

Praxisbeispiele zum Tragverhalten von pfahlartigen Traggliedern und Bodenverbesserungen

Wegener, Dirk

GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Caspar-David-Friedrich-Straße 8, 01219 Dresden, dirk.wegener@gepro-dresden.de

Weisemann, Ulrike

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, weisemann@htw-dresden.de

Kipper, René

GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, Caspar-David-Friedrich-Straße 8, 01219 Dresden, rene.kipper@gepro-dresden.de

Für eine Bahnstrecke auf sehr weichem, organischen Untergrund erfolgte die Planung und Ausführung von Untergrundverbesserungen mit geokunststoffbewehrtem Bodenkörper auf Fertigmörtelstopfsäulen (als pfahlartige Tragglieder) und Rüttelstopfsäulen (als Bodenverbesserung).

Die Messergebnisse für die Bodenverbesserung zeigten eine gleichmäßige Setzung von Boden und Rüttelstopfsäulen, die mit der Zeit abklingen und in einer Schotteroberbau üblichen Größenordnung liegen. Die Spannungskonzentration auf den Säulen infolge Bodeneigengewicht entspricht den Erfahrungen aus der Literatur. Die Spannungskonzentration auf den Säulen infolge Verkehrsbelastung ist hingegen aufgrund der dynamischen Lastabtragung durch Wellenausbreitung deutlich größer. Dadurch wird die Weichschicht entlastet, was sich günstig auf das dynamische Verhalten des Gesamtsystems aus Rüttelstopfsäulen und umgebenden Boden auswirkt.

Die Messergebnisse für den geokunststoffbewehrten Bodenkörper auf Fertigmörtelstopfsäulen zeigten keine signifikanten Verformungen infolge zweijährigem Zugverkehr. Mit den Bodendruckspannungsmessungen auf und zwischen den Säulen konnte gezeigt werden, dass die in den Nachweisen zugrunde gelegten Berechnungsannahmen zutreffend sind bzw. auf der sicheren Seite liegen.

For a railway line on a very soft, organic ground it was planning and execution underground improvements carried out with geogrid reinforced embankment on vibro concrete columns (as column foundations) and vibro stone columns (as a soil improvement).

The measurement results for the soil improvement show a uniform settlement of soil and Vibro Stone Columns. The displacement velocity decreases with time and are in a usual order for a track ballast system. The stress concentration on the column due to the self weight of the soil corresponds to the experiences in the literature. The stress concentration on the column due to traffic load, however, is significantly larger because of the wave propagation due to dynamic loading. Thus, the soft layer is unloaded, which has a positive effect on the dynamic behavior of the whole foundation consisting of Vibro Stone Columns and surrounding soil.

The measurement results for the geogrid reinforced embankment on vibro concrete columns shows no significant displacements due to traffic load over a period of two years. The measurement results of soil compressive stress on and between the columns could be shown that the assumptions in the safety and in the calculations are accurate or provides conservative results.

1 Einleitung

Zum Ausbau der Eisenbahnstrecke 6328 Angermünde - Rosow (DB-Grenze) als Teilstück der Städteverbindung Berlin und Stettin wurde im Streckenabschnitt Casekow - Tantow eine umfassende Ober- und Unterbauerneuerung erforderlich. Der eingleisige Streckenabschnitt Casekow – Tantow auf ehemals zweigleisig ausgebautem Bahnkörper führt über 6 ausgedehnte Niedermoorbereiche und befand sich in einem sanierungsbedürftigen Zustand mit hohem Instandhaltungsaufwand und bereits eingerichteten Langsamfahrstellen.

Eine erste Untersuchungsstufe führte zu dem Ergebnis, dass innerhalb des Streckenabschnittes Casekow - Tantow auf einer Gesamtlänge von 3.690 m tief reichende Untergrundertüchtigungen mittels Bodenaustauschverfahren erforderlich sind. Das hätte, insbesondere aufgrund des hohen Grundwasserstandes und der eingeschränkten Zuwegungen in den Niedermoorbereichen, einen erheblichen zeitlichen und finanziellen Aufwand zur Folge gehabt.

Durch genaue Untersuchung jedes Moorabschnittes hinsichtlich Standsicherheit, dynamischer Stabilität bzw. Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung unterschiedlicher gleisnaher und tiefreichender Untergrundertüchtigungen konnten der Ertüchtigungsumfang reduziert sowie differenzierte, auf die jeweiligen Mooruntergründe abgestimmte Ertüchtigungsmethoden herausgearbeitet, geplant und realisiert werden. Über die verschiedenen Ertüchtigungslösungen wurde in (Wegener et al. 2008) berichtet.

Im vorliegenden Beitrag wird auf die beiden folgenden Ertüchtigungslösungen eingegangen:

- mechanische und hydraulische Bodenverbesserung mit Rüttelstopfsäulen und
- Bewehrte Bodenkörper auf pfahlartigen Traggliedern mit Fertigmörtelstopfsäulen.

2 Tragverhalten und erforderliche Nachweise

2.1 Tragverhalten von Bodenverbesserungen mit Rüttelstopfsäulen

Rüttelstopfsäulen sind im Sinne der Ril 836.4202 (DB Netz AG 2013) als mechanische und hydraulische Verbesserungsmaßnahmen einzuordnen. Die steiferen eingebrachten Stopfsäulen aus grobkörnigen Zugabematerial stellen zwar steifere Elemente bei der Lastabtragung dar, sie sind aber auf die Stützung des umgebenden Bodens angewiesen (Priebe 2003). Ziel von Bodenverbesserungen ist ein homogener Lastabtrag unter Heranziehung des verbesserten Bodens mit flächiger Lasteinleitung und damit einer gleichmäßigen Setzung von Boden und Gründungselementen (Boley and Höppner 2015). Durch die hohe Durchlässigkeit der Säulen wird außerdem ein schneller Abbau des Porenwasserdrucks bei gering durchlässigem Untergrund erzielt und damit die zu erwartenden Setzungen beschleunigt. Rechnerisch kann die Verbesserungswirkung durch das Verfahren von (Priebe 1995) sowie bei extrem weichen Böden ergänzend nach (Priebe 2003) unter Berücksichtigung des Flächenverhältnisses von Rüttelstopfsäulen zum Säulenraster sowie den Steifigkeiten des Säulenmaterials und des unverbesserten Bodens erfasst werden.

Nach dem Modell von (Priebe 1995) ist die Spannung unmittelbar oberhalb der durch Rüttelstopfsäulen verbesserten Schicht konstant, d. h. eine lastverteilende Schicht oberhalb der Rüttelstopfsäulen ist theoretisch nicht erforderlich. Innerhalb der verbesserten Schicht sind hingegen die Spannungen im Bereich der Rüttelstopfsäulen im Vergleich zu den zwischen den Rüttelstopfsäulen auftretenden Spannungen deutlich höher.

Für diese Ertüchtigungslösung sind folgende Nachweise unter Berücksichtigung der Erhöhung der Scherfestigkeit des durch die Rüttelstopfsäulen verbesserten Bodens erforderlich:

- Tragfähigkeit (ULS) der Gesamtstandsicherheit (GEO-3) nach (EC 7-1 2011),
- Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (SLS) nach (EC 7-1 2011) und
- im Eisenbahnbau: Nachweis oder Untersuchung der dynamischen Stabilität des Unterbaus/ Untergrundes nach Ril 836.3001 Abs. 5 (DB Netz AG 2013).

