

2

41. Jahrgang
März 2018, S. 99-108
ISSN 0172-6145
21756

Sonderdruck

geo technik

ORGAN DER DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR GEOTECHNIK

Bodenmechanik
Erd- und Grundbau
Felsmechanik
Ingenieurgeologie
Geokunststoffe
Umweltgeotechnik



Foto: © DB Netz AG

Messtechnische und numerische Untersuchungen einer Kippenstabilisierung

Dirk Wegener
Christian Hering

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Brand

 **GEPRO**
Ingenieurgesellschaft für Geotechnik, Verkehrs- und Tiefbau und Umweltschutz mbH
www.gepro-dresden.de

Messtechnische und numerische Untersuchungen einer Kippenstabilisierung

In der Lausitz ist eine Eisenbahnstrecke auf einer Abraumkippe eines ehemaligen Tagebaus geführt. Dabei verblieben nach Einstellung des Tagebaubetriebs weitgehend ungesicherte Kippenbereiche im Untergrund. Das Kippenmaterial besteht aus locker gelagerten Sanden, die aufgrund ihrer Kornzusammensetzung bei hoher Wassersättigung und entsprechendem Initialeintrag zur Verflüssigung neigen. Zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs des eingleisigen Streckenabschnitts war eine Geschwindigkeitsbeschränkung auf 30 km/h und eine permanente geotechnische Überwachung notwendig. Durch den nach dem Ende der Braunkohlenförderung prognostizierten großräumigen Grundwasserwiederanstieg und den vorgesehenen zweigleisigen Eisenbahnbetrieb bestand akuter Handlungsbedarf zur dauerhaften Beseitigung der Setzungsfließgefahr. Dazu wurde mittels Rüttelstopf- bzw. Rütteldruckverdichtung ein versteckter Damm hergestellt. Anhand der Ergebnisse von Schwingungs- und Porenwasserdruckmessungen wird gezeigt, wie sich der unverdichtete und mittels Rüttelstopf- und Rütteldruckverdichtung verdichtete Kippenboden verhält. Mittels numerischen Simulationen und deren Ergebnissen werden die Säulenherstellung realistisch erfasst und die gemessene Porenwasserdruckentwicklung bestätigt.

Measurements and numerical investigations of a dump stabilisation. *In the Lausitz, a railway line were founded on a overburden dump of a former open-pit mine. After termination of the mining operation largely unprotected dumping areas remained in the subsoil. The dump material consists of loose sands, which tend to liquefaction due to initial impulse by reason of their grain size distribution at high water saturation. A speed limit of 30 km/h and a permanent geotechnical monitoring were necessary to ensure safe railway operation of the single track section. As a result of the large-scale groundwater resurgence prediction after the end of the lignite coal production and the planned two-track railway operation, there was an acute need for action to permanently eliminate the danger of liquefaction. For this purpose, a hidden dam was produced by means of vibro compaction or vibro replacement with stone columns. On the basis of the results of vibration measurements and pore water pressure measurements, the behaviour of the noncompacted soil and the soil compacted by vibro compaction or vibro replacement is shown. By means of numerical simulations and their results, the construction of the vibro replacement stone columns is determined realistically and the measured access pore water pressure is confirmed.*

1 Einleitung

Die Bahnstrecke 6207, Wegliniec–Horka–Roßlau an der Grenze Deutschland/Polen als Bestandteil des paneuropäischen Schienenverkehrskorridors C-E 30 führt im Bereich der Ortschaft Lohsa über das Kippengebiet eines ehemaligen Tagebaus in einer Entfernung von 40 bis 50 m parallel zur Ostböschung des Silbersees bzw. des Speicherbeckens Lohsa I.

Die Restlöcher Silbersee und Mortka (Speicherbecken Lohsa I) in der Lausitz entstanden durch Flutung des ehemaligen Braunkohlentagebaus Werminghoff II Mitte der 1950er-Jahre. Da nach der Einstellung des Betriebs keine Sanierungsmaßnahmen erfolgten, sind weitgehend ungesicherte Bereiche verblieben. Im Bereich der Ostböschung des Silbersees, einschließlich des Bahndamms, stehen locker gelagerte Sande an, die aufgrund ihrer Kornzusammensetzung bei hoher Wassersättigung und entsprechendem Initialeintrag zur Verflüssigung neigen. Bereits in den 1970er-Jahren wurden deshalb Verhaltensanforderungen vorgegeben, bei deren Einhaltung diese Bereiche einer Folgenutzung zugeführt werden konnten.

Zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs wurde die Geschwindigkeit im betroffenen Streckenabschnitt bereits von 100 auf 30 km/h beschränkt, und es war eine permanente geotechnische Überwachung notwendig. Durch den prognostizierten Grundwasserendstand bestand akuter Handlungsbedarf zur Herstellung der Standsicherheit dieser Böschungen und des Untergrunds unter dem Bahnkörper.

Für die Sanierung der Ostböschung des Silbersees mit den darauf befindlichen Gleisanlagen wurde deshalb die Herstellung eines versteckten Damms mittels Tiefenverdichtung der lockeren Kippenmischböden geplant und realisiert. Mit einer Untergrundverdichtung in diesem Kippenbereich und des Bereichs der Innenkippe Lohsa wird dauerhaft die öffentliche Sicherheit hergestellt. Bild 1 zeigt die Situation des Baubereichs vor Beginn der Tiefenverdichtungsarbeiten.

2 Ausgangssituation und geplanter Zustand nach der Sanierung

Im Bereich des Bahnhofs Lohsa wurde zwischen 1959 und 1962 der ehemals zweigleisige Abschnitt zwischen



Bild 1. Luftaufnahme des Baubereichs im April 2011 vor Beginn der Tiefenverdichtungsarbeiten [1]
 Fig. 1. Aerial view of the construction area in April 2011 before the beginning of deep compaction work [1]

km 52,920 und 61,700 der Bahnstrecke 6207 für den Aufschluss von Braunkohlevorkommen aus seiner ursprünglichen Lage verlegt und als eingleisiger Abschnitt südlich zwischen km 59,700 und 61,6 + 700 auf der ehemaligen Abraumkippe neu aufgebaut. Zwischen km 59,700 und 61,200 grenzt östlich das Speicherbecken Lohsa I als Teil des ehemaligen Braunkohlentagebaus Werminghoff II an. Ab km 61,200 bis 61,6+700 führt die Eisenbahnstrecke weiter über Kippengelände, an das beidseitig forst- und landwirtschaftliche Flächen angrenzen (Bild 2).

