

# MESSTECHNISCHE BEGLEITUNG EINER KIPPENSTABILISIERUNG FÜR DEN AUSBAU EINER BAHNSTRECKE

D. WEGENER<sup>1)</sup>, R. KIPPER<sup>1)</sup>, C. HERING<sup>2)</sup>, E. SCHOLZ<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Caspar-David-Friedrich-Str. 8, 01219 Dresden

<sup>2)</sup> DB ProjektBau GmbH, Knappenrode-Horka, Ammonstraße 8, 01069 Dresden

<sup>3)</sup> LMBV GmbH, Sanierungsbereich Lausitz, Knappenstraße 1, 01968 Senftenberg

T: +49 351 8777 50, F: +49 351 8777 555, E: dirk.wegener@gepro-dresden.de

## Kurzfassung

Die Bahnstrecke 6207 (Weglinie -) Grenze D/PL -Horka - Roßlau als Bestandteil des paneuropäischen Schienenverkehrskorridors C-E 30 führt im Bereich der Ortschaft Lohsa über das Kippengebiet eines ehemaligen Tagebaues. Der inhomogene Aufbau der Kippen im Nahbereich des Speicherbeckens Lohsa aus Kippenmischböden SU/SU\* in lockerer bis mitteldichter Lagerung und der Grundwasseranstieg machen eine Kippenstabilisierung zur Beseitigung der Gefahr des Setzungsfließens nötig.

In vorliegendem Beitrag wird insbesondere auf die messtechnische Begleitung der Baumaßnahme sowie Ergebnisse von Schwingungs- und Porenwasserdruckmessungen während der Rüttelstopfverdichtung eingegangen und es werden Ergebnisse undrainierter zyklischer Triaxialversuche am verbesserten und unverbesserten Kippenmaterial zur Charakterisierung des Bodenverhaltens vorgestellt.

## 1. Projektübersicht

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

In einer Entfernung von 40 m bis 50 m parallel zur Ostböschung des Wasserspeichers Lohsa I verlaufen die Gleisanlagen der Bahnstrecke 6207 im Bereich des Bahnhofes Lohsa. Zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebes wurde die Geschwindigkeit im betroffenen Streckenabschnitt bereits von 100 km/h auf eine Geschwindigkeit von 30 km/h aus geotechnischer Sicht beschränkt. Durch den prognostizierten Grundwasserendstand besteht akuter Handlungsbedarf zur Herstellung der Standsicherheit dieser Böschungen und des gesamten Untergrundes (Bahnkörper). Eine Sanierung der Ostböschung des Silbersees mit den darauf befindlichen Gleisanlagen der Bahnstrecke 6207 ist durch die Herstellung eines versteckten Dammes – Verdichtung des locker gelagerten Materials - möglich.

Mit einer Untergrundverdichtung in diesem Kippenbereich sowie des Bereiches der Innenkippe wird dauerhaft die öffentliche Sicherheit hergestellt.

Der LMBV wurde durch den Freistaat Sachsen und durch das Bundesministerium der Finanzen die Projektträgerschaft für die Maßnahmen zur Gefahrenabwehr übertragen.

Finanziert über das Verwaltungsabkommen Braunkohlesanierung und einer Beteiligung der DB Netz AG (vertreten durch die DB ProjektBau GmbH) erfolgt eine nachhaltige Sicherung des Gefährdungsbereiches.



Abbildung 1: Übersicht über das Projekt (Ostböschung, Innenkippe)

## 2. Problemstellung und geotechnisches Konzept

Zur Gewährleistung eines sicheren Eisenbahnbetriebes und zur Beseitigung der Setzungsfließgefahr über dem Kippengebiet eines ehemaligen Tagebaues wurde eine Kippenstabilisierung [1] geplant, die im Wesentlichen aus einem insgesamt 65 m breiten, mittels Rüttelstopfverdichtung (RSV) hergestellten versteckten Damm besteht. Trotz geotechnischer Vorgaben entsprechend der Ausführungsplanung [2] mit einem Mindestgrundwasserflurabstand von 4,0 m sowie baubegleitender Messungen des Porenwasserdrucks (PWD) kam es am 24.06.2011 zu einem Setzungsfließen an der Ostböschung des Silbersees, ausgelöst durch die Tiefenverdichtungsarbeiten im Bereich der verflüssigungsempfindlichen Kippen.

