

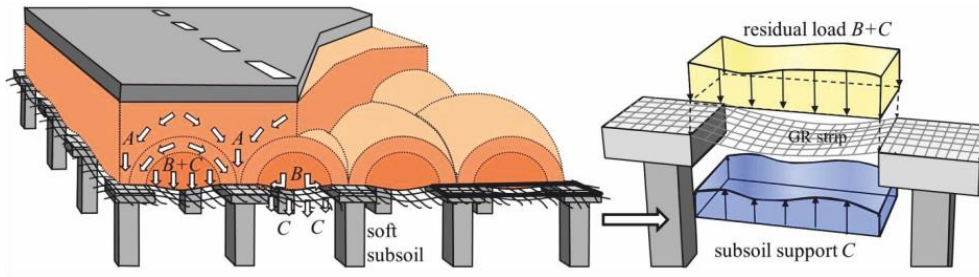
## **Untersuchungen zum Tragverhalten von Piled Embankments im Großversuch**

**Marc Schneider, M.Sc.<sup>1</sup>, Marylin Hell, M.Sc.<sup>2</sup>, Britt Wittekoek, M.Sc.<sup>3</sup>,  
Dr. ir. Suzanne van Eekelen<sup>3</sup>, Pascal Schaubert, M.Sc.<sup>4</sup>, Dipl.-Ing. Paul Pandrea<sup>2</sup>,  
Prof. PhD. DSc. CE. Michał Topolnicki<sup>5</sup>, Karolina Makowska M.Sc. CE.<sup>6</sup>,  
Prof. Dr.-Ing. Hauke Zachert<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen, Institut für  
Geotechnik, <sup>2</sup>Keller Holding, <sup>3</sup>Deltares, Niederlande, <sup>4</sup>Keller Fondations Spéciales, <sup>5</sup>Keller Polska, Polen,  
<sup>6</sup>SHM System, Polen

### **1 Einleitung**

Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern sind eine etablierte Bauweise zum Errichten von Infrastrukturbauwerken, insbesondere in Regionen die durch weichen, stark setzungsempfindlichen Boden charakterisiert sind. Angelehnt an die international verbreitete Bezeichnung werden diese Systeme in diesem Beitrag als Piled Embankments bezeichnet. Die Modellvorstellung des Tragverhaltens in einem Piled Embankment gemäß dem Concentric Arches Modell (CA Modell) nach van Eekelen et al., 2013, 2015 ist in Bild 1 dargestellt. Im Dammkörper bilden sich Bodengewölbe aus, sobald sich der Boden zwischen den Pfählen stärker setzt als die Pfähle selbst. Durch das Dammmaterial selbst wird ein gewisser Anteil an Lasten (A) direkt auf die Pfähle umgelagert. Um weitere vertikale Lasten und die für Dämme typischen Spreizkräfte aufzunehmen und auf die Pfähle umzulagern, wird eine Basisbewehrung, üblicherweise aus Geokunststoffen (GKS), eingesetzt.



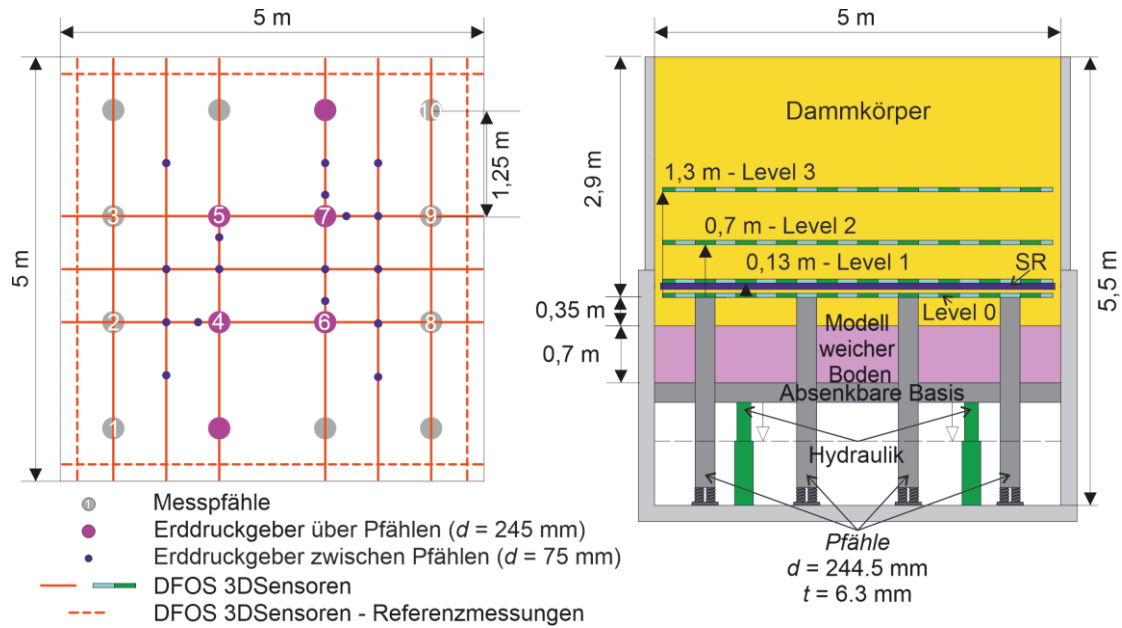
**Bild 1** Lastabtragung in einem Piled Embankment durch Gewölbebildung im CA Modell. Nach van Eekelen et al., 2013.

