

Zyklische belastete, im Boden eingespannte Träger als Gründungssystem für Solaranlagen

E. Kammel, I. Schuhmacher, J. Engel

HTW Dresden

Zusammenfassung

Für die Nutzung erneuerbarer Energien ist die Errichtung dezentraler Kleinanlagen zur Stromerzeugung eine wichtige Voraussetzung. Es werden einfache Bauweisen für wirtschaftliche und auf beengtem Raum herzustellende Gründungen benötigt. Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens wird an der Entwicklung eines zyklisch-mehrachsig beanspruchbaren Gründungssystems für Solarkraftwerke gearbeitet. Dieser Beitrag stellt die Ziele des Projekts und die geplanten Arbeitsschritte vor. Es werden die ersten Ergebnisse der Modellversuche gezeigt.

1 Gründungsvarianten für Solarenergieanlagen

1.1 Einleitung

Im Zeitalter knapper werdender Ressourcen und der Veränderung des globalen Klimas hat die umweltschonende Erzeugung von Energie eine enorme Bedeutung erlangt. Der Mix aus unterschiedlichen Energieformen bietet die Chance, durch innovative technische Lösungen die Abhängigkeit von einzelnen Energieträgern zu reduzieren. Neben Wasser und Wind ist ein Schwerpunkt der Forschung und Entwicklung die Solarenergie. Vorteile dieser Energieform liegen in der Unabhängigkeit von den örtlichen Windverhältnissen und der Möglichkeit, stillgelegte Flächen einer Folgenutzung zuzuführen, z. B. ehemalige landwirtschaftlich genutzte Areale oder Bergbaufolgelandschaften. In den letzten Jahren hat sich die Effizienz der Solartechnik erheblich gesteigert und es ist davon auszugehen, dass durch technische Neuerungen der Wirkungsgrad auch in Zukunft noch steigen wird.

Flächige Solarmodule müssen entsprechend dem Stand der Sonne ausgerichtet werden. Wechselnde Windrichtungen führen zu Horizontaleinwirkungen in unterschiedlichen Richtungen und durch Sogwirkung kommt es außerdem zu vertikalen Einwirkungen. Bei Windkraftwerken treten ähnliche Effekte auf. Diese Wechsellasten beanspruchen die Gründung gleichzeitig axial auf Zug und auf Druck sowie horizontal. Für die sichere Abtragung der Kräfte in den Untergrund ist eine entsprechende Gründung erforderlich, z.B. mit Einzelfundamenten (siehe Abbildung 1). Damit verbunden ist eine Reihe von Nachteilen. Dies betrifft u.a. die folgenden Punkte:

- Einzelfundamente müssen frostsicher gegründet werden. Daraus ergibt sich eine Gründungstiefe von mindestens 0,8 m.
- Die zyklischen Beanspruchungen werden allein durch das Eigengewicht der Einzelfundamente abgetragen. Daraus ergeben sich relativ große Abmessungen und damit hohe Kosten.
- Für die Herstellung müssen Baugruben ausgehoben und der Beton an die Einbaustelle transportiert werden. Voraussetzung dafür ist eine ausreichende Zugänglichkeit für den Einsatz entsprechender Gerätetechnik.
- Ein späterer Rückbau oder die Anpassung an andere Aufbauten ist mit großem Aufwand für Aushub, Recycling und Wiederverfüllung verbunden.



Abbildung 1 Beispiel für die Gründung von Solarkraftwerken (Nähe Freiberg)

Im Rahmen eines Forschungsprojekts wird an der Entwicklung wirtschaftlicher Alternativen gearbeitet. Erste Ideen dazu sind im Zusammenhang mit der Errichtung von Solaranlagen auf Brachflächen in Bayern und Sachsen entstanden.

