

# Verflüssigungspotenzial von reinem und siltigem Sand unter multiaxialer Belastung

von  
Julia Buchheister

1. Auflage

Verflüssigungspotenzial von reinem und siltigem Sand unter multiaxialer Belastung – Buchheister

schnell und portofrei erhältlich bei [beck-shop.de](http://beck-shop.de) DIE FACHBUCHHANDLUNG

vdf Hochschulverlag 2012

Verlag C.H. Beck im Internet:

[www.beck.de](http://www.beck.de)

ISBN 978 3 7281 3305 2

# **Verflüssigungspotenzial von reinem und siltigem Sand unter multiaxialer Belastung**

Juliane A. Buchheister

Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik (IGT) der ETH Zürich  
Band 240, April 2012

**IGT**

**v/d/f** vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ETH-Dissertation Nr. 18312  
© 2012, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ISBN: 978-3-7281-3305-2

---

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

# Vorwort

Die Verflüssigung von sandigen und siltigen Böden trägt einen wesentlichen Anteil zu den Schäden an Bauwerken bei. Die Höhe der Schäden ergibt sich nicht zuletzt daraus, dass mit der Verflüssigung von Böden grosse Verformungen des Untergrundes einhergehen. Diese Verformungen sind nicht zwingend gleichmässig über den Untergrund verteilt und können daher zu grossen differentiellen Verformungen unter einem Gebäude führen. Häufig treten diese Verformungen plötzlich auf, da sich Porenwasserdrücke, die das Phänomen der Verflüssigung hervorrufen, schlagartig an einer Schwachstelle der Oberfläche entlasten können. Das Verflüssigungsphänomen zeigt sich vor allem bei gesättigten locker gelagerten granularen Böden. Durch eine Erschütterung bzw. ein Erdbeben werden die Partikel des Bodens zur Verdichtung angeregt. Für locker gelagerte granulare Böden bedeutet dies, dass die Partikel des Bodens sich umlagern müssen, um in eine dichtere Lagerung überzugehen. Bei einer zyklischen oder dynamischen Belastung kann dies jedoch nicht immer zeitgleich zur dynamischen Belastungsgeschwindigkeit erfolgen. Anstelle einer direkten Umlagerung der einzelnen Körner stellt sich zunächst ein Porenwasserüberdruck ein, der zunächst drainiert werden muss, bevor die Kornumlagerung stattfinden kann. Durch die wiederholten Zyklen während eines Erdbebens kann sich der Porenwasserüberdruck weiter aufbauen und im Extremfall die Grösse der totalen Spannungen erreichen. Die effektiven Spannungen werden dabei zu Null und der Wasserdruck trägt das Korngerüst (Verflüssigung). Zu grossen Verformungen und ähnlichen Schadensbildern führt auch die «zyklische Mobilität» bei dichter gelagerten sandigen Böden. Hier wird durch die zyklische Belastung des dilatanten Bodenverhaltens zunächst eine Volumenzunahme herbeigeführt, die dann durch den Richtungswechsel der Belastung zum Aufbau von Porenwasserdrücken führen kann. Auch für den Modus der zyklischen Mobilität stellen sich grosse Verformungen ein, es kommt jedoch nur kurzfristig zu einem Verlust der Stabilität.

Im Feld ist es meist schwierig zu entscheiden, welche der beiden Mechanismen zu den nach einem Erdbeben sichtbaren grossen Verformungen geführt hat. Welcher Modus des Versagens sich einstellt, hängt neben der Lagerungsdichte auch von weiteren Einflussfaktoren wie z.B. der Art der Belastungsfunktion, der zyklischen Amplitude wie auch der Dauer einer Belastung ab. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei granulare Böden, die nach einer ersten Klassifizierung verflüssigungsgefährdet sind, untersucht. Neben klassischen Versuchen werden Untersuchungen in einem Hohlzylindergerät (Hollow Cylinder Apparatus, HCA) durchgeführt. Dieses Versuchsgerät, welches im Rahmen dieser Arbeit in Betrieb genommen und im Hinblick auf die durchgeführten Versuche optimiert wurde, erlaubt es, zyklische Belastungen in zwei der drei Hauptspannungsrichtungen auf eine Probe einwirken zu lassen und damit eine dem Erdbeben näher kommende Spannungsgeschichte zu untersuchen. Ein Erdbeben kennzeichnet sich durch eine komplexe

---

dreidimensionale Belastungsfunktion, wobei in der Regel in Versuchen die horizontale Einwirkung erfasst wird. Der Einfluss der vertikalen Bewegungen, die in der Regel zwischen 45% und 90% der Grössen der Horizontalbewegungen annehmen können, werden in herkömmlichen zyklischen Untersuchungen vernachlässigt.

