

Schottersäulen als Gegenmaßnahme bei verflüssigungsgefährdeten Böden

Dr.-Ing Jamal Hleibieh

GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH

Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

Technische Universität Dresden

Zusammenfassung

Zur Verminderung der Gefahr einer Bodenverflüssigung kommt oft die Rüttelstopfverdichtung zum Einsatz. Dabei werden mit Hilfe von Tiefenrüttlern Schottersäulen im Boden hergestellt. Untersuchungen zu deren Funktionsweise sind jedoch kaum vorhanden. Dies lässt sich damit begründen, dass sowohl numerische Berechnung mit einfachen Stoffmodellen als auch kleinmaßstäbliche Laborversuche problematisch sind. In diesem Beitrag wird die Anwendung von Schottersäulen als Prävention zur Bodenverflüssigung numerisch mittels 2D- und 3D-Berechnungen untersucht. Hierfür wurde ein hypoplastisches Modell verwendet. Die Drainagewirkung der Säulen sowie der Einfluss der Aussteifung wurden dabei separat betrachtet.

1 Einleitung

Zur Verhinderung der Bodenverflüssigung bieten sich verschiedene Bodenverbesserungsmaßnahmen wie z.B. Bodenverfestigung, Bodenverdichtung oder die Anwendung von Dränagen an. Die Bodenverdichtung mittels Tiefenrüttler weist eine hohe Effektivität bei grobkörnigen Böden auf. Allerdings sinkt die Wirkung des Tiefenrüttlers mit zunehmendem Feinkornanteil des Bodens stark ab. In diesem Fall kann der Boden durch das Einbringen von Schottersäulen verbessert werden (Wehr und Trunk 2011). Als innovative Methode zur Verminderung der Verflüssigungsgefahr kommt somit die Rüttelstopfverdichtung zum Einsatz. Dabei werden mit Hilfe von Tiefenrüttlern Schottersäulen im Boden hergestellt. Hierbei werden verschiedene Faktoren zur Verhinderung der Verflüssigung, wie z.B. Drainageeffekt, Bodenverdichtung und steife Elemente kombiniert (Madhav und Krishna 2008).

Die höhere Durchlässigkeit der Schottersäulen im Vergleich zum umliegenden Boden führt dazu, dass sich in den Säulen kaum Porenwasserdruck (PWD) aufbaut.

Dadurch entsteht ein Druckunterschied zwischen den Säulen und dem umliegenden Boden. Aufgrund dieses Druckunterschiedes entsteht eine Wasserbewegung in Richtung Säulen und damit eine Abnahme des PWDs im Boden. Da die Durchlässigkeit von Sand und Kies in horizontaler Richtung größer als in vertikaler Richtung ist, sind die Auswirkungen der Schottersäulen nicht nur die Verkürzung der Dränagewege, sondern auch die Änderung der Richtung der Wasserbewegung zu der effektiveren Fließrichtung (Madhav und Krishna 2008). Weiterhin verursacht die Herstellung der Schottersäulen eine Verdichtung des umliegenden Bodens, was die Verflüssigungsneigung ebenfalls verringert. Da die Schottersäulen wesentlich steifer als der umliegende Boden sind, werden die erdbeben-induzierten oder bereits bestehenden Lastverteilungen in die steiferen und dichteren Säulenelemente umgelagert. Das führt dazu, dass Erdbeben geringere Beanspruchungen im lockeren Boden verursachen. Die Dränagewirkung sowie der Einfluss der Aussteifung werden in diesem Beitrag mittels numerischer Verfahren untersucht.