1.2 Anlass der Untersuchungen

Auf dem Gelände eines ehemaligen Militärflugplatzes sollte eine Photovoltaikanlage errichtet werden. Das Gelände ist im Baubereich relativ eben. Die Solarmodule sollten im Wesentlichen auf dem Wiesengelände zwischen den Rollbahnen angeordnet werden. Für die Herstellung der Gründung war als Alternative zu den Einzelfundamenten das Einrütteln von feuerverzinkten Stahlpfosten mit einem Außendurchmesser von 114 mm vorgesehen. Der Abstand der Träger untereinander betrug etwa 5 - 8 m, die plan-

mäßige Einbindetiefe ungefähr 2,5 - 3 m. Die Lagerung der Solarmodule war in einer Höhe von rd. 1,5 m über GOF vorgesehen.

Das vereinfachte System ist in Abbildung 2 dargestellt. Die zu erwartenden Belastungen lagen lt. Statik bei $F_{H,max} = \pm 4,6$ kN bzw. bei $F_{V,max} = +7,8$ kN bzw. $-3,3$ kN. Horizontalbewegungen von ± 3 cm in Höhe GOF sollen vom System schadlos aufgenommen werden können.

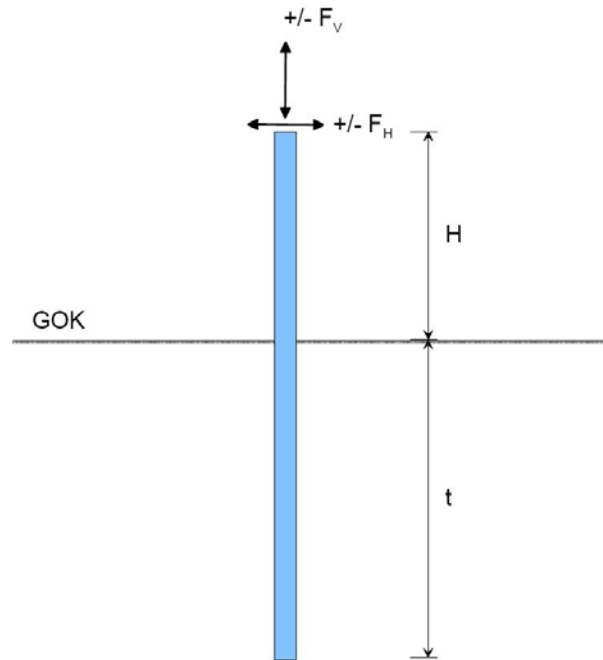


Abbildung 2 System der Einbindung der Träger

Für den Nachweis der Tragfähigkeit dieses Gründungssystems sind mit einfacher Technik statische Probelastungen durchgeführt worden. Diese „Herausziehversuche“ wurden mittels einer an einer Baggerschaufel befestigten Kraftmessdose durchgeführt. Um die in situ Messwerte mit ergänzenden Messungen absichern zu können sind im Labor unter Modellbedingungen zyklische Probelastungen an einem Modellträger vorgenommen worden. Die Messergebnisse wiesen eine relativ große Streuung auf und der Aufbau der Messtechnik für die Probelastungen war offenkundig noch mit Unzulänglichkeiten behaftet. Da davon auszugehen ist, dass der Bedarf für einfache Gründungskonstruktionen für Solarkraftwerke in Zukunft noch steigen wird, wurde auf Grundlage dieser ersten Ergebnisse ein Forschungsprojekt initiiert.

2 Forschungsprojekt

2.1 Zielstellung

Auf Grundlage der ersten Erfahrungen mit der Untersuchung kurzer, zyklisch belasteter Träger, wurden folgende Ziele für ein kooperatives Forschungsvorhaben abgeleitet:

1. Es soll ein Bemessungsverfahren für die Planung von zyklisch, mehrachsig beanspruchten, kurzen Trägern entwickelt werden.
2. Zur Überprüfung der Annahmen, die den Nachweisen zugrunde liegen, ist ein Belastungsversuch für den Einsatz auf Baustellen zu entwerfen und unter realen Bedingungen zu testen.
3. Als Bemessungsgrundlagen sollen Ergebnisse von normalen Baugrunduntersuchungen genutzt werden. Dies umfasst die üblichen Kennwerte sowie Schlagzahlen von Rammsondierungen und unter Umständen Herausziehmessungen an Rammsonden.