Die Verwendung von GKS als Basisbewehrung ist eine international etablierte Lösung in Piled Embankments. Bei hohen Dämmen werden die Lasten aus Eigengewicht groß und es werden GKS mit höherer Dehnsteifigkeit oder auch mehrlagige GKS verwendet, um die Verformungen gering zu halten. Bei sehr hohen Lasten können erhebliche horizontale Spreizkräfte an der Basis des Erdkörpers auftreten, welche insbesondere von unbewehrten oder schwach bewehrten vertikalen Traggliedern nicht aufgenommen werden können. In diesen Fällen bietet sich die Verwendung einer im Vergleich zu GKS deutlich steiferen Bewehrung aus Stahlgittern an (Topolnicki et al., 2019). Der vorliegende Beitrag basiert auf den in Schneider et al. 2024 a und b gezeigten Inhalten.

## 2 Großmaßstäblicher Modellversuch

Dieser Beitrag stellt einen an der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) durchgeführten großmaßstäblichen Modellversuch zur Untersuchung von mit Stahlgittern bewehrten Erdkörpern auf Pfählen (Piled Embankments) vor. Der Modellversuch wurde im Rahmen des Projekts PEBSTER (Piled Embankments with Basal Steel Reinforcement) entwickelt, welches im Rahmen des EU Projekts GEOLAB gefördert wurde. Neben dem Großversuch an der TU Darmstadt umfasst das PEBSTER Projekt eine Serie von vier kleinmaßstäblichen Versuchen zum Tragverhalten von Piled Embankments mit Stahlbewehrung in einem speziell hierauf ausgerichteten Versuchsstand bei Deltares in Delft. Der kleinmaßstäbliche Versuchsaufbau und Versuchsergebnisse sind van Eekelen et al. 2024 a und b zu entnehmen.

Bild 2 zeigt einen schematischen Aufbau des großmaßstäblichen Modellversuchs. Auf einer Grundfläche von 5 m x 5 m und mit einer Gesamthöhe von 5,5 m wird ein innenliegender Ausschnitt eines Piled Embankments mit 16 Pfählen abgebildet. Die Pfähle sind am Fuß federnd gelagert und reichen durch das Modell des weichen Bodens (siehe Abschnitt 2.2) hindurch. Im Modellmaßstab 1:1,6 stellt dies einen Erdkörper von 4,7 m Höhe über den Pfahlköpfen dar.



**Bild 2** Schematischer Aufbau des Modellversuchs in einer Draufsicht (links) und einer Seitenansicht (rechts).

Das Bodenmodell wurde aus trockenem „Darmstädter Sand“ (Mittelsand) hergestellt. Der Sand wurde mit einer mittleren Dichte von  $1,735 \text{ g/cm}^3$  lagenweise eingerieselt, was einer relativen Dichte von 92 % entspricht. Der Sand weist bei dieser Lagerungsdichte einen Reibungswinkel von  $\phi' = 34,8^\circ$  auf.

Mit der Modelldammhöhe von 2,90 m wird die nach Topolnicki und Kłosiński et al. (2022) geschätzte kritische Höhe von 1,52 m sicher überschritten. Die kritische Höhe ist der Bereich oberhalb der Bewehrung, in dem sich die Gewölbewirkung ausbildet. Oberhalb der kritischen Höhe wird von gleichmäßigen Setzungen sowohl über als auch zwischen den Pfählen ausgegangen.

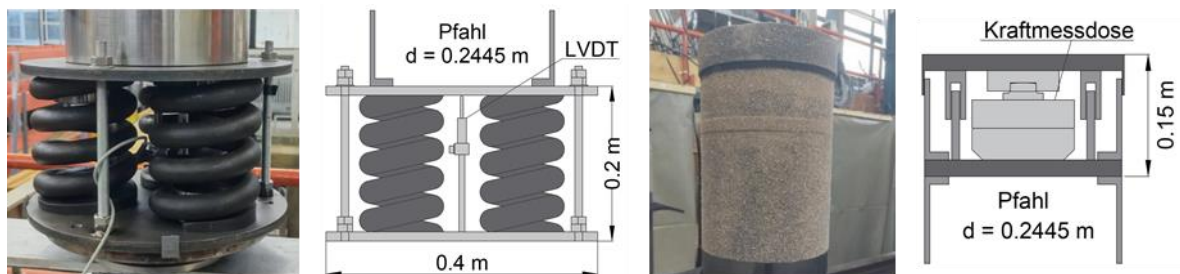
Mit dem Ziel, hochauflösende räumliche Messungen der Spannungen und Dehnungen sowie der Verformungen in dem Modellversuch zu gewinnen, wurden vier Ebenen von verteilten faseroptischen Sensoren (DFOS) und konventionelle Sensoren strategisch über, in und zwischen den Pfahlköpfen und an der Stahlbewehrung platziert. 50 lineare DFOS und 84 klassische Sensoren erfassten Bodenverformungen, Stahldehnungen, Bodenspannungen, Pfahllasten sowie die Gesamtlasten und Verformungen des Modellversuchs.

