

**Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik
der Technischen Hochschule Darmstadt**

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Rolf Katzenbach

Heft 35

**Vorträge zum
3. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium
am 21. März 1996**

SONDERDRUCK

Darmstadt · März 1996

Gründungstechnische Besonderheiten bei der Ausführung von zwei Abschnitten mit Fester Fahrbahn im norddeutschen Raum

Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Kempfert

Ingenieurbüro Kempfert + Partner GmbH, Konstanz

1 Einleitung

Im Rahmen von Verkehrsprojekten zur Deutschen Einheit werden in Teilabschnitten unterhaltungsarme Oberbauformen ausgeführt, die insgesamt eine bessere Lagestabilität des Gleises besonders 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 Betontragplatte oder eine Asphalttragschicht, in die der Gleisrost in unterschiedlicher Weise fest eingebunden werden kann.

Die Eignung dieser neuen Oberbauform wurde in der Vergangenheit lediglich in sehr kurzen Versuchsabschnitten auf Brücken, Erdbauwerken (nur eingleisig) und im Tunnel erprobt (Kempfert, Vogel, 1992), (Fastenau, Widmann, 1991).

Auf der Ausbaustrecke Hamburg-Berlin wurde 1993/94 ein etwa 6 km langer Abschnitt zwischen Wittenberge und Dergenthin (Kempfert, Wahrmund, 1995) und ein etwa 8 km langer Abschnitt zwischen Breddin und Glöwen im Land Brandenburg zweigleisig mit der neuen Oberbauform ausgeführt. Für die erneuerten Abschnitte ist eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h, optional bis 200 km/h, vorgesehen. In diesen Abschnitten wurde die Feste Fahrbahn erstmalig auf der freien Strecke in nennenswertem Umfang ausgeführt. Dabei waren gleichzeitig relativ ungünstige Untergrundverhältnisse vorhanden sowie bei der Bauausführung enge Terminvorgaben und die Aufrechterhaltung eines eingleisigen Bahnbetriebes mit Fahrgeschwindigkeiten bis 120 km/h einzuhalten.

2 Alte Bahnanlagen und Untergrundverhältnisse

2.1 Wittenberge - Dergenthin

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. Unter dem Dammauflager sind überwiegend schluffige Fein- bis Mittelsande in mitteldichter Lagerung vorhanden (Bild 1). Die ehemalige Mutterbodenschicht bzw. organische Ablagerungen wurden bei der Dammerstellung vor etwa 100 Jahren offenbar überschüttet und stellten 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 $\eta = 1$.

2.2 Breddin - Glöwen

Die Trasse verläuft im Bereich pleistozäner Bodenarten (Geschiebelehm, Geschiebemergel) der Grundmoränen der Weichsel- und Saalevereisung. Unter den vorhandenen Gleisen war der Oberbau aus Schotter in einer Mächtigkeit von überwiegend zwischen 0,5 und 0,7 m Dicke vorhanden. Teilweise waren Schottersäcke bis 1,1 m vorhanden. Darunter folgt i.a. direkt der geschüttete Damm bzw. der anstehende Untergrund. Die stark unterschiedlichen Schotterdicken deuten auf Einrüttelungen oder Eindrückungen des Schotters in den ursprünglich wenig verdichteten Damm/Untergrund hin. Teilweise finden sich besonders in den Niederungsbereichen relativ geringmächtige ($\leq 1,0$ m) organische Schichten, die überwiegend als Torfe ausgebildet sind. Vorhandene Niederungen des Geländes wurden beim Bau der vorhandenen Strecke seinerzeit überschüttet. Die Aufschüttungen für den Bahndamm wurden dabei zum größten Teil direkt auf den vorhandenen Mutterboden aufgebracht. Im Streckenabschnitt wechseln bindige und nichtbindige Bereiche oberflächennah ab. Die tieferreichenden bindigen Bodenarten sind im

gesamten Streckenabschnitt eiszeitlich vorbelastet und zum größten Teil von Sanden unterschiedlicher Mächtigkeit, aber auch von organogenen Bildungen überlagert. Die pleistozänen Sande sowie die spätpleistozänen Talsande sind eiszeitlich nicht vorbelastet.

Die Sande weisen überwiegend lockere und mitteldichte Lagerungsschichten auf. Der Geschiebelehm bzw. Geschiebemergel steht in den oberen Zonen überwiegend in weicher bis steifer Konsistenz an. Der vorhandene Verdichtungsgrad der aufgeschütteten und unmittelbar unter dem Schotter anstehenden Böden beträgt $0,9 \leq D_{pr} \leq 1,0$. Während der Aufschlußarbeiten wurde nur bei wenigen Aufschlüssen Wasser zwischen 2,1 und 3,4 m unter SO angetroffen. Es handelt sich dabei größtenteils um Schicht- und Stauwasser in den Sanden oberhalb des Geschiebelehms/-mergels. In niederschlagsreichen Zeiten und nach der Schneeschmelze waren erhebliche Schicht- und Stauwasserstände bis zur Geländeoberfläche vorhanden.

3 Gründungstechnische Anforderungen und Konstruktion

3.1 Wittenberge - Dergenthin

Die seinerzeit zu berücksichtigenden erdbautechnischen Anforderungen enthält Tabelle 1, wobei NBS/300 für Neubaustrecken mit Fahrgeschwindigkeiten bis 300 km/h, Wittenberge die gewählten Anforderungen für die Baumaßnahme und ABS/200 die neuen Regelungen (nach DB AG, 1994) für Ausbaustrecken mit Fahrgeschwindigkeiten bis 200 km/h darstellen.