Die vorliegende Forschungsarbeit ist im Rahmen eines multidisziplinären Forschungsprojekts zum Thema «Management of Earthquake Risk using Condition Indicators (MERCi)» eingebunden gewesen. Daher wurde ein besonderes Augenmerk darauf gerichtet, ob auf die Auswirkung eines Erdbebens massgebende Einflussfaktoren bei der Beurteilung der Verflüssigunggefährdung untersucht und berücksichtigt werden. Hierbei zeigt sich, dass die in der Praxis bei der Abschätzung des Verflüssigungspotentials verwendeten Methoden die Belastungsfunktion nur in der Grösse eines zyklischen Spannungsverhältnisses bzw. Widerstandsverhältnisses (CSR bzw. CRR) berücksichtigen. Richtungseffekte, multiaxiale Bedingungen oder der Einfluss einer eher schockartigen oder eher harmonischen Belastung erfolgt nicht bzw. haben in diesen empirischen Modellen keinen Eingang gefunden. Für diese Fragestellungen konnten durch die Überlagerungen und den Vergleich unterschiedlich aufgebracht zyklischer harmonischer Belastungen wie auch der direkten Einspeisung von Erdbebenaufzeichnungen interessante Erkenntnisse über die Einflussfaktoren auf die Entwicklung der Porenwasserdrücke wie auch auf die Entwicklung der Steifigkeiten gewonnen werden. Ein Beispiel hierzu stellt der Einfluss der Form einer multiaxialen Belastungshysterese auf die Entwicklung des Porenwasserdruckes dar. Ebenfalls wird durch die multiaxiale Versuchsdurchführung deutlich, dass bei der realistischeren Abbildung von Erdbebenereignissen eher von einer Simulation als Schockereignis als von einem Vibrationsereignis auszugehen ist.

Dr. Buchheister hat sich mit grossem Engagement in einer interdisziplinären Forschungsgruppe eingebracht und die sich dort zeigenden offenen Fragestellungen an der Schnittstelle einzelner Disziplinen aufgegriffen und vertieft untersucht. Dabei hat sie sich der Herausforderung gestellt, einen Prototyp eines multiaxial-zyklischen Hohlzylinder-Versuchsgerät für diese Untersuchungen in Betrieb zu nehmen und weiterzuentwickeln. Sowohl die dabei verwendeten innovativen Mess- und Steuerelemente wie auch die Untersuchung weiterer identifizierter offener Fragen wird in aktuellen Forschungsvorhaben fortgesetzt.

Dr. J. Laue

Prof. Sarah M. Springman OBE FRENG

# Danksagung

Prof. Sarah M. Springman gab mir die Möglichkeit, an einem interessanten internationalen Projekt (DRM) mitzuarbeiten mit der Aussicht auf eine daran anschliessende Doktorarbeit. Ihrer Idee ist es zu verdanken, dass ein Hohlzylindergerät am Institut für Geotechnik angeschafft wurde, das im Rahmen dieser Arbeit in Betrieb genommen wurde. Ich möchte Ihr hier ganz herzlich danken für das entgegengebrachte Vertrauen.

Dr. Jan Laue möchte ich ganz herzlich danken für die Betreuung meiner Arbeit. Diverse Diskussionen haben zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Er gab mir die Gelegenheit, am Schweizer Nationalfond Projekt «Management of Earthquake Risks using Condition Indicators (Merci)» mitzuarbeiten (SNF No. 200021-104027). Es war eine wunderbare Erfahrung, instituts- und departmentsübergreifend an einem gemeinsamen Forschungsprojekt zu arbeiten. Zwei ausführliche Treffen mit dem externen Gutachter Prof. Triantafyllidis sind nicht genug zu schätzen und ermöglichten durch seine Fachkompetenz eine offene Diskussion der Ergebnisse aus dem Hohlzylindergerät. Weitere Diskussionen mit Prof. Ansal, Prof. Yasuda, Dr. Cubrinovski und Dr. Jost Studer gaben interessante Anregungen zu dieser Arbeit und motivierten das Forschungsthema voranzubringen. Ebenfalls möchte ich Dr. Michael Plötze danken für seine Ideen zum Untersuchen des Siltes im tonmineralogischen Labor.