## 2.1 Pfähle

Die 16 Pfähle wurden durch S235-Stahlrohre mit einem Außendurchmesser von  $d = 244,5 \text{ mm}$  und einer Wandstärke von  $t = 6,3 \text{ mm}$  modelliert. Um die Mantelreibung von Ortbetonpfählen besser nachzubilden, wurde die glatte Stahloberfläche der Modellpfähle oberhalb des weichen Modellbodens auf einer Epoxidharzschicht mit Sand

bestreut. Die Pfahloberfläche im Kontakt mit dem weichen Modellboden wurde nicht besandet, um die negative Mantelreibung zu minimieren.

Modellversuche zu Piled Embankments aus der Literatur weisen in aller Regel eine starre Auflagerung der Pfähle auf. Damit wird die natürliche Pfahlsetzung vernachlässigt, was wiederum einen Einfluss auf die Ausbildung der Gewölbewirkung haben kann, da diese ausschließlich infolge der Relativverschiebung zwischen Boden und Pfahl entsteht. Um die Auswirkungen flexibler Auflagerpunkte auf das Lastverteilungsverhalten in der Tragschicht zu untersuchen, wurden die Pfähle daher auf Federpaketen mit einer Steifigkeit von 5 MN/m platziert (Bild 3, links). In den kleinmaßstäblichen Versuchen von van Eekelen et al. 2024 a wurde gezeigt, dass die starr gelagerten Pfähle erwartungsgemäß eine höhere Last anziehen als die federnd gelagerten Pfähle.



**Bild 3** Aufbau der Pfahlbasis (links) und der Pfahlköpfe (rechts) im Modellversuch.

Zehn der 16 Pfähle wurden in den Pfahlköpfen und dem Federpaket am Pfahlfuß instrumentiert. Diese Messpfähle sind verteilt auf die Eck-, Rand- und Innenpfähle (vgl. Bild 1). Für die Überprüfung des Lastverteilungsmodells ist die Kenntnis der auf den Pfahlkopf wirkenden Kräfte von zentraler Bedeutung. Die Pfahlköpfe beinhalten daher eine Kraftmessdose, welche über einen Deckel die gesamten wirkenden Lasten erfasst. Der Aufbau dieses Pfahlkopfs ist in Bild 3 rechts dargestellt. Um den Einfluss der über den Mantel des Deckels übertragenen Kräfte auf die Kraftmessung möglichst gering zu halten, wurde der Deckel so flach wie möglich konstruiert. Am Pfahlfuß wird über einen Wegaufnehmer in der Mitte der Federpakete die Setzung ermittelt. Im Vorfeld wurde für jedes Federpaket die individuelle (aber sehr ähnliche) Steifigkeit ermittelt, welche dann wiederum zur Ermittlung der Pfahlfußkräfte aus den gemessenen Verschiebungen herangezogen wurde. Zusammen mit der am Pfahlkopf gemessenen vertikalen Belastung kann somit die Größe der auftretenden Mantelreibung an den Pfählen bestimmt werden.

## 2.2 Modell des wenig tragfähigen bindigen Bodens

Piled Embankments werden eingesetzt, um besonders kompressible, bindige Böden zu überbrücken. Das Verhalten dieses bindigen Bodens ist maßgebend für das Last-Verformungsverhalten sowie die Lastverteilung in dem Piled Embankment. Die Verwendung

bindiger Böden im Großversuch ist jedoch nur mit erheblichem versuchstechnischem und zeitlichem Aufwand möglich, weshalb ein zweiteiliges System entwickelt wurde, um das weiche Bodenverhalten zu modellieren. Ein aus dem Recycling von Altreifen gewonnenes Gummigranulat wurde eingesetzt, um einen Boden mit sehr geringer Steifigkeit abzubilden. Dieses Gummigranulat hat sowohl große elastische Verformungsanteile als auch ein ausgeprägtes Kriechverhalten, welches sich jedoch nicht steuern lässt. Um zusätzlich eine ausgeprägte Konsolidierung des natürlichen Bodens zu modellieren, wurde die weiche Modellbodenschicht auf einem nahezu starren doppelten Boden aufgebracht, welcher über Hydraulikpressen kontrolliert abgesenkt werden konnte, um so eine ausgeprägte Konsolidierung zu simulieren. Das Gummigranulat besteht aus Partikeln von etwa 1,5 bis 5 mm Durchmesser. Die Modellbodenschicht hatte im unbelasteten Zustand eine Mächtigkeit von 0,7 m bei einer mittleren Dichte von  $0,48 \text{ g/cm}^3$ . Die spannungsabhängige Erstbelastungssteifigkeit des Gummigranulats wurde in Ödometerversuchen zu kleiner 1 MPa bestimmt. Die Ent- und Wiederbelastungssteifigkeit liegt zwischen 1 MPa und 4 MPa. Um exakte Vergleiche der Messdaten aus dem Großversuch mit Berechnungen analytischer und numerischer Methoden zu ermöglichen, wird das Gummigranulat derzeit in weiteren Laborversuchen intensiv untersucht, die Ergebnisse eines Großödometers sind in Schneider et al. 2024 a angegeben.

