

# 3D TRAG- UND VERFORMUNGSVERHALTEN STAHLBEWEHRTER ERDKÖRPER AUF VERTIKALEN TRAGGLIEDERN

Marc Schneider, M.Sc., Technische Universität Darmstadt, Deutschland  
Marylin Hell, M.Sc., Keller Holding, Deutschland  
Britt Wittekoek, M.Sc., Deltares, Niederlande  
Karolina Makowska, M.Sc., SHM System, Polen

Dieser Beitrag präsentiert einen großmaßstäblichen Versuchsstand zur Untersuchung von mit Stahlmatten basisbewehrten dammartigen Erdkörpern auf vertikalen Traggliedern (Piled Embankments) im Maßstab 1:1,6. Infolge der hohen Dehn- und Biegesteifigkeit der Stahlbewehrung war zu untersuchen, ob sich die Ausbildung der Gewölbewirkung und damit das Trag- und Verformungsverhalten grundsätzlich von dem bereits umfangreich beschriebenen Verhalten bei Verwendung von Geokunststoffen als Basisbewehrung unterscheidet. Umfangreiche und hochauflösende Messungen an den Strukturelementen und im Boden, unter anderem mittels zahlreicher faseroptischer Sensoren, legen nahe, dass die hohe Dehn- und die Biegesteifigkeit der Stahlbewehrung keinen signifikanten Einfluss auf die Umlagerung der Lasten im Dammkörper haben. Ausgewählte analytische Modelle, die auf Geokunststoffbewehrung basieren, stimmten gut mit den im Großversuch gemessenen Kräften aus der Gewölbewirkung überein. Über spezielle faseroptische 3D Sensoren konnte ein einzigartiger Einblick in die Verformungen der Stahlbewehrung und des Bodens gewonnen werden. Detaillierte Messungen der Stahldehnungen zeigen zudem die Spannungskonzentrationen an den Auflagerpunkten und lassen Rückschlüsse auf das Plastifizieren des Stahls bei maximaler Belastung zu. Die analytischen Modelle überschätzten die Durchbiegung der Bewehrung im Vergleich zum Versuch. Dies kann unter anderem auf die fehlende Berücksichtigung der Biegesteifigkeit in den analytischen Modellen zurückgeführt werden.

## 1 Einleitung

Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern sind eine etablierte Bauweise für Infrastrukturprojekte, insbesondere in Gebieten mit weichen und stark kompressionsfähigen Böden. Diese Bauweise kombiniert die Baugrundverbesserung mit vertikalen Traggliedern und eine horizontale Basisbewehrung, wodurch sowohl die Tragfähigkeit als auch die Gebrauchstauglichkeit der dammartigen Körper erhöht werden. In der internationalen Fachliteratur werden diese Konstruktionen oft 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 und 2015 ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Bodengewölbe entwickeln sich innerhalb des Dammkörpers, sobald sich der Boden zwischen den Pfählen stärker setzt als die Pfähle selbst. Ein Teil der Lasten (Lastanteil A) wird durch das Dammmaterial direkt auf die Pfähle übertragen. Zur Aufnahme weiterer vertikaler Lasten und der für Dämme charakteristischen Spreizkräfte wird eine Basisbewehrung, üblicherweise aus Geokunststoffen (GKS), eingesetzt. Die Verwendung von GKS als Basisbewehrung ist eine international etablierte Lösung in Piled Embankments. Bei hohen Dämmen werden die Lasten aus dem Eigengewicht des Erdkörpers jedoch 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).

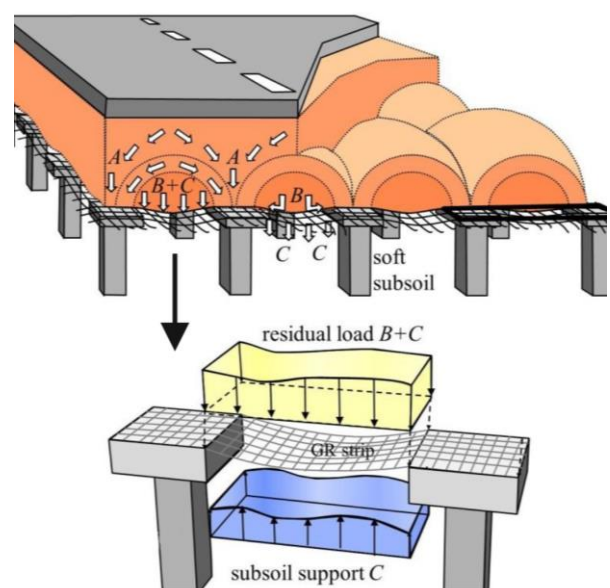


Abbildung 1: Lastabtragung in einem Piled Embankment durch Gewölbewirkung im CA-Modell. Nach van Eekelen et al., 2013.