Für die technische Umsetzung sind verschiedene Varianten vorgesehen, z. B. feuerverzinkte Rohre oder verpresste Kleinpfähle. Wegen der relativ geringen Kräfte, die von den Gründungen von Solarkraftwerken aufzunehmen sind, ist keine allzu tiefe Einbindung in den Untergrund erforderlich. Es handelt sich deshalb nicht um Pfähle im eigentlichen Sinne. Es soll im Rahmen dieses Projekts eine Gründungstechnologie entwickelt werden, die sich an unterschiedliche Lastgrößen und Bodenarten flexibel anpassen lässt und als eine Variante bei der Auswahl der optimalen bautechnischen Lösung untersucht werden kann.

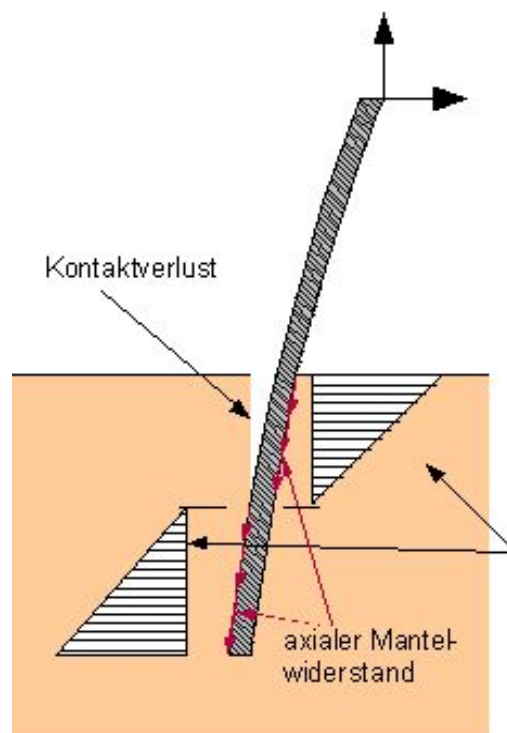


Abbildung 3 Zustand eines Trägers während eines Belastungszyklus

Die Erfahrungen bei Mikropfählen (siehe Anhang D der [DIN 1054, 2005]) sollen mit herangezogen werden, wobei diese auf axiale Beanspruchungen begrenzt sind. Eine Benutzung dieser Erfahrungswerte ist auf Grund des anderen Tragverhaltens und der Fachtagung Geotechnik an der HTW Dresden (FH)

fehlenden Verpressung bei den geramnten Trägern nicht möglich. Weiterhin liegen bereits Erfahrungen auf dem Gebiet der Modellversuche und Erddruckberechnungen anhand von Trägern vor (siehe [Neuberg et. al, 2007], die in den aktuellen Untersuchungen berücksichtigt werden.

Partner in diesem Projekt sind das ZAFT an der HTW Dresden und die Jähmig GmbH Dorfhain.

2.2 Arbeitsplan

Im Mittelpunkt der Forschung stehen Modellversuche. Zu diesem Zweck ist der schrittweise Aufbau eines Speziallabors für 1g-Modellversuche vorgesehen. Für die Simulation der Beanspruchung der Gründung von Solarkraftwerken muss der Modellversuchsstand in der Lage sein, zyklische Belastungen mit vorgegebener Amplitude und Richtung planmäßig zu erzeugen. Die neu entwickelten Verfahren werden nach Abschluss der kleinmaßstäblichen Versuche unter großmaßstäblichen Modellbedingungen erprobt.

