Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

Gründung einer Bahnstrecke auf organischen Böden mit Tragsäulen im Mixed-In-Place-Verfahren (MIP) und einem geokunststoffbewehrten Tragschichtsystem

M. Raithel, W. Schwarz, M. Stadel

Zusammenfassung Die Deutsche Bahn AG hat im Zuge der zweiten Ausbaustufe der VDE 2 ABS Hamburg-Berlin die Strecke zwischen Büchen und Hamburg für eine Entwurfsgeschwindigkeit von 230 km/h ausgebaut. In zwei Streckenabschnitten von insgesamt 625 m Länge war es aufgrund anstehender Weichschichten aus Torf und Faulschlamm sowie der geringen Tragfähigkeit des Erdkörpers erforderlich, den Untergrund und Unterbau zu ertüchtigen. Als Ertüchtigungsmaßnahmen wurden die Bewehrung des Erdkörpers mit Geokunststoffen und Auflagerung auf punktförmigen Tragglieder als Verbund-Tragsystem ausgeführt. Als Tragglieder wurden Säulen aus Boden-Bindemittelgemisch ausgeführt, die im Mixed in Place (MIP) Verfahren hergestellt wurden. Da im Anwendungsbereich der Deutschen Bahn AG für das ausgeführte Verbund-Tragsystem noch keine abgesicherten Erfahrungen vorliegen und das MIP-Verfahren nach der bauaufsichtlichen Zulassung bisher in organischen Böden nicht angewendet werden darf, wurde vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) für die Ausführung der Ertüchtigungsmaßnahmen eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erteilt. In dem Beitrag wird über die Erfahrungen bei der Ausführung der Ertüchtigungsmaßnahmen und das durch Verformungsmessungen beobachtete Verformungsverhalten des Verbund-Tragsystems berichtet.

Foundation of a railway embankment on soft organic soils with Mixed-in-Place-columns and a geogrid reinforced load transfer mattress

The Deutsche Bahn AG has improved the railway line Hamburg-Berlin to allow a train speed of 230 km/h. In two sections between Buechen and Hamburg, with a total length of 625 m an improvement of the subsoil was necessary, due to the soft organic layers consisting (mud and peat) with low bearing capacity. For soil improvement cement columns were installed, on top of which a geogrid reinforced load transfer mattress was constructed. The cement columns were installed using the Mixed-in-Place method (MIP), which can be characterized as a wet deep soil mixing technique. Due to the missing experiences by application of this foundation system for railway embankments by the Deutsche Bahn AG and due to the general permission restrictions of the Mixed-in-Place method, with means that the system so far could not be used in organic soils, an individual permission (Zustimmung im Einzelfall ZiE) by the Eisenbahn-Bundesamt (EBA) was needed. In the contribution the experiences with the construction and the application of the soil improvement system will be reported and the measured deformation behaviour of the foundation system will be shown.

Dr.-Ing. M. Raithel
Dipl.-Ing. M. Stadel

Kempfert + Partner GmbH
Beratende Ingenieure für Geotechnik
Kassel · Würzburg · Konstanz
m.raithel @kup-geotechnik.de
m.stadel@kup-geotechnik.de

Dr.-Ing. W. Schwarz

Bauer Spezialtiefbau GmbH, Schrobenhausen
wolfgang.schwarz@bauer.de

1 Projektbeschreibung

Im Zuge der zweiten Ausbaustufe der ABS Hamburg-Berlin wurde von der Deutschen Bahn AG im Jahre 2003 der Ausbau der Strecke zwischen Büchen und Hamburg für eine Entwurfsgeschwindigkeit von 230 km/h vorgenommen. In zwei, in der Nähe des Bahnhofs Büchen gelegenen Streckenabschnitten mit Längen von 150 und 475 m war es aufgrund anstehender Weichschichten aus Torf und Faulschlamm sowie der geringen Tragfähigkeit des Erdkörpers (Damm) erforderlich, den Untergrund und Unterbau zu ertüchtigen. Als Ertüchtigungsmaßnahmen wurden im Rahmen eines Nebenangebotes die Bewehrung des Erdkörpers mit Geokunststoffen und Auflagerung auf punktförmigen Tragglieder als Verbund-Tragsystem ausgeführt (**Bild 1**). Hierzu wurden als Tragglieder Säulen aus Boden-Bindemittelgemisch ausgeführt, die im Mixed in Place (MIP) Verfahren nach der bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-34.26–200 hergestellt wurden.

