

# **Geogitter und Stopfsäulen**

**Dipl.-Ing. Steffen Tost**

BAUGRUND DRESDEN Ingenieurgesellschaft

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert**

Institut für Geotechnik und Geohydraulik Universität Kassel

**Dipl.-Ing. Frank Brünger**

Wittfeld GmbH

**Die geplante Geschwindigkeitserhöhung und die unruhige Gleislage eines etwa 13 km langen Abschnittes der Bahnstrecke Hamburg–Berlin machten eine Ertüchtigung des Fahrweges, bestehend aus teilvermörtelten Stopfsäulen und darüberliegender geogitterbewehrter Kiessandschicht, notwendig. Der Umbau wurde im Rahmen einer Totalsperrung innerhalb von 2 1/2 Monaten im Sommer 2003 durchgeführt. Vorangegangen waren entsprechende Ursachenklärungen, numerische Untersuchungen und eine erfolgreiche großmaßstäbliche Erprobung eines verbesserten Tragsystems unter Verkehr. Ergebnisse der messtechnischen Beobachtung des hergestellten Fahrweges belegen die Wirksamkeit der durchgeführten Ertüchtigung.**

## **1 Ausgangssituation und Problemstellung**

In der Ausbaustrecke (ABS) Hamburg–Berlin liegt nordwestlich von Berlin zwischen den Ortschaften Paulinenaue und Friesack ein Abschnitt mit geologisch schwierigem Untergrund. Er ist etwa 13 km lang und durchquert das Havelländische Luch mit mächtigen organogenen Bildungen im Untergrund (Bild 1).

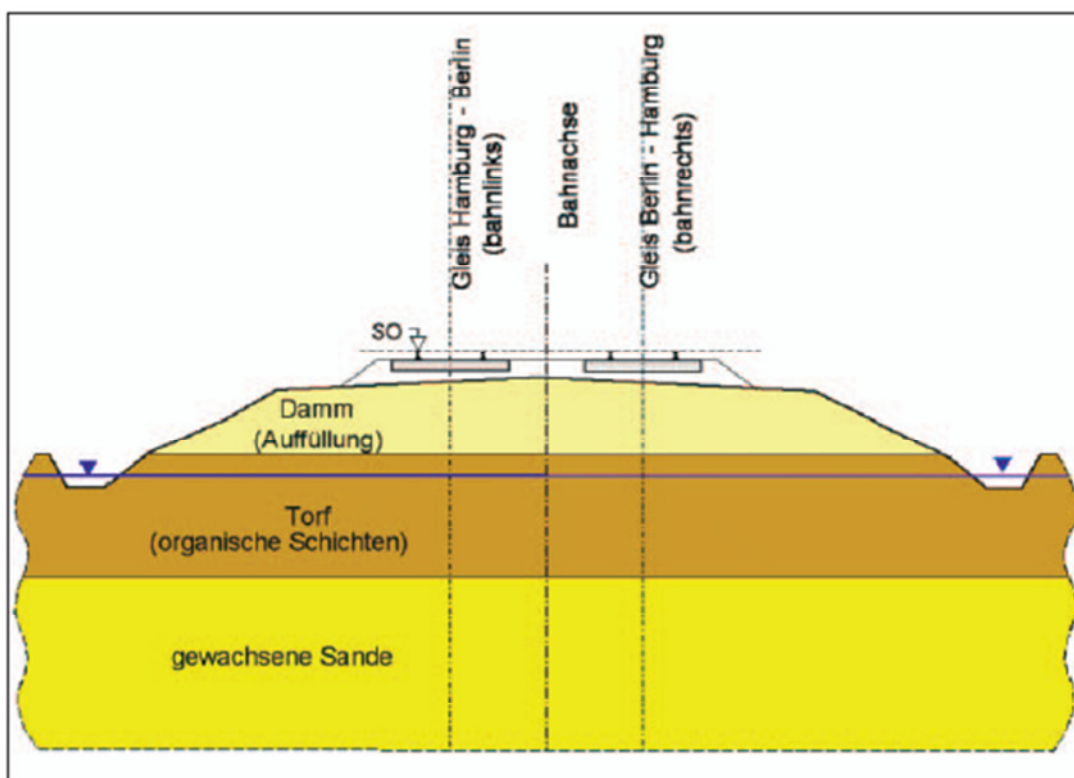
Über den gewachsenen, gleichförmigen, meist mitteldicht gelagerten Sanden stehen überwiegend Torfe, teilweise Mudden und Faulschlamm mit Mächtigkeiten von bis zu 6,5m an. Darüber wurde Mitte des 19. Jahrhunderts der 2m bis 3m hohe Bahndamm mit dem Schottergleis errichtet.

Der Bahndamm bestand aus meist locker gelagerten, enggestuften Sanden. Das Grundwasser steht hoch, d. h. meist geländegleich bis in Höhe des Dammfußes an.

Im Zuge der 1. Ausbaustufe Mitte der 90er Jahre wurden zur Ertüchtigung des Untergrundes u. a. teilvermörtelte Stopfsäulen (TVSS) mit einer im Kopfbereich aus einem geogitterbewehrten Kiessand bestehenden Verbundschicht ausgeführt.

Auch nach dieser Maßnahme stellte sich keine befriedigend stabile Gleislage ein, so dass auch weiterhin ein erhöhter Instandhaltungsaufwand für den betreffenden Bereich zu verzeichnen war.

Dieser Zustand, vor allem aber die geplante Erhöhung der Geschwindigkeit waren Anlass, die Ursachen der nicht stabilen Gleislage zu klären und ein verbessertes, stabiles Tragsystem, möglichst unter Einbeziehung des vorhandenen Tragschichtaufbaus zu entwickeln.



