

DOI: 10.1002 / bate.201600046

Oliver Detert*, Diethard König, Dimiter Alexiew, Tom Schanz

AUFSATZ

Zum Tragverhalten der selbstregulierenden interaktiven Membrangründung

Der Beitrag berichtet über eine neuartige Gründungsmethode für Schütt- und Dammkörper, wie beispielsweise Rohstoffhalden oder Verkehrsdämme, auf gering tragfähigen Böden großer Mächtigkeit. Zur Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens dieser „selbstregulierenden interaktiven Membrangründung“ wurden Zentrifugen-Modellversuche und umfangreiche numerische Berechnungen in Form von globalen Sensitivitätsanalysen und Parameterstudien durchgeführt. Deren Ergebnisse sowie der daraus abgeleitete Ansatz zur Dimensionierung werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt. Eine Validierung des entwickelten Ansatzes erfolgt am Ende des Beitrags über eine Vergleichsrechnung mit dem numerischen Modell.

Keywords Geokunststoff; Weichböden; Gründungssystem; Membrangründung, selbstregulierende interaktive; Zentrifugen-Modellversuche; Sensitivitätsanalysen; Dimensionierungsansatz

On the load bearing behavior of the self-regulating interactive membrane foundation system

The paper reports on a new foundation system, the self-regulating membrane foundation, for embankments on deep soft soil deposits, such as stockpiles or infrastructure embankments. The load bearing behavior of the system was analyzed by means of centrifuge model tests and comprehensive numerical simulations, such as global sensitivity analyses and parametric studies. The results of those analyses and the derived design approach are presented in the paper. The paper concludes with a validation of the design approach, by comparison with results of the numerical simulation.

Keywords geotextile; soft soils; foundation system; self-regulating interactive membrane foundation; centrifuge model tests; sensitivity analyses; design approach

1 Einleitung

Die Gründung von größeren Schütt- oder Dammkörpern (im Weiteren als Dammkörper bezeichnet), wie zum Beispiel Rohstoffhalden oder Verkehrsdämme, auf gering tragfähigen Weichböden großer Mächtigkeit ist schwierig und häufig nicht ohne Zusatzmaßnahmen möglich. Charakteristisch für Weichböden sind geringe Scherfestigkeiten, Durchlässigkeiten und Steifigkeiten sowie hohe Sättigungsgrade. Die Belastung aus dem Dammkörper kann deshalb zu großen, unverträglichen Setzungen und horizontalen Verformungen bis hin zum Verlust der Standsicherheit in Form von Böschungs- und Grundbrüchen führen. Benachbarte Bauwerke können aufgrund von Mitnahmesetzungen oder erhöhten Horizontalspannungen im Untergrund durch den Bau der Dammkörper beeinträchtigt oder gefährdet werden. Um dies zu vermeiden, müssen entsprechende Bau- und Gründungsverfahren den jeweiligen Randbedingungen angepasst werden.

Das Lösungsspektrum reicht von sehr einfachen und zeitintensiven Verfahren, wie zum Beispiel dem langsamen stufenweisen Aufbau des Dammkörpers, über die Verwendung von hochzugfesten Dammbasisgeokunststoffbewehrungen in Kombination mit Streifendrainen oder Bodenver-

besserungen unterschiedlicher Art bis hin zur praktisch setzungsfreien Gründung auf Pfählen kombiniert mit Geogittern. Eine weitere, bis jetzt eher selten angewandte Lösung ist die seitliche Einfassung des weichen Gründungsbodens durch Randwände im Untergrund [1–3]. Die selbstregulierende interaktive Membrangründung stellt eine Weiterentwicklung dieser Option dar.

2 Selbstregulierende interaktive Membrangründung

Die selbstregulierende interaktive Membrangründung besteht aus zwei vertikalen biegesteifen Wandelementen, wie zum Beispiel Spundwänden, und einer horizontalen, vollflächigen, dehnsteifen und zugfesten Membran, zum Beispiel einem hochfesten Geogewebe oder Geogitter (Bild 1). Der Begriff „Membran“ wird hier im mechanischen und nicht im hydraulischen Sinn verwendet.

Die vertikalen und parallel zueinander verlaufenden Wandelemente können in eine tragfähige Schicht einbinden und reichen bis zur Geländeoberkante oder darüber hinaus. Sie sind über die Membran auf Höhe der Geländeoberkante kraftschlüssig miteinander verbunden. Die vertikalen Wandelemente, der umschlossene Boden und die horizontale Membran bilden die Gründung für den Dammkörper.

Das grundlegende Konzept des Systems besteht darin, den Gründungsboden unter dem Dammkörper zwischen

*) Corresponding author: detert@huesker.de
Submitted for review: 19 May 2016
Revised: 14 July 2016
Accepted for publication: 21 July 2016

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: On the load bearing behavior of the self-regulating interactive membrane foundation system