In Auswertung dieses Schadensereignisses wurden für die weitere Bauausführung sicherheitsverbessernde Maßnahmen nach [3] vorgesehen und entsprechend umgesetzt. Das beinhaltet zum Einen die Herstellung des 65 m breiten versteckten Dammes in 3 Phasen:

- 1) einem 39 m breiten, mittels RSV herzustellenden Hauptdamm mit entsprechend breitem Vorland zur Uferböschung,
- 2) einem nachlaufenden 11 m breiten, ebenfalls mittels RSV herzustellenden Streifen und
- 3) einem 15 m breiten nur noch mittels Rütteldruckverdichtung herzustellenden Restbereiches.

Zum Anderen wurde die sogenannte Sicherheitsfahrweise eingeführt, bei der die Rüttelstopfsäulen in einer versetzten Abfolge hergestellt und nach Säulenherstellung Ruhepausen mit einer tiefenabhängigen Dauer von 20 bis 40 min zur Vermeidung konzentrierter PWD-Anstiege eingehalten werden. Außerdem erfolgte eine PWD-gesteuerte RSV, bei der es bei Erreichen festgelegter Grenzwerte für den Gerätefahrer eine Signalisierung mittels Ampelschaltung erfolgt, wonach die Verdichtungsarbeiten sofort unterbrochen werden. Diese Maßnahmen dienen der Erhöhung der Sicherheit, können aber eine Rutschungsauslösung aufgrund der gezielt eingetragenen Initiale nicht durchgängig verhindern.

Am 08.03.2012 kam zu einem weiteren, durch die RSV ausgelösten Setzungsfließen an der Ostböschung des Silbersees. Seitdem sind noch mehrere, in ihrem Umfang kleinere lokale Geländeabsackungen im überwiegend unverdichteten Bereich der Kippe eingetreten.

Für die Dimensionierung des Stützkörpers im Zuge der Genehmigungsplanung [1] erfolgten die bodenmechanischen Berechnungen auf der Basis der Sächsischen Bergverordnung [4]. Als kritischer Lastfall wurde ein auf der sicheren Seite liegender Ansatz der Restscherfestigkeit für eine angenommene Verflüssigung sowohl vor dem Stützkörper als auch im Hinterland des Stützkörpers angesetzt.

Die bei geotechnischen Nachweisen anzuwendende Normen für den Bahnverkehr ist in der ELTB [5] geregelt. Demnach sind für die Nachweise der Gesamtstandsicherheit entsprechend dem Nachweisverfahren GEO-3 der DIN 1054:2010-12 [6] zu führen. Dabei ist zu beachten, dass locker gelagerte, wassergesättigte Kippenböden schon bei geringer Störung flüssig werden können und daher nicht ausreichend duktil sind, siehe auch [7].

Durch die dynamische Anregung aus dem späteren Zugverkehr kommt es zu einem Anstieg des PWD, der sich infolge mehrerer Achsübergänge entsprechend akkumulieren kann. In der Folge dieses Anstieges nehmen die effektiven Spannungen im Boden ab und die Scherfestigkeit wird reduziert. Es muss durch entsprechende Untersuchungen abgesichert werden, dass eine die Gesamtstandsicherheit gefährdende Reduzierung der effektiven Spannungen bzw. der Scherfestigkeit mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann. Für eine Beurteilung dieses Verhaltens ist die Ermittlung der bodendynamischen Kennwerte der Bodenschichten im verbesserten und unverbesserten Bereich sowie zur Größe und Ausbreitung der Erschütterungen erforderlich. Die Messungen zum PWD sowie zum Eintrag und zur Ausbreitung der Schwingungen geben die Möglichkeit, Rückschlüsse zu den dynamischen Bodeneigenschaften und zum vorhandenen sowie zum kritischen Spannungszustand zu ziehen sowie Grenzwertbetrachtungen vorzunehmen. Es wurden deshalb entsprechende Labor- und Feldversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in den folgenden Abschnitten 3 und 4 zusammengestellt sind.

