

Spreizverformungen von Erddämmen auf Säulen und Pfählen

- Betrachtungen zur Spannungs- und Verformungskompatibilität

Thomas Neidhart, Roland Gömmel

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Zusammenfassung

Nach Einführung in die Thematik werden unter Berücksichtigung der EBGEO und des aktuellen Entwurfs des neuen Eurocodes 7, Teil 3 numerische Berechnungen zur Beanspruchung unbewehrter pfahlartiger Tragglieder/ Stabilisierungssäulen aufgrund von Spreizverformungen von Erddämmen durchgeführt. Dabei werden u.a. die Materialeigenschaften der Tragglieder und die Dehnsteifigkeiten eingelegter Geogitter variiert, sowie deren Einflüsse auf die Verdrehung und Verbiegung der Tragglieder aufgezeigt.

1 Einleitung

Bei der Errichtung von Erddämmen auf Pfählen und Säulen (pfahlartige Tragglieder, Stabilisierungssäulen) sind neben der gesicherten und verformungsarmen Abtragung der Lasten in vertikaler Richtung u.a. auch Betrachtungen zur Aufnahme der Spreizverformungen erforderlich. Dabei ist zu beachten, dass horizontale Dammverformungen nicht mehr ausschließlich von den direkt unterlagernden Bodenschichten sondern zu einem erheblichen Teil von den häufig unbewehrten vertikalen pfahlartigen Traggliedern (PTG) aufgenommen werden müssen. Reichen die seitlichen Bettungswiderstände an den pfahlartigen Traggliedern nicht aus, um deren Abbrechen und/ oder Abscheren zu vermeiden, können oberhalb der Köpfe der Tragglieder „Zugbänder“ z.B. in Form von Geogittern oder Bindemittel-stabilisierten Bodenschichten zur Reduzierung der horizontalen Dammverformungen eingebaut werden.

Die inneren Widerstände pfahlartiger Tragglieder gegen Abbrechen und Abscheren hängen neben deren Durchmesser, Druck- und Zugfestigkeit, etc. insbesondere auch von den aus dem Damm eingeleiteten Normalkräften ab. Aus geometrischen Gründen nehmen die in die PTG eingeleiteten Normalkräfte zum Dammfuß hin bis auf nahezu null ab. Somit verfügen die äußersten Reihen PTG über die geringsten inneren Widerstände und erfahren die größten horizontalen Verformungen im Kopfbereich.

Es ist offensichtlich, dass die Normalkräfte in den PTG für die Tragfähigkeitsnachweise möglichst genau ermittelt werden müssen: Werden die Normalkräfte überschätzt, liegt man auf der unsicheren Seite, werden sie unterschätzt, führt dies zu einer unwirtschaftlichen Überdimensionierung der PTG. Folglich müssen Normalkraftverlauf bzw. Spannungsverteilung in den PTG und Bodenverformungen bzw. Setzungen zwischen den PTG kompatibel sein, was die Ermittlung der neutralen Ebenen erforderlich macht.

Weiterhin müssen auch die horizontalen Verformungen aus Dammspreizen möglichst genau ermittelt werden, da diese zu Verdrehungen und Verbiegungen der PTG führen, welche insbesondere im Bereich der Dammfüße ebenfalls Einfluss auf den tiefenabhängigen Spannungsverlauf in den PTG haben. Der aus den Verdrehungen und Verbiegungen der PTG resultierende Biegezug- und Biegedruckverlauf muss beim Nachweis der inneren Tragfähigkeit der im Allg. unbewehrten PTG berücksichtigt werden. Spätestens beim Aufreißen des PTG-Querschnitts über die Querschnittsmitte hinaus kommt es zum Versagen einer PTG-Reihe, die u. U. einem Reißverschlusseffekt bei den benachbarten PTG zur Folge hat, was zumeist zu einem Geländebruch führt.

Im Abschnitt 9 „Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern“ der EBGEO (2010) werden auch nach außen gerichtete Schub- und Spreizkräfte in Dämmen und die daraus resultierenden Zugbeanspruchungen der Geokunststoffe behandelt. Dazu werden im Abschnitt 9.6.3.5 zwei Verfahrenswege aufgezeigt:

- (1) Die Spreizkraft aus einem angenommenen aktiven Erddruck, der sich von der Oberkante des bewehrten Erdkörpers bis zur Bewehrung aufgebaut hat, abgeleitet und als Beanspruchung $\Delta E_{a,k}$ der Geokunststoffbewehrung zugewiesen wird.
- (2) Es wird der Geokunststoffbewehrung entweder nur die Beanspruchung infolge Membranwirkung zwischen den PTG oder infolge Spreizwirkung aus Erddruckansatz nach Verfahrensweg (1) zugewiesen, wobei der Maximalwert maßgebend ist.