## 2 Großmaßstäblicher Modellversuch

Dieser Beitrag präsentiert einen an der Technischen Universität Darmstadt (TU Darmstadt) konstruierten Versuchsstand zur Untersuchung von Piled Embankments mit einer Stahlbasisbewehrung. Zusätzliche Informationen über den durchgeführten Großversuch sind Schneider et al. 2024a und 2024b zu entnehmen. 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

Projekt eine Serie von vier kleinmaßstäblichen Versuchen in einem speziell hierauf ausgerichteten Versuchsstand bei Deltares in Delft. Der kleinmaßstäbliche Versuchsaufbau und Versuchsergebnisse sind van Eekelen et al. 2024a und 2024b zu entnehmen. Abbildung 2 zeigt den 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. Im Modellmaßstab 1:1,6 stellt dies einen Erdkörper von 4,7 m Höhe über den Pfahlköpfen dar.

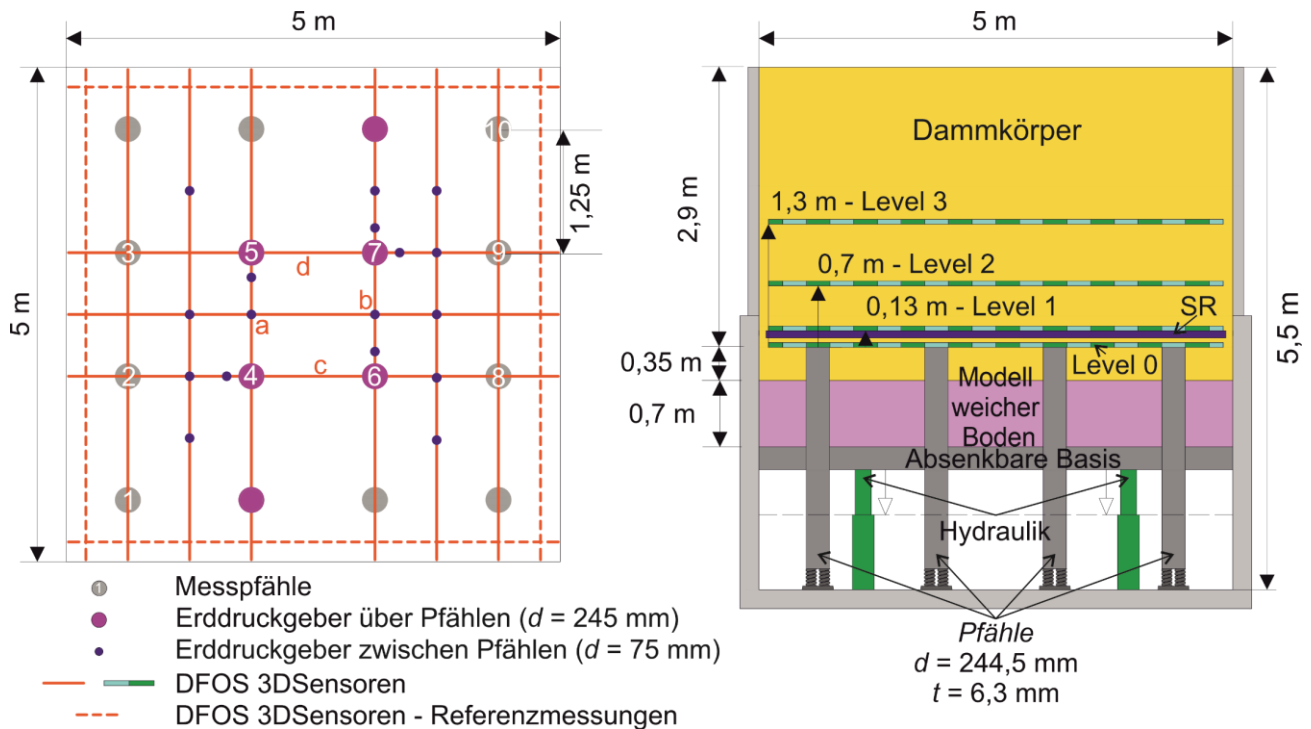


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des Modellversuchs in einer Draufsicht (l.) und einer Seitenansicht (r.).

