

Feste Fahrbahn

Gründungstechnische Erfahrungen bei der ersten planmäßigen Anwendung für die Erneuerung eines Abschnitts der Bahnstrecke Hamburg-Berlin

Mit der Realisierung der zweigleisigen Baumaßnahme Feste Fahrbahn Wittenberge-Dergenthin auf einem 6150 m langen Teilstück der Ausbaustrecke Hamburg-Berlin, Verkehrsprojekt Deutsche Einheit Nr. 2, wurde erstmalig diese neue Oberbauform (hier System Züblin) für den planmäßigen Betrieb ausgeführt. Es werden die Anforderungen, Planungs- und Ausführungsrandbedingungen aus gründungstechnischer Sicht beschrieben und über Erfahrungen berichtet. Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Systems sowie als Grundlage für weitere Optimierungen zum Auflager der Festen Fahrbahn wurden Messungen im Unterbau/Untergrund durchgeführt. Erste Ergebnisse werden mitgeteilt. Weitere größere Abschnitte mit Festen Fahrbahnen sind für Neu- und Ausbaustrecken vorgesehen.

Feste Fahrbahn (rigid tracks) – geotechnical experience with its first application for an improved section of the train route Hamburg-Berlin. *The construction contract Feste Fahrbahn Wittenberge - Dergenthin, for a double tracked 6150 m long section of the improved line from Hamburg to Berlin, Transport Project German Unity No. 2, represents the first use of the new trackbed system (in this case Züblin System) for operational permanent way. The requirements, planning guidelines and construction parameters are described from the geotechnical point of view and experiences are reported. To check the practicability of the system and as a basis for further optimisations of the support for the rigid track system, a measurement programme was carried out within subgrade/subsoil. First results are presented here. Further longer sections of rigid track are planned for new and improved routes.*

1 Einleitung

Seit etwa 25 Jahren entwickeln einige große deutsche Baufirmen in Zusammenarbeit mit den zuständigen Institutionen der Deutschen Bahn AG unterhaltungsarme Oberbauformen, die insgesamt eine bessere Lagestabilität des Gleises insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten aufweisen und den klassischen Schotteroberbau zumindest auf Teilstrecken ablösen

sollen. Diese Fahrbahnarten werden als Feste Fahrbahn bezeichnet. Die entscheidende Veränderung ist der Ersatz des Schotterbettes durch eine Betontragsplatte oder eine Asphalttragschicht, in der der Gleisrost in unterschiedlicher Weise fest eingebunden werden kann.

Die Eignung dieser neuen Oberbauform wurde bisher lediglich in sehr kurzen Versuchsabschnitten auf Brücken, Erdbauwerken (nur eingleisig) und im Tunnel erprobt [1], [2]. In einem von der Deutschen Bahn AG durchgeführten und vom BMFT geförderten F + E-Projekt wurden in einem Teilprojekt die Anforderungen an den Unterbau und den Erdkörper für den Einsatz der Festen Fahrbahn auf Erdbauwerken für Neubaustrassen mit Fahrgeschwindigkeiten bis 300 km/h erarbeitet [3]. Daraus wurde eine Ergänzung zur Erdbauvorschrift [4] für Feste Fahrbahnen abgeleitet [5].

Im Rahmen der Verkehrsprojekte Deutsche Einheit auf der Strecke Hamburg-Berlin wurde von der damaligen Deutschen Reichsbahn ein etwa 6 km langer Abschnitt (Bild 1) zwischen Wittenberge und Dergenthin (Land Brandenburg) mit der neuen Oberbauform ausgeschrieben. Für den erneuerten Abschnitt ist eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h, optional bis 200 km/h, vorgesehen. Den Zuschlag erhielt im Juli 1993 die Arbeitsgemeinschaft Ed. Züblin AG-H. Cronau GmbH unter Federführung der Firma Züblin. Im Juni 1994 konnte planmäßig der zweigleisige Betrieb auf dem erneuerten Streckenabschnitt aufgenommen werden. Da in diesem Abschnitt erstmalig die Feste Fahrbahn auf der freien Strecke in nennenswertem Umfang

zur Anwendung kommt und gleichzeitig relativ ungünstige Untergrundverhältnisse vorhanden sind, wird im folgenden über die gründungstechnischen Erfahrungen bei der Planung und Ausführung des Abschnitts berichtet. Erschwerend für die Bauausführung waren die engen Terminvorgaben und die Aufrechterhaltung eines eingleisigen Bahnbetriebes mit Fahrgeschwindigkeiten bis 120 km/h.

2 Alte Bahnanlage und Untergrundverhältnisse

Die vor den Erneuerungsmaßnahmen vorhandene Bahnanlage war durch eine schlechte Gleislage sowie bereichsweise vorhandene Schottersäcke ab OK Erdplanum gekennzeichnet. Ausgehend von einer geländegleichen Streckenführung im Süden des Abschnitts steigt die Dammhöhe nahezu kontinuierlich bis auf ca. 6 m an. Die Trasse verläuft durch ein eingeebnetes Altmoränengebiet der Saalevereisung [6]. Unter dem Dammauflager sind überwiegend schluffige Fein- bis Mittelsande in mitteldichter Lagerung vorhanden. Die ehemalige Mutterbodenschicht bzw. organische Ablagerungen wurden bei der Dammerstellung vor etwa 100 Jahren offenbar überschüttet und stellen für den Damm Bereiche geringerer Tragfähigkeit dar. Ihre Dicke beträgt 0,1 bis 0,9 m, und ihr organischer Anteil liegt zwischen 2 und 18%. Der darübergeschüttete Damm besteht aus aufgefülltem schluffigem Fein- bis Mittelsand in überwiegend lockerer, örtlich mitteldichter Lagerung. Teilweise sind schluffige und grobsandige Beimengungen sowie abschnittsweise auch geringfügige humose Anteile vorhanden.

Grundwasser steht etwa zwischen 3 und 7 m unter Schienenoberkante (SO) bzw. 1 bis 3 m unter Geländeniveau neben der Strecke an. In Niederungen wurde auch unmittelbar unter der Geländeoberfläche Wasser angetroffen. Teilweise sind am Dammfuß wasserführende Gräben bzw. Feuchtgebiete vorhanden.

Die Böschungsneigung der Dämme liegt etwa bei 45 bis 50°. Aus den geometrischen und baugrundspezifischen Randbedingungen ergab sich ein ursprünglich vorhandenes Sicherheitsniveau der Dämme gegen Böschungsbruch und Spreizdruck um $\eta = 1$.

3 Anforderungen und notwendige Verbesserungsmaßnahmen für Erdkörper und Unterbau

3.1 Ausgangssituation

Die bei der Ausschreibung der Maßnahme vorliegenden technischen Anforderungen zum Regelquerschnitt [1], [3], [5] für Feste Fahrbahnen auf Erdbauwerken bezogen sich auf Neubaustrecken (NBS) mit Fahrgeschwindigkeiten bis 300 km/h. In Zusammenarbeit mit den Fachdiensten der DB AG wurden vorläufige erdbautechnische Anforderungen für den Erdkörper und den Unterbau von Ausbaustrecken (ABS) mit Fahrgeschwindigkeiten bis 200 km/h

festgelegt [7]. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Anforderungsbedingungen für die ABS im Vergleich zur NBS dargestellt.