2.2 Bewehrte Bodenkörper auf pfahlartigen Traggliedern

Die vertikalen Spannungen aus Eigengewicht und Verkehrslast werden konzentriert über die im Vergleich zum Boden um ein Vielfaches steiferen pfahlartigen Tragglieder in den tragfähigen Untergrund geleitet. Dabei wird die Weichschicht bzw. der Boden zwischen den pfahlartigen Traggliedern wesentlich entlastet. Zwischen Boden und Gründungselementen bestehen planmäßige Setzungsdifferenzen (Boley and Höppner 2015). Eine Übersicht über Verfahren zur Herstellung pfahlartiger Tragglieder enthält (Borchert et al. 2005).

Zur Lastverteilung und Einleitung der Kräfte in die pfahlartigen Tragglieder ist eine statisch bemessene und konstruktiv dauerhaft ausgebildete Tragkonstruktion als geokunststoffbewehrter Bodenkörper oder alternativ als Stahlbetonplatte erforderlich (DB Netz AG 2013).

Für diese Ertüchtigungslösung sind neben den auch für die Rüttelstopfsäulen zu führenden Nachweise bzw. Untersuchungen zur Tragfähigkeit der Gesamtstandsicherheit (GEO-3), der Gebrauchstauglichkeit (SLS) und der dynamischen Stabilität im Eisenbahnbau folgende Nachweise erforderlich:

- Geländebruchsicherheit des Gesamtsystems (GEO-3) nach (EC 7-1 2011) unter Berücksichtigung der Scherfestigkeit der als flächengleiche Scheiben idealisierten Säulen,
- Nachweis der äußeren Tragfähigkeit (Spitzendruck und Mantelreibung) der pfahlartigen Tragglieder (GEO-2) nach (EC 7-1 2011),
- Nachweis der inneren Tragfähigkeit (Axial- und Querbeanspruchung der pfahlartigen Tragglieder nach (DIN EN 1992-1-1 2011),
- Nachweis des Geogitterpolsters, insbesondere zur Aufnahme der Zugkräfte und der Verankerung der Geogitter nach EBGEO (DGGT 2010).

Entsprechend Ril 836.4202 (DB Netz AG 2013) ist für diese als Verpfählung bezeichnete Fahrweggründung einschließlich der Tragkonstruktion in der Regel eine unternehmensinterne Genehmigung (UiG) und eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erforderlich. Beispiele für realisierte Bauvorhaben bei der DB Netz AG enthält (Vogel 2005).

2.3 Vergleich pfahlartige Tragglieder mit Bodenverbesserungen

Mit bewehrten Bodenkörpern auf pfahlartigen Traggliedern lässt sich prinzipiell eine deutlich höhere Zunahme der Steifigkeit und Tragfähigkeit erzielen. Die Zunahme der Steifigkeit und damit die Setzungsverbesserungswirkung bei in der Praxis üblichem Verhältnis von Säulenfläche A_s zur Gesamtfläche A von $A_s/A = 0,1 - 0,2$ beträgt nach der Literatur $\beta \approx 1,5 - 3,0$ (Breitsprecher et al. 2009), (Kirsch 2004), (Kirsch et al. 2004) und (Weber 2007). Jedoch ist die Konstruktion aufgrund der hohen Lastkonzentration und hohen Steifigkeitsunterschiede zwischen Säulenmaterial und Boden entsprechend sensibler hinsichtlich Lasteinleitung oberhalb der Säulen, aber auch hinsichtlich Querbeanspruchung unbewehrter Säulen oder auch Knickbeanspruchung bei sehr weichem Baugrund.

Die entsprechenden Nachweise sind daher berechtigterweise deutlich umfangreicher und aufwendiger als bei Bodenverbesserungen. Entsprechend Ril 836.4203 Abs. 1 (3) (DB Netz AG 2013) dürfen deshalb Tiefgründungen mit pfahlartigen Traggliedern nur ausgeführt werden, wenn Bodenverbesserungsmaßnahmen ausscheiden.

3 Praxisbeispiel mit Rüttelstopfsäulen

3.1 Querschnitt mit Anordnung der Messaufnehmer

Im Streckenabschnitt Casekow - Tantow der Bahnstrecke 6328 Angermünde - Rosow (DB-Grenze) erfolgte auf insgesamt 400 m Länge die mechanische und hydraulische Bodenverbesserung mit Rüttelstopfsäulen durch die Keller Grundbau GmbH. Im Rahmen der Auflagen der UiG (DB Netz AG 2006) sowie für das Forschungsprojekt Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten (Vogel et al. 2008) wurde innerhalb des Bereiches ein Querschnitt mit Erddruckgebern auf und zwischen den Rüttelstopfsäulen, mit Geophonen sowie Horizontal- und Vertikalinklinometer ausgestattet (Abb. 1).

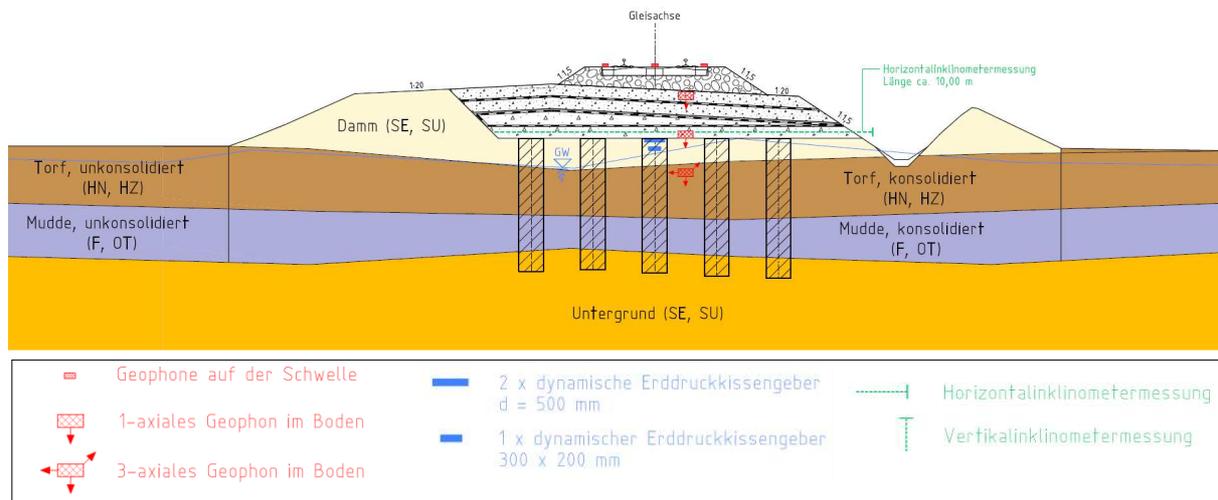


Abb. 1: Querschnitt km 100,380 mit Rüttelstopfsäulen und Anordnung der Messaufnehmer

3.2 Säulengeometrie, Material- und Bodenkennwerte, Nachweise

Es wurden 5 Säulenreihen im Raster von 1,50 m · 1,50 m mit einem mittleren Säulendurchmesser von ca. 0,60 m angeordnet. Aufgrund der deutlich nachgiebigeren Weichschicht (Torf und Mudde) gegenüber dem Dammmaterial (Sand) ergeben sich bei gleichem Energieeintrag sowohl im Torf als auch in der Mudde größere Säulendurchmesser von ca. 0,80 im Torf und ca. 0,70 in der Mudde gegenüber dem Säulendurchmesser im Damm von ca. 0,50 m.

Das Flächenverhältnis von Säulenfläche $A_s = \pi/4 d_s^2$ zur Gesamtfläche $A = (1,50 \text{ m})^2 = 2,25 \text{ m}^2$ beträgt

- im Bereich des Torfes: $A_s/A = 0,22$,
- im Bereich der Mudde: $A_s/A = 0,17$ und
- im Bereich des Dammmaterials: $A_s/A = 0,09$.