Damit der Verkehr auf der Strecke aufrechterhalten werden konnte, waren die Ertüchtigungsmaßnahmen unter erschwerten Bedingungen abschnittsweise bei eingleisigem Eisenbahnbetrieb mit einer Betriebsgeschwindigkeit von 90 km/h auszuführen. Da es sich bei dem ausgeführten Verbund-Tragsystem um eine neue Bauart handelt, für die im Anwendungsbereich der Deutschen Bahn AG noch keine abgesicherten Erfahrungen vorliegen und das MIP-Verfahren nach der bauaufsichtlichen Zulassung bisher nur in grobkörnigen und gemischtkörnigen Böden mit geringen organischen Beimengungen von höchstens 3,0 Gew.-% sowie in Auffüllungen aus diesen Böden angewendet werden durfte, wurde vom Eisenbahn-Bundesamt (EBA) für die Ausführung der Ertüchtigungsmaßnahmen eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erteilt.

2 Ertüchtigung des Unterbaus und Untergrunds

2.1 Unterbau- und Untergrundverhältnisse

Der Unterbau des Fahrweges besteht aus überwiegend mitteldicht gelagerten Auffüllungen aus Sanden mit unterschiedlich starken Schluff- und Kiesanteilen sowie humosen Beimengungen und Schlackeanteilen. Die Schichtdicken der Auffüllungen liegen zwischen etwa 3 und 5 m. Unter den Auffüllungen stehen abschnittsweise gewachsene Weich-