Zwischenzeitlich liegen neuere Festlegungen [8] für den Bau der Feste Fahrbahn auf Ausbaustrecken vor, in denen die Anforderungen für den Unterbau/Untergrund gemäß Tabelle 1, vorletzte Zeile und letzte Spalte, nur noch für einen Tiefenbereich von etwa 1,3 m unter Erdplanum nachgewiesen sein müssen.

3.2 Verbesserungsmaßnahmen

Aufgrund der Anforderungen nach Abschn. 3.1 und der überwiegend vorhandenen lockeren Lagerungsdichte des Dammes wurde zunächst eine Baugrundverbesserungsmethode vorgesehen, die den Unterbau möglichst durchgängig in eine gleichmäßige mindestens mitteldichte Lagerung versetzen sollte. Dafür wurde eine kombinierte Rütteldruck/Rüttelstopfverdichtung im Rastermaß von 1,6 m gewählt, bei der jeder dritte bis fünfte Verdichtungspunkt als Stopfsäule so auszubilden war, daß die im Untergrund befindliche Mutterbodenschicht durchstoßen und das Dammauflager erheblich verbessert wird. Die restlichen Verdichtungspunkte sollten kürzer sein und nur der Erhöhung

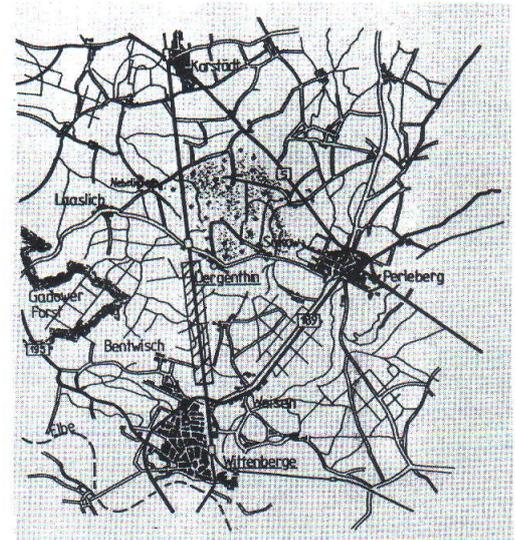


Bild 1. Lageplan des erneuerten Streckenabschnittes

Fig. 1. Plan of the renewed section of line

der Lagerungsdichte im Damm dienen.

Nach Ausführung von Probeverdichtungsfeldern konnte dieses Konzept aber nicht aufrecht erhalten werden, da in den vorhandenen gleichkörnigen, teilweise schluffigen Sanden der erwartete nachhaltige Verdichtungseffekt im Damm durch die Tiefenverdichtung nicht durchgängig nachgewiesen werden konnte. Endgültig wurde dann als Tiefenverdichtung eine Stopfverdichtung mit Grobkornsäulen gewählt, deren Länge abhängig von den Ergebnissen vorlaufender Drucksondierungen festgelegt wurde. Gleichzeitig wurde mit diesem Verfahren auch die Lagerungsdichte der Sande im Damm verbessert.

4 Ausführungsplanung

Grundlage für die Ausführungsplanung war der in [5] vorgegebene Aufbau eines Regelquerschnittes für die Feste Fahrbahn. Zusätzlich waren Anforderungen nach Abschn. 3 zu berücksichtigen [7]. Der ausgeführte Querschnitt ist in Bild 2 dargestellt.

Auch die ursprünglich in [5] vorgesehene seitliche Anschüttung der Fahrbahnplatte mit Schotter wurde nicht ausgeführt. Die Mittenentwässerung wurde als offenes Gerinne mit Einläufen im Abstand von 50 m ausgebildet. Auf eine Auf-

Tabelle 1. Vorläufige erdbautechnische Anforderungen für Neubaustrecken bis $v = 300$ km/h (NBS/300) und Ausbaustrecken bis $v = 200$ km/h (ABS/200)

Table 1. Provisional geotechnical guidelines for new railway lines up to $v = 300$ km/h (NBS/300) and improved lines up to $v = 200$ km/h (ABS/200)

Bauteil	Höhen	Anforderungen	
		NBS/300	ABS/200
Frostschuttschicht (FSS)	OK FSS oberer Bereich (0,2 m) darunter gesamte FSS gesamte FSS	$E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,03$ $D_{pr} \geq 1,00$ $U \geq 6,0$ $k \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$E_{v2} \geq 100 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $D_{pr} \geq 1,00$ $U \geq 6,0$ $k \geq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
Unterbau/Untergrund	OK Erdplanum (EP) bis 0,5 m unter EP bis 1,8 m unter EP bis 2,5 m unter EP bis Dammsohle	$E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $D_{pr} \geq 1,00$ $D_{pr} \geq 0,97$	$E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 0,97$ $D_{pr} \geq 0,95$ $D_{pr} \geq 0,95$

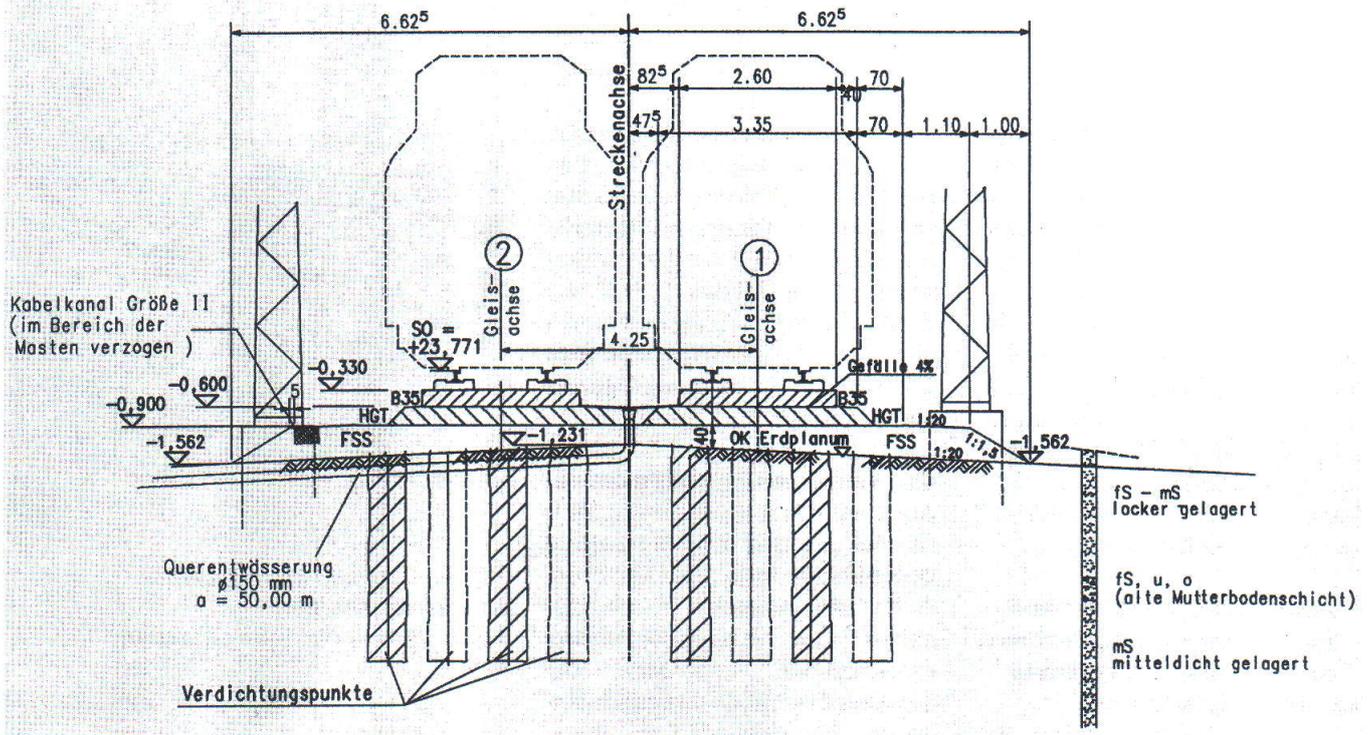


Bild 2. Ausgeführter Querschnitt Feste Fahrbahn Bauart Züblin auf dem Streckenabschnitt Wittenberge-Dergenthin