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  $\varphi' = 34,8^\circ$  auf. Mit der Modelldammhöhe von 1,52 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 („Distributed Fibre Optic Sensing“ – 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 Oberfläche von Ortbetonpfählen besser nachzubilden, wurde die glatte Stahloberfläche der Modellpfähle oberhalb des weichen Modellbodens auf einer Epoxidharzschicht mit Sand bestreut. Die Stahloberfläche im Kontakt mit dem weichen Modellboden wurde nicht verändert, um die negative Mantelreibung in diesem Bereich 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 sich diese ausschließlich infolge der Relativverschiebung zwischen Boden und Pfahl ausbildet. 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 (Abbildung 3, links). In den kleinmaßstäblichen Versuchen von van Eekelen et al. 2024a wurde gezeigt, dass die starr gelagerten Pfähle erwartungsgemäß etwa 20 bis 30 % mehr Last anziehen als die federnd gelagerten Pfähle.

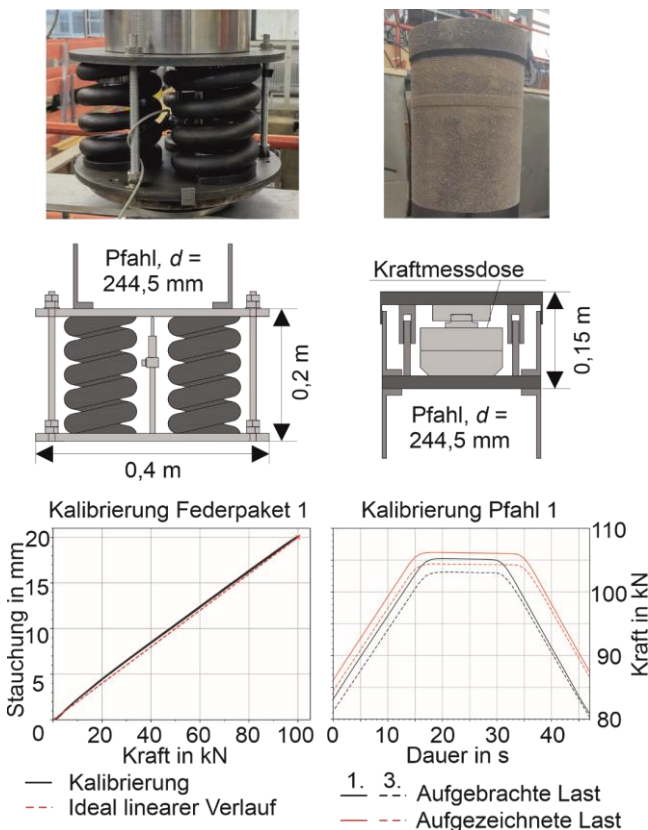


Abbildung 3: Aufbau der Pfahlbasis (links) und der Pfahlköpfe (rechts) im Modellversuch.

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. Abbildung 2). 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 Abbildung 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 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 und als auch ein ausgeprägtes Kriechverhalten. 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 die Konsolidierung des Bodens zwischen den Pfählen 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 Ödometersversuchen 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 entsprechenden Großödometers sind in Schneider et al. 2024a 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 Brettsperrholz-Tafeln. Nach Erreichen der maximalen Setzungen des Gummigranulats infolge des Eigengewichts des voll aufgetragenen Dammkörpers wurde der steife doppelte Boden schrittweise um insgesamt 220 mm abgesenkt. Dies hatte zum Ziel, den Kontakt zwischen Bewehrung und Gummigranulat



möglichst vollflächig aufzuheben und damit den Traganteil des weichen Bodens (Lastanteil C in Abbildung 1) aufzuheben. Die Last des gesamten Erdkörpers sollte dann über die Gewölbewirkung und die Bewehrung (Lastanteile A und B) auf die 16 Pfähle übertragen werden.