Als die Setzungen des Gummigranulats nach Erstellung des kompletten Modells abgeklungen waren, wurde der nächste Schritt im Versuchsablauf gestartet, um weitere, zeitabhängige Setzungen im System zu erzeugen. Der auf Hydraulikpressen gelagerte steife doppelte Boden des Versuchsstands besteht aus steifen Stahlträgern und 100 mm starken Brettspertholz-Tafeln. Nach Erreichen der maximalen Setzungen des Gummigranulats infolge des Eigengewichts des voll aufgebrachten Dammkörpers wurde der steife doppelte Boden schrittweise um insgesamt 220 mm abgesenkt. Dies hatte zum Ziel, den Kontakt zwischen Bewehrung und Gummigranulat möglichst überall zu unterbrechen und damit den Traganteil des weichen Bodens (Lastanteil C in Bild 1) aufzuheben. Die Last des gesamten Erdkörpers sollte über die Gewölbewirkung und die Bewehrung (Lastanteile A und B) auf die 16 Pfähle übertragen werden. Nach bisherigen Erkenntnissen wurde dies zumindest teilweise erreicht.

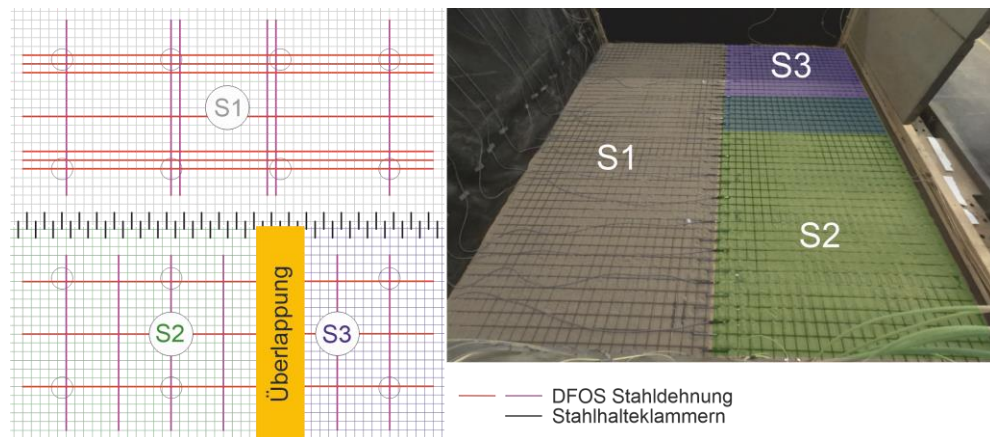
### 2.3 Stahlbewehrung

Die im Modellversuch verwendete Basisbewehrung aus Stahlmatten besteht aus 8 mm starkem Baustahl (Stahl S235), der mit einem Achsabstand von 100 mm quadratisch angeordnet und verschweißt ist. Die resultierende Zug- und Biegesteifigkeit der Matten beträgt  $EA = 105558 \text{ kN/m}$  bzw.  $EI = 0,2577 \text{ kN} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ .

Die Bewehrung wurde zusammengesetzt aus drei Matten in den Versuchsstand eingebaut. Zum einen wäre der Einbau einer durchgehenden quadratischen Matte mit 5 m Kantenlänge logistisch nicht möglich gewesen, zum anderen sollten auch die in der Praxis

üblichen Verbindungen von Stahlmatten in Piled Embankments untersucht werden. Die Matte S1 (Bild 4) wurde mit den beiden anderen Matten S2 und S3 auf Kontakt gestoßen und dann mit Stahlhalteklammern verbunden. 16 dieser 49 Halteklammern wurden zusätzlich mit Dehnungsmessstreifen bestückt, um das Dehnungsverhalten der Klammern unter Last zu beobachten. Die Matten S2 und S3 wurden überlappend verlegt, um auch diese gängige Art der Verlegung im System zu untersuchen.

Um die Dehnungen in der Bewehrung systematisch zu untersuchen, wurden zahlreiche Stäbe mit Glasfaser-Sensoren ausgestattet. In Bild 4 sind die instrumentierten Stäbe gekennzeichnet. Dabei wurden Glasfasersensoren in der Regel an der Ober- oder Unterseite der Bewehrung angebracht, vereinzelt aber auch seitlich an den Bewehrungsstäben um die Dehnung in den Einzelstäben differenziert betrachten zu können. Die kontinuierlichen Dehnungsmessungen erlauben einen vertieften Einblick in das Biegeverhalten der Stahlbewehrung und sollen den detaillierten Vergleich mit zukünftigen numerischen Berechnungen und analytischen Modellen ermöglichen.



