

Fahrweggründungen auf organischen Weichschichten – ein Erfahrungsbericht

Es werden ein Überblick über Ertüchtigungskonzepte und Fahrweggründungen gegeben sowie Erkenntnisse zum Tragverhalten ausgewählter Ertüchtigungsverfahren vorgestellt.

ULRIKE WEISEMANN / DIRK WEGENER

Es wird ein Überblick über mögliche Ertüchtigungskonzepte und -verfahren sowie Hinweise zur Auswahl geeigneter Fahrweggründungen für bestehende Erdbauwerke auf organischen Weichschichten gegeben, die für höhere Geschwindigkeiten bzw. Achslasten ertüchtigt werden sollen. Als wichtiges Hilfsmittel für den Entscheidungsprozess wird auf die Planungshilfe Weichschichten [3] verwiesen. Aber auch andere Gesichtspunkte, wie ökologische betriebliche und baubetriebliche Randbedingungen sowie Risiko- und Wirtschaftlichkeitsaspekte werden genannt. Weiterhin werden ausgewählte Ergebnisse von Langzeitmessungen vorgestellt. Über einen Zeitraum von 8,5 Jahren wurde das Langzeitverhalten von Rüttelstopfsäulen und geokunststoffbewehrten Bodenkörpern auf Fertigmörtelstopfsäulen näher untersucht.

Problemstellung

Die Erdbauwerke stellen neben den Kunstbauwerken einen wesentlichen Bestandteil des Eisenbahnfahrweges dar. Sie werden vorrangig zur Anpassung der Gradienten von Eisenbahnstrecken an die bestehende Geländeform erforderlich. Während der Anteil an Erdbauwerken bei bestehenden Eisenbahnstrecken bis zu 97% ausmachen kann, ist bei Neubaustrecken der Anteil von Kunstbauwerken, das heißt von Brücken und Tunneln, deutlich höher und kann bis zu 50% betragen [1].

Die Erdbauwerke bestehender Eisenbahnstrecken wurden vorwiegend im 19. Jahrhundert errichtet. Zu dieser Zeit waren die erdbautechnischen Möglichkeiten stark eingeschränkt. So war zum Beispiel eine Verdichtung der Schüttstoffe bei der Dammerstellung kaum oder nur begrenzt möglich.

Auf problematische Untergrundbedingungen konnte ebenfalls nur begrenzt reagiert werden. Zur teilweisen Stabilisierung der Fahrweggründung wurden z. B. Faschinenlagen, Knüppelbeläge, Holzpfähle sowie Steinschüttungen ausgeführt und die Weichschichten im Untergrund belassen (Abb. 1). Nach Inbetriebnahme der Eisenbahnstrecken erfolgte über einen langen Zeitraum eine Nachsetzung der Weichschichten. Die

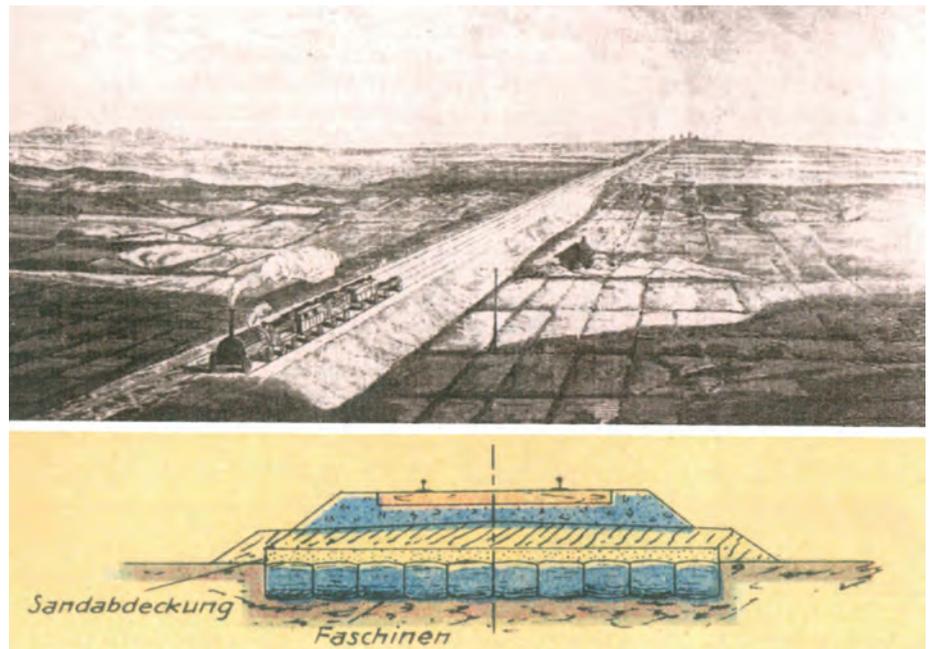


Abb. 1: Stabilisierung von Weichschichten bei der Überquerung des Chat Moor [1]

Gleislage wurde üblicherweise durch Stopp- und Richtarbeiten berichtigt. Aufgrund der im Vergleich zu heutigen Ansprüchen geringen Geschwindigkeiten und niedrigen Achslasten stellte diese Vorgehensweise zur damaligen Zeit kein Problem dar.

Während der Oberbau an die gestiegenen Anforderungen hinsichtlich Fahrgeschwindigkeiten und Radsatzlasten immer wieder angepasst wurde, sind die Erdbauwerke nicht oder nur wenig verändert worden. Um den heutigen Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu genügen, muss bei bestehenden Erdbauwerken im Zusammenhang mit geplanten Belastungs- und Geschwindigkeitserhöhungen untersucht werden, inwieweit hier für die Erdbauwerke Ertüchtigungsbedarf besteht.