## 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 an den Knotenpunkten verschweißt ist. Die resultierende rechnerische Zug- und Biegesteifigkeit der Matten beträgt  $EA = 105.558 \text{ kN/m}$  bzw.  $EI = 0,2577 \text{ kN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ .

Die Bewehrung wurde zusammengesetzt aus drei Matten in den Versuchsstand eingebaut (Abbildung 4). 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 und Überlappungen von Stahlmatten in Piled Embankments untersucht werden. Die Matte S1 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 mit einer Überlappung von 50 cm verlegt, um auch diese gängige Art der Verlegung im System zu untersuchen.

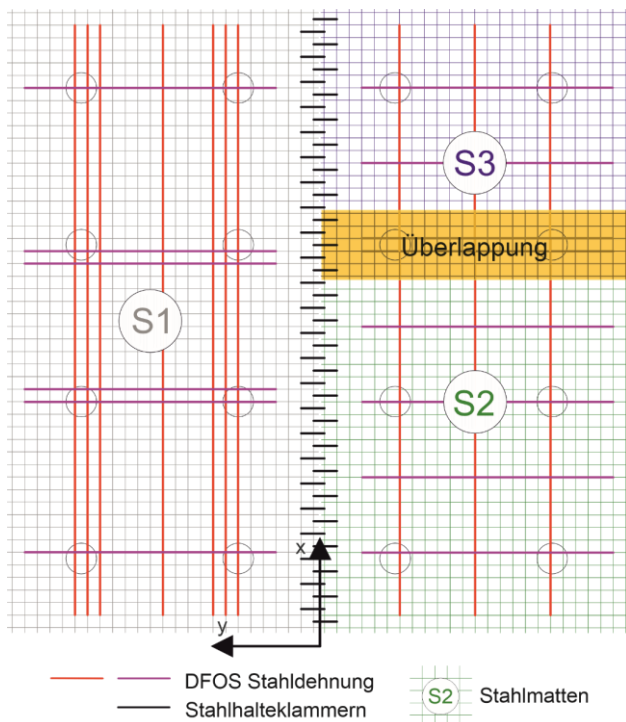


Abbildung 4: Die im Modellversuch verwendeten Stahlmatten und deren Anordnung sowie die mit DFOS-Dehnungsmessungen ausgestatteten Stäbe in der Draufsicht.

## 2.4 Verteilte Faseroptische Messungen

Zur Untersuchung des Systemverhaltens wurden im Modellversuch zahlreiche verteilte faseroptische Messungen (DFOS) eingesetzt. Die kontinuierlichen Messungen erlauben einen vertieften Einblick in das Verhalten des Systems und sollen den detaillierten Vergleich mit analytischen Modellen und zukünftigen numerischen Berechnungen ermöglichen.

Um das Verhalten der Bewehrung zu untersuchen, wurden die in Abbildung 4 gekennzeichneten Stäbe mit Glasfaser-Sensoren ausgestattet. Wegen der erwarteten hohen lokalen Verformungen und Dehnungen in der Bewehrung wurden die meisten der Dehnungsmessungen an der Seite der Stäbe angeordnet. Dies bezweckte den Schutz der Glasfaser-Sensoren vor Schäden aus den hohen Dehnungen und Stauchungen an der Ober- und Unterseite der Bewehrung.

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.

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. 2024b angegeben. Während die 3DSensoren einen bisher unerreichten Einblick in das Verformungsverhalten von Piled Embankments liefern, ist die Auswertung aufwendig und komplex. Details zum Vorgehen bei der Auswertung von faseroptischen Messungen im PEBSTER Projekt können van Eekelen et al 2024b entnommen werden.

Zusammen mit 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 der Bewehrung.

## 3 Versuchsergebnisse und Vergleich mit analytischen Modellen

Im folgenden Abschnitt werden ausgewählte Versuchsdaten des durchgeführten Modellversuchs dargestellt. Zur Einordnung dieser Daten werden sie mit den Berechnungen etablierter analytischer Verfahren verglichen. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich mit Ausnahme der Stahldehnungen lediglich auf die innere Zelle des Versuchsstands, welche

durch die vier innenliegenden Pfähle (Pfähle 4 bis 7 in Abbildung 2) aufgespannt wird. Diese Pfähle erfahren einen minimalen Einfluss aus Wandreibung und anderen Randeffekten und zeigen daher die möglichst ungestörte Ausbildung der Gewölbewirkung und der damit einhergehenden Lastumlagerung.