Durch den nach dem Ende der Braunkohlenförderung prognostizierten großräumigen Grundwasserwiederanstieg und den vorgesehenen zweigleisigen Eisenbahnbetrieb bestand akuter Handlungsbedarf zur dauerhaften Beseitigung der Setzungsfließgefahr. Zwischen den Jahren 2011 und 2015 führte die LMBV mbH im Bereich der zuvor zurückgebauten Bahntrasse eine Sanierung des Kippenkörpers unterhalb der Bahnanlage zur Beseitigung der Setzungsfließgefahr infolge des Grundwasserwiederanstiegs am Speicherbecken Lohsa I, der sogenannten Ost-

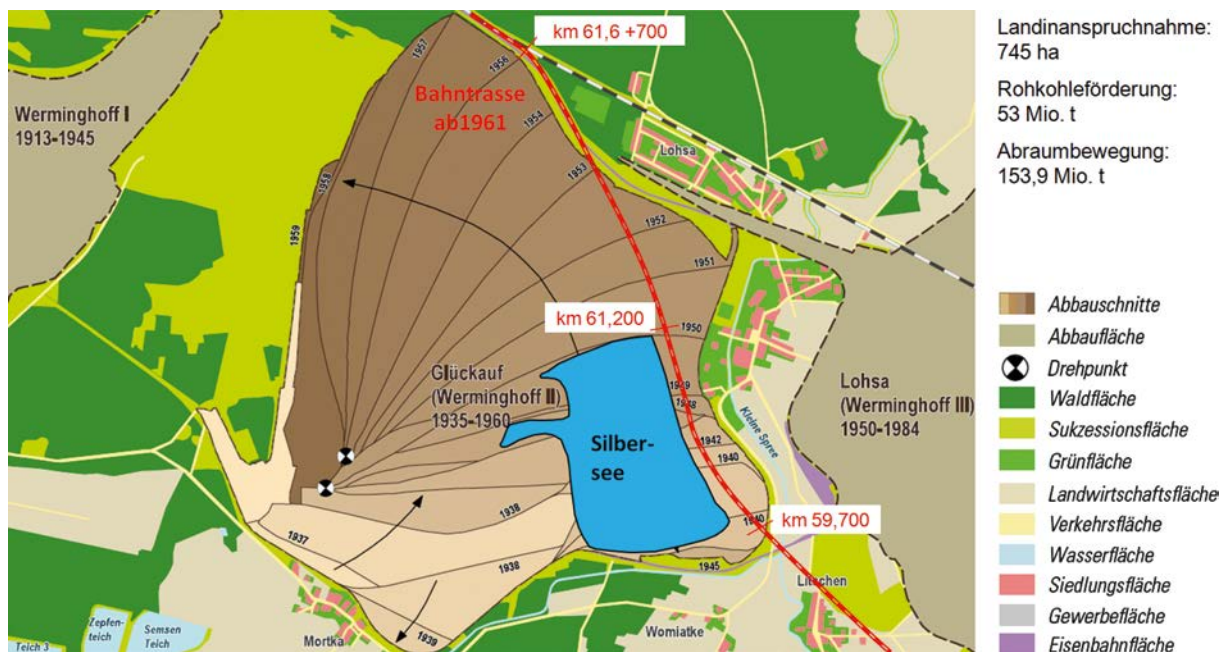


Bild 2. Tagebau Glückauf (Werminghoff II) mit Eintragung der Bahntrasse ab 1961 einschließlich Kilometrierung und Lage des Silbersees [2] [3]
 Fig. 2. Opencast Glückauf (Werminghoff II) with the entry of the railway line from 1961 including the kilometer and the location of the Silbersee [2] [3]

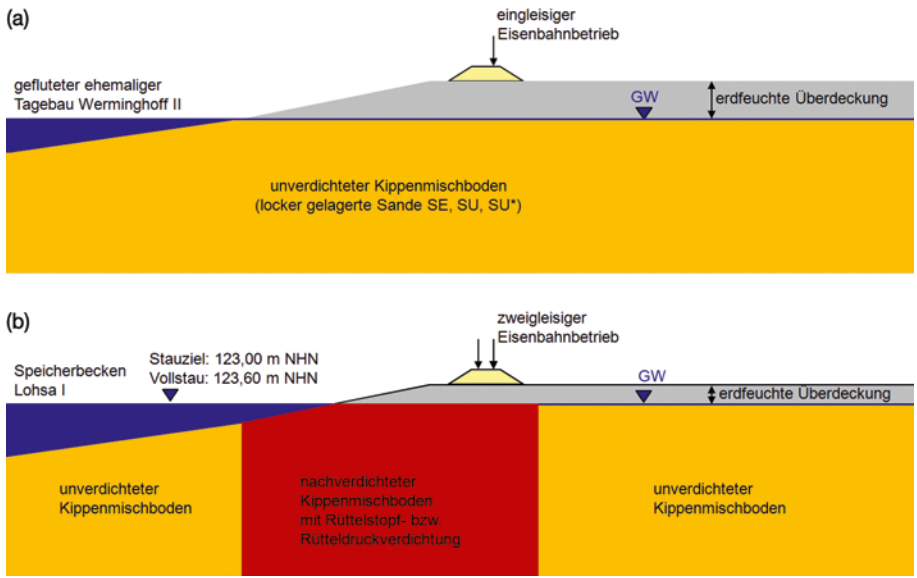


Bild 3. Typische Querschnitte vor (a) und nach der Sanierung (b) im Bereich der Ostböschung Silbersee bzw. des Speicherbeckens Lohsa I [5]

Fig. 3. Typical cross sections before (a) and after the rehabilitation (b) in the area of eastern embankment of Silbersee respectively storage reservoir Lohsa I [5]

böschung Silbersee (Länge ca. 1,5 km), und der sich anschließenden Innenkippe (Länge ca. 1 km) durch. In [4] sind weitere Angaben zum Gesamtprojekt und dessen Finanzierung, zu den vorgesehenen Ausbaumaßnahmen und den Bahnanlagen auf der Altbergbaukippe im Bereich Lohsa angegeben. In Bild 3 sind jeweils ein typischer Querschnitt im Bereich der Ostböschung Silbersee vor und nach der Sanierung zu sehen.

3 Untergrundsanie rung mittels Rüttelstopf- bzw. Rütteldruckverdichtung

3.1 Durchführung der Verdichtungsarbeiten

Zur Beseitigung der Setzungsfließ- und Grundbruchgefahr und damit zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebs wurde in den gekippten Bereichen des ehemaligen Tagebaus Werminghoff II eine Kippenstabilisierung mittels Tiefenverdichtung geplant. Im südlichen Teilabschnitt, dem Bereich der Ostböschung am Silbersee, wurde die Tiefenverdichtung überwiegend mittels Rüttelstopfverdichtung (RSV) und im nördlichen Teilabschnitt, dem Bereich der Innenkippe, mittels Rütteldruckverdichtung (RDV) ausgeführt. Der so entstandene verdichtete Bodenkörper weist gemäß den Planungen von [6] und [7] im südlichen Teilabschnitt eine Breite von 65 m, im nördlichen Teilabschnitt eine Breite von 50 m und eine bis zum Liegenden reichende Tiefe im Mittel von 34 m auf.

Bei der RSV und RDV wird von einem Trägergerät aus eine Rüttellanze in den Untergrund mittels Eigengewicht und Unterstützung durch Druckluft abgesenkt. Dabei steht das Trägergerät auf einem bereits gesicherten Kippenkörper. Durch die dynamische Anregung einer rotierenden Unwucht am Rüttellanzekopf mit einer Anregungsfrequenz von ca. 30 Hz wird der enggestufte Kippenmischboden SE/SU/SU* nach DIN 18196:2011-05 zur Kornumlagerung und Verdichtung angeregt. Die Druckluft wird zur Förderung des Zugabematerials erforderlich.

Im Weiteren wird insbesondere auf die RSV eingegangen, da bei deren Ausführung Schadensereignisse aufgetreten sind und eine messtechnische Begleitung einschließlich Labor- und Feldversuche erfolgte.