### **3. Durchführung und Ergebnisse der Laborversuche**

Es wurden ungestörte Bodenproben aus Schürfgruben sowohl aus dem unverbesserten Bereich als auch aus dem mit Rüttelstopfsäulen verbesserten Bereich (zwischen den Säulen) entnommen und an diesem Probenmaterial zyklische Triaxialversuche sowie Dichte- und

Wassergehaltbestimmungen durchgeführt [8]. Die Ergebnisse der sowie Dichte- und Wassergehaltbestimmungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Bezeichnung	Formelz./ Einheit	unverbessertes Bereich		verb. Bereich gemittelt <sup>1)</sup>	Bereich mit RSS	
		(1)	(2)		(1)	(2)
Bodenklasse		SU*/ST*	SU*/ST*	SU*/ST*	SE	SE
Dichte	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,77	1,78	1,92	2,10	2,09
Wassergehalt	w [%]	14,5	17,1	14,4	15,0	15,2
Trockendichte	$\rho_d$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,55	1,52	1,68	1,82	1,82
Sättigungsdichte	$\rho_{sat}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,96	1,94	2,04	2,13	2,13
Feststoffdichte	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,63	2,63	2,63	2,64	2,64
Porenzahl	e [-]	0,71	0,74	0,58	0,45	0,46
Sättigungsgrad	$S_R$ [%]	54	61	66	88	88
min. Porenzahl	$e_{min}$ [-]	0,40		0,40	0,42	
max. Porenzahl	$e_{max}$ [-]	0,81		0,81	0,83	
bez.Lagerungsd.	$I_D$ [-]	0,25	0,18	0,58	0,93	0,91
Lagerungsdichte	(verbal)	locker	locker	mitteldicht	sehr dicht	sehr dicht

<sup>1)</sup> berechnet aus dem Mittelwert der beiden Proben im unverbesserten Bereich unter Berücksichtigung einer Dichtezunahme von 0,11 g/cm<sup>3</sup> durch das eingebrachte Säulenmaterial von 1,0 t/lfm Säule bei einem Säulenraster von 3,0 x 3,0 m und von 0,03 g/cm<sup>3</sup> durch die Geländeabsenkung um 1,0 m durch die Verdichtungsarbeiten

Tabelle 1: Ergebnisse der Dichte- und Wassergehaltbestimmungen für die Bodenproben im unverbesserten Bereich sowie im Bereich mit bereits hergestellten Rüttelstopfsäulen.

Tabelle 1 zeigt, dass die aus dem unverbesserten Bereich entnommenen Bodenproben der Bodenklasse SU\*/ST\* eine lockere Lagerung aufweisen. Durch das eingebrachte Säulenmaterial von im Mittel 1,0 t/lfm Säule erhöht sich unter Berücksichtigung des Säulenrasters von 3,0 x 3,0 m die Trockendichte  $\rho_d$  um im Mittel 0,11 g/cm<sup>3</sup>. Weiterhin gibt es eine Zunahme der Dichte aufgrund der zusätzlichen Geländeabsenkung um ca. 1,0 m bei ca. 33 m Säulenlänge von im Mittel 0,03 g/cm<sup>3</sup>. Es liegt dann im Mittel eine mitteldichte Lagerung vor, siehe Spalte „verb. Bereich gemittelt“ in Tabelle 1.