Weiterhin wird ohne weitere Quellenangabe vermerkt, dass bei Verfahrensweg (1) davon ausgegangen werden kann, dass die Geokunststoffbewehrung ausreichend bemessen wird und die vertikalen Tragglieder keine unzulässigen Verformungen aufweisen, sowie von einer Verformungsberechnung der Tragglieder in der Regel abgesehen werden kann. Davon abweichend kann bei Verfahrensweg (2) nicht mehr davon ausgegangen werden, dass die vertikalen Tragglieder keine unzulässigen Verformungen aufweisen, weshalb ein Nachweis der Formänderungen der vertikalen Tragglieder, z. B. durch numerische Verfahren, empfohlen wird.

Zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bzw. der zulässigen Verformungen der PTG wird in der EBGEO auf Ergebnissen von Probelastungen, Aufzeichnungen bei der Herstellung oder Erfahrungswerten (...) und eine Absicherung numerische Verfahren hingewiesen. Für eine Prognose der Gesamtverformungen des Systems Damm auf PTG wird in der EBGEO empfohlen, diese näherungsweise durch numerische Verfahren zu ermitteln. Zusätzlich wird die Anwendung Beobachtungsmethode nahegelegt.

Die zuvor erläuterten Themen werden im neuen Abschnitt 11 – Ground Improvement des Teil 3 des aktuellen Entwurfs des (E EC 7-3, 2023) recht ausführlich behandelt. Die Regeln des (E EC 7-3, 2023) werden im Arbeitskreis 2.8 der DGGT e.V. Stabilisierungssäu-

len aufgegriffen und in den kommenden Empfehlungen (EAS) berücksichtigt. Wesentliche Punkte im (E EC 7-3, 2023) mit Bezug auf den vorliegenden Beitrag sind u.a. die Möglichkeit auch Tragfähigkeitsnachweise mit numerischen Methoden zu führen, für die Ermittlung der Wechselwirkung zwischen den PTG und dem Boden nur noch nichtlineare Stoffgesetze einzusetzen (Stichworte: Neutrale Ebene und Normalkraftverlauf in den PTG), sowie die Empfehlung bei Spreizverformungen von Dämmen die äußeren Säulenreihen ggf. zu bewehren.

Die Regelungen in der EBGEO (2010) und des E EC 7-3 (2023) legen es nahe, grundsätzlich die Verformungen des Gesamtsystems mit numerischen Methoden zu ermitteln und daraus die Beanspruchungen der PTG sowie Geogitterbewehrung abzuleiten.

2 Numerische Berechnungen zur Spannungs- und Verformungskompatibilität

Die Untersuchung der Verformungskompatibilität erfolgt mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente mit dem Programm PLAXIS 3D (Version 22.02.00.1078). Hierbei wird ein konkretes Anwendungsbeispiel eines real gebauten Erddammes herangezogen, welches auch in den neu erscheinenden Empfehlungen Stabilisierungssäulen (EAS) aufgenommen wird. Im Rahmen der Untersuchungen zur Verformungskompatibilität wurden zahlreiche Variationen zur Modellierung der Geogitter sowie der Tragglieder, als auch Variationen in deren Kennwerten vorgenommen. Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Variationen werden nachfolgend vorgestellt.

Mit den numerischen Modellierungen soll insbesondere das Verformungsverhalten im Anfangszustand mit undrainierten Bodenparametern untersucht werden. Aufgrund der Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit erfolgt die Modellierung mit charakteristischen Bodenkennwerten ohne Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten und Konsolidierungseffekten innerhalb der Weichschicht.

Beim Anwendungsbeispiel handelt es sich um einen 5,0 m hohen Verkehrsdamm. Der Damm ist auf einer 6,8 m mächtigen, gering tragfähigen Schicht gegründet, welche von einer ausreichend tragfähigen Sandschicht unterlagert wird. Die unterste Lage des Dammes wird von einer Arbeitsebene mit einer Dicke von 1,0 m gebildet. Der Bemessungswasserstand befindet sich näherungsweise auf Höhe der Geländeoberkante.