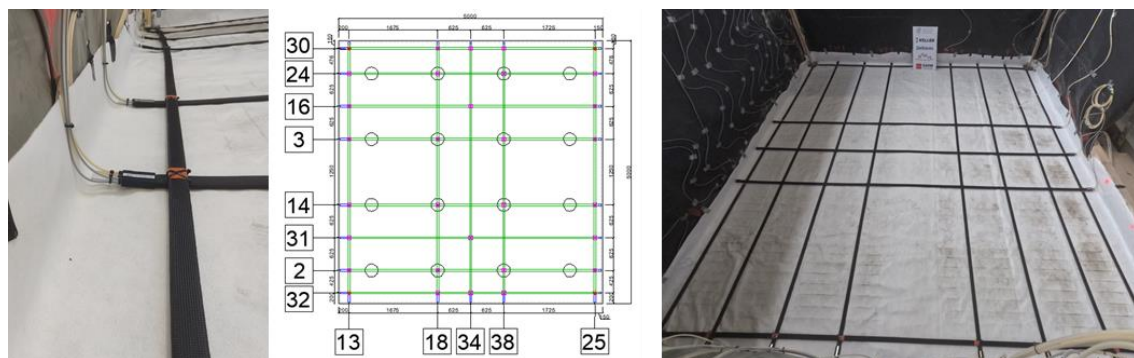
**Bild 4** Die im Modellversuch verwendeten Stahlmatten und deren Anordnung in der Draufsicht (links) und in einer Ansicht (rechts).

## 2.4 Verteilte faseroptische Messungen

Eine Vielzahl verteilter faseroptischer Messungen (Distributed Fibre Optic Sensing – DFOS) wurde zur Untersuchung des Systemverhaltens im Modellversuch eingesetzt. 40 3D-DFOS-Sensoren („3DSensor“) wurden verwendet, um die 3D-Verformungen der Bewehrung und des Dammmaterials zu erfassen. Diese 3DSensoren kombinieren vier Glasfasern in einem Sensor und ermöglichen über die Auswertung der Dehnungsdifferenzen die Ableitung von Verformungen in die drei Raumrichtungen. Zusammen mit zehn weiteren DFOS-Dehnungsmessungen und 84 konventionellen Sensoren wurde ein hochauflösender Einblick in das System ermöglicht. Die Konzentration von Erddruck-, Dehnungs- und Verformungsmessungen im Bereich zwischen den Pfählen und der kritischen Höhe ermöglicht die umfassende Untersuchung des Bodenverhaltens und der



Gewölbeausbildung sowie punktwiser Messungen der Lastverteilung auf die Bewehrung. Die 3DSensoren ermöglichen die hochauflösende Ermittlung von relativen Verformungen entlang des Sensors. Um hieraus die absoluten Verformungen zu ermitteln, müssen für jeden Sensor an mindestens zwei Punkten Referenzmessungen erfolgen, analog zur Interpretation der Biegelinie eines Balkens. Die detaillierte Ausbildung dieser Referenzpunkte ist in Schneider et al. 2024 b angegeben. Während die 3DSensoren einen bisher unerreichten Einblick in das Verformungsverhalten von Piled Embankments liefern, so ist die Auswertung sehr aufwendig und komplex. Details zum Vorgehen bei der Auswertung von faseroptischen Messungen im PEBSTER Projekt können van Eekelen et al 2024 b entnommen werden und wurden für die klein- und großmaßstäblichen Versuche gleichermaßen angewendet.



**Bild 5** Referenz-Sensor am Rand des Versuchs (links), Draufsicht der in Ebene 1 verwendeten DFOS-Sensoren (mittig) und Ansicht der eingebauten 3DSensoren (rechts).

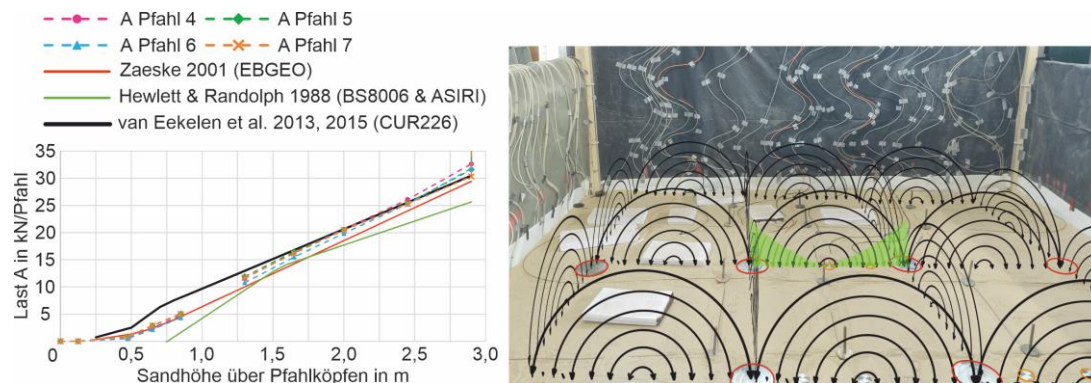
### 3 Ergebnisse und Vergleich mit analytischen Modellen

Die Darstellung der Ergebnisse in diesem Beitrag konzentriert sich zunächst auf die vier innenliegenden Pfähle. Sie erfahren minimalen Einfluss aus Wandreibung oder anderen Randeffekten und zeigen daher die ungestörte Ausbildung der Gewölbewirkung und der damit einhergehenden Lastumlagerung in einer inneren Zelle des Piled Embankments.