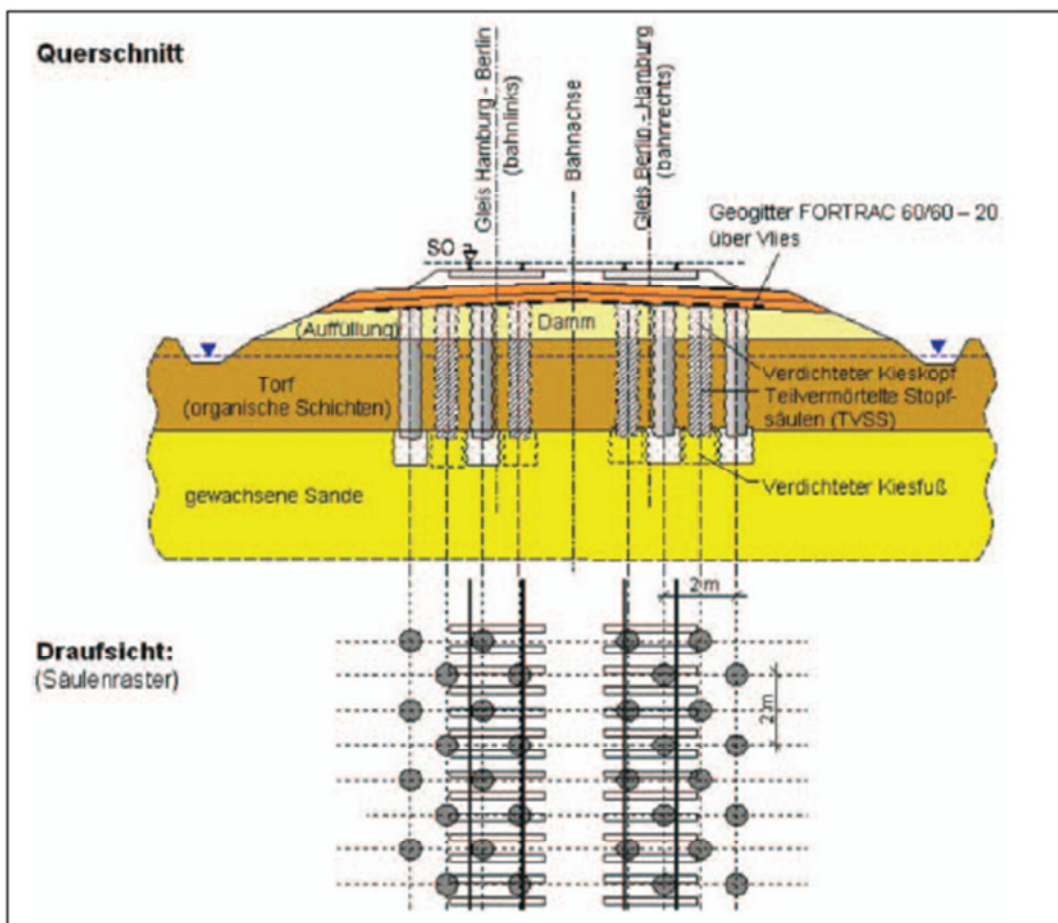
**Bild 1** Typische Baugrundsituation vor der 1. Ausbaustufe

## 2 Tragschichtaufbau der 1. Ausbaustufe

Nach den Unterlagen ergab sich unter den Gleisen der in Bild 2 dargestellte Tragschichtaufbau (siehe auch [1]).

Die Umbauarbeiten Mitte der 90er Jahre (1. Ausbaustufe) erfolgten bei einseitiger Gleissperrung. Nach Einbringen des Mittenverbau als Berliner Verbau, Gleisrückbau und Bodenabtrag bis auf eine Arbeitsebene bei ca. 1,0m unter SO wurden pro Gleis 4 TVSS-Reihen hergestellt. Dabei sollten die Säulen mit einem Durchmesser von etwa 0,6m die organischen Schichten durchteufen und in die gewachsenen Sande, mit gleich-

zeitiger Ausbildung eines verbreiterten und verdichteten Kiesfußes, einbinden. Die Vermörtelung der Säulen sollte bis zur Oberkante der organischen Schichten reichen. Im Dammbereich war bis zur Unterkante des Erdplanums (EPL) ein Kieskopf herzustellen. Darüber wurde eine ca. 0,6m dicke, mit einer 1-lagigen Geogitterbewehrung versehene, mineralische Tragschicht angeordnet, die gleichzeitig die Aufgabe einer Planumschutzschicht (PSS) bzw. Frostschutzschicht (FSS) zu erfüllen hatte. Als Geogitter wurde ein über einem Vlies angeordnetes biaxiales Gitter mit einer Höchstzugkraft von 60 kN/m verwendet. Die einzelnen Geogitterbahnen wurden längs unter dem jeweiligen Gleis, ohne Ausführung einer Überlappung im Bahnachsbereich verlegt. Der eingebrachte Mittenverbau wurde vollständig entfernt.



**Bild 2** Querschnitt und Draufsicht nach der 1. Ausbaustufe

Aus der in Bild 2 dargestellten Draufsicht des Systems wird deutlich, dass in Bahnachse wegen des Mittenverbaus technologisch bedingt keine TVSS vorhanden sind.

### 3 Untersuchung und Erprobung eines verbesserten Tragsystems

Zur Ursachenermittlung der unruhigen Gleislage und zur möglichen Optimierung des Tragsystems wurden auf der Grundlage des Tragschichtaufbaus der 1. Ausbaustufe u. a. Berechnungen mittels FEM vorgenommen.