Fig. 2. Cross section of the Züblin design rigid track constructed in the section Wittenberge-Dergenthin

fällung des Gerinnes mit Schotter wurde ebenfalls verzichtet. Noch in der Diskussion befindet sich ein Vorschlag zur Begrünung der Randwege und der Mittenentwässerung.

Die Ablaufplanung sah für die Ausführung der Arbeiten die Vorgehensweise entsprechend Bild 3 vor. Der Verlauf der Trasse und die Höhenlage der Schienen wurden gegenüber der Sollage der alten Gleise nur unwesentlich verändert. Gleisbögen waren nur im Bereich der Einfahrt zum Bahnhof Dergenthin mit einem Radius zwischen 20 000 und 40 000 m herzustellen. Weichen waren im Abschnitt der Festen Fahrbahn nicht vorgesehen.

Gleislagekorrekturen sind bei einer Festen Fahrbahn bisher nur durch Ausgleichsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung in bestimmten Grenzen möglich. Für die Bauart Züblin betragen die maximalen Korrekturmöglichkeiten an der Schienenbefestigung nach oben 22 mm, nach unten 4 mm und in seitlicher Richtung jeweils 5 mm. Aufgrund der guten Lastverteilung durch die Tragplatte der Festen

Fahrbahn werden für den Zugverkehr besonders nachteilige Differenzsetzungen über kurze Entfernungen vermieden. Gleislagekorrekturen nach Fertigstellung des Gleises sind daher nur in seltenen Ausnahmefällen erforderlich. Die Korrekturmöglichkeiten dienen in erster Linie der Ausrichtung der Gleise vor der Inbetriebnahme der Strecke.

5 Bauausführung

5.1 Baustraßen

Problematisch für die Bauausführung war die geringe Anzahl von Zufahrten auf das Gleis. Das an den Bahndamm angrenzende Gelände ist zum großen Teil bewaldet. An einigen Stellen reichen Acker- bzw. Weideflächen bis nahe an den Bahndamm. Entlang des Dammfußes erstrecken sich häufig Feuchtgebiete, in denen seltene Tier- und Pflanzenarten heimisch sind. Aufgrund strenger Auflagen durch den Umweltschutz, der große Gebiete längs des Bahndammes als schützenswerte Biotope auswies, waren die Möglichkeiten zum Ausbau bzw. Neubau von Baustraßen und Zufahrten zum

Damm sehr eingeschränkt. Wege entlang des Bahndammes waren nicht überall vorhanden bzw. durften nicht als Baustraße genutzt werden. Für die gut 6 km lange Strecke waren nur sieben Zufahrten zum Bahndamm im Abstand von 500 bis 1500 m realisierbar. Insgesamt mußten 2 km Baustraßen neu angelegt und 4 km bestehende Wege ausgebaut und nach Abschluß der Baumaßnahme rückgebaut werden. Im Zeitraum der Bauarbeiten wurden über diese Baustraßen insgesamt ca. 275 000 t Material an- und abtransportiert.

5.2 Tiefenverdichtung

Die Herstellung der Stopfsäulen erfolgte mit vier mäklergeführten Torpedorüttlern der Firma Keller Grundbau, die zweischichtig im Einsatz waren und eine Tagesleistung von 200 bis 250 lfm Stopfsäulen je Gerät erzielten. Als Arbeitsebene diente das alte Schotterbett, von dem lediglich der Gleisrost entfernt worden war. Je Gleis waren 30 000 lfm Stopfsäulen herzustellen.

Als Sondervorschlag genehmigt wurde der Einsatz des vorhandenen, ursprünglich zum Abtrans-