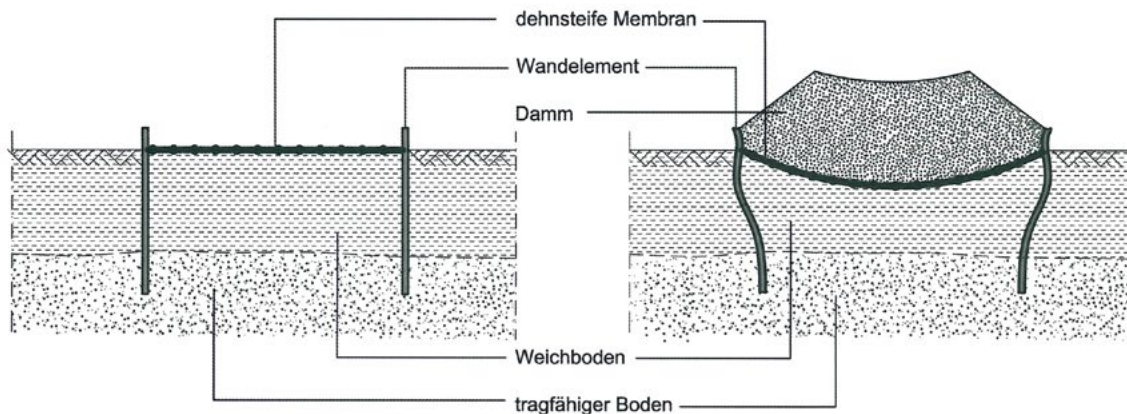


Bild 1 Systemskizzen der selbstregulierenden interaktiven Membran Gründung (links: unbelastetes und unverformtes System; rechts: belastetes und verformtes System)
System sketch of the self-regulating interactive membrane foundation (left: not loaded or deformed system; right: loaded and deforms system)

den vertikalen Wandelementen einzufassen und zu stützen, welche über die horizontale Membran, als neues zusätzliches Element, gegenseitig verankert werden. Dadurch werden Verformungen reduziert und die Tragfähigkeit erhöht. Es erfolgt eine Selbstregulierung, die im Folgenden beschrieben wird.

Das System wird mit dem Aufbau des Dammkörpers aktiviert. Durch die Auflast des Dammkörpers und die daraus resultierenden Verformungen der Membran in der Dammaufstandsfläche (Setzungsmulde) werden Zugkräfte in der Membran aktiviert. Ein Teil der Dammlast wird, in Abhängigkeit der eintretenden Verformungen, über die Membran in die vertikalen Wandelemente abgeleitet. Der verbleibende Teil der Belastung verursacht einen Anstieg der vertikalen und horizontalen Spannungen im Gründungsboden zwischen den Wandelementen. Die zusätzlichen Horizontalspannungen verursachen eine nach außen gerichtete Verformung der vertikalen Wandelemente, wodurch die Membran zusätzlich gedehnt wird und somit die Zugkraft in der Membran ansteigt. Diese Zugkraft wirkt der nach außen gerichteten Bewegung entgegen. Mit steigender Auflast und der damit verbundenen steigenden auswärtsgerichteten Verformung aufgrund der erhöhten Horizontaldrucke steigt auch die rückstellende Zugkraft in der Membran an. Das System reagiert interaktiv und selbstregulierend auf die Belastung.

Im Rahmen einer Forschungsarbeit am Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der Ruhr-Universität Bochum wurde das Trag- und Verformungsverhalten der selbstregulierenden interaktiven Membran Gründung untersucht. Unter anderem sollte innerhalb der Forschungsarbeit die Gebrauchstauglichkeit des Systems untersucht, das Tragverhalten erfasst und ein Ansatz zur Dimensionierung des Gründungssystems entwickelt werden. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen können weitere Systemoptimierungen im Hinblick auf Konstruktion und Wirtschaftlichkeit vorgenommen werden.

3 Methodik der Systemanalyse

Die Vorgehensweise zur umfassenden Analyse des Gründungssystems ist in Bild 2 dargestellt.

Das Ziel der Forschungsarbeit war es, einen semi-analytischen Ansatz zur sicheren Dimensionierung des Gründungssystems herzuleiten. Hierzu ist es notwendig, das Trag- und Verformungsverhalten des Systems hinreichend genau zu kennen, sodass maßgebende Prozesse und Zustände Berücksichtigung finden können. Mittels einer globalen Sensitivitätsanalyse (GSA) [4, 5] sollten die dominierenden Systemparameter ermittelt werden [6, 7]. Basierend auf den Ergebnissen der GSA wurde mithilfe von Parameterstudien der Einfluss dieser Parameter quantitativ erfasst und in Bemessungshilfen bzw. -diagrammen abgebildet. Das so ermittelte semi-analytische Bemessungsverfahren wird anschließend über Vergleichsrechnungen verifiziert.

Um diese Analysen und Studien durchführen zu können, wird ein validiertes numerisches Modell des Gründungssystems benötigt. Eine Modellvalidierung kann anhand von Messwerten und Beobachtungen aus Feld- und La-

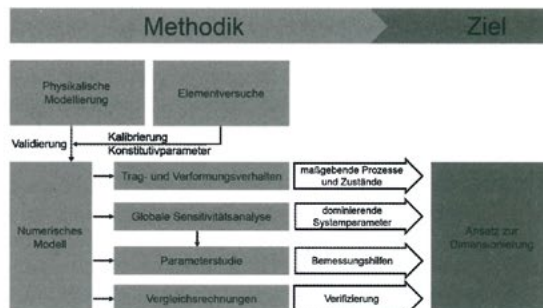


Bild 2 Ablaufdiagramm der Systemanalysen
Flowchart of system analysis

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: Zum Tragverhalten der selbstregulierenden interaktiven Membrangründung