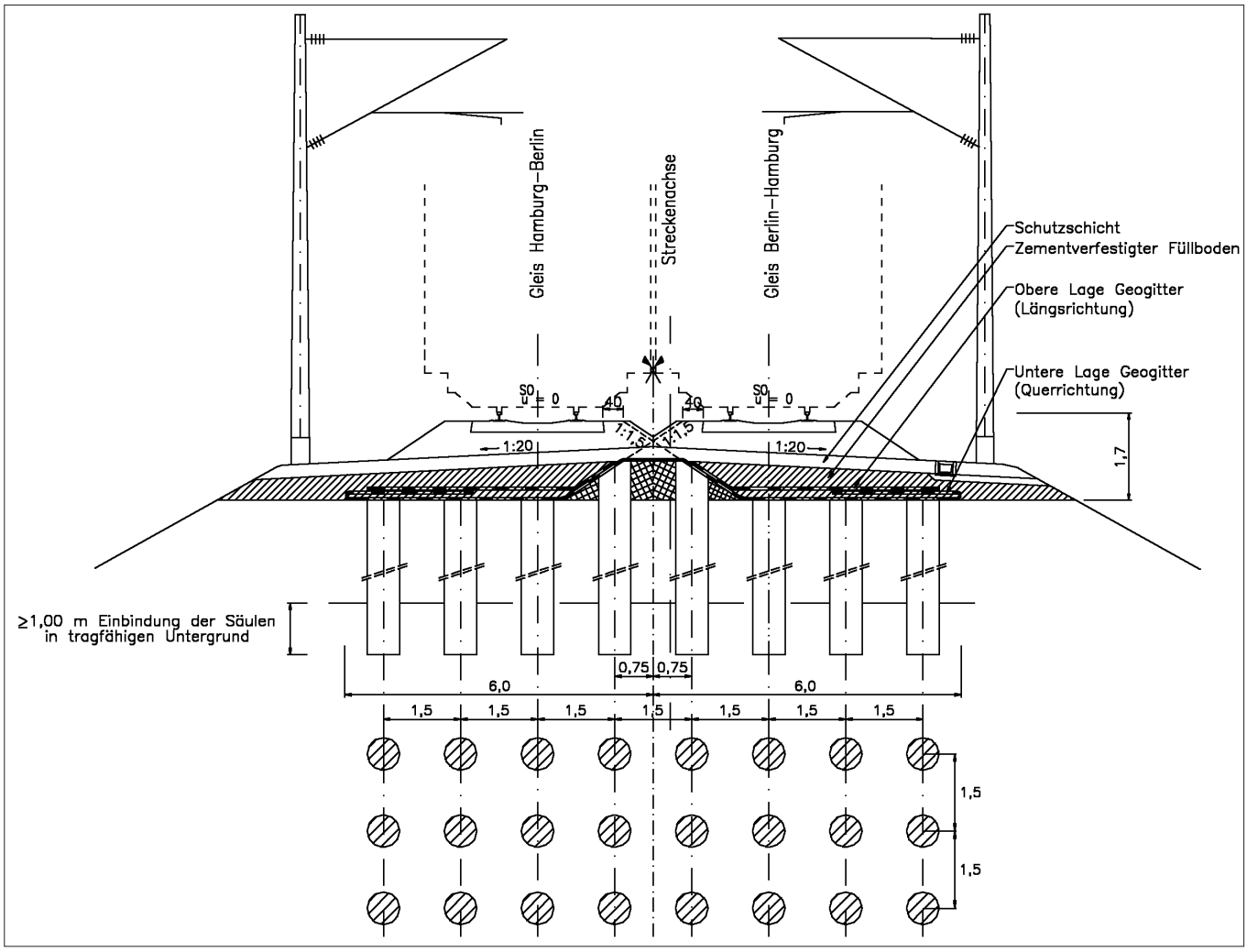

Bild 1. Verbund-Tragsystem
Fig. 1. Foundation-System

schichten aus Torf und Faulschlamm in Schichtdicken zwischen etwa 0,5 und 2 m an. Die Wassergehalte des Torfs liegen zwischen etwa 80 und 330 % und der Anteil an organischen Bestandteilen (Glühverlust) zwischen etwa 25 und 80 %. Diese Weichschichten werden von mitteldicht gelagerten Fein- bis Mittelsanden mit schwach schluffigen Beimengungen, örtlich auch mit schwach kiesigen Beimengungen in Schichtdicken zwischen etwa 1,5 und 8 m unterlagert.
Das Liegende bildet Geschiebemergel, der auf den obersten 1 bis 2 Schichtmetern weiche bis steife, darunter halbfeste Konsistenz besitzt. Die Wassergehalte des Geschiebemergels liegen zwischen etwa 10 und 20 %.