Tatsächlich wurde an den Bodenproben im verbesserten Bereich der Rüttelstopfsäulen eine noch höhere Dichte von 2,1 g/cm<sup>3</sup> ermittelt, die einer sehr dichten Lagerungsdichte entspricht. Ursache hierfür ist zum einen 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. Zum anderen wird die Massenzugabe im oberen Bereich der Säule oberhalb des Grundwasserspiegels tendenziell größer sein als im tieferen Bereich mit entsprechend größeren Horizontalspannungen aus Erd- und Wasserdruck.

Verflüssigung bzw. verflüssigungsähnliche Zustände entstehen bei weitgehend wassergesättigten, locker gelagerten Sanden, die sich infolge Scherung kontraktant verhalten [9]. Zur versuchstechnischen Modellierung dieses Verhaltens sowie zur Untersuchung des Bodenverhal-

tens infolge zyklischer Belastung wurden an der HTW Dresden undrainierte zyklische Triaxialversuche durchgeführt [8]. Abbildung 2 zeigt wesentliche Ergebnisse dieser Versuche.

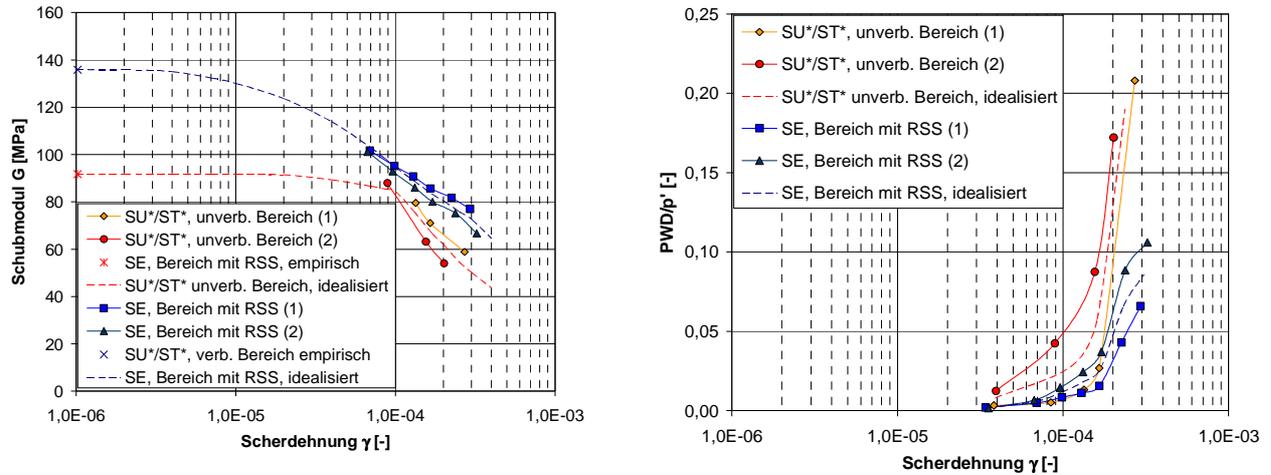


Abbildung 2: links: Schubmodul  $G$  und rechts: auf die mittlere effektive Spannung  $p'$  normierter Porenwasserdruck  $PWD$  jeweils in Abhängigkeit von der Scherdehnungsamplitude  $\gamma$  im Ergebnis zyklischer Triaxialversuche nach jeweils 1000 Zyklen / Laststufe [8].

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 entsprechend der Beziehung (1) ermittelt.

$$G_0 \approx 323 \frac{(2,97-e)^2}{1+e} \cdot p_a \cdot \sqrt{p'/p_a} \quad \text{mit } p_a = 100 \text{ kPa} \quad (1)$$

Mit der mittleren effektiven Spannung  $p' = \sigma'_3 \approx 95 \text{ kPa}$  und den Porenzahlen nach Tabelle 1 ergeben sich die bei  $\gamma = 1 \cdot 10^{-6}$  eingetragenen Grundwerte des Schubmoduls  $G_0$ . Aus den Ergebnissen für den verbesserten und unverbesserten Bereich wurden die entsprechenden Kurvenverläufe idealisiert und sind ebenfalls in Abbildung 2 dargestellt.