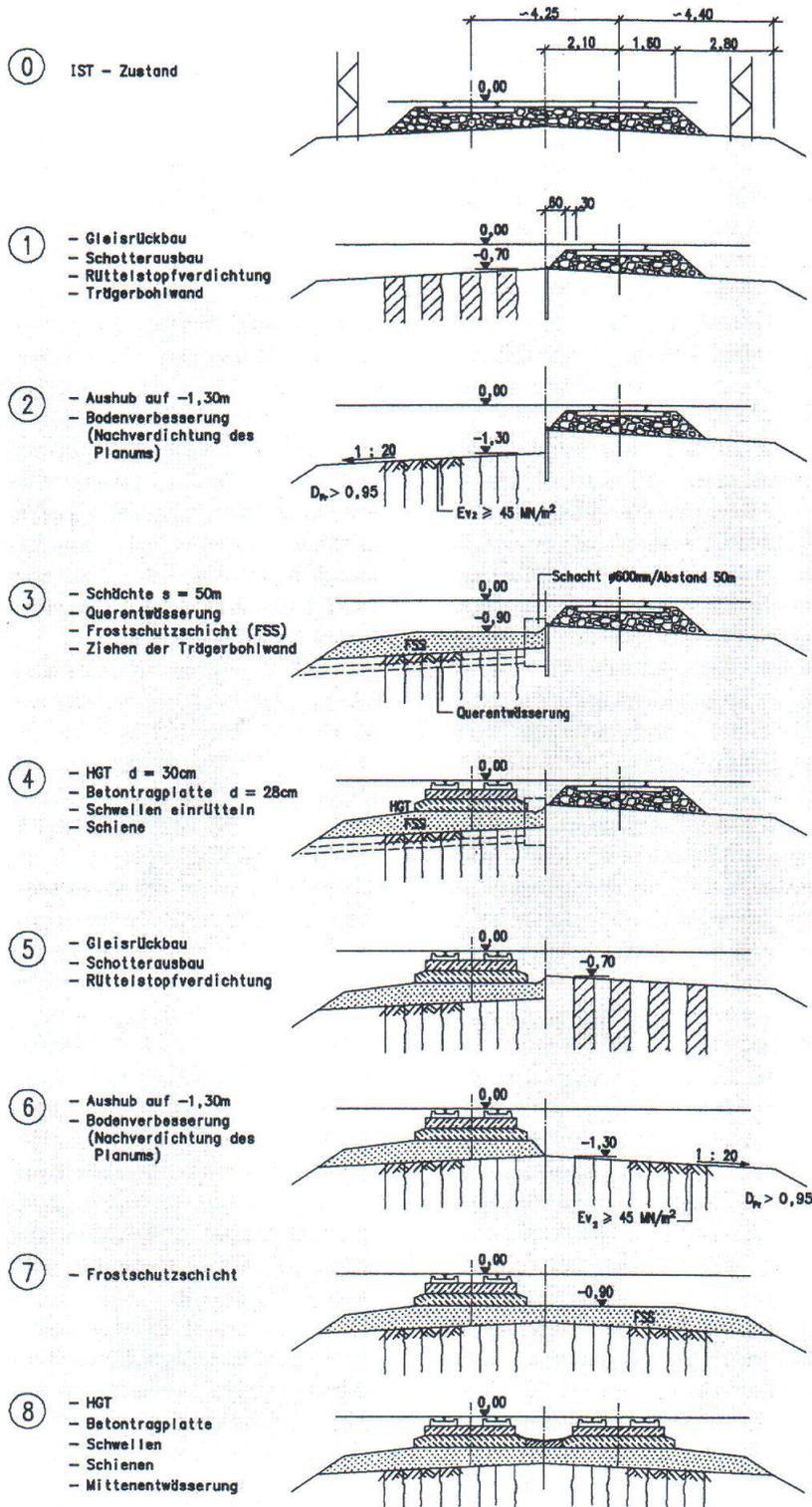


Bild 3. Reihenfolge der Arbeiten zur Herstellung der Festen Fahrbahn während eingleisigem Betrieb

Fig. 3. Sequence of work to construct the rigid track during single-line operation

port vorgesehenen alten Bahnschotter als Zugabematerial für die Stopfsäulen der Tiefenverdichtung. Veranschlagt war für den Materialverbrauch eine Schottermenge von $0,3 \text{ m}^3$ je Meter Stopfsäule. Die Vorteile dieser Technologie bestanden darin,

– daß der Abtransport des Schotter zur 60 km entfernten Recyclinganlage entfiel

– daß kein zusätzliches Material für die Stopfsäulen beschafft, auf den Damm transportiert und zwischengelagert werden mußte, und

– daß die Verdichtungsgeräte den Altschotter als Arbeitsebene nutzen konnten.

Da die Tiefenverdichtung in relativer Nähe zum befahrenen Nachbargleis ausgeführt wurde, war für das jeweilige Betriebsgleis die Lagestabilität zu sichern und ständig zu überwachen. Ein Konzept zur meßtechnischen Lageüberwachung des Betriebsgleises an ausgewählten Stellen wurde aufgestellt und umgesetzt. Die Meßfelder wurden entsprechend den wechselnden Dammhöhen festgelegt. Fiel die Lageänderung in eine unbedenkliche Größenordnung von maximal 3 bis 5 mm, konnte die Tiefenverdichtung für diesen Dammbereich ohne zusätzliche Einschränkungen weitergeführt werden. Messungen erfolgten sowohl während des Verdichtungs Vorganges als auch nach Herstellung aller Stopfreiheiten im Testfeld. Die Messungen ergaben Höhenverschiebungen der Schienen im alten Schottergleis zwischen -3 mm und $+1,5 \text{ mm}$, wobei Verschiebungen von mehr als 1 mm die Ausnahme bilden. In einem Punkt wurde eine Gleissetzung von 5 mm gemessen. Die horizontalen Lageveränderungen waren in der Regel so gering, daß die Meßtoleranz von $\pm 3 \text{ mm}$ unterschritten wurde.

Weil die Stopfarbeiten sehr nahe am Gefahrenbereich des benachbarten Zugverkehrs ausgeführt werden mußten, wurde die innere Stopfsäulenreihe nur am Tage hergestellt. Die Reihenfolge der Herstellung der Stopfreiheiten war so festgelegt, daß zuerst die innere Reihe ausgeführt wurde, um dadurch eine abschirmende Wirkung für das Betriebsgleis während der Ausführung der restlichen drei Stopfreiheiten zu erzielen. Aufgrund der überwiegend geringen gemessenen Verformungen am Schottergleis wurde in einem gesonderten Testabschnitt überprüft, ob eine andere Reihenfolge der Herstellung zu größeren Setzungen führt. Dabei wurden keine signifikanten Differenzen zwischen den verschiedenen Reihenfolgen festgestellt. Aus den Meßdaten der Gleislage ist die Tendenz ablesbar, daß die Gleisverschiebungen bei hohen Dämmen und damit längeren

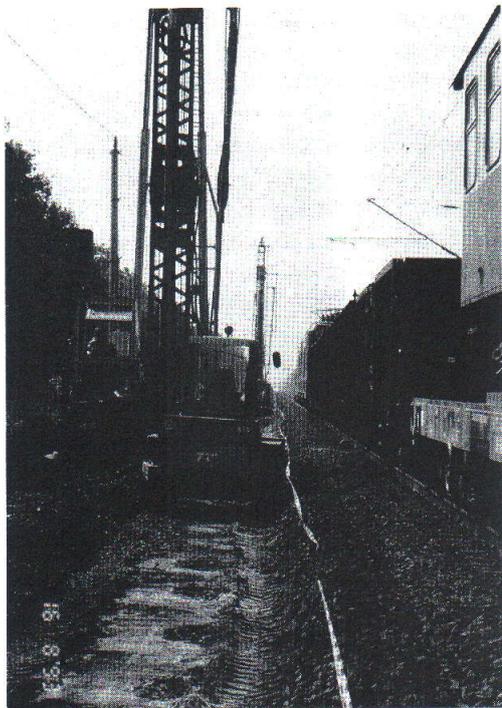


Bild 4. Herstellung der inneren Stopfsäulenreihe neben dem befahrenen Gleis

Fig. 4. Construction of the inner row of vibrated stone columns next to the operational track

Stopfsäulen und Rüttelzeiten geringfügig gegenüber flachen Dämmen zunehmen.

Während der Verdichtungsarbeiten im Bereich von gering tragfähigen Schichten im Untergrund kam es zu einer örtlich stärkeren Verschiebung am Betriebsgleis, so daß die Gleislage im Schottergleis durch Nachstopfen korrigiert werden mußte. An dieser Stelle war auch in früherer Zeit ein erhöhter Unterhaltungsaufwand nötig. Im zweiten Bauabschnitt wurde die Tiefenverdichtung neben der nun in Betrieb befindlichen Festen Fahrbahn in diesem Abschnitt nach Herstellung der inneren zwei Stopfereien auf einer Länge von 50 m abgebrochen, da an der Festen Fahrbahn Setzungen von 12 mm aufgetreten waren. Zur Feststellung der Ursache der eingetretenen Setzungen wurde eine Schlauchkernbohrung bis in eine Tiefe von 14 m unter SO ausgeführt. Dabei wurden unter dem Dammauflager Wechsellagen von wassergesättigten schluffigen Feinsanden und dünnen, weichen Schlufflagen festgestellt, die

erschütterungs- bzw. verflüssigungsempfindlich reagieren. Ursache der Setzungserscheinung dürfte damit die Vibration der Tiefenverdichtung in Verbindung mit den empfindlichen Untergrundverhältnissen in diesem Bereich sein.

Um die Arbeiten in diesem erschütterungsempfindlichen Bereich des Bahndammes ohne schädliche Auswirkungen auf das Betriebsgleis fortsetzen zu können, mußte ein vibrationsarmes Verfahren gefunden werden.