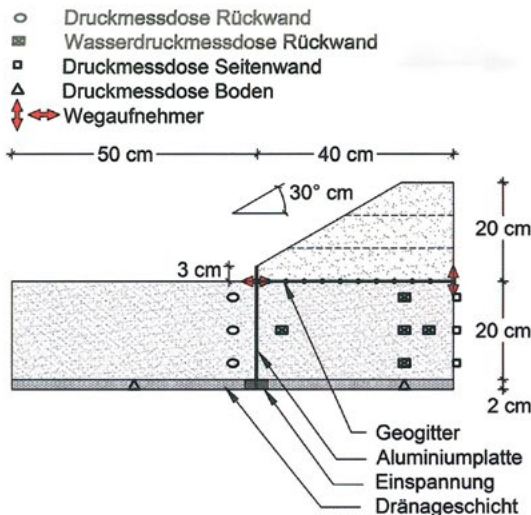


Bild 3 Aufbau und Abmessungen des Zentrifugenmodells (links) sowie Anordnung und Art der Messtechnik (rechts)
Set-up and dimensions of centrifuge modell (left) as well as layout and type of measuring technique (right)

borversuchen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine physikalische Modellierung des Systems mit der Zentrifugen-Modelltechnik durchgeführt [8, 9]. Diese bietet sich hier im Besonderen an, da sie es ermöglicht, im kleinmaßstäblichen Modellversuch den Spannungszustand des Prototypens zu erzeugen und gleichzeitig den Vorteil der geringen Konsolidierungszeit aufgrund der reduzierten Modellabmessungen zu nutzen.

Anhand der Ergebnisse durchgeführter Elementversuche (Ödometer- und Triaxialversuche) findet eine Kalibrierung der Konstitutivparameter statt, sodass anschließend eine Validierung des numerischen Modells auf Grundlage der Ergebnisse der Zentrifugen-Modellversuche stattfinden kann.

4 Physikalische und numerische Modellierung des Systems

4.1 Festlegung eines Prototypens

Für die physikalische und numerische Modellierung wird zunächst ein Prototyp des Gründungssystems festgelegt. Unter einem Prototypen wird ein idealisierter Ausschnitt aus der Realität mit realen Dimensionen verstanden, welcher alle für die Fragestellung als wesentlich erachteten Parameter enthält.

Der Prototyp des Gründungssystems besteht aus einem 10 m hohen Damm mit einer Basisbreite von 40 m, welcher auf einer 10 m mächtigen Weichschicht gegründet werden soll. Unterhalb der Weichschicht befindet sich eine tragfähige Sandschicht. Die Randeinfassung bindet 5 m in die tragfähige Sandschicht ein und hat eine Über-

standshöhe von 1,5 m über die Geländeoberkante. Die dehnsteife und zugfeste Membran wird auf Geländeoberkante kraftschlüssig an die Randeinfassung befestigt.

4.2 Zentrifugen-Modellversuche

Die Zentrifugen-Modellversuche werden im Modellmaßstab von 1:50 in einem erhöhten Schwerefeld von 50g durchgeführt. Somit ist gewährleistet, dass im kleinmaßstäblichen Modell der Spannungszustand des Prototypens herrscht und das spannungsabhängige Bodenverhalten korrekt abgebildet wird.

Unter Berücksichtigung der Systemgeometrie wird nur das halbe System modelliert. Die Einbindung der Randeinfassung erfolgt aus Platzgründen über eine mechanische Einspannung. Der Modellaufbau sowie die Instrumentierung sind in Bild 3 dargestellt.

Die Systembauteile wurden gemäß validierter Maßstabsfaktoren unter Berücksichtigung des erhöhten Schwerefelds skaliert. In den Versuchen auftretende Größen, wie zum Beispiel Längen, Kräfte oder Verformungen, werden ebenfalls über Maßstabsfaktoren umgerechnet. Die verwendeten Faktoren sind Tab. 1 zu entnehmen.

Die Herstellung des Weichbodens erfolgt aus einer Schlämme, welche aus einem Kaolinpulver unter Zugabe von Wasser angerührt wurde. Anschließend wurde die Schlämme in der Zentrifuge bei 50g konsolidiert.

Die Versuchsdurchführung erfolgte im erhöhten Schwerefeld bei 50g in drei Schüttstufen. Hierzu wurde eine neuartige Einrieselvorrichtung für große Sandmengen entwickelt, welche im erhöhten Schwerefeld wiederbefüllt werden kann und den Damm in drei Schüttstufen aufbaut (Bild 4). Zwischen den einzelnen Schüttstufen erfolgen einstündige Konsolidierungsphasen. Eine detaillierte Beschreibung der Zentrifugen-Modellversuche ist in [8, 9] zu finden.

4.3 Numerische Simulation

Numerische Simulationen ermöglichen eine differenzierte Betrachtung der stattfindenden Prozesse sowie die Variation der Randbedingungen und Modellparameter, um deren Einfluss auf das Systemverhalten zu bestimmen.

Die numerischen Simulationen des Gründungssystems wurden mit dem Programm Plaxis 2D durchgeführt. Wie in den Zentrifugen-Modellversuchen wurde unter Nutzung der Symmetrie nur das halbe System simuliert. Die Simulationen wurden mit effektiven Bodenparametern unter Berücksichtigung von Porenwasserüberdrücken und Konsolidierungsprozessen durchgeführt. Für die Böden wurde das Hardening Soil Stoffgesetz [10] verwendet. Die Bodenparameter wurden zuvor anhand durchgeführter Elementversuche kalibriert.