2.2 Ertüchtigungsmaßnahmen

Mit dem Verbund-Tragsystem des bewehrten Erdkörpers auf Traggliedern werden die vertikalen Lasten aus dem Eigengewicht des Ober- und Unterbaus sowie die Lasten aus Verkehr durch über den Traggliedern angeordneten Geogittern in den ausreichend tragfähigen Untergrund (Geschiebemergel) eingeleitet. Die Bemessung des Verbund-Tragsystems erfolgte nach dem Entwurf des Abschnitts 6.9 der Empfehlungen für Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO (6. Fassung vom 10.06.2003).
Die im MIP-Verfahren hergestellten Säulen wurden mit einem Säulendurchmesser von 63 cm und in einem Säulenraster von 1,5 x 1,5 m ausgeführt. Der Einsatz von MIP-Säulen als Bauverfahren bietet den Vorteil, dass die Tragglieder mit Rücksicht auf den laufenden Eisenbahnbetrieb erschütterungs- und verdrängungsfrei in den bestehenden Unterbau und Untergrund eingebracht werden konnten.
Als Geokunststoffe wurden biaxiale Geogitter vom Typ Fortrac M (PVA) 400/30-30 eingebaut, die in insgesamt zwei Lagen über den Säulen verlegt wurden. Um eine möglichst gleichmäßige Auflagerung des Oberbaus über den Säulen gewährleisten zu können, wurde der Füllboden durch die Zugabe von 2,5 bis 3,0 Gew.-% Zement verfestigt. Damit die langfristige Verfügbarkeit des Oberbaus durch die Verfestigung des Füllbodens nicht ungünstig beeinflusst wird, wurde das Erdplanum aufgeraut, so dass eine gute Verzahnung zur Schutzschicht entstand. Der Effekt der Hydrolyse durch Zement konnte durch die Verwendung von Polyvenylalkohol (PVA) als Material für die eingebauten Geogitter ausgeschlossen werden. Die Überschüttungshöhe der Säulen wurde mit 1,5 m ausgeführt, so dass die Mindestüberschüttungshöhe wie für Bauteile nach DS 804 [1] eingehalten ist. Die bauliche Durchbildung des Verbund-Tragsystems ist in Bild 1 für eine Überhöhung von u = 0 dargestellt.
Im Streckenabschnitt zwischen den beiden Ertüchtigungsabschnitten mit einer Länge von 75 m wurde der bewehrte Unterbau weitergeführt und aufgrund der in diesem Teilabschnitt nicht anstehenden Weichschichten direkt auf dem vorhandenen und ausreichend tragfähigen Unterbau auf-

Bild 2. Herstellung der MIP-Säulen
Fig. 2. Production of MIP-columns

Bild 3. Abschälen der MIP-Säulen
Fig. 3. Shortening of MIP-columns

gelagert. Die Übergänge vom nicht ertüchtigten zum ertüchtigen Unterbau wurden als Übergangsbereiche so ausgebildet, dass der bewehrte Unterbau jeweils 10 m über die Begrenzungen hinausgeführt und zusätzlich die oberste Lage der Geogitter weitere 10 m in den nicht ertüchtigen Unterbau hineingeführt wurden.

3 MIP-Säulen

3.1 Herstellung der Säulen

Die MIP-Säulen wurden nach dem Rückbau der Schutzschichten vom Erdplanum aus hergestellt und danach zusammen mit dem teilweisen Rückbau des Unterbaus bis auf die Soll-Höhe von 1,7 m unter SO durch Abschälen im noch nicht ausgehärteten Zustand gekürzt. **Bild 2** zeigt das Herstellen und **Bild 3** das Abschälen der MIP-Säulen.

Im Rahmen der durchgeführten Eignungsprüfung (Herstellung von Probemischungen mit dem Boden im Baufeld) wurde für die Herstellung der MIP-Säulen die Zusammensetzung der Suspension (MIP-Rezeptur) bestehend aus Wasser, Bentonit und Bindemittel mit einem w/b-Wert von etwa 1,0 gewählt. Die Suspensionszugabe im Bauabschnitt 1 (Richtungsgleis Hamburg-Berlin) betrug etwa 800 l/m^3. Im Bauabschnitt 2 (Gegengleis Berlin-Hamburg) wurde dem Boden solange Suspension zugegeben, bis sich ein homogenes Boden-Suspensionsgemisch einstellte. Diese Vorgehensweise führte zu einer bodenabhängigen variable Suspensionszugabe.