Tab. 1 enthält die bodenmechanischen Kennwerte der einzelnen Schichten und des Säulenmaterials. Maßgebend für die Setzungen und damit auch für die Verbesserungswirkung ist die Steifigkeit der Ent- und Wiederbelastung $E_{s,ur}$, da es sich um die Ertüchtigung einer bestehenden Strecke handelt, die durch den bestehenden Damm, den Oberbau und die Verkehrsbelastung entsprechend vorbelastet ist.

Tab. 1: Kennwerte der Ausgleichsschicht, des Säulenmaterials und der unverbesserten Bodenschichten

Bodenschicht	Schicht UK u. OK Schwelle	Wichte γ/γ' [kN/m ³]	Reibungsw. ϕ' [°]	Kohäsion c'/c_u [kPa]	Steifemodul $E_{s,ur}$ [MPa]	Ruhedruckbeiw. K_0 [-]
Ausgleichsschicht	1,8 m	21 / 11	37,5	0	100	
Säulenmaterial	1,8 - 5,1 m	22 / 12	40	0	200	
Damm (SE, SU)	2,4 m	21 / 11	37,5	0	100	0,4
Torf, konsolidiert	3,7 m	11 / 1	30	3 / 16	1,7	0,6
Mudde, konsolidiert	4,6 m	16 / 6	30	0 / 27	25	0,6
Untergrund (SE, SU)	> 10 m	20 / 10	36	0	100	0,4

Unter Berücksichtigung eines Reibungswinkels des Säulenmaterials aus Kiessand 2/32 von $\phi_s = 40^\circ$ ergibt sich ein Lastanteil der Stopfsäulen:

- von ca. 30 % im Bereich des Dammes mit $A_s/A = 0,09$,
- von ca. 57 % im Bereich des Torfes mit $A_s/A = 0,22$ und
- von ca. 51 % im Bereich der Mudde mit $A_s/A = 0,17$

entsprechend (Priebe 1995). Infolge der Gesamtbelastung aus Eigengewicht und Verkehrslast in der Ebene OK Säulen von $p \approx 80$ kPa resultiert eine auf die undrainierte Kohäsion c_u normierte Belastung von $p/c_u \approx 5,0$ für den Torf und von $p/c_u \approx 3,0$ für die Mudde.

Für den Messquerschnitt konnte rechnerisch eine ausreichende Tragfähigkeit (ULS), dynamische Stabilität und Gebrauchstauglichkeit (SLS) nachgewiesen werden. Die mit dem Verfahren von (Priebe 1995) prognostizierten Setzungen betragen infolge Gesamtbelastung aus Eigengewicht und Verkehrslast 31 mm. Damit reduzierten sich diese prognostizierten Setzungen im Vergleich zur unverbesserten Situation (hier wurden Setzungen von 56 mm prognostiziert) um den Faktor $\beta \approx 1,8$. Werden die Setzungen infolge alleiniger Verkehrslast miteinander verglichen, so beträgt der Faktor $\beta \approx 2,5$, da sich die Setzungen von 27 mm (ohne Verbesserung) auf 11 mm reduzieren (GEPRO 2006 a).

3.3 Messergebnisse für den Messquerschnitt mit Rüttelstopfsäulen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der ca. 1,5 Jahre nach dem Umbau durchgeführten Bodendruckspannungsmessungen sowie der bis ca. 2 Jahre nach Wiederinbetriebnahme erfolgten Inklinometermessungen gezeigt. Die Ergebnisse der Schwingungsmessungen, auf deren Basis bodendynamische FE-Berechnungen verifiziert und der Nachweis der dynamischen Stabilität geführt werden konnte, wurden bereits in (Vogel et al. 2009) vorgestellt.

Mittels elektrischen Bodendruckspannungsgebern mit hydraulischen Druckkissen und Drucksensoren Typ K5 (Glözl 2008) war es möglich, Bodendruckspannungen bis 500 kPa und mit einer Messfrequenz von 1.000 Hz zu messen. Dadurch können Frequenzen bis ca. 100 Hz zuverlässig bestimmt werden. Die Bodendruckspannungen infolge Zugüberfahrt mit Trieb- und Steuerwagen der Baureihe 628 sind im Zeitbereich (Abb. 2) und im Frequenzbereich (Abb. 3) dargestellt.

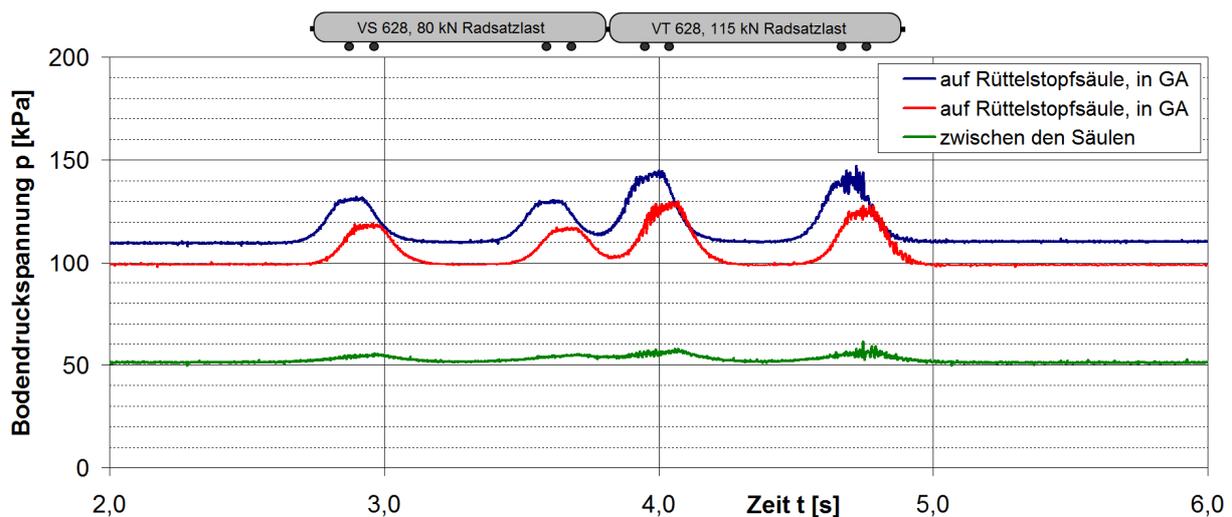


Abb. 2: Bodendruckspannungen infolge Zugüberfahrt mit der Baureihe 628 im Zeitbereich

Die Vertikalspannungen infolge Bodeneigengewicht (ohne Verkehrslast) lässt sich in Abb. 2 in den Bereichen zwischen 2,0 und 2,8 s bzw. 5,0 und 6,0 s ablesen. Die Spannungen betragen direkt auf den Rüttelstopfsäulen in Gleisachse (blaue und rote Kurve) $\sigma_{\text{Säule}} \approx 100 - 110$ kPa. Zwischen den Rüttel-

stopfsäulen (grüne Kurve) wurden mit $\sigma_{\text{Boden}} \approx 50 \text{ kPa}$ im Vergleich zu den oben genannten Werten nur ca. 50 % der Spannungen gemessen. Damit beträgt die Spannungskonzentration auf den Säulen $n = \sigma_{\text{Säule}}/\sigma_{\text{Boden}} \approx 2,0$ bis 2,2.