Die Untersuchungen des Istzustandes führten zu dem Ergebnis, dass das vorhandene System nicht den zukünftigen, erhöhten Anforderungen genügt. Daraufhin wurden Variantenuntersuchungen auf der Grundlage von Berechnungen mit 3D Finite-Elemente-Modellen durchgeführt. Dabei wurden Tragschichtdicke sowie Anzahl und Steifigkeit der Geogitter über den TVSS variiert. Im Ergebnis ergab sich als Erfolg versprechende Ertüchtigungsvariante ein 3-lagig bewehrtes mineralisches Tragschichtsystem mit zugfesten Geogittern. Es besitzt folgende Hauptmerkmale:

- Anordnung eines dauerhaft verbleibenden Mittenverbau,
- Teilweiser Abtrag des Unterbaus und Einkürzen der TVSS als vorbereitende Maßnahmen für die Herstellung eines verstärkten Tragsystems aus hochscherfesten Kiessand-Material,
- Bewehrung der Kiestragschicht mit 3 Lagen zugfesten Geogittern, die kraftschlüssig an den Mittenverbau angeschlossen und im Außenbereich verankert werden.

Durch den Anschluss der Geogitter an den dauerhaft verbleibenden Mittenverbau sollte eine in Streckenquerrichtung durchgehende Bewehrungswirkung erreicht werden.



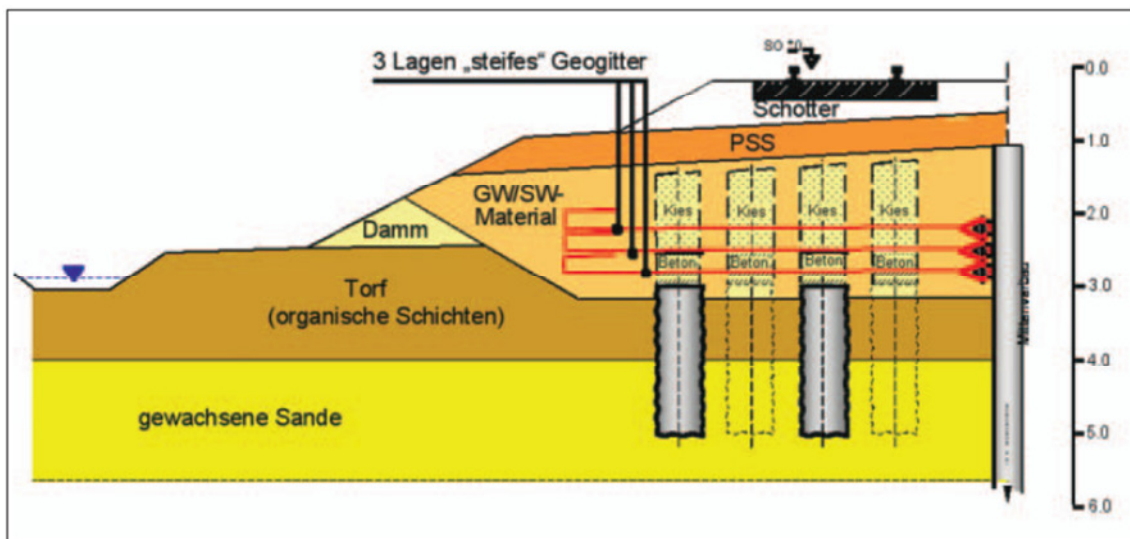
**Bild 3** Großschurf im Sommer 2001; eingepresste Spundwände und freigelegtes Geogitter,

Zur Feststellung des Zustandes des vorhandenen Unterbaus wurde u. a. im Sommer 2001 ein ca. 50 m langer Großschurf unter einem gesperrten Betriebsgleis ausgeführt (siehe Bild 3). Der Wiederaufbau der Strecke im Bereich des Großschurfes erfolgte mit

dem o. g. ertüchtigten Tragsystem als Versuchsabschnitt. Gleichzeitig wurde dieser Versuchsabschnitt messtechnisch instrumentiert, um die Verformungen des Ober und Unterbaus sowie die dynamischen Einwirkungen erfassen zu können. Der so hergestellte Versuchsabschnitt wurde über einen Zeitraum von ca. 15 Monaten unter Verkehr messtechnisch überwacht.

Detaillierte Ausführungen zum vorgefundenen Zustand des Tragschichtsystems der 1. Ausbaustufe und zur messtechnischen Beobachtung mit den jeweiligen Ergebnissen sind in [2] enthalten.

Im Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass das in der 1. Ausbaustufe hergestellte Tragsystem für zukünftige Anforderung nicht ausreichend lastverteilend und tragfähig ist und demzufolge ertüchtigt werden musste. Die durchgeführten messtechnischen Beobachtungen an dem Versuchsabschnitt bestätigten, dass eine Nutzung der vorhandenen und teilweise ertüchtigten Säulen in Kombination mit einem verstärkten darüber liegenden Tragsystem zur Herstellung eines den zukünftigen Anforderungen genügenden Fahrweges möglich ist.



**Bild 4** Regelquerschnitt der Ausschreibung zur Tragsystemertüchtigung

#### 4 Ausgeführtes Tragsystem

Gemäß der allgemein üblichen Bauweise mit Sperrung eines Gleises bei 1-gleisiger Betriebsführung sah die Ausschreibung zunächst die Anordnung des bereits erwähnten dauerhaft verbleibenden Mittenverbaues vor. Es sollte deshalb das in der Versuchsstrecke erprobte Tragsystem ausgeführt werden (siehe Bild 4).