Die Säulenreihen unmittelbar neben der Bahnachse ließen sich so herstellen, dass das Bohrwerkzeug nicht in das Lichtraumprofil des jeweiligen Betriebsgleises hineinreichte (notwendiger Arbeitsraum gemessen von der Säulenachse etwa 60 cm). Die Sicherung des jeweiligen Betriebsgleises erfolgte durch Abböschen des Schotters, der Schutzschicht sowie des Unterbaus entsprechend den Anforderungen der Ril 836.0605 [2]. Diese Art der Sicherung des jeweiligen Betriebsgleises ist für das Verbund-Tragsystem günstiger als die Sicherung durch einen Mittelverbau, da durch diesen die Geogitter in Querrichtung des Tragsystems in der Bahnachse unterbrochen werden müssen und nicht über die gesamte Breite des Erdkörpers verlegt werden können. Durch die sich zur Bahnachse hin ergebenden Böschungen konnten die jeweils neben der Bahnachse gelegenen Säulen nur bis zur Oberfläche der Böschungen gekürzt werden, womit der Abstand von OK MIP-Säule bis zur SwOK für diese Säulen kleiner wurde als 1,5 m. Dies konnte verfahrenstechnisch jedoch nicht verhindert werden und wurde gegenüber den Nachteilen eines Mittelverbaus (Gefahr von Auflockerungen usw.) in Kauf genommen.

Insgesamt wurden 3.260 Stück bzw. 21.000 stgm MIP-Säulen mit Säulenlängen zwischen 5 und 8 m im Bauabschnitt 1 (Richtungsgleis Hamburg-Berlin) und 2 (Gegengleis Berlin-Hamburg) hergestellt. Die Festlegung der Säulenlängen und damit der Einbindung der Säulen in den Geschiebemergel als ausreichend tragfähiger Baugrund erfolgte durch eine der Säulenherstellung vorauseilende Erkundung mit Sondierungen im Rahmen der Qualitätssicherung.

3.2 Qualitätssicherung

Um nachweisen zu können, dass die hergestellten MIP-Säulen auch beim Einsatz in organischen Böden den Bestimmungen der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung entsprechen, wurde eine baustelleneigene Produktionskontrolle eingerichtet. Die kontinuierliche Überwachung der Säulenherstellung erfolgte entsprechend dem für die Baustelle aufgestellten Qualitätssicherungs-Plan. Weiterhin wurden bei der Säulenherstellung für jede Säule die Herstellungsparameter in einem Herstellungsprotokoll aufgezeichnet.

Zur Überprüfung der Homogenität des Säulenmaterials wurde vorab bei insgesamt elf Probesäulen über die gesamte Säulenlänge ein Stahlrohr mit Liner in das noch frische Boden-Bindemittelgemisch eingedrückt. Nach der Entnahme der Liner wurden diese längs der Achse aufgeschnitten, um die Homogenität des Säulenmaterials beurteilen zu können. Die Liner-Proben zeigten, dass für die Säulen ein homogenes Boden-Bindemittelgemisch hergestellt werden konnte, in dem nur vereinzelt Torfstücke bis zur Faustgröße eingeschlossen waren. Zur Überprüfung, dass es sich bei den Torfstücken lediglich um lokale Einschlüsse handelt, die sich nicht über den gesamten Säulenquerschnitt erstrecken, wurde ein Teil der Säulen bis zur Tiefe der Torfeinschlüsse freigelegt und abgetragen. **Bild 4** zeigt aufgeschnittene Liner-Proben der Probesäulen.

Zur Überprüfung der Druckfestigkeit der MIP-Säulen wurden an insgesamt 4,5 % der hergestellten Säulen Probekörper entnommen und je 500 m^3 MIP-Körper an einer Serie von Probekörpern (sechs Einzelproben) die Größe der einaxialen Druckfestigkeit nach 28 Tagen bestimmt. Die Ergebnisse

Bild 4. Liner-Proben der MIP-Säulen
Fig. 4. Liner-Samples of MIP-columns

der durchgeführten einaxialen Druckversuche sind in **Bild 5** getrennt für den Bauabschnitt 1 (Richtungsgleis Hamburg-Berlin) und 2 (Gegengleis Berlin-Hamburg) als Histogramme dargestellt und zeigen die Häufigkeitsverteilung der Druckfestigkeiten. Danach wurde die nach der Bemessung des Verbund-Tragsystems erforderliche Größe der einaxialen Druckfestigkeit von mindestens $q_u = 2{,}2$ MN/m² nach 28 Tagen von allen Probekörpern eingehalten. Der tendenzielle Unterschied für die Größe der einaxialen Druckfestigkeit der Probekörper wird auf die unterschiedliche Suspensionszugabe zurückgeführt.