Der Vorteil von kleinmaßstäblichen Modellversuchen besteht vor allem in der Kontrolle der Versuchsrandbedingungen. Zu diesem Zweck wird ein spezieller Versuchsstand in Eigenleistung entwickelt und gebaut. Die Kontrolle der Versuchsrandbedingungen umfasst außerdem den reproduzierbaren Einbau des Bodens. Die Kennwerte des Bodens werden schließlich im Labor an Proben bestimmt, die das Spektrum der Einbaudichten abdecken. Zur Bestimmung der Abhängigkeit der Bodenkennwerte von der Dichte, der Probenherstellung und dem Spannungsniveau ist ein umfangreiches Laborprogramm vorgesehen.

2.2.1 Bodenmechanische Laborversuche zur Kennwertermittlung

Zunächst war ein geeigneter Boden für die Modellversuche auszuwählen. Dieser sollte folgende Anforderungen erfüllen:

- ein nichtbindiger Boden, möglichst ein Fein- bis Mittelsand, der beim Rieseln nur wenig zur Staubentwicklung neigt.
- die Dichten bei lockerster und dichtester Lagerung sollten so weit auseinander liegen, dass eine gezielte Herstellung unterschiedlicher Lagerungsdichten möglich ist.
- die reproduzierbare Herstellung einer Lagerungsdichte soll auf einfache Weise, z. B. durch Einschütten, möglich sein.

Es ist das Ziel des Forschungsprojekts, ein Bemessungsverfahren zu entwickeln, das im Wesentlichen klassische bodenmechanische Kennwerte benutzt. Für die Interpretation der Modellversuche ist allerdings die Bestimmung der Abhängigkeit der Kennwerte

vom Spannungsniveau und der Dichte erforderlich. Insbesondere die Spannungs- und Druckabhängigkeit des Reibungswinkels φ soll in umfangreichen Triaxialversuchen festgestellt werden. Es ist vorgesehen, die Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Amplitude und der Anzahl der Zyklen durch einfach bestimmbare Kennwerte zu erfassen. Dazu sind zyklische Versuche unter Randbedingungen geplant, die den Modellversuchen nahe kommen.

In der ersten Phase werden folgende Eigenschaften bestimmt:

- Korngrößenverteilung und Kornform
- Grenzlagerungsdichten, Korndichte
- bodenmechanische Berechnungskennwerte (Steifemodulbeiwerte ν und w , Scherparameter φ und c , Durchlässigkeit k) für klassische Nachweise in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte
- Kennwerte von Stoffgesetzen (z. B. Hardening Soil) in Abhängigkeit vom Spannungszustand und der Belastungsgeschichte, abhängig von der Zyklenzahl. Schwerpunkt sind Triaxialversuche zur Erfassung der Mobilisierung
- Untersuchung der Veränderung der Steifigkeit und der Scherfestigkeit bei kleinen, statischen Lastzyklen in Abhängigkeit von Spannungsniveau und Lagerungsdichte.

2.2.2 Modellversuche, numerische Berechnungen

Zur systematischen Untersuchung unterschiedlicher Beanspruchungen und Bauweisen sind kleinmaßstäbliche Modellversuche geplant. Dazu wird ein 1g-Versuchsstand gebaut, in dem die Träger maßstäblich nachgebildet und sowohl axial als auch horizontal zyklisch belastet werden können. Es wird eine kraftgesteuerte Belastungsvorrichtung entwickelt.

Die Ergebnisse der Labor- und Modellversuche bilden die Grundlage für Nachrechnungen mit klassischen Verfahren und numerischen Methoden. Aus der umfassenden Bewertung von in situ Messungen, Modellversuchen und den Ergebnissen der Berechnungen soll ein Nachweisverfahren abgeleitet werden, das mit einfachen Ansätzen auskommt.