In Modellversuchen (Kirsch 2004), (Kirsch et al. 2004) wurden ebenfalls Spannungskonzentrationen auf Rüttelstopfsäulen bei Wiederbelastung unter einer auf die undrainierte Kohäsion c_u normierten Belastung $p/c_u = 3 - 5$

- von $n = 1,6 - 1,8$ unter Mittelsäulen und
- von $n = 2,1 - 2,3$ unter Ecksäulen

eines annähernd starren Fundaments ermittelt. Bei dem vorliegenden Beispiel eines Eisenbahndammes muss von einer schlaffen Lastfläche ausgegangen werden. Damit ist die größte Spannung auf den Rüttelstopfsäulen in Gleisachse zu erwarten. Somit stimmt die ermittelte Spannungskonzentration von $n = 2,0 - 2,2$ sehr gut mit den in (Kirsch 2004), (Kirsch et al. 2004) angegebenen Ergebnissen für die Ecksäulen von $n = 2,1 - 2,3$ überein.

Infolge der dynamischen Beanspruchung durch die Zugüberfahrten sind die Unterschiede zwischen den Spannungen auf und zwischen den Rüttelstopfsäulen größer. Auf den Rüttelstopfsäulen betragen die dynamischen Zusatzspannungen (ohne Bodeneigengewicht):

- $\Delta\sigma \approx 30 \text{ kPa}$ infolge der Triebwagen (VT 628) mit 115 kN Radsatzlast und
- $\Delta\sigma \approx 20 \text{ kPa}$ infolge der Steuerwagen (VS 628) mit 80 kN Radsatzlast.

Hingegen betragen die dynamischen Zusatzspannungen zwischen den Rüttelstopfsäulen nur ca. 5 kPa infolge der VT 628 und nur ca. 3 kPa infolge der VS 628. Damit treten hier nur ca. 1/6 der auf den Rüttelstopfsäulen gemessenen Spannungen auf, siehe Abb. 2. Auch in Abb. 3 ist dieser deutliche Unterschied zwischen den Spannungen auf und zwischen den Rüttelstopfsäulen erkennbar und beträgt im Frequenzbereich mit den größten Druckspannungen ($f < 10 \text{ Hz}$) ebenfalls ca. Faktor 6.

Eine Ursache für die höhere Lastkonzentration infolge dynamischer Belastung sind vermutlich die um mehrere Zehnerpotenzen höhere Wasserdurchlässigkeit des Säulenmaterials gegenüber dem dazwischen befindlichen Boden, wodurch sich die Spannungen in den Rüttelstopfsäulen schneller auf- und wieder abbauen können und dadurch bei kurzzeitigen Einwirkungen entsprechend größer sind.

Eine weitere Ursache ist die bei einer dynamischen Einwirkung gegenüber der statischen Situation andersartige Lastabtragung durch Wellenausbreitung. Hier wird vermutlich bereits relativ viel Energie direkt über Kompressionswellen in die gegenüber dem umgebenden Boden deutlich steiferen Rüttelstopfsäulen abgetragen, während bei homogenen Untergrundbedingungen der größte Teil der Energie über Scher- und Rayleighwellen abgeleitet wird (Richart et al. 1970). Zur Klärung der Ursache der unterschiedlichen statischen und dynamischen Lastabtragung sind weitere Untersuchungen notwendig.

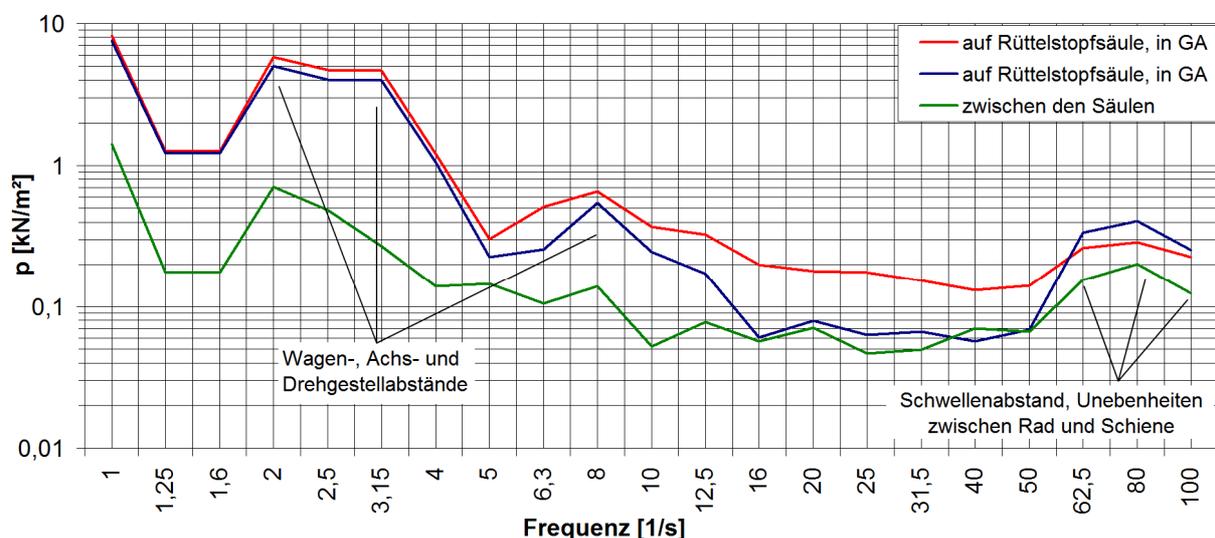


Abb. 3: Bodendruckspannungen infolge Zugüberfahrt mit der Baureihe 628 im Frequenzbereich

Die Vertikalverformungen für das oberhalb der Rüttelstopfsäulen und unterhalb der untersten Geogitterlage eingebaute Horizontalinklinometer zeigt Abb. 4. Unmittelbar vor Inbetriebnahme erfolgte eine Nullmessung. Wiederholungsmessungen wurden nach ca. 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten, 1 Jahr und 2 Jahren durchgeführt. Die größten Verformungen wurden im Bereich der Gleisachse ermittelt, während jeweils ca. 4 m rechts und links der Gleisachse die Verformungen annähernd Null sind (Abb. 4).