2 Das numerische Modell

Die numerischen Berechnungen wurden mit dem Finite-Elemente-Programm Tochnog Professional [Roddeman 2016] durchgeführt. Sowohl das 2D-Netz als auch das 3D-Netz wurden mit Hilfe der Software GiD [GiD 2016] erzeugt. Das numerische 2D-Modell mit den Dimensionen von $B \cdot H = 2 \cdot 10$ m besteht aus einer Schottersäule und dem umliegenden Sandboden (Bild 1). Der Durchmesser der simulierten Säule sollte 0,8 m in 3D betragen. Die Breite der Schotterscheibe im 2D-Modell wurde deshalb so angepasst, dass das Flächenverhältnis im 2D- demjenigen im 3D-Fall entspricht. Somit wird die Schottersäule in 2D mit einer 0,25 m breiten Scheibe modelliert. Der linke und der rechte Modellrand sind miteinander verbunden, sodass die beiden Ränder auf gleicher Höhe sowohl dieselbe horizontale und vertikale Verschiebung als auch den gleichen Porenwasserdruck aufweisen. Die Oberfläche des Modells ist frei beweglich. Der untere Rand wird in vertikaler Richtung fixiert, während in horizontaler Richtung die seismische Beanspruchung in Form von sinusförmigen Beschleunigungs-wellen aufgebracht wird (Bild 1). Die numerischen Berechnungen wurden mit dem hypoplastischen Modell nach (von Wolffersdorff 1996), verbunden mit dem Ansatz von intergranularen Dehnungen nach (Niemunis und Herle 1997) durchgeführt. Für den umliegenden Sandboden wurden die hypoplastischen Parameter für Nevada Sand verwendet (Tabelle 1 und Tabelle 2). Diese Parameter wurden anhand von statischen und dynamischen bzw. zyklischen Laborversuchen ermittelt (siehe Hleibieh 2017). Für das Säulenmaterial wurden die hypoplastischen Parameter für Hochstetten Kies verwendet (Wegener 2013). Die hypoplastischen Parameter für den Hochstetten Kies sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengefasst.

φ_c [°]	h_{s0} [MPa]	n_0	e_{d0}	e_{c0}	e_{i0}	α	β
36.	133	0,50	0,26	0,45	0,50	0,1	1,8

Tabelle 3 Parameter für Hochstetten Kies für das hypoplastische Modell nach (von Wolffersdorff 1996).

R	m_R	m_T	β_r	χ	ϑ
0,00005	10,0	4,0	0,3	1,0	10,0

Tabelle 4 Parameter für Hochstetten Kies für das Modell nach (Niemunis und Herle 1997).

Im Anfangszustand hat der Sand eine bezogene Lagerungsdichte von $I_d = 40$ %. Sowohl für den Sand als auch für die Schottersäule wurden geostatische Spannungszustände infolge des Eigengewichts vorgegeben. Die Lagerungsdichte des Säulenmaterials entspricht der maximalen druckabhängigen Lagerungsdichte. Die Durchlässigkeit beträgt $k_{\text{Sand}} = 7 \cdot 10^{-5}$ m/s für den Sand und $k_{\text{Saeule}} = 1 \cdot 10^{-2}$ m/s für den Kiesboden. Sowohl für den Sand als auch für den Kies wurde ein Sättigungsgrad von 96 % angenommen, was einem Kompressionsmodul von Wasser von $K = 2$ MPa entspricht. Die dynamische Anregung am unteren Rand besteht aus 20 sinusförmigen Beschleunigungszyklen mit der Amplitude von $1,3 \text{ m/s}^2$ bei einer Frequenz von 2 Hz. Alle Berechnungen wurden mit vierknotigen Elementen mit einer Elementenlänge von $\Delta_l = 20$ cm und einem Zeitschritt von $\Delta_t = 5 \cdot 10^{-4}$ s durchgeführt.

3 Einheitszelle

Die numerischen Berechnungen von Schottersäulen in Verbindung mit der Bodenverflüssigung sind sehr rechenaufwendig. Der Aufwand ist umso größer, je größer die Modelldimensionen und die Anzahl der Schottersäulen innerhalb des Modells sind. Es ist sinnvoll, eine minimale Modellgröße zu ermitteln, mit welcher sich das Verhalten einer Säulengruppe abbilden lässt. Hierfür wird ein Modell bestehend aus zwei Schottersäulen mit dem umgebenden Boden (Bild 2b), ein Modell bestehend aus einer Schottersäule mit dem umgebenden Boden (Bild 2 a) und ein Modell bestehend aus zwei Halbsäulen mit dem dazwischenliegenden Boden (Bild 2c) verwendet. Sowohl das Modell mit einer Schottersäule als auch das Modell mit zwei Halbsäulen sind jeweils ein Ausschnitt aus dem Modell mit zwei Schottersäulen. Somit haben alle Modelle den gleichen Säulenabstand und das gleiche Flächenverhältnis.