2.2.3 Berechnungsansatz, Belastungsversuche

Für die Entwicklung von Berechnungsverfahren ist die Bearbeitung folgender Teilaufgaben vorgesehen:

- Bereitstellung von Mobilisierungsfunktionen für den Zusammenhang zwischen den Verformungen und den Belastungen. Die Parameter dieser Funktionen werden in Abhängigkeit der Bodenkennwerte angegeben.
- Entwicklung eines Rechenansatzes zur Erfassung der Kinematik der kurzen Träger. Dazu ist die Lage der Drehachsen sowie die Steifigkeit des Trägers im Verhältnis zur Steifigkeit des Untergrunds zu beschreiben. Für die Quantifizierung der Wechselwirkung Bauwerk-Baugrund ist die Kenntnis des Bereichs mit klaffender Fuge wichtig.
- Bereitstellung von Funktionen, die die Abnahme der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Zyklenzahl und der Amplitude erfassen.

Bei den Untersuchungen im Modellmaßstab können die Modellgesetze niemals vollständig eingehalten werden. Für die Überprüfung der Berechnungsannahmen ist die Entwicklung eines baustellentauglichen Verfahrens für Probelastungen notwendig. Als mögliche Lösungsansätze werden folgende Varianten untersucht:

- Prüfung durch Impulsbelastung des Trägers
- Statische Probelastung in vertikaler Richtung bei konstanter Horizontalkraft
- Aufsetzen einer Vorrichtung zur Erzeugung von Erschütterungen, Messung der Systemantwort.

3 Erste Ergebnisse

3.1 Laborversuche

Für die Modellversuche wird ein Sand mit einer Kornverteilung gemäß Abbildung 4 benutzt (Ungleichförmigkeitszahl $C_U=3$, Krümmungszahl $C_C=1$). Es handelt sich nach DIN EN ISO 14688-1 um einen mittelsandigen, feinkiesigen Grobsand (fgrmsaCSa).