Bauteil	Höhen	Anforderungen		
		NBS/300	Wittenberge	ABS/200
Frostschuttschicht (FSS)	OK FSS gesamte FSS	$E_{v2} \geq 120 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $k \geq 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$E_{v2} \geq 100 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $k \geq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$E_{v2} \geq 100 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $k \geq 1 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$
Unterbau/Untergrund	Erdplanum (EP) bis 0,5 m unter EP bis 1,3 m unter EP bis 1,8 m unter EP bis 2,5 m unter EP bis Dammsohle	$E_{v2} \geq 60 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 1,00$ $D_{pr} \geq 0,98$	$E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 0,97$ $D_{pr} \geq 0,95$	$E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$ $D_{pr} \geq 0,98/0,97$ $D_{pr} \geq 0,97$

Tabelle 1 Erdbautechnische Anforderungen für Feste Fahrbahnen

Aufgrund der Anforderungen und der überwiegend auf der Strecke Wittenberge-Dergenthin vorhandenen lockeren Lagerungsdichte des Dammes wurde eine Baugrundverbesserungsmethode durch eine kombinierte Rütteldruck/Rüttelstopfverdichtung (Tiefenverdichtung) im Rastermaß von 1,6 m so ausgeführt, daß die im Untergrund befindliche Mutterbodenschicht durchstoßen und auch das Dammauflager erheblich verbessert wird. Bild 1 zeigt die Stopfsäulen und den konstruktiven Aufbau der Festen Fahrbahn sowie das überwiegend vorhandene Körnungsband des Dammmaterial.

Die Feste Fahrbahn Bauart Züblin besteht aus einer 28 cm starken Tragplatte aus Stahlbeton (B 35) mit Schwellen. Die Tragplatte liegt auf einer 30 cm starken hydraulisch gebundenen Tragschicht (HGT). Die Frostschutzschicht (FSS) hat eine Mindeststärke von 40 cm zwischen den Gleisen und nimmt nach außen hin gefällebedingt (1:20) bis auf 60 cm Dicke zu.

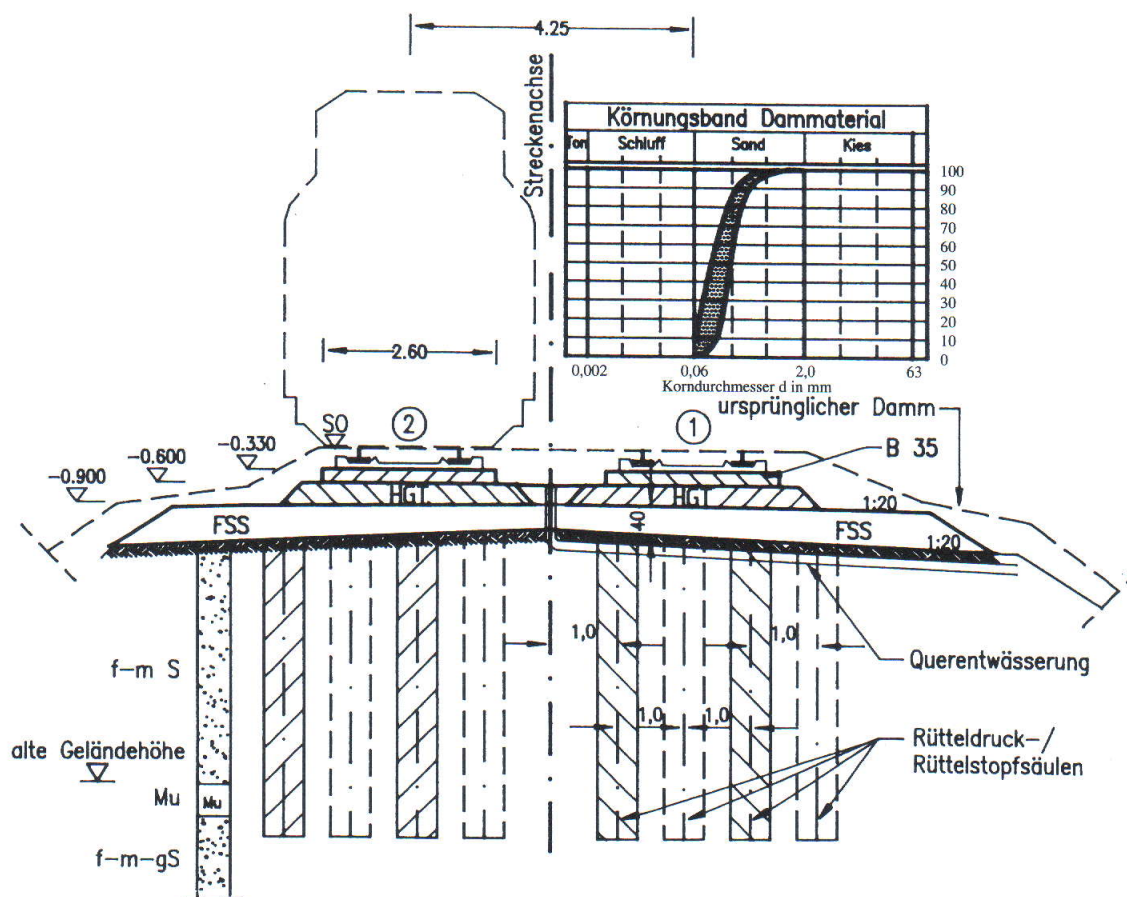


Bild 1 Ausgeführter Querschnitt Feste Fahrbahn Bauart Züblin auf dem Streckenabschnitt Wittenberge - Dergenthin mit Gründungssituation und Körnungsband des Dammmaterials

Die Entwässerung der Gleise erfolgt über eine Mittenentwässerung, die zwischen eine bituminöse Abdichtung gebettet ist. Über Einlaufschächte und Querentwässerungsleitungen wird das gesammelte Wasser alle 50 m nach außen geleitet.

Gleislagekorrekturen sind bei einer Festen Fahrbahn bisher nur durch Ausgleichsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung in bestimmten Grenzen möglich. Für die hier ausgeführte Bauart Züblin betragen die maximalen Korrekturmöglichkeiten an der Schienenbefestigung nach oben 22 mm, nach unten 4 mm und in seitlicher Richtung jeweils 5 mm. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer setzungsarmen Gründung.