### 3.1 Lastumlagerung im Dammkörper

Abbildung 5 zeigt die Lasten A, welche im Dammkörper 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 Positionen der Erddruckgeber sind in Abbildung 2 dargestellt.

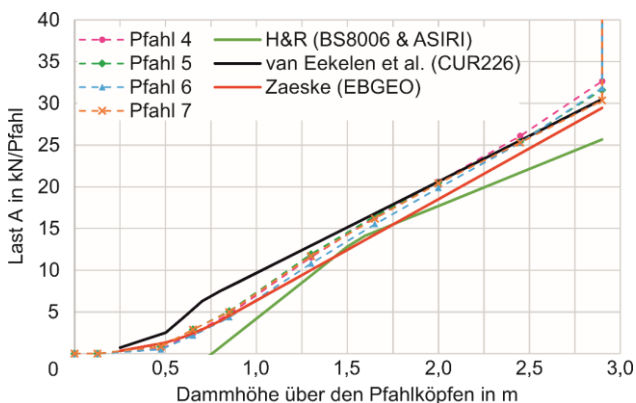


Abbildung 5: Lasten A oberhalb der Bewehrung an den Positionen der vier inneren Pfähle im Vergleich mit den Berechnungen dreier analytischer Modelle.

Die Lasten der vier gezeigten Innenpfähle stimmen untereinander sehr gut überein und bestätigen ein symmetrisches Systemverhalten. Weiterhin stimmen die Messdaten gut mit Berechnungen mittels der etablierten analytischen Modelle nach Hewlett & Randolph (1988), van Eekelen et al. (2013, 2015) und Zaeske (2001) überein. Diese analytischen Modelle bilden die Grundlage der Normen und Empfehlungen BS8006, ASIRI, CUR226 und EBGE0 und wurden ausschließlich für geokunststoffbewehrte Piled Embankments erstellt. GKS weist jedoch gegenüber der Stahlbewehrung eine deutlich geringere Dehnsteifigkeit auf und hat eine zu vernachlässigende 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 gemessenen vertikalen Kräften (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 der hier vorgestellte Großversuchs jedoch nur eine Kombination aus Bewehrung und Bodenmodell untersucht, können diese Fragen im PEBSTER-Projekt nicht abschließend geklärt werden.

### 3.2 Dehnungen in der Bewehrung

Während die Dehnung eines GKS wegen der geringen Höhe als auf den Querschnitt gleichverteilt angenommen wird, ist diese Annahme nicht auf die Verwendung von Stahlmatten zu übertragen. Bei den 8 mm starken Stahlstäben, aus denen die Bewehrungsmatten gefertigt wurden, wurde eine Verteilung der Dehnungen über die Höhe des Querschnitts erwartet. Die in Abbildung 6 präsentierten Daten zeigen exemplarisch die Messergebnisse der DFOS-Sensoren an den Bewehrungsstäben über Pfahl 4 im Bereich sich kreuzender Bewehrungsstäbe nach vollständigem Einbau des Dammes und nach Absenken des steifen Bodens um 25 mm. Zur Orientierung sind die beiden senkrecht zueinander stehenden Stäbe angedeutet. Die Messdaten an der Seite und an der Ober- oder Unterseite der Stäbe wurden als Kennpunkte eines linearen Verlaufs angenommen und dieser über die Höhe des Querschnitts dargestellt.

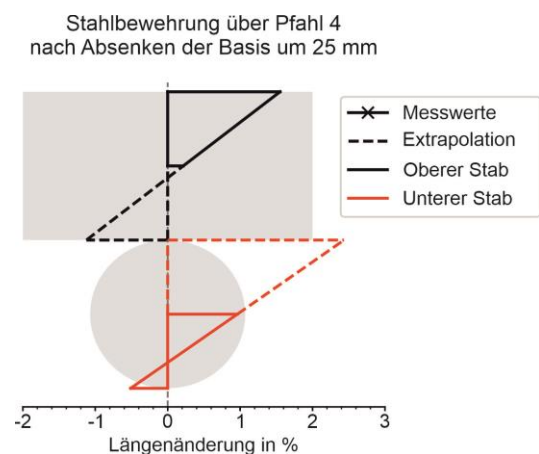


Abbildung 6: Die Dehnungen in der Stahlbewehrung am Beispiel eines Kreuzungsbereichs der oberen und der unteren Stäbe über Pfahl 4.