Ein wichtiges Mittel, um die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Erdbauwerken umfassend beurteilen zu können, ist die Planungshilfe Weichschichten [3]. Hier sind Methoden beschrieben, um die dynamische Stabilität von Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau über Weichschichten einschätzen und daraus entsprechenden Handlungsbedarf ableiten zu können.

Überblick über Ertüchtigungskonzepte und -verfahren

Mit einer Ertüchtigung werden bestehende Erdbauwerke durch bautechnische Maßnahmen an höhere Achslasten bzw. Geschwindigkeiten angepasst. Hier ist zu beachten, dass neben der Sicherung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bzw. dynamischer Stabilität bei Erfordernis auch geometrische Anpassungen erfolgen müssen (Tab. 1).

Aus dem in Tab. 1 dargestellten Handlungsbedarf sind grundsätzlich die in Abb. 2 dargestellten Ertüchtigungskonzepte möglich, wobei eine Kombination oftmals sinnvoll ist. Die in Abb. 2 dargestellten Ertüchtigungskonzepte decken sich mit den Hinweisen, die in der Planungshilfe Weichschichten [3] für die Wahl geeigneter bautechnischer Maßnahmen gegeben werden.

Vor allem durch die Untersuchung der dynamischen Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr und die Berücksichtigung der positiven Effekte, die durch elastische Elemente sowie massereichen und verstärkten Ober- und Unterbau auftreten, können gezielt die Beanspruchungen auf Erdbauwerke verringert und aufwendige tiefgründige Ertüch-

Bestehende Erdbauwerke Ausgangssituation	Handlungsbedarf
<ul style="list-style-type: none"> - weiche und organische Böden im Untergrund - unzureichende Tragfähigkeit des Untergrundes - ungeeigneter und inhomogener Boden als Dammschüttmaterial - unzureichende Verdichtung der geschütteten Erdkörper - zu geringe Standsicherheit bzw. Nichteinhaltung der Regelneigungen von Damm- und Einschnittböschungen 	Sicherung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bzw. dynamischer Stabilität für geforderte Geschwindigkeit, Radsatzlast, Streckenbelastung durch: <ul style="list-style-type: none"> → Ertüchtigung des Unterbaus/ Untergrundes durch Erhöhung der Widerstände im Baugrund bzw. → Verminderung der Einwirkungen aus dem Verkehr bzw. → Überwachung / Monitoring
<ul style="list-style-type: none"> - unzureichende Planumsbreite und Nichteinhaltung des Regelprofils - fehlender Raum für Entwässerungsanlagen 	<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung des Regelquerschnittes gemäß Ril 800.0130 - Anordnung von Entwässerungsanlagen - Ermöglichung von eventuell erforderlichen Korrekturen in der Linienführung → Dammverbreiterungen / Einschnittserweiterungen

Tab. 1: Zu beachtende Ausgangssituationen und daraus abgeleiteter Handlungsbedarf für die Ertüchtigung von bestehenden Erdbauwerken

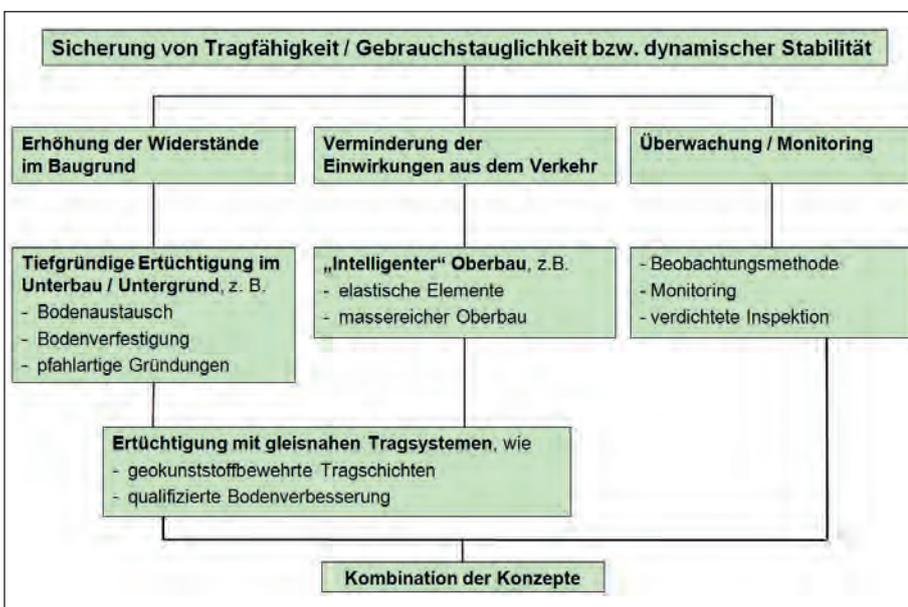


Abb. 2: Überblick über Ertüchtigungskonzepte

Bodenaustauschverfahren	Klassischer Bodenaustausch	Ohne UiG und ZiE
	Bodenaustausch mit wanderndem Verbau	ohne UiG und ZiE, wenn Zulassung durch EBA und geprüfte Statik
	Bodenaustausch in Rohren und Kästen	
mechanische und hydraulische Verbesserungsverfahren	Baggerschüttverfahren	nur mit UiG und ZiE
	Tiefenverdichtungen und Mineralstoffsäulen	im Regelfall ohne UiG und ZiE (Vorliegen von Messergebnissen mit ähnlichem Untergrund)
	Vertikaldrainagen	ohne UiG und ZiE
	Konsolidierungsverfahren	im Regelfall ohne UiG und ZiE
	Intensivverdichtung	Bei Einsatz im Einflussbereich benachbarter Eisenbahnstrecken nur mit UiG und ZiE
	verbesserte und verfestigte Bodenschichten	Bodenverbesserung, qualifizierte Bodenverbesserung und -verfestigung
tiefreichende Bodenstabilisierungen	Bindemittelstabilisierte Bodenkörper mit Hilfe von Schnecken und Fräsen	nur mit UiG und ZiE, außer FMI-Verfahren
Verpfählungen	Einbringen eng stehender Säulen und Pfähle	Im Stützbereich nach Modul 836.2001 nur mit UiG und ZiE

Tab. 2: Überblick über Verfahren zur Untergrundverbesserung gemäß Ril 836.4201 [2]

tigungsverfahren reduziert bzw. vermieden werden.