#### 3.1 Lastumlagerung

Bild 6 zeigt die Lasten A, welche im Boden auf die Positionen der Pfähle umgelagert und oberhalb der Bewehrung mit Erddruckgebern gemessen wurden. Die Erddruckgeber hatten den gleichen Durchmesser wie der Pfahl, weshalb die Erddruckspannungen zu Kräften analog zu den Pfahlkräften umgerechnet werden können. Die Lasten der vier gezeigten Innenpfähle stimmen untereinander sehr gut überein und bestätigen ein symmetrisches Systemverhalten. Weiterhin fügen sich die Messdaten gut in die Berechnungen des Systems mit drei verschiedenen europäischen Normen zugrunde liegenden analytischen

Modellen ein. Diese analytischen Modelle wurden ausschließlich für geokunststoffbewehrte Piled Embankments erstellt. GKS weist jedoch gegenüber der Stahlbewehrung eine deutlich geringere Dehnsteifigkeit auf und hat keine Biegesteifigkeit. Die trotzdem gute Übereinstimmung der Ergebnisse lässt vermuten, dass diese Steifigkeiten der Bewehrung keinen signifikanten Einfluss auf die Größe der im Dammkörper auf die Pfähle umgelagerten Lasten A haben. Die Steifigkeit der Bewehrung scheint bei der Berechnung der über die Bewehrung umgelagerten Lasten B im Zusammenspiel mit der Tragwirkung C des weichen Bodens einen größeren Einfluss zu haben. Bisherige Untersuchungen zeigen einen Unterschied der in den Pfahlköpfen gemessen vertikalen Kräfte (Lasten A und B) und den Berechnungsergebnissen der analytischen Modelle. Inwiefern eine andere Verhaltensweise von Bewehrungen aus GKS oder Stahl ursächlich für die beobachteten Unterschiede sind, wird weiterhin untersucht. Da die Auswertung des Großversuchs jedoch nur eine Kombination aus Bewehrung und Bodenmodell darstellt, können diese Fragen im PEBSTER-Projekt nicht abschließend geklärt werden.



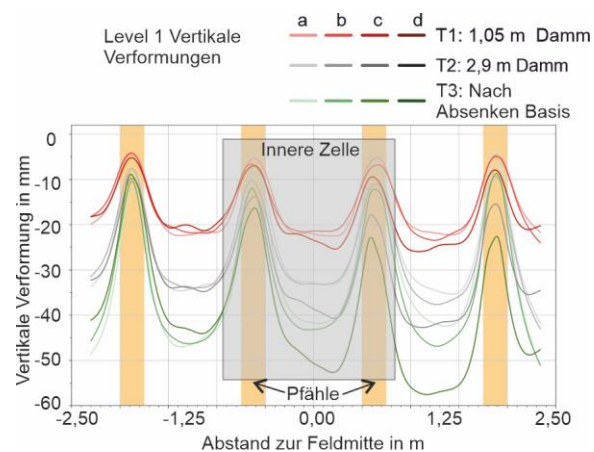
**Bild 6** Lasten A oberhalb der Bewehrung an den vier inneren Pfählen im Vergleich mit drei analytischen Modellen.

### 3.2 Verformung der Bewehrung

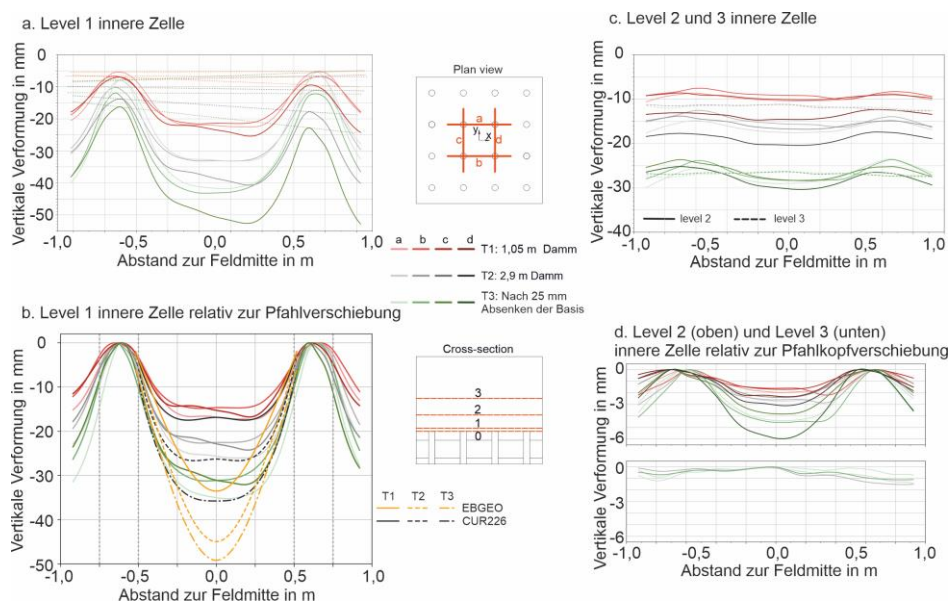
Die Verformung der Bewehrung, ermittelt mit den 3DSensoren a bis d gemäß Bild 5 ist in Bild 7 für drei Zeitpunkte (T1: 1,05 m Sand über der Bewehrung eingebracht; T2: 2,9 m Sand eingebracht, was der vollen Höhe entspricht; T3: der Zustand mit um 25 mm abgesenktem doppelten Boden) gegeben. Es ist zu erkennen, dass die Sandschicht zwischen Bewehrung und Pfahlkopf dazu führt, dass sich die gesamte Bewehrungslage bei zunehmender Belastung vertikal verschiebt. In Bild 8 sind die Verschiebungen der inneren Zelle dargestellt. Um einen besseren Vergleich der Durchbiegung der Bewehrung zwischen den verschiedenen Laststufen mit analytischen Modellen zu ermöglichen, werden die Verschiebungen sowohl absolut (Bild 8 a und c) als auch bezogen auf den Hochpunkt der verformten Bewehrung über den Pfählen (Bild 8 b und d) dargestellt. Die analytischen Modelle gehen davon aus, dass die Bewehrungslage direkt auf den Pfählen aufliegt und damit dort keine vertikale Verschiebung erfahren kann. In Bild 8b sind