Die Neigung der Böschungen beträgt beidseitig 1 : 1,5. Die Dammkrone hat eine Breite von 10,0 m. Veränderliche Einwirkungen aus Verkehr werden im Rahmen dieses Beitrags vernachlässigt. Zur Entlastung der Weichschicht, bzw. zur Erhöhung der Gesamtstandsicherheit wurden unter dem Damm insgesamt 21 Reihen Nassmörtelsäulen (NMS C20/25) mit einem Säulendurchmesser von $D = 0,30$ m angeordnet. Nassmörtelsäulen werden den Stabilisierungssäulen (StS) zugeordnet und wirken aufgrund ihres Baustoffs

(pumpfähiger Beton oder Mörtel) wie pfahlartige Tragglieder. Der Achsabstand der StS beträgt in Dammquerrichtung $s_x = 1,2$ m sowie in Dammlängsrichtung $s_y = 0,90$ m. Zur Reduktion der Spreizverformungen wird 0,25 m über den StS-Köpfen eine Lage Geogitter angeordnet. Der Bemessungswert der Langzeitzugfestigkeit beträgt $R_d = 135$ kN/m.

Zur effizienten numerischen Modellierung in Plaxis 3D wird ein Ausschnitt mit einer Breite in Dammlängsrichtung von $\Delta y = 0,5 \cdot s_y = 0,45$ m gewählt, wobei die StS-Reihe mittig geschnitten wird. Der vermaßte Modellausschnitt ist in der nachfolgenden Abbildung 1 dargestellt.

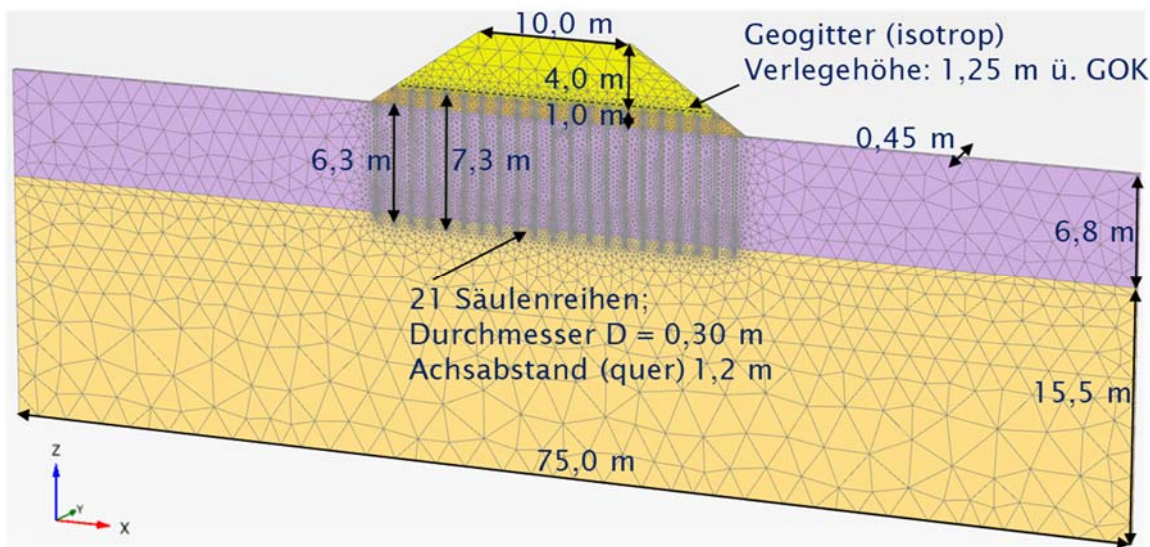


Abbildung 1 Aufbau des dreidimensionalen numerischen Modells

Die Diskretisierung erfolgt mit dem programminternen Algorithmus, wobei die Weichschicht hierbei um den Faktor 0,71 sowie die strukturellen Bauteile (StS und Geogitter) um den Faktor 0,25 verfeinert wurden. Das gesamte Modell besteht aus rd. 56.400 10-knotigen Elementen sowie rd. 110.900 Knoten.

Sämtliche Böden des Beispiels wurden in Übereinstimmungen mit dem EC 7-3 (2023) mit dem nichtlinearen Hardening-Soil (HS) Modell abgebildet. Die Weichschicht wurde hierbei mit undrainiertem Verhalten, die übrigen Böden mit drainiertem Verhalten abgebildet. Die wesentlichen Kennwerte der Böden können der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1 Wesentliche Kennwerte der modellierten Böden (Hardening Soil Modell)

Material	Stoffgesetz	γ / γ' [kN/m ³]	c' / c_u [kPa]	φ' / φ_u [°]	E_{oed} [MPa]	E_{50}^{ref} [MPa]	ν [-]	ψ [°]
Damm	HS, drained	21,5/12,5	2,0 / -	37,5 / -	50	60	0,20	7,5
Planum	HS, drained	19,5/9,5	2,5 / -	32,5 / -	40	50	0,20	2,5
Weichschicht	HS, undrained-B	15,0/5,0	- / 20	- / 0	1,85	3,0	0,33	0

Sand	HS, drained	21,0/10,0	5,0 / -	27,5 / -	40	40	0,20	0
------	-------------	-----------	---------	----------	----	----	------	---

Die Modellierung des Geogitters erfolgte nach (VON WOLFFERSDORFF, 2017) als elastoplastisches Plate-Elemente, da eine Modellierung mit den programminternen Geogitter-Elementen zu unzutreffende Schnittkräfte führt. Die gewählten Kennwerte zur Modellierung des Geogitters sind der nachfolgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2 Wesentliche Kennwerte des Geogitters (Platten-Element).

