

„Durchführung ergänzender Untersuchungen zu den Kalibrierversuchen an Flüssigböden“

Bericht

Bestimmung der Scherfestigkeitsparameter an ZFSV in situ

Ergänzungsuntersuchungen im Rahmen der vom Institut der Leibniz Universität Hannover (IGtH) durchgeführten Kalibrierversuche an Flüssigböden

Ausführende Stelle:

Hochschule Koblenz
Erd- und Grundbaulabor
Konrad-Zuse-Straße 1
56075 Koblenz

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Quarg-Vonscheidt
B.Eng. Timo Petry

Az.: HS16-001

Koblenz; 16.10.2017

I. Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|------|
| I. | Inhaltsverzeichnis | I |
| II. | Abbildungsverzeichnis | III |
| III. | Tabellenverzeichnis | VI |
| IV. | Symbolverzeichnis | VII |
| V. | Abkürzungsverzeichnis | VIII |
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Ausgangssituation und Zielsetzung | 3 |
| 3 | Entwicklung eines alternativen Nachweiskonzeptes..... | 4 |
| 4 | Untersuchungskonzept | 6 |
| 4.1 | Versuchstechnik | 6 |
| 4.1.1 | Modifizierte ViskoWaage..... | 6 |
| 4.1.2 | Pfahlzuggerät | 7 |
| 4.2 | Materialien und Versuchsfeld | 8 |
| 4.3 | Versuchsprogramm | 9 |
| 4.3.1 | Versuchsumfang der Universität Hannover | 9 |
| 4.3.2 | Ergänzender Versuchsumfang der Hochschule Koblenz..... | 10 |
| 5 | Ergebnisse der Untersuchung | 12 |
| 5.1 | Ergebnisse der Kalibrierversuche des IGtH | 12 |
| 5.2 | Ergebnisse der Modifizierten ViskoWaage..... | 13 |
| 5.2.1 | Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 1 | 13 |
| 5.2.2 | Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 2 | 15 |
| 5.2.3 | Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 3 | 15 |
| 5.2.4 | Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Vergleich der ZFSV | 17 |
| 5.3 | Ergebnisse des Pfahlzugversuches | 17 |
| 5.3.1 | Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 1..... | 18 |
| 5.3.2 | Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 2..... | 19 |
| 5.3.3 | Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 3..... | 20 |
| 5.3.4 | Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Pfahlzugversuch..... | 22 |
| 5.4 | Entwicklung der Scherfestigkeit im Vergleich..... | 22 |
| 5.5 | Korrelationsanalysen..... | 23 |
| 5.5.1 | Allgemein | 23 |
| 5.5.2 | Korrelation von Scherfestigkeit τ und undrainierte Kohäsion c_u | 23 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.5.3 | Korrelation von Scherfestigkeit τ und dynamischer Verformungsmodul E_{vd} | 28 |
| 5.6 | Korrelation von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und dynamischer Lastplatte | 33 |
| 6 | Fazit | 35 |
| 7 | Literaturverzeichnis..... | 36 |

II. Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Verfestigungsverlaufs (FGSV, 2012) | 5 |
| Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Modifizierten ViskoWaage | 6 |
| Abbildung 4-2: Für großmaßstäbliche Versuche verwendeten Pfahlvarianten..... | 7 |
| Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung eines Pfahlzugversuches..... | 8 |
| Abbildung 4-4: Versuchsfelder..... | 8 |
| Abbildung 4-5: Exemplarische Durchführung eines statischen Plattendruckversuches durch das IGtH | 9 |
| Abbildung 4-6. Exemplarische Durchführung des Versuches mit Modifizierter ViskoWaage | 10 |
| Abbildung 4-7: Exemplarische Durchführung des Pfahlzugversuches am eingebauten ZFSV | 11 |
| Abbildung 4-8: Anordnung der durchgeführten Pfahlzugversuche auf dem Testfeld | 11 |
| Abbildung 5-1: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 1 (FB1) . | 12 |
| Abbildung 5-2: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 2 (FB2) . | 12 |
| Abbildung 5-3: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 3 (FB3) . | 13 |
| Abbildung 5-4: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 1 (FB1)..... | 14 |
| Abbildung 5-5: Exemplarische Verankerungskörper nach Herausziehen aus dem Flüssigboden 1 – links 0 h und rechts 2 h nach Grabenverfüllung..... | 14 |
| Abbildung 5-6: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 2 (FB2)..... | 15 |
| Abbildung 5-7: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 3 (FB3)..... | 16 |
| Abbildung 5-8: Exemplarische Verankerungskörper nach Herausziehen aus dem Flüssigboden 3 – 4 h nach Grabenverfüllung..... | 16 |
| Abbildung 5-9: Vergleich der Entwicklung der Scherfestigkeit an der Fließgrenze | 17 |
| Abbildung 5-10: Exemplarische Darstellung einer oberflächennahen Störung während des Eindrehens | 18 |
| Abbildung 5-11: Exemplarische Widerstands-Hebungs-Linien für FB1 nach 7 d – links Pfahllänge 60 cm und rechts Pfahllänge 80 cm..... | 18 |
| Abbildung 5-12: Exemplarische Widerstands-Hebungs-Linien für FB2 nach 7 d – Pfahllänge 74 cm | 19 |
| Abbildung 5-13: Undrainierte Scherfestigkeit des FB2 in Abhängigkeit der Pfahllänge bzw. Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 7 d und rechts zum Zeitpunkt 14 d | 20 |
| Abbildung 5-14: Exemplarische Ausbildung eines Bruchkörpers zum Versuchszeitpunkt 7 d mit einer Pfahllänge von 33 cm..... | 20 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5-15: Undrainierte Scherfestigkeit des FB3 in Abhängigkeit der Pfahllänge bzw. Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 22 h und rechts zum Zeitpunkt 7 d | 21 |
| Abbildung 5-16: Herauszieh Widerstand des FB3 in Abhängigkeit der Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 22 h und rechts zum Zeitpunkt 7 d | 21 |
| Abbildung 5-17: Exemplarische Ausbildung eines Bruchkörpers zum Versuchszeitpunkt 7 d | 21 |
| Abbildung 5-18: Zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit der Flüssigböden 1 bis 3 | 22 |
| Abbildung 5-19: Entwicklung von τ und c_u bei einer kurzen Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 24 |
| Abbildung 5-20: Entwicklung von τ und c_u bei einer kurzen Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 25 |
| Abbildung 5-21: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1) | 25 |
| Abbildung 5-22: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 26 |
| Abbildung 5-23: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 26 |
| Abbildung 5-24: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1) | 27 |
| Abbildung 5-25: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 27 |
| Abbildung 5-26: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 28 |
| Abbildung 5-27: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer kurzen Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 29 |
| Abbildung 5-28: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer kurzen Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 29 |
| Abbildung 5-29: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1) | 30 |
| Abbildung 5-30: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 30 |
| Abbildung 5-31: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 31 |
| Abbildung 5-32: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1) | 31 |
| Abbildung 5-33: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2) | 32 |
| Abbildung 5-34: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3) | 32 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 5-35: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahllänge, FB1 | 33 |
| Abbildung 5-36: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahllänge, FB2 | 34 |
| Abbildung 5-37: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahllänge, FB3 | 34 |

III. Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 3-1: Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung für Atlaspfähle in bindigen Böden (EA-Pfähle, 2012) | 4 |
| Tabelle 5-1: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB1 | 13 |
| Tabelle 5-2: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB2 | 15 |
| Tabelle 5-3: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB3 | 15 |
| Tabelle 5-4: Übersicht der von der Pfahllänge abhängigen Korrelationsfaktoren | 28 |
| Tabelle 5-5: Übersicht der von der Pfahllänge und Material abhängigen Korrelationsfaktoren | 32 |

IV. Symbolverzeichnis

| | | |
|-----------|----------------------|---|
| A_{si} | [m ²] | Mantelfläche |
| c | [kPa] | Kohäsion |
| c_u | [kPa] | undrainierte Kohäsion |
| E_{v1} | [MPa] | Verformungsmodul der Erstbelastung |
| E_{v2} | [MPa] | Verformungsmodul der Zweitbelastung |
| E_{vd} | [MPa] | dynamischer Verformungsmodul |
| F_a | [N], [kN] | Herauszieh Widerstand des Zugpfahles |
| L | [m], [cm] | Pfahllänge |
| m | [g] | Masse |
| $q_{s,k}$ | [kN/m ²] | charakteristischer Bruchwert der Pfahlmantelreibung |
| q_u | [kN/m ²] | einaxiale Druckfestigkeit |
| t | [h] | Zeit |
| u | [mm], [m] | Pfahlkopfhebung |
| α | [-] | Faktor zur Festlegung der negativen Mantelreibung für bindige Böden |
| τ | [kPa] | Scherfestigkeit |
| τ_f | [kPa] | Scherfestigkeit an der Fließgrenze |
| τ_n | [kN/m ²] | negative Mantelreibung |
| τ_u | [kPa] | undrainierte Scherfestigkeit an der Fließgrenze |

V. Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------|---|
| BTB | Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. |
| DGGT | Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e.V. |
| EA-Pfähle | Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ |
| EC | Eurocode |
| EN | Europäische Norm |
| FB | Flüssigboden |
| FGSV | Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen |
| FID 90 | Fischer-Dübel mit Länge in mm |
| IGtH | Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover |
| ISO | International Organization for Standardization |
| M.-% | Massenprozent |
| NA | Nationaler Anhang |
| WHL | Widerstands-Hebungs-Linie |
| WSL | Widerstands-Setzungs-Linie |
| ZFSV | Zeitweise fließfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoff |

1 Einleitung

Der vorliegende Bericht dokumentiert Ausführung und Ergebnisse ergänzender Untersuchungen der Hochschule Koblenz im Rahmen der vom Institut für Geotechnik der Leibniz Universität Hannover (IGtH) durchgeführten Kalibrierversuche an Flüssigböden. Das Projekt „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ wird im Auftrag des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) bearbeitet. Im Rahmen der ergänzenden Untersuchungen wird der Auszieh Widerstand von Verankerungskörpern in zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen, auch als ZFSV oder Flüssigboden bezeichnet, ermittelt. Aus den Ergebnissen der In-Situ-Versuche werden anschließend die Scherfestigkeitsparameter der untersuchten ZFSV und ihre zeitliche Entwicklung bestimmt.

Um die zeitabhängige Scherfestigkeitsentwicklung untersuchen zu können, werden Messungen am Verfüllmaterial sowohl im fließfähigen als auch im erhärtenden Zustand durchgeführt.

Die untersuchten Suspensionen zeigen im fließfähigen Zustand ein plastisches Verhalten ähnlich wie Feststoffe, das sich durch Vorhandensein einer Fließgrenze auszeichnet. Überschreitet die Scherbeanspruchung die Fließgrenze verformt sich das Material irreversibel und es beginnt zu fließen. Stoffe ohne Fließgrenze zeigen ein viskoses Verhalten.




Kennzeichnend für die ZFSV ist die zeitabhängige Entwicklung der Fließgrenze, die schließlich den Übergang vom Flüssigkeits- zum Feststoffverhalten bewirkt.

Um den Verlauf der Verfestigung zu dokumentieren, wird die zeitlich veränderliche Fließgrenze unmittelbar nach Anlieferung der ZFSV (Zeitpunkt: 0 h) sowie innerhalb der ersten vier Stunden nach Einbau in den Graben mittels der Modifizierten ViskoWaage ermittelt. Hierbei wird ein kleinmaßstäblicher Verankerungskörper in Form eines Einschraubdübels in einen Probekörper eingebracht, der während des Einfüllvorgangs gewonnen wird. Anschließend wird an dem Dübel der Auszieh Widerstand gemessen.

Mit zunehmendem Alter entwickeln ZFSV Feststoffeigenschaften und nach etwa vier Stunden werden die Materialuntersuchungen zur Bestimmung der Scherfestigkeit direkt im Versuchsgraben mittels großmaßstäblicher Schraubpfähle durchgeführt, da der Messbereich der ViskoWaage überschritten ist.

Die gesamtheitliche Auswertung der Versuche erfolgt anschließend unter Einbezug der Ergebnisse der Prüfungen des IGtH im Sinne einer Ergänzung der eigentlichen Kalibrierversuche.

Für die Untersuchungen werden zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe der Firmen HeidelbergCement AG, Dyckerhoff GmbH und Holcim (Deutschland) GmbH zur Verfügung gestellt. Im Folgenden werden die Materialien ohne explizite Herstellerzuordnung als Flüssigboden 1 (FB1), Flüssigboden 2 (FB2) und Flüssigboden 3 (FB3) bezeichnet. Die Materialien werden im Rahmen der Ausarbeitung wie folgt dargestellt:

- Flüssigboden 1 
- Flüssigboden 2 
- Flüssigboden 3 

Die dem vorliegenden Bericht zugrunde gelegten Messungen werden parallel zu den Versuchen des IGtH in einem Zeitraum vom 04. bis zum 25. Oktober 2016 auf einem Versuchsgelände durchgeführt, welches von der Firma Holcim GmbH in 31319 Höver bereitgestellt wird.

2 Ausgangssituation und Zielsetzung

Im Straßenbau hat sich zur Beurteilung der Tragfähigkeit des Planums und zur Kontrolle der Bodenverdichtung der Lastplattendruckversuch nach DIN 18134 etabliert. Nach ZTV E-StB (FGSV, 2009) gilt als Mindestanforderung an das Planum von Verkehrsflächen ein Verformungsmodul E_{v2} von 45 MN/m^2 , gleichzeitig ist das zulässige Verhältnis von Erst- und Wiederbelastung (E_{v1} zu E_{v2}) auf einen Höchstwert von 2,6 beschränkt.

Bei Verwendung von ZFSV ist die Untersuchungsmethode der statischen Lastplatte nur mit Einschränkungen anwendbar. Besonders zu berücksichtigen ist das ausgeprägt zeitabhängige Materialverhalten dieser Baustoffe. Während bei konventionellen Grabenverfüllungen das Planum bereits unmittelbar nach der Verdichtung seine endgültige Festigkeit erreicht, befinden sich die ZFSV noch einige Zeit nach dem Einbau im Übergangsbereich zwischen Flüssigkeit und Feststoff. Eine zutreffende Beurteilung des Materials zeitnah nach dem Einbau kann in den meisten Fällen daher nur über eine Kontrolle der anfänglichen Entwicklung und eine Prognose der weiteren Festigkeitszunahme erfolgen.

Das IGtH hat bereits im Jahr 2014 begonnen, Untersuchungen durchzuführen, um in situ bestimmbare Bodenkenngrößen mit dem E_{v2} -Wert zu korrelieren. Mit dem aktuellen Forschungsprojekt werden diese Untersuchungen ergänzt und insbesondere statische und dynamische Lastplattendruckversuche in Probegräben durchgeführt. Zusätzlich wird im bodenmechanischen Laborversuchen an der Universität Hannover die zeitliche Entwicklung der Festigkeitseigenschaften der eingesetzten Materialien untersucht. Zu diesem Zweck werden in direkten Scherversuchen die Parameter ϕ' (Winkel der inneren Reibung) und c' (Kohäsion) sowie die undrainierte Scherfestigkeit c_u in einaxialen Zylinderdruckprüfungen und die Druckfestigkeit q_u an Mörtelprismen untersucht.

Die Hochschule Koblenz führt als Ergänzungsuntersuchungen hierzu Feldversuche zum Auszieh Widerstand an Verankerungskörpern durch, mit deren Hilfe die Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f der ZFSV im Einbauzustand und im verfestigten Zustand bestimmt werden können. Die Werte der Fließgrenze des festen Materials können direkt mit den Werten der undrainierten Scherfestigkeit τ_u aus den einaxialen Druckversuchen im Geotechnischen Labor der Universität Hannover verglichen werden.

Anschließend soll gezeigt werden, dass sich die vor Ort an den Zugpfählen gemessenen Scherfestigkeiten ebenfalls mit den Ergebnissen der dynamischen Lastplattendruckversuche korrelieren lassen und hierdurch eine weitgehend vereinfachte Kontrolle der Festigkeitsentwicklung des eingebauten ZFSV möglich ist.

3 Entwicklung eines alternativen Nachweiskonzeptes

Die Eignung des statischen Lastplattendruckversuchs zur Ermittlung des E_{v2} -Wertes an weichen bindigen Böden und Böden, die mit Bindemitteln verfestigt sind, wird in der Literatur kritisch diskutiert (vgl. Kuntsch, 2016) und ist hinsichtlich der Anwendbarkeit bei ZFSV ebenfalls zu hinterfragen.

Als Grundlage für die Diskussion eines alternativen Nachweiskonzeptes der Tragfähigkeit des Planums wird die Festigkeitsentwicklung der ZFSV in situ an Zugpfahlversuchen gemessen und unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Kalibrierversuche ausgewertet.

Die Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeit aus den Werten der gemessenen Pfahlmantelreibung erfolgt in Anlehnung an die Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (EAP) der DGGT (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V.) in denen an mehreren Stellen die direkte Proportionalität beider Parameter beschrieben wird.

In Tabelle 3-1 sind die Erfahrungswerte der DGGT für die Korrelation der charakteristischen Pfahlmantelreibung und der Scherfestigkeit des undrainierten Bodens (hier als undrainierte Kohäsion c_u bezeichnet) für Schraubpfähle mit Vollverdrängung (Atlaspfähle) wiedergegeben.

Tabelle 3-1: Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung für Atlaspfähle in bindigen Böden (EA-Pfähle, 2012)

| Scherfestigkeit $c_{u,k}$ des undrainierten Bodens in kN/m^2 | Bruchwert $q_{s,k}$ der Pfahlmantelreibung in kN/m^2 |
|--|--|
| 60 | 40-60 |
| 150 | 75-95 |
| ≥ 250 | 95-120 |

Zwischenwerte dürfen geradlinig interpoliert werden.
Pfahlmantelfläche A_{si} : Bezogen auf äußeren Wendeldurchmesser D_s .

Ein Ansatz der EA-Pfähle zur Ableitung der negativen Mantelreibung τ_n beruht ebenfalls auf dem Wert der Scherfestigkeit des undrainierten Bodens (Gl. 3.1).

$$\tau_n = \alpha \cdot c_u \quad (3.1)$$

τ_n negative Mantelreibung [kN/m^2]

α Faktor zur Festlegung der negativen Mantelreibung für bindige Böden [-]

c_u Wert der Scherfestigkeit des undrainierten Bodens [kN/m^2]

Der Faktor α liegt je nach Bodenart und Pfahltyp zwischen 0,15 und 1,60, wobei generell für einen bindigen Boden $\alpha = 1$ empfohlen wird (EA-Pfähle, 2007).