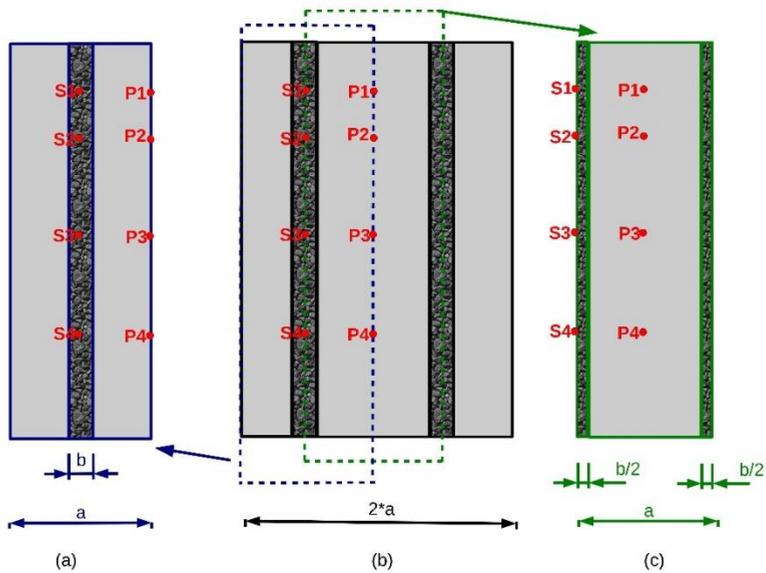


Bild 2 Verschiedene Modelle zur Ermittlung der Einheitszelle.

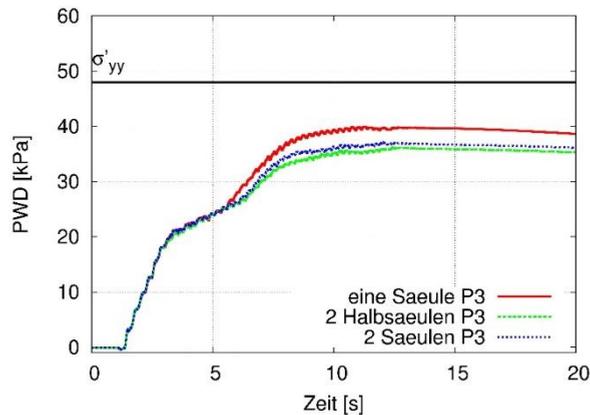


Bild 3 Entwicklung des Porenwasserdrucks im Punkt P3 für die Berechnungen zur Ermittlung der Einheitszelle.

Die Entwicklung des Porenwasserdrucks infolge eines Erdbebens ist für den Punkt P3 in allen drei Modellen in Bild 3 vorgestellt. In den ersten zehn Belastungszyklen baut sich der gleiche Porenwasserdruck in allen Modellen auf. Danach unterscheiden sich die Kurvenverläufe leicht voneinander. Auch in den Punkten P1, P2 und P4 lassen sich ähnliche Tendenzen beobachten. Die unterschiedlichen Kurvenverläufe nach ca. 10 Zyklen können damit begründet werden, dass der Boden verflüssigt

(siehe Abschnitt 4). Nichtsdestotrotz zeigen die Berechnungsergebnisse, dass das Verhalten einer Säulengruppe mit Hilfe einer Einheitszelle repräsentiert werden kann. Als Einheitszelle können entweder eine Säule mit dem umgebenden Boden oder zwei Halbsäulen mit dem dazwischenliegenden Boden verwendet werden. Für die weiteren Berechnungen wird das Modell mit einer Schottersäule und dem umgebenden Boden eingesetzt.

4 Dränage- und Aussteifungseffekte der Schottersäulen

Der Einfluss der Steifigkeit und Durchlässigkeit der Schottersäulen wurden getrennt untersucht. Zunächst wurden die Säulen so simuliert, dass sie die gleiche Durchlässigkeit, jedoch eine höhere Steifigkeit als der Sand aufweisen (Annahme der Parameter für den Hochstetten Kies). In einer anderen Berechnung wurden die Säulen mit den gleichen Bodenparametern wie der Sand, jedoch mit einer höheren Durchlässigkeit simuliert ($k_{\text{Sand}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ und $k_{\text{Saeule}} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$). Anschließend wurden die Säulen als Schottersäulen simuliert, was eine höhere Steifigkeit und Durchlässigkeit im Vergleich zum umliegenden Boden bedeutet.

