

9

97. Jahrgang
September 2020
ISSN 0932-8351
A 1556

Bautechnik

Zeitschrift für den gesamten Ingenieurbau



Reibungswinkel und Kohäsion von RSS-Flüssigboden nach dynamischer Belastung

Dietmar Mähner, Marius Dorgeloh, Jacob Lengers

Reibungswinkel und Kohäsion von RSS-Flüssigboden nach dynamischer Belastung

Der folgende Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss von dynamischen Lasten auf den Reibungswinkel und die Kohäsion von Flüssigboden. Im Fokus der vorgestellten Untersuchungen lag die Beständigkeit der genannten bodenmechanischen Parameter gegenüber simulierten Schienenverkehrslasten, wie sie bspw. für Sohlauffüllungen unter Schienenverkehrswegen in Tunneln anzunehmen sind. Auf diese Zielstellung und auf die beim Tunnelbau überwiegend vorkommenden Bodenarten wurden angepasste Flüssigbodenrezepturen entwickelt. Dynamisch belastete und nicht belastete Probekörper wurden hergestellt und nach einer 28-tägigen Lagerung hinsichtlich ihrer Kohäsion und ihres Reibungswinkels miteinander verglichen. Für die gewählten Randbedingungen konnte dabei kein nachteiliger Einfluss der dynamischen Belastung auf die untersuchten Rezepturen festgestellt werden.

Stichworte dynamische Belastung; Flüssigboden; Sohlverfüllung; Tunnelbau

About the behavior of liquid soil under dynamic load

The following article deals with the behaviour of liquid soil under dynamic loading. The focus was on the resistance of the soil-mechanical parameters against simulated rolling loads such as those to be assumed for fillings under railways in tunnels. Liquid soil recipes adapted to the objectives and to the soil types predominantly found in tunnel construction were developed. Specimens that were dynamically loaded and not dynamically loaded were produced and, after 28 days of hermetic storage, compared with each other with regard to their cohesion and their angle of friction. For the selected boundary conditions, no adverse influence of the dynamic load on the investigated formulations could be determined.

Keywords dynamic load; liquid soil; tunnel floor backfilling; tunnel construction

1 Einleitung und Problemstellung

Der Einsatz von Flüssigboden kann eine kosteneffiziente und ressourcenschonende Herstellung von Tunnelbauwerken unterstützen, indem das ausgebrochene Gestein bzw. Bodenmaterial mittels einer auf die jeweilige Ausbruchszusammensetzung und die gewünschten technologischen wie auch Gebrauchseigenschaften eingestellten Rezeptur für bestimmte Bereiche wiederverwendet werden kann. Durch dieses Vorgehen können notwendige Materialströme minimiert, teils neue Technologien eingesetzt und somit auch Kosteneinsparungen erzielt werden. Das diesen Untersuchungen zugrunde liegende RSS-Flüssigbodenverfahren, im Folgenden Flüssigbodenverfahren genannt, findet seinen Anwendungsschwerpunkt aktuell im Bereich Rohrleitungs- und Kanalbau. Aus dem Zusammenhang mit Rohr- bzw. Kombitrassen, bestehend aus Regenwasserleitungen, Schmutzwasserleitungen und sonstigen Leitungen, leitet sich die Abkürzung RSS ab. Als mögliches weiteres Anwendungsgebiet soll die Eignung als Sohlverfüllung bei Tunnelbauwerken untersucht werden. Durch Verkehrslasten aus Straßen- und Zugverkehr wird der eingebaute Flüssigboden dynamischen Belastungen ausgesetzt. Im Hinblick auf die dynamische Beständigkeit der bodenmechanischen Parameter gegenüber dynamischen Einflüssen gibt es derzeit nur wenige Aussagen bzw. Untersuchungen. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens führte das Institut für unterirdisches Bauen (IuB) der FH Münster Untersuchungen zur dynamischen Beständigkeit von Flüssigboden gegen simulierte Schienenverkehrslasten durch.

Die üblichen im Tunnelbau verwendeten Sohlauffüllungen bestehen aus Beton mit starren Zementsteinstrukturen. Beim hier geprüften Flüssigboden beruht die Belastbarkeit ausschließlich auf den Ergebnissen eines Rückverfestigungsprozesses der eingesetzten Materialien ohne die Ausbildung starrer und schwingungsübertragender Zementsteinstrukturen. Im Falle von positiven Untersuchungsergebnissen könnte der Bodenaushub ressourcenschonend wieder als Baustoff verwendet werden.

2 Stand der Technik

Das Flüssigbodenverfahren ermöglicht es, aus einem Boden-Bindemittelgemisch ein zeitweise fließfähiges und selbstverdichtendes Verfüllmaterial (ZFSV) herzustellen. Als Ausgangsmaterial wird idealerweise der Bodenaushub der konkreten Baumaßnahme verwendet. Es können jedoch auch geeignete Recyclingmaterialien oder andere Schüttgüter verwendet werden, wenn diese keine rest- oder latent hydraulischen Inhaltsstoffe enthalten. Zur Erreichung der zeitweisen Fließfähigkeit wird dem Ausgangsmaterial ein Plastifikator und Zugabewasser beigemischt. Die sich hierbei bildenden Gleitschichten zwischen den Bodenpartikeln bewirken die Fließfähigkeit und können durch den teilweisen Entzug des Zugabewassers wieder abgebaut werden, was in der Folge zur Rückverfestigung führt. Dieser Vorgang wird durch die Zugabe von hydraulischen Bindemitteln mit entsprechenden Hydratationsverläufen zeitlich gesteuert, ohne diese für die Ausbildung geschlossener, starrer Zementsteinstruk-

turen zu nutzen. Als Verfüllung von Gräben für Rohrleitungen und Kabel hat sich das Flüssigbodenverfahren u. a. aufgrund der selbstverdichtenden Eigenschaften und der resultierenden optimalen Umschließung der Rohre bereits etabliert [1–3]. Wesentliche Parameter, wie die Fließfähigkeit und der Verlauf der Rückverfestigung, lassen sich an die projektspezifischen Anforderungen und an das zur Verfügung stehende Grundmaterial anpassen. Mit dem Heft 563 [4] veröffentlichte die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) ein Hinweisblatt mit Qualitätsanforderungen an Flüssigboden, wie er im Erdbau eingesetzt werden kann. Im Zusammenhang mit der Erstellung von Verkehrstunneln liegt der wesentliche Vorteil des Flüssigbodenverfahrens in der Wiederverwendung der im Zuge der Baumaßnahme reichlich anfallenden Aushub- und Ausbruchmaterialien. Diese können unter Zugabe von modifizierten Bentoniten, mineralischen Bindemitteln und Wasser zu Flüssigboden verarbeitet und vor Ort wiederverwendet werden. Weiterhin zeigen Untersuchungen für das Anwendungsgebiet als Grabenverfüllung einen deutlich reduzierten Primärenergieverbrauch und CO_2 -Ausstoß im Vergleich zur konventionellen Bauweise [5]. Die erfolgreiche Einführung des Flüssigbodenverfahrens in den Tunnelbau lässt daher ebenfalls deutliche Einsparungen an CO_2 -Emissionen und Primärenergie erwarten. Der überwiegende Teil der Einsparungen resultiert hierbei auf die entfallenden bzw. deutlich reduzierten Transportwege.