Über die in situ durchgeführten Zugpfahlversuche kann somit die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bzw. der einaxialen Druckfestigkeit ermittelt werden, die gemäß den Empfehlungen der FGSV im Hinweisblatt für ZFSV (H ZFSV der FGSV, 2012) auch als Kriterium zur Beurteilung der Wiederaushubfähigkeit des Füllmaterials im Endzustand dient.

Als Anhaltswerte für die Zuordnung in die drei Klassen der Wiederaushubfähigkeit werden Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen sowie der prinzipielle Verfestigungsverlauf angegeben. Bei leichter Wiederaushubfähigkeit dürfen die Festigkeitswerte $0,3 \text{ N/mm}^2$ nicht

3. Entwicklung eines alternativen Nachweiskonzeptes

überschreiten. Bei mittlerer Wiederaushubfähigkeit darf die Druckfestigkeit zwischen 0,3 N/mm² und 0,8 N/mm² betragen. Alles darüber hinaus ist der Klasse „schwer wieder-aushubfähig“ zuzuordnen. Außerdem ist für die Klassifizierung der Festigkeitszuwachs ab dem 7ten Tag maßgebend. Der Verfestigungsverlauf und die Bereiche der drei Klassen sind in folgender Abbildung 3-1 dargestellt.

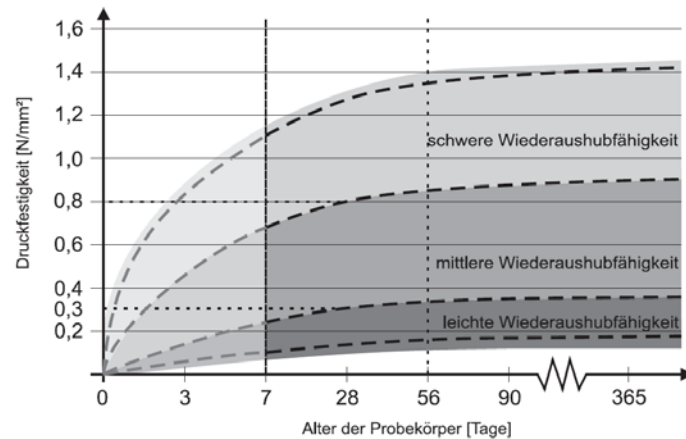


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des Verfestigungsverlaufs (FGSV, 2012)

Analog hierzu ermöglicht die Kenntnis des Verfestigungsverlaufs im frühen Alter der ZFSV auch die Einschätzung, wann eine ausreichende Tragfähigkeit einer Grabenverfüllung in diesem Zeitraum erreicht wird.

Abgesehen von Belastungen durch die Bautätigkeit muss der Flüssigboden die Festigkeitsanforderungen an ein Planum erst bei Inbetriebnahme des Verkehrsweges erfüllen. Hinsichtlich eines ungestörten Baufortschritts sind längere Wartezeiten für direkte Abnahmeprüfungen nur in Ausnahmefällen akzeptabel.

Ein alternatives Nachweiskonzept könnte auf dem Vergleich der am eingebauten Material im jungen Alter gemessenen Festigkeitsentwicklung mit dem Festigkeitsverlauf im Rahmen der Eignungsprüfung beruhen. Liegen die vor Ort ermittelten Messwerte zum entsprechenden Zeitpunkt auf der erwarteten Entwicklungskurve, kann von einem konformen Material mit ungestörter Festigkeitsentwicklung ausgegangen werden. Der Zeitpunkt zu dem eine geforderte Tragfähigkeit erreicht wird, kann in diesem Fall anhand der Vergleichswerte der Eignungsprüfung bestimmt werden.

Führt man Eigenüberwachungs- oder Kontrollprüfungen mittels Ausziehversuchen durch, so müssen Scherfestigkeit τ und die undrainierte Kohäsion c_u über einen entsprechenden Korrelationsfaktor miteinander verbunden sein. Für flächenhafte Kontrollen wäre es außerdem vorteilhaft, den relativ einfachen dynamischen Plattendruckversuch zu verwenden und diesen anhand eines Pfahlzugversuches zu kalibrieren. Die Möglichkeiten einer solchen Korrelation werden im Rahmen der Versuche ebenfalls untersucht.

Die undrainierte Kohäsion bzw. Scherfestigkeit c_u lässt sich direkt aus der einaxialen Druckfestigkeit q_u ableiten (Gl. 3.2).

$$q_u \approx 2 \cdot c_u \quad (3.2)$$

q_u einaxiale Druckfestigkeit [kN/m²]
 c_u undrainierte Kohäsion [kN/m²]

4 Untersuchungskonzept

4.1 Versuchstechnik

4.1.1 Modifizierte ViskoWaage

Die Modifizierte ViskoWaage (Abbildung 4-1) wird zur Bestimmung der Scherfestigkeit an der Fließgrenze von fließfähigen Baustoffen genutzt, welche aus dem Ausziehwiderstand eines Einschraubdübels als Verankerungskörper ermittelt wird.

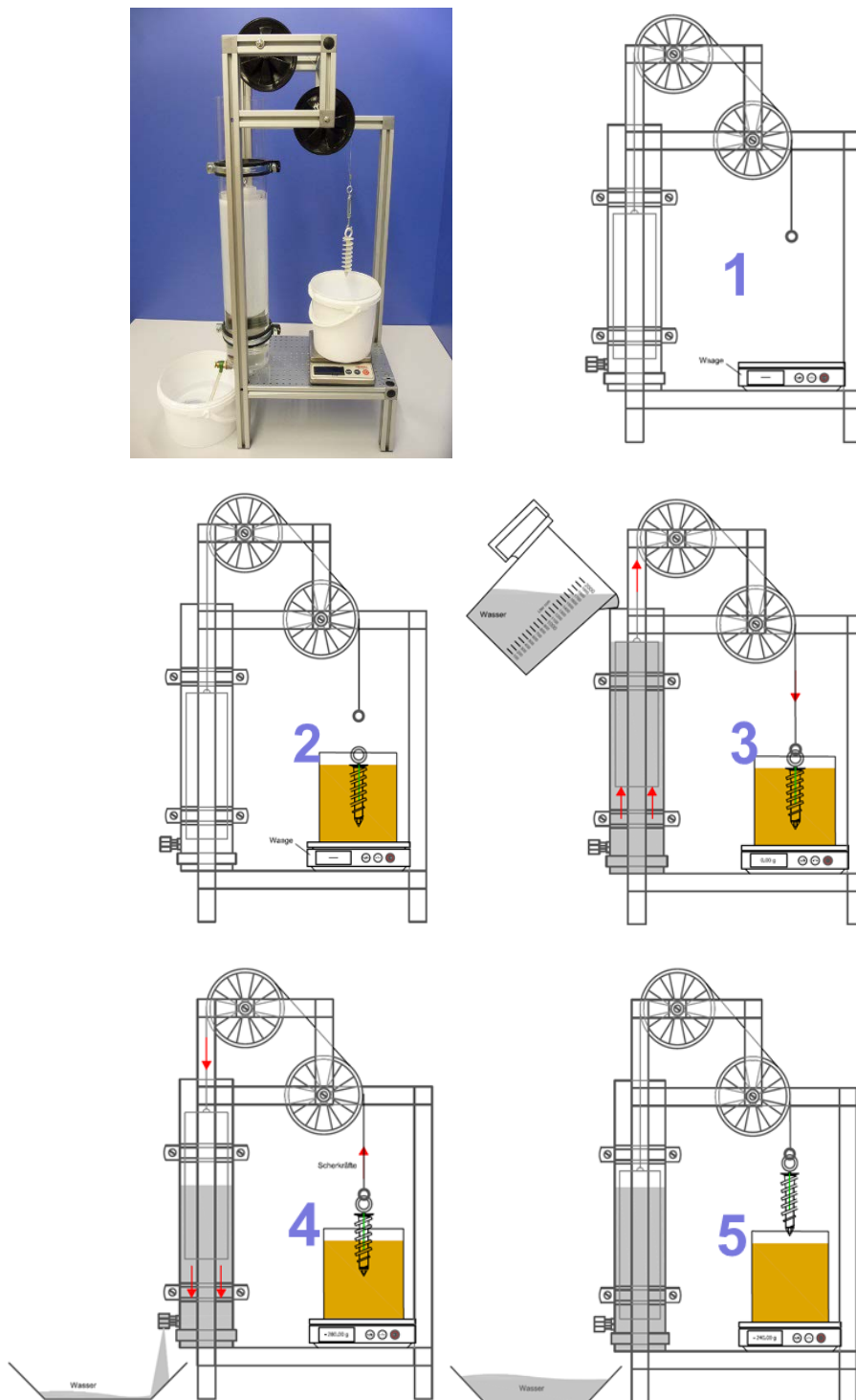


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung der Funktionsweise der Modifizierten ViskoWaage

4. Untersuchungskonzept

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wird ein Verankerungskörper, in diesem Fall ein Kunststoffdübel mit einer Gesamtlänge von 90 mm, in das gewonnene Probenmaterial eingeschraubt. Daraufhin wird der Verankerungskörper bei gleichmäßiger Laststeigerung auf Herausziehen beansprucht und der maximale Ausziehwiderstand gemessen. An Rückstellproben lässt sich hieraus zu verschiedenen Zeitpunkten nach Einbau bzw. Beginn der Grabenverfüllung die Scherfestigkeit des eingebauten Materials bestimmen.

Der Versuch mittels Modifizierter ViskoWaage, welcher an Probekörpern des noch fließfähigen Materials durchgeführt wird, entspricht prinzipiell dem Pfahlzugversuch in einer Kleinmaßstäblichen Ausführung.

4.1.2 Pfahlzuggerät

Die großmaßstäblichen Versuche zur Ermittlung des Ausziehwiderstandes von Verankerungskörpern erfolgen im Gegensatz zur Durchführung mit der Modifizierten ViskoWaage direkt im Versuchsfeld, d.h. am eingebauten Verfüllmaterial. Hierzu werden Pfähle unterschiedlicher Längen, alternativ mit und ohne Wendel verwendet (Abbildung 4-2). Der Pfahlzugversuch kann durchgeführt werden, sobald der ZFSV für ein Betreten ausreichend tragfähig ist. Dieser Zeitpunkt ist sowohl material- als auch witterungsabhängig und kann somit nicht pauschal angegeben werden.

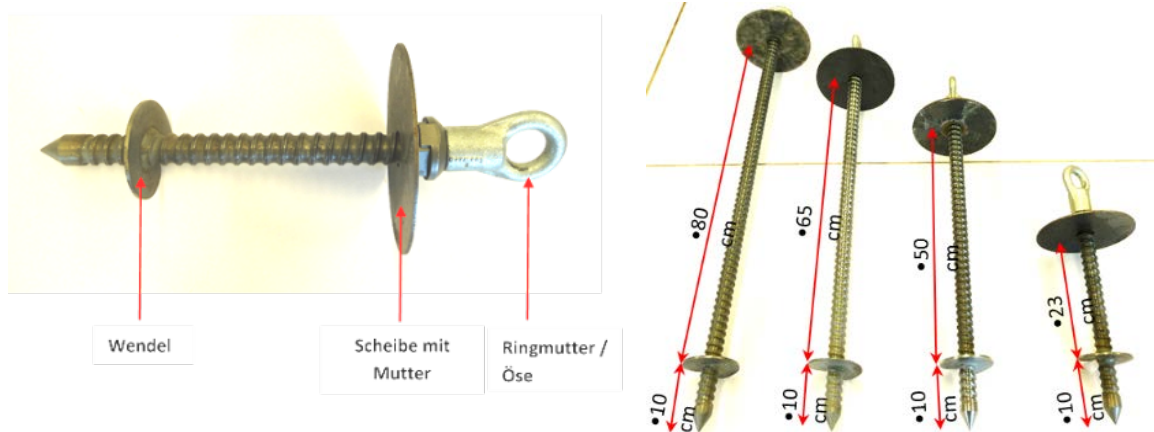


Abbildung 4-2: Für großmaßstäbliche Versuche verwendete Pfahlvarianten

Um einen Pfahl möglichst störungsfrei in den Boden einzubringen, wird dieser unabhängig von seiner Länge unter Zuhilfenahme eines Kraftschraubers kontrolliert in den ZFSV eingedreht, bis der obere Scheibenteller bündig am Boden aufliegt (Abbildung 4-3). Das Pfahlzuggerät wird anschließend mittig über der Öse positioniert und mittels Einhakvorrichtung mit dem Pfahl verbunden. Mit Hilfe einer hydraulischen Presse wird der Pfahl gleichmäßig auf Herausziehen belastet und die Werte der Kraft- sowie Hebungsmessung aufgezeichnet. Hieraus lässt sich anschließend die undrainierte Scherfestigkeit τ_u des sich verfestigenden Materials zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmen.



Abbildung 4-3: Exemplarische Darstellung eines Pfahlzugversuches

4.2 Materialien und Versuchsfeld

Gegenstand der Untersuchungen sind ZFSV-Mischungen von drei unterschiedlichen Herstellern, welche nachfolgend als Flüssigböden 1 bis 3 (FB 1 bis 3) bezeichnet werden. Die Mischungen bestehen generell aus Wasser, Zement, Compound sowie Sand und werden jeweils in einer ortsfesten Mischanlage hergestellt und mittels Fahrmixer zum Versuchsgelände transportiert.

Auf dem Betriebsgelände der Firma Holcim GmbH in Höver wurden im Vorfeld drei Versuchsfelder angelegt (Abbildung 4-4), die zeitlich aufeinander abgestimmt jeweils mit den Flüssigböden 1 bis 3 befüllt werden. Die Testgräben weisen eine Länge von etwa 14 m und eine Breite von etwa 3 m auf, die Grabensohle liegt ca. 0,8 m unterhalb der Geländeoberkante. Der örtlich anstehende Boden kann augenscheinlich als gemischtkörniger Boden mit hohem Feinkornanteil und erwartungsgemäß geringem Wasserdurchlässigkeitsvermögen beschrieben werden.



Abbildung 4-4: Versuchsfelder

4.3 Versuchsprogramm

4.3.1 Versuchsumfang der Universität Hannover

Das IGtH der Universität Hannover führt an den drei zu untersuchenden ZFSV sowohl Feld- als auch Laborversuche durch. Im Feld erfolgen über einen Zeitraum von 28 Tagen statische und dynamische Lastplattendruckversuche zu jeweils definierten Zeitpunkten (Abbildung 4-5).

Im Rahmen von direkten Scherversuchen und Prüfungen der einaxialen Druckfestigkeit werden im bodenmechanischen Labor der Universität Hannover die Scherparameter ϕ' (Winkel der inneren Reibung) und c' (Kohäsion) sowie die undrainierte Scherfestigkeit bzw. Kohäsion c_u ermittelt, um Aussagen zur Festigkeitsentwicklung der jeweiligen Verfüllbaustoffe treffen zu können.

Die Ergebnisse der sogenannten Kalibrierversuche an Flüssigböden bilden die Datenbasis für die Erarbeitung einer speziell auf den fließfähigen Verfüllbaustoff abgestimmten Korrelation des statischen mit dem dynamischen Lastplattendruckversuch. Für den Nachweis einer ausreichenden Tragfähigkeit wird im Verkehrswegebau aufgrund zeitlicher und somit wirtschaftlicher Vorteile der dynamische Lastplattendruckversuch (Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd}) zugelassen, welcher in der Regel an einem statischen Lastplattendruckversuch (Ermittlung des Verformungsmoduls der Erstbelastung E_{v1} und der Wiederbelastung E_{v2}) kalibriert wird. Eine Zuordnung von statischer und dynamischer Lastplatte zum Verdichtungsgrad D_{Pr} wird in der ZTV E-StB für grobkörnige Böden angegeben. Für ZFSV existieren jedoch keine Angaben.

Analog der konventionellen Grabenverfüllung wird auch bei fließfähigen Verfüllbaustoffen, ein Nachweis der Verformbarkeit und Tragfähigkeit des eingebauten Materials gefordert. In diesem Zusammenhang bestehen seitens des IGtH die Bestrebungen, eine Beziehung zwischen statischem und dynamischem Lastplattendruckversuch an ZFSV aufzuzeigen.

Das detaillierte Versuchsprogramm einschließlich der Untersuchungsergebnisse ist eingehend im Abschlussbericht des IGtH beschrieben und wird an dieser Stelle nicht näher erläutert. Auf eine Auswahl der Ergebnisse dieser Feld- und Laboruntersuchungen wird in den nachfolgenden Kapiteln Bezug genommen, um sie im Zusammenhang mit den eigenen Messwerten zu analysieren.



Abbildung 4-5: Exemplarische Durchführung eines statischen Lastplattendruckversuches durch das IGtH

4.3.2 Umfang der ergänzenden Versuche der Hochschule Koblenz

Durch die Hochschule Koblenz werden ergänzend zu dem Versuchsprogramm des IGtH Felduntersuchungen durchgeführt, welche eine Ermittlung des Ausziehwiderstandes an klein- und großmaßstäblichen Verankerungskörpern zu verschiedenen Zeitpunkten umfassen.

Unmittelbar nach Anlieferung der jeweiligen Flüssigböden wird mit der Modifizierten Visko-Waage die Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f bestimmt (Abbildung 4-6). Die Prüfung an dem noch fließfähigen Material erfolgt planmäßig in einem Zeitraum von 0 bis 4 Stunden nach Einbau, wobei der Zeitpunkt 0 Stunden den Beginn der Grabenverfüllung kennzeichnet.



Abbildung 4-6. Exemplarische Durchführung des Versuches mit Modifizierter ViskoWaage

Die Pfahlzugversuche (Abbildung 4-7) werden für das Projekt ab der 18ten Stunde bis zum 14ten Tag nach Beginn der Grabenverfüllung durchgeführt und schließen somit an die Versuche mittels Modifizierter ViskoWaage an, so dass eine große Bandbreite der Messwerte zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung zur Verfügung steht. Innerhalb dieses zeitlichen Fensters können die expliziten Zeitpunkte der Einzelversuche mit dem Pfahlzuggerät bedingt durch die absoluten Einbauzeitpunkt der ZFSV variieren.