Die Messdaten bestätigen, dass die Dehnungen über die Querschnittshöhe variieren und nicht konstant sind. Zu beachten ist, dass die beiden dargestellten Stäbe in zueinander senkrecht stehende Richtungen verlaufen und somit die Dehnungen am Kontakt der beiden Stäbe nicht übereinstimmen müssen. Da die gewählte Stelle über einem Pfahl liegt und die Bewehrung bereits eine ausgeprägte Verformung aufweist, war die beobachtete Dehnung qualitativ zu

erwarten. An der Oberseite der Matte sind die größten Dehnungen zu beobachten, während an der Unterseite des unteren Stabes Stauchungen auftraten. Dies ist analog zum Verhalten eines Mehrfeldträgers unter vertikaler Belastung zu erwarten.

Abbildung 7 stellt die Dehnungen, gemessen an den Seiten der Stäbe, in Stahlmatte S1 für den Zeitpunkt nach dem vollständigen Einbau des Damms und dem Absenken der steifen Basis um 25 mm dar. Zu beachten ist, dass die vertikalen Linien die Messdaten der oberliegenden Stäbe darstellen, während die horizontal verlaufenden Linien die Daten an der Seite der untenliegenden Stäbe darstellen. Auch hier ist zu erkennen, dass die größten Dehnungen auf und direkt um die Pfähle auftreten. Die zum dargestellten Zeitpunkt auftretenden Dehnungen von teilweise über 1,5 % erzeugen bereits plastische Verformungen, führen allerdings noch nicht zum Versagen des Stahls.

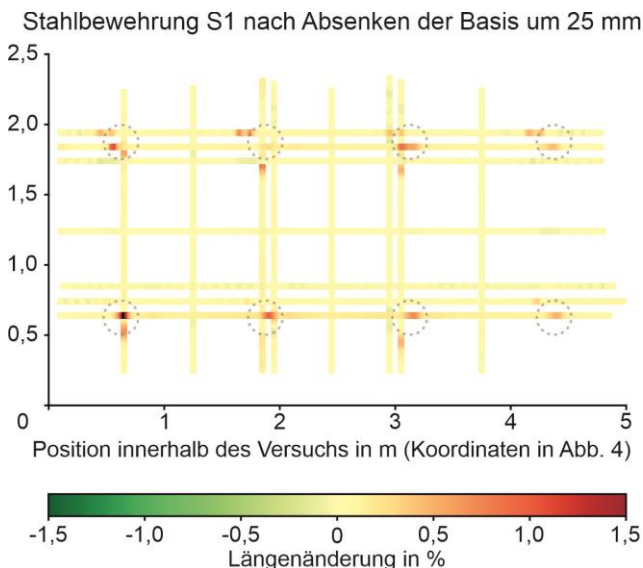


Abbildung 7: Darstellung der Stahldehnungen in Stahlmatte 1 nach Absenken der steifen Basis um 25 mm. Die Dehnungen wurden an den Seiten der oberen (vertikale Linien) und an der Seite der unteren Stahlstäbe (horizontale Linien) gemessen.

### 3.3 Verformung der Bewehrung

Die Verformung der Bewehrung, ermittelt mit den 3DSensoren a bis d gemäß Abbildung 2 ist in Abbildung 8 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 steifem Boden) gegeben. Es ist zu erkennen, dass die 12,5 cm starke Sandschicht zwischen Bewehrung und Pfahlkopf dazu führt, dass die Verformungsfigur der Bewehrung ausgerundet wird (vgl. Abbildung 9). Allerdings ist ebenfalls zu erkennen, dass sich die gesamte Bewehrungslage bei zunehmender Belastung vertikal verschiebt und nach der letzten Testphase auf den Pfahlköpfen aufliegt.