In der Ril 836.4201 [2] werden tiefgründige Ertüchtigungen des Unterbaus bzw. Untergrundes, die über die Herstellung von Schutzschichten und oberflächennaher Verbesserungsmaßnahmen auf dem Planum hinausgehen, als Fahrweggründung bezeichnet. Je nach Wirkungsweise werden die Gründungsmaßnahmen in Untergrundverbesserungsmaßnahmen und Tiefgründungen unterschieden.

Untergrundverbesserungsmaßnahmen zeichnen sich durch ein verbessertes gleichmäßiges Tragverhalten des Bodens im gesamten Ausbreitungsbereich einer Oberflächenbelastung aus. In [2] wird ein Überblick über mögliche Ertüchtungsverfahren gegeben, die in der Tab. 2 zusammengefasst sind.

Bei Tiefgründungen werden die Lasten überwiegend über Einzelelemente mit oder ohne Mitwirkung des umgebenden Bodens in den tieferen Untergrund abgetragen (Tab. 3). Während für Tiefgründungen generell eine UiG und ZiE erforderlich ist, sind eine Vielzahl von Verfahren zur Untergrundverbesserung auch ohne UiG und ZiE ausführbar.

Hinweise zur Auswahl einer geeigneten Fahrweggründung

Wie aus den Tab. 2 und 3 ersichtlich wird, stehen für die Ertüchtigung des Untergrundes eine Vielzahl von bautechnischen Verfahren zur Verfügung.

Wertvolle Hinweise zur Auswahl der geeigneten Fahrweggründung werden unter Berücksichtigung des möglichen Einsatzgebietes, der Wirkungsweise, der geeigneten Bodenarten, der Vor- und Nachteile sowie der zu beachtenden Vorschriften und Zulassungen in [1] gegeben.

In Abb. 3 sind weitere Aspekte genannt, die bei der Auswahl der Fahrweggründung zu beachten sind. Gerade das „Bauen unter dem rollenden Rad“ sowie der Lärm-, Erschütterungs- und Naturschutz haben einen wesentlichen Einfluss auf die Wahl der Fahrweggründung.

Langzeitverhalten ausgewählter Fahrweggründungen

Projektüberblick und Konzept der Langzeitmessungen

Von Herbst 2006 bis März 2007 wurden im Abschnitt Casekow – Tantow der Strecke 6328 Angermünde – Rosow Baumaßnahmen im Ober- und Unterbau durchgeführt. Ziel war es, den Fahrweg unter Beibehaltung des Streckenstandards G 120 für eine Leitgeschwindigkeit von 160 km/h zu ertüchtigen. Eine besondere Herausforderung war hierbei die Streckenführung über sechs ausgedehnte Niedermoorbereiche, so dass eine umfangreiche Ertüchtigung der Erdbauwerke erforderlich wurde.

Dieses Bauvorhaben wurde als Pilotprojekt

Abb. 3: Aspekte bei der Wahl der Fahrweggründung



für die Planungshilfe Weichschichten [3] genutzt. Gemäß der in [3] dargestellten Methodik wurden für diesen Streckenabschnitt folgende Ertüchtigungslösungen geplant und umgesetzt:

- 1270 m tiefgründige Untergrundertüchtigungen mit Rüttelstopfsäulen, geokunststoffbewehrten Bodenkörpern auf Fertigmörtelstopfsäulen sowie Bodenaustausch,
- 550 m Dammertüchtigung durch Abtrag des oberen Dammbereiches und Neuaufbau als geogitterbewehrte Böschung sowie
- 1525 m gleisnahe Verbesserung des Unterbaus durch geokunststoffbewehrte Tragschichten in Kombination mit massereichem und elastischem Oberbau.

In diesen Abschnitten wurden über einen Zeitraum von 8,5 Jahren in drei Messkampagnen Langzeitmessungen durchgeführt. Die Messungen dienten sowohl dem Nachweis des Ertüchtigungserfolges als auch der Überprüfung und Schärfung der in der Planungshilfe Weichschichten [3] formulierten Hinweise und Festlegungen. Sie beinhalteten:

- Schwingungsmessungen,
- Bodendruckspannungsmessungen sowie
- Vertikal- und Horizontalinklinometermessungen.

Über dieses Bauvorhaben sowie über erste Ergebnisse der Langzeitmessungen wurde bereits in [4] berichtet. In einem weiteren Artikel in dieser Sonderausgabe werden für dieses Pilotprojekt die Problematik der Schwingungs-, Langzeitverformungs- und Gleislagemessungen sowie die Nachweisführung der dynamischen Stabilität näher vorgestellt [5].