4 Einbau der Geogitter und des Füllbodens

4.1 Geogitter

Die Geogitter wurden in Querrichtung des Tragsystems (untere Lage) direkt auf den Säulen verlegt, im Bauzustand in der Bahnachse vertikal nach oben geführt, aufgerollt (das Ablegen der Rollen erfolgte außerhalb des Lichtraumprofils) und später im Nachbargleis verlegt. Damit konnten die Geogitter über die gesamte Breite des Bahnkörpers durchgängig verlegt werden. Zur Vermeidung einer Beschädigung der Geogitter beim Einbau über den Säulen, wurden die Säulen so abgeschält, dass nach dem Erhärten des Boden-Bindemittelgemisches keine scharfen Kanten entstanden. Damit die Geogitter unterhalb der Schutzschicht verlegt werden konnten (wobei ein kurzfristiges Einschneiden in die Böschungen erforderlich war), erfolgten der Aushub, der Einbau der Geogitter und das Andecken der Geogitter mit Schutzschichtmaterial im Bereich der Bahnachse in Abschnittslängen von etwa 6 m (Breite der Geogitterbahnen 5 m) sowie innerhalb von Zugpausen. In Längsrichtung des Tragsystems (obere Lage) konnten die Geogitter ohne besondere Maßnahmen verlegt werden. **Bild 6** zeigt den Einbau der Geogitter und des Füllbodens.
Von der Anforderung der Technischen Lieferbedingung BN 918039 [3] nach einer Höchstzugkraft der Geogitter in Nebenrichtung von mindestens 20 % der Höchstzugkraft der Hauptrichtung wurde im vorliegenden Fall abgewichen, da dem Geogitter in Nebenrichtung rechnerisch keine Kraft zugewiesen wurde. Die Geogitterlagen werden jeweils nur einaxial beansprucht. Deshalb wurde die Höchstzugkraft des Geogitters in Nebenrichtung entsprechend der produktionsspezifischen Anforderung mit 30 kN/m als Mindestgröße gewählt.
Da das eingebaute Geogitter nicht im Verzeichnis der Lieferliste der DB AG enthalten ist, wurde vom Geotextilhersteller ein Antrag auf produktspezifische Liefererlaubnis beim EBA gemäß den Prüfbedingungen für Geokunststoffe in Zulassungsverfahren des EBA gestellt.