3.2 Breddin - Glöwen

In diesem Abschnitt wurde die Bauart Rheda ausgeführt. Der konstruktive Aufbau ist im Bild 2 dargestellt.

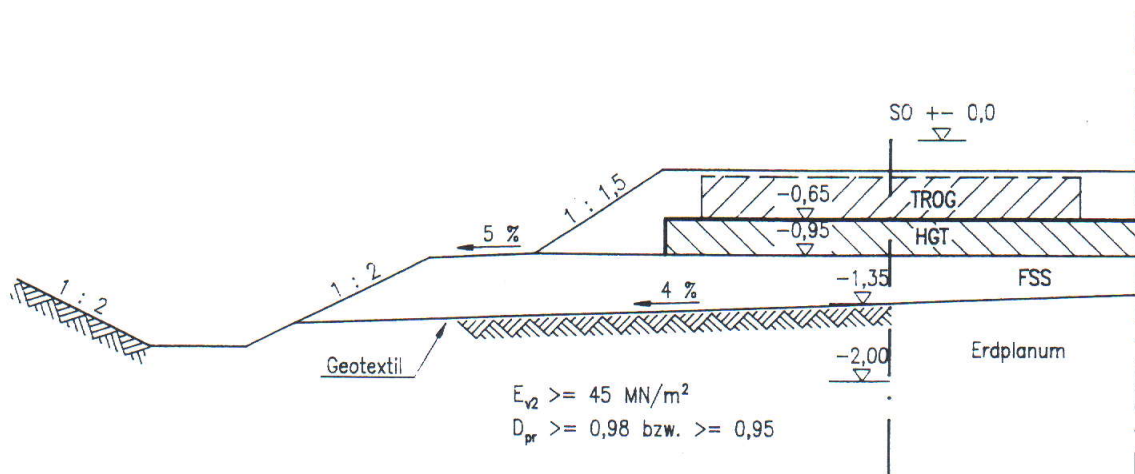


Bild 2 Ausgeführter Querschnitt Feste Fahrbahn Bauart Rheda (D+W) auf dem Streckenabschnitt Breddin - Glöwen und einzuhaltende erdbautechnische Prüfgrößen.

Dabei wurde eine Frostschutzschichtdicke von 0,4 m in Gleisachse vorgesehen. Auf der FSS liegt der Feste Fahrbohnoberbau mit einer Höhe von 0,95 m bis SO. Daraus ergibt sich das Erdplanum in einer Tiefe von ca. 1,35 m unter SO. Als erdbautechnische Prüfgrößen waren auf dem Erdplanum bis 0,5 unter OK im Rahmen der Zustimmung im Einzelfall folgende Werte einzuhalten bzw. in Anlehnung an Tabelle 1 zu verfahren:

$$E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2, \quad D_{pr} \geq 0,98$$

Im Zuge der Baumaßnahme wurde von der Bauherrenseite entschieden, die erdbautechnischen Qualitätsanforderungen gegenüber der Zustimmung im Einzelfall zu modifizieren. Danach waren im weiteren Bauablauf folgende Prüfgrößen bis 0,5 m unter OK Erdplanum bzw. 2 m unter SO einzuhalten

$$E_{v2} \geq 45 \text{ MN/m}^2, D_{pr} \geq 0,95$$

Zum vollständigen Nachweis der Verdichtungsanforderung wurde festgelegt, die Dichteprüfungen in 2 Ebenen ca. 0,3 m unter OK Erdplanum und auf OK Erdplanum auszuführen.

4 Bauausführung der Gründungsarbeiten

4.1 Wittenberge - Dergenthin

a) 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 Abtransport vorgesehenen alten Bahnschotters als Zugabematerial für die Stopfsäulen der Tiefenverdichtung. Veranschlagt war für den Materialverbrauch eine Schottermenge von 0,3 m³ je Meter Stopfsäule. Die Vorteile dieser Technik bestanden darin,

- daß der Abtransport des Schotters 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 (Bild 3), 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 er-

folgten sowohl während des Verdichtungsvorganges als auch nach Herstellung aller Stopfreiheiten im Testfeld. Die Messungen ergaben Höhenverschiebungen der Schienen im alten Schottergleis zwischen -3 mm und +1,5 mm, wobei Verschiebungen von mehr als 1 mm die Ausnahme bildeten. Nur in einem Punkt wurde eine Gleissetzung von 5 mm gemessen. Die horizontalen Lageveränderungen waren in der Regel so gering, daß die Meßtoleranz von ± 3 mm unterschritten wurde.

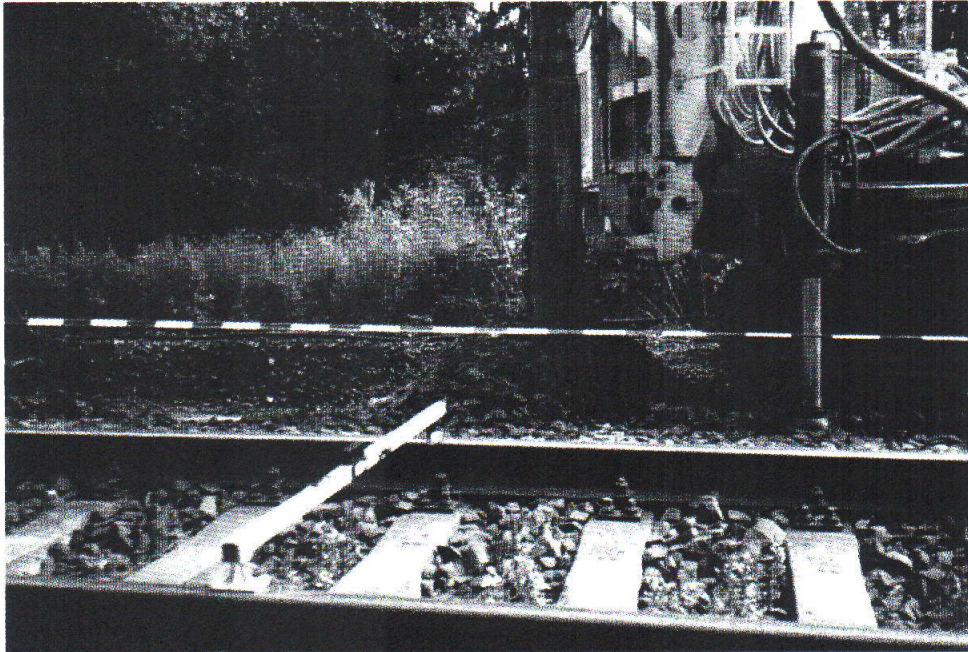


Bild 3 Ausführung der Tiefenverdichtung und Lageüberwachung des Betriebsgleises mit der Gleiswaage

Da 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 Stopfsäulen und Rüttelzeiten geringfügig gegenüber flachen Dämmen zunehmen.