Abbildung 4-7: Exemplarische Durchführung des Pfahlzugversuches am eingebauten ZFSV

Unter Berücksichtigung der Feldmessungen des IGtH werden die Pfähle im Versuchsfeld so platziert, dass sich diese weder gegenseitig beeinflussen noch im Einflussbereich der statischen und dynamischen Plattendruckversuche liegen. Abbildung 4-8 verdeutlicht die Anordnung der durchgeführten Pfahlzugversuche an den jeweiligen Flüssigböden 1 bis 3. Die in Abbildung 4-7 erkennbaren Markierungen in einem Testfeld sind den vorgesehenen Einteilungen der statischen und dynamischen Druckversuche zuzuordnen. Nach deren Durchführung erfolgt anschließend im gleichen Zeitrahmen, der jeweilige Pfahlzugversuch.

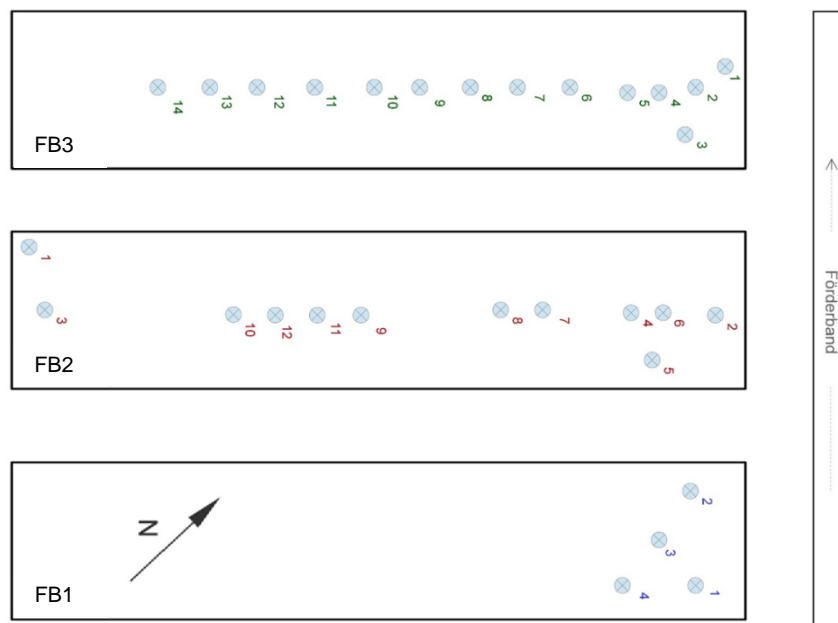


Abbildung 4-8: Anordnung der durchgeführten Pfahlzugversuche auf dem Testfeld

5 Ergebnisse der Untersuchung

5.1 Ergebnisse der Kalibrierversuche des IGtH

Für die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführte Auswertung der eigenen ergänzenden Untersuchungen wird auf eine Auswahl von Ergebnissen der Untersuchungen des IGtH zur undrainierten Kohäsion c_u und zum dynamischen Verformungsmodul E_{vd} Bezug genommen.

Die für spätere Vergleiche relevanten Messwerte der zeitabhängigen undrainierten Kohäsion bzw. Scherfestigkeit der drei Flüssigböden werden wie in den Abbildungen 5-1 bis 5-3 grafisch dargestellt, u.a. mit einer logarithmischen Skalierung der Ordinatenachse, aufbereitet.

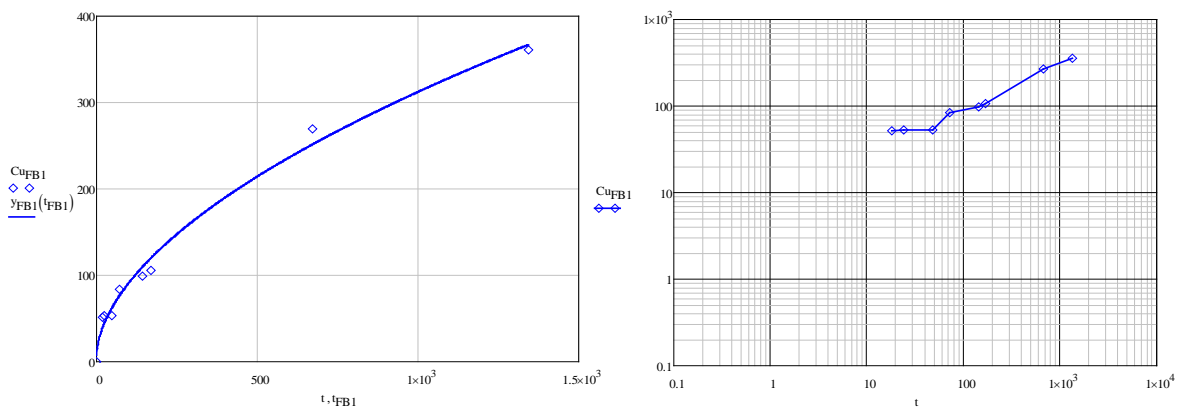


Abbildung 5-1: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 1 (FB1)

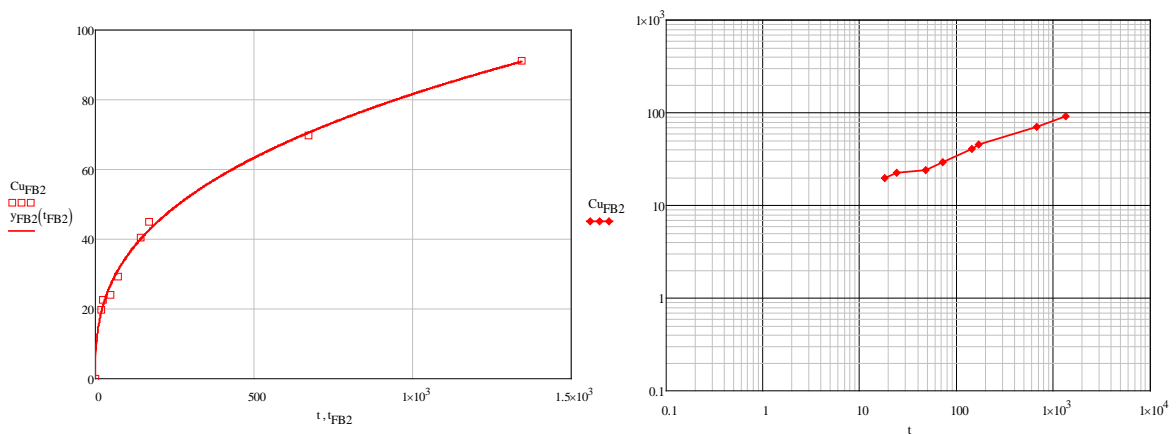


Abbildung 5-2: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 2 (FB2)

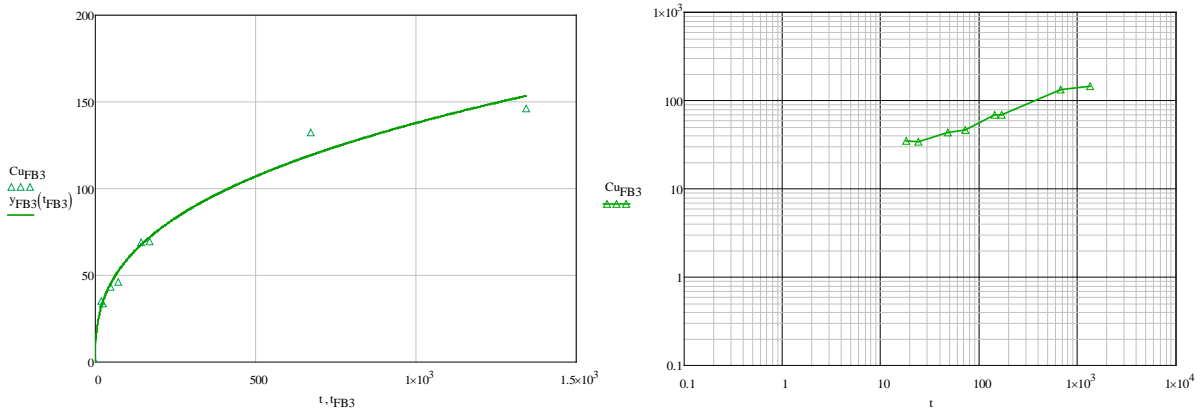


Abbildung 5-3: Darstellung der undrainierten Scherfestigkeit von Flüssigboden 3 (FB3)

5.2 Ergebnisse der Modifizierten ViskoWaage

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den kleinmaßstäblichen Untersuchungen am fließfähigen Verfüllmaterial zusammengefasst und erläutert. Im Zuge der Ergebnisdarstellung werden auch ggf. relevante Beobachtungen und Besonderheiten beschrieben. Hierbei wird sich allerdings in der Regel auf exemplarische Darstellungen zur Verdeutlichung beschränkt.

Die Scherfestigkeit an der Fließgrenze wird planmäßig zu den Zeitpunkten 0 h, 2 h und 4 h nach Einbau bzw. nach Beginn der Grabenverfüllung bestimmt. Hierbei ist zu beachten, dass die mittels Fahrnischer aus der zentralen Mischanlage angelieferten ZFSV aufgrund unvorhersehbarer Verkehrsstörungen und der dadurch differierenden Fahrtzeit ggf. ein auf den Zeitpunkt der Befüllung des Mischfahrzeuges bezogenes unterschiedliches Materialalter aufweisen können.

5.2.1 Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 1

In Tabelle 5-1 sind die Messwerte der Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f in Abhängigkeit der Zeit zusammengefasst. Bei Einbau (Zeitpunkt 0 h) weichen die ersten zwei Messungen stark voneinander ab, so dass ein dritter Versuch zur Verifizierung durchgeführt wird. Die Ergebnisse deuten auf eine Entmischung des Materials (FB1) hin, welche aufgrund der entstehenden Inhomogenität eine Streuung der Messwerte bewirkt. Diese Feststellung deckt sich mit den Beobachtungen vor Ort. Die Instabilität des angelieferten Materials bewirkt eine ungleichmäßige Verteilung von Fein- und Grobanteilen im Probekörper, so dass trotz augenscheinlich geringer Fließfähigkeit beim Einbau verhältnismäßig geringe Scherfestigkeiten gemessen werden.

Tabelle 5-1: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB1

| Zeit t [h] | Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f [kPa] | Mittelwert τ_f [kPa] |
|------------|---|---------------------------|
| 0 | 0,3509 | 0,2622 |
| 0 | 0,1809 | |
| 0 | 0,2548 | |
| 2 | 0,6386 | 0,6386 |

5. Ergebnisse der Untersuchung

Der Zeitpunkt 4 h nach Verfüllung des Flüssigbodens 1 kann nicht untersucht werden, da der hierfür vorgesehene Probenkörper außerplanmäßig für den Zeitpunkt 0 h verwendet wird, um das frische Material im Einbauzustand näher beschreiben zu können.

In der nachfolgenden Abbildung 5-4 sind die aus der Messung der Herausziehwiderstand ermittelten Werte der Scherfestigkeitsentwicklung von Flüssigboden 1 grafisch aufgetragen.

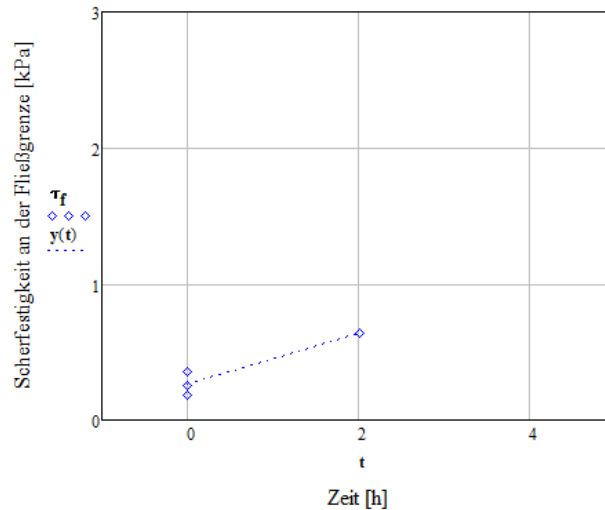


Abbildung 5-4: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 1 (FB1)

Die Abbildung 5-5 zeigt exemplarisch einen Verankerungskörper nach Abschluss des Versuches mit der Modifizierten ViskoWaage am Flüssigboden 1 zu den Zeitpunkten 0 h und 2 h nach Verfüllung des Grabens. Das Material ist zu diesen Zeitpunkten noch fließfähig und nicht begehbar.



Abbildung 5-5: Exemplarische Verankerungskörper nach Herausziehen aus dem Flüssigboden 1 – links 0 h und rechts 2 h nach Grabenverfüllung

5.2.2 Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 2

Der Flüssigboden 2 kann zu allen drei vorgesehenen Zeitpunkten beprobt werden. Die ermittelten Werte für die Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f sind in Tabelle 5-2 aufgeführt und in Abbildung 5-6 in Abhängigkeit der Versuchszeitpunkte grafisch aufgetragen.

Die Scherfestigkeitsentwicklung folgt im betrachteten Zeitraum von 0 h bis 4 h einem linearen Verlauf. Die Messwerte sowie die Beobachtungen vor Ort weisen insgesamt auf ein homogenes und stabiles Verfüllmaterial hin.

Tabelle 5-2: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB2

| Zeit t [h] | Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f [kPa] | Mittelwert τ_f [kPa] |
|------------|---|---------------------------|
| 0 | 0,4270 | 0,4176 |
| 0 | 0,4082 | |
| 2 | 0,8636 | 0,8636 |
| 4 | 1,2972 | 1,2972 |

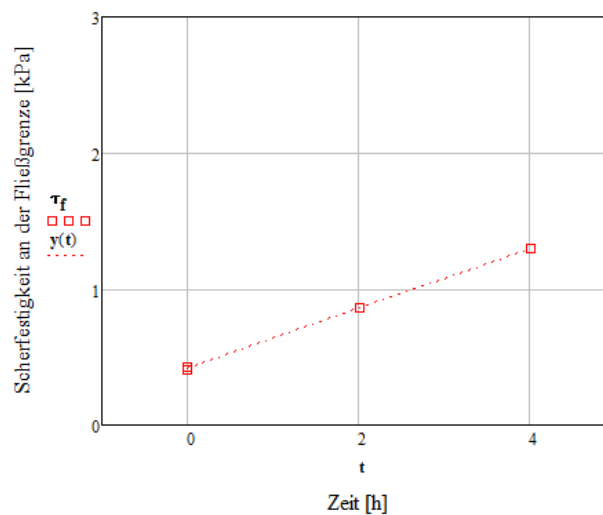


Abbildung 5-6: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 2 (FB2)

5.2.3 Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Flüssigboden 3

Für die Untersuchungen mittels der Modifizierten ViskoWaage an Flüssigboden 3 werden für jeden Zeitpunkt insgesamt zwei Messungen durchgeführt, um bei der weiteren Auswertung einen möglichen Streubereich berücksichtigen zu können. In der Tabelle 5-3 sind die Werte der Scherfestigkeit zusammengefasst.

Tabelle 5-3: Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f für FB3

| Zeit t [h] | Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f [kPa] | Mittelwert τ_f [kPa] |
|------------|---|---------------------------|
| 0 | 0,4119 | 0,4469 |
| 0 | 0,4818 | |
| 2 | 1,1418 | 1,1889 |
| 2 | 1,2360 | |
| 4 | 2,1245 | 2,4604 |
| 4 | 2,7962 | |

5. Ergebnisse der Untersuchung

Die nachfolgende Abbildung 5-7 stellt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit an der Fließgrenze des Flüssigbodens 3 grafisch dar. Innerhalb des Versuchszeitraumes von 0 h bis 4 h nimmt der Scherfestigkeitswert im Vergleich zu den anderen beiden Verfüllmaterialien stark zu. Die ermittelten Werte lassen auf einen überlinearen Anstieg der Festigkeit über die Zeit schließen.

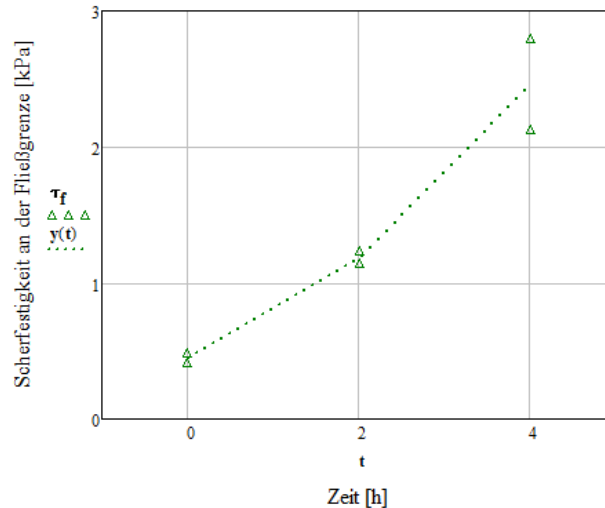


Abbildung 5-7: Scherfestigkeit an der Fließgrenze von Flüssigboden 3 (FB3)

Bei gleichmäßiger Laststeigerung im Herausziehversuch zeigen sich ab dem Zeitpunkt 2 h radial um den Verankerungskörper auftretende Risse. Diese Radialrisse sind exemplarisch in Abbildung 5-8 (links) 4 h nach Verfüllung des Grabens dargestellt. Ebenso können im oberflächennahen Bereich des Probekörpers nach dem Herausziehen des Verankerungskörpers ausgebrochene Schollen festgestellt werden (rechts in Abbildung 5-8). An den Ausbruchkörpern ist die fortschreitende Festigkeitsentwicklung des Materials zu erkennen. Der Boden ist nicht mehr durch seine Fließfähigkeit charakterisiert, sondern weist das plastische Verhalten eines Feststoffes auf.



Abbildung 5-8: Exemplarische Verankerungskörper nach Herausziehen aus dem Flüssigboden 3 – 4 h nach Grabenverfüllung

5.2.4 Scherfestigkeit an der Fließgrenze – Vergleich der ZFSV

Das nachfolgende Diagramm (Abbildung 5-9) zeigt eine Gegenüberstellung der Scherfestigkeitsentwicklung der Flüssigböden 1 bis 3. Als Grundlage der Darstellung dienen die gebildeten Mittelwerte der Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f .