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: On the load bearing behavior of the self-regulating interactive membrane foundation system

Tab. 1 Maßstabsfaktoren für Versuche im einfachen (1g) und erhöhten (ng) Schwerfeld für ausgewählte Größen
Scaling factors for tests in 1g and ng gravity field for selected values

Kenngröße	Dimension	Prototyp	Modell 1g	Modell ng
Lineare Abmessungen	L	1	$1/n$	$1/n$
Fläche	L^2	1	$1/n^2$	$1/n^2$
Volumen	L^3	1	$1/n^3$	$1/n^3$
Masse	M	1	$1/n$	1
Steifemodul	$M^*L^{-1}T^2$	1	$1/n$	1
Kraft	$M^*L^*T^2$	1	$1/n^3$	$1/n^2$
Spannung	$M^*L^{-1}T^2$	1	$1/n$	1
Reibungswinkel	-	1	1	1
Kohäsion	$M^*L^{-1}T^2$	1	$1/n$	1
Konsolidierungsvorgänge	L^*T^{-1}	1	$1/n$	$1/n^2$
Dehnsteifigkeit J Geotextil	M^*T^2	1	$1/n^2$	$1/n$
Biegesteifigkeit EI Randeinfassung	$M^*L^2T^2$	1	$1/n^4$	$1/n^3$

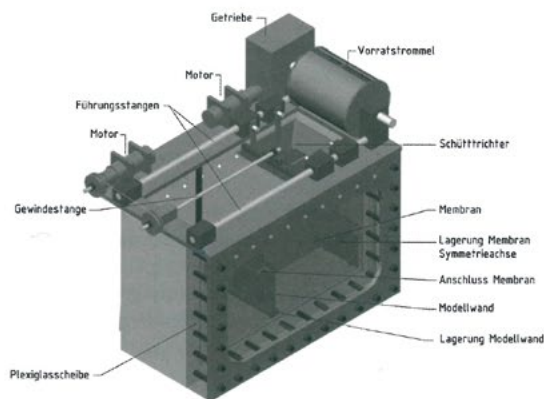


Bild 4 Einrieselevorrichtung (oben) und Einrieselevorgang der zweiten Schüttstufe (unten)
Sand hopper (up) and pouring process of second layer (down)

Eine Validierung des numerischen Modells erfolgte über die Ergebnisse der Zentrifugen-Modellversuche. Anschließend wurden mit dem validierten numerischen Modell drei unterschiedliche Analysen durchgeführt. Zunächst wurde das Last- und Verformungsverhalten analysiert und die Spannungszustände im undrainierten und drainierten Zustand betrachtet. Im nächsten Schritt wurden die dominierenden Systemparameter und anschließend der quantitative Einfluss der dominierenden Parameter in einer umfangreichen

Parameterstudie ermittelt sowie Einflussdiagramme zur semi-analytischen Dimensionierung des Systems entwickelt.

5 Ergebnisse der Zentrifugen-Modellversuche und numerischen Simulationen

5.1 Trag- und Verformungsverhalten

Die Zentrifugen-Modellversuche und numerischen Simulationen haben ergeben, dass während der Konsolidierung innerhalb des Dammkörpers eine Lastumlagerung eintritt, die auf eine setzungsinduzierte Gewölbewirkung zurückzuführen ist [11]. Lasten werden aus der Dammmitte in Richtung der seitlichen Randeinfassungen umgelagert (Bild 5a), was zu einer Zunahme der nach außen gerichteten Verformungen während der Konsolidierung führt, obwohl der auf die Randeinfassungen wirkende Porenwasserüberdruck aus der Dammast abnimmt. Des Weiteren konnte im Untergrund bei der Simulation des Dammkörpers als reibungsfreie schlaife Last die Ausbildung eines rotatorischen Bruchkörpers (Grundbruch) beobachtet werden, der im Übergangsbereich Böschung zur Dammkronen „abtaucht“ und innerhalb des Systems vor den Randeinfassungen wieder „auftaucht“ und sich quasi in den Dammkörper hineindrückt (Bild 5b). Dieser Bereich, der faktisch eine höhere Steifigkeit aufweist, bildet den Auflagerbereich des Gewölbes, wodurch der Bruchmechanismus quasi überdrückt wird. Die Lastumlagerung bzw. Gewölbewirkung stabilisiert somit das System.

Die größte Beanspruchung der Randeinfassung besteht direkt nach Aufbringung der Last, wenn der maximale Porenwasserüberdruck im Weichboden herrscht. Die Membran erfährt die größte Beanspruchung nach Abschluss der Konsolidierung, wenn die maximalen Setzungen sowie die Lastumlagerung eingetreten sind.

5.2 Ermittlung der dominierenden Systemparameter

Das komplexe Last- und Verformungsverhalten des Systems und die daraus resultierenden Bauteilbeanspru-

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: Zum Tragverhalten der selbstregulierenden interaktiven Membrangründung