Die schließlich ausgeführte technische Lösung ging von einer Streckenvollsperrung aus. Bei dieser Variante, die als Nebenangebot der Arbeitsgemeinschaft ABS Hamburg –

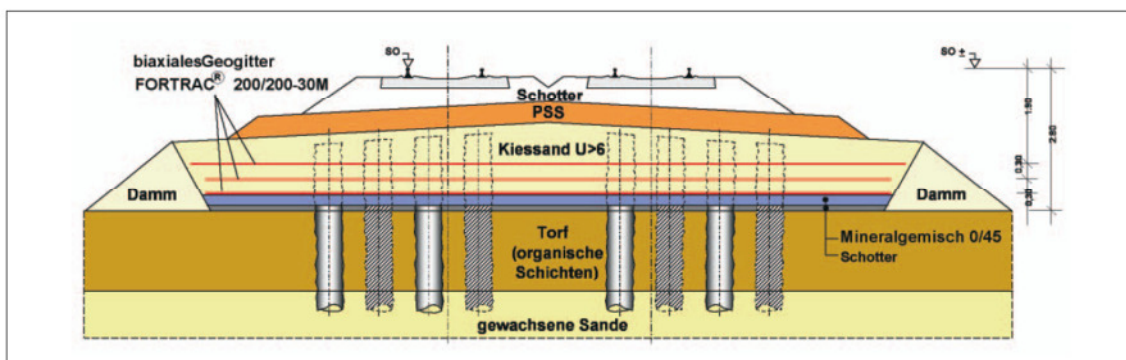


Berlin PRA 1 Spandau–Neustadt vorgeschlagen wurde, konnte eine Streckenertüchtigung mit quer zur Streckenachse durchlaufenden Geogittern ohne Mittenverbau erreicht werden. Weiterhin wurde im Unterschied zur ursprünglichen Lösung das geplante Abtragsniveau von -3,2m auf -2,7m unter Schienenoberkante (SO) zur weitgehenden Vermeidung von bauzeitlichen Eingriffen in das Grundwasser angehoben.

Im Ergebnis der fachtechnischen Planungen des modifizierten Tragsystems auf der Grundlage von [3] und weiterer numerischer Berechnungen sowie umfangreicher Laboruntersuchungen wurde in der Ausführungsplanung folgender Tragschichtaufbau festgelegt (siehe Bild 5):

- Abtrag mit Freilegen der Pfähle des bestehenden Unterbaus auf -2,7m unter SO und anschließender schonender Kürzung der Pfähle.
- Einbringen von Schotter als Stüttschicht im Pfahlkopfbereich in Abhängigkeit von dem im Aushubbereich anstehenden Bodenschichten.
- Einbau einer 0,2m dicken Tragschicht aus gebrochenem Mineralgemisch der Körnung 0/45 mit einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 0,95$ .
- Anordnung von 2 Lagen eines zugfesten Geogitters bei -2,5m und -2,2m unter SO mit einer dazwischen liegenden, 0,3 m dicken Bodenschicht aus GI-Material mit einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 0,97$  (1. Lage) bzw.  $D_{Pr} \geq 1,0$  (alle übrigen Lagen bis zum Erd-planum) zur Gewährleistung eines Reibungswinkels von  $\phi' \geq 37,5^\circ$ .
- Vervollständigung des Unterbaus mit GI-Material und Einbau einer 0,4m dicken PSS aus KG 1 nach DB AG BN 918 062 mit einem Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 1,0$ .

Für die Tragfähigkeiten waren die teilweise erhöhten Anforderungen gemäß Ril 836.0501, Bild A 1.13 einzuhalten.



**Bild 5** Querschnitt des ausgeführten Tragsystems

Wegen der Höherlegung des Abtragsniveau war es notwendig, die gemäß den vorangegangenen Untersuchungen zu erwartende größere Anzahl von nicht vermörtelten Säulenköpfen durch sog. Ausfallszenarien zu berücksichtigen. Bei diesen Ausfallszenarien

war u. a. vorgesehen, in Abhängigkeit des vorgefundenen Zustandes der Säulen eine weitere 3. Lage eines zugfesten Geogitters anzuordnen.

Die Bemessung der Geogitter erfolgte auf Grundlage von [3] und dem sich anzeichnenden Entwurf der neuen EBGEO [4]. Die Lastumlagerung auf die Pfahlelemente bei gleichzeitiger Entlastung der Weichschicht (Torf) wird hierbei durch ein Gewölbemodell berücksichtigt, aus dem auch die Beanspruchung der Geogitter nach [3] abzuleiten ist.

Für das Dammmaterial und den verwendeten Geokunststoff wurden in einem umfangreichen Laborversuchsprogramm an der Universität Kassel die für die erdstatischen Berechnungen notwendigen Rechenwerte der Bodenkenngrößen und der Geogitter-Verbundparameter bestimmt.