Alle drei Materialien weisen zum Zeitpunkt der Grabenverfüllung fließfähige Eigenschaften auf, wobei die Werte für die Scherfestigkeit in einem eng begrenzten Bereich zueinander liegen. Die Festigkeitsentwicklung des FB3 nimmt auf den Betrachtungszeitraum von 4 h bezogen im Gegensatz zum annähernd linearen Verlauf des FB2 überproportional zu. Die Ergebnisse des FB1 lassen in dieser Hinsicht aufgrund des Fehlens der Messwerte für den Zeitpunkt 4 h keine eindeutigen Aussagen zu.

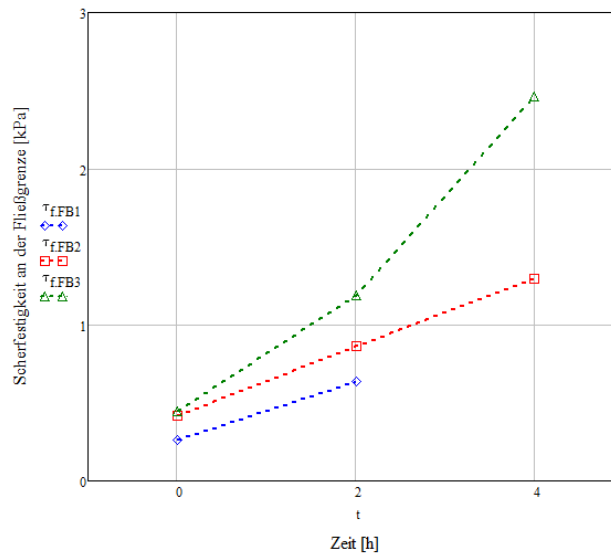


Abbildung 5-9: Vergleich der Entwicklung der Scherfestigkeit an der Fließgrenze

5.3 Ergebnisse des Pfahlzugversuches

Die Messung der Scherfestigkeitsentwicklung, welche für den Zeitraum von 0 bis 4 Stunden mit der Modifizierten ViskoWaage erfolgt, wird anschließend - mit zunehmendem Alter des ZFSV - über die Ermittlung des Herausziehwidestands von Zugpfählen fortgesetzt. Die nummerierte Anordnung der Pfähle im jeweiligen Versuchsfeld der Flüssigböden 1 bis 3 kann den vorhergehenden Kapiteln oder dem Anhang 2 entnommen werden.

Details zum jeweiligen Zugversuch, wie z.B. die Pfahlart, die kraftübertragende Länge oder Bemerkungen zum Einbau werden in Formblättern notiert. Diese stehen auszugsweise im Anhang 3 zur Verfügung. Die angegebenen Versuchszeitpunkte beziehen sich analog zu der Prüfung mit der Modifizierten ViskoWaage auf den Zeitpunkt der Grabenverfüllung. Anhang 4 und 5, welche eine detaillierte Aufstellung der Herausziehwidestände und weitere Messwerte beinhalten, komplettieren eine übersichtliche Zusammenfassung der gesamten Versuchsergebnisse.

5.3.1 Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 1

Aufgrund einer unerwartet hohen Festigkeit des Materials bereits 18 h nach dem Einbau, ist das vorgesehene Eindrehen eines Pfahls mit Wendel nicht mehr ohne Störung des Bodengefüges möglich. Für die weiteren Versuche am Flüssigboden 1 wird über die planmäßige Einbindetiefe des Pfahls vorgebohrt und anschließend der Pfahl ohne Wendel unter Aufbringung eines hohen vertikalen Druckes bis zur Endtiefe eingedreht. Eine Störung des Pfahl-Boden-Verbundes kann auch hierbei nicht komplett ausgeschlossen werden. So entstehen bspw. während des Eindrehvorgangs oberflächennahe Aufbrüche des Bodens (Abbildung 5-10).



Abbildung 5-10: Exemplarische Darstellung einer oberflächennahen Störung während des Eindrehens

Bei der weiteren Auswertung ist zu beachten, dass aufgrund des nicht störungsfreien Einbaus die Pfahlzugversuche am Flüssigboden 1 nur bedingt repräsentativ sind.

In der nachfolgenden Abbildung 5-11 sind aus dem Pfahlzugversuch resultierende Widerstands-Hebungs-Linien (WHL) für die Pfahllängen 60 cm (links) und 80 cm (rechts) aufgetragen. Erkennbar ist jeweils ein bereichsweise horizontaler Verlauf des Herauszieh Widerstandes bei zunehmender Pfahlkopfhebung. Die abfallenden und steigenden Bereiche (links) sind auf die Reaktion des Pfahls bei konstanter Zugbelastung zurückzuführen. Der Pfahl wird fortschreitend aus dem ZFSV heraus gezogen und erreicht somit nach Entlastungserscheinungen infolge der Pfahlbewegung bereichsweise wieder seine Grenzzugkraft.

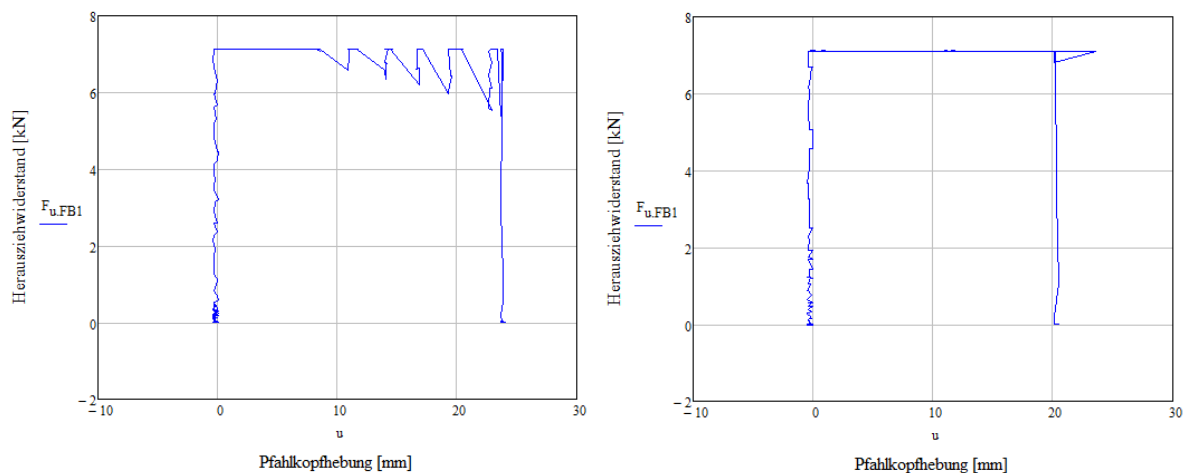


Abbildung 5-11: Exemplarische Widerstands-Hebungs-Linien für FB1 nach 7 d – links Pfahllänge 60 cm und rechts Pfahllänge 80 cm

An dieser Stelle wird ein Fehler in der Versuchstechnik bzw. Messwertaufnahme vermutet, da trotz einer konstant aufgebrachten Zugkraft und der fortschreitenden Pfahlkopfhebung nicht plausible Plateaus im Kraftverlauf erkennbar sind. Aufgrund der somit nicht eindeutigen Messwerte und des nicht störungsfreien Einbaus wird an dieser Stelle auf die Auswertung der undrainierten Scherfestigkeit τ_u in Abhängigkeit der eingebrachten Pfahllänge verzichtet.

5.3.2 Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 2

Das Eindrehen der Zugpfähle ist 18 h nach dem Verfüllvorgang sowohl mit als auch ohne Wendel problemlos möglich. Für die Versuche zum Zeitpunkt 7 d erfolgt eine Vorbohrung des Flüssigbodens 2, die ohne jegliche Störung des Bodengefüges durchgeführt werden kann. In der Abbildung 5-12 ist beispielhaft eine Widerstands-Setzung-Linie dargestellt, deren Verlauf den Erwartungen entspricht. Die Zugkraft wird kontinuierlich bis zu einer maximalen Bruchlast gesteigert. Daran anschließend wird der Pfahl schrittweise aus dem Boden herausgezogen, wobei die hierfür erforderliche Zugkraft mit Zunahme der Pfahlkopfhebung stetig abnimmt.

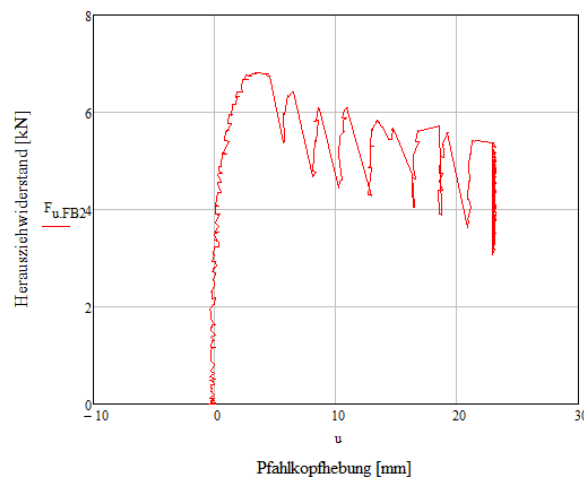


Abbildung 5-12: Exemplarische Widerstands-Hebungs-Linien für FB2 nach 7 d – Pfahllänge 74 cm

Aus dem gemessenen Herauszieh Widerstand lässt sich die undrainierte Scherfestigkeit τ_u des ZFSV zum jeweiligen Versuchszeitpunkt sowie in Abhängigkeit der in den Boden eingebrachten Pfahllänge bestimmen. In Abbildung 5-13 sind die Scherfestigkeitsverläufe nach 7 sowie 14 Tagen für unterschiedliche Einbindetiefen aufgetragen und um eine lineare Ausgleichsfunktion erweitert.

Zu beiden Versuchszeitpunkten ergibt sich jeweils ein mit der Pfahllänge konstant steigender Wert für die undrainierte Scherfestigkeit. Die Einzelwerte streuen in einem geringen Bereich entlang der linearen Ausgleichsfunktion.

Während des Herausziehvorgangs treten teilweise radial zum Pfahl verlaufende Risse auf und es bildet sich ein eindeutiger Bruchkörper im oberflächennahen Bereich des ZFSV aus (Abbildung 5-14). Vergleichbare Beobachtungen können auch bei den Versuchen mit der Modifizierten ViskoWaage an Probenkörpern fortgeschrittenen Alters gemacht werden.

5. Ergebnisse der Untersuchung

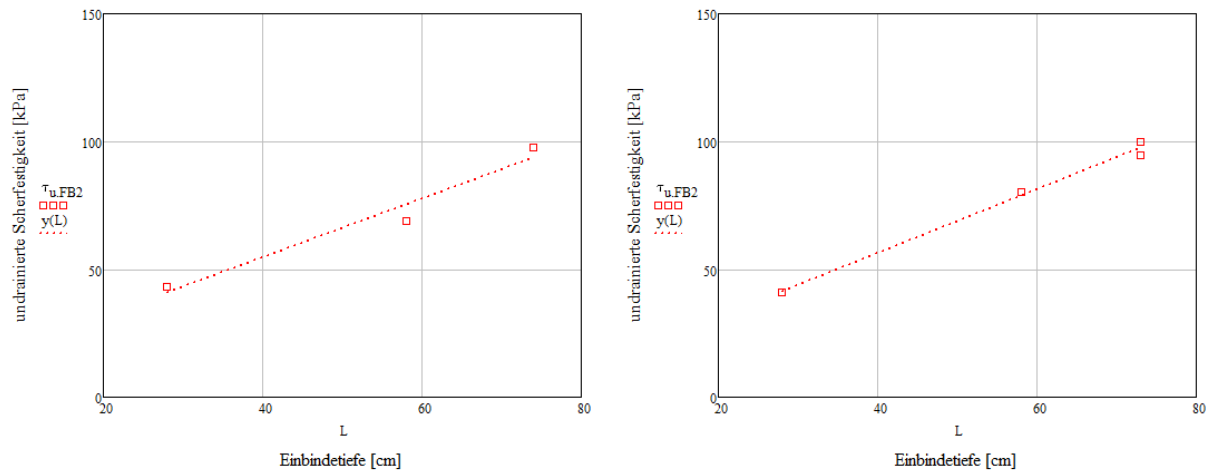


Abbildung 5-13: Undrainierte Scherfestigkeit des FB2 in Abhängigkeit der Pfahlänge bzw. Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 7 d und rechts zum Zeitpunkt 14 d



Abbildung 5-14: Exemplarische Ausbildung eines Bruchkörpers zum Versuchszeitpunkt 7 d mit einer Pfahlänge von 33 cm

5.3.3 Undrainierte Scherfestigkeit – Flüssigboden 3

Die Pfahlzugversuche an Flüssigboden 3 erfolgen ohne Vorbohren des Bodens, da die Pfähle innerhalb der ersten 24 h nach dessen Einbau eingebracht werden. Die Abhängigkeit der undrainierten Scherfestigkeit τ_u von der im ZFSV eingebrachten Pfahlänge ist in Abbildung 5-15 für die Zeitpunkte 22 h und 7 d nach Verfüllung des Grabens dargestellt. Die Scherfestigkeitswerte im rechten Diagramm (7 d) zeigen trotz zunehmender Einbindetiefe des Pfahls eine leicht abfallende Tendenz der Scherfestigkeit. Zu erwarten wäre an dieser Stelle ein stetiger Anstieg der undrainierten Scherfestigkeit, da in der Regel mit Vergrößerung der bodenberührenden Pfahlmantelfläche eine Erhöhung der aufzubringenden Zugkraft einhergeht.

Die einzelnen Widerstands-Setzungs-Linien der Pfahlzugversuche weisen Charakteristika sowohl der unter Flüssigboden 1 beschriebenen fehlerhaften Messwertaufnahmen als auch der bei Flüssigboden 2 aufgezeigten erwartungsgemäß korrekten Datenverläufe auf. Der Grund hierfür ist nicht eindeutig reproduzierbar, da u.a. ein störungsfreier Einbau gewährleistet werden kann.

5. Ergebnisse der Untersuchung

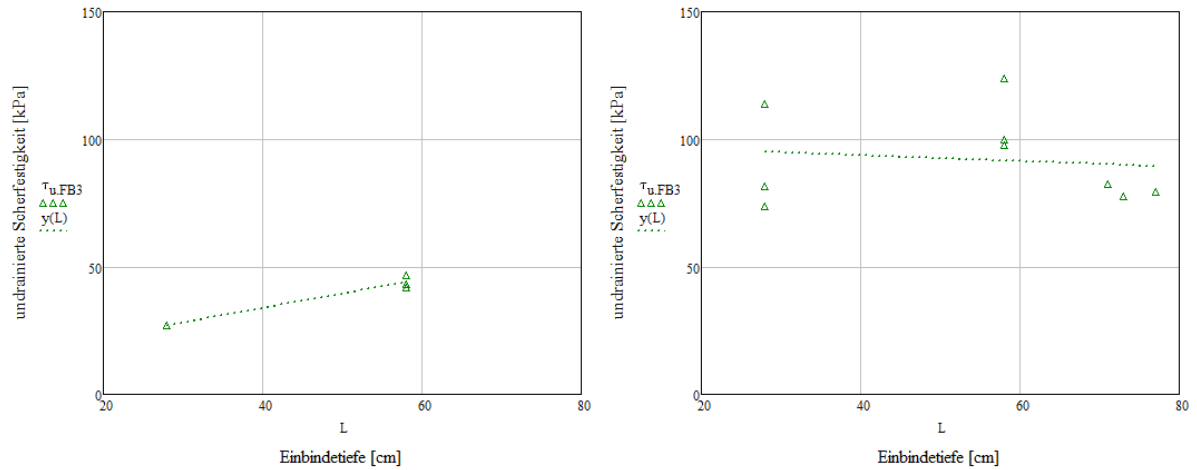


Abbildung 5-15: Undrainierte Scherfestigkeit des FB3 in Abhängigkeit der Pfahllänge bzw. Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 22 h und rechts zum Zeitpunkt 7 d

Ein Hinweis gibt die Auftragung des Herausziehwiderstandes über die Einbindetiefe (Abbildung 5-16). Die im rechten Diagramm rot markierten Messwerte bewegen sich in einem annähernd identischen Bereich des Herausziehwiderstandes bzw. der aufzubringenden Zugkraft. Dies deutet darauf hin, dass die digitale Kraftaufnahme nicht fehlerfrei funktioniert und der für einen Bruch erforderliche Herausziehwiderstand nicht eindeutig ermittelbar ist. Die Bruchbilder decken sich allerdings weitgehend mit denen des Flüssigbodens 2 (Abbildung 5-17).

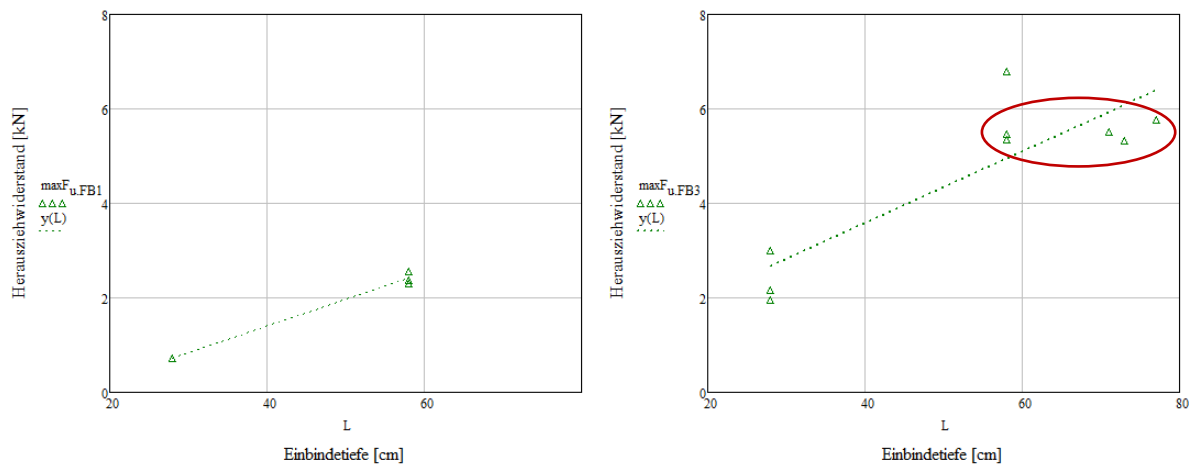


Abbildung 5-16: Herausziehwiderstand des FB3 in Abhängigkeit der Einbindetiefe – links zum Zeitpunkt 22 h und rechts zum Zeitpunkt 7 d



Abbildung 5-17: Exemplarische Ausbildung eines Bruchkörpers zum Versuchszeitpunkt 7 d

5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Pfahlzugversuch

Der einfache Ansatz zur Ermittlung der undrainierte Scherfestigkeit τ_u über die Auswertung des Herauszieh Widerstandes eines Zugpfahls, gemessen als Zugkraft und bezogen auf die bodenberührende Mantelfläche des Pfahls, vernachlässigt den Anstieg des Spannungsniveaus im Boden bei zunehmender Einbindetiefe des Pfahls. Als Folge dieser Vereinfachung in der Versuchsauswertung sind die Ergebnisse der Pfahlzugversuche von der Pfahlänge abhängig.