Material	γ [kN/m ³]	$E_1 = E_2$ [kPa]	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ [kPa]	$\sigma_{11} = \sigma_{12}$ [kPa]	E_{50}^{ref} [MPa]	d [m]	$w_{11} = w_{22}$ [m ³ /m]
Plate	1,0	700.000,0	10,0	13.500	60	0,01	$0,017 \cdot 10^{-3}$

Die Stabilisierungssäulen wurden als Volumenelemente mit Hilfe des Concrete-Models (SCHÄDLICH, SCHWEIGER, 2014) modelliert, welches durch seine spannungsabhängige Ver- und Entfestigung ein Versagen der Tragglieder, z. B. infolge Abbrechens zutreffend beschreiben kann (GÖMMEL, 2019). Die wesentlichen Kennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3 Wesentliche Kennwerte der Tragglieder (Concrete-Modell)

γ [kN/m ³]	E_{28} [kPa]	ν [-]	$f_{c,28}$ [kPa]	$\epsilon_{cp}^p(f_{c,28})$ [-]	$f_{t,28}$ [kPa]	φ [°]	ψ [°]
24,0	$20,0 \cdot 10^6$	0,15	$20,0 \cdot 10^3$	-0,0015	$1,0 \cdot 10^3$	45	10

Tabelle 4 Parameter zur Beschreibung des Entfestigungsverhaltens der Tragglieder (Concrete-Modell)

f_{c0n} [-]	f_{cfn} [-]	f_{cun} [-]	$G_{c,28}$ [kN/m]	f_{tun} [-]	$G_{t,28}$ [kN/m]
0,000	0,900	0,100	0,250	0,001	0,063

An den Mantelflächen der Tragglieder wurden Interface-Elemente mit starr-plastischen Verhalten modelliert. Die kontaktmechanische Beschreibung erfolgt über die Bodeneigenschaften der benachbarten Weichschicht, wobei aufgrund der in-situ-Herstellung von einem vollständigen Verbund zwischen Weichschicht und Tragglied ausgegangen wurde ($R_{inter} = 1,00$)

Nach Initialphase und plastischem Nullschritt erfolgt der Einbau der Arbeitsebene sowie der Tragglieder in jeweils separaten Phasen. Der Einbau der StS erfolgt hierbei als wshed-in-place-Aktivierung. Die übrige Dammschüttung erfolgt in der Simulation mit insge-

samt vier Berechnungsphasen, wobei jeweils eine Lage von 1,0 m Mächtigkeit aufgebracht wird. Mit der ersten Schüttlage über der Arbeitsebene erfolgt gleichzeitig die Aktivierung des Geogitters, aufgrund derer sämtliche Berechnungsphasen mit der updated-mesh-Funktion unter Berücksichtigung geometrischer Effekte 2. Ordnung ausgeführt werden.

3 Auswertung der numerischen Berechnungen

3.1 Gesamtverformungen

Die qualitative Auswertung des Verformungsverhaltens nach Abschluss des Dammbaus zeigt, dass der Damm erwartungsgemäß die größten Setzungsbeträge (6,5 cm) in überwiegend vertikaler Richtung im Bereich der Dammkrone aufweist. Im Bereich der Böschungsfüße betragen die maximalen horizontalen Spreizverformungen jeweils 3,6 cm, wobei sich die Horizontalverformungen über die Tiefe der Weichschicht nahezu vollständig abbauen. Aufgrund ihrer geringen Biegesteifigkeit folgen die Tragglieder im Wesentlichen den Horizontalverschiebungen des Bodens, so dass qualitativ keine nennenswerte Differenzverschiebung zwischen Boden und Tragglied (kein Umfließen) ersichtlich ist.

3.2 Einfluss und Aktivierung des Geogitters

Die Aktivierung des Geogitters wurde für die verschiedenen Berechnungsphasen (1. bis 4. Lage Dammbau) ausgewertet. Hierbei wurde im Bereich der Dammmitte die Normalkraft N_1 in Dammquerrichtung als Mittelwert über die Elementknoten ausgewertet. Ergänzend wurde die jeweils beidseitige Längung des Geogitters Δu_x erfasst.