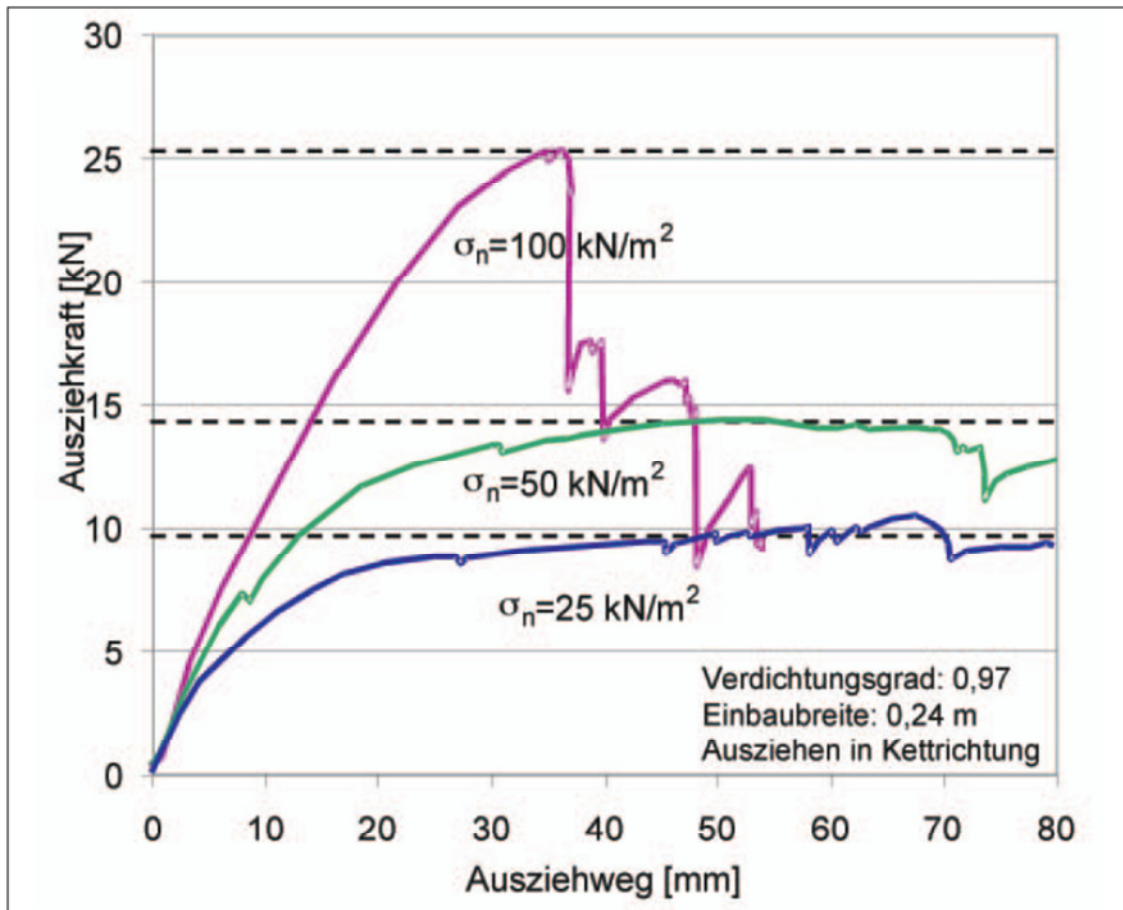
Bild 6 zeigt den hierbei insbesondere zur Anwendung gekommenen Großrahmenscherversuchsstand (Abmessungen der Scherfläche 58 cm x 36,5 cm), mit dem es möglich war, das teilweise grobkörnige Dammmaterial definiert einzubauen und ohne Störeinflüsse abzuscheren.



**Bild 6** Großrahmenscherversuchsstand – Konfiguration für die Herauszieh- und Überlappungs-Versuche

Weiterhin wurden die Verbundparameter zur Berücksichtigung des Interaktionsverhaltens zwischen Geokunststoff und Füllboden sowie zwischen Geokunststoff und Geokunststoff experimentell bestimmt. Das Verbundverhalten der Geokunststoffe wurde für verschiedene Einbauverdichtungsgrade von  $D_{Pr} = 0,97$  und  $D_{Pr} = 1,00$  sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung mittels Herauszieh- und Überlappungsversuchen untersucht (siehe Bild 7). Infolge der großen Abmessungen des Scherkastens waren Einbaubreiten des Geogitterstreifens von bis zu 24 cm möglich (siehe Bild 6).

Der Abminderungsfaktor A1 zur Berücksichtigung von Kriecheinflüssen konnte aus den für das Geokunststoffmaterial vorliegenden Isochronen mit  $A1 = 1,60$  für einen Zeitraum  $t$  von 120 Jahren im Bruchzustand entnommen werden. Durch Zugversuche sowohl in Kett- als auch in Schussrichtung an neuen, unbeschädigten Geogittern sowie an durch Einbau vorgeschädigten Geogitterproben wurde der Abminderungsfaktor A2 zur Berücksichtigung der Einbaubeschädigung im Mittel mit  $A2 = 1,095$  nachgewiesen.



**Bild 7** Exemplarisches Versuchsergebnis: Heraus-ziehversuch für  $D_{Pr} = 0,97$

Im Ergebnis der Bemessungen wurde ein biaxiales Geogitter vom Typ FORTRAC“ R 200/200-30M aus PVA mit einer geringen Bruchdehnung verwendet.



Zusätzliche Verankerungsmaßnahmen der einzelnen Geogitterlagen im Dammaußenbereich erfolgten nicht, d. h. die einzelnen Geogitterlagen laufen flach aus. Zugkräfte in der Bewehrung werden allein durch Reibung im Böschungsbereich abgetragen. Die einzelnen ca. 14 m langen Geogitterbahnen wurde quer zum Gleis mit einer Überlappung der einzelnen Geogitterbahnen von 1,0m verlegt.

Der Ausfall oder das Nichtvorhandensein einer einzelnen Säule konnte anhand der numerischen Berechnungen dann als unkritisch nachgewiesen werden, wenn eine zusätzliche 3. Geogitterlage eingebaut wird. Bei Ausfall mehrerer benachbarter Säulen war gemäß Ausführungsplanung in Abhängigkeit von der vorhandenen Mächtigkeit der organischen Schichten der Einbau von teilweise verfüllten Stahlrohren bzw. ein Bodenaustausch vorgesehen.