Zum Einsatz kam eine Kombination aus Schraubbohrpfählen und Stopfsäulen. Die Schraubbohrpfähle wurden bis in eine Tiefe von 9,3 m unter SO gebohrt und auf einer Länge von 5 m mit Beton aufgefüllt. Der obere Teil bis zur Höhe der Arbeitsebene wurde durch Stopfsäulen gebildet, die direkt auf den noch weichen Beton aufgesetzt wurden. Dadurch konnte gewährleistet werden, daß der Bereich des Erdplanums nicht von starren Betonelementen durchstoßen wird und die Tragwirkung den durchgängigen Stopfsäulen etwa entspricht. Bei Anwendung dieses Verfahrens traten noch maximal weitere 3 mm Setzung ein, so daß insgesamt an dieser Stelle rund 15 mm Gesamtsetzung durch das Bauverfahren verursacht wurden.

Aufgrund der entstandenen weiträumigen Setzungsmulde war eine Betriebsgefährdung jedoch ausgeschlossen. Die Gleisverkantung wurde durch Nachjustierung der inneren Schiene ausgeglichen. Eine spätere Meßzugfahrt ergab für den Bereich der Setzungsmulde keine Beeinträchtigung der Gleislage.

Die Tiefenverdichtungsarbeiten während des ersten Bauabschnitts im August/September 1993 konnten innerhalb von sieben Wochen abgeschlossen werden. Für den zweiten Abschnitt im Januar/Februar 1994 wurden trotz schwierigerer Witterungsbedingungen und der zusätzlich herzustellenden Schraubbohrpfähle nur noch fünf Wochen benötigt.

5.3 Erdplanum

Nach Abschluß der Tiefenverdichtung erfolgte ein Abtrag der oberen Dammschüttung bis auf Höhe des späteren Erdplanums 1,3 m unter

Schienenoberkante. Der Aushub bis auf diese Höhe konnte nicht ohne Sicherung des entstehenden Geländesprungs zum befahrenen Schottergleis ausgeführt werden. Der notwendige Verbau wurde als wandernder Trägerbohlverbau von 2 km Länge ausgeführt. Nach Fertigstellung des Erdplanums und der Anschüttung des Frostschutzmaterials konnte der Verbau wieder entfernt bzw. umgesetzt werden. Zur Herstellung des zweiten Gleises konnte auf einen Verbau verzichtet werden, da der Aufbau der Festen Fahrbahn des fertigen Gleises eine genügende Standsicherheit bietet. Gleislageveränderungen am Betriebsgleis infolge der Verbauarbeiten bzw. Verbauverformungen wurden nicht festgestellt.

Für die Verdichtung des Erdplanums kam eine 10-t-Vibrationsglattmantelwalze zum Einsatz, die gleichzeitig Prüfwalze für die erdbautechnische Qualitätssicherung mit der Flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) [9] war. In der Regel wurden drei dynamische Walzübergänge je Spur ausgeführt. Aufgrund der festgelegten Walzengeschwindigkeit von 1 km/h konnten pro Tag Abschnitte von maximal 300 bis 400 m Länge verdichtet werden.

Bedingt durch erhöhte schluffige und organische Anteile im Boden sowie einen Grundwasserstand von örtlich nur 0,5 m unter dem Erdplanum verbunden mit reichlichen Niederschlägen, wurden die Vorgaben in einigen Bereichen nicht erreicht. Da durch weitere Walzübergänge keine Verbesserung mehr erzielt werden konnte, wurde eine Stabilisierung der nicht weiter verdichtungsfähigen Abschnitte des Erdplanums mit einer Zementverfestigung über den Stopfsäulen vorgenommen. Die Zementmenge betrug dabei 25 kg/m², die Frästiefe 30 cm. Zu erreichen war eine 28-Tage-Festigkeit von 1 N/mm². Die Bodenverfestigung erbrachte eine ebene, sehr stabile Planumsoberfläche, die nach ein bis zwei Tagen ohne nachteilige Folgen mit üblichen Radfahrzeugen befahren werden konnte, wodurch sich auch Vorteile für die Zugänglichkeit dieser Streckenabschnitte ergaben.

5.4 Frostschuttschicht (FSS)

Die gemäß Bild 2 infolge der Querneigung des Erdplanums unterschiedlich dicke FSS (innen 40 cm und außen 60 cm) wurde mit Dumpfern vor Kopf in zwei Lagen eingebaut. Die Fahrzeuge konnten auf dem frisch aufgeschütteten Frostschutzmaterial der unteren Lage fahren, ohne das fertige Erdplanum nachträglich zu beeinträchtigen. Die Oberfläche der FSS wurde ohne Querneigung hergestellt. Über den verfestigten Erdplanumbereichen konnte aufgrund der hohen Steifigkeit des Auflagers der Einbau der FSS ohne nachteilige Folgen für das Verdichtungsergebnis einlagig durchgeführt werden.

Um unnötig lange Rückwärtsfahrstrecken für die Dumper zu vermeiden, wurde der Materialtransport von beiden Seiten eines Abschnitts aus jeweils bis etwa zur Mitte zwischen den Zufahrten vorgenommen. Für jede Zufahrt mußten Zwischenlager angelegt werden, auf denen das Frostschutzmaterial von Straßenfahrzeugen auf geländetaugliche Dumper umgeladen wurde.

Zum Erreichen der geforderten Verdichtung wurde die untere Lage mit Hilfe einer Anhängewalze vorverdichtet. Für die obere Lage waren je Bahn in der Regel drei dynamische Walzübergänge ausreichend.

Die Gesamtmenge des eingebauten Frostschutzmaterials betrug netto 44 500 m³. Die Anlieferung erfolgte von umliegenden bahnzugelassenen Kiesgruben, wobei die natürlichen Kiesvorkommen in dieser Gegend häufig keine ausreichende Kornabstufung aufwiesen und, wie in Abschnitt 5.5 näher ausgeführt, Grobkornanteile zugemischt werden mußten.

5.5 Hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT)

Die Herstellung der hydraulisch gebundenen Tragschicht erfolgte zweilagig mit einem Fertiger, dessen Abziehbohle sich auf die Breite und die seitliche Abschrägung einstellen ließ. Zur Beschickung des Fertigers wurden Dumper eingesetzt, die auf der Frostschuttschicht ohne starke Spurenbildung fahren konnten. Die trotzdem nicht zu

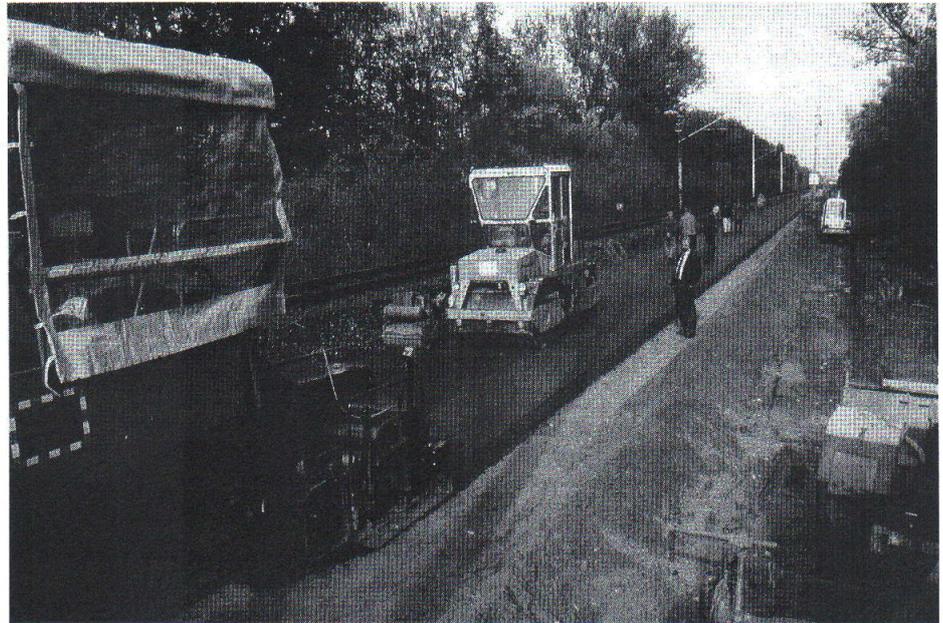


Bild 5. Herstellung der HGT mit Fertiger
Fig. 5. Production of HGT with finisher

vermeidenden Radspuren wurden vor dem Überbauen mit einer Gummiradwalze wieder geglättet. Zum Umladen des Mischgutes von Straßenfahrzeugen auf Dumper mußte für jede Dammzufahrt ein Zwischenlager eingerichtet werden.