Die Entwicklung des PWDs im Sand ohne Säulen und mit unterschiedlichen Säulenvarianten ist in Bild 4 (a) dargestellt. Bei der Berechnung mit den weichen durchlässigen Säulen baut sich genau so viel Porenwasserdruck auf wie bei der Berechnung ohne Säulen. Somit zeigen die weichen durchlässigen Säulen keine nennenswerte Dränagewirkung. Das liegt wahrscheinlich daran, dass die Durchlässigkeit des Sands relativ niedrig ist.

Zum Abbau des Porenwasserdrucks im Boden muss eine bestimmte Wassermenge abfließen und sich zur Dränage bewegen. Auch bei den kürzeren Dränagewegen Richtung Säulen braucht das Wasser eine bestimmte Zeit, um die Säulen zu erreichen. Diese Dauer nimmt mit abnehmender Durchlässigkeit zu und kann somit so lang sein, dass innerhalb einer kurzen Zeit, z.B. während eines Erdbebens, kaum Wasserbewegung und somit kaum Dränagewirkung stattfinden.

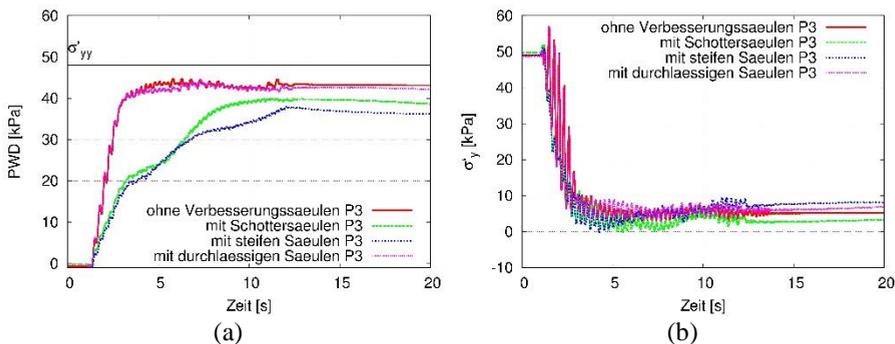


Bild 4 Entwicklung des Porenwasserdrucks (a) und der effektiven Vertikalspannung (b) im Punkt P3 für die Berechnungen mit unterschiedlichen Säulenvarianten.

Im Vergleich zur Berechnung ohne Säulen bzw. mit durchlässigen Säulen bildet sich sowohl bei der Berechnung mit steifen Säulen als auch mit Schottersäulen weniger Porenwasserdruck auf (Bild 4 a). Die Verringerung des Aufbaus von PWD durch die Säulen kann zunächst als positive Wirkung zur Verhinderung der Verflüssigung betrachtet werden. Bild 4 (b) zeigt jedoch, dass die effektive Vertikalspannung in verschiedenen Tiefen bis auf den Wert Null abnimmt, was einer Bodenverflüssigung entspricht. Das bedeutet, dass die effektive Spannung abnimmt, obwohl der PWD nicht entsprechend zunimmt.

Dies lässt sich mit einer Abnahme der totalen Spannung erklären. Tatsächlich zeigt Bild 5 (a), dass die totale Vertikalspannung im Sand abnimmt, im Gegensatz zur konstant gebliebenen totalen Vertikalspannung bei der Berechnung ohne Säulen bzw. mit weichen durchlässigen Säulen. Gleichzeitig nimmt die totale Spannung in den Säulen zu (Bild 5 b).

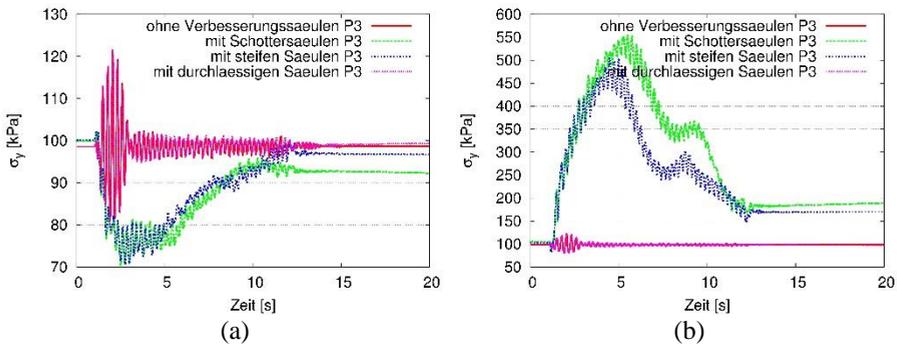


Bild 5 Entwicklung der totalen Vertikalspannung im Punkt P3 (a) und Punkt S3 (b) für die Berechnungen mit unterschiedlichen Säulenvarianten.