zusätzlich die Ergebnisse von Berechnungen mit dem CA Modell nach van Eekelen et al., 2013, 2015 und dem Modell nach EBGeo (Zaeske, 2001) für die gleichen drei Zeitpunkte angegeben. Für den Vergleich wurden die Verformungen der analytischen Kurven am Pfahlrand gleichgesetzt zu den Verformungen des Experiments. Damit soll vereinfacht der Effekt der Setzungen in der Sandschicht über den Pfahlköpfen Rechnung getragen werden, welche in den analytischen Modellen nicht erfasst wird. Auch dieser Vergleich zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messdaten und Ergebnissen der Berechnung mit dem CA Modell, während das Modell nach EBGeo die Verformungen in Feldmitte stark überschätzt.



**Bild 7** Vertikale Verschiebungen der Bewehrung (3DSensoren Level 1).



**Bild 8** Vertikale Verschiebungen der Bewehrungslage (Level 1) und im Boden (Level 2 und Level 3) in verschiedenen Belastungszuständen T1 bis T3. a. absolute Verschiebungen der inneren Zelle. b. relative Verschiebungen, bezogen auf die Hochpunkte (gestrichelte Linien in a.) und Vergleich mit analytischen Modellen. c. absolute Verschiebungen des Bodens in Level 2 und 3. d. relative Verschiebungen des Bodens bezogen auf die Hochpunkte aus c.

Trotz der sehr guten Übereinstimmung der Messwerte mit dem CA Modell verbleiben einige Unterschiede in den in Bild 8b dargestellten Verläufe zwischen analytischem Modell und Experiment. Diese können auf zwei wesentliche Punkte zurückgeführt werden. (1) Stahlmatten haben im Vergleich zu GKS eine Biegesteifigkeit. Verformungsfiguren sind daher bei Verwendung der Stahlbewehrung grundsätzlich ausgerundeter zu erwarten und zeigen keine Knicke. Das CA Modell hat die Außenkanten der Pfähle als Randbedingung mit null Verformung vorgegeben, da es keine Sandschicht zwischen Pfahl und Bewehrungslage berücksichtigt. Auf dem Pfahl selbst wird davon ausgegangen, dass die GKS-Bewehrung fest auf dem Pfahlkopf aufliegt und keine Dehnungen und Verformungen auftreten. (2) Die 12,5 cm mächtige Sandschicht zwischen Pfahlkopf und Stahlbewehrung führt im Versuch planmäßig dazu, dass die Bewehrung einen ausgerundeten Biegeverlauf erfährt und eine zu starke, lokale Biegung an der Pfahlkante vermieden wird. Dies wäre bei einer GKS-Bewehrung ähnlich zu erwarten. Allerdings entstehen hierdurch insgesamt größere Setzungen des Dammkörpers. Diese Setzung wird verstärkt durch den Effekt, dass der Sand zwischen Bewehrung und Pfählen infolge der hohen lokalen Spannungen seitlich ausweicht. Insbesondere in der Absenkphase, wo das Gummigranulat schließlich einen Spalt unter der Bewehrung formt, fließt der trockene Sand in diesen Hohlraum.

Die Messungen der weiter oben im Dammkörper liegenden Messebenen 2 und 3 (siehe Bild 8c und d) zeigen jedoch deutlich, dass die Setzungsunterschiede umso geringer werden, je höher die Messebene im Dammkörper liegt. Diese Messungen zeigen eindrucksvoll die im Boden gebildete Gewölbewirkung (Level 2) und bestätigen das Erreichen einer Ebene gleichmäßiger Setzungen etwa 1,3 m oberhalb der Bewehrung (Level 3).

#### **4 Fazit**

In diesem Beitrag wird ein großmaßstäblicher Modellversuch zur Untersuchung von mit Stahlmatten bewehrter Erdkörper auf federnd gelagerten Pfählen vorgestellt. Dieser Versuch ist Teil des PEBSTER Projekts, welches außerdem eine Reihe kleinmaßstäblicher Versuche und numerischer Analysen umfasst. Auf der Grundlage der in diesem Beitrag vorgestellten Versuchsergebnisse können die folgenden vorläufigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Zug- und Biegesteifigkeit der Bewehrung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Gewölbebildung (Last A) in Piled Embankments. Dies wird durch die Testdaten der biegesteifen Stahlbewehrung im Vergleich zu den auf GKS-Bewehrung basierenden analytischen Berechnungen für die Last A und den Beobachtungen in den kleinmaßstäblichen Versuchen von van Eekelen et al., 2024a unterstützt.