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die aus den eindeutig auswertbaren Pfahlversuchen ermittelten mittleren undrainierten Scherfestigkeiten annähernd linear mit der Pfahlänge zunehmen.

5.4 Entwicklung der Scherfestigkeit im Vergleich

Der Herauszieh Widerstand eines in den ZFSV eingebrachten Verankerungskörpers kann sowohl im kleinmaßstäblichen Versuch mit der Modifizierten ViskoWaage als auch im großmaßstäblichen Pfahlzugversuch gemessen werden. Wird der Messwert auf die kraftübertragende Mantelfläche des Verankerungskörpers bezogen, kann die Scherfestigkeit des Baustoffes bestimmt werden, sofern der Einfluss der Pfahlänge berücksichtigt wird. Die jeweiligen Ergebnisse der durchgeführten Versuche können zusammenfassend in einem Diagramm aufgetragen werden, um so die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit τ darzustellen (Abbildung 5-18).

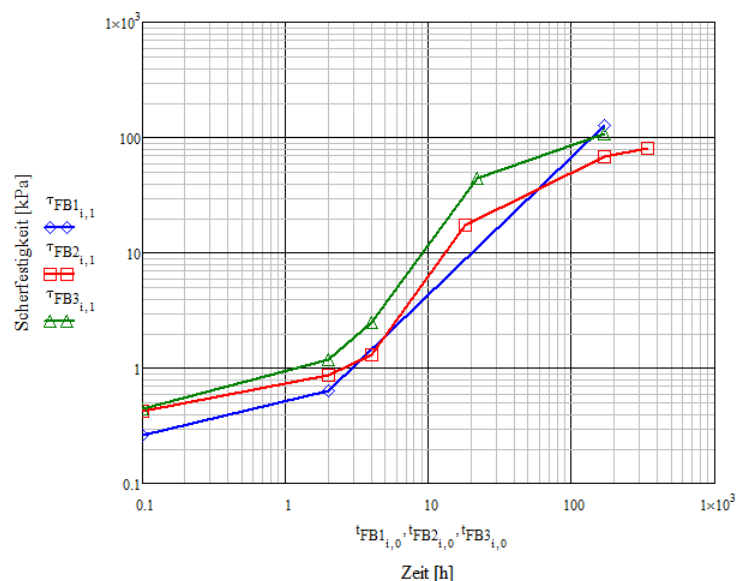


Abbildung 5-18: Zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit der Flüssigböden 1 bis 3

Der Flüssigboden 1, welcher eine bereits zuvor beschriebene Entmischungsneigung zeigt, weist in einem frühen Stadium eine im Vergleich zu den anderen beiden Materialien geringere Scherfestigkeit auf. Im Laufe des Betrachtungszeitraums übersteigt diese jedoch die Werte der Flüssigböden 2 und 3.

Es lässt sich allerdings bei allen drei Materialien ein vergleichbarer Scherfestigkeitsverlauf feststellen, so dass eindeutige Aussagen zur jeweiligen Festigkeitsentwicklung getroffen werden können.

5.5 Korrelationsanalysen

5.5.1 Allgemein

Die nachfolgenden Korrelationsanalysen zeigen einen Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der ergänzenden Untersuchungen mittels Modifizierter ViskoWaage bzw. Pfahlzuggerät und der Versuche des IGtH.

Durch Messungen der Scherfestigkeit des noch fließfähigen ZFSV und an Material im erhärtenden Zustand konnte bereits eine eindeutige zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit τ aufgezeigt werden. Die Ergebnisse der Scherfestigkeit an der Fließgrenze τ_f bzw. der undrainierten Scherfestigkeit τ_u werden nachfolgend der undrainierten Scherfestigkeit c_u aus einaxialen Zylinderdruckprüfungen gegenübergestellt. Da die einaxiale Druckfestigkeit versuchsbedingt nur an ausreichend scherfesten Proben durchgeführt werden kann, stehen für eine Korrelation nur die Werte aus den großmaßstäblichen Pfahlzugversuchen zur Verfügung.

Daran schließt ein Vergleich der Scherfestigkeit τ mit dem Verformungsmodul E_{vd} aus dem dynamischen Plattendruckversuch an. Abschließend erfolgt eine gesamtheitliche Betrachtung der erarbeiteten Korrelationen, um so Aussagen bzgl. einer alternativen Möglichkeit der Kontrolle der Festigkeitsentwicklung und Tragfähigkeit eines eingebauten ZFSV zu treffen.

Details zu sämtlichen Ergebnissen der Labor- und Felduntersuchungen des IGtH sind dem entsprechenden Abschlussbericht zu entnehmen. Für die vorliegende Ausarbeitung wird auf die relevanten Messwerte (Anhänge 4 bis 8) zur undrainierten Kohäsion sowie zum dynamischen Verformungsmodul Bezug genommen und diese für die Korrelationen grafisch aufbereitet.

5.5.2 Korrelation von Scherfestigkeit τ und undrainierte Kohäsion c_u

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine Aufstellung der Korrelation zwischen den Scherfestigkeitsparametern τ und c_u . Die Werte für die undrainierte Kohäsion bzw. Scherfestigkeit entstammen den einaxialen Druckversuchen des IGtH. Unabhängig von der Versuchsmethode oder der ausführenden Stelle, werden die Untersuchungen in einem möglichst gleichen Zeitrahmen an den drei beschriebenen Flüssigböden (FB1 bis FB3) durchgeführt, um grundsätzliche Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Gemäß dem einfachen Ansatz zur Auswertung der Pfahlversuche (Kapitel 5.3.4) wird der Anstieg des Spannungsniveaus im Boden bei zunehmender Eindringtiefe des Schraubpfahls vernachlässigt, so dass die ermittelten Ergebnisse eine Abhängigkeit von der Pfahllänge aufweisen. Aufgrund dessen wird im Folgenden nicht nur zwischen den drei beprobten Flüssigböden unterschieden, sondern auch zwischen drei definierten Einbindetiefen bzw. Pfahllängen.

- Kurzer Pfahl: Werte von Zugversuchen an Pfahllängen zwischen 23 cm und 28 cm
- Mittlerer Pfahl: Werte von Zugversuchen an Pfahllängen zwischen 58 cm und 60 cm
- Langer Pfahl: Werte von Zugversuchen an Pfahllängen zwischen 71 cm und 80 cm

Versuchsbedingt können nicht alle Pfahlzug- und Druckversuche zum exakt gleichen Zeitpunkt durchgeführt werden. Der Zusammenhang zwischen den Untersuchungen im Feld

5. Ergebnisse der Untersuchung

und im Labor wird anhand eines zeitlichen Bereiches geschaffen, in welchem von beiden Versuchen Ergebnisse vorliegen und somit eine Korrelationsanalyse möglich ist.

Ziel ist es, den mittels Pfahlzugversuch bestimmten Scherfestigkeitsverlauf über einen Faktor an die undrainierte Kohäsion anzupassen, um einen stetigen gesamten Verfestigungsverlauf darstellen zu können.

In der Abbildung 5-19 ist die Entwicklung der Scherfestigkeit τ aus dem Pfahlzugversuch und der undrainierten Kohäsion c_u aus der einaxialen Druckprüfung in Abhängigkeit der Zeit nach der Grabenverfüllung aufgetragen. Der sich hier ergebene Korrelationsfaktor von 1,1 bezieht sich auf eine kurze Pfahlänge, die in den Flüssigboden 2 eingebracht wurde.

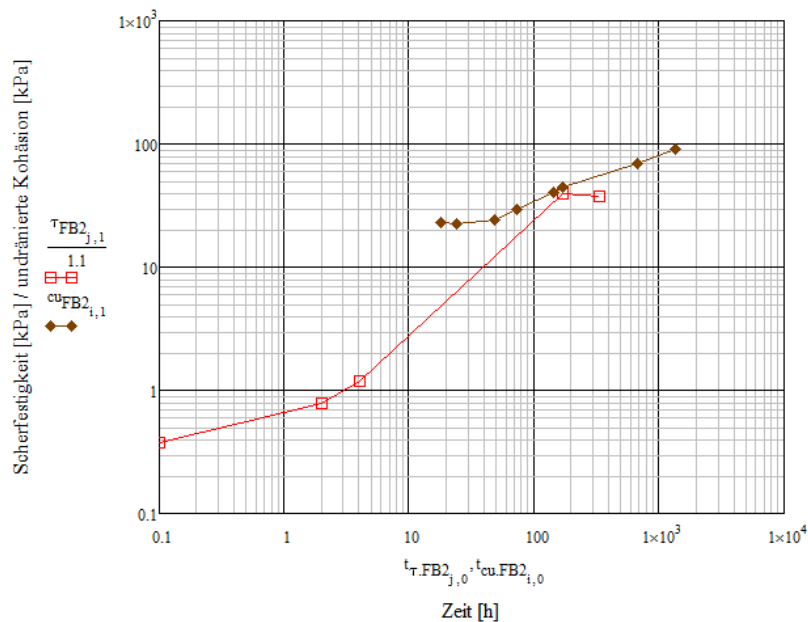


Abbildung 5-19: Entwicklung von τ und c_u bei einer kurzen Pfahlänge – Flüssigboden 2 (FB2)

Bei Betrachtung des gesamten Verfestigungsverlaufs von Flüssigbodens 3 (Abbildung 5-20) kann der Korrelationsfaktor von 1,1 für kurze Pfähle bestätigt werden. Der um den Faktor angepasste Verlauf der Scherfestigkeit schließt im Übergangsbereich nahezu deckend an den Kurvenverlauf der undrainierten Kohäsion an.

Für den Flüssigboden 1 liegen aus dem Pfahlzugversuch keine eindeutig auswertbaren Ergebnisse vor, so dass an dieser Stelle keine Festigkeitsentwicklung für den kurzen Pfahl dargestellt werden kann.

5. Ergebnisse der Untersuchung

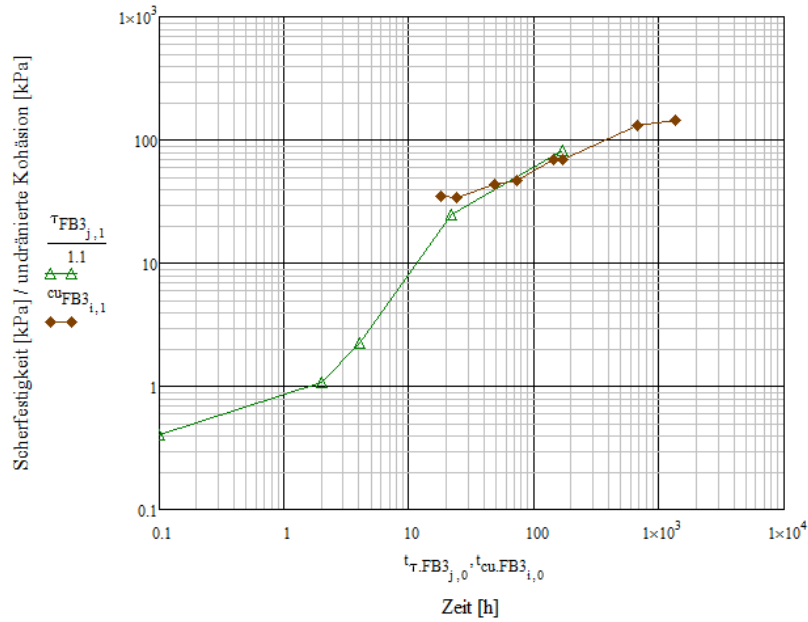


Abbildung 5-20: Entwicklung von τ und c_u bei einer kurzen Pfahlänge – Flüssigboden 3 (FB3)

Die Versuche an den Pfählen mittlerer Länge kann trotz der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen unvollständigen Messwerte der Zugversuche an Flüssigboden 1 bei allen drei Materialien ausgewertet werden. Es ergibt sich im Rahmen der gesamtheitlichen Betrachtung der einzelnen Entwicklungsverläufe von Scherfestigkeit und undrainierter Kohäsion (Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-23) ein einheitlicher Korrelationsfaktor von 1,5.

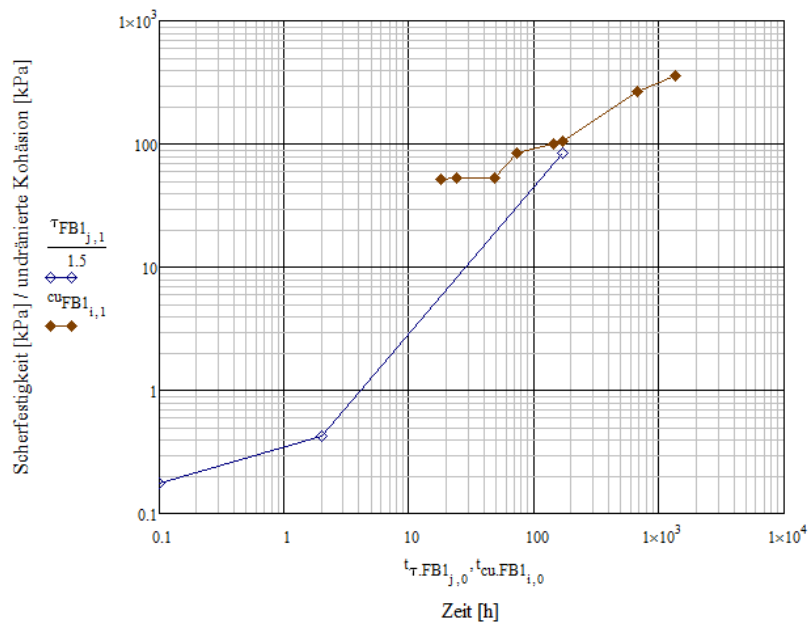


Abbildung 5-21: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahlänge – Flüssigboden 1 (FB1)

5. Ergebnisse der Untersuchung

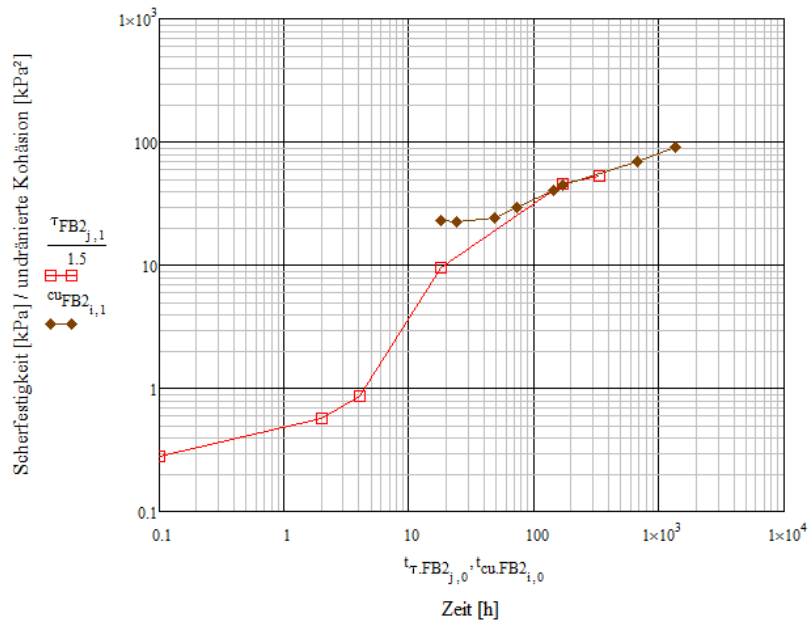


Abbildung 5-22: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2)

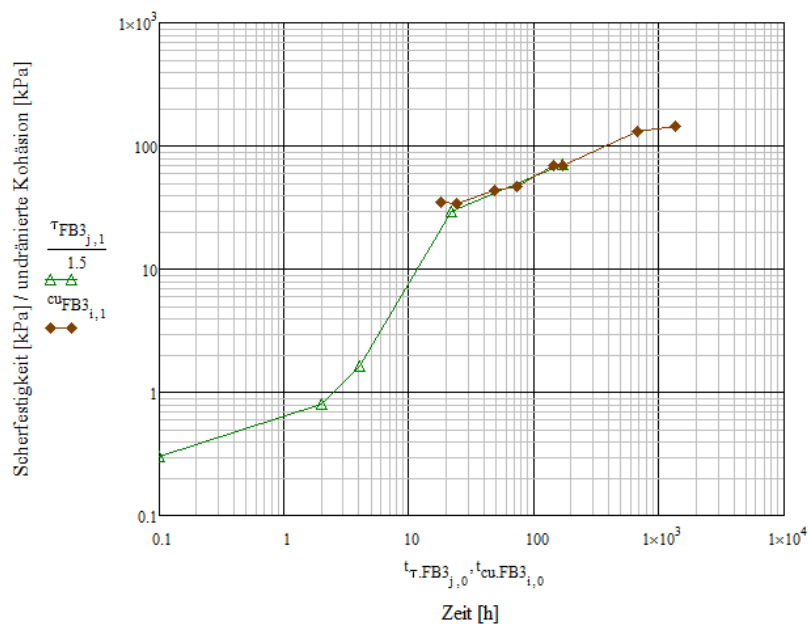


Abbildung 5-23: Entwicklung von τ und c_u bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3)

Weiterhin liegen noch die Ergebnisse von Zugversuchen bei größeren Einbindetiefen bzw. an langen Pfählen vor. Die folgenden Diagramme (Abbildung 5-24 bis Abbildung 5-26) zeigen den Verlauf der ermittelten Scherfestigkeit τ und die undrainierte Kohäsion c_u , dargestellt für den jeweiligen Verfüllbaustoff (FB1 bis FB3). Aus der jeweiligen Anpassung der Scherfestigkeitsentwicklung an die undrainierte Kohäsion lässt sich insgesamt ein Faktor von 1,9 bestimmen, der den Verfestigungsverlauf aller drei Materialien annähernd konform widerspiegelt. Wie bei den zuvor aufgezeigten Zusammenhängen bei kurzer und mittlerer

5. Ergebnisse der Untersuchung

Pfahllänge, lässt sich analog hierzu auch bei der langen Pfahlvariante ein einheitlicher Faktor definieren, der eine Anpassung der Festigkeitsverläufe erlaubt.