Ohne die Hilfe von Adi Zweidler, Ernst Bleiker, Heinz Buschor, Fredie Ehrbar und Marco Sperl wäre das Hohlzylindergerät noch nicht in Betrieb. Hier ein spezieller Dank an die Werkstatt für die schnelle Hilfe und die Konstruktion sowie Fertigung von zusätzlichen Teilen und Einbauhilfen. Eine grosse Unterstützung dabei war der perfekte Elektroniksupport. Ausserdem bedanke ich mich bei Frau Peschke für ihre unkomplizierte Art, Untersuchungen mit dem ESEM-Gerät des Instituts für Baustoffe durchzuführen, die zu wunderschönen Nahaufnahmen der Sande führten. Dabei gilt ein extra Dank der Firma Sihelco, die mir eine grosse Menge von siltigem Sand für Forschungszwecke gratis geliefert hat. Für die Bewältigung verschiedener weiterer Aufgaben standen auch Mengia Amberg und Felix Wietlisbach immer zur Verfügung.

Den Arbeitskollegen und -kolleginnen sei Dank für eine nicht ausschliesslich fachliche offene Diskussion: Jolanda Trausch-Giudici, Philippe Nater, Ravikirian Chikatarmarla, Thomas Weber, Sophie Messerklinger, Pierre Mayor, Andrea Thielen, Bernd Imre, Emma Pooley, André Arnold, Matthias Sieber und Ralf Herzog.

Ferner möchte ich mich für den interessanten Austausch in der Merci-Arbeitsgruppe bei Prof. Faber, Prof. Dazio, Prof. Grün, Prof. Schalcher, Dr. Martin Mai, Banu Mena, Yahya Bayraktarli, Ufuk Yazgan, Mehdi Rezaeian und Marjan Faizian bedanken.

Ausserdem gilt mein besonderer Dank Onoria Bozzato für das sorgfältige Korrekturlesen meiner Arbeit. All den Freunden und Bekannten sei ebenfalls gedankt, die mich in dieser Zeit unterstützt haben, auch ohne ausdrückliche Namensnennung.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, ohne deren Unterstützung diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre. Über das Institut hinaus hat sich eine wunderbare Beziehung zu Philippe Nater entwickelt, die fortwährend mit Emil, Zora und Nori unser Leben bereichert.

# Kurzfassung

Ein Teil der Erdbebenschäden lässt sich direkt auf das Phänomen der Bodenverflüssigung zurückführen. Typische Schadensbilder von Bodenverflüssigung sind schief gestellte und eingesunkene Bauwerke, an die Oberfläche geschwemmte unterirdische Bauwerke sowie Sandkegel. Um das Schadenspotenzial in Zukunft zu verringern, bedarf es eines besseren Verständnisses über das Entstehen der Bodenverflüssigung. Bis heute kann das Phänomen der Bodenverflüssigung nicht abschliessend beschrieben werden: viele der bislang gewonnenen Erkenntnisse beruhen auf empirischen Regeln. Um die Verflüssigungsempfindlichkeit eines Bodens einzuschätzen, bestehen verschiedene Ansätze, die im Zusammenhang dieser Arbeit bewertet werden.

Das grösste Verflüssigungspotenzial haben locker gelagerte und reine Sande, die unterhalb des Grundwasserspiegels liegen. Seit dem Kocaeli-Erdbeben 1999 in der Türkei wird auch siltigen Sanden – denen bis dahin kaum Aufmerksamkeit geschenkt wurde – ein grosses Verflüssigungspotenzial zugestanden. Diese Bodenarten sind in der Regel in nicht allzu grosser Tiefe anzutreffen und kommen aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte oft in der Nähe von Gewässern vor, so auch in der Schweiz, wo das Erdbebenrisiko das grösste Risiko aller Naturgefahren darstellt.