Forschungsbedarf bestand außerdem bezüglich des unterschiedlichen Tragverhal-

tens einer Untergrundverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen im Vergleich zu einer Tiefgründung mit geokunststoffbewehrten Bodenkörpern auf bindemittelstabilisierten Säulen (hier Fertigmörtelstopfsäulen) im Langzeitverhalten unter Eisenbahnbetrieb. Dazu konnten insbesondere die Ergebnisse der Bodendruckspannungsmessungen herangezogen werden.

Langzeitverhalten – Untergrundverbesserung mit Rüttelstopfsäulen

In Abb. 4 ist ein repräsentativer Querschnitt für die Teilbereiche dargestellt, in denen auf insgesamt 400 m Länge die mechanische und hydraulische Untergrundverbesserung mit Rüttelstopfsäulen erfolgte. Wie aus der Abbildung erkennbar ist, wurden Sohldruckgeber sowohl auf als auch zwischen den Säulen, jeweils in Gleisachse angeordnet.

Geokunststoffbewehrte Bodenkörper auf Säulen	Mit Bindemitteln stabilisierte Mineralstoffsäulen	Nur mit UiG und ZiE
	Geokunststoffummantelte Säulen, wenn Verhältnis der Bettungsmodule > 75	
Pfahlartige Tragglieder		
Stahlbetonplatten auf Pfählen	nur mit UiG und ZiE	

Tab. 3: Überblick über Verfahren zur Tiefgründung des Eisenbahnfahrweges gemäß Ril 836.4201 [2]

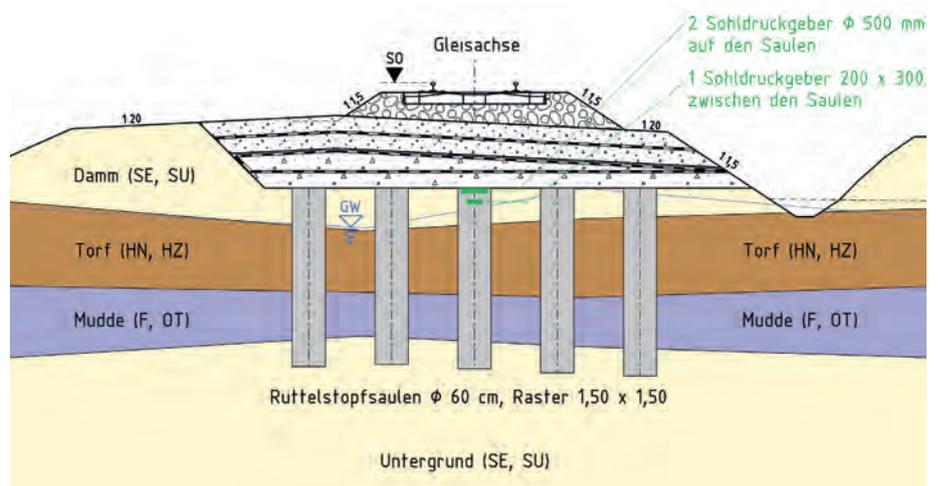


Abb. 4: Messquerschnitt MQ 2 km 100,380 mit Rüttelstopfsäulen (RSS) mit Eintragung der Sohldruckgeber

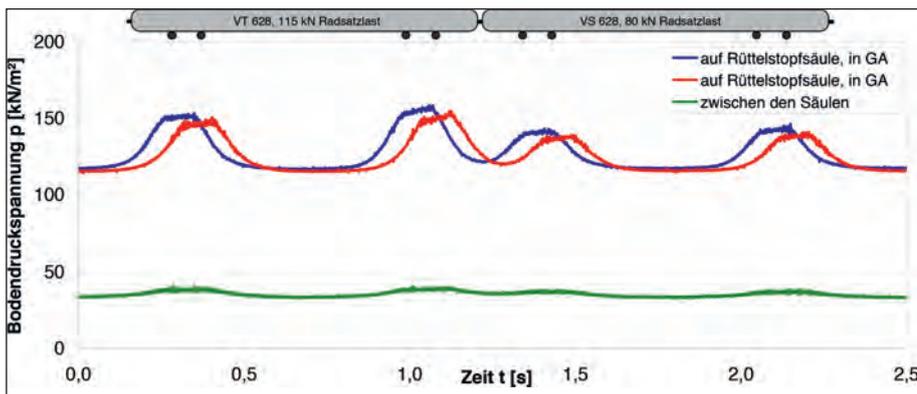


Abb. 5: Bodendruckspannungen infolge Überfahrt eines Reisezuges BR 628 mit ca. 75 km/h im Zeitbereich im MQ 2 km 100,380, 3. Messkampagne 2015

Für diese Abschnitte konnten *rechnerisch* eine ausreichende Tragfähigkeit (ULS) sowie die dynamische Stabilität und Gebrauchstauglichkeit (SLS) nachgewiesen werden. Die Nachweisführung erfolgte unter anderem unter Nutzung des Verfahrens nach Priebe [6] und [7]. Die Eingangsparameter und Berechnungsergebnisse sowie einen Vergleich mit Messergebnissen enthält [8]. Mit Hilfe der oben beschriebenen Langzeitmessungen war es nun möglich, diese Nachweisführung *praktisch* zu überprüfen. Interessant waren hier vor allem die Ergebnisse der Messkampagne vom Dezember 2015 – ca. 8,5 Jahre nach Inbetriebnahme der Eisenbahnstrecke. In Abb. 5 ist der Verlauf der Bodendruckspannungen infolge einer Zugüberfahrt eines zweiteiligen Triebzuges dargestellt. Folgende Erkenntnisse lassen sich aus diesen Messergebnissen ableiten:

- Die Vertikalspannungen infolge Bodeneigen- gewicht (ohne Verkehrslast) lassen sich in Abb. 5 vor und nach der Zugüberfahrt bzw. zwischen den Drehgestellen ablesen. Die Spannungen betragen direkt auf den Rüttelstopfsäulen in Gleisachse (rote und blaue Kurven) $p_{\text{Säule,EG}} \approx 117 \text{ kN/m}^2$. Zwischen den Rüttelstopfsäulen (grüne Kurve) wurden mit $p_{\text{Boden,EG}} \approx 34 \text{ kN/m}^2$ lediglich ca. 1/3 der auf den Rüttelstopfsäulen gemessenen Spannungen festgestellt. Die Spannungskonzentration beträgt somit $n_{\text{EG}} = p_{\text{Säule,EG}}/p_{\text{Boden,EG}} \approx 3,4$.
- 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 Bodeneigen- gewicht):

$\Delta p_{\text{Säule}} \approx 36 \text{ kN/m}^2$ infolge der Triebwagen (VT 628) mit 115 kN Radsatzlast und $\Delta p_{\text{Säule}} \approx 25 \text{ kN/m}^2$ infolge der Steuerwagen (VS 628) mit 80 kN Radsatzlast.

- Hingegen betragen die dynamischen Zusatzspannungen zwischen den Rüttelstopfsäulen nur $\Delta p_{\text{Boden}} \approx 5,7 \text{ kN/m}^2$ (VT 628) und $\Delta p_{\text{Boden}} \approx 4,0 \text{ kN/m}^2$ (VS 628).

Damit wurden hier lediglich ca. 16 % der auf den Rüttelstopfsäulen gemessenen Spannungen ermittelt. Die Spannungskonzentration beträgt $n = \Delta p_{\text{Säule}}/\Delta p_{\text{Boden}} \approx 6,3$.

Eine Ursache für die höhere Spannungskonzentration infolge dynamischer Belastung ist vermutlich die im Vergleich zum umgebenden Boden deutlich höhere Wasserdurchlässigkeit des Säulenmaterials. Dadurch können sich Spannungen in den Rüttelstopfsäulen schneller auf- und abbauen.

Eine weitere wesentliche Ursache ist die bei einer dynamischen Einwirkung veränderte Lastabtragung durch Wellenausbreitung. Hier wird möglicherweise bereits relativ viel Energie direkt über Kompressionswellen in die deutlich steiferen Rüttelstopfsäulen abgetragen. Bei homogenem Untergrund wird dagegen der größte Teil der Energie über Scher- und Rayleighwellen abgeleitet [9].

Insgesamt konnte durch die Langzeitmessungen für die Abschnitte mit Rüttelstopfsäulen festgestellt werden, dass durch die Ertüchtigung eine deutliche Erhöhung der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des mit Säulen verbesserten Bodenbereiches erzielt wurde.

Die verbleibenden Weichschichten zwischen den Säulen werden insbesondere bei dynamischer Belastung wirksam entlastet. Dieser positive Effekt zeigt sich letztendlich auch in einer stabilen Gleislage.

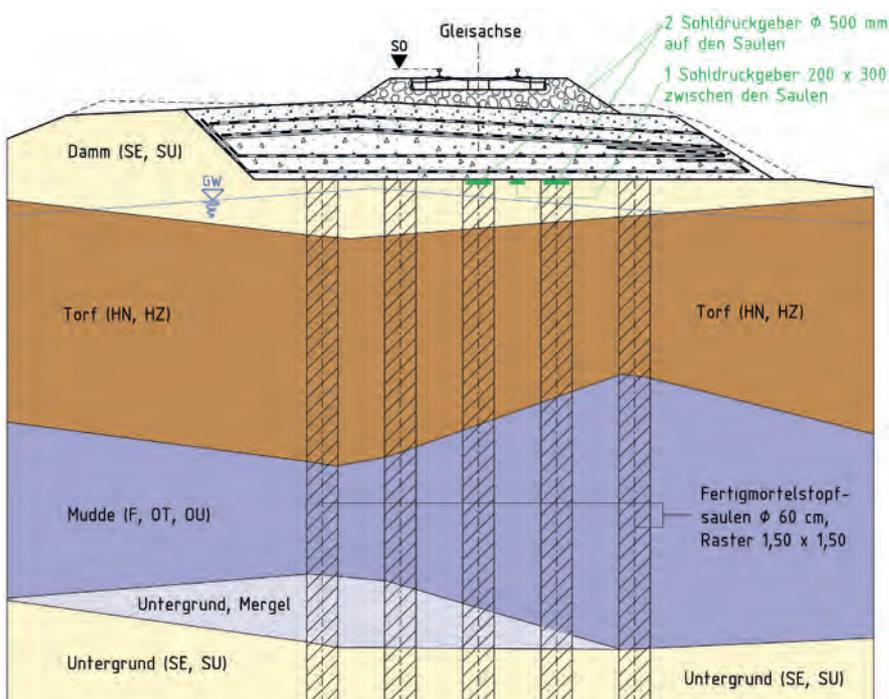


Abb. 6: Messquerschnitt MQ 3 km 102,500 mit geogitterbewehrtem Erdkörper auf Fertigmörtelstopfsäulen (FSS) mit Eintragung der Sohldruckgeber