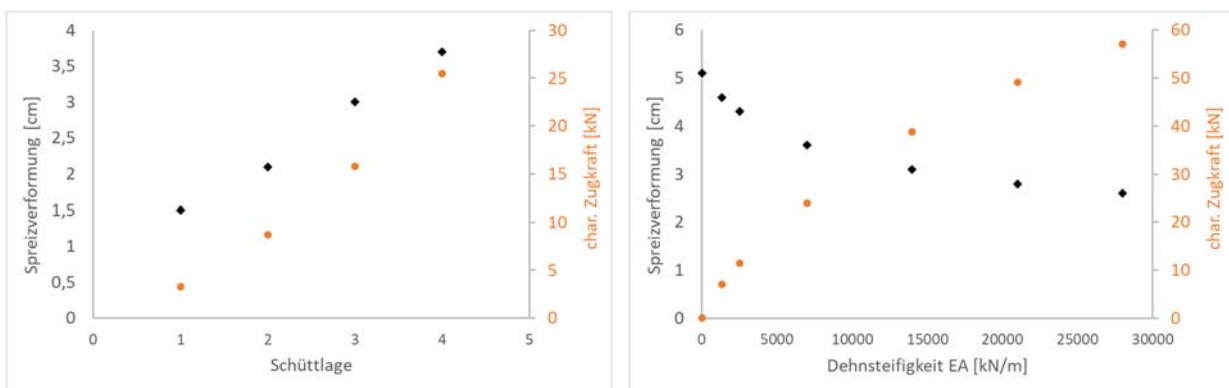


Abbildung 2 - Links: Aktivierung des Geogitters in Abhängigkeit der Schüttlage (EA = 7.000 kN/m); Rechts: Einfluss der Dehnsteifigkeit EA auf Zugkraft sowie Spreizverformungen

Die Aktivierung der Normalkraft sowie die Längung des Geogitters sind in Abhängigkeit der Dammschüttung in Abbildung 2 (links) dargestellt. Ergänzend für die in Tabelle 2 beschriebenen Kennwerte werden die Normalkräfte sowie Längungen bei fertiggestelltem

Damm für verschiedene Dehnsteifigkeiten EA bei ansonsten gleichbleibenden Boden- und Säulenkennwerten in Abb. 2 (rechts) dargestellt.

Aus Abb. 2 (links) wird ersichtlich, dass das Geogitter nur gering aktiviert wird bzw. geringe Zugspannungen erfährt. Der Mittelwert der Zugkräfte beträgt im Bereich unter der Dammkrone etwa 25 kN bei einer zugehörigen Längung von rd. 3,5 cm.

Die Variation der Dehnsteifigkeit in Abb. 2 (rechts) zeigt auf, dass die Spreizverformungen auf Höhe der OK Arbeitsebene ohne Geogitter etwa 5,2 cm betragen würden. Selbst mit mehreren Lagen Geogittern, vereinfacht berücksichtigt über eine erhöhte Dehnsteifigkeit einer Lage bis $EA = 28.000 \text{ kN/m}$, lassen sich die rechnerischen Spreizverformungen kaum auf unter 2,5 cm reduzieren.

3.3 Einfluss und Aktivierung der Tragglieder

Infolge der Spreizverformungen werden die Tragglieder quer zu deren Längsachse in Form von Verdrehungen und Verbiegungen beansprucht. Die am stärksten beanspruchten Tragglieder befinden sich erwartungsgemäß im Bereich des Böschungsfußes. Im Folgenden werden daher die Traggliedreihen 1 (äußerste Reihe, unmittelbar am Böschungsfuß) und 3 (dritte Reihe, bzw. erste Reihe mit Einbindung in Lasttransferschicht) ausgewertet. Hierzu wird die Aktivierung der tiefenabhängigen Normalkräfte in Abb. 3 (links) und der Biegemomente in Abb. 3 (rechts) in Abhängigkeit der Schüttlage für beide Säulenreihen visualisiert.