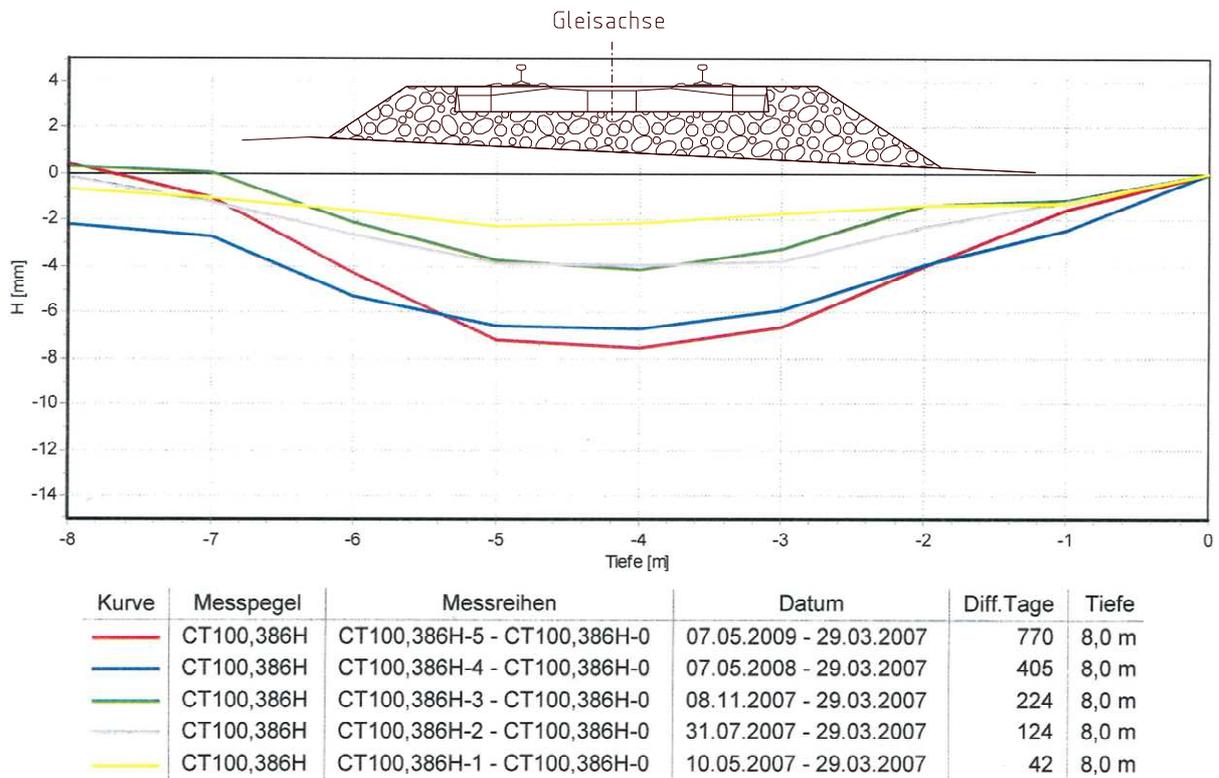


Abb. 4: Vertikalverformungsverlauf im Querschnitt km 100,380 mit Rüttelstopfsäulen ~ 1,80 m u. SO

Abb. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Vertikalverformungen in Gleisachse im halblogarithmischen Maßstab.

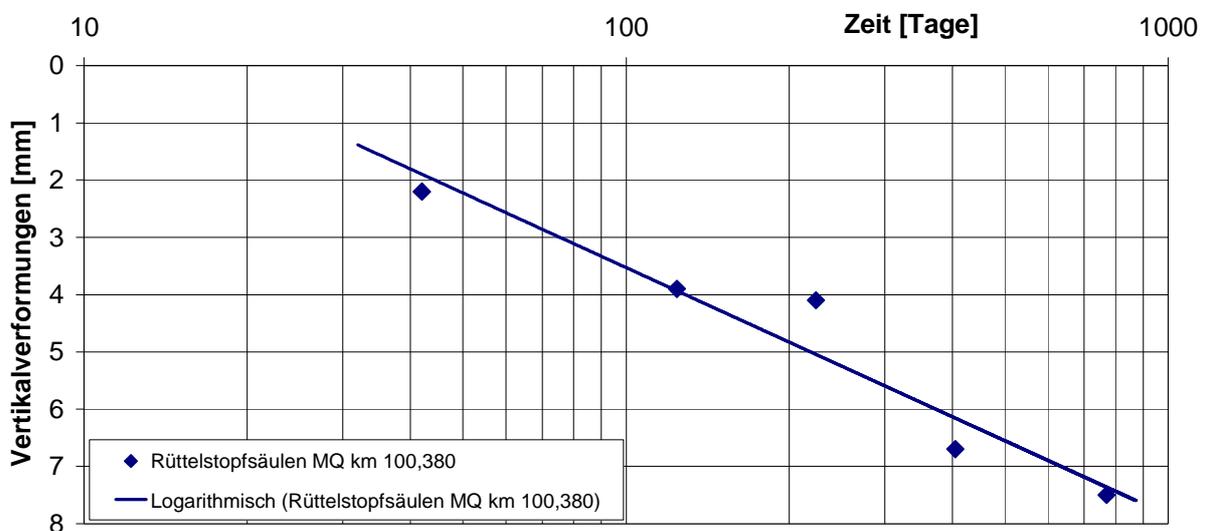


Abb. 5: Zeitlicher Verlauf der Vertikalverformungen in Gleisachse im Querschnitt mit Rüttelstopfsäulen

Die gemessenen Vertikalverformungen von 8 mm nach 2 Jahren liegen in einer für den Schotteroberbau üblichen Größenordnung. Zudem nehmen die Vertikalverformungen nur annähernd logarithmisch zu, d. h. die Verformungsgeschwindigkeit des Unterbaus und Untergrundes nimmt mit der Zeit ab, folglich klingen die Setzungen ab. Bei Extrapolation nach der in Abb. 5 dargestellten logarithmischen Regression werden die in der statischen Berechnung nach dem Verfahren von (Priebe 1999) prognostizierten Setzungen von 11 mm (GEPRO 2006 a) nach ca. 15 Jahren erreicht.

4 Praxisbeispiel mit Fertigmörtelstopfsäulen

4.1 Querschnitt mit Anordnung der Messaufnehmer und Nachweise

Im Streckenabschnitt Casekow - Tantow der Bahnstrecke 6328 Angermünde - Rosow (DB-Grenze) erfolgte auf insgesamt 375 m Länge die Untergrundertüchtigung mit bewehrtem Bodenkörper auf Fertigmörtelstopfsäulen nach der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (DIBT 2011) bzw. in der damals gültigen Fassung (DIBT 2005). Aufgrund der deutlich mächtigeren Weichschicht von 3 bis 4 m Torf und 4 bis 5 m Mudde war hier eine Bodenverbesserung mit Rüttelstopfsäulen nicht mehr ausreichend. Deshalb wurde die Ertüchtigung mit einem bewehrten Bodenkörper auf pfahlartigen Traggliedern geplant (GEPRO 2006 b) und durch die Keller Grundbau GmbH ausgeführt.

Zur Verifizierung der Berechnungsannahmen und zum Nachweis des Ertüchtigungserfolges wurden entsprechend den Auflagen von UiG (DB Netz AG 2006) und ZiE (EBA 2006) sowie für das Forschungsprojekt Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten (Vogel et al. 2008) der maßgebende Querschnitt im Ertüchtigungsbereich mit Fertigmörtelstopfsäulen messtechnisch instrumentiert und Langzeitmessungen für eine Zeitdauer von 2 Jahren nach Inbetriebnahme durchgeführt. Der maßgebende Querschnitt in km 102,500 wurde mit Bodendruckspannungsgebern auf und zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen mit Geophonen und mit Horizontal- und Vertikalinklinometer ausgestattet (Abb. 6).