Die Bodenverflüssigung wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Dazu gehören neben der Bodenart die Lagerungsdichte und die Kornform des Bodens sowie die Belastung. Oft wird die dreidimensionale Erdbebenbelastung für Berechnungen oder für experimentelle Untersuchungen zu einer sinusförmigen eindimensionalen Scherbelastung vereinfacht. Dies wird üblicherweise für das Beschreiben des Bodenverhaltens als ausreichend genau empfunden (Stand der Technik). Seitdem digitale Messungen jedoch vermehrt analysiert werden können, kann seit 2003 der Richtungseffekt bei Erdbebensignalen exakt beschrieben werden. Da der Richtungseffekt auf Bauwerke erhebliche Auswirkungen hat, gewinnt die Analyse der Belastungsart im Boden an Bedeutung.

Um den Einfluss der multiaxialen Belastung auf reinen und siltigen Sand näher zu beleuchten, wurden experimentelle Untersuchungen im Labor durchgeführt. Dazu wurde das neue Hohlzylindergerät des Instituts für Geotechnik der ETH Zürich in Betrieb genommen. In dieser Arbeit wird die Funktionsweise des Geräts, einschliesslich der Steuerung und Messwerterfassung, ausführlich beschrieben. Mit zwei verschiedenen Steuerungsmodi (Kraft/Weg und/oder Torsion/Winkel) wurden der Weg und der Winkel unabhängig voneinander auf die Bodenprobe aufgebracht. Für die einaxialen Versuche werden zwei unterschiedliche Belastungsformen in torsionale Richtung (Verdrehung) aufgebracht. Zusätzlich werden für die multiaxialen Versuche ähnliche Belastungsformen in axiale Richtung überlagert. Bei den Belastungsformen handelt es sich um eine sinusförmige Belastung oder um eine Erdbebenbelastung mit Vorwärts-Richtungseffekt, die durch einen unregelmässigen Zeitverlauf des genannten Erdbebens in der Türkei wie-

dergegeben wurde. Innerhalb und ausserhalb der Zelle konnten Daten zum Verhalten der Bodenprobe mit 100 Hz aufgezeichnet werden. Mit dem Hohlzylindergerät wurden mitteldichte reine und siltige Sandproben untersucht; beide gelten als verflüssigungsempfindlich.

Gesamthaft wurden 32 Versuche ausgewertet, der Grossteil davon mit Perth Sand (reiner Sand), ein kleiner Teil mit siltigem Sand (7 Versuche) und ein Vergleichsversuch mit Toyoura Sand (reiner Sand). Die Proben wurden mit der gleichen Einbaumethode eingebaut, um den Einfluss des Probeneinbaus auf das Bodenverhalten gering zu halten. Dabei wurden verschiedene Faktoren des Probeneinbaus berücksichtigt.

Bei der Beurteilung der Verflüssigungsempfindlichkeit mit dem bekannten zyklischen Spannungsansatz wurde erwartet, dass fast alle Proben unter den gegebenen Versuchsbedingungen verflüssigen. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Vielmehr entstand ein deutlicher Porenwasserdruckanstieg, der bis zu 50% der effektiven Spannungen ausmachte. Dabei handelte es sich genau genommen um das Phänomen der zyklischen Mobilität. Der zyklische Spannungsansatz berücksichtigt ausschliesslich die Scherspannung und keine multiaxiale Belastungsform.

Bei einaxialer Belastung (Scherrichtung) konnte gezeigt werden, dass die Belastungsform die Entwicklung des Porenwasserdrucks beeinflusst. Der Porenwasserdruck steigt bei einer erdbebenförmigen Belastungsform mit einem vergleichbaren Spannungsverhältnis schneller an als bei einer sinusförmigen Belastungsform. Generell ergab sich ein Zusammenhang zwischen zunehmender Dehnung und zunehmendem Porenwasserüberdruckverhältnis. Bei multiaxialer Belastung spielte die aufgebrachte Form der Verformung (als neu definierter Verformungswinkel  $\beta_v$ ), die sich aus axialer Verschiebung und Drehung ergibt, eine wichtige Rolle. Dabei wurde deutlich, dass bei gleichem Deviator bei runden Belastungsformen (im zweidimensionalen Verformungsraum) ein grösserer Porenwasserdruck aufgebaut werden kann. Die über die Verdrehung superponierte axiale Verschiebung hatte einen grösseren Einfluss auf den Porenwasserdruckanstieg wie die Verdrehung. Dabei stieg der Porenwasserdruck mit der axialen Dehnung deutlicher an als mit der Scherdehnung, obwohl erstere nur halb so gross war. Vergleichbare Versuche an siltigem Sand ergaben, dass siltiger Sand aufgrund der Kornform, Kornrauhigkeit und des grenzwertigen Siltanteils den grösseren Verflüssigungswiderstand als reiner Sand zeigte.