Das RSS-Flüssigbodenverfahren, wie es den vorliegenden Versuchsergebnissen zugrunde liegt, ist eine Entwicklung des Forschungsinstituts für Flüssigboden GmbH und des Ingenieurbüros LOGIC. Mithilfe des RSS-Flüssigbodenverfahrens können viele natürlich vorkommende Bodenarten, unter Vermeidung der Herausbildung starrer Fremdstrukturen und bei Erhaltung gewünschter bodentypischer Eigenschaften, als Verfüllmaterialien wiederverwendet werden. Der Rückverfestigungsvorgang ist dabei nicht durch die Bildung starrer Zementsteinstrukturen gekennzeichnet, sondern durch die Ausbildung von Reibung und Kohäsion in der Folge der chemischen und mineralogischen Anlagerung von Wasser an Teile der Bodenmatrix. Dabei übernehmen die zwei Zugabestoffe (ein schneller Zement ohne nachreagierende Komponenten wie z. B. Flugasche oder Hüttensande etc. und Schichtmineralien mit strukturell bedingt erhöhter Wasserretention bis Anlagerungsfähigkeit) infolge eines alternativen und zeitlich sehr genau aufeinander abgestimmten Reaktionsverlaufs andere Aufgaben als in bisher bekannten, hydraulisch abbindenden und ebenfalls zeitweise fließfähigen Materialien. Beispielsweise bildet der Zement lokal begrenzte Kristallstrukturen, sog. Agglomerationen, und keine geschlossenen, starren Strukturen [6].

Zum Einfluss dynamischer Einwirkungen, wie sie bspw. aus Zugverkehr entstehen können, wurden hinsichtlich der Kohäsion und des Reibungswinkels von Flüssigboden bisher keine Untersuchungsergebnisse publiziert.

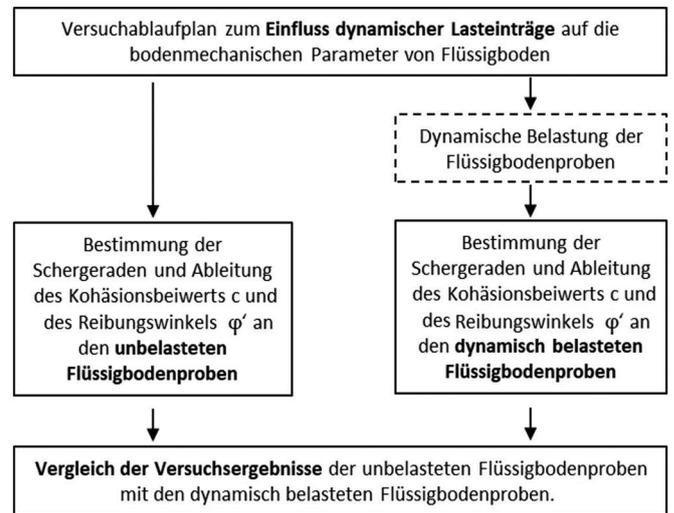


Bild 1 Versuchsablaufplan zum Einfluss dynamischer Lasteinträge auf die bodenmechanischen Kenngrößen von Flüssigbodenproben
Test schedule regarding the influence of dynamic load on the soil mechanical parameters of liquid soil samples

In einer Veröffentlichung mit dem Fokus auf die Bestimmung von bodendynamischen Kennziffern wie dem dehnungsabhängigen Schermodul und den dehnungsabhängigen Dämpfungen in Feld und Labor von Studer und Weber [7] wurden vergleichende Untersuchungen an statisch und dynamisch belasteten Bodenproben durchgeführt. Die Untersuchungen ergaben, dass die wesentlichen Festigkeitseigenschaften wie der Reibungswinkel und die Kohäsion unter statischen und dynamischen Lasten als weitgehend gleich betrachtet werden können. In einer weiteren Veröffentlichung zum Thema „Kumulative und dynamisches Verhalten von Böden“ von Triantafyllidis, Wichtmann und Niemunis [8] wird ebenfalls davon berichtet, dass zyklische und dynamische Einwirkungen auf nicht bindige Bodenproben keine nennenswerte Veränderung auf die dort gemessene Scherdehnung haben. Um zu erfassen, inwieweit dynamische Einwirkungen den Reibungswinkel und die Kohäsion von Flüssigboden beeinflussen, wurden im Rahmen eines Forschungsvorhabens des Instituts für unterirdisches Bauen (IuB) der FH Münster und des Ingenieurbüros LOGIC Logistic Engineering GmbH (Leipzig) die in Abschn. 3 beschriebenen Versuche durchgeführt. Das Vorhaben wurde durch das zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses vom deutschen Bundestag gefördert.

3 Versuchsbeschreibung

Die Untersuchungen beschränkten sich auf die Bestimmung und den Vergleich der Parameter der Scherfestigkeit von dynamisch belasteten und nicht dynamisch belasteten Proben aus RSS Flüssigboden. Mit „dynamisch belastet“ ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass die Bodenprobe vor dem Scherversuch einer definierten dynamischen Belastung unterzogen wurde, alternativ könn-

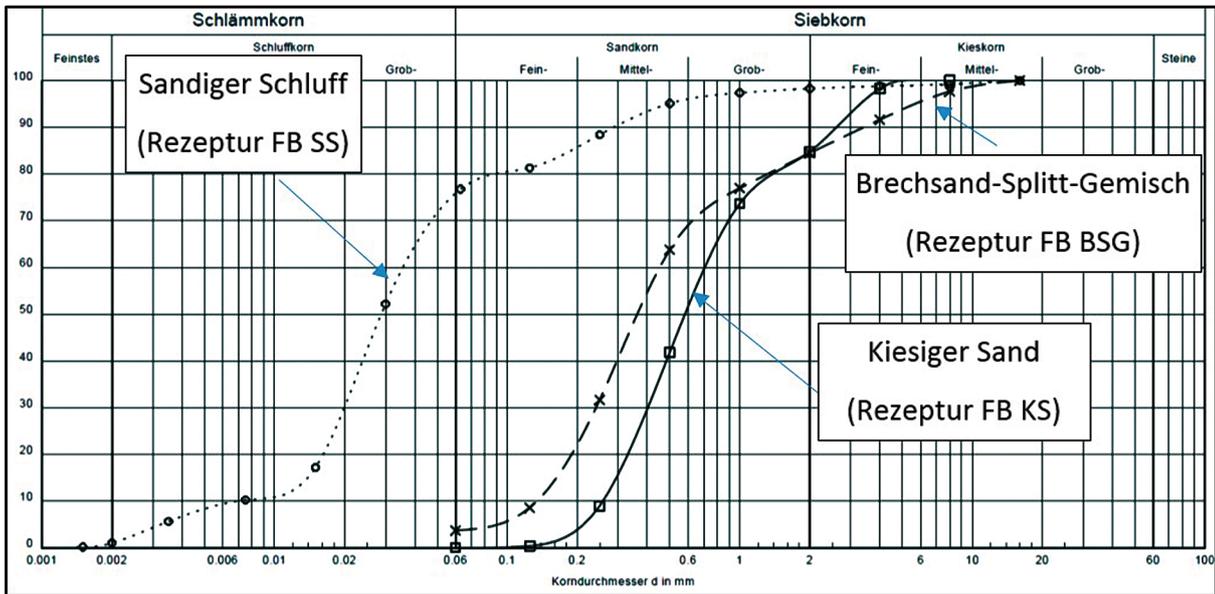


Bild 2 Korngrößenverteilung der Grundmaterialien
 Particle size distribution of the basic raw material