Der zweilagige Einbau mit einem Fertiger erwies sich als zweckmäßig, da die geforderte Verdichtung des HGT-Materials meist schon durch den Fertiger erzielt werden konnte. Je nach Kontinuität der Materialzufuhr waren Tagesleistungen von 230 bis 300 m erreichbar.

Beim Einbau der HGT konnte eine Höhentoleranz von $\pm 1,5$ cm eingehalten werden. Besondere Sorgfalt erforderten die Übergangsbereiche zwischen den Tagesabschnitten sowie die Randbereiche. Für die Qualität der Randbereiche erwies sich der Einsatz eines Fertigers mit speziellen Kantenführungsschienen als besonders vorteilhaft. Bei Lückenschlüssen oder an Stellen, an denen aufgrund der örtlichen Gegebenheiten der Fertiger nicht mehr einsetzbar war, wurde der Einbau der HGT mit dem Grader vorgenommen. Die Randbereiche wurden in solchen Fällen um 10 bis 15 cm verbreitert. Die Tagesabschnitte konnten bereits einen Tag nach der Fertigstellung

von Fahrzeugen befahren werden. Da die einzige Möglichkeit der Andienung des Fertigers für die Herstellung der Fahrbahnplatte über die befahrbare HGT bestand, war es für den Bauablauf von besonderer Bedeutung, den Vorlauf der HGT ständig so groß zu halten, daß eine Zufahrtsmöglichkeit für den Materialtransport zum Fertiger der Fahrbahnplatte gegeben war. Bild 6 zeigt die Herstellung der Feste Fahrbahn auf der HGT mit dem Spezialfertiger der Firma Züblin.

5.6 Qualitätssicherung

Die in Abschn. 3.1 aufgeführten erdbautechnischen Anforderungen zur FSS und zum Unterbau/Untergrund waren durch ein Qualitätssicherungsprogramm aus Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen zu gewährleisten, was sowohl den sehr engen terminlichen Randbedingungen der Baumaßnahme als auch der neuen Bauweise gerecht wird.

Die in den Abschnitten 3.2 und 5.2 dargestellten Verbesserungsmaßnahmen mit einer Tiefenverdichtung sind den Anforderungen an den Unterbau/Untergrund ab 0,5 m unter Erdplanum mindestens gleichwertig und wurden mit vor- und nachlaufenden Drucksondierungen geprüft.

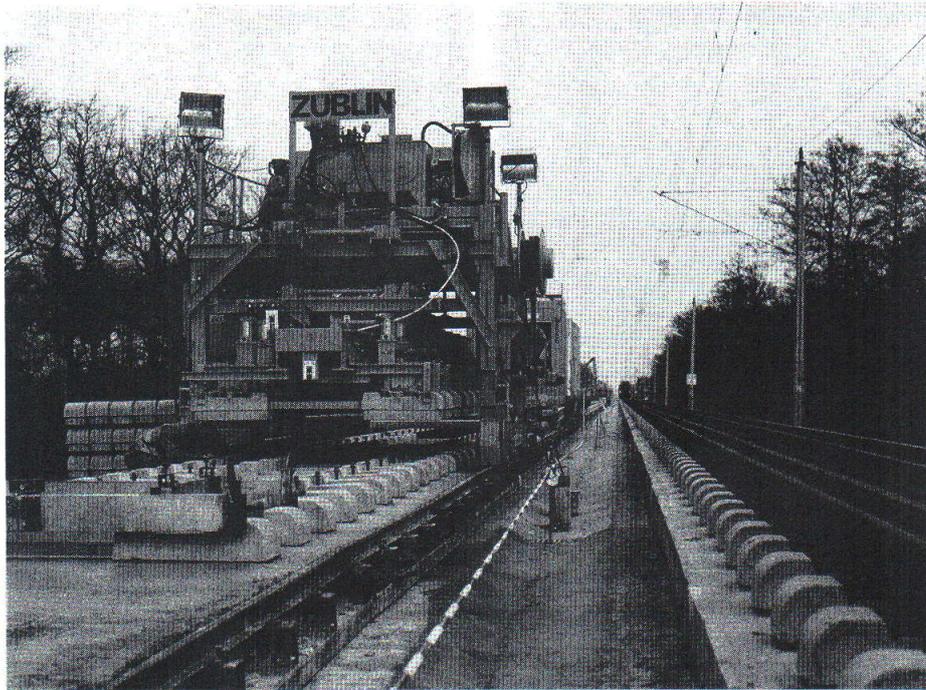


Bild 6. Herstellung der Fahrbahnplatte mit eingerüttelten Schwellen
 Fig. 6. Production of the track slab with vibrated sleepers

Die erdbautechnischen Prüfungen des Erdplanums und der FSS wurden wie folgt durchgeführt:

- **Eigenüberwachungsprüfungen:** ausschließlich die flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) sowie Eignungsprüfungen zum FSS-Material
- **Kontrollprüfungen:** Überprüfungen des Verdichtungsgrades D_{pr} mit konventionellen Methoden bzw. mit radiometrischen Verfahren sowie der Tragfähigkeit mit der dynamischen Fallplatte [10]

Durch vorlaufende Versuchsfelder wurden die FDVK und die dynamische Fallplatte gemäß Tabelle 2 kalibriert und die Abnahme-

bedingungen festgelegt. Als FDVK-System war eine Vibrationswalze (10 t) mit Dynapac-Verfahren (Meßwert CMV) im Einsatz.

Die Erfahrungen mit der Art der angesprochenen Qualitätssicherung waren insgesamt positiv. Lediglich beim Nachweis von $U \geq 6$ und $k \geq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ für das FSS-Material haben sich mit den örtlichen Materialvorkommen Probleme derart ergeben, daß für $D_{pr} \geq 1,0$ zunächst kleinere Durchlässigkeitsbeiwerte gemessen wurden. Erst durch besondere Zumischung von bestimmten Kornfraktionen zu dem vorhandenen FSS-Material konnten die Durchlässigkeitsanforderungen erfüllt werden.