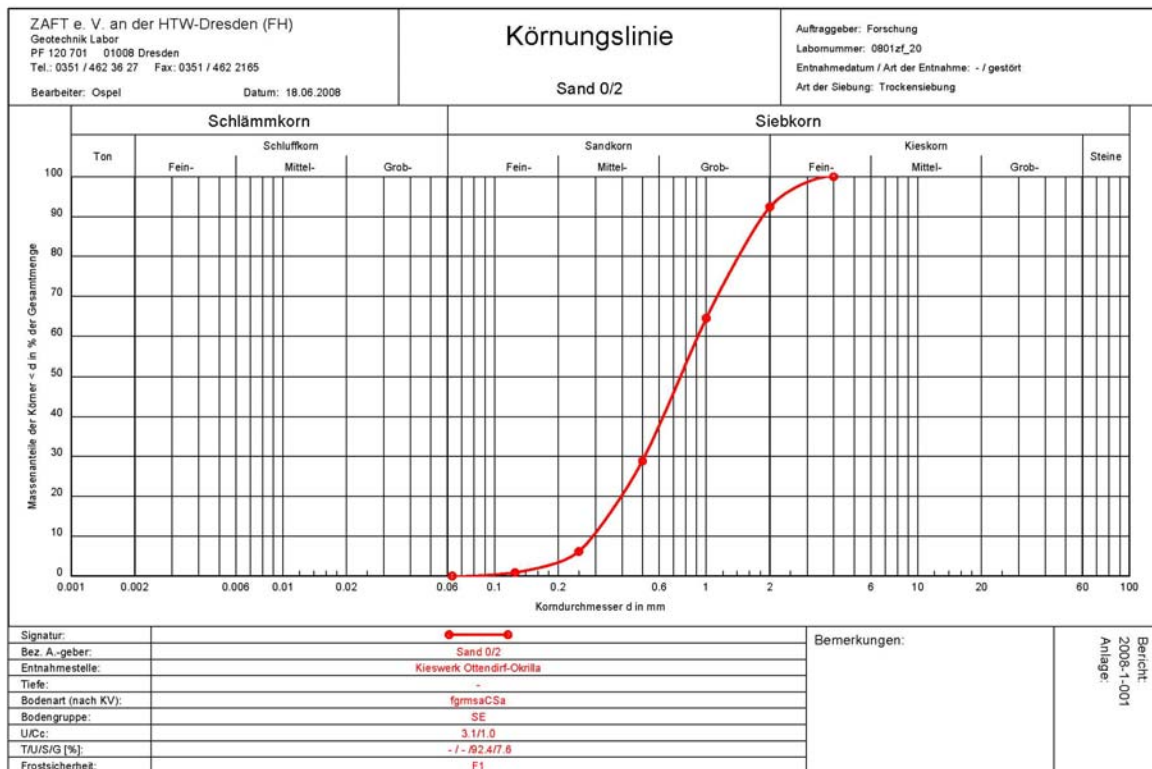


Abbildung 4 Korngrößenverteilung des Modellsandes

Die lockerste Lagerung beträgt $1,50 \text{ g/cm}^3$ und dichteste Lagerung $1,62 \text{ g/cm}^3$.

3.2 Versuchsstand – Modellversuche

Für die Modellversuche wurde ein Versuchsstand (siehe Abbildung 5) geplant, der eine maßstäbliche Nachbildung der realen Verhältnisse ermöglicht. Die Belastungen werden kraftgesteuert aufgebracht und langsam variiert.

Es sollen folgende Ergebnisse bereitgestellt werden:

- Angaben zum Bruchverhalten, insbesondere zur Geometrie des an der Lastabtragung beteiligten Bodenbereichs,
- Kinematik der Träger, insbesondere Lage der Drehachse und Beschreibung der Starrkörperbewegung der Träger,
- Arbeitslinien der Träger. Dies umfasst die Abhängigkeit der Grenztragkraft von der Zyklenzahl, der Amplitude und der Lastkombination,
- Sammlung von Erfahrungen bezüglich der Messung der Kräfte und Verformungen als Voraussetzung für die Entwicklung eines Messverfahrens für in situ Belastungsversuche.

Für den Einbau des Modellsands mit einer vorgegebenen Dichte ist das Einrieseln und das Rütteln nach lockerem Einfüllen vorgesehen.

Zur Erprobung der Versuchstechnik wurde als erstes die Reproduzierbarkeit bei statischer, axialer Zugbelastung untersucht. Diese „Herausziehversuche“ liefern darüber hinaus als Ergebnis die Mantelreibung, die am Modellträger mobilisiert worden ist. Diese Versuche sind jeweils mit einer konstanten Dichte und einer konstanten Einbindelänge durchgeführt worden. Dabei wurde jeweils der Herausziehwiderstand gemessen.



Abbildung 5 Modellversuchsstand für zyklische Herausziehversuche

In Abbildung 6 ist der Herausziehwiderstand in Abhängigkeit von der Einbaudichte für einen Pfahl mit einem Durchmesser von 3 cm aufgetragen.