te daher auch von einer Vorbelastung gesprochen werden. Die Scherfestigkeit wird allgemein für erdstatische Berechnungen benötigt. Aus ihr können die Scherparameter Kohäsion und Reibungswinkel abgeleitet werden. Zur Ermittlung der Scherparameter stehen im Wesentlichen zwei Verfahren zur Verfügung: der direkte Scherversuch, z. B. im Rahmenschergerät, und der dreiaxiale Druckversuch im Triaxialgerät [9]. Ein Triaxialgerät stand für die Versuche nicht zur Verfügung. Es wurde daher auf drei vorhandene Rahmenschergeräte zurückgegriffen. Eine in Abschn. 3.3 genauer beschriebene Modifizierung der Rahmenschergeräte erlaubt einen ungestörten Transfer der Bodenprobe zwischen der Prüfmaschine, mit welcher die dynamische Belastung aufgebracht wurde, und dem Rahmenschergerät. Weitergehende Fragestellungen in Bezug auf das Verformungsverhalten oder die Festigkeitsentwicklung sind fraglos von großer Bedeutung und Interesse und sollten in künftigen Forschungsvorhaben betrachtet werden. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Ablauf und die Konzeption des Untersuchungsprogramms.

3.1 Grundmaterialien und Rezepturen

Die Möglichkeit der Entwicklung von individuell einstellbaren Rezepturen zur Herstellung von Flüssigboden mit speziellen bodenmechanischen Eigenschaften lässt die Verwendung unterschiedlichster Grundmaterialien zu, wobei sichergestellt werden sollte, dass die Gütebestimmungen nach RAL-GZ 507, Stand 2014 [10] als Grundlage der Gütesicherung eingehalten werden. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden drei verschiedene Ausgangsmaterialien zur Herstellung der Flüssigbodenproben verwendet.

In Bild 2 sind die Korngrößenverteilungen der verwendeten Ausgangsmaterialien dargestellt, aus denen sich die technische Bezeichnung der Bodenart ableiten lässt. Neben diesen Grundmaterialien wurden für die Flüssigbodenprüfkörper das Compound „RSS Breitband FBC 16“ und Zement „CEM I 42,5 R“ sowie Zugabewasser verwendet. Bei der Komponente „RSS Breitband FBC 16“ handelt es sich um Schichtmineralien auf Basis ehemaliger und gezielt veränderter Bentonite, die einerseits das temporäre Fließverhalten des frisch hergestellten

Tab. 1 Zusammensetzung der Rezepturen für die Flüssigbodenprüfkörper
 Composition of the liquid soil test samples

Zusammensetzung der Rezepturen für die Flüssigbodenprüfkörper			
Bezeichnung	Rezeptur FB SS	Rezeptur FB KS	Rezeptur FB BSG
Bodenart lt. Korngrößenverteilung	sandiger Schluff	kiesiger Sand	Brechsand-Splitt-Gemisch
Grundmaterial [kg/m ³]	1 008	1 641	1 298
RSS Breitband FBC [kg/m ³]		31–44	
CEM I 42,5 R [kg/m ³]		46–50	
Gesamtwasser (inkl. Eigenfeuchte) [kg/m ³]		452–591	

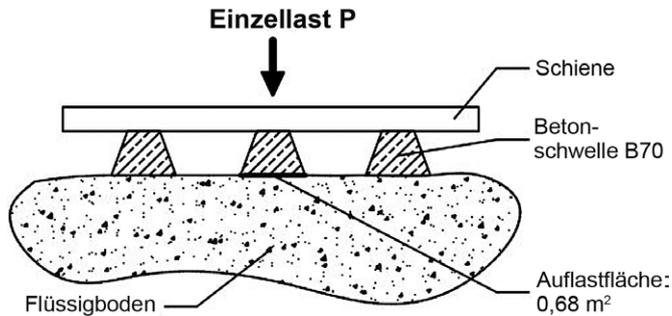


Bild 3 Lasteinleitung direkt in den eingebauten Flüssigboden
Direct load introduction into the placed liquid soil

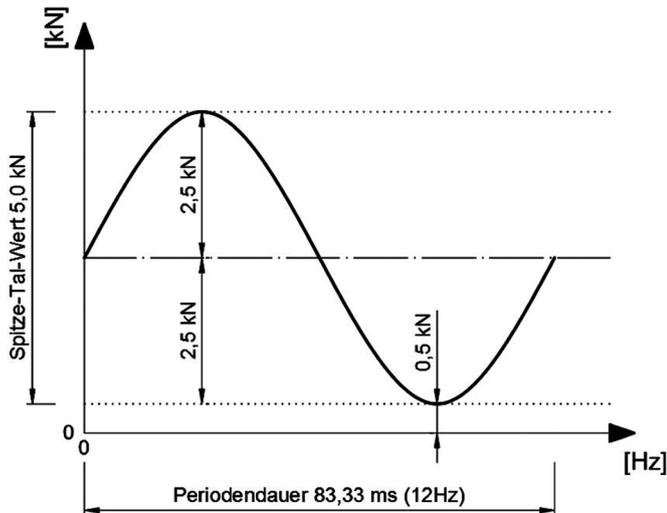


Bild 4 Einwirkungsprofil der dynamischen Belastung
Load profile of the dynamic load

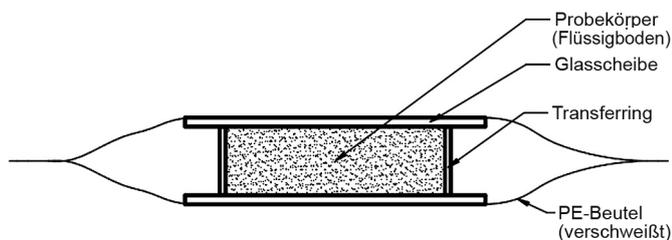


Bild 5 Probenlagerung im Transferring und verschweißten PE-Beutel
Sample stored in transfer ring and sealed PE bag



Bild 6 Lagerung von je zwölf Transferringen bis zur Prüfung nach 28 d
Storage of twelve transfer rings each until the test

Flüssigbodens ermöglichen, andererseits aber auch einen wesentlichen Beitrag bei der Rückverfestigung über die Ausbildung von steuerbarer Kohäsion leisten. Die genauen Zusammensetzungen der Rezepturen besitzen keine Allgemeingültigkeit und müssen immer an das vorhandene Grundmaterial und die technischen Anforderungen der jeweiligen Baumaßnahme angepasst werden. Um diesem Umstand Sorge zu tragen, werden an dieser Stelle lediglich Bandbreiten der Komponenten veröffentlicht (Tab. 1).