Tabelle 2. Erdbautechnische Abnahmebedingungen aus Kalibrierungsversuchen der FDVK und der dynamischen Fallplatte
 Table 2. Geotechnical acceptability criteria from calibration tests of FDVK and dynamic drop plate

Bauteil	FDVK: CMV [-]		Dynam. Fallplatte $E_{vd} \text{ [MN/m}^2\text{]}$
	Mindestwert	Mittelwert	
FSS	≥ 38	≥ 50	≥ 50
Erdplanum	≥ 25	≥ 30	$\geq 22,5$

6 Messungen

Nach den bisherigen Untersuchungen zur Festen Fahrbahn [1], [11] ist das Setzungsverhalten unter Verkehrsbelastung u. a. auch abhängig von der Anzahl der Zugüberfahrten. Hinzu kommen Setzungsanteile aus Eigensetzungen der Dämme und Setzungen des Untergrundes infolge der Dammlast.

Zu den dynamischen Lasteinwirkungen bei Festen Fahrbahnen auf den Unterbau/Untergrund ist nach [11] bisher bekannt, daß sich die Beanspruchung aus Achslasten infolge der dynamischen Verkehrsbelastung bis zu Fahrgeschwindigkeiten von 250 km/h um etwa ein Drittel gegenüber der statischen Last erhöht. Während die Spannungen aus statischer Last nach dem bisherigen Kenntnisstand etwa umgekehrt proportional zum Quadrat der Tiefe abnehmen, nehmen die Spannungen aus dynamischen Lasten demgegenüber nur etwa umgekehrt proportional zur Tiefe ab. Bisher ist man von einer Einflußtiefe der Spannungen infolge der dynamischen Verkehrslasten von etwa 2,5 m unter der Tragplatte ausgegangen.

Für die Feste Fahrbahn Bauart Züblin in Wittenberge-Dergenthin wird ein umfangreiches Meß- und Untersuchungsprogramm [13] zur Absicherung der Bauweise mit Setzungs-, Erschütterungs-, Extensometer-, Neigungs- und Feuchtigkeitsmessungen in vier Meßquerschnitten (MQ) über einen Zeitraum von rund zwei Jahren nach Inbetriebnahme durchgeführt. Die Meßquerschnitte befinden sich am Ende des Streckenbereichs in Dammlage (Dammhöhe ca. 5 m).

Bild 7 zeigt den bisherigen Setzungsverlauf infolge Verkehrsbelastung. In der Setzungskurve für den MQ 1 nach Bild 7 wurden die in Abschn. 5.2 beschriebenen Mitnahmesetzungen an diesem Meßquerschnitt während der Tiefenverdichtung von maximal 15 mm eliminiert, um nur den Verkehrslastsetzungsanteil zu erhalten. Die Sprünge in den Setzungskurven sind im Zusammenhang mit der möglichen Meßgenauigkeit des Feinnivellements von $\pm 0,3 \text{ mm}$ zu sehen. Nach den Meßergebnissen

verhält sich die Feste Fahrbahn mit Setzungen um 1 mm infolge Eisenbahnbetrieb nach etwa 200 Betriebstagen erwartungsgemäß sehr setzungsarm.

Im Bild 8 sind die gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten beispielhaft für den Meßquerschnitt 2 (MQ 2) tiefenabhängig unter der Festen Fahrbahn für Zugfahrgeschwindigkeiten zwischen 50 und 130 km/h dargestellt. Höhere Geschwindigkeiten wurden bei den bisherigen Messungen an den Meßquerschnitten noch nicht gefahren. Ergebnisse dazu sind erst bei weiteren Folgemessungen zu erwarten. Die Größe von v_{max} ist neben dem Lok- und Zugtyp und der Fahrgeschwindigkeit auch abhängig vom Zustand der Räder (Radunwuchten).

Aus dem Vergleich der in Bild 8 dargestellten Meßergebnisse mit früheren Messungen im Schotteroberbau [12] geht hervor, daß der Schotteroberbau eine größere dynamische Einwirkung auf den Unterbau gegenüber der Festen Fahrbahn bewirkt, die Schwinggeschwindigkeit aber zur Tiefe stärker abklingt. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten unter der Festen Fahrbahn Bauart Züblin in dem hier dargestellten Streckenabschnitt Wittenberge–Dergenthin korrespondieren gut mit älteren Messungen auf Versuchsstrecken mit anderen Oberbauformen der Festen Fahrbahn gemäß [12]. Der starke Abfall von v_{max} in Bild 8 unmittelbar unter der HGT in der FSS kann auch infolge Brückenbildung meßtechnisch begründet sein und sollte nicht überbewertet werden. An den Ergebnissen in Bild 8 ist besonders der Umstand hervorzuheben, daß die Erschütterungseinwirkungen nahezu in gleicher Größenordnung bis in tiefere Bereiche unter der Festen Fahrbahn vorhanden sind. Der Vergleich zu den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten bei der Tiefenverdichtung gemäß Bild 8 zeigt eine deutlich überproportionale Vorwegnahme der Erschütterungseinwirkungen auf den Unterbau/Untergrund aus der Tiefenverdichtung im Vergleich zur späteren Festen Fahrbahn und stellt damit eine sinnvolle Unterbau/Untergrund-

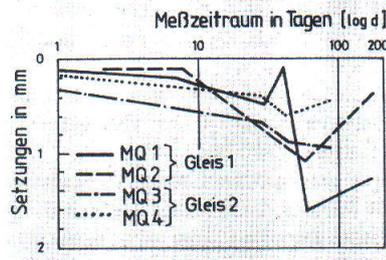


Bild 7. Setzungsverlauf infolge Verkehrsbelastung MQ 1 bis MQ 4
Fig. 7. Progress of settlement caused by traffic loading MQ 1 to MQ 4

Ertüchtigungsmaßnahme für die hier vorhandenen bereichsweise sehr locker gelagerten Sande im Hinblick auf möglichst geringe Nachsetzungen unter der Festen Fahrbahn aus dem Eisenbahnverkehr dar.

Die Analysen der Frequenzspektren zeigen unter der Festen Fahrbahn Bauart Züblin einen Hauptfrequenzbereich zwischen 40 und 60 Hz mit größeren Anteilen auch unter 20 Hz. Der Frequenzbereich des Tiefenrüttlers wurde von den Geophonen im Boden analog zur Rüttelfrequenz um 50 Hz gemessen. Der Unterschied zwischen Tiefenverdichtung und Verkehrsbelastung unter der Festen Fahrbahn besteht darin, daß die Schwinggeschwindigkeiten v_{max} aus der erstgenannten Beanspruchung zum größten Teil aus den Horizontalkomponenten und letztere aus der Vertikalkomponente der Schwinggeschwindigkeiten resultieren.