3.2 Schadensereignisse bei Ausführung der Tiefenverdichtungsarbeiten

Geländebrüche im Zuge von Tiefenverdichtungsmaßnahmen stellen ein nicht auszuschließendes Risiko dar. Mittels Standsicherheitseinschätzungen in [6] wurde jedoch im Zuge der Genehmigungsplanung nachgewiesen, dass das auf dem bereits verdichteten Damm befindliche Trägergerät mit einem entsprechend langen Ausleger in einem genügend großen Abstand zum unverdichteten Kippenbereich, für den lediglich die Restscherfestigkeit angesetzt wurde, ausreichend standsicher ist.

Trotz Einhaltung der geotechnischen und technologischen Vorgaben entsprechend der Ausführungsplanung in [7] kam es am 24. Juni 2011 zu einem durch die Tiefenverdichtungsarbeiten ausgelösten Setzungsfließen an der Ostböschung des Silbersees. Nach Auswertung dieses Schadensereignisses wurden für die weitere Bauausführung sicherheitsverbessernde Maßnahmen vorgesehen und entsprechend umgesetzt. Diese beinhalteten zum einen die Herstellung des versteckten Damms im südlichen Teilabschnitt in drei Phasen:

- 39 m breiter, mittels RSV herzustellender Hauptdamm mit entsprechend breitem Vorland zur Uferböschung,
- Nachlaufend 11 m breiter, ebenfalls mittels RSV herzustellender Streifen,
- 15 m breiter, nur mittels RDV herzustellender uferseitiger Restbereich.

Zum anderen wurde die sogenannte Sicherheitsfahrweise eingeführt, bei der die Rüttelstopfsäulen (RSS) in einer versetzten Abfolge hergestellt und nach Säulenherstellung Ruhepausen mit einer tiefenabhängigen Dauer

von 20 bis 40 min zur Vermeidung konzentrierter Anstiege des Porenwasserdrucks (PWD) im Untergrund eingehalten wurden. Außerdem erfolgte eine PWD-gesteuerte Verdichtung, bei der bei Erreichen des in [8] mit 30% der effektiven Vertikalspannung ($0,3 \cdot \sigma'_v$) festgelegten Grenzwerts des PWD im Untergrund für den Gerätefahrer eine Signalisierung mittels Ampelschaltung erfolgte. Dabei ist zu beachten, dass der PWD-Aufbau ein Ergebnis und kein Indikator der Verflüssigung ist [9], so dass mit dieser Maßnahme die Gefahr eines Setzungsfließens zwar reduziert, aber nicht vermieden werden kann.

Am 8. März 2012 trat ein weiteres umfangreiches Setzungsfließen an der Ostböschung des Silbersees infolge der Tiefenverdichtungsarbeiten ein, das einen Vorkopfbereich von etwa 180 m und das seitliche Hinterland der Trasse bis zu einem Abstand von 120 m erfasste [10]. Daneben gab es mehrere, in ihrem Umfang kleinere, lokale Geländeabsenkungen im unverdichteten Bereich der Kippe. Bei allen eingetretenen Schadensereignissen kamen jedoch keine Personen zu Schaden, und es bestand keine Gefahr für die Standsicherheit im Bereich der bereits verdichteten Kippe mit dem darauf befindlichem Trägergerät.

3.3 Dichtezunahme durch die Rüttelstopfverdichtung (RSV)

Bei der RSV wird beim Ziehen der Rüttellanze zusätzlich ein Mineralstoffgemisch (Splitt/Schotter mit einer Körnung 5/32) eingebracht, so dass abhängig von der Lagerungsdichte des Kippenmischbodens Rüttelstopfsäulen (RSS) mit ca. 0,6 bis 1 m, im Mittel 0,8 m Durchmesser aus dem Mineralstoffgemisch entstehen. Die Zugabemenge betrug im Mittel 1,1 t/m RSS. Unter Berücksichtigung ei-

nes mittleren Säulenrasters von $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ resultiert daraus eine Dichtezunahme von $\Delta\rho_{d,\text{Säule}} = 0,122 \text{ g/cm}^3$. Die Erhöhung der Dichte zeigte sich jedoch außerdem in einer mittleren Geländeabsenkung von 1,2 m durch die Tiefenverdichtung. Bei einer mittleren Verdichtungstiefe von ca. 33 m unter Oberkante (OK) Gelände bis zum Liegenden resultiert daraus eine prozentuale Zunahme um $1,2 \text{ m}/33 \text{ m} = 3,6\%$ bzw. eine mittlere Dichtezunahme von $\Delta\rho_{d,\text{Abs}} = 0,056 \text{ g/cm}^3$. Die gesamte Dichtezunahme durch die RSV beträgt somit im Mittel $\Sigma\Delta\rho_d = \Delta\rho_{d,\text{Säule}} + \Delta\rho_{d,\text{Abs}} = 0,179 \text{ g/cm}^3$.

3.4 Laborversuche und Ableitung bodenmechanischer Kennwerte

Es wurden ungestörte Bodenproben aus Schürftgruben sowohl aus dem unverbesserten Bereich als auch aus dem mit RSS verbesserten Bereich zwischen den Säulen entnommen [11]. Tabelle 1 zeigt, dass die aus dem unverbesserten Bereich entnommenen Bodenproben der Bodenklasse SU*/ST* eine lockere Lagerung aufweisen. Durch die Erhöhung der Trockendichte durch das eingebrachte Säulenmaterial und die Geländeabsenkung liegt dann im Mittel eine mitteldichte Lagerung vor.

Tatsächlich wurde an den beiden Bodenproben im verbesserten Bereich der RSS eine noch höhere Dichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$ ermittelt, die einer sehr dichten Lagerungsdichte entspricht. Ursache hierfür ist die Inhomogenität der Kippe, wie auch an der unterschiedlichen Bodenklasse (SE im untersuchten verbesserten Bereich mit RSS, SU*/ST* im untersuchten unverbesserten Bereich) deutlich wird. Das Zugabematerial wurde gleichmäßig über die gesamte Säule zugeführt und eingebaut (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1. Bodenmechanische Kennwerte für die einzelnen Bodenschichten
Table 1. Soil mechanical parameters for the different soil layers

Bezeichnung, Formelzeichen [Einheit]	Unverbesserter Bereich		Verbesserter Bereich gemittelt ¹⁾	Verbesserter Bereich mit RSS	
	Probe 1	Probe 2		Probe 1	Probe 2
Bodenklasse	SU*/ST*	SU*/ST*	SU*/ST*	SE	SE
Mittlerer Korndurchmesser d_{50} [mm]	0,25	0,28	0,27	0,27	0,27
Ungleichförmigkeitszahl C_U [-]	> 6	> 6	> 6	3,00	2,56
Dichte ρ [g/cm^3]	1,77	1,78	1,95	2,10	2,09
Wassergehalt w [%]	14,5	17,1	14,1	15,0	15,2
Trockendichte ρ_d [g/cm^3]	1,55	1,52	1,71	1,82	1,82
Sättigungsdichte ρ_{sat} [g/cm^3]	1,96	1,94	2,06	2,13	2,13
Korndichte ρ_s [g/cm^3]	2,63	2,63	2,63	2,64	2,64
Sättigungsgrad S_R [%]	54	61	68	88	88
Porenzahl e [-]	0,71	0,74	0,54	0,45	0,46
Porenzahl e_{min} [-]	0,40	0,40	0,40	0,42	0,42
Porenzahl e_{max} [-]	0,81	0,81	0,81	0,83	0,83
Bezogene Lagerungsdichte I_D [-]	0,25 (locker)	0,18 (locker)	0,65 (mitteldicht)	0,93 (sehr dicht)	0,91 (sehr dicht)

¹⁾ Mittelwert von Probe 1 und 2 aus unverbessertem Bereich unter Berücksichtigung der mittleren Dichtezunahme durch die RSV von $\Sigma\Delta\rho_d = 0,179 \text{ g/cm}^3$ entsprechend Abschnitt 3.3.