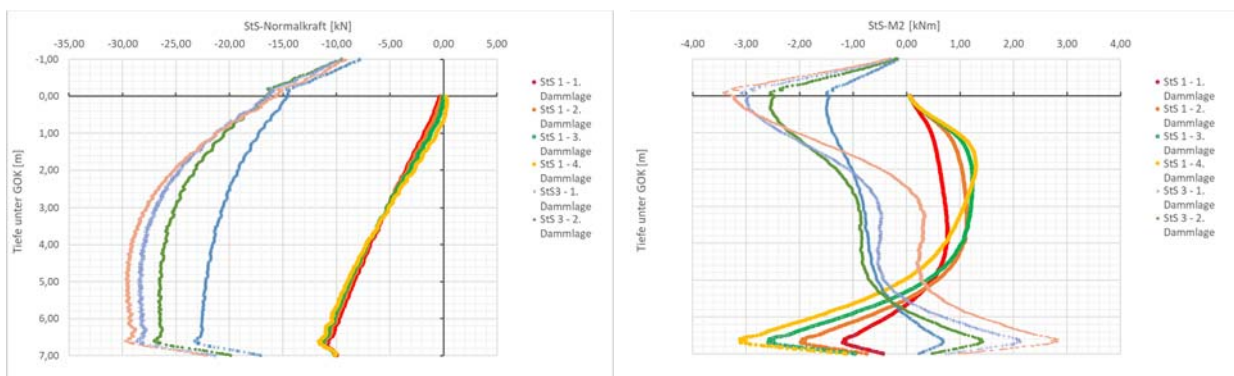


Abbildung 3 - Aktivierung der Schnittkräfte der Säulenreihen 1 und 3 in Abhängigkeit der Dammschüttung; Links: Aktivierung Normalkräfte $N(z)$; Rechts: Aktivierung Biegemomente $M(z)$

Infolge der minimalen Überschüttung der Traggliedreihe 1 kann sich kein Druckgewölbe oberhalb der Tragglieder ausbilden, wodurch die Tragglieder dieser Reihe nur geringe Normalkräfte aufweisen. Die Maxima der Biegemomente befinden sich in etwa in der Mitte der Weichschicht sowie an der Schichtgrenze zum unterlagernden Sand.

Bei der Traggliedreihe 3 ergeben sich aufgrund der mittleren Überschüttungshöhe von etwa 0,9 m bereits deutlich höhere Normalkräfte von bis zu 30 kN. Die qualitative Verteilung der Biegemomente unterscheidet sich, infolge der Einbindung des Traggliedkopfes in die Lastverteilungsschicht, grundlegend von der Traggliedreihe 1. Demnach ergeben sich die Stellen der maximalen Biegemomente jeweils an der oberen und unteren Schichtgrenze der Weichschicht.

In (GÖMMEL, 2019) wurde der Einfluss zahlreicher Traggliedparameter anhand eines Strukturmodells einer querbeanspruchten Einzelsäule systematisch mittels Sensitivitätsanalyse quantifiziert. Beim hier vorgestellten Randwertproblem wurde insbesondere der Einfluss des Elastizitätsmoduls sowie der Zugfestigkeit des Säulenmaterials durch Parametervariation betrachtet. Hierbei wurde der Elastizitätsmodul im Bereich von 20.000 bis 40.000 MN/m² variiert. Der Einfluss der Zugfestigkeit wurde mit Beträgen von 1.000 kPa, 333 kPa sowie 0,1 kPa untersucht. Eine Variation des Elastizitätsmoduls hat demnach keine nennenswerten Auswirkungen auf Normalkraft und Biegemoment. Identisch wurde dies auch für eine Reduktion der Zugfestigkeit von 1000 kPa auf 333 kPa beobachtet. Lediglich bei einer nahezu vollständigen Vernachlässigung der Zugfestigkeit von $f_t = 0,1$ kPa konnte eine deutliche Reduktion der Biegemomente sowie eine stärkere Variation der Normalkräfte im Bereich des Biegemomentenmaximums beobachtet werden.

Eine detaillierte Auswertung der Spannungen im Bereich der Biegemomentenmaxima kann an dieser Stelle aus Platzgründen nicht erfolgen. Es sei jedoch angemerkt, dass bei beiden Traggliedreihen im Bereich der Biegemomentenmaxima keine Entfestigung der Elemente - und somit kein Aufreißen des Traggliedquerschnittes, bzw. Abbrechen des Traggliedes für angenommene Zugfestigkeiten von 1.000 kPa sowie 333 kPa auftritt. Demgegenüber kann bei einer angenommenen Zugfestigkeit von 0,1 kPa eine deutliche Entfestigung und somit Rissbildung im Bereich der Biegemomentenmaxima der äußeren Säulenreihen beobachtet werden, was ein Abbrechen der Tragglieder indiziert.