# Abstract

## **Liquefaction potential of sand and silty sand under multi-axial loading**

One of the major reasons for damage caused by earthquakes can be soil liquefaction. Damage may occur as a result of tilted and settled buildings, floating structures or sand volcanoes. A better understanding of the development of soil liquefaction is needed to reduce this type of damage potential in the future. Even though the basic mechanism causing soil liquefaction is known, the details of each occurrence cannot be fully described or predicted to date: thus, most of the known influencing factors are based on empirical rules. Different approaches exist to assess the susceptibility of soils to liquefaction. Such approaches will be applied within the framework of this thesis.

Loose sands under the ground water table have the highest liquefaction potential. Silty sands showed a higher liquefaction potential in the 1999 Kocaeli earthquake than was previously the case. In the Kocaeli region, these soils are found in shallow depths below the ground surface and are often situated close to sources of water surface due to their history of deposition. This is similar to many regions in Switzerland. Furthermore, the earthquake risk counts here as the highest risk apportioned to natural hazards.

Many different factors influence soil liquefaction, such as the soil type, the density of the soil, the shape and surface of the particles and the loading function. Often a one-dimensional shearing load simplifies the complicated three-dimensional earthquake loading that is used for design or for experimental investigations. Generally, this simplification is thought to be sufficient to describe the soil behaviour. Since digital recordings of earthquake signals can be analysed on a big data basis, the forward directivity effect of near-field earthquake records could be fully described (2003). As the directivity effect has a significant impact on the response of structures, the analysis of this effect on the soil response will be the focus in this thesis.

Experiments were carried out in the laboratory to investigate the influence of one- and multi-axial loading on the soil behaviour. Therefore, the new hollow cylinder apparatus (HCA) of the Institute for Geotechnical Engineering of ETH Zurich was put into operation. The functionality of the apparatus including the control and measurement system is fully described in this thesis. Two regulations of the two hydraulic units of the apparatus are possible: displacement/axial force and/or rotation/torsion. The experiments were driven with displacement and rotation being controlled independently of each other. Two different loading forms were selected for the one-axial (rotational) experiments. Additionally, similar loading forms were superposed in the axial direction for the multi-axial experiments. Both loading forms were described by either a sinusoidal loading function or a real time history of the 1999 Kocaeli earthquake that exhibits the forward directivity effect. Data could be registered inside and outside the cell with

a frequency of 100 Hz. Medium dense sand and silty sand was investigated using the HCA. Both sands are considered to be susceptible to liquefaction.

In total, 32 experiments were analysed thereof most experiments were accomplished with Perth sand (pure sand), few of the experiments with silty sand (7 tests) and one experiment with Toyoura sand (pure sand). The same sample preparation method is used for all the experiments in order to keep the comparative influence of the sample preparation small for all.

The liquefaction susceptibility is evaluated using the cyclic stress approach e.g. «the simplified procedure». Thereafter, almost all experiments were expected to reach initial liquefaction. That was not the case. In fact, the pore water pressure increased up to a maximum of 50% of the effective stresses in all the experiments. To be more specific, this phenomenon should be called cyclic mobility. This approach considers only the shear stress of the loading, and no other loading stress that would result from multi-axial loading.

One-axial loading (rotation) experiments showed an influence of the loading form on the development of the pore water pressure. The pore water pressure ratio increases, at a similar stress ratio, faster for an earthquake loading form than for a sinusoidal loading form. In general, coherence could be noticed between increasing strains and increasing pore water pressures. Multi-axial loading experiments showed a significant impact of the loading angle that is derived from the applied displacement over the applied rotation. At the same deviator stress a circular loading form (in two-dimensional space of deformation) showed a higher build-up of pore water pressures than a plain loading form. By superimposing axial displacement to the applied rotation, the axial strains showed a meaningful influence on the pore water pressure even though the axial strains were approximately half of the magnitude of the shear strains. A comparison between the experiments of pure sand and silty sand revealed that the silty sand has more liquefaction resistance due to the particle shape and surface as well as the selected portion of silt in the sand.