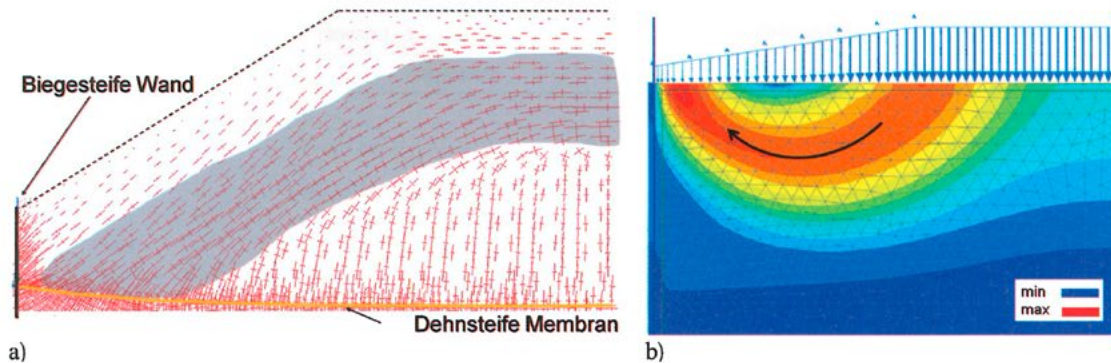


Bild 5 a) Verdrehung der Hauptspannungen im Dammkörper nach Konsolidierung (Weichboden ausgeblendet); b) totale Verformungen nach Konsolidierung (Damm als schlaffe Last simuliert zur besseren Anschauung)
 a) Rotation of principal stresses in embankment after consolidation (soft soil not shown); b) total deformation after consolidation (for the sake of simplicity the embankment is simulated by vertical loads)

chungen hängen von unterschiedlichen Systemparametern ab. Um einen Dimensionierungsansatz zu entwickeln ist es hilfreich bzw. notwendig, die das Systemverhalten dominierenden Parameter zu kennen. Die Ermittlung dieser Parameter kann über sogenannte globale Sensitivitätsanalysen (GSA) erfolgen [4, 5]. Hierbei wird eine Vielzahl an Berechnungen mit variierenden Systemparametern durchgeführt und der Einfluss aus den Parametervariationen auf aussagekräftige Systemantworten ermittelt. Variiert werden Parameter mit einem potenziellen Einfluss auf das Systemverhalten, deren Vorauswahl zum Beispiel aus Voruntersuchungen erfolgt.

Die Systemantworten, welche in der GSA betrachtet werden, müssen so gewählt werden, dass sie eine Aussagekraft bezüglich des Systemverhaltens besitzen, wie zum Beispiel die Bauteilbeanspruchung oder der Spannungsabbau unterhalb der Dammmitte. Bei einer GSA werden in jeder Berechnung die gesamten Eingangsparameter gleichzeitig innerhalb vorgegebener Grenzen variiert, um so auch den gegenseitigen Einfluss der Parameter untereinander zu erfassen. Je mehr Eingangsparameter verwendet werden, desto mehr Berechnungen sind für eine zuverlässige Auswertung der Systemsensitivitäten erforderlich. Die verwendeten Parameter sowie deren ausgewählter Wertebereich sind Tab. 2 zu entnehmen.

Um die Berechnungszeiten deutlich zu reduzieren, können mathematische Ersatzmodelle, sogenannte Metamodelle, erstellt und verwendet werden. Ein Metamodell ist eine Regressionsfunktion, welche basierend auf einer vergleichsweise geringen Anzahl an Berechnungen mit der Ursprungssoftware aufgestellt werden kann und nach erfolgreicher Validierung approximiert Ergebnisse für neue Eingangsparametersätze mit hoher Genauigkeit berechnet. Dies ermöglicht den Verzicht auf die Ursprungssoftware.

Ein ausgewähltes Ergebnis der GSA ist in Bild 6 zu sehen. Untersucht wurde hier, welche Parameter die Lastumlagerung maßgeblich beeinflussen. Zu erkennen ist, dass

die Lastumlagerung insbesondere von der Weichbodensteifigkeit und der Dammhöhe abhängt.

Als dominierende Systemparameter wurden die Dehnsteifigkeit der Membran, Steifigkeit des Weichbodens, Dammgeometrie und Höhe des Überstands ermittelt. Die Biegesteifigkeit der Randeinfassung besitzt einen Einfluss auf die Schnittgrößen der Randeinfassung, jedoch keinen relevanten Einfluss auf das Systemverhalten. Eine ausführliche Beschreibung und detailliertere Ergebnisse sind in [6, 7] zu finden.

5.3 Ermittlung von Einflussdiagrammen

In einer umfassenden Parameterstudie wurde systematisch der Einfluss der zuvor ermittelten dominierenden

Tab. 2 Parameterauswahl für die globale Sensitivitätsanalyse sowie deren obere und untere Grenze
 Selected parameter for global sensitivity analysis as well as the upper and lower limit

Eingangswert	Einheit	Untere Grenze	Obere Grenze
Weichboden			
E_{oed}	kN/m ²	3 000	10 000
φ	°	18	24
c	kN/m ²	3	9
Schüttmaterial			
E_{oed}	kN/m ²	40 000	100 000
φ	°	31	39
Modellwand			
EI	kN/m ²	30 000	170 000
dehnsteife Membran			
J	kN/m	25 000	60 000
Dammgeometrie			
Überstandshöhe	m	0	3
Dammhöhe	m	0	10

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: On the load bearing behavior of the self-regulating interactive membrane foundation system

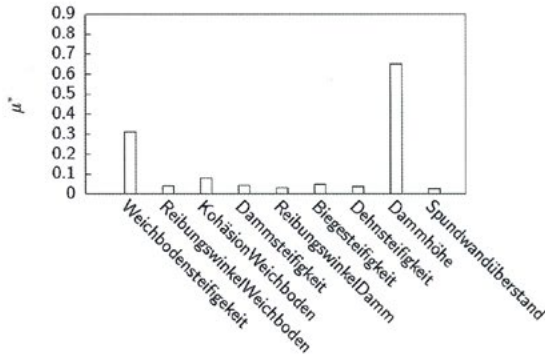


Bild 6 Ergebnisse der GSA: dominierende Parameter der Lastumlagerung
Result of GSA: load redistribution dominating parameter

Systemparameter auf die Systembeanspruchung und -verformung untersucht. Zusätzlich wurden noch die Weichschichtmächtigkeit, Dammbasisbreite sowie Wichte des Dammmaterials variiert.