3.2 Dynamische Lastannahmen

Um überprüfen zu können, ob die dynamischen Einwirkungen aus Schienenverkehr eine mögliche nachteilige Veränderung bodenmechanischer Kennwerte haben, musste zuerst ein geeignetes Ersatzlastsystem gewählt werden. Die Amplitude und die Frequenz der dynamischen Ersatzlasten wurden in Anlehnung an das Lastmodell HSLM (High Speed Load Model) der DIN EN 1991-2 [11] bestimmt. Das Lastmodell HSLM ergibt sich aus den Anforderungen der Europäischen Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität [11] und stellt die dynamische Auswirkung von gegliederten, konventionellen und regelmäßigen Hochgeschwindigkeitsreisezügen dar. Aus einer angenommenen Streckengeschwindigkeit von 300 km/h (83,3 m/s) und einem gemittelten Achsabstand von 6,9 m ergibt sich eine Belastungsfrequenz von 12 Hz. Die Lastamplitude basiert auf einer Einzellast P von 210 kN. Auf der sicheren Seite liegend wurde bei diesem Ansatz angenommen, dass die Betonschwellen ohne eine lastverteilende Zwischenschicht oder feste Fahrbahn direkt auf dem eingebauten Flüssigboden aufliegen (Bild 3).

Direkt unter der Schwelle kann weiterhin näherungsweise von einer einaxialen Verformung des Flüssigbodens ausgegangen werden, was der nachfolgend beschriebenen Versuchsanordnung im dynamisch belasteten Scherring entspricht. Weitere mögliche Verformungszustände des Flüssigbodens, wie sie bspw. direkt neben den Schwellen und der Lasteinleitung entstehen können, waren nicht Gegenstand dieser Untersuchungen und können mit der gewählten Versuchsanordnung auch nicht abgebildet werden. Bei diesem gewählten Ansatz treten direkt unterhalb der Betonschwelle Spannungen von ca. $0,3 \text{ N/mm}^2$ auf. Um eine Veränderung der bodenmechanischen Parameter durch die aufgetragenen dynamischen Einwirkungen bewusst herbeizuführen und um dem Arbeitsbereich der verwendeten servohydraulischen Prüfmaschine zu entsprechen, wurden die aus Bild 3 resultierenden Spannungen auf $1,25 \text{ N/mm}^2$ erhöht. Bezogen auf den Versuchsaufbau mit einer nach [12] genormten Probenfläche von 4000 mm^2 ergibt sich das in Bild 4 dargestellte Einwirkungsprofil.

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden für jeden Versuch insgesamt 1 Mio. Lastzyklen aufgebracht. Für eine jährliche Betrachtungsweise am Beispiel des Modellzugs A1 aus [11] entspricht dies einer täglichen Überfahrtszahl von etwa 76 Zügen.

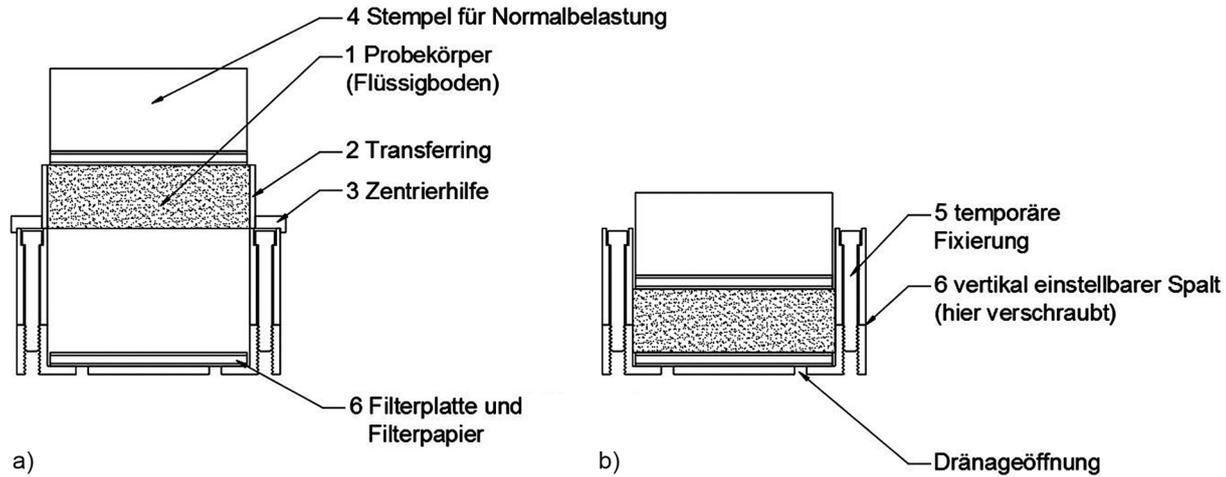


Bild 7 Transfer der Bodenprobe in den fixierten Scherring: a) Transferring auf Scherring aufgesetzt, b) Bodenprobe in Scherring eingedrückt
Transfer of the soil sample into the fixed shear ring: a) transfer ring placed on shear ring, b) soil sample pressed into shear ring

3.3 Scherversuche

Zur Bestimmung der Zielparame-ter Reibungswinkel und Kohäsion wurden Rahmenscherversuche nach DIN 18137-3 [12] durchgeführt. Je Rezeptur wurden zwei Durchgänge mit je zwölf Einzelversuchen vorgenommen. In einem ersten Schritt wurden die homogenisierten Flüssigbodenproben in zwölf Transferringe eingebaut, um zu gewährleisten, dass diese ungestört gelagert und anschließend in die Rahmenschergeräte eingebaut werden können. Um einen Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung zu verhindern, wurden diese beidseitig mit Glasplatten abgedeckt und zusätzlich luftdicht in PE-Folie eingeschweißt (Bilder 5 und 6).

Nach einer Wartezeit von 28 d wurden die Proben aus den Transferringen herausgedrückt. Sechs dieser Proben wurden umgehend einem Scherversuch unterzogen. Die sechs verbliebenen Proben wurden zuerst dynamisch belastet und anschließend hinsichtlich ihrer Scherfestigkeit untersucht.

Um das Gefüge der Proben möglichst wenig zu stören, wurden die verwendeten Schergeräte dahingehend modifiziert, dass die Scherringe des Geräts miteinander verschraubt und aus dem Schergerät entnommen werden können. Bild 7 zeigt schematisch den Einbau der Bodenprobe vom Transferring in den Scherring.

Anschließend wurden je drei Scherringe, zwecks dynamischer Belastung, axial übereinander in einer servohydraulischen Prüfmaschine angeordnet (Bild 8). Die aufbrachte dynamische Belastung wirkte über die in Bild 7 markierten Stempel gleichermaßen auf alle drei Proben. Es wurden jeweils 1 Mio. Lastzyklen mit einer Frequenz von 12 Hz gemäß Bild 4 durchgeführt.

Nach dem Ende der Lastzyklen konnten die Scherringe direkt in das Rahmenschergerät eingebaut, die Verschraubung gelöst und die Scherversuche durchgeführt werden (Bild 9).