Während der Verdichtungsarbeiten im Bereich einer Weichschicht im Untergrund kam es zu einer örtlich begrenzten stärkeren Setzung 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

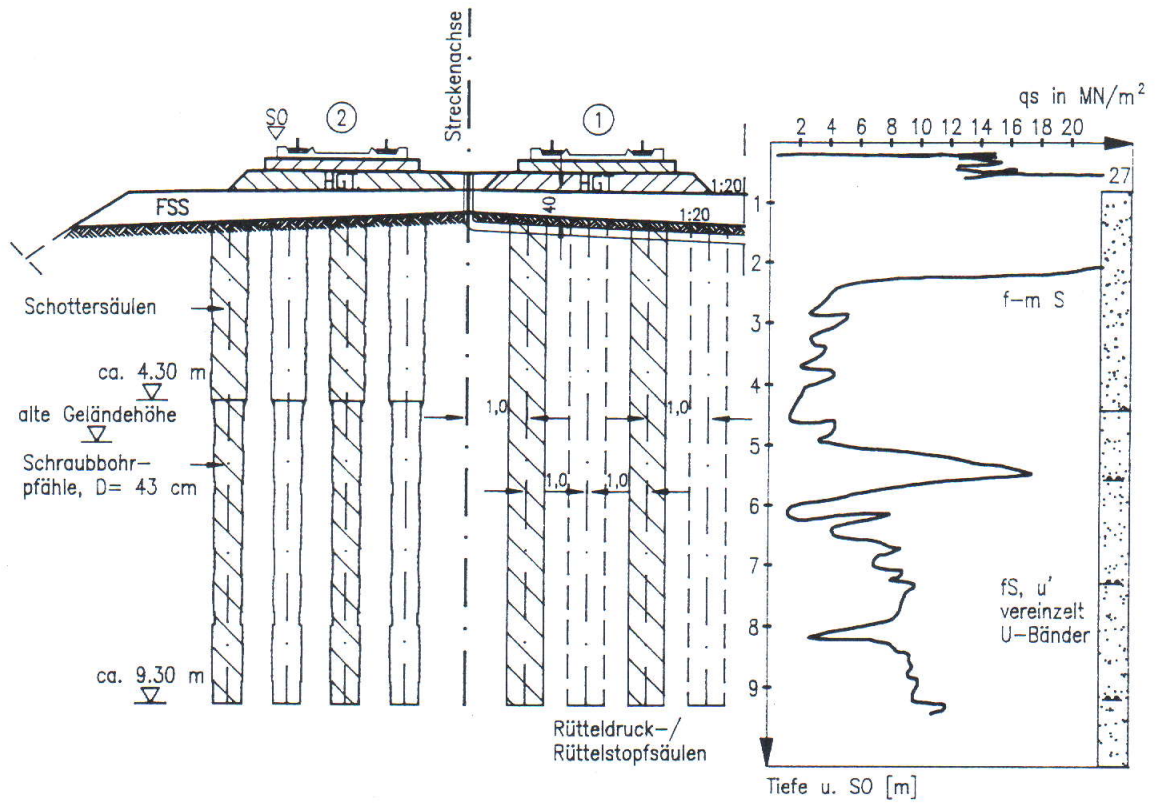
die Tiefenverdichtung neben der nun in Betrieb befindlichen Festen Fahrbahn in diesem Abschnitt nach Herstellung der inneren zwei Stopfreihen auf einer Länge von 50 m eingestellt, da an der Festen Fahrbahn Setzungen von 12 mm aufgetreten waren. Zur Feststellung der Ursache der eingetretenen Setzungen wurde eine Schlauchkernbohrung bis eine Tiefe von 14 m unter SO ausgeführt. Dabei wurden unter dem Dammauflager Wechsellagen von wassergesättigten schwach schluffigen Feinsanden und weichen Grobschluffbändern festgestellt, die erschütterungs- bzw. verflüssigungsempfindlich reagieren. Ursache der lokal verstärkten Setzungserscheinung dürfte damit die Vibration der Tiefenverdichtung in Verbindung mit den empfindlichen Untergrundverhältnissen in diesem Bereich sein.

Um die Arbeiten in diesem empfindlichen 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 (Bild 4). 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 hier insgesamt rund 15 mm Gesamtsetzung durch das Bauverfahren verursacht wurden. Aufgrund der entstandenen weiträumigen Setzungsmulde war eine Betriebsgefährdung jedoch nicht gegeben. 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 den zusätzlich herzustellenden Schraubbohrpfählen nur noch fünf Wochen benötigt.

b) 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.