Für die Bauausführung und deren Überwachung wurden in einem speziellen Qualitätssicherungssystem die einzelnen Arbeitsschritte und die zu verwendenden Baustoffe detailliert festgelegt, ebenso die notwendigen Eignungs- und Güteprüfungen.

Für das Ertüchtigungsverfahren mit einem geogitterbewehrten Erdkörper auf Säulen erteilte das Eisenbahnbundesamt (EBA) eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE).



**Bild 8** Schonendes Kürzen der TVSS

## 5 Streckenumbau

Der Umbau erfolgte im Rahmen einer Streckenvollsperrung innerhalb von 76 Tagen vom 14.07.2003 bis zum 27.09.2003. Die Streckenertüchtigung wurde im Zweischichtsystem rund um die Uhr und an 7 Tagen in der Woche mit insgesamt 10 Bauspitzen bewältigt. Aufgrund planrechtlicher Einschränkungen konnten fast keine streckenparallelen Baustraßen angelegt werden. Die Materialzufuhr und -abfuhr erfolgte direkt über die Eisenbahnstrecke.



**Bild 9** Abtragsniveau bei -2,7 m unter SO

Im gesamten Umbaubereich wurde auf einer Streckenlänge von ca. 8,8 km das geogitterbewehrte Tragsystem hergestellt. Insgesamt wurden dazu ca. 37000 TVSS während der Umbaumaßnahme freigelegt und entsprechend vorgesehener Tieferlegung ihrer Oberkante gekürzt (siehe Tafel 1 und Bild 8 bis Bild 10).

Die Kürzung der TVSS erfolgte mit eigens dafür entwickelten und im Vorfeld erprobten „Säulenknackern“ (Bild 8). In Bereichen mit geringer Mächtigkeit der organischen Schichten wurde ein klassischer Bodenaustausch durchgeführt, um den Verbleib von kurzen TVSS-Stücken im Untergrund zu vermeiden.

Zur Spitzenzeit waren rund 450 Mitarbeiter der ARGE in den verschiedenen Gewerken rund um die Uhr tätig, um die Arbeiten in der 76-tägigen Sperrzeit pünktlich fertig zu stellen.

<b>Sperrzeit:</b> 76 Tage	Vollsperrung beider Gleise
<b>Rückbau:</b> 23 km 23 km 45.000 m <sup>3</sup> 115.000 m <sup>3</sup> 135.000 m <sup>2</sup> 150.000 m <sup>3</sup> 60.000 m <sup>3</sup> 37.000 Stck.	Rückbau der Oberleitung (Fahrdrabt und Trageil) Gleisrückbau in 6 Tagen Rückbau des Altschotters Rückbau der FSS und PSS Rückbau der Geogitter Rückbau des Bahndamms Ausbau des Torfes / der Mudde Kürzen der Stopfsäulen
<b>Neuaufbau:</b> 85.000 to 410.000 m <sup>2</sup> 400.000 to bau 130.000 to 50.000 to 23 km 23 km	Einbau von Mineralgemischen Einbau der Geogitter Herstellung und lagenweiser Einbau Dammschüttstoff/Kiestragschicht Herstellung und Einbau der Planumsschutzschicht Einbau des Schotters Gleiseinbau inkl. Stopf- und Richtarbeiten Montage der Oberleitung

**Tafel 1** Der TVSS-Bereich in Zahlen

Baubegleitend erstellte die bauausführende ARGE neben der üblichen Dokumentation zu den Ergebnissen der erdbautechnischen Prüfungen eine umfangreiche Dokumentation zur vorhandenen Säulensituation (siehe Bild 11). Sie bildete die Grundlage für die tägliche Entscheidung, ob die laut Ausführungsplanung vorgesehene Regellösung mit 2 Lagen Geogitter oder die Lösung mit 3 Lagen Geogitter bzw. Sondermaßnahmen entsprechend den Festlegung für Ausfallszenarien auszuführen ist.

Die bauausführende ARGE schlug dazu die jeweilige Tragschichtgestaltung auf der Grundlage der Empfehlungen ihres Geotechnischen Sachverständigen vor. Dieser Vorschlag wurde dann durch die Bauüberwachung bzw. den Bauherren auf der Grundlage der Empfehlung des Geotechnischen Sachverständigen des Bauherren bestätigt oder andernfalls in Abstimmung mit allen Beteiligten abgeändert.

Die Kiestragschicht musste aufgrund des festgestellten Zustandes der Säulen durchgängig 3-lagig mit Geogittern vom Typ FORTRAC® R 200/200-30M bewehrt werden. Insgesamt wurden 120 teilverfüllte Stahlrohre eingebaut, davon 70 Stück in einem Sonderbereich von 2 Brückenwiderlagern.