Bild 7 zeigt ein Ablaufdiagramm der Parameterstudie. Es wurden zunächst neun Basissysteme (schwarze Quadrate in Bild 7) festgelegt, die sich aus den Kombinationen der Dammhöhen von 5 m, 10 m und 15 m mit Weichschichtmächtigkeiten von 5 m, 10 m und 15 m ergeben. Die verwendeten Systemparameter für die Basissysteme können Bild 7 entnommen werden.

Im ersten Schritt wurden fünf unterschiedliche Dammbasisbreiten untersucht (dargestellt durch unterschiedliche Farben der neun Quadrate). Die Untersuchung ergab, dass die größten Bauteilbelastungen für alle neun Basissysteme bei einem Verhältnis von Dammhöhe zu Dammbasisbreite von 0,25 auftreten. Aus den insgesamt 45 Berechnungen wurden Diagramme entwickelt, mit denen der Einfluss aus dem geometrischen Verhältnis aus Dammhöhe zu Dammbasisbreite auf die Bauteilbelastung ermittelt werden kann [12]. Basierend auf den Berechnungen der neun Basissysteme mit einem Verhältnis Dammhöhe zu Dammbasisbreite von 0,25 wurden Diagramme entwickelt, aus denen die Membranbeanspruchung bzw. die resultierende horizontale Belastung (Summe der Spannungen außerhalb und innerhalb des Gründungssystems) der Randeinfassung sowie des Wandüberstands über Geländeoberkante abgelesen werden kann. Zwischen den ermittelten Werten wird ein linearer Verlauf der Größen in den Diagrammen angenommen. Der Verlauf der resultierenden Horizontalbelastung der Randeinfassung über die Tiefe der Weichschicht ist nicht konstant, sondern abhängig von der Dammhöhe und Weichschichtmächtigkeit. Die Abnahme der resultierenden Horizontalbelastung pro m Tiefe i_q kann ebenfalls aus einem Diagramm abgelesen werden.

Die Einflüsse der Biegesteifigkeit der Randeinfassung, Dehnsteifigkeit der Membran, Steifigkeit der Weichschicht und Wichte des Dammmaterials wurden nachfol-

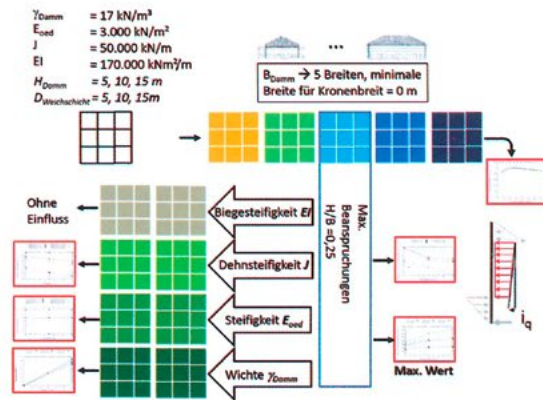


Bild 7 Flussdiagramm der Parameterstudie zur Ermittlung des quantitativen Einflusses einzelner Parameter auf das Systemverhalten
Flow chart of parametric study to estimate the quantitative influence of single parameters on the system behaviour

gend nacheinander an den neun Basissystemen mit einem Verhältnis von Dammhöhe zu Dammbasisbreite von 0,25 untersucht und ebenfalls in Diagrammen abgebildet. Die Wertebereiche der untersuchten Parameter und damit die Gültigkeit der Diagramme zur Ermittlung der Anpassungsfaktoren sind wie folgt:

- Dammhöhen zwischen 5 m und 15 m
- Weichschichtmächtigkeiten zwischen 5 m und 15 m
- Dammbasisbreiten zwischen 6,4 m und 120 m
- Dehnsteifigkeiten der Membran zwischen 10000 kN/m und 50000 kN/m
- Weichbodensteifigkeiten (E_{Oed}) zwischen 500 kN/m² und 3000 kN/m²
- Wichten des Dammmaterials zwischen 17 kN/m³ und 23 kN/m³

6 Bemessungsansatz unter Verwendung von Einflussdiagrammen

Aufgrund des komplexen und von vielen Parametern abhängigen Trag- und Verformungsverhaltens des Systems bietet sich zur Dimensionierung der Bauteile die FEM an. Um dennoch eine rasche (Vor-)Bemessung durchführen zu können, wurden wie zuvor erwähnt Einflussdiagramme zur Ermittlung der Systembeanspruchung sowie -verformungen entwickelt [12]. Diese ermöglichen die Ermittlung der Systembeanspruchungen für den undrainierten Zustand direkt nach Lastaufbringung (maßgebender Bemessungszustand für die Randeinfassung) sowie für den drainierten bzw. auskonsolidierten Zustand (maßgebender Bemessungszustand für die Membran). Über die Anpassungsfaktoren aus den Einflussdiagrammen können die Einwirkungen bzw. Beanspruchungen für Systemkonfigurationen ermittelt werden, die von den neun Basissystemen abweichen.