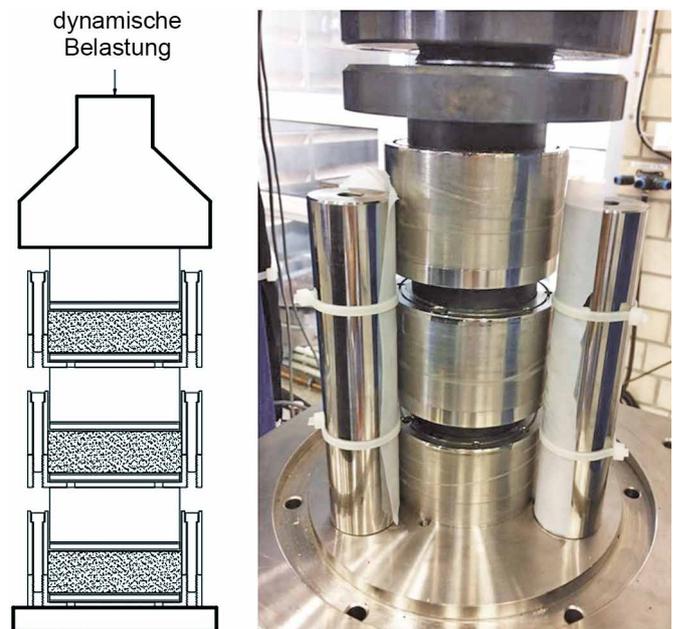


Bild 8 Dynamische Belastung der axial angeordneten Scherringe
Dynamic loading on the axially arranged shear rings

Für Flüssigboden mit sandigem Schluff und Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial wurden jeweils acht Schergeraden aus je drei Einzelversuchen bestimmt. Für die Rezeptur mit kiesigem Sand als Ausgangsmaterial wurden abweichend zehn anstatt acht Schergeraden ermittelt.

4 Versuchsergebnisse

Im linken Teil der Bilder 10–15 sind jeweils die Messwerte ohne dynamische Belastung und im rechten Teil die Messwerte mit dynamischer Belastung der Proben dargestellt. Die gepunktete Linie stellt jeweils den Mittelwert dar.

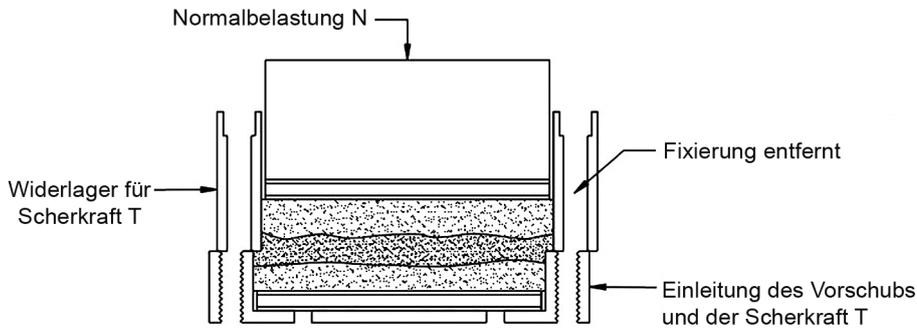


Bild 9 Scherversuch mit entfernter Fixierung
Shear test with removed fixing

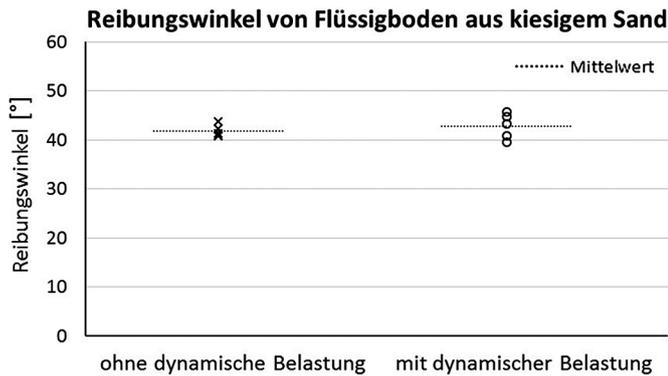


Bild 10 Veränderung des Reibungswinkels unter simulierter Schienenersatzlast (kiesiger Sand als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB KS), jeweils fünf Messwerte
Change in the friction angle after simulated rail load (gravelly sand as basic raw material using composition FB KS), five measurements each

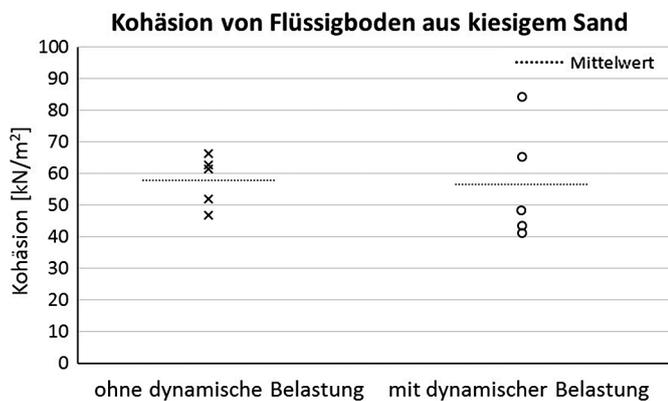


Bild 11 Veränderung der Kohäsion unter simulierter Schienenersatzlast (kiesiger Sand als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB KS), jeweils fünf Messwerte
Change in the cohesion after simulated rail load (gravelly sand as basic raw material using composition FB KS), five measurements each

4.1 Kiesiger Sand als Ausgangsmaterial

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse für eine Flüssigbodenrezeptur mit kiesigem Sand als Ausgangsmaterial vorgestellt.

In Bild 10 sind die Messwerte des Reibungswinkels in Abhängigkeit von der dynamischen Belastung dargestellt.

Der arithmetische Mittelwert des Reibungswinkels beträgt für die nicht dynamisch belasteten Flüssigbodenproben 42° . Für die dynamisch belasteten Flüssigbodenproben liegt mit 43° ein nahezu unveränderter mittlerer Reibungswinkel vor. Nach dynamischer Belastung erhöhte sich die Standardabweichung von 1° auf 2° .

Die Messwerte der Kohäsion in Abhängigkeit von der dynamischen Belastung sind in Bild 11 dargestellt. Die Kohäsion der dynamisch belasteten Flüssigbodenproben lag mit 57 kN/m^2 um nur 1 kN/m^2 niedriger als der Mittelwert der Kohäsion von nicht dynamisch belasteten Flüssigbodenproben. Die Standardabweichung stieg von 7 kN/m^2 auf 16 kN/m^2 .

4.2 Sandiger Schluff als Ausgangsmaterial

Nachfolgend werden die Versuchsergebnisse für eine Flüssigbodenrezeptur mit sandigem Schluff als Ausgangsmaterial dargestellt. Der Mittelwert des Reibungswinkels für die nicht dynamisch belasteten Flüssigbodenproben lag bei 24° . Der mittlere Reibungswinkel der dynamisch belasteten Flüssigbodenproben erhöhte sich um 33% auf 32° . Die Standardabweichung des mittleren Reibungswinkels von nicht dynamisch belasteten Flüssigbodenproben lag bei $3,6^\circ$. Die dynamisch belasteten Proben wiesen hingegen eine Standardabweichung von $6,3^\circ$ auf.

Gemäß Bild 13 steigerte sich die mittlere Kohäsion der dynamisch unbelasteten Flüssigbodenproben von 26 kN/m^2 um ca. 80% auf 47 kN/m^2 . Abweichend von den übrigen Bodenproben ist nach dynamischer Belastung von Flüssigboden aus sandigem Schluff eine Verringerung der Streuung der Kohäsion von $24,2 \text{ kN/m}^2$ auf $17,1 \text{ kN/m}^2$ zu verzeichnen.