Wegen der höheren Steifigkeit der Schottersäulen im Vergleich zum umliegenden Sand tritt eine Spannungumlagerung in Richtung der Säulen auf. Ein Teil vom Eigengewicht des Sandes wird durch die Säulen getragen und es entsteht ein Siloeffekt (Bild 6). Das führt zur Abnahme der totalen Spannungen im Sand und zur Zunahme der totalen Spannungen in den Säulen. Diese Spannungumlagerung ist realistisch, entsteht allerdings zum größten Teil wahrscheinlich schon bei der Herstellung der Schottersäulen. Deshalb spielt die Betrachtung der Säulenherstellung und der dadurch entstehenden Spannungsumverteilung im Anfangszustand des numerischen Modelles eine entscheidende Rolle, wenn die Schottersäulen zur Verhinderung der Bodenverflüssigung numerisch untersucht werden sollen.

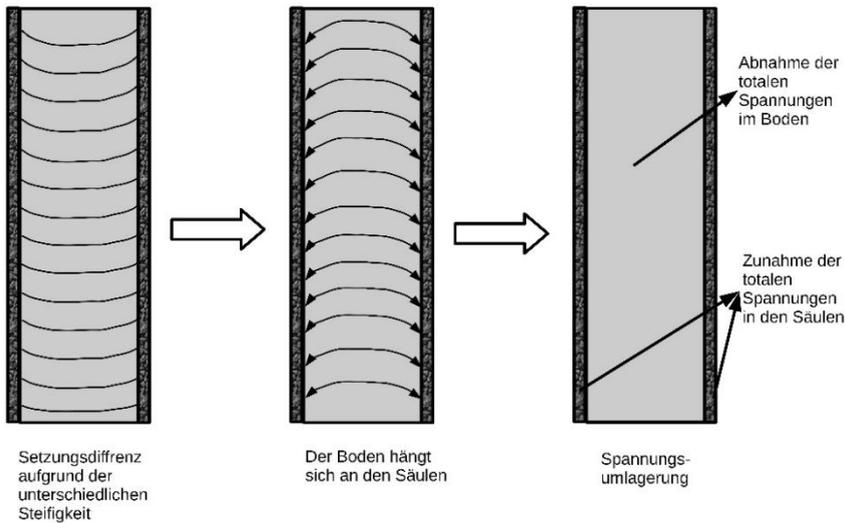


Bild 6 Entstehen des Siloeffektes.

5 Vergleich zwischen 2D- und 3D-Berechnungen

Im 2D-Modell wird statt einer Schottersäule eigentlich eine Schotterscheibe modelliert. Um den Einfluss dieser Verzerrung bzw. um den Unterschied zwischen den 2D- und 3D-Modellen zu untersuchen, wurden zwei 3D-Modelle geprüft; ein 3D-Modell mit einer Schotterscheibe und ein 3D-Modell mit einer Schottersäule (Bild 7). Das 3D-Modell mit der Schotterscheibe ist eine Erweiterung des 2D-Modells um die dritte Dimension. Alle drei Modelle haben dasselbe Säulenraster und das gleiche Flächenverhältnis. Die Randbedingungen in beiden 3D-Modellen entsprechen denjenigen im 2D-Modell. Der vordere und der hintere Modellrand sind sowohl in x-Richtung als auch in z-Richtung frei beweglich, während die Bewegung in y-Richtung verhindert wird.

Der linke und der rechte Modellrand sind miteinander verbunden, sodass die beiden Ränder bei gleichen y- und z-Koordinaten sowohl dieselbe horizontale und vertikale Verschiebung als auch den gleichen Porenwasserdruck aufweisen. Die Oberfläche des Modells ist frei beweglich. Der untere Rand wird in vertikaler Richtung fixiert, während in x-Richtung die seismische Beanspruchung in Form von sinusförmigen Beschleunigungswellen aufgebracht wird. Die 3D-Berechnungen wurden mit vierknotigen Elementen mit einer Elementenlänge von $\Delta_l = 20 \text{ cm}$ und einem Zeitschritt von $\Delta_t = 5 \cdot 10^{-4} \text{ s}$, entsprechend den 2D-Berechnungen, durchgeführt. Der Anfangszustand und die dynamische Beanspruchung entsprechen denjenigen im 2D-Modell.