Langzeitverhalten – Tiefgründung mit geogitterbewehrten Bodenkörpern auf Säulen

Eine Untergrundertüchtigung mit geogitterbewehrten Bodenkörpern auf bindemittelstabilisierten Säulen (Fertigmörtelstopfsäulen) erfolgte auf insgesamt 375 m Länge unter Anwendung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung [10] in der damals gültigen Fassung. In diesen Bereichen war aufgrund der deutlich mächtigeren Weichschichten von 3 bis 4 m Torf sowie 4 bis 5 m Mudde eine Untergrundverbesserung mit Rüttelstopfsäulen nicht mehr ausreichend. Auch hier wurden ein repräsentativer Querschnitt messtechnisch instrumentiert und Langzeitmessungen durchgeführt (Abb. 6). Für den Messquerschnitt in km 102,500 wurden die entsprechenden Nachweise der Tragfähigkeit (ULS) sowohl für das Gesamtsystem als auch für die einzelnen Bauteile (Fertigmörtelstopfsäulen und geogitterbewehrter Erdkörper), einschließlich des Nachweises der dynamischen Stabilität sowie der Gebrauchstauglichkeit (SLS) unter Zugrundelegung

Messort	auf Säule, 1,50 m neben Gleisachse			auf Säule, in Gleisachse			zwischen den Säulen		
	2007	2008	2015	2007	2008	2015	2007	2008	2015
Messkampagne	2007	2008	2015	2007	2008	2015	2007	2008	2015
Spannungen infolge Bodeneigengewicht	83	86	105	93	80	127	18	9,0	3,0
Spannungen infolge Triebwagen VT 628 (115 kN Radsatzlast)	17	17	17	37	27	41	5,0	4,7	5,3
		Ø 17			Ø 35			Ø 5,0	
Spannungen infolge Steuerwagen VS 628 (80 kN Radsatzlast)	15	11	10	29	17	27	4,5	2,6	3,3
		Ø 12			Ø 25			Ø 3,5	

Tab. 4: Bodendruckspannungen in [kN/m²] auf und zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen

der zum damaligen Zeitpunkt gültigen DIN-Normen sowie der EBGEO [11] in der damals vorliegenden Entwurfsfassung geführt.

Bei der inneren und äußeren axialen Tragfähigkeit der Säulen wird derzeit 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 [12].

Auch hier war es mit Hilfe der durchgeführten Langzeitmessungen möglich, diese Annahmen *praktisch* zu überprüfen. In Abb. 7 ist der gemessene Verlauf der Bodendruckspannungen infolge einer Zugüberfahrt dargestellt. Ergänzend dazu wurden in Tab. 4 die Bodendruckspannungen infolge Bodeneigengewicht sowie infolge der Verkehrslast auf und zwischen den Fertigmörtelstopfsäulen zusammengefasst.

Aus diesen Messergebnissen lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassen:

- Die Vertikalspannungen infolge Verkehrslast sind auf der Säule in Gleisachse am größten und betragen $\Delta p_{\text{Säule}} \approx 35 \text{ kN/m}^2$ (VT 628) und $\Delta p_{\text{Säule}} \approx 25 \text{ kN/m}^2$ (VS 628).
- Für die Säule mit 1,50 m Abstand zur Gleisachse sind die Vertikalspannungen infolge Verkehrslast in etwa halb so groß wie in Gleisachse. Sie betragen $\Delta p_{\text{Säule}} \approx 17 \text{ kN}$ (VT 628) und $\Delta p_{\text{Säule}} \approx 12 \text{ kN/m}^2$ (VS 628).
- Zwischen den Säulen wurden Vertikalspannungen infolge Verkehrslast $\Delta p_{\text{Boden}} \approx 5,0 \text{ kN}$ (VT 628) und $\Delta p_{\text{Boden}} \approx 3,5 \text{ kN/m}^2$ (VS 628) ermittelt. Sie sind damit deutlich geringer als die auf den Säulen gemessenen Werte. Zwischen den einzelnen Messkampagnen sind hier keine wesentlichen Unterschiede erkennbar.
- Die Vertikalspannungen infolge Bodeneigengewicht betragen auf den Säulen in den Messkampagnen der Jahre 2007 und 2008 $p_{\text{EG}} \approx 80 - 90 \text{ kN/m}^2$. Sie nahmen mit der Zeit auf $p_{\text{EG}} \approx 105 - 125 \text{ kN/m}^2$ (2015) deutlich zu.
- Hingegen zeigte der Sohldruckspannungsgeber zwischen den Säulen eine kontinuierliche Abnahme der Vertikalspannungen von $p_{\text{EG}} \approx 18 \text{ kN/m}^2$ (2007) über $p_{\text{EG}} \approx 9 \text{ kN/m}^2$ (2008) auf $p_{\text{EG}} \approx 3 \text{ kN/m}^2$ (2015).

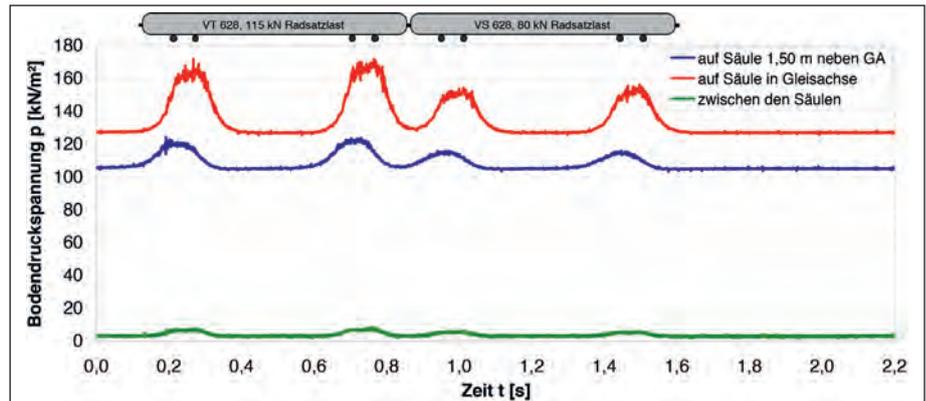


Abb. 7: Bodendruckspannungen infolge Überfahrt eines Reisezuges BR 628 mit ca. 110 km/h im Zeitbereich im MQ 3 km 102,500, 3. Messkampagne 2015