4.3 Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial

Die Versuchsergebnisse für eine Flüssigbodenrezeptur mit Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial werden in den Bildern 14 und 15 dargestellt.

Der mittlere Reibungswinkel der dynamisch unbelasteten Proben lag mit 50° auf einem ähnlichen Niveau wie der

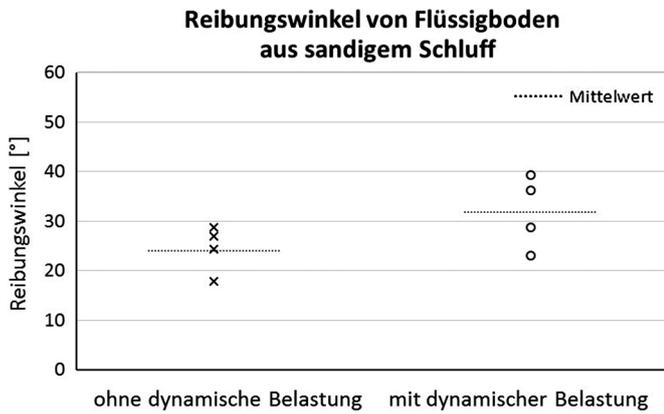


Bild 12 Veränderung des Reibungswinkels unter simulierter Schienenersatzlast (sandiger Schluff als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB SS), jeweils vier Messwerte
Change in the friction angle after simulated rail load (sandy silt as basic raw material using composition FB SS), four measurements each

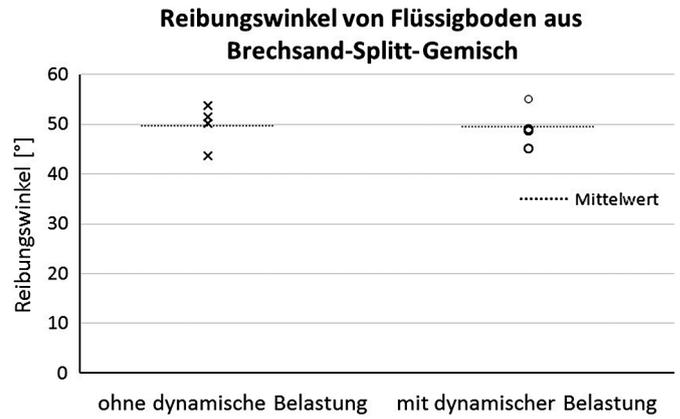


Bild 14 Veränderung des Reibungswinkels unter simulierter Schienenersatzlast (Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB BSG), jeweils vier Messwerte
Change in the friction angle after simulated rail load (Crushed sand and split mixture as basic raw material using composition FB BSG), four measurements each

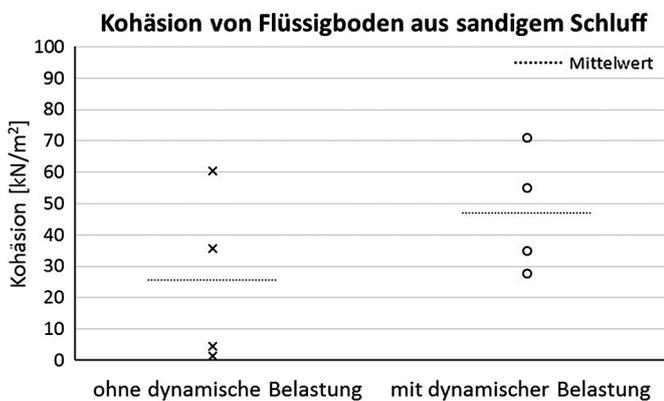


Bild 13 Veränderung der Kohäsion unter simulierter Schienenersatzlast (sandiger Schluff als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB SS), jeweils vier Messwerte
Change in the cohesion after simulated rail load (sandy silt as basic raw material using composition FB SS), four measurements each

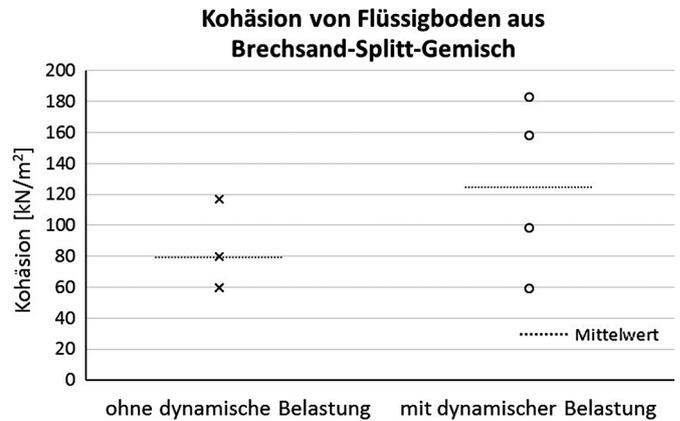


Bild 15 Veränderung der Kohäsion unter simulierter Schienenersatzlast (Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial mit Rezeptur FB BSG), jeweils vier Messwerte
Change in cohesion after simulated rail load (Crushed sand and split mixture as basic raw material using composition FB BSG), four measurements each

Mittelwert der Reibung der dynamisch belasteten Bodenprobe mit 49° . Die Standardabweichung reduzierte sich geringfügig von $3,7^\circ$ auf $3,5^\circ$.

Die Messwerte der Kohäsion in Abhängigkeit von der dynamischen Belastung sind in Bild 15 dargestellt. Die nicht dynamisch belasteten Flüssigbodenproben wiesen mit 79 kN/m^2 eine um 56% niedrigere Kohäsion auf als dynamisch belastete Flüssigbodenproben. Für diese betrug die Kohäsion 124 kN/m^2 .

5 Auswertung

Die Auswertung der aufgeführten Versuchsreihen zeigt, dass zwar die Streuung des gemessenen Reibungswinkels und der Kohäsion infolge der dynamischen Einwirkungen teilweise zunahm, der Mittelwert jedoch nahezu unverändert blieb oder deutlich höhere Werte annahm. In Tab. 2 wird eine Übersicht über die gemessenen Mittelwerte für

Reibungswinkel und Kohäsion in Abhängigkeit von dynamischen Einwirkungen zusammengestellt. Weiterhin ist als Streuungsmaß die Standardabweichung S_x angegeben.

Für die hier untersuchte Flüssigbodenrezeptur mit kiesigem Sand als Ausgangsmaterial ist zu erkennen, dass die dynamischen Einwirkungen gemäß Abschn. 3.2 weder einen erhöhenden noch einen abmindernden Einfluss auf die gemittelten Werte für den Reibungswinkel und die Kohäsion haben.