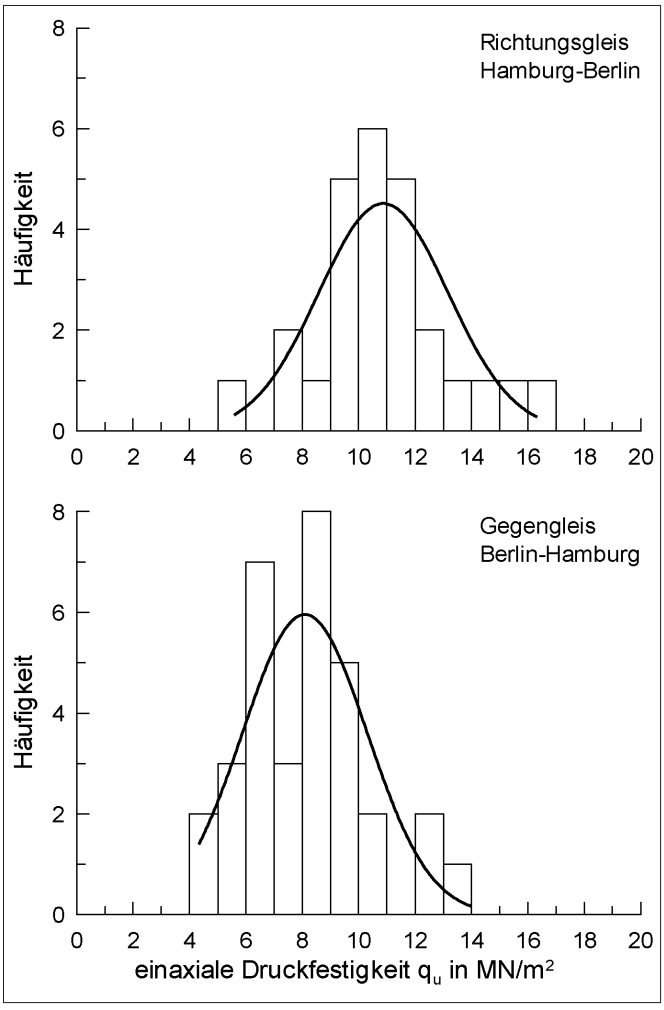

Bild 5. Einaxiale Druckfestigkeiten des Säulenmaterials
Fig. 5. Unconfined compression strength

Bild 6. Einbau der Geogitter und des Füllbodens
Fig. 6. Installation of geogrids and fill

4.2 Füllboden

Als Füllboden wurde ein intermittierend gestuftes Kies-Sand-Gemisch (Boden der Gruppe SI) mit einer Ungleichförmigkeit von U ≥ 6, das durch die Zugabe von 2,5 bis 3,0 Gew.-% Zement verfestigt wurde, eingebaut. Das Boden-Bindemittelgemisch wurde im Zentralmischverfahren hergestellt, entsprechend den Anforderungen der Ril 836.0504 [4] in Lagen von höchstens 30 cm Dicke eingebaut und auf einen Verdichtungsgrad von mindestens D_{Pr} = 0,98 verdichtet.

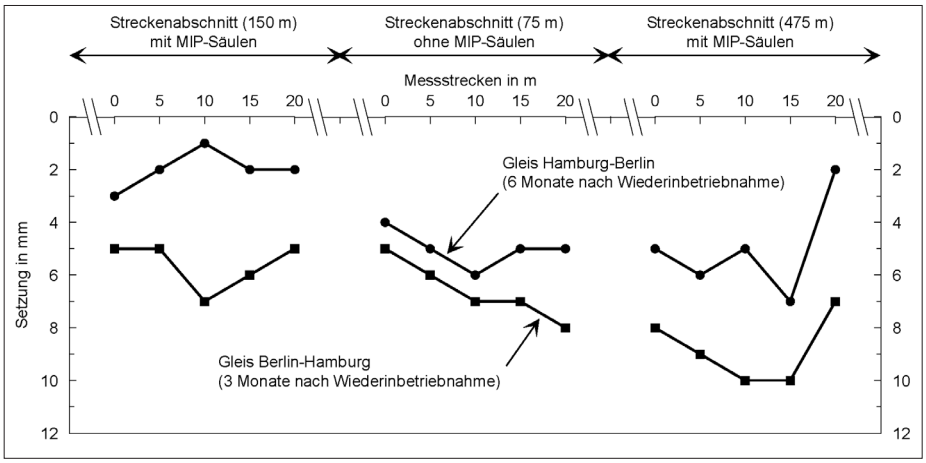

Bild 7. Setzungsmessungen am Oberbau 3 bzw. 6 Monate nach Wiederinbetriebnahme
Fig. 7. Deformation measurements