Das Bauwerk lässt sich für die Bemessung in zwei gekoppelte Teilsysteme zerlegen: Teilsystem 1 umfasst die

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: Zum Tragverhalten der selbstregulierenden interaktiven Membrangründung

Membran, für die aus den Einflussdiagrammen unmittelbar die maximale Beanspruchung sowie die horizontale und vertikale Anschlusskraft ermittelt werden können. Die Beanspruchungen ergeben sich aus folgender Formel:

$$F_i = F_{0,25,i} \cdot A_{geo,i} \cdot A_{\gamma,i} \cdot A_{E_{oed,i}} \cdot A_{J,i}$$

Mit

- $i = A_h$ für horizontale Anschlusskraft oder *Mem* für maximale Membrankraft
- F_i = Zugkraft
- $F_{0,25,i}$ = Zugkraft des Basissystems bei einem Verhältnis von Dammhöhe zu Dammbasisbreite von 0,25
- $A_{geo,i}$ = Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung des tatsächlichen geometrischen Verhältnisses aus Dammhöhe zu Dammbasisbreite
- $A_{\gamma,i}$ = Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Wichte des Dammmaterials, wenn diese größer als 17 kN/m³ ist
- $A_{E_{oed,i}}$ = Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Weichbodensteifigkeit, wenn diese kleiner als 3000 kN/m³ ist
- $A_{J,i}$ = Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Membrandehnsteifigkeit, wenn diese kleiner als 50000 kN/m ist

Die vertikale Komponente kann über einen Verhältniswert in Abhängigkeit der Dammhöhe sowie der Weichbodensteifigkeit ermittelt werden.

Teilsystem 2 umfasst die seitliche Randeinfassung und ist über die horizontale und vertikale Anschlusskraft der Membran mit Teilsystem 1 gekoppelt (Bild 8). Die Einwirkungen auf die Randeinfassung im Bereich des Überstands und der Weichschicht können in Größe und Form aus den Diagrammen ermittelt werden. Der Betrag und Verlauf der resultierenden Belastung auf die Randeinfassung innerhalb der Weichschicht ergeben sich aus folgender Formel:

$$q_{res,WS}(x) = \left(q_{0,25,res,WS} - x \cdot i_{qres,WS} \right) \cdot A_{geo,qres,WS} \cdot A_{E_{oed,qres,WS}} \cdot A_{J,qres,WS}$$

Mit

- $q_{res,WS}(x)$ = resultierende horizontale Belastung auf die Wand innerhalb der Weichschicht über die Tiefe x
- $q_{0,25,res,WS}$ = resultierende Belastung aus den Basissystemen für ein Verhältnis von Dammhöhe zu Dammbasisbreite von 0,25 in Abhängigkeit der Wichte
- $i_{qres,WS}$ = Abnahme der resultierenden horizontalen Belastung auf die Wand innerhalb der Weichschicht je m Tiefe

Die restlichen Parameter haben eine entsprechende Bedeutung, wie zuvor bei der Ermittlung der Membrankräfte. Die Belastung des Überstands wird analog ermittelt.

Im Einbindebereich ist die Verteilung der resultierenden Erddruckspannungen (Summe der Spannungen außerhalb und innerhalb des Systems) bekannt, jedoch nicht die Größe. Da der Biegemomentenverlauf am Fußpunkt der Randeinfassung auf null zurückgehen muss, kann diese Größe über Iteration im Zuge einer Balkenstatik ermittelt werden. Anschließend erfolgt die Überprüfung, ob die ermittelte Größe zuzüglich dem Erdruchdruck aus dem Systeminneren (konservative Annahme) vom Einbindeboden aufgenommen werden kann. Zur Herstellung des horizontalen Gleichgewichts ist eine zusätzliche Horizontalkraft B am Fußpunkt erforderlich (Teileinspannung).

7 Vergleichsrechnung

Zur Überprüfung der beschriebenen Herangehensweise zur Dimensionierung des Gründungssystems sowie der getroffenen Annahmen wurden Vergleichsrechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse einer Vergleichsrechnung zwischen dem numerischen Modell und dem Dimensionierungsansatz über Einflussdiagramme für die in Bild 9a) gezeigte

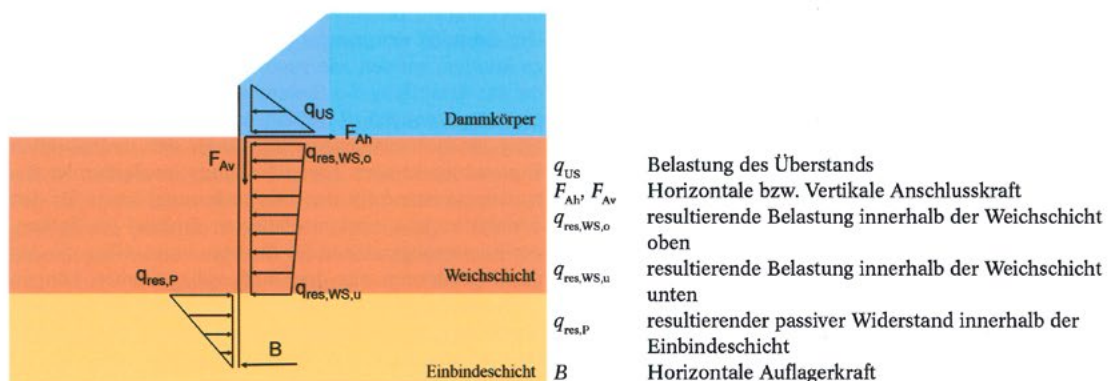


Bild 8 Statisches System zu Ermittlung der Wandbeanspruchung
Static system for determination of the wall loading

O. Detert, D. König, D. Alexiew, T. Schanz: On the load bearing behavior of the self-regulating interactive membrane foundation system