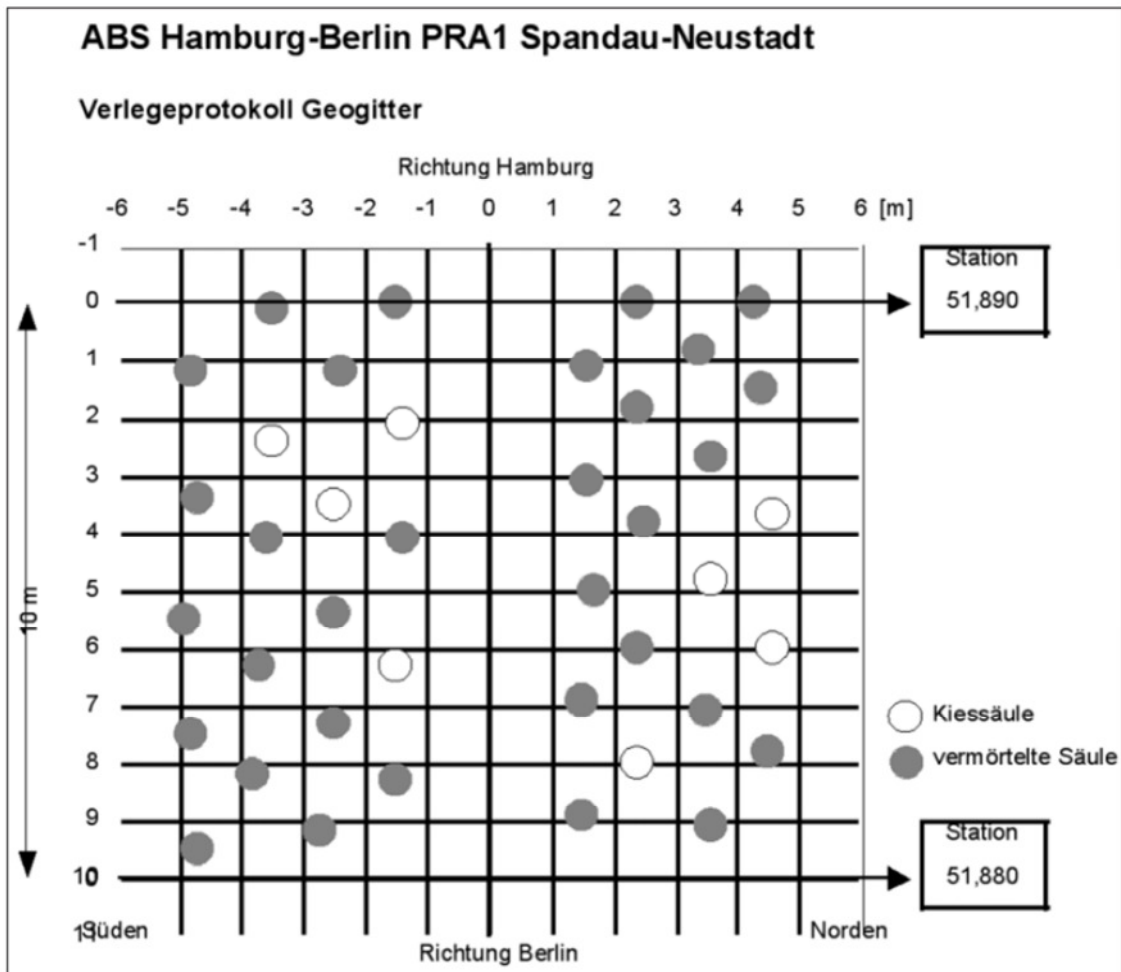
**Bild 10** Einbau von Geogittern zwischen Paulineaue und Friesack  
(Quelle: DB AG)

Die Gütenachweise bestätigten für die über den TVSS eingebaute Mineralschicht der Körnung 0/45 Verdichtungsgrade von  $D_{Pr} \approx 1,0$  (Mittelwert aus ca. 190 Prüfungen), die somit über den Anforderungen der Planung lagen. Für den darüber hergestellten Damm einschließlich der PSS konnte der laut Planung geforderte Verdichtungsgrad von  $D_{Pr} \geq 0,97$  bzw.  $D_{Pr} \geq 1,0$  anhand von ca. 580 Prüfungen (ohne Berücksichtigung von ca. 100 statischen Plattendruckversuchen) im Mittelwert bei  $D_{Pr} \approx 1,1$  ebenfalls nachgewiesen werden. Damit wurden aufgrund der gleichzeitig einzuhaltenden Materialanforderungen (Kontrolle durch Kornverteilung) die im Vorfeld ermittelten und in den Berechnungen angesetzten Parameter gewährleistet. Bei den Tragfähigkeitsnachweisen mit dem Leichten Fallgewichtsgerät (ca. 1200 Einzelversuche) konnten die geforderten Güteparameter ebenfalls sicher nachgewiesen werden [5].

## 6 Messtechnische Beobachtung nach Wiederinbetriebnahme

Zur Bestätigung der langfristigen Gebrauchstauglichkeit des Tragsystems wurden parallel zu den Umbauarbeiten an 3 ausgewählten Querprofilen Messquerschnitte (MQ) hergestellt. Nach Abschluss der Umbaumaßnahmen werden je Messquerschnitt folgende Messungen durchgeführt:

- Verformungsmessungen an den Schienen und an Setzungspegeln mittels Feinnivellement,
- linienförmige Verformungsmessungen mittels Horizontalinklinometer oberhalb der Geogitter (UK PSS bzw. OK Bewehrung) in 2 Inklinometerrohren und unterhalb (OK Säulen) der 3 Geogitterlagen in 4 Inklinometerrohren (2 Rohre über den Säulen, 2 Rohre zwischen den Säulen) und
- geodynamische Messungen in 4 unterschiedlichen Höhenlagen (OK Schwelle, im EPL, OK TVSS und im Torf).



**Bild 11** Ausschnitt aus der Dokumentation des Säulenrasters bei -2,7 m unter SO als Entscheidungsgrundlage für die Herstellung des Tragsystems

Nach erfolgter Nullmessung begannen die Messungen unter Betriebsbelastung nach Wiederinbetriebnahme im September 2003. Dabei wurden vereinzelt auch Überfahrten mit 230 km/h registriert. In Tafel 2 sind die in diesem Zeitraum gemessenen Setzungen zusammengefasst dargestellt.