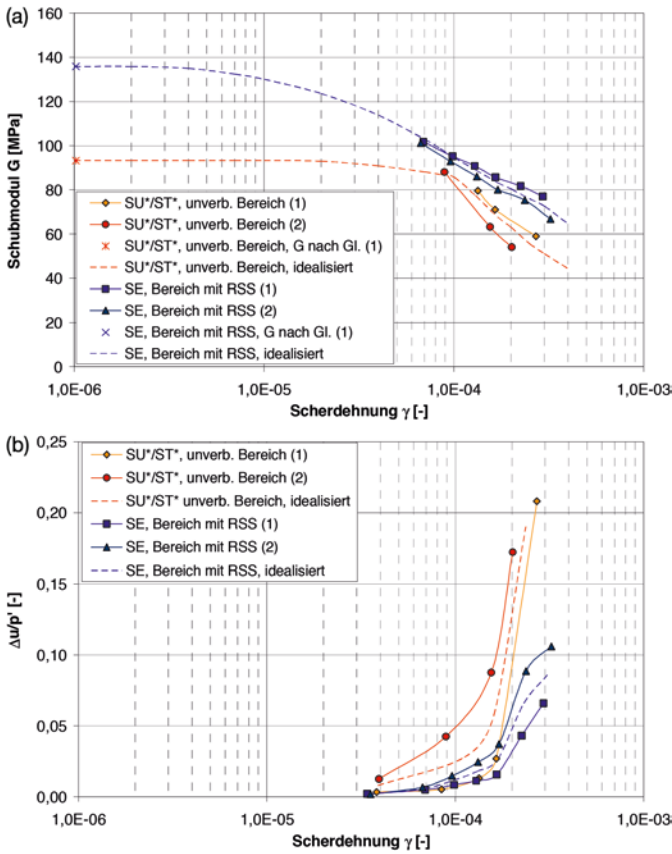


Bild 4. Ergebnisse von zyklischen Triaxialversuchen: Schubmodul G (a) und auf die mittlere effektive Spannung p' normierter PWD Δu (b) in Abhängigkeit von der Scherdehnungsamplitude γ nach jeweils 1.000 Zyklen/Laststufe
 Fig. 4. Results of cyclic triaxial tests: shear modulus G (a) and excess pore pressure Δp normalized on mean effective stress p' (b) in dependence of shear strain amplitude γ after each 1,000 cycles/load level

Verflüssigung bzw. verflüssigungsähnliche Zustände entstehen bei weitgehend wassergesättigten, locker gelagerten Sanden, die sich infolge Scherung kontraktant verhalten [12]. Zur versuchstechnischen Modellierung dieses Verhaltens und zur Untersuchung des Bodenverhaltens infolge zyklischer Belastung wurden jeweils ein undrännierter zyklischer Triaxialversuch an den vier in Tabelle 1 angegebenen Proben aus dem verbesserten und dem unverbesserten Bereich mit jeweils einer Höhe von 20 cm und einem Durchmesser von 10 cm durchgeführt [11]. Die zyklischen Triaxialversuche erfolgten nach einer isotropen Konsolidation mit $p' \approx 95$ kPa bei einem Gegendruck von ca. 500 kPa mit einer Frequenz von 5 Hz und mehrstufiger Erhöhung der Vertikalspannung um $\Delta\sigma_v \approx 5, 10, 15, 20$ und 25 kPa.

Die Steifigkeit bei kleinen Dehnungen konnte in den zyklischen Triaxialversuchen erst ab einer Scherdehnung von $\gamma \approx 5 \cdot 10^{-5}$ zuverlässig bestimmt werden. Die Steifigkeit bei kleinen Dehnungen wurde nach Gl. (1) entsprechend den Empfehlungen in [13] ermittelt.

$$G_0 = 323 \cdot \frac{(2,97 - e)^2}{(1 + e)} \cdot p_a \cdot \left(\frac{p'}{p_a}\right)^{0,5} \quad (1)$$

mit
 e Porenzahl,
 $p' = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$ mittlere effektive Spannung,
 $p_a = 100$ kPa atmosphärischer Druck.

Mit den Porenzahlen nach Tabelle 1 und der in den zyklischen Triaxialversuchen vorhandenen mittleren effektiven Spannung $p' \approx 95$ kPa ergeben sich die bei $\gamma = 1 \cdot 10^{-6}$ eingetragenen Werte des Schubmoduls G_0 . Aus den Ergebnissen für den verbesserten und unverbesserten Bereich wurden die entsprechenden Kurvenverläufe idealisiert und zusammen mit den Messergebnissen nach jeweils 1.000 Zyklen/Laststufe in Bild 4 dargestellt.

Die Bodenproben im unverbesserten Bereich zeigen erwartungsgemäß eine geringere scherdehnungsabhängige Steifigkeit $G(\gamma)$ und einen größeren Anstieg des PWD mit zunehmender Scherdehnung gegenüber den Bodenproben im Bereich mit RSS.

3.5 Feldversuche und Ergebnisse

Zur messtechnischen Kontrolle wurden begleitend zur Herstellung der RSV entsprechend der geotechnischen Ausführungsplanung in [7] und der geotechnischen Stellungnahme in [8] permanent Messungen des PWD durchgeführt [14]. Zur Ermittlung der Schwingungen in unterschiedlichen Abständen zur jeweils hergestellten RSS wurden außerdem an zwei Messtagen Schwingungsmessungen ausgeführt [15].

Bild 5 zeigt einen Lageplanausschnitt mit Eintragung der PWD-Geber und der direkt daneben befindlichen Geophone. Weiterhin sieht man die bereits hergestellten RSS zum Zeitpunkt der Schwingungsmessung und die Säulen, bei deren Herstellung die Schwingungsmessungen erfolgten. Bei der dynamischen Anregung bei Herstellung der Säule 2 157 13 erfolgt die Wellenausbreitung bis zu den Geophonen 1Z bis 8Z komplett im unverbesserten

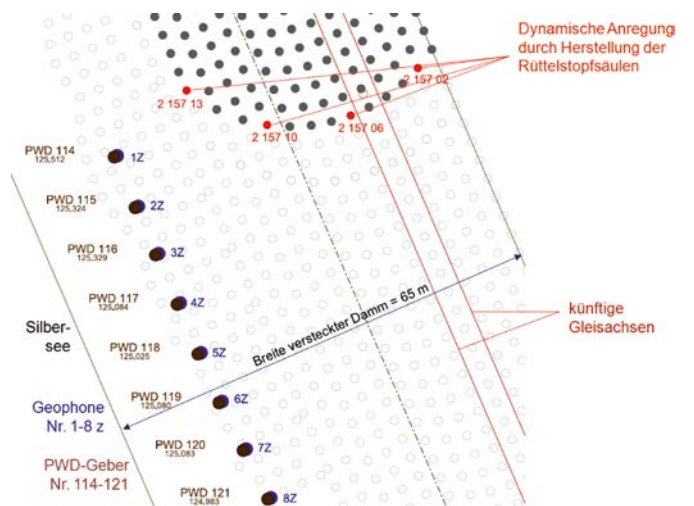


Bild 5. Lageplanausschnitt mit Eintragung der PWD-Geber, Geophone und bereits hergestellten RSS zum Zeitpunkt der Schwingungsmessung
 Fig. 5. Site map with entry of the pore water pressure sensors, geophones and already installed vibro replacement with stone columns at the time of the vibration measurement