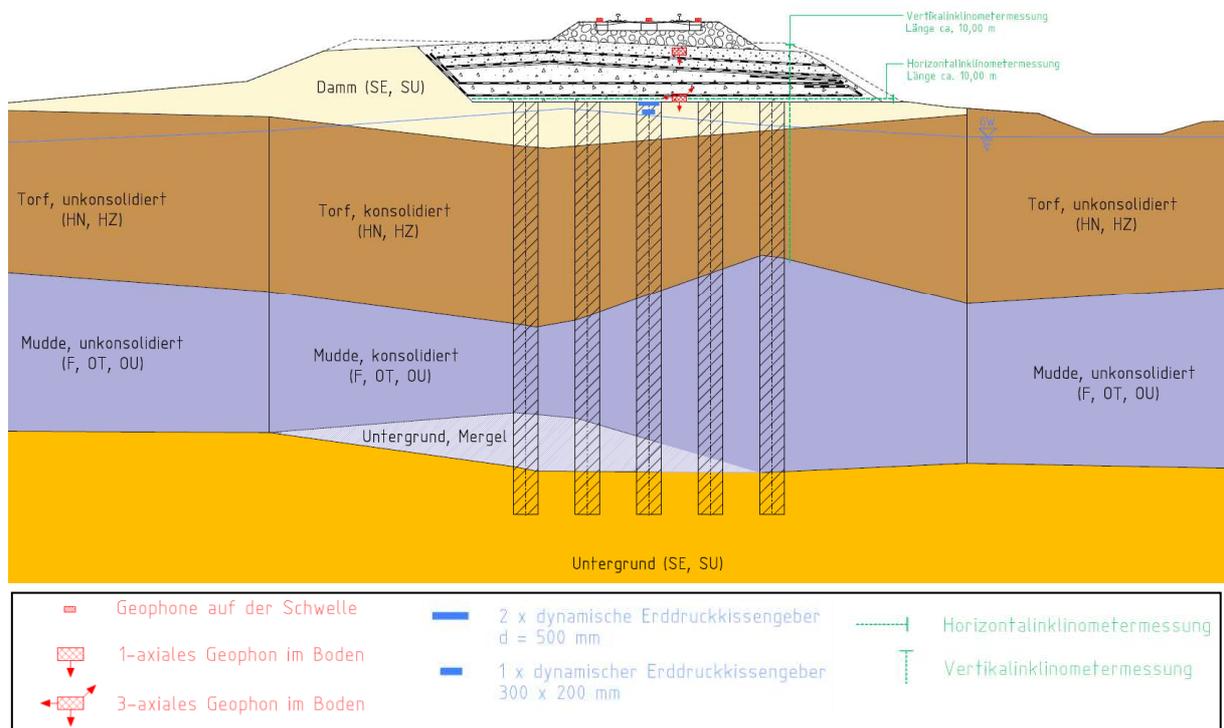


Abb. 6: Querschnitt mit Fertigmörtelstopfsäulen und Anordnung der Messaufnehmer

Es wurden 5 Säulenreihen im Raster von $1,50\text{ m} \cdot 1,50\text{ m}$ mit einem Durchmesser von $0,60\text{ m}$ aus unbewehrten Beton C 8/10 mit einem Bemessungswert der Betondruckfestigkeit von $f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$, d. h. $f_{cd} = 8,0 / 1,8 = 4,44\text{ MPa}$ hergestellt. Die Bodenkennwerte für die einzelnen Baugrundsichten sind analog dem Querschnitt mit den Rüttelstopfsäulen (Tab. 1).

Für den Messquerschnitt konnten die entsprechenden Nachweise der Tragfähigkeit (ULS) für das Gesamtsystem und für die einzelnen Bauteile (Fertigmörtelstopfsäulen und geogitterbewehrter Erdkörper), einschließlich des Nachweises der dynamischen Stabilität sowie der Gebrauchtauglichkeit (SLS) unter Zugrundelegung der damals gültigen DIN-Normen sowie dem Entwurf der EBGEO (DGGT 2004) geführt werden.

Bei der inneren und äußeren axialen Tragfähigkeit der Säulen wird auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass die komplette Vertikallast aus Eigengewicht und Verkehr von den Säulen aufgenommen wird. Beim Nachweis des geogitterbewehrten Erdkörpers über den Säulen wird vorausgesetzt, dass ein Teil der Spannungen auf den Boden zwischen den Säulen wirkt und nach der Membrantheorie zu einer Zugbeanspruchung des Geogitters führt (Kempfert and Stadel 1995).

4.2 Messergebnisse für den Messquerschnitt mit Fertigmörtelstopfsäulen

Die Bodendruckspannungen infolge Zugüberfahrt mit einer 6-achsigen Diesellokomotive der Baureihe 232 mit ca. 200 kN Radsatzlast und relativ leichten Güterwagen mit ca. 120 kN Radsatzlast sind im Zeitbereich (Abb. 7) und im Frequenzbereich (Abb. 8) dargestellt.

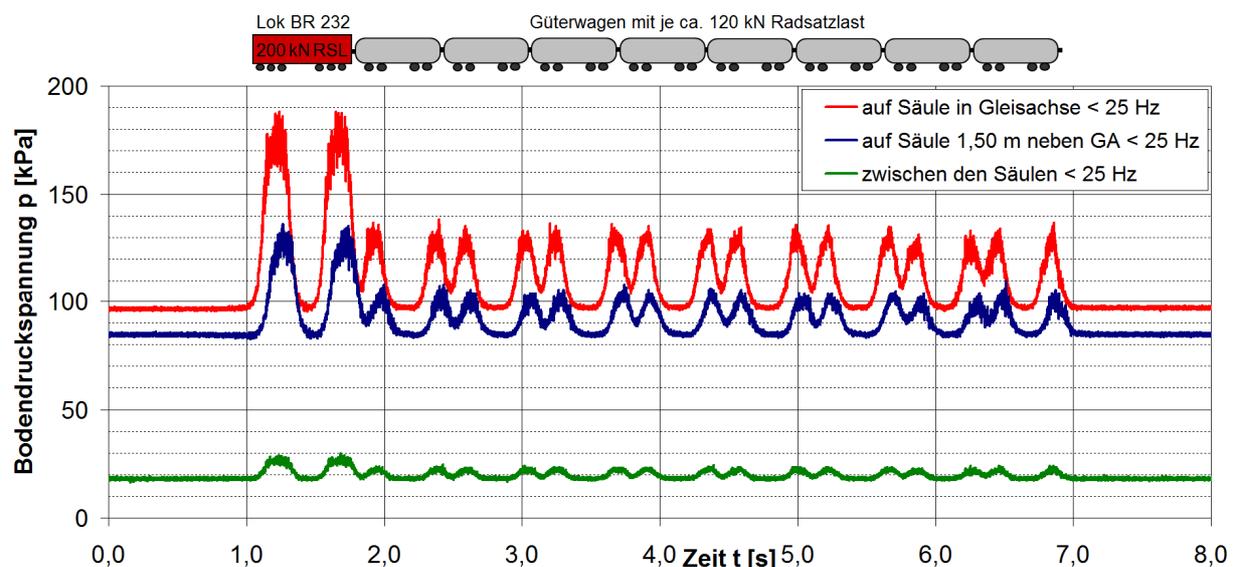


Abb. 7: Bodendruckspannungen infolge Überfahrt eines Güterzuges mit Lok BR 232 im Zeitbereich

Die Vertikalspannungen infolge Bodeneigengewicht (ohne Verkehrslast) lassen sich in Abb. 7 in den Bereichen zwischen $0,0$ und $1,0\text{ s}$ bzw. zwischen $7,0$ und $8,0\text{ s}$ ablesen. Die Spannungen betragen direkt auf den Fertigmörtelstopfsäulen in Gleisachse (rote Kurve) ca. $95 - 100\text{ kPa}$ und auf den Fertigmörtelstopfsäulen $1,5\text{ m}$ neben der Gleisachse (blaue Kurve) ca. 85 kPa . Die Spannungen zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen (grüne Kurve) betragen mit ca. 18 kPa nur ca. $1/5$ der auf den Fertigmörtelstopfsäulen gemessenen Spannungen.

Infolge der dynamischen Beanspruchung durch die Lok BR 232 mit 200 kN Radsatzlast kam es zu einem Anstieg der Spannungen um $\Delta\sigma \approx 90\text{ kPa}$ auf den Fertigmörtelstopfsäulen in Gleisachse bzw. um $\Delta\sigma \approx 50\text{ kPa}$ auf den Fertigmörtelstopfsäulen $1,5\text{ m}$ neben der Gleisachse. Hingegen betragen die dynamischen Zusatzbeanspruchungen zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen nur ca. 10 kPa und damit nur ca. $1/9$ der auf den Fertigmörtelstopfsäulen in Gleisachse gemessenen Spannungen bzw. nur ca.