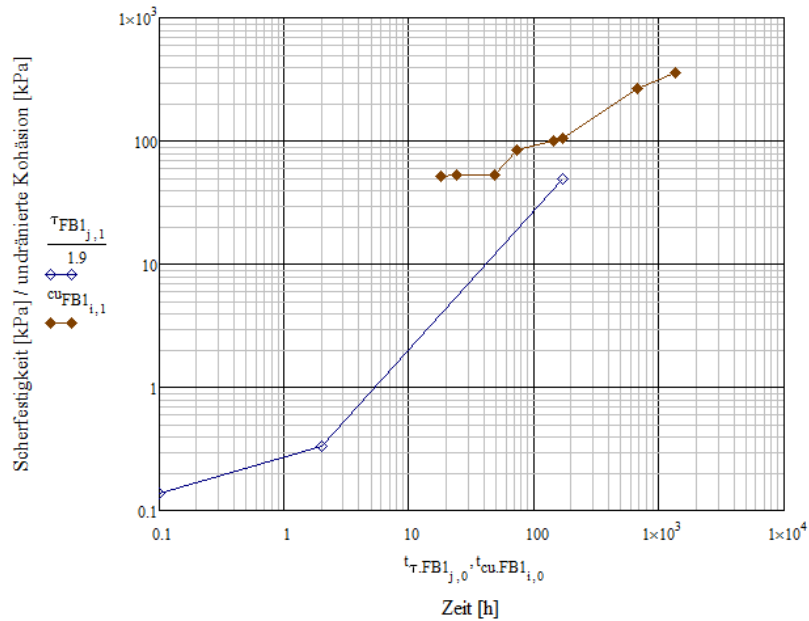


Abbildung 5-24: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1)

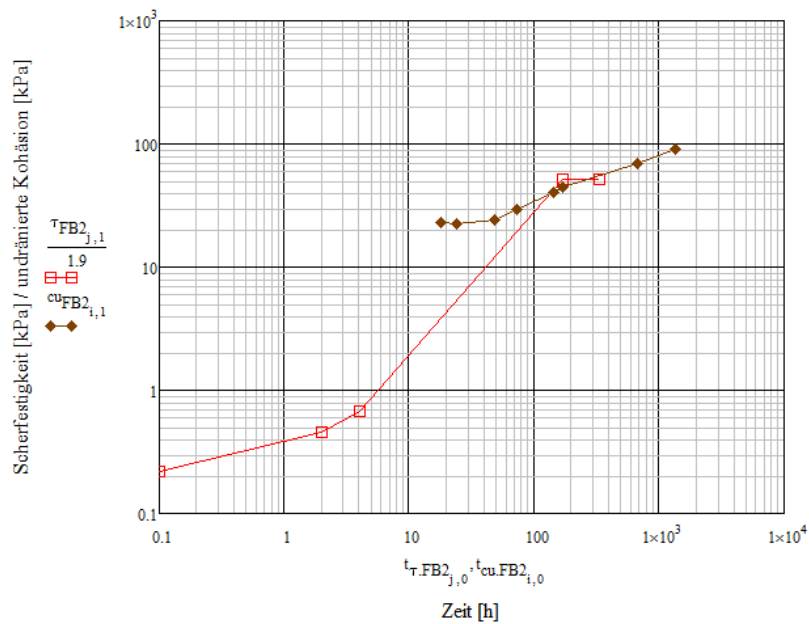


Abbildung 5-25: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2)

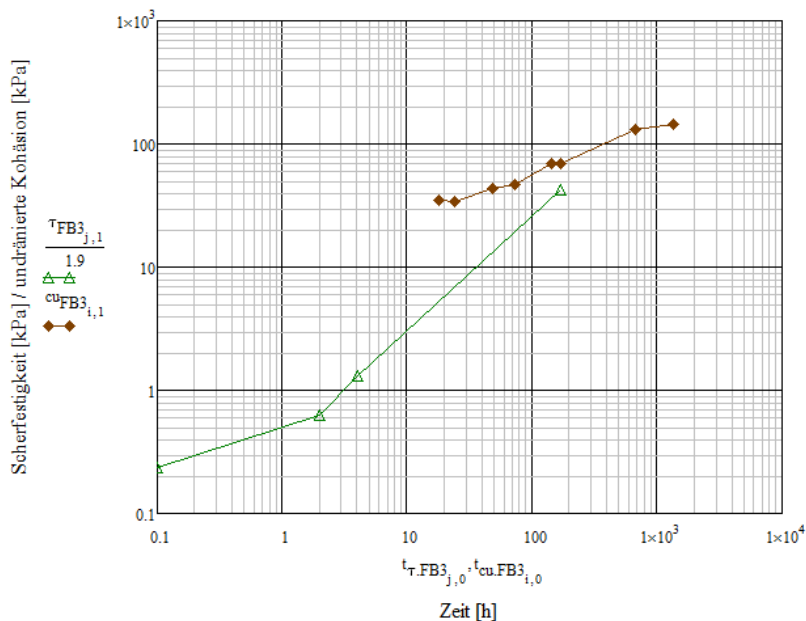


Abbildung 5-26: Entwicklung von τ und c_u bei einer langen Pfahllänge – Flüssigboden 3 (FB3)

Die durchgeführten Versuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit τ in situ und der undrainierten Kohäsion c_u im Labor zeigen, dass die unterschiedlich ermittelten Scherfestigkeitsparameter in einem eindeutigen Kontext zueinander stehen, der sich im Zuge der Auswertung als materialunabhängig erweist. Der Korrelationsfaktor steht im direkten Zusammenhang mit der Einbindetiefe der im Rahmen der Pfahlzugversuche verwendeten Schraubpfähle.

Die Tabelle 5-4 gibt einen zusammenfassenden Überblick der festgestellten Korrelationsfaktoren.

Tabelle 5-4: Übersicht der von der Pfahllänge abhängigen Korrelationsfaktoren

| Pfahlausbildung | Mittlere Länge [cm] | Korrelationsfaktor |
|-----------------|---------------------|--------------------|
| kurz | ≈ 25 | 1,1 |
| mittel | ≈ 60 | 1,5 |
| lang | ≈ 75 | 1,9 |

5.5.3 Korrelation von Scherfestigkeit τ und dynamischer Verformungsmodul E_{vd}

In einer weiteren Korrelationsanalyse soll ein möglicher Zusammenhang zwischen der mittels Pfahlauszugversuch bestimmten Scherfestigkeit τ und dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} untersucht werden. Die relevanten Ergebnisse des dynamischen Plattendruckversuches mit leichtem Fallgewichtsgerät entstammen dem Versuchsprogramm der IGtH. Analog der zuvor durchgeführten Vergleiche werden auch an dieser Stelle die unterschiedlichen Versuchszeitpunkte der einzelnen Untersuchungen in einem möglichst engen Rahmen zusammengefasst betrachtet.

Ebenso gilt bezüglich des Pfahlzugversuches weiterhin die Einteilung in kurze, mittlere und lange Pfähle abhängig von der effektiven Einbindetiefe.

5. Ergebnisse der Untersuchung

In den nachfolgenden Diagrammen (Abbildung 5-27 und Abbildung 5-28) wird die mittels Pfahlzugversuch gemessene Scherfestigkeitsentwicklung und die ebenfalls zeitlich abhängige Entwicklung des dynamischen Verformungsmoduls für eine kurze Pfahlänge dargestellt. Gegenstand der Betrachtung sind lediglich Flüssigboden 2 und 3, da der Pfahlauszugversuch an Flüssigboden 1 keine eindeutig auswertbaren Ergebnisse liefert.

Die Kurvenanpassung der an Flüssigboden 2 ermittelten Werte zeigt einen Korrelationsfaktor von 4, während bei Betrachtung der Messungen an Flüssigboden 3 unter Einhaltung einer hinreichenden Übereinstimmung ein Faktor von 9 angesetzt werden kann.

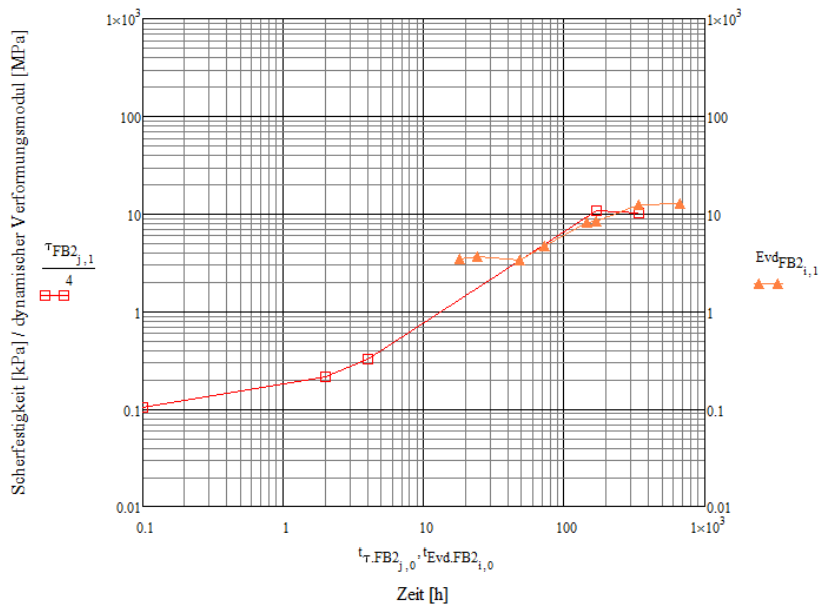


Abbildung 5-27: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer kurzen Pfahlänge – Flüssigboden 2 (FB2)

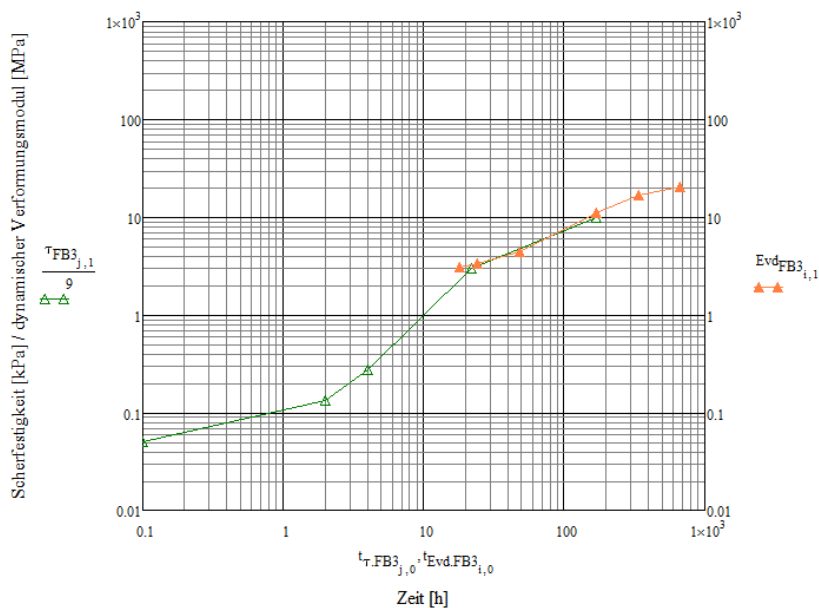


Abbildung 5-28: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer kurzen Pfahlänge – Flüssigboden 3 (FB3)

5. Ergebnisse der Untersuchung

Werden zur Bestimmung der Scherfestigkeit die Herausziehversuche an den Pfählen mittlerer Länge betrachtet, ergeben sich entsprechend den größeren Pfahllängen ebenfalls größere Korrelationsfaktoren. Die Diagramme in Abbildung 5-29 bis Abbildung 5-31 zeigen die entsprechenden Kurvenverläufe. Es ergibt sich so bei Material 1 (FB1) ein abgeschätzter Anpassungsfaktor von 2. Bei Flüssigboden 2 (FB2) kann der Korrelationsfaktor zu 7 und bei Boden 3 (FB3) zu 12 bestimmt werden.

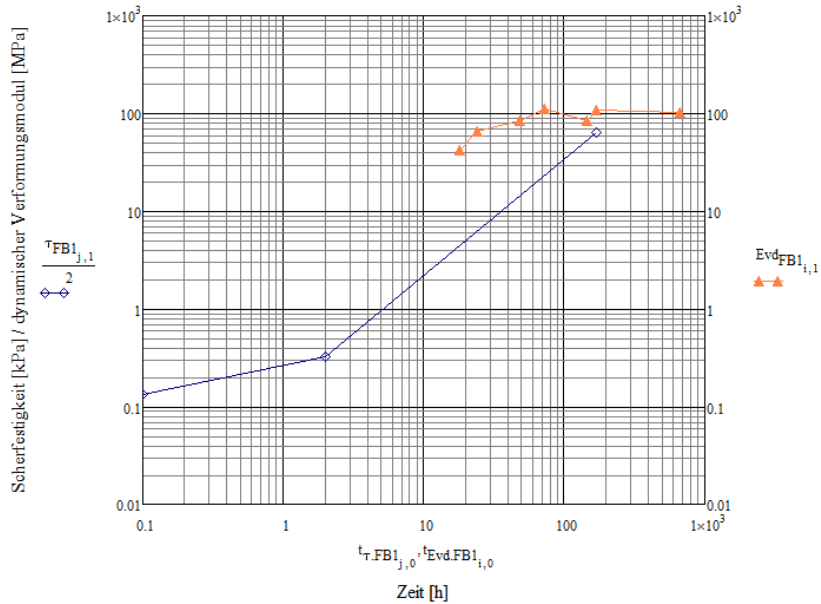


Abbildung 5-29: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 1 (FB1)

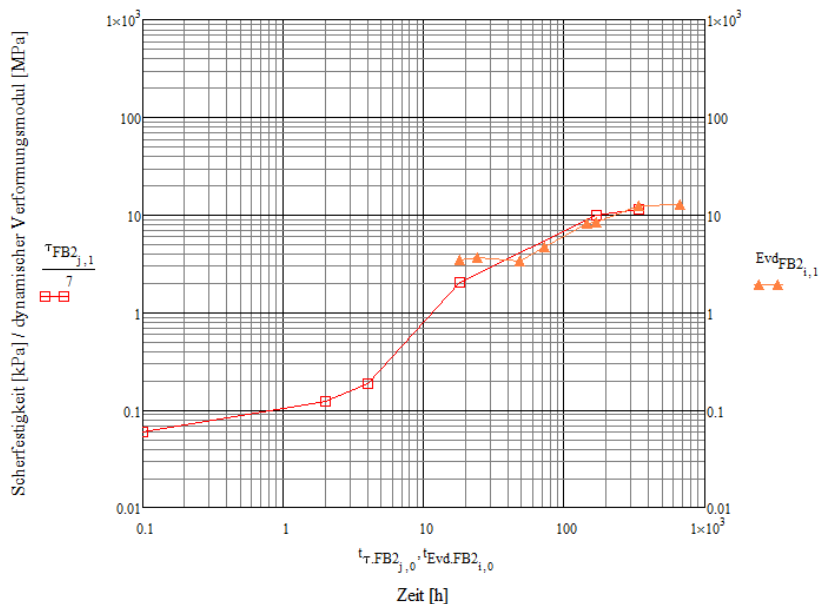


Abbildung 5-30: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahllänge – Flüssigboden 2 (FB2)

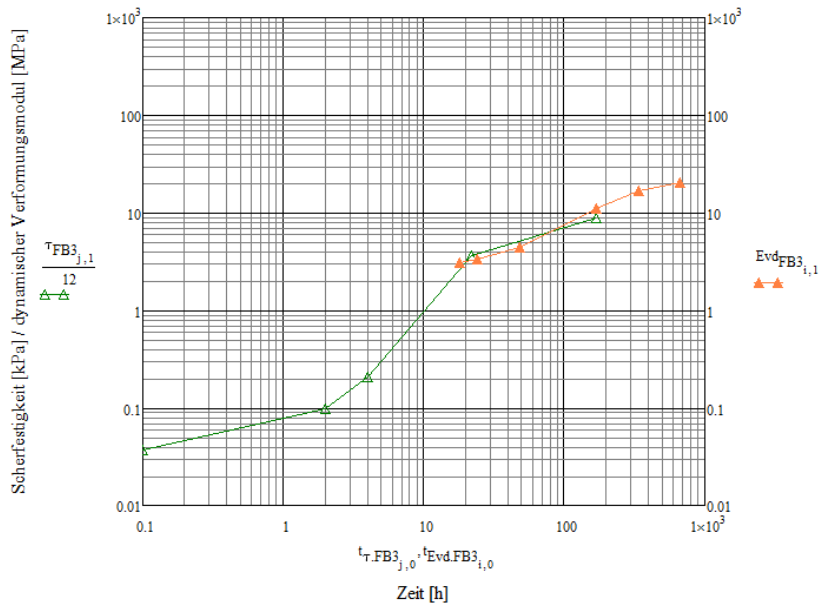


Abbildung 5-31: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer mittleren Pfahlänge – Flüssigboden 3 (FB3)

Bei Betrachtung der Versuche mit den längsten Pfählen und der dazugehörigen Messwerte können wiederum größere Korrelationsfaktoren ermittelt werden. Bei Flüssigboden 1 (FB1) wird näherungsweise ein Korrelationsfaktor von 2 ermittelt. Auch hierbei handelt es sich aufgrund einer nicht ausreichenden Menge an Messungen zu Scherfestigkeit und dynamischen Verformungsmodul in einem einheitlichen Zeitrahmen um eine entsprechend grobe Abschätzung.

Der Baustoff 2 (FB2) lässt auf einen Faktor von 9 schließen und aus der Analyse von Flüssigboden 3 (FB3) ergibt sich ein Anpassungsfaktor von 7.