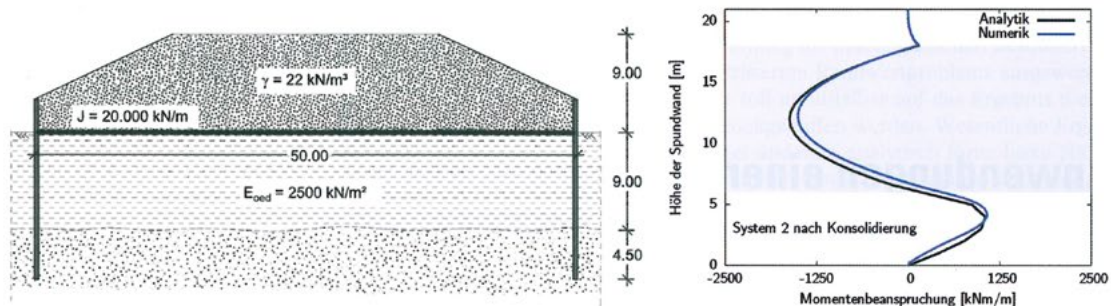


Bild 9 a) System mit Angabe der relevanten Parameter; b) ermittelter Momentenverlauf mit dem numerischen Modell und dem Bemessungsansatz
a) System with relevant parameters; b) determined distribution of bending moment by means of numerical simulation and design approach

Systemkonfiguration sind in Bild 9b) zu sehen. Für die horizontale Anschlusskraft ist vor Konsolidierung eine Abweichung von 8% und nach Konsolidierung von 7% zu verzeichnen. Bei der maximalen Membranzugkraft ergeben sich Abweichungen von 3% vor und 0% nach Konsolidierung, und beim maßgebenden Feldmoment liegen die Abweichungen bei 8% vor und 12% nach Konsolidierung.

Unter Berücksichtigung des komplexen Systemverhaltens und der getroffenen Annahmen für den Dimensionierungsansatz können die erzielten Übereinstimmungen als sehr gut bezeichnet werden.

8 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein neuartiges Gründungssystem zur Gründung von Dämmen auf sehr weichen und gering tragfähigen Böden. Zur Analyse des Trag- und Verformungsverhalten wurden umfangreiche Zentrifugen-Modellversuche sowie numerische Analysen durchgeführt, deren Durchführung und Ergebnisse beschrieben werden. Basierend auf den numerischen Analysen wird ein Dimensionierungsansatz unter Verwendung von Einflussdiagrammen entwickelt, welcher über Vergleichsrechnungen validiert wurde.

Literatur

- [1] OCHIALI, H.; YASUFUKU, N.; OTANI, J.: *Effectiveness of sheet-pile countermeasures in soft ground*. Proceedings of Japan-China Joint Symposium on Recent Developments of Theory and Practice in Geotechnology, 2012.
- [2] POUNGCHOMPU, P.: *Development of a timber raft and pile foundation for embankments on soft ground*. Dissertation, Saga University, Japan, 2009.
- [3] ADALIER, K.; PAMUK, A.; ZIMMIE, T.: *Seismic rehabilitation of coastal dikes by sheet-pile enclosures*. Proceedings of The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, Vol. 2, The International Society of Offshore and Polar Engineers, 2003.
- [4] SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S.: *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Wiley & Sons, 2008.
- [5] MIRO, S.; HARTMANN, D.; SCHANZ, T.: *Global sensitivity analysis for subsoil parameter estimation in mechanized tunneling*. Computers and Geotechnics 56 (2014), No. 3, pp. 80–88.
- [6] MODARRESI, H.: *Global and local sensitivity analyses on a self-regulating foundation system*. Masterarbeit, Ruhr-Universität Bochum, 2014.
- [7] DETERT, O.; KAHLIEDI, K.; MODARRESI, H.; SCHANZ, T.: *Analyse geotechnischer Problemstellungen mit fortschrittlichen numerischen Methoden am Beispiel einer selbstregulierenden Membrangründung*. FS-KGEO, DGGT, 2015.
- [8] DETERT, O.; KÖNIG, D.; SCHANZ, T.: *Centrifuge modeling of an adaptive foundations system for embankments on soft soils*. Geotechnik, 2012.
- [9] DETERT, O.; SCHANZ, T.; ALEXIEW, D.; KÖNIG, D.: *Analysis of an adaptive foundation system for embankments on soft soils by means of physical and numerical modelling*. 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
- [10] SCHANZ, T.; VERMEER, P. A.; BONNIER, P. G.: *The hardening soil model: Formulation and verification*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics – 10 Years of Plaxis 1999.
- [11] DETERT, O.; ALEXIEW, D.; KÖNIG, D.; SCHANZ, T.: *Load redistribution effect in an embankment founded on a new self-regulating interactive membrane foundation system*. 10th International Conference on Geosynthetics, Berlin, 2014.
- [12] DETERT, O.: *Analyse einer selbstregulierenden interaktiven Membrangründung für Schüttkörper auf geringtragfähigen Böden*. Dissertationsschrift (noch nicht veröffentlicht), Ruhr-Universität Bochum, 2016.

Autoren

Oliver Detert
Fabrikstraße 13–15, 48712 Gescher
detert@huesker.de

Diethard König
Gebäude IC 5/115, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum
diethard.koenig@rub.de

Dimitar Alexiew
Fabrikstraße 13–15, 48712 Gescher
dalexiew@huesker.de

Tom Schanz
Gebäude IC 5/115, Universitätsstraße 150, 44780 Bochum
tom.schanz@rub.de