7 Ausblick

Aus den Diskussionen um die Anforderungen an den Unterbau/Untergrund bei Festen Fahrbahnen ist erkennbar, daß gegenüber dem Schotteroberbau etwa gleiche oder nur geringfügig erhöhte Anforderungen notwendig sind. Dies wird auch durch die Erfahrungen aus dem hier vorgestellten Projekt bestätigt. Bei sehr ungünstigen Auflagerbedingungen für die Feste Fahrbahn sind Untergrundertüchtigungen notwendig, die im vorliegenden Fall nur etwa 6% Prozent der Gesamtbaukosten ausmachen. Damit ist aber auch gegenüber dem Schot-

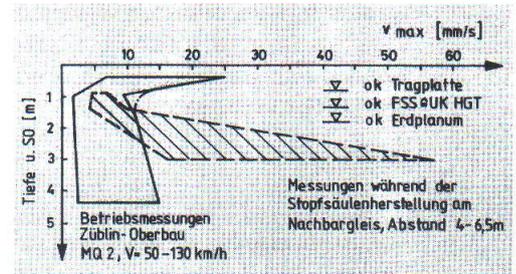


Bild 8. Schwinggeschwindigkeiten v_{max} am MQ 2 infolge Eisenbahnbetrieb im Vergleich zur Erschütterungsbeanspruchung bei der Stopfsäulenherstellung
Fig. 8. Vibration frequency v_{max} at MQ 2 caused by railway traffic in comparison to vibration stresses during the production of stone columns

teroberbau ein erheblich niedrigerer Unterhaltungsaufwand zu erwarten. Um die Auswirkungen eines verringerten Aufwandes für die Ertüchtigung des Unterbaus/Untergrundes zu testen, wurden zwei weitere Testfelder im Bereich der Baumaßnahme mit flachem Dammquerschnitt eingerichtet, in denen die Tiefenverdichtung einmal mit vergrößerten Rasterabständen ausgeführt bzw. im zweiten Bereich ganz auf die Tiefenverdichtung verzichtet wurde. Weiterhin wurde in einem 50 m langen Testbereich die untere Lage der HGT als Zementverfestigung in die Frostschuttschicht eingefräst und nur die obere Lage mit dem Fertiger hergestellt, mit dem Ziel, die Qualität dieser wirtschaftlicheren Bauweise gegenüber dem zuvor in Abschn. 5.4 beschriebenen bisher geforderten Verfahren nachzuweisen. Aufgrund der kurzen Betriebszeit liegen noch keine aussagekräftigen Meßergebnisse aus den genannten Testbereichen vor. Es ist aber zu erwarten, daß aus den Erfahrungen an den fertiggestellten Streckenabschnitten in Fester Fahrbahn Konsequenzen für eine wirtschaftlichere Bemessung des Regelquerschnittes gezogen werden können.

Letztlich wird die Qualität und Wirtschaftlichkeit dieser Strecken entscheidenden Einfluß darauf haben, ob sich die Bauweise Feste Fahrbahn in Deutschland gleichberechtigt neben dem bisher vorherrschenden Schotteroberbau

etablieren wird und sich vielleicht sogar als Regelbauweise für Strecken mit Fahrgeschwindigkeiten ab 160 km/h durchsetzt.

Literatur

- [1] *Kempfert, H.-G. und Vogel, W.*: Bodenmechanische und erdbautechnische Randbedingungen bei Feste Fahrbahn - Konstruktionen im Eisenbahnbau. Vorträge der Baugrundtagung in Dresden, Eigenverl. Deutsche Gesellschaft f. Erd- und Grundbau e. V. 1992, S. 477-496.
- [2] *Fastenau, W., Widmann, H. und Jetter, A.*: Die Feste Fahrbahn Bauart Züblin, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Hestra-Verlag Darmstadt, Heft 7/1991, S. 443-449.
- [3] *Kempfert, H.-G. und Vogel, W.*: Erdbauwerke für Feste Fahrbahn - Darstellung des Entwicklungsstandes, Schlußbericht, Konstanz, München (unveröffentlicht).
- [4] DB AG: DS 836, Vorschrift für Erdbauwerke (VE), Ausgabe Januar 1985.
- [5] DB AG: DS 836, EzVE 14, Erdbauwerke für Feste Fahrbahnen. Entwurf Juli 1992.
- [6] Ingenieurbüro Gremzow, Schlegel + Partner: Baugrundgutachten über Ausbaumaßnahmen mit Schottergleis. 1992 (unveröffentlicht).
- [7] Ingenieurbüro Kempfert+Partner: Gutachten zum Einbau der Festen Fahrbahn und zu erdbautechnischen Anforderungen. 1992/93 (unveröffentlicht).
- [8] DB AG: Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn. Entwurf 1994.
- [9] *Floss, R., Bräu, G., Gabauer, M., Gruber, N. und Obermayer, J.*: Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, Bonn 1991.
- [10] TP BF.StB, Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit Hilfe des leichten Fallgerätes. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Ausgabe 1992.
- [11] BAM: Dynamische Einwirkungen: Momentendynamik und Setzungen aus zyklischer Belastung, Statusbericht Feste Fahrbahn, Berlin 1990 (unveröffentlicht).
- [12] Prüfamtsamt für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, TU München: Berichte zum Versuchsprogramm Feste Fahrbahn 1988, 1989, 1990, 1991 (unveröffentlicht).
- [13] Ingenieurbüro Kempfert+Partner: 1. und 2. Meßbericht zum Meß- und Untersuchungsprogramm Feste Fahrbahn Wittenberge-Dergenthin 1994 (unveröffentlicht).

Autoren dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert, Kempfert + Partner, Ingenieurbüro für Geotechnik, Max-Stromeier-Straße 1, 78467 Konstanz

Dr.-Ing. Holger Wahrmund, Ed. Züblin AG, Zentrale Technik Büro Berlin, Stresemannstraße 128, 10117 Berlin

Seminar „Wind, Rain, and the Building Envelope“ in Ontario

Für moderne Hochbauten sind häufig die Kosten für die Gebäudehülle und die Kosten für die Tragstruktur etwa gleich hoch. Andererseits treten Gebäudeschäden überwiegend an der Gebäudehülle (Dacheindeckungen, Dachabdichtungen, Außenwandbekleidungen) auf. Die beobachteten Schäden sind hauptsächlich durch Wind- und Regeneinflüsse bedingt. Während die Windwirkung auf das Tragverhalten von Bauwerken in den vergangenen 30 Jahren intensiv erforscht wurde, wurde der Windeinwirkung auf die Gebäudehülle weit weniger Aufmerksamkeit geschenkt. Der windbedingte Eintrag von Regen an Gebäudewänden, insbesondere an durchlässigen Außenwandbekleidungen, wird erst seit jüngster Zeit ansatzweise untersucht.

Um einen umfassenden Überblick über die weltweiten For-

schungsaktivitäten auf dem Gebiete der Einwirkung von Wind und Regen auf die Gebäudehülle zu gewinnen, fand vom 15. bis zum 18. Mai 1994 ein Einladungsseminar mit dem Titel „Wind, Rain, and the Building Envelope“ an der University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, statt. Das Seminar wurde von Dr. Alan Dalgliesh vom National Research Council, Canada, organisiert. Es waren alle Forschungsgruppen, welche auf diesem Spezialgebiet der Bauwerksaerodynamik und Bauphysik aktiv sind, aufgefordert worden, Beiträge einzureichen. Von deutscher Seite nahmen Dipl.-Ing. J. Wacker, Karlsruhe, und Prof. H. J. Gerhardt, Aachen, teil.

Insgesamt 30 Beiträge behandelten die folgenden Themenbereiche:

- Wind-driven rain and permeable facades
- Wind pressures on the envelope - internal
- Wind pressures on the envelope - peaks
- Design guides and wind-born missiles
- Rain technology

Drei Foren gaben den etwa 40 Teilnehmern zusätzliche Gelegenheit zu einer intensiven Diskussion der präsentierten Forschungsergebnisse und Praxiserfahrungen. Die Beiträge des Einladungsseminars wurden als Sonderheft (Special Issue) des Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics als Volume 53, No 1/2 im November 1994 veröffentlicht.

Prof. H. J. Gerhardt, M.Sc., Aachen