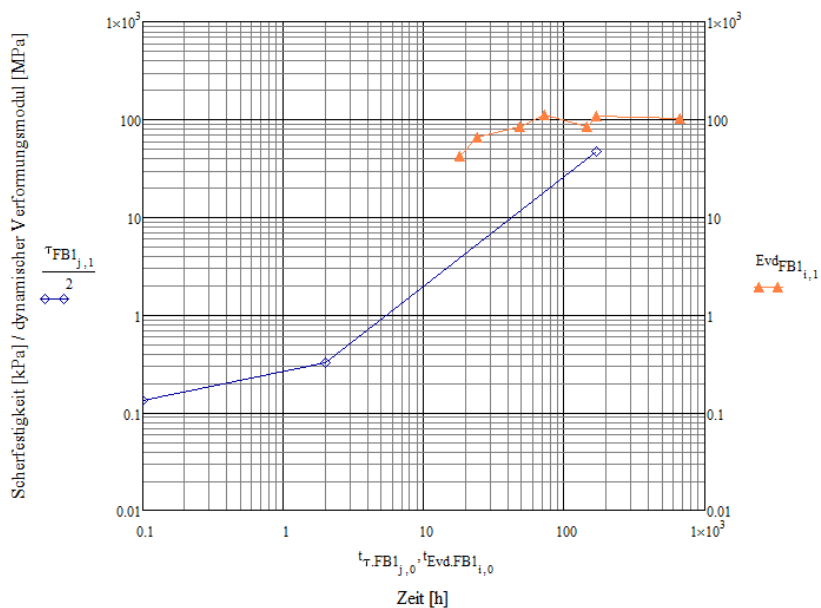


Abbildung 5-32: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahlänge – Flüssigboden 1 (FB1)

5. Ergebnisse der Untersuchung

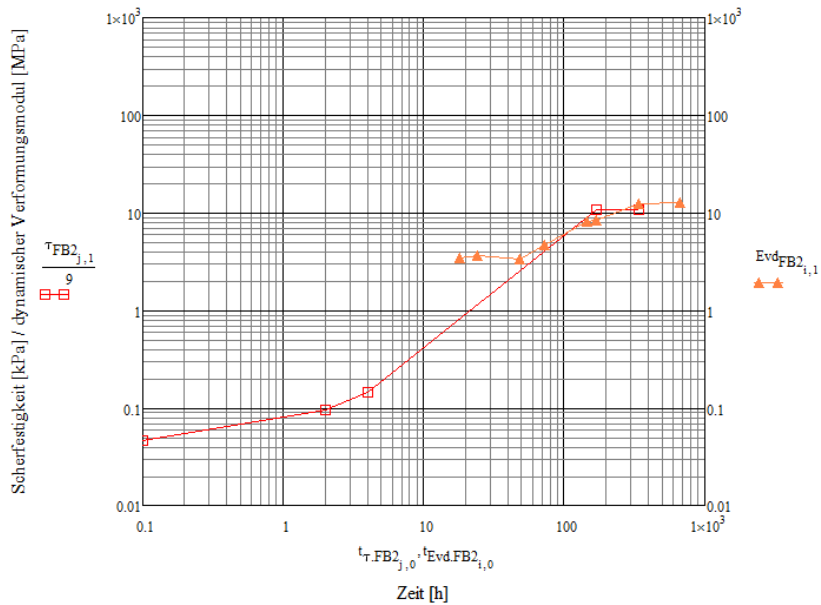


Abbildung 5-33: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahlänge – Flüssigboden 2 (FB2)

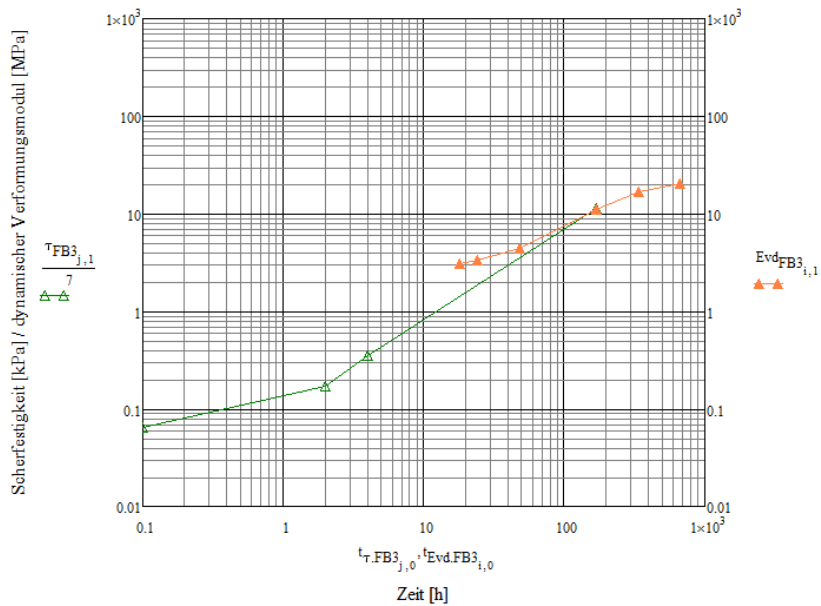


Abbildung 5-34: Entwicklung von τ und E_{vd} bei einer langen Pfahlänge – Flüssigboden 3 (FB3)

Die nachfolgende Tabelle 5-5 fasst die aus den zuvor jeweils angepassten Kurvenverläufen ermittelten Korrelationsfaktoren zusammen.

Im Gegensatz zum aufgezeigten Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit τ aus dem Pfahlzugversuch und undrainierter Kohäsion c_u aus der einaxialen Druckfestigkeitsprüfung ist das Verhältnis von Scherfestigkeit τ zum dynamischen Verformungsmodul E_{vd} sowohl von der Pfahlgeometrie als auch vom Material abhängig. Aufgrund dessen ist bei Verwendung des Pfahlzugerätes vor Ort eine Kalibrierung an der dynamischen Lastplatte erforderlich.

Tabelle 5-5: Übersicht der von der Pfahlänge und Material abhängigen Korrelationsfaktoren

5. Ergebnisse der Untersuchung

| Pfählausbildung | Mittlere Länge [cm] | Korrelationsfaktor | | |
|-----------------|---------------------|--------------------|-----|-----|
| | | FB1 | FB2 | FB3 |
| <i>kurz</i> | ≈ 25 | - | 4 | 9 |
| <i>mittel</i> | ≈ 60 | (2) | 7 | 12 |
| <i>lang</i> | ≈ 75 | (2) | 9 | 7 |

Bei Flüssigboden 2 (FB2) zeigt sich erwartungsgemäß bei zunehmender Pfahllänge eine Erhöhung des Korrelationsfaktors. Die ermittelten Werte für den Boden 3 (FB3) zeigen an dieser Stelle allerdings keine eindeutige Tendenz. Der Grund hierfür kann nicht abschließend geklärt werden, allerdings ist an dieser Stelle auf die nicht plausible Widerstands-Setzungs-Linie aus Kapitel 5.3.3 zu verweisen. Zur eingehenden Klärung der Einflüsse sind über das bearbeitete Projekt hinaus weitere Versuche erforderlich.

5.6 Korrelation von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und dynamischer Lastplatte

Am Beispiel der Ergebnisse für die Zugversuche an Pfählen mit mittlerer Länge (ca. 60 cm) werden nachfolgend die Korrelationen zu den Versuchen zur Ermittlung der undrained Scherfestigkeit (einaxialer Druckversuch und Pfahlzugversuch) und der dynamischen Lastplatte aufgezeigt.

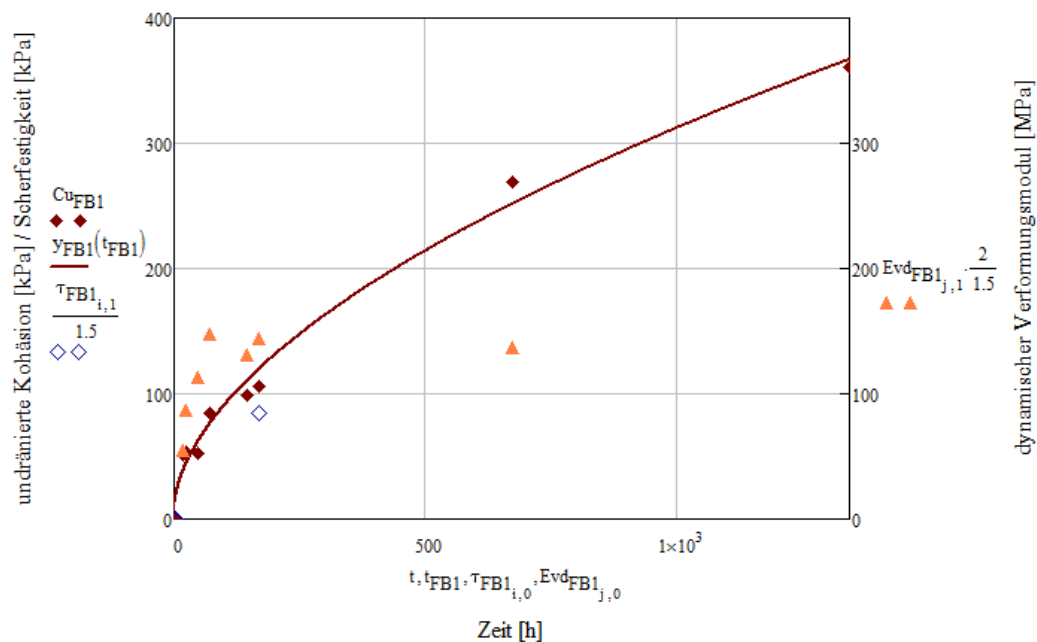


Abbildung 5-35: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahllänge, FB1

5. Ergebnisse der Untersuchung

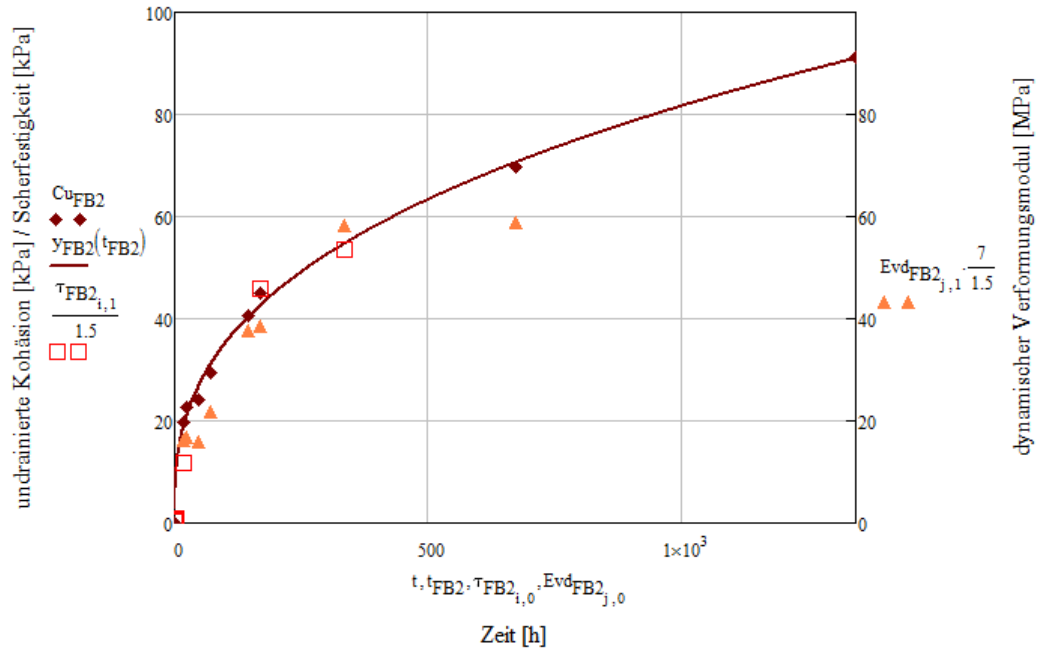


Abbildung 5-36: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahlänge, FB2

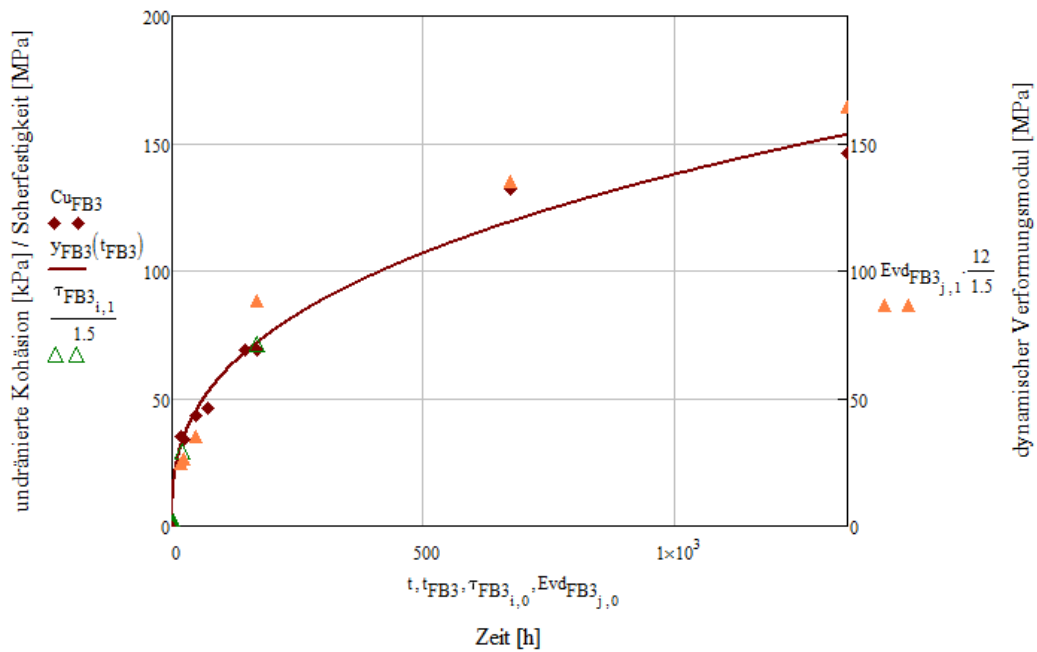


Abbildung 5-37: Vergleich von einaxialem Druckversuch, Pfahlzugversuch und Lastplatte – mittlere Pfahlänge, FB3

6 Fazit

Nach den durchgeführten Versuchen zur Ermittlung der Scherfestigkeit von ZFSV in situ ist die Datenbasis für eine abschließende Beurteilung noch nicht breit genug. Die ersten Auswertungen legen aber den Schluss nahe, dass die undrainierte Scherfestigkeit aus den Ergebnissen von Zugpfahlversuchen mit den Ergebnissen einaxialer Druckversuche übereinstimmen.

Bei den im Rahmen der zusätzlich zu den Kalibrierversuchen durchgeführte Pfahlzugversuchen hat sich gezeigt, dass der Herauszieh Widerstand eines Zugpfahles grundsätzlich geeignet ist, um die Festigkeit eines zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffes nachzuweisen. Anhand weniger Pfahlzugversuche lässt sich der Verfestigungsverlauf prognostizieren. Die einzelnen Messwerte können zur Qualitätssicherung mit dem Verlauf aus der Eignungsprüfung verglichen werden. Auch die Festigkeitsentwicklung (f_z -Wert) lässt sich anhand der Pfahltragfähigkeit beurteilen. Das Verhältnis zwischen dem Pfahlzugversuch und dem einaxialen Druckversuch ist materialunabhängig, es liegt somit ein direkter Zusammenhang zwischen den Versuchsmethoden vor. Bei der Korrelation zum dynamischen Plattendruckversuch ergibt sich ein materialabhängiger Faktor, der durch die Kalibrierung an einem Pfahlzugversuch vor Ort bestimmt werden kann.

Nach den bisherigen Erkenntnissen sind Pfahlzugversuche grundsätzlich für eine Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfung von ZFSV in situ geeignet. Eine weitere Vereinfachung kann durch die Korrelation der Zugversuche mit den Ergebnissen der Versuche mittels Fallgewichtsgesetz (dynamischer Lastplattendruckversuch) erreicht werden.

7 Literaturverzeichnis

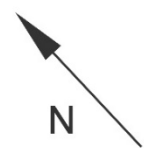
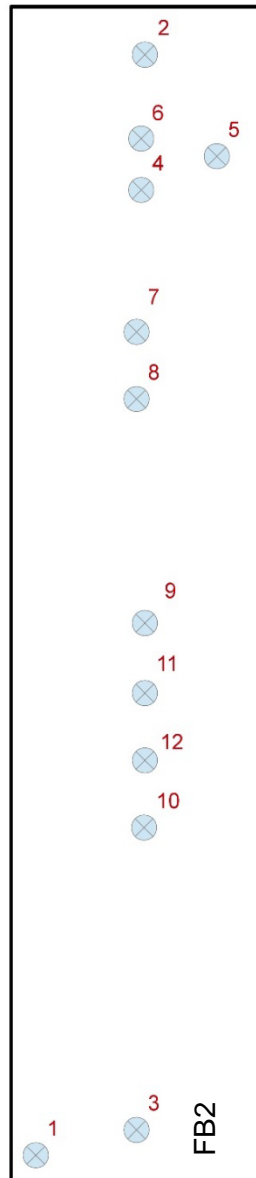
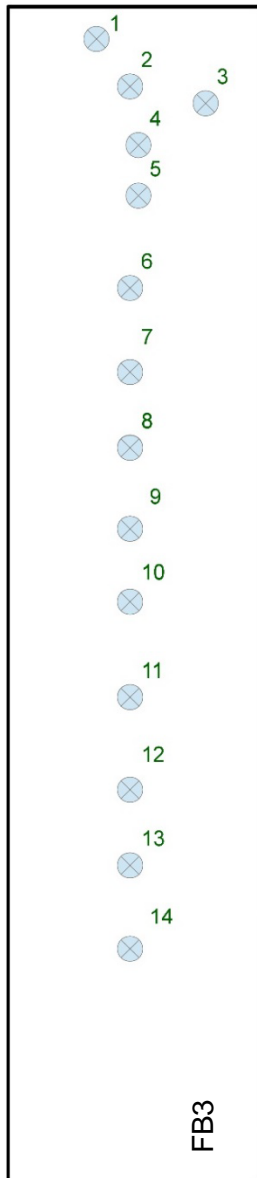
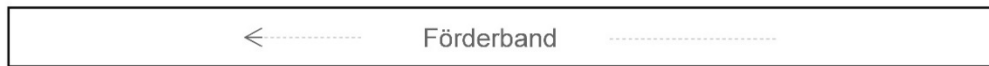
- EA-Pfähle (2012) Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“ (AK 2.1), Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2012.
- FGSV (2009) Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB), Köln 2009.
- FGSV (2012) Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (H ZFSV), Köln 2012.
- Kuntsche (2016) Kuntsche, Konrad: Geotechnik, Erkunden – Untersuchen – Berechnen – Ausführen – Messen, 2. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden 2016.