Für die Flüssigbodenproben mit sandigem Schluff als Ausgangsmaterial konnten, nach dynamischer Belastung, sowohl für die Kohäsion als auch für den Reibungswinkel deutlich höhere Messwerte festgestellt werden. Es ist auffällig, dass Proben, die nicht dynamisch belastet wurden, teilweise sehr geringe Kohäsionswerte erreichen. So liegt die Spannweite der ermittelten Werte für die Kohäsion zwischen ca. 2 und ca. 60 kN/m^2 . Ein statistischer Ausreißer liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht vor, da

Tab. 2 Zusammenstellung der Messergebnisse der dynamisch belasteten und dynamisch unbelasteten Flüssigbodenproben
Compilation of the measurement results of dynamically loaded and not dynamically loaded liquid soil samples

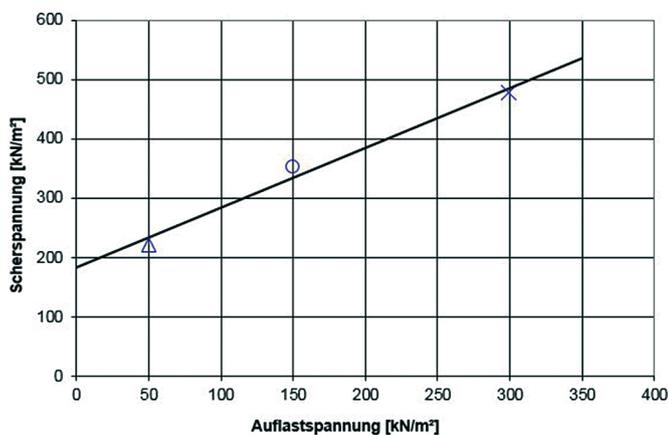
Zusammensetzung der Messergebnisse

Bezeichnung		Rezeptur FB KS kiesiger Sand	Rezeptur FB SS sandiger Schluff	Rezeptur FB BSG Brechsand-Splitt- Gemisch
Mittelwerte des Reibungswinkels φ' [°]	Ohne dynamische Belastung	42 $S_x = 1$	24 $S_x = 3,6$	50 $S_x = 3,7$
	Mit dynamischer Belastung	43 $S_x = 2$	32 $S_x = 6,3$	49 $S_x = 3,5$
Mittelwerte der Kohäsion c [kNg/m ²]	Ohne dynamische Belastung	58 $S_x = 7$	26 $S_x = 24,2$	79 $S_x = 23,2$
	Mit dynamischer Belastung	57 $S_x = 16$	47 $S_x = 17,1$	124 $S_x = 48,7$

zwei der vier Messwerte auf ähnlich niedrigem Niveau (2 kN/m², 4 kN/m²) liegen.

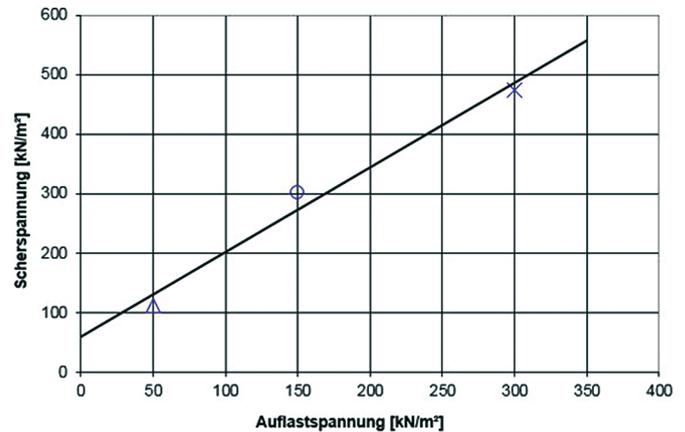
Für Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial konnte bez. des Reibungswinkels keine Veränderung des Mittelwerts oder der Standardabweichung festgestellt werden. Die Kohäsion hingegen erhöhte sich im Mittel um 57%. Eine mögliche Ursache hierfür ist u. U. die gebrochene Struktur des Ausgangsmaterials. Diese lässt einen gewissen Verzahnungseffekt vermuten. Dieser Verzahnungseffekt des scharfkantigen Ausgangsmaterials könnte eine parallele Verschiebung der Schergeraden bei gleichzeitiger Konstanz des Reibungswinkels hervorrufen und die vorgefundenen Ergebnisse erklären.

Der überwiegende Teil aller Messreihen für Reibungswinkel und Kohäsion weisen, entsprechend Tab. 2, nach der dynamischen Belastung eine Erhöhung der Standardabweichung auf. Es ist anfangs naheliegend, dies mit versuchsbedingten Ausreißern zu begründen. Beispielsweise könnte sich ein außergewöhnlich großes Korn des Ausgangsmaterials zufällig in der Scherfuge befunden und so zu erhöhten Scherfestigkeiten geführt haben. Diese Erklärung scheint bei genauerer Betrachtung jedoch nicht plausibel. Die in den Bildern 10–15 gezeigten Messwerte sind aus den zugehörigen Schergeraden abgeleitet, welche sich wiederum aus drei Scherversuchen zusammensetzen. Wie gut sich diese drei Messpunkte durch eine Schergerade verbinden lassen, wird durch das Bestimmtheits-



Versuchs-Nummer und -Bezeichnung	1 Δ	2 ○	3 x		
Auflastspannung [kN/m ²]	50	150	300		
max. Scherspannung [kN/m ²]	221,8	352,6	477,4		
Schergeschwindigkeit [mm/min]	0,1	0,1	0,1		
Einbaudichte [g/cm ³]					
Reibungswinkel [°]				45,2	
Kohäsion [kN/m ²]				182,7	
Korrelation [-]				0,98	

Bild 16 Schergeraden von Flüssigboden mit Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial, Maximalwert
Shear plane of liquid soil with crushed sand and split mixture as basic raw material, maximum value



Versuchs-Nummer und -Bezeichnung	1 Δ	2 ○	3 x		
Auflastspannung [kN/m ²]	50	150	300		
max. Scherspannung [kN/m ²]	112,7	301,8	474,6		
Schergeschwindigkeit [mm/min]	0,1	0,1	0,1		
Einbaudichte [g/cm ³]					
Reibungswinkel [°]				54,9	
Kohäsion [kN/m ²]				59,0	
Korrelation [-]				0,98	

Bild 17 Schergeraden von Flüssigboden mit Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial, Minimalwert
Shear plane of liquid soil with crushed sand and split mixture as basic raw material, minimum value

maß beschrieben. Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen, wobei ein Wert von 1 einer perfekten Übereinstimmung entspricht. Für dynamisch belasteten Flüssigboden mit Brechsand-Splitt-Gemisch als Ausgangsmaterial sind die Schergeraden, welche die Minimal- und Maximalwerte für Kohäsion erzeugen, in den Bildern 16, 17 dargestellt. Sie erzeugen zwar eine große Streuung, weisen jedoch gleichzeitig ein hohes Bestimmtheitsmaß auf (Korrelation jeweils 0,98).

Ein ungünstig positioniertes übergroßes Korn könnte einen Stützpunkt der Schergeraden verfälschen, würde jedoch durch ein schlechtes Bestimmtheitsmaß auffallen. Auch eine Variation in der Zusammensetzung der Proben kann weitestgehend ausgeschlossen werden, da alle Proben einer Schergeraden aus derselben Charge stammen. Gleiches gilt für die Lagerungsbedingungen. Alle Proben wurden luftdicht und in unmittelbarer Nähe zueinander gelagert. Für das steigende Streuungsmaß im Zusammenhang mit der dynamischen Verdichtung konnte keine plausible Erklärung gefunden werden.