Die Vertikalspannungen infolge Bodeneigengewicht werden somit sehr konzentriert über die Säulen abgetragen. Die Spannungskonzentration $n_{\text{EG}} = p_{\text{Säule,EG}}/p_{\text{Boden,EG}}$ nimmt mit der Zeit deutlich zu. So erhöhte sich die Spannungskonzentration von $n_{\text{EG}} \approx 5$ (2007) über $n_{\text{EG}} \approx 10$ (2008) auf $n_{\text{EG}} \approx 40$ (2015). Die Spannungskonzentration infolge Verkehrslast auf den Säulen ist mit $n_{\text{dyn}} \approx 7$ (in Gleisachse) bzw. $n_{\text{dyn}} \approx 3,5$ (1,5 m neben der Gleisachse) jedoch deutlich geringer als infolge Bodeneigengewicht.

Ursache für die unterschiedliche Lastkonzentration ist das andersgeartete Tragverhalten: Bei einer zyklisch-dynamischen Belastung

müssen die Wellenausbreitung und das Wirken von Massenträgheitskräften beachtet werden. Wesentlich ist dabei vermutlich die um mehrere Zehnerpotenzen höhere Wasserdurchlässigkeit des umgebenden Bodens gegenüber dem hydraulisch gebundenen Säulenmaterial. Dadurch können sich die Spannungen im Boden schneller auf- und abbauen. Außerdem können sie dadurch bei kurzzeitigen Einwirkungen entsprechend größer sein.

Durch die Langzeitmessungen konnte bestätigt werden, dass die Vertikalspannungen zwischen den Säulen sehr gering sind und die Weichschichten deutlich entlastet sowie

- Gutachterliche Studien und Zuarbeiten**
 Beurteilung der Standsicherheit und der dynamischen Stabilität im Verkehrswegebau
 FE-Modellierung, Verformungs-, Konsolidierungs- und Setzungsberechnung
 Baugrundbegutachtung und Gründungsberatung
- Objekt- und Tragwerksplanung**
 Verkehrs- und Tiefbau
 Spezialtiefbau, Untergrundertüchtigung im Verkehrswegebau
 Stützbauwerke, Bauweisen mit Geokunststoffen
- Baubetreuung**
 Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen
 Messtechnische Überwachung
 Abfallrechtliche Betreuung
 Bauüberwachung

Gepro
 Ingenieurgesellschaft für Geotechnik
 Verkehrs- und Tiefbau und Umweltschutz mbH
 Caspar-David-Friedrich-Straße 8
 01219 Dresden
 Tel. 0351 / 877 75 - 0
 Fax 0351 / 877 75 - 55
 Internet: www.gepro-dresden.de E-Mail: info@gepro-dresden.de

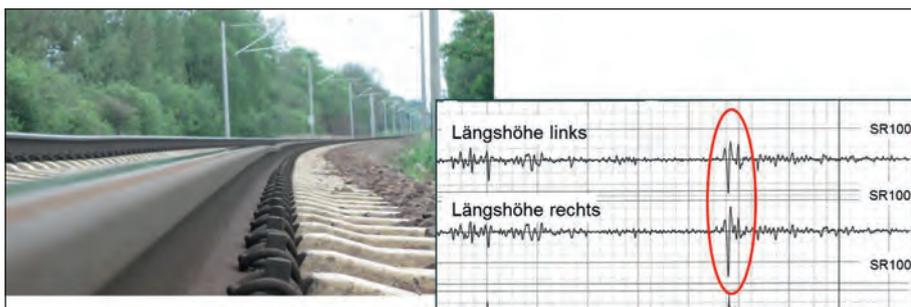


Abb. 8: Gleislagefehler durch unzureichende Ausbildung eines Übergangsbereiches zwischen benachbarten Untergrundertüchtigungen

die Spannungen konzentriert über die Säulen abgetragen werden.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass es zu keiner Zunahme der Spannungen auf der Weichschicht nach ca. 8,5 Jahren Eisenbahnbetrieb bzw. nach ca. drei Millionen Achsübergängen gekommen ist, die auf einen Abbau des Bodengewölbes hindeuten würden.

Im untersuchten Messquerschnitt beträgt die Bodenüberdeckung lediglich $h_b = 1,20$ m. Bei einem Pfahlabstand von $s = 1,50$ m ergibt sich somit das Verhältnis $h_b/s = 0,80$. Bei einem derartig geringen Verhältnis von Überdeckung zu Säulenabstand ($h_b/s \leq 1,5$) wurde in Modellversuchen [13] ein Abbau des Bodengewölbes infolge zyklisch-dynamischer Belastung beschrieben. Dieses Phänomen konnte bei den durchgeführten Langzeitmessungen nicht beobachtet werden. Unter den konkreten Bedingungen des Projektes konnte auch bei der geringen Bodenüberdeckung eine „gewölbeartige“ Einleitung der Lasten über die geokunststoffbewehrten Bodenkörper sowie die geogitterbewehrte Tragschicht in die Säulen festgestellt werden und nachgewiesen werden, dass eine lastverteilende Wirkung dauerhaft gegeben ist.