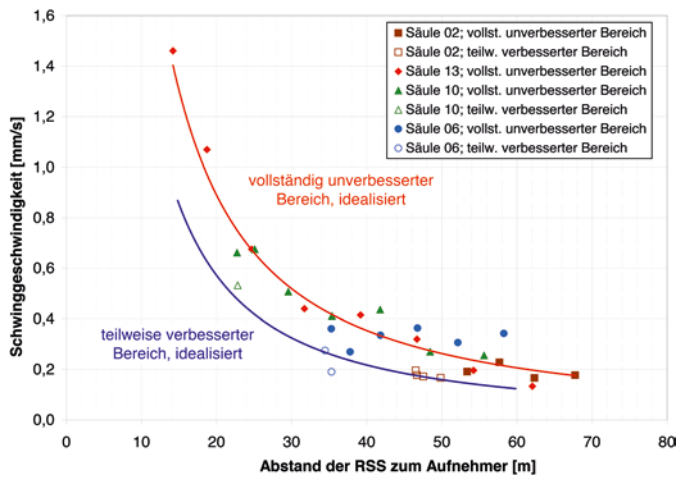


Bild 6. Schwinggeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abstand der hergestellten RSS

Fig. 6. Particle velocities in dependence of the distance to the installed vibro replacement with stone columns

Bereich. Bei Herstellung der Säule 2 157 02 erfolgt hingegen die Wellenausbreitung für die Geophone 1Z bis 4Z teilweise im verbesserten und teilweise im unverbesserten Bereich.

In Bild 6 ist die Abnahme der Schwinggeschwindigkeit mit zunehmendem Abstand von der hergestellten RSS zu sehen. Die Säulen, in denen die Wellenausbreitung bis zum Geophon im vollständig unverbesserten Bereich erfolgt, sind mit ausgefüllten Symbolen und die Säulen, in denen die Wellenausbreitung bis zum Geophon im teilweise verbesserten Bereich erfolgt, sind mit unausgefüllten Symbolen gekennzeichnet. Die Messpunkte für die Wellenausbreitung im vollständig unverbesserten Bereich und im teilweise verbesserten Bereich wurden zu jeweils einem Kurvenverlauf gemittelt bzw. idealisiert.

Bei gleichem Abstand der hergestellten RSS zum Aufnehmer sind die Schwinggeschwindigkeiten um ca. 50% größer, wenn sich der direkte Ausbreitungsweg vollständig im noch unverbesserten Bereich der Kippe befindet.

In Bild 7 ist die PWD-Entwicklung während der Herstellung der RSS im Zeitraum der Schwingungsmes-

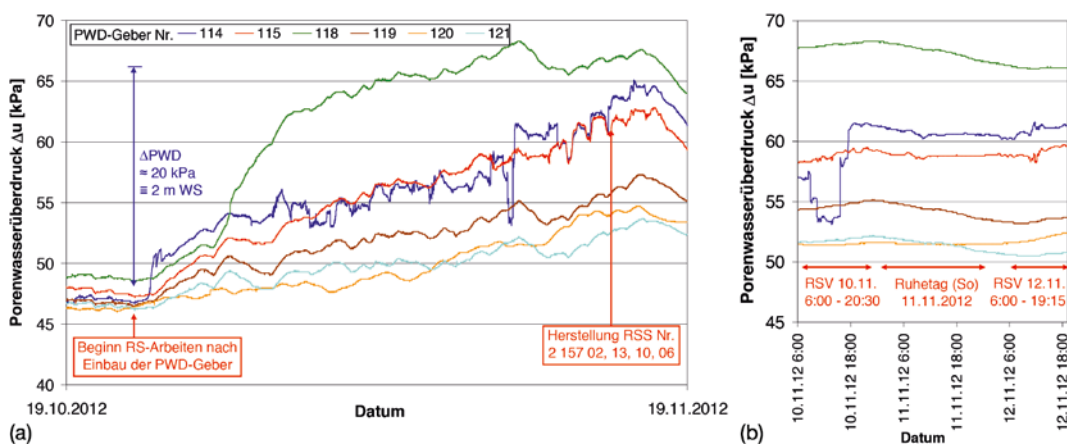


Bild 7. PWD-Entwicklung während der RSV: (a) über einen Monat im Zeitraum der Schwingungsmessungen; (b) im Zeitraum 10. bis 12. November 2012

Fig. 7. Development of excess pore pressure while the vibro replacement with stone columns: (a) over one month at the time of the vibration measurements; (b) at the time of 10. to 12. November 2012

sungen dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass es seit dem Wiederbeginn der Rüttelstopfarbeiten am 22. Oktober 2012 nach ca. einwöchiger Pause, in der auch der Einbau der PWD-Geber erfolgte, zu einem kontinuierlichen Anstieg des PWD kam.

Die drei PWD-Geber Nr. 114, 115 und 118, die sich näher an der Erschütterungseintragung durch die Säulenerstellung befinden, zeigen einen größeren PWD-Anstieg gegenüber den drei weiter entfernten PWD-Gebern Nr. 119, 120 und 121. Erkennbar ist außerdem der Abbau des PWD in den nächtlichen Ruhephasen und an Sonntagen entsprechend den Tagesprotokollen zur RSV [16], z.B. PWD-Anstieg am 10. und 12. November 2017 während der RSV, hingegen PWD-Abfall am Sonntag, 11. November 2012 (Bild 7b).

Insgesamt beträgt der PWD-Anstieg $\Delta u \approx 10$ bis 20 kPa bzw. 1 bis 2 m Wassersäule. Das entspricht für die jeweils in ca. 7 m Tiefe angeordneten Messgeber einer effektiven Vertikalspannung von $\sigma'_v \approx 85$ kPa bzw. einer mittleren effektiven Spannung von $p' \approx 56$ kPa und einem auf die jeweiligen Spannungen normierten PWD $\Delta u / \sigma'_v \approx 0,12$ bis 0,24 bzw. $\Delta u / p' \approx 0,18$ bis 0,36. Der in [8] festgelegte Grenzwert von $0,3 \cdot \sigma'_v$, im konkreten Fall ca. 25 kPa, wurde nicht erreicht, so dass die RSV ohne zusätzliche Zwangspausen, außer der 40-minütigen Ruhepause nach der jeweiligen Säulenerstellung, entsprechend der Sicherheitsfahrweise erfolgen konnte.

4 Numerische Simulation der Rüttelstopfverdichtung (RSV)

4.1 FE-Modell

Die Herstellung der RSS wird entsprechend den Untersuchungen in [17] bzw. [18] mit dem Modell der zylindrischen Hohlraumverformung simuliert. Damit können die Spannungsänderungen und PWD-Entwicklung numerisch erfasst werden. Modelliert wird der bis zum Liegenden reichende Kippenmischboden in einem axialsymmetrischen Modell (Bild 8).