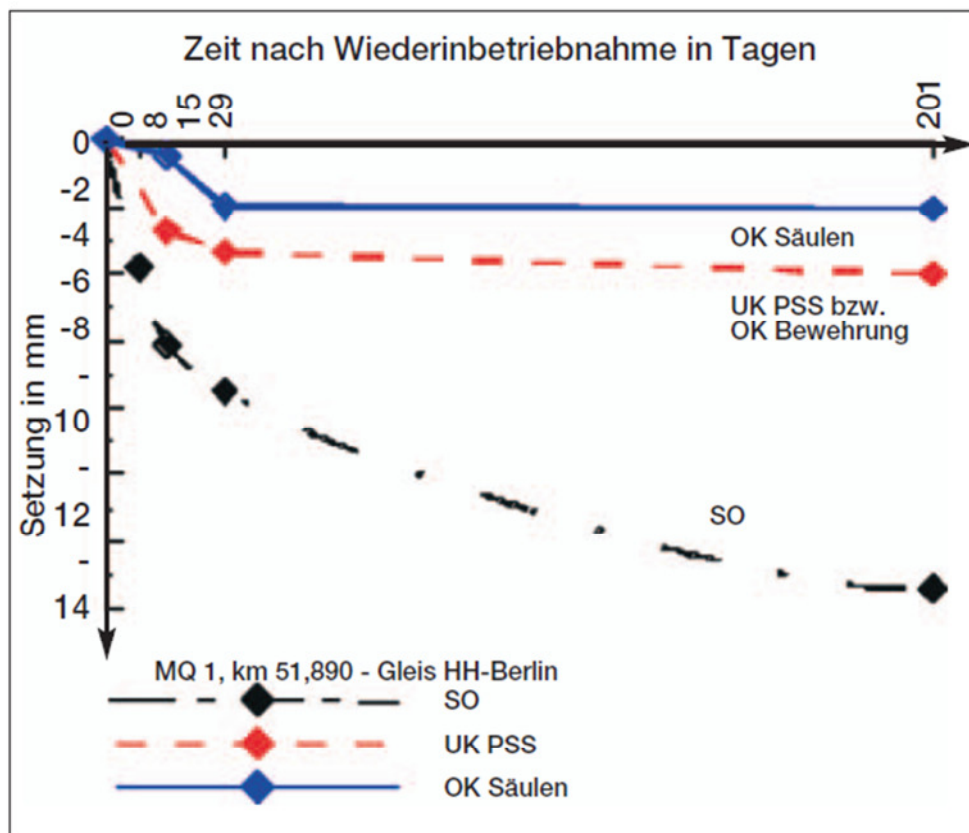
Bild 12 zeigt beispielhaft für den Messquerschnitt 1 den zeitlichen Setzungsverlauf in den einzelnen Ebenen.



Lage der Messelemente		Max. Setzungen in mm	
		Gleis HH-Berlin	Gleis Berlin-HH
SO (± 0,0)	MQ 1	13	11
	MQ 2	14	9
	MQ 3	15	13
UK PSS bzw. OK Bewehrung (-1,5 m bis -1,8 m)	MQ 1	4	5
	MQ 2	1	2
	MQ 3	[17]1	[19]1
OK Säulen (-2,7 m)	MQ 1	2	3
	MQ 2	1	2
	MQ 3	7	6

1) Setzungen in der Größenordnung nicht erklärbar, Messfehler

**Tafel 2** Ergebnisse der Setzungsmessungen 6 Monate nach Wiederinbetriebnahme



**Bild 12** Ergebnisse der Setzungsmessungen 6 Monate nach Wiederinbetriebnahme

## 7 Zusammenfassung

Die Verformungsanalysen auf der Grundlage numerischer Berechnungen und die großmaßstäbliche Erprobung in der Versuchsstrecke belegen, dass es durch Verstärkung des über den TVSS befindlichen Tragsystems möglich ist, einen für höhere statische und dynamische Beanspruchungen ausreichend stabilen und verformungsarmen Fahrweg herzustellen.

Die bisher nach der Wiederinbetriebnahme durchgeführten Verformungsmessungen zeigen nur geringe und gleichmäßige Setzungen, die in der zu erwartenden Größenordnung liegen und die geforderten Kriterien für Gebrauchstauglichkeit und Fahrkomfort der Bahnstrecke erfüllen. Die Wirksamkeit der durchgeführten Ertüchtigungsmaßnahme hat sich somit voll bestätigt.

### Schrifttum

- [1] Sondermann, W., Jebe, W.: Methoden zur Baugrundverbesserung für den Neu- und Ausbau von Bahnstrecken auf Hochgeschwindigkeitslinien; ungekürzte Fassung eines Vortrages zur Baugrundtagung 1996 in Berlin, aktualisiert im Juni 1998; Veröffentlichung · Publikationen Keller Holding GmbH, Ausgabe 2003.
- [2] Tost, S.: Berechnung und großmaßstäbliche Erprobung eines optimierten, geogitterbewehrten Tragschichtsystems über teilvermörtelten Stopfsäulen (TVSS) im Zuge der Ertüchtigung der Strecke der DB AG Hamburg – Berlin. Geotechnik-Kolloquium „35 Jahre Geotechnikausbildung in Freiberg“, Hrsg. F. Heinrich & H. Klapperich, 2003.
- [3] Zaeske, D., Kempfert, H.-G.: Berechnung und Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über punkt- und linienförmigen Traggliedern, Bauingenieur, 77 (2), S. 80-86, 2002.
- [4] Entwurf zum Abschnitt 6.9 der EBGEO: Bewehrte Erdkörper auf punkt- oder linienförmigen Traggliedern, Stand 25.10.2002, unveröffentlicht.
- [5] Kempfert, H.-G., Heitz, C.: ABS Hamburg – Berlin, 2. Ausbaustufe – Geotechnische Berichte Nr. 1 bis 3, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel, 2003, unveröffentlicht.