1/5 der Spannungen, die auf den Fertigmörtelstopfsäulen 1,5 m neben der Gleisachse ermittelt wurden. Auch in Abb. 8 ist dieser deutliche Unterschied zwischen den Spannungen auf und zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen im untersuchten Frequenzbereich zwischen 1 und 100 Hz erkennbar.

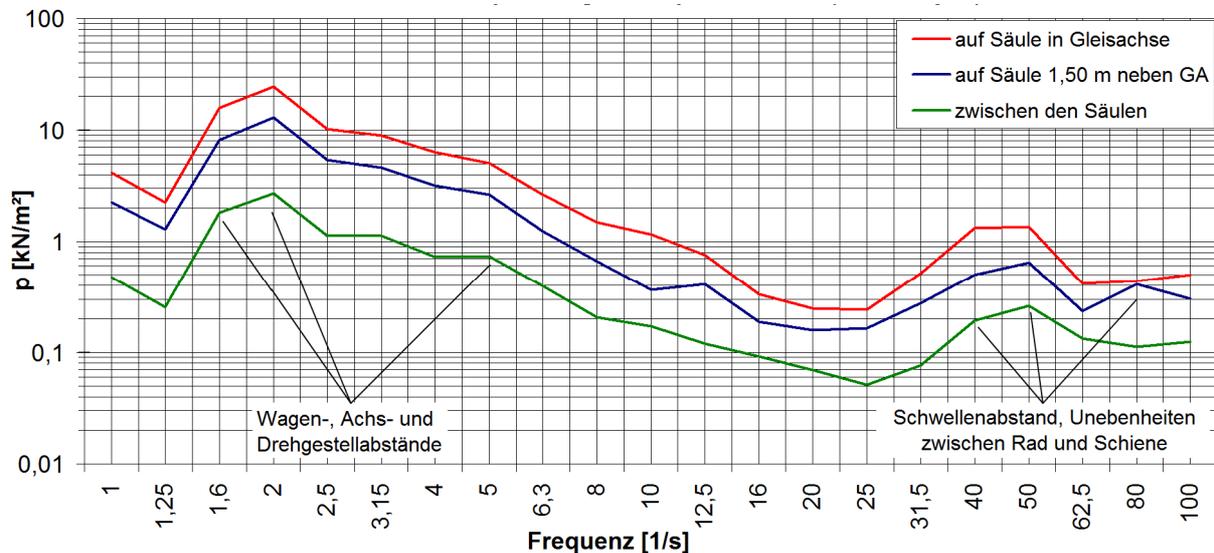


Abb. 8: Bodendruckspannungen infolge Überfahrt eines Güterzuges mit Lok BR 232 im Frequenzbereich

Bei der Bemessung des geogitterbewehrten Erdkörpers wurde auf Basis der Gewölbetheorie entsprechend den Berechnungsannahmen (DGGT 2004) ein größerer Unterschied der Spannungen zwischen und direkt auf den Säulen prognostiziert. Infolge Eigengewicht als auch infolge der Gesamtbeanspruchung aus Eigengewicht und Verkehr wurde hier ein Unterschied von 1/14 ermittelt.

Die höhere Lastkonzentration auf die Säulen in diesen Berechnungen liegt vermutlich daran, dass bei der Spannungsermittlung auf und zwischen den Traggliedern nach (DGGT 2004 bzw. DGGT 2010) die Spannung infolge der vertikalen Reaktion der Weichschicht vernachlässigt wird. Bei der Berechnung wird nur die Spannung zwischen den Säulen σ_G ermittelt, die das Geogitter beanspruchen. Die gemessene Bodendruckspannung (Abb. 7 und 8) zwischen den Säulen beinhaltet hingegen die Spannung σ_G zuzüglich der verformungsabhängigen Spannungsreaktion der Weichschicht σ_{0r} , siehe auch Gleichung (10) in (Kempfert and Stadel 1995).

Mit den Bodendruckspannungsmessungen konnte gezeigt werden, dass die in den Nachweisen zugrunde gelegten Berechnungsannahmen zutreffend sind bzw. auf der sicheren Seite liegen. Ein Abbau des Bodengewölbes, wie sie in (Heitz 2008) in Modellversuchen bei geringer Bodenüberdeckung im Verhältnis zum Pfahlabstand von $h/s \leq 1,5$ infolge zyklisch-dynamischer Belastung beobachtet wurde, konnte durch die Messungen nach ca. 1,5 Jahren Zugverkehr bzw. ca. 750.000 Achsübergängen nicht festgestellt werden. Zur Überprüfung, ob es zu Spannungsumlagerungen infolge der dynamischen Belastung durch den Zugverkehr kommt, ist eine weitere Messkampagne vorgesehen.

Die Vertikalverformungen für das oberhalb der Fertigmörtelstopfsäulen und unterhalb der untersten Geogitterlage eingebaute Horizontalinklinometer zeigt Abb. 9.

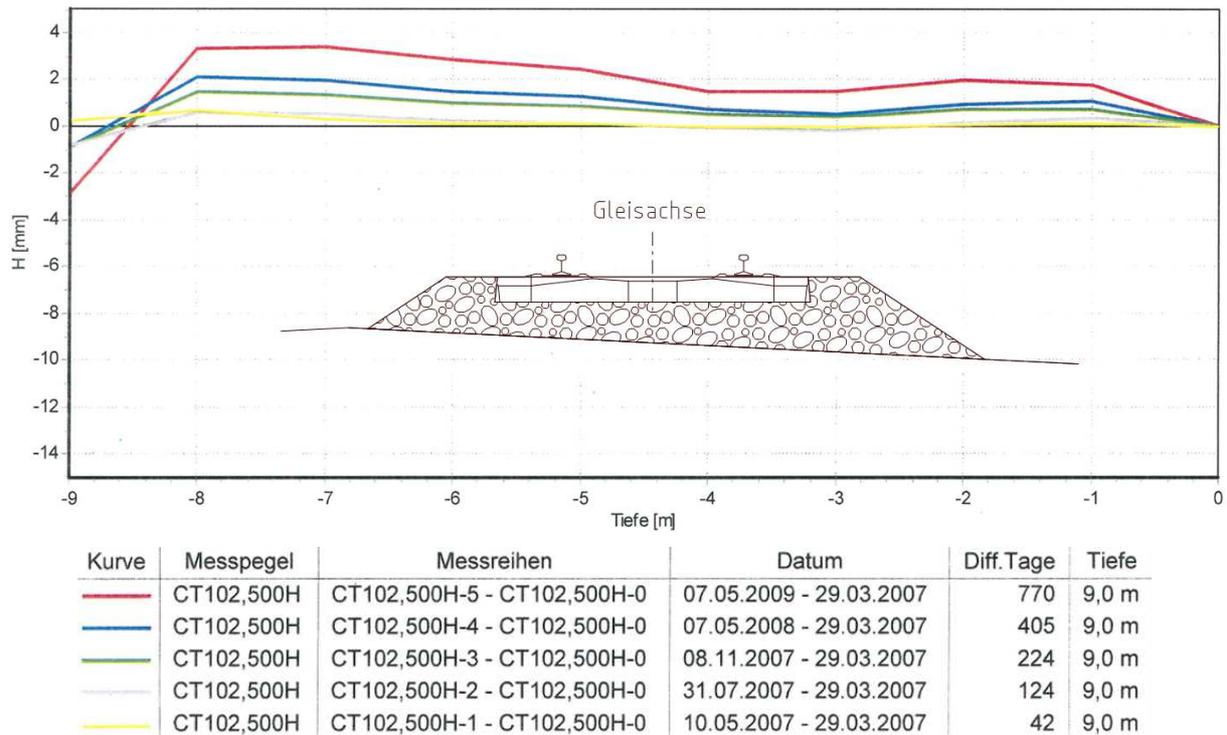


Abb. 9: Vertikalverformungsverlauf im Querschnitt km 102,500 mit Fertigmörtelstopfsäulen.