Gemäß den mittleren Herstellungszeiten und Energieeinträgen bei der entsprechend den Tagesprotokollen [16] dokumentierten Säulenerstellung wird in einer ers-

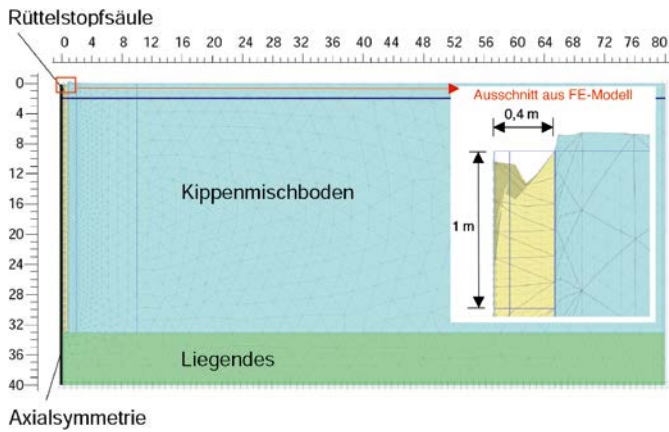


Bild 8. Axialsymmetrisches FE-Modell zur Simulation der Säulenherstellung, Darstellung nach bereits eingebrachten Säulen

Fig. 8. Axial-symmetrical FE-model for the simulation of vibro replacement, representation after columns already installed

ten Phase das Eindringen des Rüttlers bis zum Liegenden innerhalb von 5 min simuliert. Dabei wird der Hohlraum auf einen Radius von 20 cm aufgeweitet. Anschließend wird eine Aufweitung auf 40 cm und das Einbringen des Säulenmaterials von unten nach oben modelliert (Bild 9). So wird der mittlere Säulendurchmesser von 80 cm erreicht.

Die Modellierung erfolgt sowohl beim Eindringvorgang als auch bei der Säulenherstellung meterweise. Programmbedingt werden dabei jeweils zwei Schritte vorgenommen:

- Etappenweise Herstellung mit Eintragung der vorgegebenen Verschiebung zur Hohlräumeaufweitung als undrained Berechnung unter Berücksichtigung der Netz-anpassung,
- Konsolidation zur Berücksichtigung der notwendigen Zeit für die Aufweitung (je ca. 10 s/m beim Eindringen bis zur Endtiefe von 32 m (= 320 s \approx 5 min) und anschließend je ca. 3 min/m bei der Säulenherstellung (insgesamt \approx 100 min) bis zur vollständigen Herstellung der Säule.

4.2 Stoffgesetz und Materialparameter

Als Stoffgesetz wird für den Kippenmischboden, für das Säulenmaterial und für das Liegende das Stoffgesetz HS Small [19] verwendet, das im FE-Programm Plaxis 2D [20] implementiert ist. Die Materialparameter sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

4.3 Berechnungsergebnisse

In Bild 9 sind die Ergebnisse der Horizontalverformungen nach dem Eindringvorgang des Rüttlers nach 5 min und nach vollständiger Herstellung der Säule nach 105 min sowie in ausgewählten Zwischenphasen jeweils als Auszug aus dem gesamten FE-Netz dargestellt. Die Verformungen am Rand des Rüttlers wurden mit 20 cm beim Eindringvorgang bzw. mit 40 cm bei der Säulenherstellung vorgegeben. Horizontalverformungen sind beim Eindringvorgang bis 2 bzw. bei der Säulenherstellung bis 5 m neben der Achse der RSS erkennbar.

Tabelle 2. Materialparameter zur numerischen Simulation der RSV

Table 2. Material properties for the simulation of vibro replacement with stone columns

Bodenschicht	Kippenmischboden	Liegendes	Stopfsäule
Feuchtwichte ρ [g/cm ³]	18,0	20,0	21,0
Sättigungswichte ρ_{sat} [g/cm ³]	19,5	20,5	22,0
Porenzahl e [-]	0,72	0,58	0,50
Steifemodul bei Erstbelastung E_{50}^{ref} [MN/m ²]	10	50	50
Steifemodul bei Ent- und Wiederbelastung $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ [MN/m ²]	30	150	150
Referenzspannung p^{ref} [kN/m ²]	100	100	100
Exponent für Spannungsabhängigkeit m [-]	0,50	0,50	0,50
Querdehnzahl für Ent- und Wiederbelastung ν_{ur} [-]	0,30	0,30	0,30
Ruhedruckbeiwert K_0 [-]	0,50	0,50	0,50
Reibungswinkel ϕ' [°]	30	33	40
Kohäsion c' [kN/m ²]	1	1	1
Dilatanzwinkel ψ [°]	0	3	10
Referenzscherdehnung $\gamma_{0,7}$ [-]	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Schubmodul bei kleinen Dehnungen G_0^{ref} [MN/m ²]	95	180	150
Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s]	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$

Bild 10 zeigt die Tiefenlage des Rüttlers und den zugehörigen Porenwasserüberdruck Δu in 7 m Tiefe, in der auch die PWD-Geber installiert waren, jeweils in Abhängigkeit von der Zeit während des Eindringvorgangs und der Säulenherstellung.

Der größte Porenwasserüberdruck in 7 m Tiefe tritt beim Eindringvorgang nach ca. 1 min auf, wenn sich der Rüttler ebenfalls in 7 m unter Gelände befindet. In einem Abstand von 3 m von der Rüttelachse beträgt $\Delta u = 83$ kPa, was in etwa der effektiven Vertikalspannung in 7 m Tiefe bei 2 m Grundwasserflurabstand entspricht. Dadurch wird im Nahbereich der herzustellenden Säule (≤ 3 m) ein gewollter verflüssigungsähnlicher Zustand erreicht, wodurch sich der Boden umlagern und eine entsprechend höhere Dichte einnehmen kann. Mit zunehmendem Abstand von der Rüttelachse nimmt der Porenwasserüberdruck beim Eindringvorgang deutlich ab und beträgt z. B. im Abstand von $R = 10$ m nur noch ca. 7 kPa. Nach 5 min, wenn der Rüttler die Endtiefe erreicht hat, nimmt der Porenwasserüberdruck weiter ab und beträgt im Abstand von 3 m $\Delta u \approx 42$ kPa, im Abstand von 10 m $\Delta u \approx 4$ kPa und im Abstand von $R = 40$ m $\Delta u \approx 1$ kPa.