Die teilweise beobachtbare Erhöhung der Kohäsions- und Reibungsbeiwerte nach dynamischer Belastung lässt sich ggf. durch eine Nachverdichtung, resultierend aus der dynamischen Belastung, erklären. Einen Hinweis auf eine mögliche Gefügeverdichtung zeigten teilweise beobachtete Wasseraustritte zwischen den Laststempeln und Scherringen zu Beginn der dynamischen Belastung. Es ist davon auszugehen, dass eine Gefügeverdichtung auch zu höheren Werten der Kohäsion führt, da die der Kohäsion zugrunde liegenden bindenden Kräfte zwischen den feinen Bodenbestandteilen von ihrem Abstand abhängig sind. Ferner ist augenscheinlich, dass die Scherfestigkeit von dicht gelagerten Böden größer ist als diejenige von locker gelagerten Böden, da sich die Körner im Scherversuch aneinander vorbeibewegen müssen und dies bei dichter Lagerung erschwert wird. Eine durch die dynamische Einwirkung hervorgerufene Nachverdichtung ist daher die wahrscheinlichste Erklärung für die erhöhten Werte der Kohäsion und des Reibungswinkels.

Es ist anzumerken, dass entsprechend Abschn. 3.2 auf eine weitere Lastverteilung unterhalb der Schwelle verzichtet wurde. In der Baupraxis sind daher durch Zwischenschichten (feste Fahrbahn) und hieraus resultierende Lastverteilungen deutlich geringere Auflastspannungen wahrscheinlich.

Literatur

- [1] Rohrleitungsbauverband e. V. (2014) *Zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV). Eine Bestandsaufnahme.*
- [2] IKT Institut für Unterirdische Infrastruktur (2002) *Einsatz von Bettungs- und Verfüllmaterialien im Rohrleitungsbau: Laboruntersuchungen und Versuche im Maßstab 1:1.*
- [3] Stolzenburg, O. (2009) *Was ist Flüssigboden wirklich* in: bi Umwelt Bau 1, S. 56–61.

Weiterhin ist abschließend festzuhalten, dass die Aussagen von [7, 8] aus Abschn. 2 für den Reibungswinkel und die Kohäsion von dynamisch einaxial verformtem Flüssigboden in Teilen bestätigt werden können. Die Hälfte der Messreihen zeigt näherungsweise gleiche Werte für nicht dynamisch belastete und dynamisch belastete Proben. Die andere Hälfte der Messreihen weist nach der dynamischen Belastung deutlich höhere Werte auf (Tab. 2).

6 Fazit

Nach Durchführung und Auswertung der Scherversuche konnte gezeigt werden, dass der Reibungswinkel und die Kohäsion der untersuchten Rezepturen durch die gewählten dynamischen Beanspruchungen nicht reduziert wurden. Es wird darauf hingewiesen, dass diese Ergebnisse nur im näherungsweise einaxial verformten Bereich direkt unterhalb der Schwelle ihre Gültigkeit haben. In Bereichen ohne behinderte Seitendehnung können andere Ergebnisse möglich sein. Diese mittels Triaxialversuchen zu untersuchen, sollte Gegenstand künftiger Forschungen sein. Weiterhin sollte insbesondere das Verformungsverhalten genauer untersucht werden, da größere Verformungen, je nach Bauwerk, eine nicht zu vernachlässigende Relevanz besitzen. Ferner sollte in künftigen Forschungen als Grundmaterial tatsächliches Aushubmaterial von Tunnelbaustellen verwendet und hinsichtlich seiner Eignung als Grundmaterial und anschließend auf seine dynamische Beständigkeit geprüft werden. Die Lastamplitude wurde im Rahmen der Untersuchungen deutlich überhöht, aber auf der sicheren Seite liegend angenommen. Weitergehende Untersuchungen sollten mit reduzierten Lasten und ggf. höheren Lastspielzahlen erfolgen, um höhere Ausnutzungsgrade und Nutzungszeiträume sowie bahnspezifische Details (z. B. Schwellenarten, Möglichkeiten der Auflagerung etc.) realitätsnäher abzubilden.

Dank

Die Verfasser bedanken sich beim Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH (FiFB), Leipzig, für die Unterstützung und Beratung während des Projekts.

- [4] FGSV-Nr. 563 (2012) *Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau.* FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- [5] Zeck, K.; Trunk, U. (2013) *Flüssigboden im Klima-Vergleich* in: bi Umwelt Bau 3, S.72–75.
- [6] Stolzenburg, O. (2010) *Flüssigboden im Tunnelbau.* LOGIC Logistic Engineering GmbH.

- [7] Studer, J.; Weber, T. (2012) *Bestimmung dynamischer Bodenkennziffern in Feld und Labor*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- [8] Triantafyllidis, T.; Wichtmann, T.; Niemunis, A. (2006) *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik, Kumulatives und dynamisches Verhalten von Böden*. Berlin: Springer Verlag.
- [9] Augner, D. (2019) *Laborversuche an Bodenproben – Ermittlung von Bodenkenngrößen* [online]. <https://izw.baw.de/publikationen/kolloquien/0/16-AugnerLaborversuche.pdf> [Zugriff am: 2. Juli 2019]
- [10] Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. [Hrsg.] *Flüssigboden – Gütesicherung RAL-GZ 507* [online]. <https://docplayer.org/109775728-Fluessigboden-guetesicherung-ral-gz-507.html> [Zugriff am: 2. Juli 2019]
- [11] DIN EN 1991-2:2010-12 (2010) *Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*. Berlin: Beuth. Ausgabe Dez. 2010.
- [12] DIN 18137-3:2002-09 (2002) *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 3: Direkter Scherversuch*. Berlin: Beuth. Ausgabe Sept. 2002.

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Dietmar Mähner
d.maehner@fh-muenster.de
Fachhochschule Münster
Institut für unterirdisches Bauen
Corrensstraße 25
48149 Münster

Marius Dorgeloh M.Sc.
m.dorgeloh@fh-muenster.de
Fachhochschule Münster
Institut für unterirdisches Bauen
Corrensstraße 25
48149 Münster

Jacob Lengers M.Energy (Korrespondenzautor)
jacoblengers@fh-muenster.de
Fachhochschule Münster
Institut für unterirdisches Bauen
Corrensstraße 25
48149 Münster

Zitieren Sie diesen Beitrag

Mähner, D.; Dorgeloh, M.; Lengers, J. (2020) *Reibungswinkel und Kohäsion von RSS-Flüssigboden nach dynamischer Belastung*. Bautechnik 97, H. 9, S. 637-646. <https://doi.org/10.1002/bate.201800083>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 9. Oktober 2018; angenommen: 31. Juli 2020.



LOGIC Logistic Engineering GmbH

Fachplaner für Flüssigboden und komplexe unterirdische Infrastruktursysteme

Wurzner Straße 139

04318 Leipzig

Telefon: +49 341 24469-0

Telefax: +49 341 24469-32

E-Mail: info@logic-engineering.de

Internet: www.logic-engineering.com

Geschäftsführer: Dr.-Ing. Steffen Weber



Forschungsinstitut für Flüssigboden GmbH

Wurzner Straße 139

04318 Leipzig

Telefon: +49 341 24469-11

Telefax: +49 3423 7342474

E-Mail: info@fi-fb.de

Internet: www.fi-fb.de

Geschäftsführer: Dr.-Ing. Steffen Weber

Institutsdirektor: Dipl.-Ing. (FH) Olaf Stolzenburg