a) Modifizierte Gründungsform



b) Herstellung der Schraubbohrpfähle neben der Festen Fahrbahn

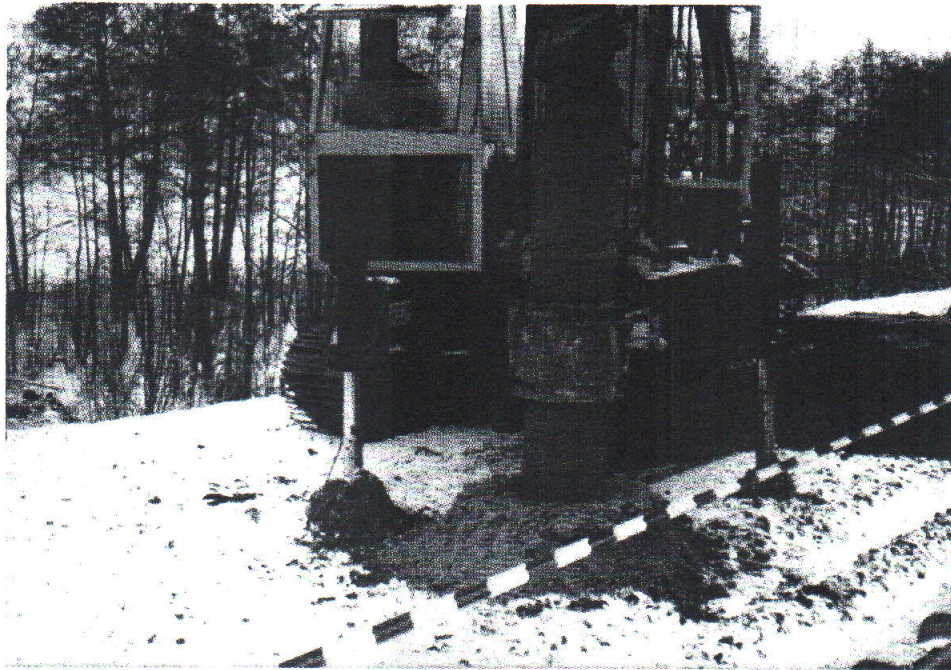


Bild 4 Erschütterungsarme Gründungsvariante im Bereich von Meßquerschnitt 1/3, Dammhöhe ca. 5 m

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) (Floss et al., 1991) 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 einem Grundwasserstand von örtlich nur 0,5 m unter dem Erdplanum verbunden mit reichlichen Niederschlägen, wurden die Verdichtungs- und Tragfähigkeitsvorgaben in einigen Bereichen nicht erreicht. Da durch weitere Walzenübergänge 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/m^2 , die Frästiefe 30 cm. Zu erreichen war eine 28 Tage-Festigkeit von 1 N/mm^2 . 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.

c) Frostschutzschicht (FSS)

Die gemäß Bild 1 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 Erdplanumsbereichen 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.

Zur Erreichung der geforderten Verdichtung wurde die untere Lage mit Hilfe einer Anhängewalze vorverdichtet. Für die obere Lage waren je Bahn in der Regel 3 dynamische Walzübergänge ausreichend.

Bei den im Rahmen der Fremdüberwachung durchgeführten Kontrollprüfungen der Wasserdurchlässigkeit an dem in der Region vorhandenen FSS-Material wurde festgestellt, daß die im Anforderungskatalog enthaltene Mindestgröße des Durchlässigkeitsbeiwertes k nicht eingehalten wurde, die Laborergebnisse zeigten Werte zwischen rund $1 \cdot 10^{-6}$

und $5 \cdot 10^{-6}$ m/s. Durch Zumischung von gröbereren Kornfraktionen konnte die Durchlässigkeit auf im Mittel rund $1 \cdot 10^{-5}$ m/s gesteigert werden. Unter Berücksichtigung der hier vorhandenen Überbreite der HGT, was die Wassereintrittsmöglichkeiten in die FSS vermindert, wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber dieser Durchlässigkeit zugestimmt und auch in DB AG (1994) als Anforderung für Ausbaustrecken übernommen.

4.2 Breddin - Glöwen

a) Tiefenverdichtung

In kurzen Teilbereichen mit mächtigeren Torfeinlagen wurden analog zu Abschnitt 4.1 Rüttelstopfsäulen ausgeführt.

b) Erdplanum

Das Erdplanum wurde freigelegt und mit Vibrationswalzen verdichtet. Aufgrund der sehr ungünstigen Witterungsverhältnisse mit sehr hohen Wasserständen und daraus resultierenden Aufweichungen im Bereich der Geschiebelehme des Erdplanums waren ausreichende Verdichtungsgrade bzw. Tragfähigkeiten im Prüfbereich bis etwa 2 m unter SO nicht durchgängig einzuhalten. In diesen Bereichen wurde eine Bodenverbesserung mit 25 kg Kalk/m² bis etwa 0,3 m unter OK Erdplanum durchgeführt (Bild 5). Zur Lagesicherung des während der Bauphase befahrenen Nachbargleises wurde ein konventioneller Bohlträgerverbau eingebaut.

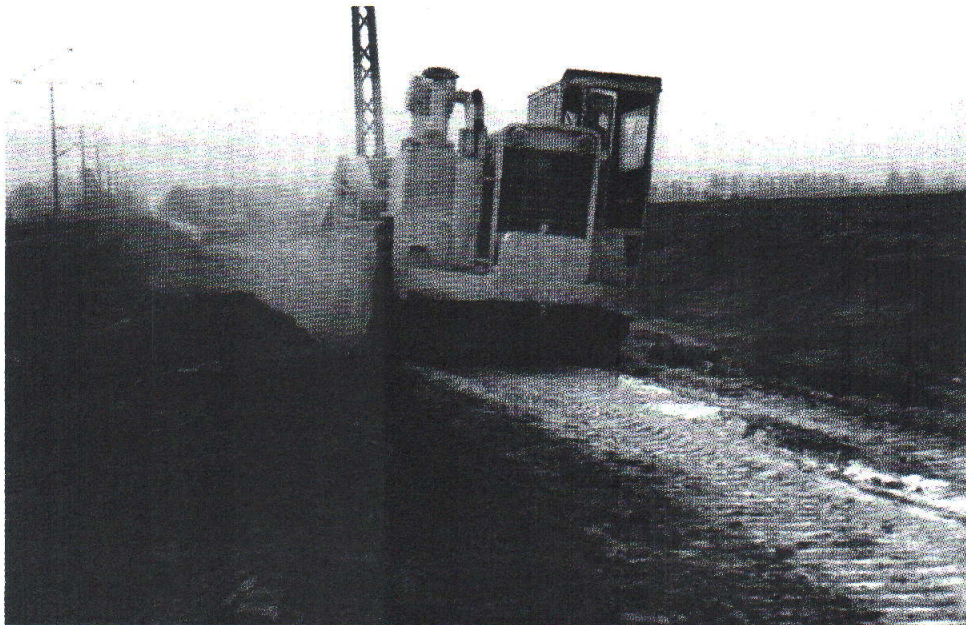


Bild 5 Bodenverbesserung mit Kalk im Bereich aufgeweichter gemischtkörniger Böden