Die Bodenproben im unverbesserten Bereich zeigen erwartungsgemäß eine geringere scher-  
dehnungsabhängige Steifigkeit  $G(\gamma)$  und einen größeren Anstieg des Porenwasserdruckes mit  
zunehmender Scherdehnung gegenüber den Bodenproben im Bereich mit Rüttelstopfsäulen.

Auf Basis dieser Versuchsergebnisse können die Materialparameter für das hypoplastische  
Stoffgesetz entsprechend [10] bestimmt werden, mit denen die Porenwasserdruckakkumulati-  
on infolge dynamischer Belastung ermittelt werden kann.

#### 4. Durchführung und Ergebnisse der Feldversuche

Zur messtechnischen Kontrolle werden begleitend zur Herstellung der Rüttelstopfverdichtung  
permanent Messungen des Porenwasserdruckes (PWD) durchgeführt [13]. Zur Beurteilung des  
bodendynamischen Verhaltens und der Abnahme der Erschütterungen in unterschiedlichen  
Abständen zum Rüttler sowohl im verbesserten als auch im unverbesserten Bereich der Kip-  
penböden wurden außerdem an 2 Messtagen Schwingungsmessungen ausgeführt [11].

Die Anordnung der PWD-Geber und Geophone sowie die bereits hergestellten Rüttelstopfsäulen zum Zeitpunkt der Schwingungsmessung sind in Abbildung 3 links dargestellt.

Abbildung 3 rechts zeigt auf Basis der ausgewerteten Schwingungsmessungen, dass mit zunehmendem Abstand vom Erschütterungseintrag die Schwinggeschwindigkeit abnimmt. Dabei sind bei gleichem Abstand die Schwinggeschwindigkeiten größer, wenn sich der direkte Ausbreitungsweg vollständig im noch unverbesserten Bereich der Kippe befindet.

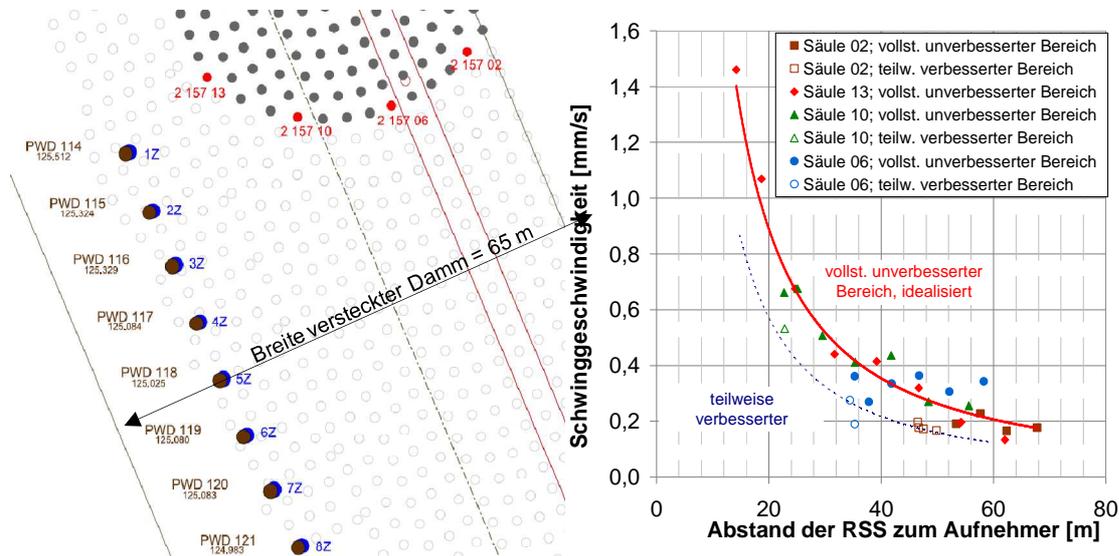


Abbildung 3: links: Lageplan mit Eintragung der PWD-Geber, Geophone und bereits hergestellten Rüttelstopfsäulen zum Zeitpunkt der Schwingungsmessung, rechts: Abnahme der Schwinggeschwindigkeiten mit zunehmendem Abstand von der Erschütterungsanregung.