5 Messtechnische Absicherung

Entsprechend den Nebenbestimmungen der ZiE wurden zur Kontrolle und zum Nachweis der eintretenden Setzungen geodätische Verformungsmessungen an der Schienenoberkante durchgeführt. Dabei wurden jeweils an der rechten (äußeren) Schiene des Richtungs- und Gegengleises Feinnivellements mit einem mittleren Fehler des beobachteten Höhenunterschieds von 1 mm durchgeführt. Die Messpunkte je Schiene sind in einem gegenseitigen Abstand von 5 m über eine Messstreckenlänge von 20 m angeordnet. Die Messstrecken wurden in den beiden ertüchtigten Streckenabschnitten sowie ergänzend zwischen den beiden Ertüchtigungsabschnitten (Abschnitt ohne MIP-Säulen) an den Stellen angeordnet, an denen jeweils die ungünstigsten Baugrundverhältnissen vorliegen.

Bisher liegen für das Richtungsgleis Hamburg-Berlin die Ergebnisse der Verformungsmessungen bis zu einem Zeitraum von sechs Monaten nach Wiederinbetriebnahme und für das Gegengleis Berlin-Hamburg bis zu einem Zeitraum von drei Monaten nach Wiederinbetriebnahme vor. Die beiden Gleise wurden in diesem Zeitraum mit einer Geschwindigkeit von bis zu 160 km/h befahren. Die Ergebnisse der Verformungsmessungen sind in **Bild 7** als Setzungsverläufe in den Messstrecken für das Richtungsgleis Hamburg-Berlin für sechs Monate nach Wiederinbetriebnahme sowie für das Gegengleis Berlin-Hamburg für drei Monate nach Wiederinbetriebnahme dargestellt.

Nach der Darstellung in Bild 7 beträgt die Größe der für das Richtungsgleis Hamburg-Berlin gemessenen Setzungen innerhalb eines Zeitraums von sechs Monaten nach Wiederinbetriebnahme bis zu 7 mm. Dies ist verglichen mit den üblicherweise für Schotteroberbau infolge der Nachverdichtung des Oberbaus, der Schutzschichten und des Unterbaus unter Verkehr bei normalen Untergrundverhältnissen zu erwartenden Setzungen von erfahrungsgemäß etwa 10 bis 15 mm als gering zu bezeichnen. Dies gilt auch, wenn berücksichtigt wird, dass die Geogitter gewisse Anfangsverformungen benötigen, damit die Tragwirkung des Verbund-Tragsystems mobilisiert werden kann. Weiterhin zeigt Bild 7, dass die Größe der gemessenen Setzungen in den beiden Streckenabschnitten, in denen der Untergrund ertüchtigt wurde, nicht größer sind als für den Bereich, in dem keine Weichschichten anstehen.

Die Größe der für das Gegengleis Berlin-Hamburg gemessenen Setzungen beträgt innerhalb eines Zeitraums von drei Monaten nach Wiederinbetriebnahme bis zu 10 mm. Verglichen mit den für das Richtungsgleis Hamburg-Berlin gemessenen Setzungen sind diese im Mittel um etwa 3 mm größer.

Aus den Messergebnissen lässt sich erkennen, dass die gemessenen Setzungen weitgehend nur aus den Setzungen des Oberbaus und der Schutzschicht resultieren und die ausgeführte Untergrundertüchtigung nahezu keine Setzungen unter Verkehr aufweisen. Die Wirksamkeit und der Erfolg der ausgeführten Ertüchtigungsmaßnahmen konnte somit durch die Verformungsmessungen nachgewiesen werden.

Literatur

[1] DS 804 Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Deutsche Bahn AG

[2] Richtlinie 836, Erdbauwerke planen, bauen und instand halten. Modul 836.0605 Stützbauwerke, Sicherungsmaßnahmen im Nahbereich zu Gleisen

[3] BN 918039 Technische Lieferbedingung „Geokunststoffe“

[4] Richtlinie 836, Erdbauwerke planen, bauen und instand halten. Modul 836.0504 Übergänge zwischen Erdkörper und Kunstbauwerken