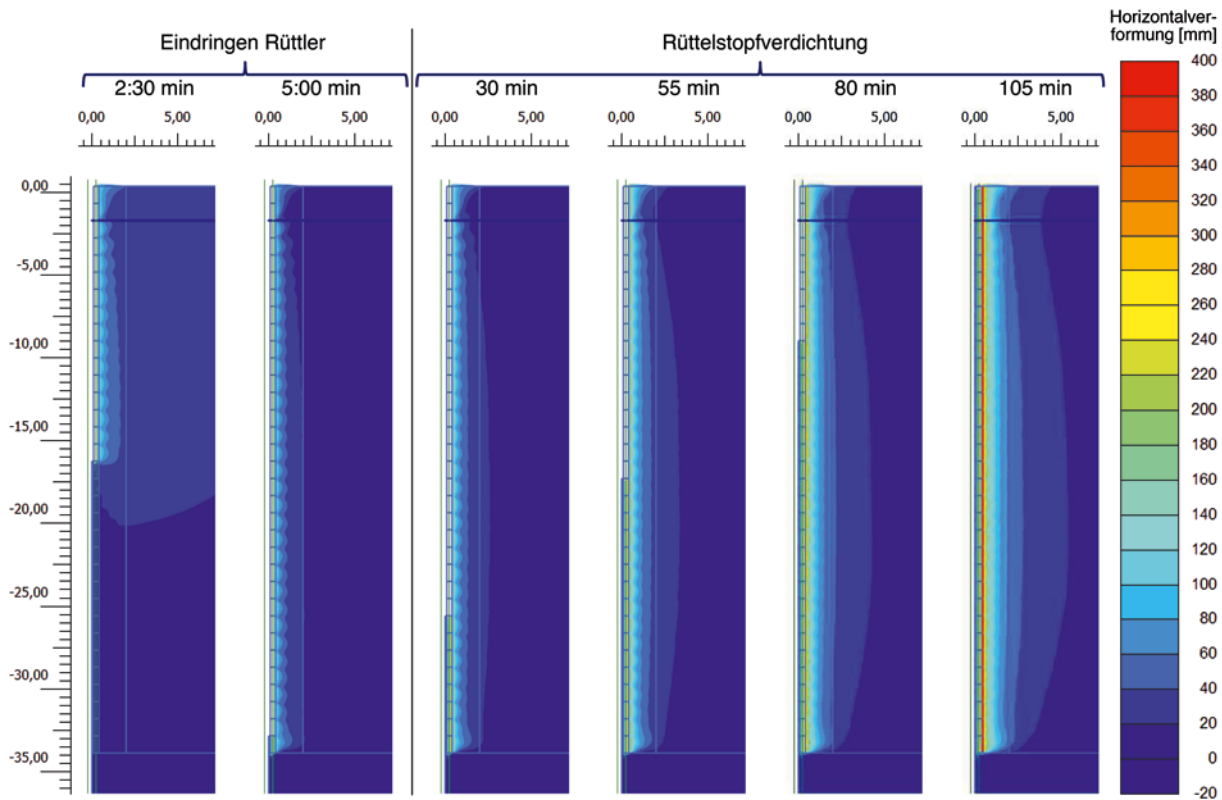


Bild 9. Simulation des phasenweisen Eindringens des Rüttlers und der RSV (jeweils meterweise) und Ergebnisse der Horizontalverformungen

Fig. 9. Simulation of the phased penetration of the vibrator and vibro replacement (in each case by meter) and the results of the horizontal displacements

Während der Säulenherstellung bzw. der Aufweitung des Säulendurchmessers auf 40 cm bei gleichzeitigem Einbringen des Säulenmaterials steigt der Porenwasserdruck allmählich an und beträgt im Abstand von 3 m $\Delta u \approx 60$ kPa und im Abstand von 10 m $\Delta u \approx 30$ kPa.

Bild 11 zeigt die Porenwasserüberdrücke Δu in 7 m Tiefe zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Säulenherstellung in Abhängigkeit von der Entfernung zur Achse

der RSS. Aufgrund der hohen Durchlässigkeit des Säulenmaterials ist am Säulenrand $\Delta u \approx 0$. Anschließend steigt Δu deutlich an und erreicht sein Maximum von $\Delta u \approx 60$ kPa im Abstand von $R \approx 2,5$ m unmittelbar nach Säulenherstellung.

Mit zunehmender Zeit nimmt der Porenwasserüberdruck ab, und das Peak verschiebt sich von der Achse der RSS weg. So beträgt nach 40 min das Maximum

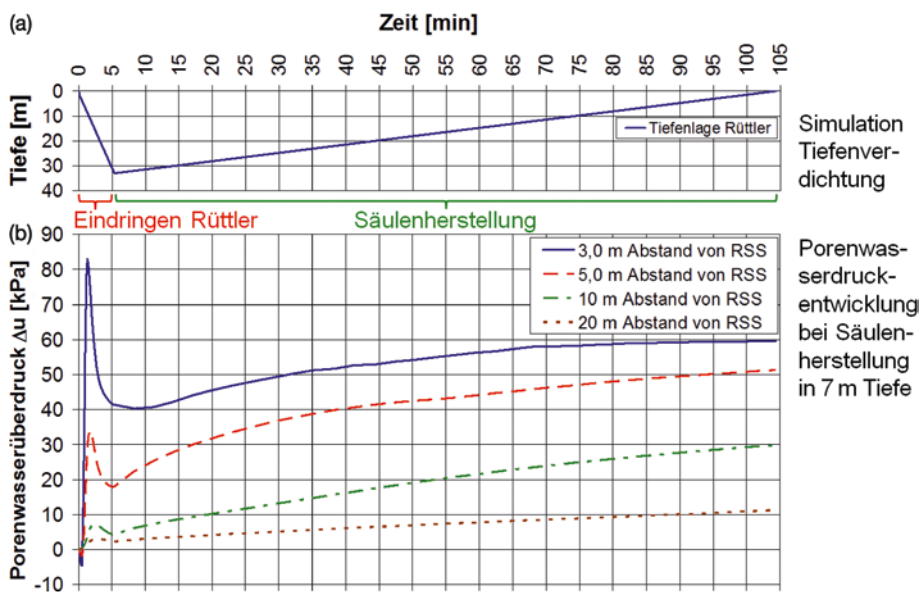


Bild 10. Simulation des Herstellungsprozesses einer RSS: Tiefenlage des Rüttlers (a); Porenwasserüberdruck in 7 m Tiefe (b)
 Fig. 10. Simulation of the vibro replacement for one stone column: depth of the vibrator (a); excess pore pressure in a depth of 7 m (b)

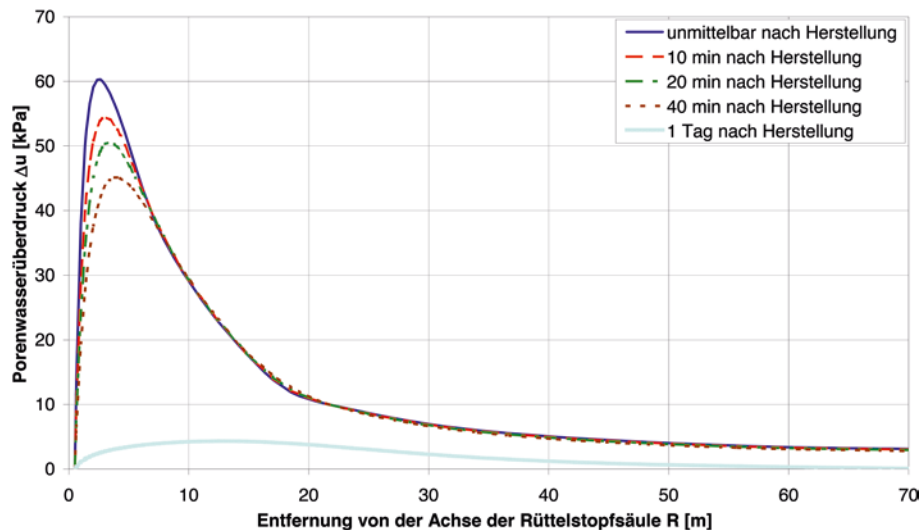


Bild 11. Porenwasserüberdruckentwicklung in 7 m Tiefe unter GOK nach Säulenherstellung
Fig. 11. Development of the excess pore pressure in a depth of 7 m after the vibro replacement

$\Delta u \approx 45$ kPa im Abstand von $R \approx 4$ m und nach einem Tag $\Delta u \approx 4,3$ kPa im Abstand von $R \approx 12$ m.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich einerseits eine 20- bis 40-minütige Unterbrechung der Verdichtungsarbeiten und andererseits eine versetzte Anordnung der Säulen reduzierend auf die PWD-Akkumulation auswirkt. Weiterhin kann auf Basis der Berechnungsergebnisse geschlossen werden, dass es durch die Herstellung mehrerer Säulen am Tag zu einer Akkumulation des PWD auch im Abstand von 20 bis 40 m kommt. Pro Tag wurden im Mittel etwa sieben Säulen hergestellt, so dass sich im Umfeld von 20 bis 60 m ein Porenwasserüberdruck von ca. 7 kPa akkumuliert. Das deckt sich qualitativ gut mit den Ergebnissen der PWD-Messungen (vgl. Bild 7).