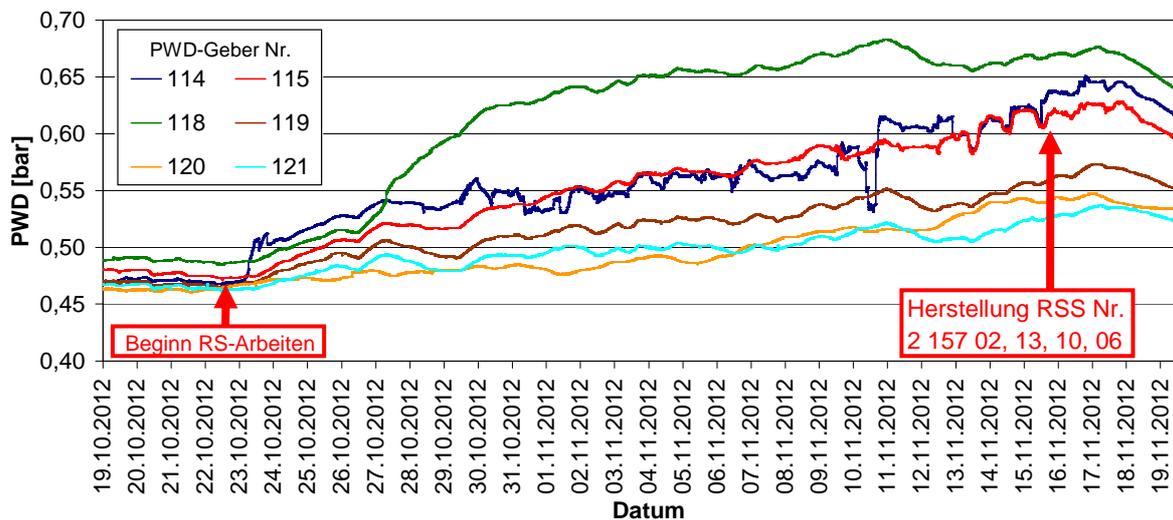


Abbildung 4: Porenwasserdruckentwicklung im Zeitraum der Schwingungsmessungen.

In Abbildung 4 ist die PWD-Entwicklung während der Herstellung der Rüttelstopfsäulen im Zeitraum der Schwingungsmessungen dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass es seit dem Wiederbeginn der Rüttelstopfarbeiten am 22.10.2012 nach ca. 1 wöchiger Pause, in der auch der Einbau der PWD-Geber erfolgte, zu einem kontinuierlichen Anstieg des PWD kam. Erkenn-

bar ist außerdem der Abbau des PWD in den nächtlichen Ruhephasen und an Sonntagen (z. B. am 11.11.2012 und am Wochenende 17.-18.11.2012) entsprechend den Tagesprotokollen [12]. Die drei PWD-Geber Nr. 114, 115 und 118, die sich näher an der Erschütterungseintragung durch die Säulenherstellung befinden, zeigen einen größeren PWD-Anstieg gegenüber den 3 entfernteren PWD-Gebern Nr. 119, 120 und 121.