Zusammenfassung und Ausblick

Im Zusammenhang mit geplanten Belastungs- und Geschwindigkeitserhöhungen muss untersucht werden, inwieweit bei einer Streckenführung über organische Weichschichten die Erdbauwerke in der Lage sind, den zukünftigen Anforderungen an Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu genügen. Ein wichtiges Mittel zur Beurteilung dieser Bestandsbauwerke ist die Planungshilfe Weichschichten [3]. Neben der Sicherung von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bzw. dynamischer Stabilität kann sich zusätzlich ein Handlungsbedarf aus dem Erfordernis geometrischer Anpassungen ergeben.

Zur Erreichung dieser Zielstellung stehen dem Planer neben einer Erhöhung der Widerstände im Baugrund durch tiefgründige oder gleisnahe Ertüchtigungen zusätzliche Möglichkeiten, wie die Verminderung der statischen und dynamischen Einwirkungen aus

dem Eisenbahnverkehr, aber auch die Überwachung bzw. das Monitoring zur Verfügung. Für die Ertüchtigung des Untergrundes gibt es eine Vielzahl von bautechnischen Verfahren. Um aus diesen für das konkrete Bauvorhaben geeignete Fahrweggründungen herausarbeiten zu können, sind u. a. die Wirkungsweise, geeignete Bodenarten sowie die Vor- und Nachteile des jeweiligen Verfahrens zu beachten. Aber auch weitere Aspekte, wie das „Bauen unter dem rollenden Rad“ sowie der Lärm-, Erschütterungs- und Naturschutz müssen bei der Wahl der Fahrweggründung berücksichtigt werden.

Durch Langzeitmessungen über einen Zeitraum von 8,5 Jahren konnten insbesondere für Rüttelstopfsäulen und geokunststoffbewehrte Bodenkörper auf Fertigmörtelstopfsäulen die Wirkung im Langzeitverhalten unter Eisenbahnbetrieb näher untersucht und neue Erkenntnisse zum Tragverhalten abgeleitet werden.

Eine Problematik muss zukünftig im Prozess der Planung und Bauausführung im Hinblick auf eine stabile Gleislage stärker Beachtung finden: Es ist wichtig, sich intensiver mit der Gestaltung der Übergangsbereiche zwischen verschiedenen Fahrweggründungen (z. B. zwischen Bodenaustausch und Fer-

tigmörtelstopfsäulen), aber auch zwischen Erdbauwerken und Kunstbauwerken (z. B. zwischen Tiefgründung der EÜ und Damm auf Weichschichten) auseinanderzusetzen. Außerdem muss der teilweise beobachtete „Durchstanzeffekt“ hochliegender Durchlässe vermieden werden.

Zielstellung sollte hier eine Vergleichmäßigung der Gleissteifigkeit in Längsrichtung sein, um Gleislagefehler, wie exemplarisch in Abb. 8 dargestellt, zukünftig zu vermeiden. ■

QUELLEN

- [1] Göbel, C.; Lieberenz, K. (Hrsg.): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, DVV Media Group GmbH / Eurailpress, Hamburg, 2013.
- [2] DB Netz AG: Richtlinie 836; Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten, 01.02.2013.
- [3] DB Netz AG: Planungshilfe für Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten. Qualitative Beurteilung der dynamischen Stabilität des Eisenbahnfahrwegs bei Zugüberfahrt, Stand 20.08.2013.
- [4] Wegener, D.; Weisemann, U.; Neidhart, T.; Neumann, G.: Ertüchtigung von Eisenbahnstrecken auf Weichschichten, DER EISENBAHNINGENIEUR 59 Heft 12/2008, S. 34 - 42.
- [5] Wegener, D.; Fischer, R.: Langzeitmessungen zur dynamischen Stabilität bei ausgewählten Strecken auf Weichschichten, DER EISENBAHNINGENIEUR Sonderheft Geotechnik (2016).
- [6] Priebe, H.J.: Die Bemessung von Rüttelstopfsäulen, Die Bautechnik 72 Heft 3/1995, S. 380 - 384.
- [7] Priebe, H.J.: Zur Bemessung von Rüttelstopfverdichtungen, Anwendung des Verfahrens bei extrem weichen Böden, bei schwimmenden Gründungen und beim Nachweis der Sicherheit gegen Gelände- oder Böschungsbruch, Die Bautechnik 80, Heft 6/2003, S. 380 - 384.
- [8] Wegener, D.; Weisemann, U.; Kipper, R.: Praxisbeispiele zum Tragverhalten von pfahlartigen Traggliedern und Bodenverbesserungen, Tagungsband zum 8. Freiburger Geotechnik Kolloquium, Herausgeber: Tamaskovics, N., TU Bergakademie Freiberg, S. 107-118.
- [9] Richart, F.E.; Hall, J.R.; Woods, R.D. (1970): Vibrations of Soils and Foundations. Civil Engineering and Engineering Mechanics Series, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- [10] Deutsches Institut für Bautechnik: 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.
- [11] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik: Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen - EBGE0, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 2. Auflage 2010.
- [12] Kempfert H. G.; Stadel, M.: Zum Tragverhalten geokunststoffbewehrter Erdbauwerke über pfahlähnlichen Traggliedern, 4. Informations- und Vortragsveranstaltung über Kunststoffe in der Geotechnik, Sonderheft Geotechnik 1995, S.146 - 152.
- [13] Heitz, C.: Bodengewölbe unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Berücksichtigung von Bewehrungseinlagen aus Geogittern, Dissertation, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 19, 2006.



Prof. Dr.-Ing. Ulrike Weisemann

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen/Architektur Lehrgebiet Eisenbahnbau
weisemann@htw-dresden.de



Dr.-Ing. Dirk Wegener

Projektingenieur
Gepro Ingenieurgesellschaft mbH Dresden
dirk.wegener@gepro-dresden.de