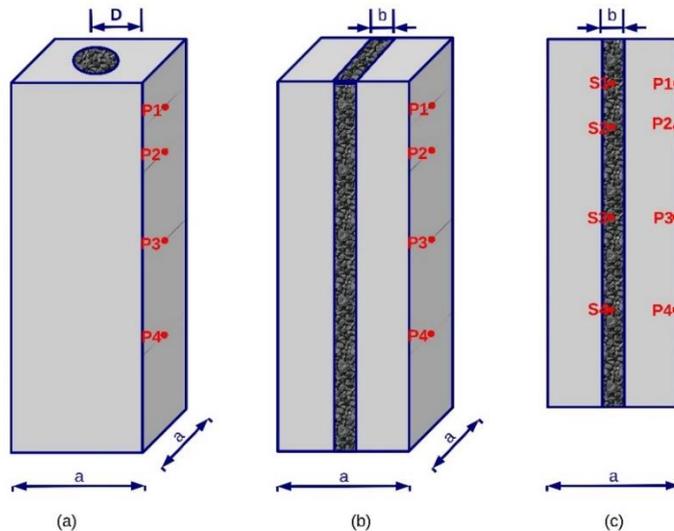


Bild 7 2D- und 3D-Modelle einer Schottersäule bzw. Schotterscheibe.

Die Entwicklung des PWDs im Punkt P3 ist sowohl für die 2D- als auch 3D-Berechnungen in Bild 8 (a) dargestellt. Bei der 3D-Berechnung mit der Schotterscheibe baut sich fast derselbe Porenwasserdruck auf wie bei der entsprechenden 2D-Berechnung. Bei der 3D-Berechnung mit der Schottersäule baut sich hingegen so viel PWD auf wie beim Boden ohne Verbesserung. Bild 8 (b) zeigt jedoch, dass die effektive Vertikalspannung bei allen dargestellten Berechnungen gleich abnimmt. Das bedeutet, dass die totale Vertikalspannung σ_v in den einzelnen Berechnungen unterschiedlich verläuft (Bild 8 c). Der Verlauf von σ_v bei der 3D-Berechnung mit der Schotterscheibe ist fast identisch wie bei der entsprechenden 2D-Berechnung. Dabei nimmt σ_v in den ersten 3 Zyklen zunächst sehr schnell ab und danach ganz langsam wieder zu.

Im Gegensatz dazu nimmt σ_v bei der 3D-Berechnung mit der Schottersäule in den ersten drei Zyklen leicht ab und steigt danach wieder schnell bis zu den ursprünglichen Werten an. Auch die Berechnungsergebnisse in den unterschiedlichen Punkten P1, P2 und P4 zeigen ähnliche Tendenzen,

Die oben vorgestellten 2D- und 3D-Berechnungen zeigen, dass die Spannungsumlagerung bei den Berechnungen mit der Schotterscheibe stärker auftreten als bei der 3D-Berechnung mit der Schottersäule. Das kann damit begründet werden, dass die Kontaktfläche zwischen dem Boden und der Schottersäule deutlich kleiner als diejenige zwischen dem Boden und der Schotterscheibe ist. Weiterhin treten sowohl beim 2D-Modell als auch beim 3D-Modell mit der Schotterscheibe ebene Verformungen auf, im Gegensatz zu den räumlichen Verformungen beim 3D-Modell mit der Schottersäule. Die ebenen Verformungen führen wahrscheinlich auch zur Verstärkung des Siloeffektes.