Unmittelbar vor Inbetriebnahme erfolgte eine Nullmessung. Wiederholungsmessungen wurden nach ca. 6 Wochen, 3 Monaten, 6 Monaten, 1 Jahr und 2 Jahren durchgeführt. Die Messergebnisse im Messquerschnitt km 102,500 (Abb. 9) zeigen keine Einsenkungen, sondern allenfalls leichte Hebungen, die mit der Zeit leicht zunehmen. Es wird vermutet, dass der Böschungsbereich mit dem Inklinometerkopf und -fuß sich im Bereich der Messgenauigkeit der geodätischen Messung von ca. ± 3 mm nach unten bewegt hat, was zu einer (theoretischen) Relativverschiebung im Gleisbereich nach oben führte. Insgesamt ist die Größe der Vertikalverformungen jedoch sehr gering, so dass keine ungünstigen Einflüsse durch die mit Fertigmörtelstopfsäulen ertüchtigten Bereiche zu erwarten sind.

5 Literaturverzeichnis

- Boley C, Höppner R (2015) Fahrweggründungen: Aktuelle Aspekte zur Bemessung und Ausführung, 10. Tiefbaufachtagung des VDEI 2015 in Dresden.
- Borchert K-M, Kirsch F, Mittag J (2005) Betonsäulen als pfahlartige Tragglieder. Herstellverfahren, Qualitätssicherung, Tragverhalten und Anwendungsbeispiele, Pfahl-Symposium 2005 in Braunschweig, in: Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der TU Braunschweig, Heft 80, Seiten 219 - 238.
- Breitsprecher G, Rawitzer S, Kirsch F (2009) Flughafen Berlin-Brandenburg International - Dimensionierung und Ausführung einer Baugrundverbesserung für Bauwerke und Verkehrsflächen der landseitigen Anbindung, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der TU Berlin, Heft Nr. 47.
- DB Netz AG (2006) Technische Mitteilung zum Geotechnischen Ingenieurbau (UiG und fachtechnische Stellungnahme) TM 2006-1207 I.NVT(K), 23.08.2006.
- DB Netz AG (2013) Ril 836, Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke; planen, bauen und instand halten; 2. Aktualisierung, gültig ab 01.02.2013.
- DIBT (2005) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Vermörtelte Stopfsäulen (VSS), Fertigmörtel-Stopfsäulen (FSS) und Beton-Stopfsäulen (BSS), Zulassungs- Nr. Z-34.2-3, 08.09.2005.

- DIBT (2011) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Vermörtelte Stopfsäulen (VSS), Fertigmörtel-Stopfsäulen (FSS) und Beton-Stopfsäulen (BSS), Zulassungs- Nr. Z-34.2-3, Keller Grundbau GmbH, 27.09.2011.
- DGGT (2004) Entwurf der Empfehlung „Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern“, Entwurf- EBGEO Kapitel 6.9, AK 5.2 der DGGT, Fachsektion Kunststoffe in der Geotechnik.
- DGGT (2010) Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen - EBGEO, 2. Auflage 2010, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V., Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin, DOI: 10.1002/9783433600597.
- DIN EN 1992-1-1 (2011) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Beuth Verlag GmbH Berlin, 2011.
- EC 7-1 (2011) Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessung, Band 1, Allgemeine Regeln. enthält DIN EN 1997-1 (2009), DIN EN 1997-1/NA (2010) und DIN 1054 (2010), Beuth Verlag GmbH Berlin, 2011.
- EBA (2006) Zustimmung im Einzelfall (ZiE) für die Ausführung von geogitterbewehrten Bodenkörpern auf Säulen und geogitterbewehrten Böschungen, Gleiserneuerung und Untergrundertüchtigung Strecke 6328 Angermünde, W 13 - Rossow (DB Grenze), Streckenabschnitt Casekow - Tantow, Bonn, 10.11.2006.
- GEPRO (2006 a) Statische Berechnung für die Ertüchtigung des Dammkörpers im Moorabschnitt 1, Teilbereich 1.2 km 100,350 - km 100,550, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, 24.06.2006, unveröffentlicht.
- GEPRO (2006 b) Statische Berechnung für die Ertüchtigung des Dammkörpers im Moorabschnitt 2, Teilbereich 2.3 km 102,425 - km 102,675, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, 15.05.2006, unveröffentlicht.
- Glözl (2008) Produktkatalog Glözl Baumesstechnik, http://www.gloetzl.de/fileadmin/produkte/Digitaler_Produktordner/Produktkatalog_Teil1_de.pdf.
- Heitz C (2006) Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern, Dissertation, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19.
- Kempfert HG, Stadel M (1995) Zum Tragverhalten geokunststoffbewehrter Erdbauwerke über pfahlähnlichen Traggliedern, 4. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik, Sonderheft Geotechnik 1995, S.146 - 152.
- Kirsch F (2004) Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Rüttelstopfsäulengruppen, Dissertation, Mitteilungen des Instituts für Geotechnik der TU Braunschweig, Heft 25.
- Kirsch F, Stahlmann J, Wehr W (2004) Berechnung von Baugrundverbesserungen nach dem Rüttelstopfverfahren, Vorträge der Baugrundtagung 2004 in Leipzig, DGGT, Verlag Glückauf Essen, S. 149 - 156.
- Priebe HJ (1995) Die Bemessung von Rüttelstopfsäulen, Bautechnik 72 Heft 3, S. 380 - 384.
- Priebe HJ (2003) Zur Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen, Anwendung des Verfahrens bei extrem weichen Böden, bei schwimmenden Gründungen und beim Nachweis der Sicherheit gegen Gelände- oder Böschungsbruch, Bautechnik 80 Heft 6, S. 380 - 384.
- Richart FE, Hall JR, Woods RD (1970) Vibrations of Soils and Foundations. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Vogel W (2005) Erfahrungen über den Einsatz geogitterbewehrter Bodenkörpern auf Säulen für Eisenbahnfahrwege bei Neubau - und Ausbaumaßnahmen der DB, Vortrag zum 60. Geburtstag von Prof. Kempfert In: Raithel, M.; Rudolph, M. (Hrsg.): Schriftenreihe Geotechnik Universität Kassel, Heft 18, S. 79 - 82.
- Vogel W (Projektleiter), Ingenieurgemeinschaft GEPRO / Prof. Lieberenz / Prof. Neidhart (2008) Erarbeitung von Kriterien zur Beurteilung der Notwendigkeit von Ertüchtigungen bei Eisenbahnstrecken auf Weichschichten, Vorabbericht zur 5. Bearbeitungsstufe, Dresden, 27. 11.2008, unveröffentlicht.
- Vogel W (Projektleiter), Ingenieurgemeinschaft GEPRO / Prof. Lieberenz / Prof. Neidhart (2009) Zur Notwendigkeit von Ertüchtigungen bei Eisenbahnstrecken auf Weichschichten, Vortrag zur 7. Tiefbaufachtagung des VDEI, Dresden, 05. - 06.02.2009.
- Weber T (2007) Modellierung der Baugrundverbesserung mit Schottersäulen, Dissertation, ETH Zürich.
- Wegener, D, Weisemann U, Neidhart T, Neumann G (2008) Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken auf Weichschichten, Eisenbahningenieur 59 Heft 12, S. 34 - 42.