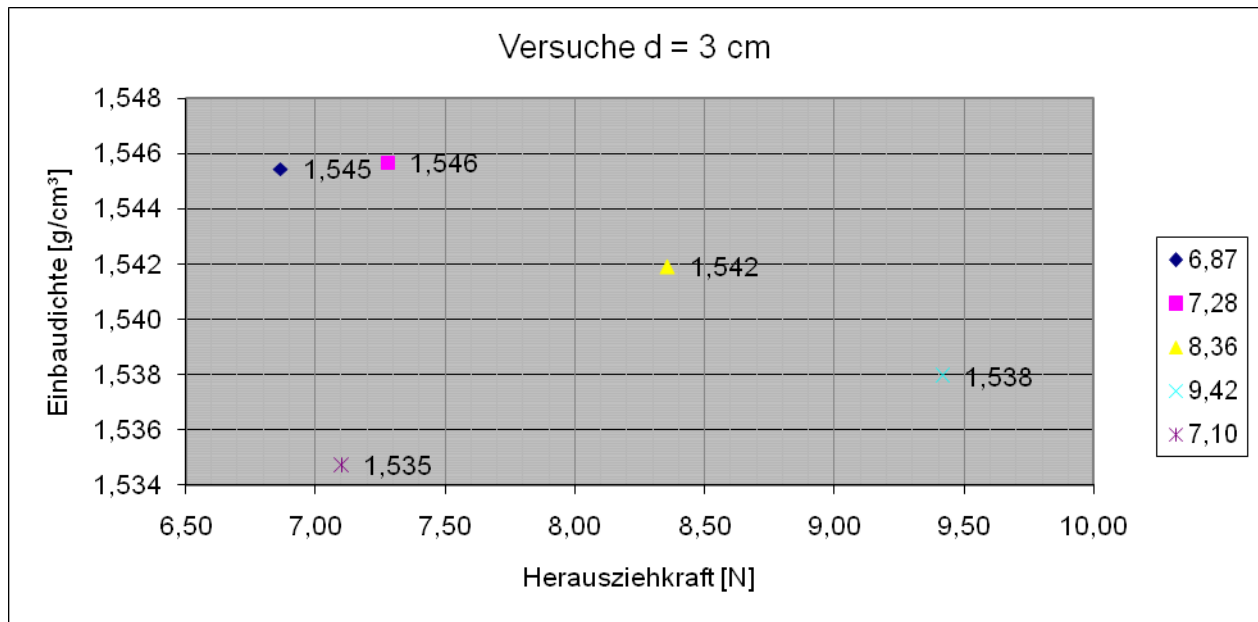


Abbildung 6 Herausziehversuche Pfahl (d = 3cm)

4 Zusammenfassung / Ausblick

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens werden die Grundlagen für die Nutzung kurzer Träger für zyklisch mehrachsig belastete Gründungen untersucht. Dazu ist ein Modellversuchsstand entwickelt worden, mit dem die grundsätzliche Lastabtragung erfasst wird. Eine direkte Übertragung auf den Prototyp in situ ist nicht ohne weiteres möglich. Deshalb besteht das Ziel der Versuche zunächst in der Schaffung reproduzierbarer Randbedingungen. Es wird dafür ein nichtbindiger Sand als Versuchsmaterial eingesetzt und mit speziellen Einbaumethoden in den Versuchsstand eingefüllt. Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse unter gleichen Randbedingungen konnte mit den ersten Versuchen nachgewiesen werden.

Im Zuge der nächsten Arbeitsschritte sind Versuchsserien geplant, in deren Ergebnis die Abhängigkeit der Grenztragkraft von der Belastungsamplitude und der Zyklenzahl erfasst wird. Schließlich soll durch Probelastungen in situ die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf reale Bedingungen sicher gestellt werden.

5 Literatur

- | | | |
|---------------------------------|------|---|
| DIN 18123 | 1996 | Bestimmung der Korngrößenverteilung |
| DIN EN ISO 14688-1 | 2006 | Benennung , Beschreibung und Klassifizierung von Boden |
| DIN 18196 | 2006 | Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke |
| C. Neuberg, D. Franke, J.Engel, | 2007 | Modellversuche und numerische Simulationen mit der DEM zum räumlichen passiven Erddruck, BAutechnik, 2007, Heft 6, S. 379-387 |
| C. Neuberg, D. Franke, J.Engel, | 2007 | Ein neues Verfahren zur Berechnung des räumlichen passiven Erddrucks, BAutechnik, 2007, Heft 7, S. 477-485 |
| DIN 1054 | 2005 | Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau |

Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Enrico Kammel
Zentrum für angewandte Forschung und Technologie (ZAFT)
an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH)
Friedrich-List-Platz 1
D-01069 Dresden
Telefon +49 351 4623667
Email: kammel@htw-dresden.de

Dipl.-Ing. Ingolf Schuhmacher
Sachverständigeninstitut für Geotechnik GmbH
90461 Nürnberg
Telefon +49 911 48094935
Email: is@sv-geo.de