c) Frostschutzschicht

Auf dem Erdplanum wurde das Frostschutzmaterial in 2 Lagen mit einer maximalen Lagendicke von 0,3 m aufgebracht und mit Rüttelwalzen verdichtet. Das in der Anfangsphase der Baumaßnahme zum Einbau vorgesehene FSS-Material erfüllte die ursprüngliche und später reduzierte Mindestanforderung an den Ungleichförmigkeitsgrad von $U \geq 5$ zunächst nicht. Ein Sondervorschlag des AN sah vor, das vorhandene FSS-Material durch Einfräsen von gebrochenem Gleisschotter zu verbessern. Im Zuge der Bauausführung zeigte es sich allerdings, daß das gewählte mixed-in-place Verfahren zum Erreichen einer gleichmäßig hohen Materialqualität ungeeignet war. Aufgrund dieser Probleme wurde in größeren Teilbereichen angeliefertes FSS-Material eingebaut, das die erdbautechnischen Anforderungen erfüllte. Zur Durchlässigkeitsproblematik beim gut verdichteten FSS-Material ergaben sich ähnliche Ergebnisse wie in Abschnitt 4.1 beschrieben.

5 Qualitätssicherung

5.1 Wittenberge - Dergenthin

Die Einhaltung der in Abschnitt 3.1 aufgeführten erdbautechnischen Anforderungen zur FSS und zum Unterbau- und 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 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.

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

Durch vorlaufende Versuchsfelder wurden die FDVK und die dynamische Fallplatte gemäß Tabelle 2 kalibriert und die Abnahmebedingungen festgelegt. Als FDVK-System war eine Vibrationswalze (10 t) mit Dynapac-Verfahren (Meßwert CMV) im Einsatz.

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

Tabelle 2 Erdbautechnische Abnahmebedingungen aus Kalibrier-
versuchen der FDVK und der dynamischen Fallplatte

Die Erfahrungen mit der Art der angesprochenen Qualitätssicherung waren insgesamt positiv. Lediglich beim Nachweis von $U \geq 6$ und $k \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s für das FSS- Material haben sich mit den örtlichen Materialvorkommen gemäß Abschnitt 4.1 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. Bei den durchgeführten Eignungs- und Kontrollprüfungen am FSS-Material wurde die Gegenläufigkeit der Anforderungen zum einen an die Ungleichförmigkeit und die Verdichtung und zum anderen an die Durchlässigkeit deutlich. Unter Abwägung aller Randbedingungen, wie der Ausbildung der verwendeten Festen Fahrbahn mit HGT und des örtlich verfügbaren Materials wurde die erreichte Durchlässigkeit von rund $k = 1 \cdot 10^{-5}$ m/s akzeptiert. Daß diese Anforderungsreduzierung nicht eine Qualitätsminderung zur Folge haben muß, belegen Forschungsergebnisse aus dem Straßenbau (Berner, Floss 1992), wonach eine freie Entwässerung des Porenraums von Böden noch erfolgt bei Durchlässigkeitsbeiwerten von etwa $k \geq 1 \cdot 10^{-5}$ m/s. Bei Tragschichten mit dieser Mindestdurchlässigkeit ist somit auch die Gefahr von Porenwasserüberdrücken unter Verkehrslast gering.

5.2 Breddin - Glöwen

In Teilbereichen konnten die erdbautechnischen Anforderungen, insbesondere die Verdichtungsgrade in der Prüfebene ab 0,3 m unter OK Erdplanum nur sehr schwer eingehalten werden.

Diese Verhältnisse werden durch die im Zuge der Eigen- und Fremdüberwachungsprüfungen festgestellten stark schwankenden Verdichtungsgrade belegt. Bei den im Rahmen der Fremdüberwachung durchgeführten Prüfungen konnten teilweise innerhalb von wenigen Metern wechselnde Baugrundverhältnisse unterhalb der kalkstabilisierten Bereiche festgelegt werden. Daraus resultieren stark schwankende Auflagerbedingungen mit Steifigkeitssprüngen im Unterbaubereich der Festen Fahrbahn. Der Einsatz der FDVK zur Qualitätssicherung und damit die Überprüfung der Gleichmäßigkeit des Auflagers konnte aufgrund der stark wechselnden Baugrundverhältnisse und Versagen des Verfahrens aufgrund der hohen Wassergehalte im Erdkörper flächig nicht durchgeführt werden.

Die Verdichtungs- und Tragfähigkeitsforderungen der FSS konnten überall eingehalten werden.

6 Messungen auf der Strecke Wittenberge - Dergenthin

6.1 Kenntnisstand und Meßprogramm

Nach den bisherigen Untersuchungen zur Festen Fahrbahn ist nach Kempfert, Vogel (1992) 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 BAM (1990) 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 etwa umgekehrt proportional zum Quadrat der Tiefe abnehmen, nehmen die Spannungen aus dynamischen Lasten nach dem bisherigen Kenntnisstand 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.

In Kempfert, Vogel (1992) sind Spannungsmessungen infolge Verkehrslasten bei unterschiedlichen Oberbauformen dargestellt, die allerdings bisher nur bis in Tiefen von 1,5 m unter Tragplatte/Schwelle vorlagen. Bild 6 enthält dazu Darstellungen in Form von Schwingungsgeschwindigkeiten v_{\max} [mm/s] für die Oberbauformen.