- Die drei wichtigsten europäischen Bemessungsmethoden für GKS-verstärkte Erdkörper stimmen gut mit der gemessenen Gewölbewirkung (Last A) überein. Die Lastübertragung auf den Pfahl (Last A+B) und die Stützwirkung des weichen Bodens (Last C) hingegen werden ersten Ergebnissen zufolge von der Steifigkeit der Bewehrung beeinflusst.
- Die hohe Auflösung der DFOS-Sensoren ermöglicht in Kombination mit einer geschickten flächenhaften Anordnung einen einzigartigen Einblick in das Bodenmodell und einen detaillierten Vergleich der gemessenen Verformungen und Dehnungen mit den berechneten Werten.
- Die wichtigsten Berechnungsmodelle für Geokunststoffe gehen davon aus, dass die Dehnung der Bewehrung oberhalb der Pfähle gleich Null ist. Die Stahlbewehrung in diesem Versuch weist jedoch die größte Krümmung und damit auch die höchsten Dehnungen direkt über den Pfählen auf. Dies wird insbesondere auf die 12,5 cm starke Sandschicht zwischen Bewehrung und Pfahlkopf zurückgeführt.
- Da die Effekte der Biegesteifigkeit der Bewehrung und der Einfluss einer Bodenschicht zwischen Pfahlkopf und Bewehrungslage in den aktuellen Bemessungsmodellen nicht berücksichtigt werden, ergeben sich Unterschiede zwischen den Versuchsergebnissen und den analytischen Modellen. Das Modell nach EBGeo überschätzt die Verformungen der Bewehrung stark. Das CA Modell ist hingegen in der Lage, die Verformungen der Bewehrung sehr gut zu prognostizieren.

## 5 Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Finanzhilfvereinbarung Nr. 101006512 für das transnationale GEOLAB-Projekt PEBSTER, die TKI-PPS-Förderung des niederländischen Wirtschaftsministeriums und die finanzielle Unterstützung durch Keller.

## Literatur

Hewlett, W.J., Randolph, M.F., Aust, M.I.E. (1988).

Analysis of piled embankments. Ground Engineering Vol. 21, pp. 12-17.

Schneider, M., Hell, M., Pandrea, P., Wittekoek, B., van Eekelen, S.J.M., Topolnicki, M., Makowska, K., Sieńko, R., Zachert, H., (2024 a).

Large-scale test on basal steel-reinforced piled embankments. In: Proc. ECSMGE 24, Lisbon, Portugal.

- Schneider, M., Hell, M., Pandrea, P., Wittekoek, B., van Eekelen, S.J.M, Topolnicki, M., Makowska, K., Sieńko, R., Zachert, H., (2024 b).  
High density spatial measurements on a large-scale model of a basal steel-reinforced piled embankment. In: Proc. ECPMG 24, Delft, Netherlands.
- Topolnicki, M., Sołtys, G., Brzozowski, T., (2019).  
Performance and modelling of road embankment supported on rigid inclusions and a transfer platform with steel geogrid, Proc. of the XVII ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation of the future, Reykjavik.
- Topolnicki, M., Kłosiński, B. (eds.) et al., (2022).  
Recommendations for Ground Improvement with Rigid Inclusions - Design, Execution and Control (auf Polnisch). PWN SA. ISBN 978-83-01-22578-0.
- van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A. van Tol, A.F., (2013).  
An analytical model for arching in piled embankments. Geotextiles and Geomembranes 39: 78-102.
- Van Eekelen, S.J.M., Bezuijen, A., van Tol, A.F., (2015).  
Validation of analytical models for the design of basal reinforced piled embankments. Geotextiles and Geomembranes Volume 43, Issue 1, 56 – 81.
- van Eekelen, S.J.M. & Brugman, M.H.A., Eds. (2016).  
Design Guideline Basal Reinforced Piled Embankments (CUR226). CRC press, Delft, Niederlande.
- van Eekelen, S.J.M, Schneider, M., Hell, M., Wittekoek, B., Makowska, K., Zdanowicz, K., Pandrea, P., Sieńko, R., Schaubert, P., Topolnicki, M., Zachert, H. (2024 a).  
3D small-scale tests on steel-reinforced piled embankments. In: Proc. ECSMGE 24, Lisbon, Portugal.
- van Eekelen, S.J.M, Schneider, M., Hell, M., Makowska, K., Zdanowicz, K., Wittekoek, B., Pandrea, P., Sieńko, R., Schaubert, P., Topolnicki, M., Zachert, H., (2024 b).  
Distributed Fibre Optic Sensing (DFOS) in 3D small-scale tests on steel-reinforced piled embankments. In: Proc. ECPMG 24, Delft, Niederlande.
- Zaeske, D., (2001).  
Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen. Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 10