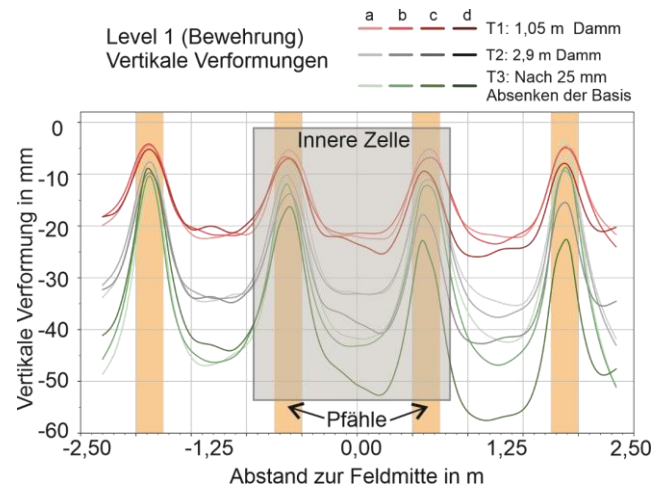


Abbildung 8: Vertikale Verschiebungen der Bewehrung (3DSensoren Level 1).

In Abbildung 10 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 (Abbildung 10a und 10c) als auch bezogen auf den Hochpunkt der verformten Bewehrung über den Pfählen (Abbildung 10b und 10d) dargestellt. In Abbildung 10b sind zusätzlich die Ergebnisse von Berechnungen mit dem CA-Modell (van Eekelen et al., 2013, 2015) und dem Modell nach EBGeo (Zaeske, 2001) für die gleichen drei Zustände 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 berücksichtigt werden können. 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.



Abbildung 9: Plastisch verformte Stahlbewehrung bei Pfahl 10 beim Ausbau des Großversuchs.



Trotz der sehr guten Übereinstimmung der Messwerte mit dem CA-Modell verbleiben einige Unterschiede in den in Abbildung 10b 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. GKS werden als dehnungsfrei fest auf dem Pfahlkopf aufliegend angenommen. (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. Allerdings entstehen hierdurch insgesamt größere Setzungen des Dammkörpers. Diese

Setzung wird durch den Effekt verstärkt, dass der Sand zwischen Bewehrung und Pfählen infolge der hohen lokalen Spannungen seitlich ausweicht. Insbesondere in der Absenkphase, in der das Gummigranulat schließlich einen Spalt unter der Bewehrung formt, kann der trockene Sand seitlich entweichen.

Die Messungen der weiter oben im Dammkörper liegenden Messebenen 2 und 3 (siehe Abbildung 10c und d) zeigen jedoch deutlich, dass die Setzungsunterschiede umso geringe werden, je höher die Messebene im Dammkörper liegt. Diese Messungen zeigen eindrucksvoll die im Boden gebildete Gewölbe Wirkung (Level 2) und bestätigen das Erreichen einer Ebene gleichmäßiger Setzungen maximal 1,3 m oberhalb der Bewehrung (Level 3).