3.4 Nachweis der inneren Tragfähigkeit der Tragglieder

Mit dem Nachweis der inneren Tragfähigkeit ist aufzuzeigen, dass die Tragglieder die aus den Verformungen resultierenden Einwirkungen unbeschadet aufnehmen können. Dazu sind folgende Nachweise zur inneren Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1 für Bauteile mit kreisförmigem Querschnitt aus einheitlichem Mörtel oder Beton zu führen:

- Nachweis einer hinreichend elastischen Bettung durch Begrenzung der Verformungen (Durchbiegung)
- Nachweis von Biegung mit Längskraft für unbewehrte Querschnitte
- Nachweis gegen örtliches Versagen durch Begrenzung der Exzentrizität der Normalkraft
- Nachweis der Querkraft für unbewehrte Querschnitte.

In (ALBER, 2013) wird ein vereinfachter Nachweis der inneren Tragfähigkeit in Konformität mit DIN EN 1992-1 vorgestellt. Es wird ersichtlich, dass i. W. der Nachweis mit Biegung und Längskraft maßgebend wird, weshalb sich die Ausführungen im Folgenden auf diesen Nachweis beschränken. Unter Vernachlässigung veränderlicher Einwirkungen kann der Nachweis demnach in der vereinfachten Form $m_{e,d} \leq m_{r,d}$ erbracht werden, wobei $m_{e,d}$ und $m_{r,d}$ wie folgt definiert sind:

$$m_{e,d} = \frac{\gamma_G \cdot M_{G,k}}{\pi \cdot r^3 \cdot f_{cd,pl}} \quad m_{r,d} = 0,8164 \cdot \frac{\gamma_G \cdot N_{G,k}}{\pi \cdot r^2 \cdot f_{cd,pl}} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_G \cdot N_{G,k}}{\pi \cdot r^2 \cdot f_{cd,pl}}\right)$$

Der normierte Bemessungswert des vorhandenen Biegemoments $m_{e,d}$, bzw. der normierte Bemessungswert des maximal mobilisierbaren Biegemoments $m_{r,d}$ können hierbei unter Berücksichtigung des Traggliedradius r sowie der Bemessungsdruckfestigkeit $f_{cd,pl}$ aus der vorhandenen Normalkraft $N_{G,k}$, bzw. dem vorhandenen Biegemoment $M_{G,k}$ berechnet werden. Für den Teilsicherheitsbeiwert γ_G wird auf Tabelle NA A2.1 aus der (E DIN EN 1990, 2023) verwiesen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass weder die auftretenden Verdrehungen und Verbiegungen noch die Lagerbedingungen am Kopf und Fuß der PTG mit klassischen statischen Systemen für gebettete Stäbe („Knicknachweis“) modelliert werden können. Vielmehr sind die Beanspruchungen der PTG aus den Ergebnissen der numerischen Berechnungen zu entnehmen.

Während aus den numerischen Berechnungen kein Abbrechen ersichtlich wird, ist der vorgestellte analytische Nachweis der inneren Tragfähigkeit mit Biegung und Längskraft für die äußersten vier Säulenreihen in der Tiefe des maximalen Biegemoments nicht erfüllt. Dies ist insbesondere auf die gemäß DIN EN 1992 zu vernachlässigende Zugfestigkeit des StS-Materials im analytischen Nachweis zurückzuführen.

Nach (EC 7-3, 2023) dürfen einzelne Bauteile versagen, solange die Gesamtstandsicherheit gewährleistet ist. Die Widerstände dieser StS-Reihen dürfen jedoch beim Nachweis der Gesamtstandsicherheit nicht angesetzt werden. Die Berechnungsergebnisse in den vorherigen Abschnitten stellen u.E. den Verfahrensweg (1) der (EBGEO, 2010) in Frage, worin bei ausreichender Bemessung der Geokunststoffbewehrung die vertikalen Tragglieder keine unzulässigen Verformungen aufweisen.

4 Zusammenfassung und Empfehlungen für die Praxis

Mit Hilfe der FEM wurde in dreidimensionalen Modellierungen das Gesamtverformungsverhalten eines Damms auf PTG abgebildet und untersucht, inwiefern durch die Spreizverformungen für die PTG unverträgliche Verschiebungen auftreten. Es wurde ersichtlich, dass sich die Horizontalverformungen innerhalb der Weichschicht vom Maximalwert im

Bereich des Böschungfußes zum Minimalwert im Bereich der Schichtgrenze zum unterlagernden Sand nahezu vollständig reduzieren. Aufgrund der geringen Biegesteifigkeit der unbewehrten PTG folgen die Tragglieder näherungsweise den Horizontalverformungen des Bodens ohne unverträglich große Differenzverschiebungen zwischen Boden und Tragglied.