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur dauerhaften Beseitigung der Gefahr des Setzungsfließens war für den über das Kippengebiet eines ehemaligen Tagebaus geführten Eisenbahnfahrweg eine Kippenstabilisierung unter Berücksichtigung des prognostizierten großräumigen Grundwasserwiederanstiegs notwendig. Dazu erfolgten Maßnahmen zur Tiefenverdichtung mittels RSV bzw. RDV der locker gelagerten Kippenmischböden SE/SU/SU*.

Es wurden entsprechende geotechnische Untersuchungen vor, während und nach den Tiefenverdichtungsarbeiten zur Untersuchung des Materialverhaltens der unverdichteten und verdichteten Kippenböden geführt. Auf Basis der Laborergebnisse, insbesondere der zyklischen Triaxialversuche und der Schwingungsmessungen, erfolgte eine numerische Simulation der Herstellung einer RSS.

Sowohl die Ergebnisse der PWD-Messungen als auch der numerischen Berechnungen zeigen einen deutlichen Anstieg des PWD infolge der RSV. Im Nahbereich der Säule (≤ 3 m) tritt während des Eindringvorgangs und der Säulenherstellung ein (gewollter) verflüssigungsähnlicher Zustand ein, wodurch sich der Boden umlagern und eine entsprechend höhere Dichte einnehmen kann. Durch die Herstellung mehrerer Säulen am Tag kommt es zu ei-

ner Akkumulation des PWD auch im Abstand von ca. 20 bis 60 m von der herzustellenden Säule. Eine versetzte Anordnung der Säulen und Ruhepausen bei den Verdichtungsarbeiten wirken sich reduzierend auf die PWD-Akkumulation aus.

Anhand der Mess- und Berechnungsergebnisse kann ein verifiziertes numerisches Berechnungsmodell für den Endzustand mit Zugverkehr aufgestellt und geotechnische Nachweise und Verformungsprognosen geführt werden. Kritische Zustände (PWD-Akkumulation und Abnahme der effektiven Spannungen und Scherfestigkeit) sind für den Endzustand mit Sicherheit auszuschließen.

Literatur

- [1] Wegener, D., Kipper, R., Hering, C., Scholz, E.: Messtechnische Begleitung der Kippenstabilisierung für den Ausbau einer Bahnstrecke. Tagungsband zum 7. Freiburger Geotechnik-Kolloquium, TU Bergakademie Freiberg, 2013.
- [2] LMBV mbH: Werminghoff/Knappenrode, Wandlungen und Perspektiven, Lausitzer Revier. H. 17, 2. Auflage 2015, https://www.lmbv.de/index.php/Wandlungen_Perspektiven_Lausitz.html.
- [3] Hering, C., Wegener, D.: Geotechnische Herausforderungen bei der Kippenstabilisierung für den Ausbau einer Bahnstrecke im Bereich des Bf Lohsa. Tagungs-CD mit den Vorträgen zur 11. Tiefbaufachtagung in Dresden, 2017.
- [4] Hering, C., Kipper, R., Wegener, D.: Untergrundertüchtigung für die Nutzung einer Bergbaukippe als Eisenbahnfahrweg. Eisenbahningenieurkalender 2016, S. 203–216.
- [5] Wegener, D., Hering, C.: Geotechnische Herausforderungen bei der Kippenstabilisierung für den Ausbau einer Bahnstrecke. Tagungsband der Vorträge zur 34. Baugrundtagung in Bielefeld, 2016, S. 233–240.
- [6] G.U.B. Ingenieur AG: Kippenstabilisierung im Bereich des Bahnhofes Lohsa, DB Strecke 6207, km 59,685 bis km 61,5+700; Genehmigungsplanung, Standsicherheitseinschätzung, 2008.
- [7] G.U.B. Ingenieur AG: Kippenstabilisierung im Bereich des Bahnhofes Lohsa, Teil 1 Ostböschung Silbersee, Geotechnischen Ausführungsplanung, 2010.
- [8] G.U.B. Ingenieur AG: Geotechnische Stellungnahme zur Weiterführung der Verdichtungsarbeiten an der Ostböschung Silbersee, 2011.

- [9] *Raju, V. R.*: Spontane Verflüssigung lockerer granularer Körper-Phänomene, Ursachen, Vermeidung. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, 1994, H. 134.
- [10] *Pretzlaff, H., Sommer, K.*: Die geotechnische Sicherung einer DB-Trasse im Bereich der Tagebaukippe am Bahnhof Lohsa. Tagungsband der Vorträge zur 13. Erdbaufachtagung in Leipzig, 2017, S. 132–142.
- [11] HTW Dresden: Labor-Bericht, Prüfergebnisse Knappenrode-Horka, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, 2013.
- [12] *Förster, W., Gudehus, G. et al.*: Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen. LMBV mbH, IFGT TU Freiberg, IBF Universität Karlsruhe, 1998.
- [13] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT): Empfehlungen des Arbeitskreises Baugrunddynamik, 2002.
- [14] FCB GmbH: Porenwasserdruckmessungen, baubegleitend zu den Tiefenverdichtungsarbeiten, Ostböschung Silbersee und Innenkippe Lohsa von 2012–2014.
- [15] Geophysik und Geotechnik Leipzig (GGL) GmbH: Ergebnisbericht Schwingungsmessungen und Seismische Refraktionstomographie, Kippenstabilisierung Bf. Lohsa, 2012.
- [16] Keller Grundbau GmbH: Tagesprotokolle vom 12.11.2012–17.11.2012 (46. KW), 2012.
- [17] *Weber, T.*: Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen. Dissertation ETH Zürich, 2007.
- [18] *Carter, J. P., Randolph, M. F., Wroth, C. P.*: Stress and pore pressure changes in clay during and after the expansion of a cylindrical cavity. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 3 (1979), No. 4, pp. 305–322.
- [19] *Benz, T.*: Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences. Dissertation Universität Stuttgart, 2007.
- [20] *PLAXIS 2D*: Reference Manual, Plaxis bv. The Netherlands, 2012, www.plaxis.nl.

Autoren

Dr.-Ing. Dirk Wegener
 GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH
 Caspar-David-Friedrich-Straße 8
 01219 Dresden
dirk.wegener@gepro-dresden.de

Dipl.-Ing. (FH) Christian Hering
 DB Netz AG, Regionalbereich Südost
 Ammonstraße 8
 01069 Dresden
Christian.Hering@deutschebahn.com

Eingereicht zur Begutachtung: 20. Oktober 2017

Überarbeitet: 14. Januar 2018

Angenommen zur Publikation: 15. Januar 2018



Ingenieurgesellschaft für Geotechnik, Verkehrs- und Tiefbau und Umweltschutz mbH

www.gepro-dresden.de

Caspar-David-Friedrich-Straße 8

01219 Dresden

Telefon: (0351) 8 777 5-0

Telefax: (0351) 8 777 5-55

info@gepro-dresden.de