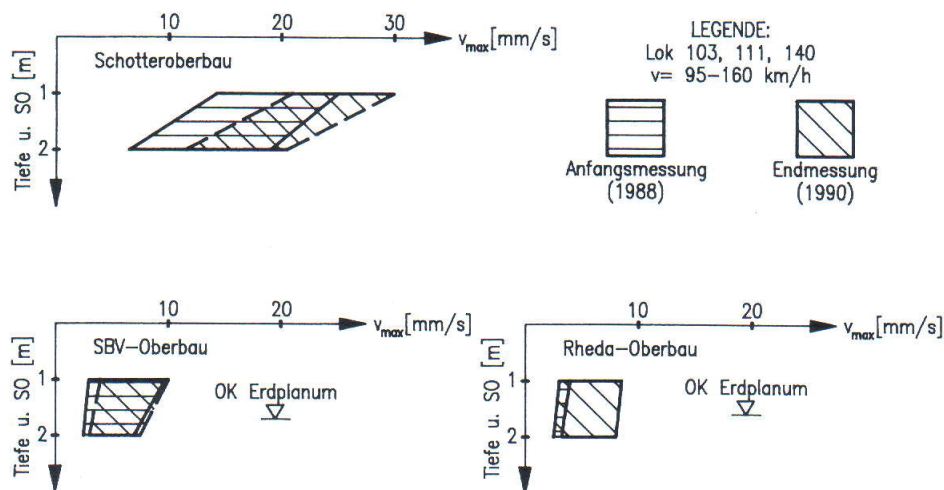


Bild 6 Gemessene Schwingungsgeschwindigkeiten v_{\max} in der FSS und unter dem Erdplanum für unterschiedliche Oberbauformen

Für den neuen Abschnitt mit Fester Fahrbahn in Wittenberge-Dergenthin wird ein umfangreiches Meß- und Untersuchungsprogramm 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). Zusätzlich wurden auch Schwingungsgeschwindigkeitsmessungen während der Ausführung der Tiefenverdichtung ausgeführt. Im folgenden werden ausgewählte bisher vorliegende Meßergebnisse zur Überprüfung des Setzungsverhaltens und der dynamischen Einwirkungen auf den Unterbau/Untergrund und deren Tiefenwirkung mitgeteilt.

6.2 Setzungen der Fahrbahnplatte

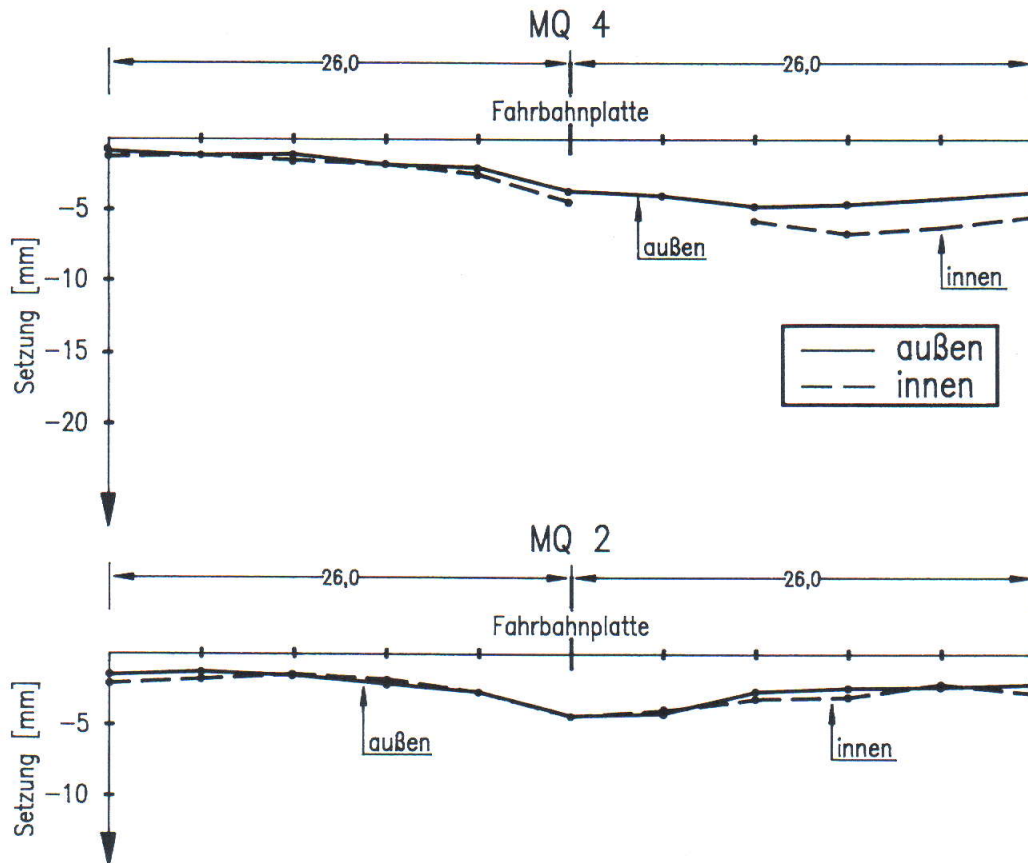


Bild 7 Setzungen der Fahrbahnplatte in Streckenlängsrichtung bei MQ 2 nach ca. 52.000 Zugüberfahrten und bei MQ 4 nach ca. 35.000 Zugüberfahrten

Bild 7 zeigt die bisher gemessenen Setzungen der Fahrbahnplatte in den Bereichen um die Meßquerschnitte (2 und 4) in Längsrichtung. Die Bezeichnungen „innen“ bzw. „außen“ bedeuten dabei jeweils die Lage der Meßbolzenreihe am Rand der Fahrbahnplatte zur

Streckenachse hin bzw. am Rand der Fahrbahnplatte zur Außenseite (Dammschulter) hin. MQ 2 (Gleis 1) und MQ 4 (Gleis 2) liegen jeweils nebeneinander auf der zweigleisigen Strecke.