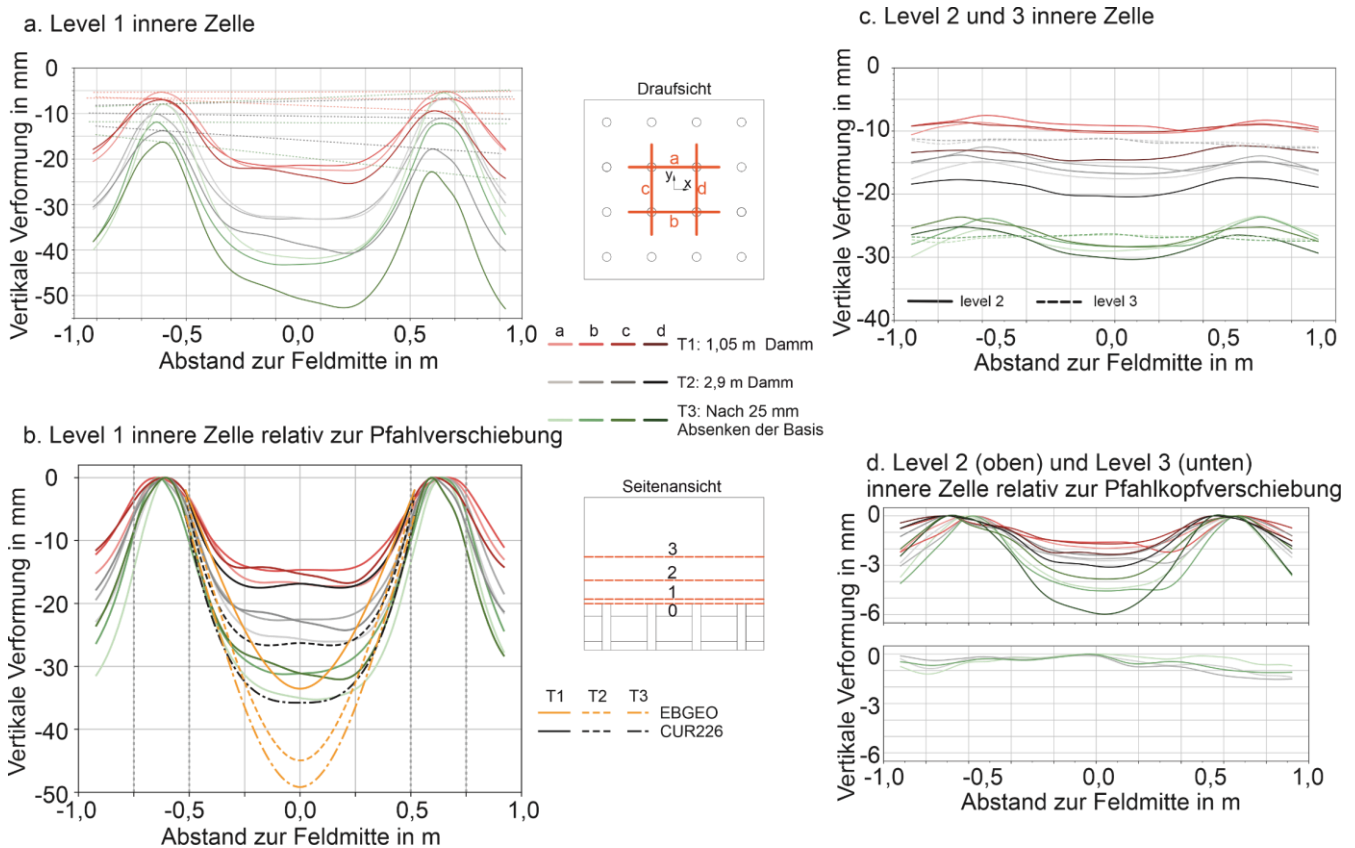


Abbildung 10: Vertikale Verschiebungen der Bewehrungslage (Level 1) und des Bodens (Level 2 und Level 3) in verschiedenen Belastungszuständen T1 bis T3. a. absolute Verschiebungen der inneren Zelle. b. relative Verschiebungen, bezogen auf die Hochpunkte (gestrichelte Linien in a.) und Vergleich mit analytischen Modellen. c. absolute Verschiebungen des Bodens in Level 2 und 3. d. relative Verschiebungen des Bodens bezogen auf die Hochpunkte aus c.

#### 4 Fazit

In diesem Beitrag wird ein großmaßstäblicher Modellversuch zur Untersuchung von mit Stahlmatten bewehrten Erdkörpern auf federnd gelagerten Pfählen vorgestellt. Dieser Versuch ist Teil des PEBSTER Projekts, welches außerdem eine Reihe kleinmaßstäblicher Versuche bei Deltares, Delft, umfasst. Auf der Grundlage der in diesem Beitrag vorgestellten

V Versuchsergebnisse können die folgenden vorläufigen Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Die Zug- und Biegesteifigkeit der Bewehrung scheint keinen signifikanten Einfluss auf die Gewölbebildung (Last A) in Piled Embankments zu haben. 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 von der Bewehrung auf den Pfahl (Last B) hingegen wird ersten Ergebnissen zufolge von der Steifigkeit der Bewehrung beeinflusst.
- Die hohe Auflösung der DFOS-Sensoren ermöglicht in einer geschickten flächenhaften Anordnung einen einzigartigen Einblick in das Bodenmodell und einen detaillierten Vergleich der gemessenen Verformungen und Dehnungen mit den berechneten Werten.
- Die DFOS-Messungen der Dehnungen der Stahlbewehrung lassen Rückschlüsse auf die plastischen Dehnungen und die Dehnungsverläufe der Bewehrung zu.
- 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 etwa mittig über den Pfählen auf. Dies wird insbesondere auf die 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. Das Forschungsteam besteht des Weiteren aus: P. Pandrea, P. Schaubert, M. Topolnicki, S.J.M. van Eekelen, H. Zachert.

## Literaturverzeichnis

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