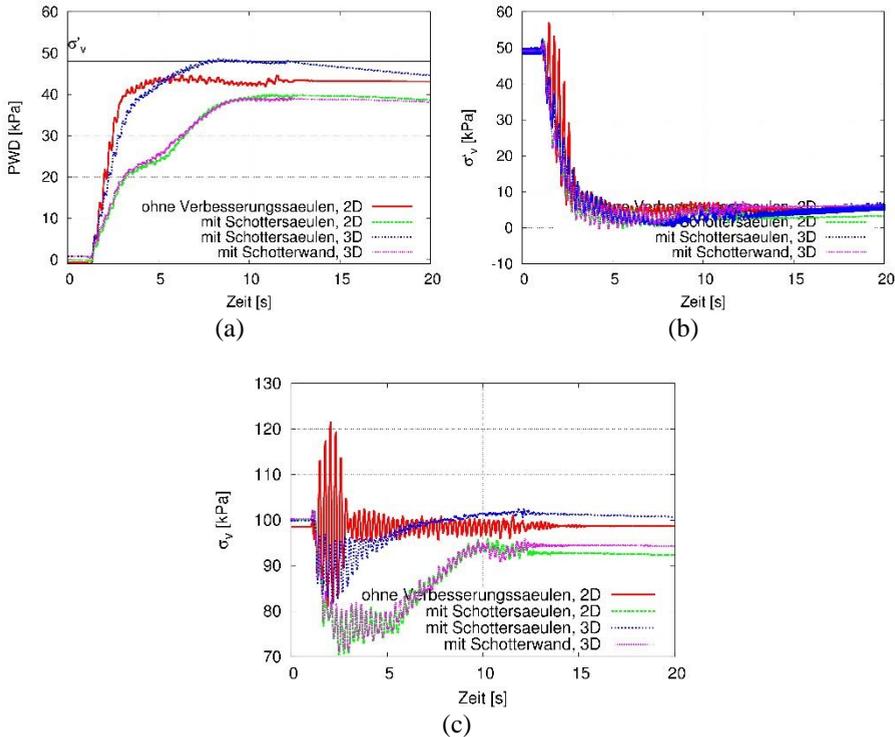


Bild 8 Entwicklung des Porenwasserdrucks (a), der effektiven Vertikalspannung (b) und der totalen Vertikalspannung (c) im Punkt P3 für die 2D- und 3D-Berechnungen.

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

In diesem Beitrag wurde die Wirkung der Schottersäulen zur Verhinderung der Bodenverflüssigung numerisch untersucht. Zunächst wurden die Drainage- und die Aussteifungswirkung separat untersucht. Die alleinige Drainagewirkung zeigt keinen nennenswerten Einfluss wegen des sehr schnellen Aufbaus von Porenwasserdruck im Boden während des Erdbebens. Aufgrund der hohen Steifigkeit der Schottersäulen wird zwar weniger Porenwasserdruck in den Boden aufgebaut. Die effektive Spannung nimmt jedoch trotzdem unverhindert weiter ab. Das liegt darin, dass die hohe Säulensteifigkeit zu einer Spannungsumlagerung in Richtung Säulen führt und ein Siloeffekt entsteht. Somit wird der Boden zum Teil von den Säulen getragen und die totale Spannung im Boden nimmt ab. In der 3D-Berechnungen ist der Siloeffekt deutlich geringer als in den 2D-Berechnungen. Nichtsdestotrotz zeigen sowohl die 2D- als auch die 3D-Berechnungen, dass die Säulensteifigkeit nur mäßige Wirkung zur Verhinderung der Bodenverflüssigung hat.

Literatur

- Wehr, W.; Trunk U.: Baugrundverbesserung im Spezialtiefbau. In C. Boley, editor, *Handbuch Geotechnik*, 2011, S. 469–542.
- Madhav, M.R.; Krishna, A.M.: Liquefaction mitigation of sand deposits by granular piles - an overview. In: Liu, Deng, and Chu, editors, *Geotechnical Engineering for Disaster Mitigation and Rehabilitation*, Science Press Beijing, 2008, S 66–79.
- Von Wolffersdorff, P.-A.: A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. In: *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 1 (1996), S. 251–271.
- Niemunis, A.; Herle, I.: Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. In: *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2 (1997), S. 279–299.
- Wegener, D.: Ermittlung bleibender Verformung infolge dynamischer Belastung mittels numerischer Verfahren. Dissertation, TU Dresden, 2013
- Hleibieh, J.: Anwendung der Hypoplastizität bei numerischen Berechnungen von bodendynamischen Problemen. Dissertation, TU Dresden, 2017. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-229516>
- Roddeman, D: TOCHNOG Professional User's manual, 2016.
- GiD: Pre and post processing system for Numerical Simulations, 2016.