Anhang 1: Daten der Verankerungskörper

| Bezeichnung | Länge gesamt [cm] | Länge Schnecke [cm] | Schaftdurchmesser [cm] | Wendeldurchmesser [cm] | Mantelfläche [cm ²] | Volumen des einhüllenden Zylinders [cm ³] |
|-------------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|------------------------|---------------------------------|---|
| <i>FID 90</i> | 9 | 8 | 1 | 2,5 | 62,83 | 39,3 |
| <i>Stahlpfahl ohne Wendel</i> | - | * | 3 | - | * | - |
| <i>Stahlpfahl mit Wendel</i> | - | * | 3 | 9 | * | - |

* je nach Einbindetiefe bzw. Einschraubtiefe

Anhang 2: Lage der Pfahlzugversuche



Anhang 3: Auszug aus den Formblättern der Pfahlzugversuche

Erläuterungen:

- 1 Dichte zum Zeitpunkt der Grabenverfüllung
- 2 Bezeichnung bzw. Bodenkennung
- 3 Alter des ZFSV zum Zeitpunkt des Zugversuches (einschließlich Datum)
- 4 Angaben zur Pfahlart und der eingedrehten kraftübertragenden Länge
- 5 Pfahllage gemäß Lageplan der Pfahlzugversuche (Anhang 2)
- 6 Maximalwert des Herausziehwiderstandes zur Ermittlung der undrainierten Scherfestigkeit

Daten zu Flüssigboden 1

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>0</i> | ² Material: | <i>FB1</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,04</i> | ³ Materialalter: | <i>21 h / (05.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 mit Wendel / -</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>1</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>3,777 (nicht repräsentativ)</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>1</i> | ² Material: | <i>FB1</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,04</i> | ³ Materialalter: | <i>7d (11.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 80</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>2</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>1,638</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 60</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>3</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>7,133</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 80</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>4</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>7,117</i> | | |

Daten zu Flüssigboden 2

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|--|-----------------------------|--------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>1</i> | ² Material: | <i>FB2</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,00</i> | ³ Materialalter: | <i>18 h (12.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 mit Wendel / 75 (65 cm oberhalb Wendel)</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>1</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,619</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|--|-----------------------------|-------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>2</i> | ² Material: | <i>FB2</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,00</i> | ³ Materialalter: | <i>7 d (18.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 mit Wendel / 60 (50 cm oberhalb der Wendel)</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>2</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>7,053</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 mit Wendel / 33 cm (23 cm oberhalb Wendel)</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>3</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,443</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 74</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>4</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>6,824</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 4 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>5</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>3,756</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 5 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>6</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>1,142</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>3</i> | ² Material: | <i>FB2</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,00</i> | ³ Materialalter: | <i>8 d (19.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 56</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>7</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>3,575</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>8</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>3,025</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>4</i> | ² Material: | <i>FB2</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>2,00</i> | ³ Materialalter: | <i>14 d (25.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 73</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>9</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>6,882</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 73</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>10</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>6,514</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>11</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>4,391</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 4 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>12</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>1,083</i> | | |

Daten zu Flüssigboden 3

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|--|-----------------------------|--------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>1</i> | ² Material: | <i>FB3</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>1,99</i> | ³ Materialalter: | <i>18 h (19.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 mit Wendel / 60 (50 cm oberhalb der Wendel)</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>1</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>7,096</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>1</i> | ² Material: | <i>FB3</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>1,99</i> | ³ Materialalter: | <i>22 h (19.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>2</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,369</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>3</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,299</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 4 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>4</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,555</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 5 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>5</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>0,710</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>2</i> | ² Material: | <i>FB3</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>1,99</i> | ³ Materialalter: | <i>7 d (25.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 71</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>6</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>5,506</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>7</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>6,781</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>8</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>1,942</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>3</i> | ² Material: | <i>FB3</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>1,99</i> | ³ Materialalter: | <i>7 d (25.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 73</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>9</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>5,335</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>10</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>5,463</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>11</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>3,009</i> | | |

| Pfahlzugversuch | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Kraftmessdose: | <i>1t Pfahlbock</i> | Wegaufnehmer: | <i>HBM - Typ WSF</i> |
| Versuchsreihen-Nr.: | <i>4</i> | ² Material: | <i>FB3</i> |
| ¹ Dichte [g/cm ³]: | <i>1,99</i> | ³ Materialalter: | <i>7 d (25.10.2016)</i> |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 1 ohne Wendel / 77</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>12</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>5,767</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 2 ohne Wendel / 58</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>13</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>5,351</i> | | |
| ⁴ Pfahl / Pfahllänge [cm]: | <i>Pfahl 3 ohne Wendel / 28</i> | | |
| ⁵ Pfahllage: | <i>14</i> | | |
| ⁶ Maximal übertragene Zugkraft [kN]: | <i>2,155</i> | | |

Anhang 4: Übersicht der Herauszieh Widerstände

| Zeit [h] | Kraftübertragende Pfahlänge [cm] | Typ | Herauszieh Widerstand* [N],[kN] |
|-----------------|---|-------------|--|
| FB1 | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2,204 N |
| 0 | 8 | FID 90 | 1,136 N |
| 0 | 8 | FID 90 | 1,600 N |
| 2 | 8 | FID 90 | 4,011 N |
| 168 | 60 | ohne Wendel | (7,133 kN) |
| 168 | 80 | ohne Wendel | (7,117 kN) |
| 168 | 80 | ohne Wendel | (1,638 kN) |
| FB2 | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2,681 N |
| 0 | 8 | FID 90 | 2,564 N |
| 2 | 8 | FID 90 | 5,423 N |
| 4 | 8 | FID 90 | 8,146 N |
| 18 | 65 | mit Wendel | 2,619 kN |
| 168 | 23 | mit Wendel | 2,443 kN |
| 168 | 50 | mit Wendel | 7,053 kN |
| 168 | 28 | ohne Wendel | 1,142 kN |
| 168 | 58 | ohne Wendel | 3,756 kN |
| 168 | 74 | ohne Wendel | 6,824 kN |
| 192 | 56 | ohne Wendel | 3,575 kN |
| 192 | 58 | ohne Wendel | 3,025 kN |
| 336 | 28 | ohne Wendel | 1,083 kN |
| 336 | 58 | ohne Wendel | 4,391 kN |
| 336 | 73 | ohne Wendel | 6,882 kN |
| 336 | 73 | ohne Wendel | 6,514 kN |
| FB3 | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2,587 N |
| 0 | 8 | FID 90 | 3,026 N |
| 2 | 8 | FID 90 | 7,170 N |
| 2 | 8 | FID 90 | 7,762 N |
| 4 | 8 | FID 90 | 13,342 N |
| 4 | 8 | FID 90 | 17,560 N |
| 18 | 50 | mit Wendel | 7,096 kN |
| 22 | 28 | ohne Wendel | 0,710 kN |

| | | | |
|-----|----|--------------------|------------|
| 22 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | 2,369 kN |
| 22 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | 2,299 kN |
| 22 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | 2,555 kN |
| 168 | 28 | <i>ohne Wendel</i> | 1,942 kN |
| 168 | 28 | <i>ohne Wendel</i> | 3,009 kN |
| 168 | 28 | <i>ohne Wendel</i> | 2,155 kN |
| 168 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | 6,781 kN |
| 168 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | (5,463 kN) |
| 168 | 58 | <i>ohne Wendel</i> | (5,351 kN) |
| 168 | 71 | <i>ohne Wendel</i> | (5,506 kN) |
| 168 | 73 | <i>ohne Wendel</i> | (5,335 kN) |
| 168 | 77 | <i>ohne Wendel</i> | (5,767 kN) |

Anmerkungen:

(...) Bei den Werten in Klammern sind fehlerhafte, abgeschnittene Widerstands-Hebungslinien vorhanden.

Anhang 5: Übersicht der Pfahlzugversuche

| Aushärtezeit t [h] | Pfahl | | | Scherfestigkeit τ [kN/m ²] | Mittelwert der Scherfestigkeit τ [kN/m ²] | τ/c_u | τ/E_{vd} |
|--------------------|-----------------------|-------------|--------------------|---|--|------------|---------------|
| | maßgebende Länge [cm] | Typ | Durchmesser D [cm] | | | | |
| FB1 | | | | | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2.5 | 0.3509 0.1809 0.2548 | 0.2622 | | |
| 2 | 8 | FID 90 | 2.5 | 0.6386 | 0.6386 | | |
| 168 | 60 | ohne Wendel | 3 | 126.1391 | 126.1391 | 1.192 | 1.171 |
| 168 | 80 | ohne Wendel | 3 | 94.3921 | 94.3921 | 0.892 | 0.876 |
| 168 | 80 | ohne Wendel | 3 | 21.7246 | 21.7246 | 0.205 | 0.202 |
| FB2 | | | | | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2.5 | 0.4270 0.4082 | 0.4176 | | |
| 2 | 8 | FID 90 | 2.5 | 0.8636 | 0.8636 | | |
| 4 | 8 | FID 90 | 2.5 | 1.2972 | 1.2972 | | |
| 18 | 65 | mit Wendel | 9 | 14.2505 | 14.2505 | 0.613 | 4.119 |
| 168 | 23 | mit Wendel | 9 | 37.5667 | 37.5667 | 0.834 | 4.548 |
| 168 | 50 | mit Wendel | 9 | 49.8898 | 49.8898 | 1.107 | 6.040 |
| 168 | 28 | ohne Wendel | 3 | 43.2750 | 43.2750 | 0.960 | 5.239 |
| 168 | 58 | ohne Wendel | 3 | 68.7110 | 68.7110 | 1.525 | 8.319 |
| 168 | 74 | ohne Wendel | 3 | 97.8444 | 97.8444 | 2.171 | 11.846 |
| 192 | 56 | ohne Wendel | 3 | 67.7356 | 61.5370 | 1.366 | 7.450 |
| 192 | 58 | ohne Wendel | 3 | 55.3384 | | | |
| 336 | 28 | ohne Wendel | 3 | 41.0392 | 41.0392 | 0.770 | 3.291 |
| 336 | 58 | ohne Wendel | 3 | 80.3275 | 80.3275 | 1.508 | 6.442 |
| 336 | 73 | ohne Wendel | 3 | 100.0278 | 97.3534 | 1.827 | 7.807 |
| 336 | 73 | ohne Wendel | 3 | 94.6790 | | | |
| FB3 | | | | | | | |
| 0 | 8 | FID 90 | 2.5 | 0.4119 0.4818 | 0.4469 | | |
| 2 | 8 | FID 90 | 2.5 | 1.1418 1.2360 | 1.1889 | | |
| 4 | 8 | FID 90 | 2.5 | 2.1245 2.7962 | 2.4604 | | |
| 18 | 50 | mit Wendel | 9 | 50.1939 | 50.1939 | 1.423 | 16.493 |
| 22 | 28 | ohne Wendel | 3 | 26.9048 | 26.9048 | 0.794 | 8.145 |
| 22 | 58 | ohne Wendel | 3 | 43.3377 | | | |
| 22 | 58 | ohne Wendel | 3 | 42.0572 | 44.0451 | 1.300 | 13.334 |
| 22 | 58 | ohne Wendel | 3 | 46.7403 | | | |
| 168 | 28 | ohne Wendel | 3 | 73.5902 | | | |
| 168 | 28 | ohne Wendel | 3 | 114.0231 | 89.7583 | 1.295 | 8.125 |
| 168 | 28 | ohne Wendel | 3 | 81.6616 | | | |
| 168 | 58 | ohne Wendel | 3 | 124.0494 | | | |
| 168 | 58 | ohne Wendel | 3 | 99.9383 | 107.2924 | 1.548 | 9.713 |
| 168 | 58 | ohne Wendel | 3 | 97.8894 | | | |
| 168 | 71 | ohne Wendel | 3 | 82.2824 | | | |
| 168 | 73 | ohne Wendel | 3 | 77.5426 | 79.7641 | 1.151 | 7.221 |
| 168 | 77 | ohne Wendel | 3 | 79.4672 | | | |

Anmerkungen:

- 1) Ergebnisse der Pfahlzugversuche an FB1 nur bedingt repräsentativ (Gefügestörung durch Vorbohren und äußerst schwerem Einbringen des Pfahles)
- 2) Vergleichbare Pfahllängen sind in einer Farbe hinterlegt

Anhang 6: Übersicht der Ergebnisse der einaxialen Druckversuche

Die nachstehende Tabelle listet die Werte der undrainierten Kohäsion bzw. Scherfestigkeit auf, die anhand einaxialer Druckversuche ermittelt wurden.

| | c_u [kN/m ²] | | | | | | | | |
|------------|----------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|------|--------|--------|
| | 0,75 d | 1 d | 2 d | 3 d | 6 d | 7 d | 14 d | 28 d | 56 d |
| FB1 | 53,84 | 54,85 | 49,15 | 64,15 | 101,51 | 97,77 | - | 270,83 | 369,77 |
| | 48,85 | 51,63 | 56,64 | 104,03 | 96,10 | 113,86 | - | 267,56 | 351,56 |
| FB2 | 19,83 | 21,17 | 25,41 | 27,34 | 41,23 | 45,51 | - | 66,08 | 92,96 |
| | 26,66 | 24,08 | 22,76 | 31,24 | 39,7 | 44,62 | - | 73,35 | 89,47 |
| FB3 | 27,86 | 32,57 | 40,86 | 42,38 | 66,45 | 61,85 | - | 129,30 | 147,42 |
| | 42,71 | 35,17 | 45,81 | 50,14 | 72,07 | 76,73 | - | 135,47 | 144,75 |

Die einaxialen Druckversuche wurden durch das IGtH nach DIN 18136 durchgeführt. Geprüft wurden zylindrische Proben mit einer Höhe von ca. 11 cm und einem Durchmesser von ca. 4,6 cm. Die aufgeführten Werte wurden dem Entwurf zum Bericht „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ zum Auftrag vom 20.07.2016 mit dem Stand 16.02.2017 entnommen.

Anhang 7: Übersicht der Ergebnisse der dynamischen Plattendruckversuche

Die nachstehende Tabelle listet die Werte des dynamischen Verformungsmoduls auf, die mittels dynamischer Plattendruckversuche bestimmt wurden.

| | E_{vd} [MN/m ²] | | | | | | | |
|------------|-------------------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 0,75 d | 1 d | 2 d | 3 d | 6 d | 7 d | 14 d | 28 d |
| FB1 | 38,57 | 56,91 | 71,65 | 115,97 | 96,29 | 87,32 | - | 79,59 |
| | 50,11 | 70,02 | 85,01 | 110,47 | 72,42 | 118,62 | - | 83,43 |
| | 35,59 | 68,45 | 97,26 | 105,14 | 86,09 | 117,18 | - | 145,47 |
| FB2 | 3,46 | 3,81 | 3,98 | 4,72 | 9,45 | 9,17 | 7,60 | 12,86 |
| | - | 4,01 | 3,33 | 5,09 | 6,51 | 6,82 | 17,34 | 13,95 |
| | - | 3,01 | 2,85 | 4,11 | 8,20 | 8,79 | - | 11,04 |
| FB3 | 3,03 | 3,41 | 4,19 | - | - | 12,00 | 17,11 | 12,54 |
| | 3,11 | 3,23 | 4,24 | - | - | 13,48 | 14,16 | 24,82 |
| | 2,99 | 3,27 | 4,72 | - | - | 7,66 | 19,42 | 24,36 |

Die dynamischen Plattendruckversuche wurden durch das IGtH nach TP BF-StB Teil B 8.3 durchgeführt. Die aufgeführten Werte wurden dem Entwurf zum Bericht „Durchführung von Kalibrierversuchen an Flüssigböden“ zum Auftrag vom 20.07.2016 mit dem Stand 16.02.2017 entnommen.

Anhang 8: Übersicht der Prüfzeitpunkte (c_u , E_{vd} , τ_f)

| | Wert | 0h | 2h | 4h | 18h | 24h | 2d | 3d | 6d | 7d | 8d | 14d | 28d | 56d |
|-----|----------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| FB1 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | - |
| | τ | x | x | - | - | - | - | - | - | x | - | - | - | - |
| FB2 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | x | - | - | - | - | x | x | x | - | - |
| FB3 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | - | - | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | x | x | - | - | - | x | - | - | - | - |

- x Messergebnisse vorhanden
- Keine Messung erfolgt
- Verwertbare Ergebnisse aller Versuche vorhanden

| | Wert | 0h | 2h | 4h | 18h | 24h | 2d | 3d | 6d | 7d | 8d | 14d | 28d | 56d |
|-----|----------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| FB1 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | - |
| | τ | x | x | - | - | - | - | - | - | ~ | - | - | - | - |
| FB2 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | x | - | - | - | - | x | x | x | - | - |
| FB3 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | - | - | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | x | x | - | - | - | ~ | - | - | - | - |

- x Messergebnisse vorhanden und plausibel
- Keine Messung erfolgt
- ~ Messergebnisse vorhanden, allerdings nicht verwertbar da unplausibel
- Verwertbare Ergebnisse aller Versuche vorhanden

| | Wert | 0h | 2h | 4h | 18h | 24h | 2d | 3d | 6d | 7d | 8d | 14d | 28d | 56d |
|-----|----------|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|
| FB1 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | - |
| | τ | x | x | - | - | - | - | - | - | ~ | - | - | - | - |
| FB2 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | ~ | - | - | - | - | x | x | x | - | - |
| FB3 | c_u | - | - | - | x | x | x | x | x | x | - | - | x | x |
| | E_{vd} | - | - | - | x | x | x | - | - | x | - | x | x | - |
| | τ | x | x | x | ~ | ~ | - | - | - | ~ | - | - | - | - |

- x Messergebnisse vorhanden und plausibel
- Keine Messung erfolgt
- ~ Messergebnisse vorhanden, allerdings nicht verwertbar da unplausibel oder Zugversuch an nur einer Pfahlänge vorhanden
- Verwertbare Ergebnisse aller Versuche vorhanden