Als kritisch für den Entwurf derartiger geotechnischer Bauwerke erweisen sich Schichtgrenzen mit Böden stark variierender Steifigkeiten. Diese können im Bereich der Einbindung des Säulenfußes in den tragfähigen Boden auftreten. Als besonders kritisch erweist sich in der vorliegenden Simulation der Übergang von der steifen Arbeitsplattform zur unterlagernden Weichschicht. Da im Bereich der Arbeitsplattform die größten horizontalen Spreizverformungen auftreten, entsteht hier eine „Einspannung“, innerhalb welcher aufgrund der hohen seitlichen Bettungssteifigkeit große laterale Einwirkungen auf die Tragglieder entstehen. In den Simulationen wurden im Bereich dieser Schichtgrenzen häufig die betragsmäßig größten Biegemomente festgestellt.

Im Rahmen der Erstellung der *Empfehlungen des Arbeitskreises 2.8 Stabilisierungssäulen der DGGT e.V.* wird ein Anwendungsbeispiel in Form eines Verkehrsdammes auf Stabilisierungssäulen erstellt. Während der Nachweis der Gesamtstandsicherheit noch mit vereinfachten analytischen Methoden erbracht werden kann, ist eine Abschätzung der zu erwartenden Horizontalverformungen sowie der Verformungsverträglichkeit kaum mit analytischen Verfahren möglich. Aus diesem Grund wurden Verformungsberechnungen und Parametervariationen mit der Methode der finiten Elemente ausgeführt.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrages ist die Thematik der Verformungskompatibilität noch nicht vollständig abgehandelt. Nach dem jetzigen Erkenntnisstand lassen sich jedoch die folgenden Schlussfolgerungen für die Praxis zusammenfassen:

- Der Verfahrensweg 1 in (EBGEO, 2010) sollte bei unbewehrten PTG nicht angewendet oder durch numerische Berechnungen ergänzt werden.
- Der Einfluss der Geogitter ist aufgrund deren geringen Dehnsteifigkeiten gering.
- Der Einfluss der Biegesteifigkeit der PTG ist gering
- Der Einfluss der PTG-Zugfestigkeit ist gering, sofern realistische Beträge für die Zugfestigkeiten angenommen werden.

Naheliegender wäre es, die Normalkräfte über die gesamte Länge der PTG innerhalb der ersten Kernweite ($r/4 = 15 \text{ cm}/4 = 3,75 \text{ cm}$) der PTG zu halten, was jedoch erfordert, den Normalkraftverlauf in den PTG möglichst genau zu ermitteln. Dazu ist jedoch anzumerken, dass mit den vorliegenden numerischen Simulationen ein Idealzustand ohne Imperfektionen abgebildet wurde. Vor allem in der Praxis übliche, verfahrensbedingte Schiefstellungen von 1° bis 3° führen hierbei zu weiteren ungewollten Exzentrizitäten und Biegemomenten innerhalb der Tragglieder, welche zusätzlich zu berücksichtigen wären.

5 Literatur

- | | | |
|--------------------------------------|------|--|
| Alber, Dirk | 2013 | Der Nachweis der inneren Sicherheit von pfahlartigen Traggliedern im Boden; Bautechnik 90; Heft 12; S. 803 – 815 |
| EBGEO | 2010 | Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO); 2. Auflage; DGGT e. V. (Hrsg.); Ernst & Sohn Verlag Berlin |
| E DIN EN 1990 | 2023 | DIN EN 1990/NA/A1:2023-05 – Entwurf; Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Änderung A1 Beuth Verlag, Berlin. |
| E EAS | | Empfehlungen des Arbeitskreises 2.8: Stabilisierungssäulen der DGGT e.V., Essen (AK-interne Entwurfsfassung) |
| E EC 7-3 | 2023 | prEN 1997-3:2023:11 (E) Eurocode 7 - Geotechnical design - Part 3: Geotechnical structures |
| Gömmel, Roland; | 2019 | Berücksichtigung unbewehrter pfahlartiger Tragglieder beim Nachweis der Gesamtstandsicherheit; Dissertation; Technische Universität Berlin; Shaker Verlag Düren |
| Schädlich, Bernd; Schweiger, Helmut; | 2014 | Shotcrete Model – Internal report: Implementation, validation and application of the shotcrete model; Graz University of Technology |
| von Wolffersdorff, Peter-Andreas | 2017 | Informationen und Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“; geotechnik 40; Heft 1; S. 64 – 73; |

Anschrift der Verfasser

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg

Fakultät Bauingenieurwesen

Lehrgebiet Geotechnik

Galgenbergstraße 30

93053 Regensburg

Telefon +49 941 943 1366

Email: thomas.neidhart@oth-regensburg.de

Website: <http://bauingenieurwesen.oth-regensburg.de>