Insgesamt beträgt der PWD-Anstieg ca. 0,10 - 0,20 bar bzw. 10 - 20 kPa. Das entspricht für die jeweils der in ca. 7 m Tiefe angeordneten Geber einer effektiven Vertikalspannung von  $\sigma'_v \approx 85$  kPa bzw. einer mittleren effektiven Spannung  $p' \approx 56$  kPa einen auf die jeweiligen Spannungen normierten Porenwasserdruck  $\text{PWD}/\sigma'_v \approx 0,12 - 0,24$  bzw.  $\text{PWD}/p' \approx 0,18 - 0,36$ . Der in [4] festgelegte Grenzwert von  $0,3 \cdot \sigma'_v$ , im konkreten Fall ca. 25 kPa, wurde nicht erreicht, sodass die RSV ohne zusätzliche Zwangspausen außer der 40 minütigen Ruhepause nach der jeweiligen Säulenherstellung entsprechend der Sicherheitsfahrweise erfolgen konnte.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Für eine über das Kippengebiet eines ehemaligen Tagebaues geführten Bahnstrecke müssen kritische Zustände aufgrund der dynamischen Anregung durch den Zugverkehr mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Für die dazu notwendigen Untersuchungen wurden die bodendynamischen Eigenschaften anhand von undrainierten zyklischen Triaxialversuchen und weiteren Laborversuchen bestimmt sowie Schwingungsmessungen und Porenwasserdruckmessungen während der dynamischen Anregung bei der Herstellung von Rüttelstopfsäulen durchgeführt. Wesentliche Auswertungen und Ergebnisse sind in diesem Artikel zusammengestellt.

Im Weiteren ist vorgesehen, auf Basis der Laborergebnisse die Materialparameter für das hypoplastische Stoffgesetz entsprechend [10] zu bestimmen, mit denen die Porenwasserdruckakkumulation infolge dynamischer Belastung ermittelt werden kann. Anhand der Ergebnisse der Schwingungs- und PWD-Messungen kann ein numerisches Berechnungsmodell aufgestellt und verifiziert werden.

Auf Basis des verifizierten Berechnungsmodells sind entsprechende Prognoseberechnungen infolge der dynamischen Anregung durch den künftigen Zugverkehr vorgesehen. Damit soll abgesichert werden, dass eine die Gesamtstandsicherheit gefährdende Reduzierung der effektiven Spannungen bzw. der Scherfestigkeit mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

## Literatur

[1] G.U.B. Ingenieur AG: Kippenstabilisierung im Bereich des Bahnhofes Lohsa, DB Strecke 6207, km 59,685 bis km 61,5+700, Genehmigungsplanung; Standsicherheitseinschätzung, Zwickau, 26.06.2010.

[2] G.U.B. Ingenieur AG: Kippenstabilisierung im Bereich des Bahnhofes Lohsa, Teil 1 Ostböschung Silbersee, Geotechnischen Ausführungsplanung, Zwickau, 31.08.2010.

[3] G.U.B. Ingenieur AG: Geotechnische Stellungnahme zur Weiterführung der Verdichtungsarbeiten an der Ostböschung Silbersee, Zwickau, 21.09.2011.

[4] Sächsisches Oberbergamt: Sächsische Bergbauverordnung, vom 16.07.2009.

- [5] Eisenbahn-Bundesamt: Eisenbahnspezifische Liste technischer Baubestimmungen (ELTB) Fassung Februar 2013, gültig ab 01.05.2013.
- [6] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1054:2010-12; Baugrund - Standsicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2010.
- [7] Gudehus, G.: Eingeschränkt duktile Geotechnische Tragsysteme, Baugrundtagung Bremen, 2006.
- [8] Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden: Labor-Bericht, Prüfergebnisse Projekt: Knappenrode-Horka, Dresden, 01/2013.
- [9]: Förster, W., Gudehus, G. et. al.: Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen; LMBV mbH, IFGT TU Freiberg, IBF TH Karlsruhe, 1998.
- [10] Wegener, D.: Ermittlung bleibender Bodenverformungen infolge dynamischer Belastung mittels numerischer Verfahren; Dissertation, TU Dresden, 2013.
- [11] GGL GmbH: Ergebnisbericht Kippenstabilisierung Bf. Lohsa Schwingungsmessungen und Seismische Refraktionstomographie; Leipzig, 12/2012.
- [12] ARGE INNENKIPPE LOHSA: Tagesprotokolle vom 12.11.2012 - 17.11.2012 (46. KW), Keller Grundbau GmbH; Leipzig, 11/2012.
- [13] FCB GmbH: Porenwasserdruckmessungen vom 12.11.2012 - 17.11.2012 (46. KW); Espenhain, 11/2012.