6.3 Schwinggeschwindigkeiten im Untergrund

Mit den in verschiedenen Tiefen im Untergrund eingebauten Geophonen wurden die Schwinggeschwindigkeiten bei Zugüberfahrten gemessen. In Bild 4 sind die Bereiche über die Tiefe dargestellt, innerhalb derer die bisher gemessenen jeweils maximalen Schwinggeschwindigkeiten liegen. Anhand der Darstellungen ist zu erkennen, welche Schwankungsbreite die maximalen Schwinggeschwindigkeiten im Untergrund aufweisen. Diese sind abhängig von den unterschiedlichen Lokarten, vom Zustand der Räder (Radunwuchten) und Fahrgeschwindigkeiten, wobei bisher nur Messungen mit Geschwindigkeiten bis 160 km/h vorlagen. Die Messungen zeigen weiterhin, daß die maximalen Schwinggeschwindigkeiten v_{\max} hauptsächlich aus der Vertikalkomponente v_z resultieren.

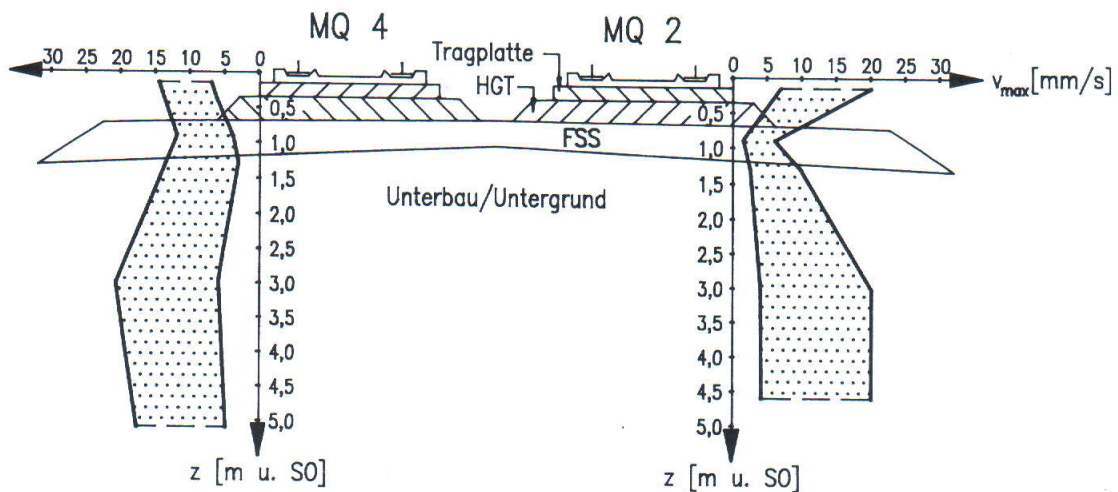


Bild 8 Bandbreite der gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten an der Fahrbahnplatte und im Unterbau/Untergrund (Fahrgeschwindigkeiten bis 160 km/h)

Der starke Abfall von v_{\max} in Bild 8 und 9 unmittelbar unter der HGT in der FSS kann auch infolge Brückenbildung meßtechnisch begründet sein und sollte nicht überbewertet werden. Auffallend an den Meßergebnissen ist, daß die Schwinggeschwindigkeiten und damit die dynamischen Einwirkungen bis in tiefere Bereiche unter der Festen Fahrbahn ohne Rückgang, eher sogar mit leicht ansteigender Tendenz, vorhanden sind.

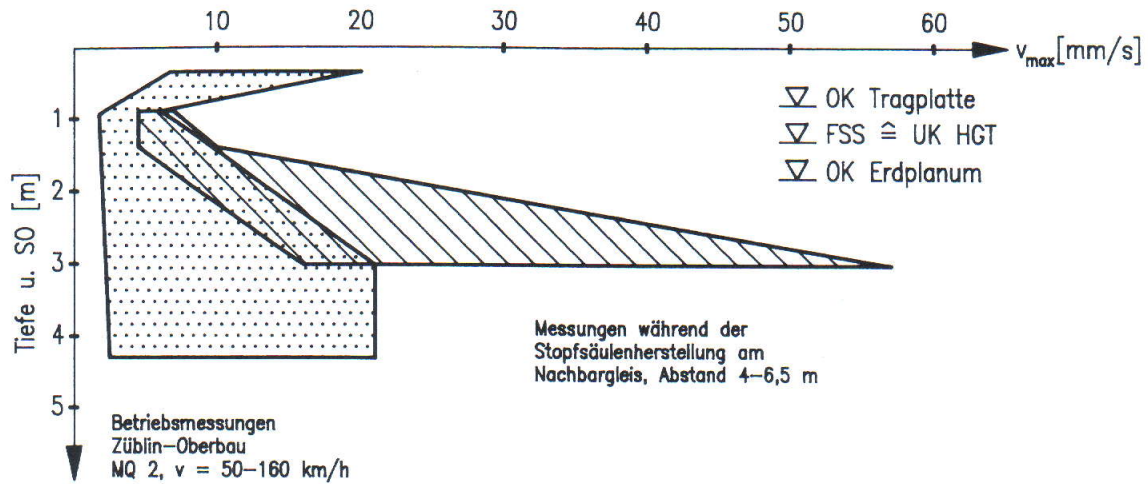


Bild 9 Schwinggeschwindigkeiten am MQ 2 infolge Eisenbahnbetrieb im Vergleich zur Erschütterungsbeanspruchung bei Stopfsäulenherstellung

Aus dem Vergleich der in Bild 8 und 9 dargestellten Meßergebnisse mit früheren Messungen auf Versuchsstrecken (Bild 6) geht hervor, daß der Schotteroberbau i.d.R. eine etwas größere dynamische Einwirkung auf den Unterbau gegenüber der Festen Fahrbahn bewirkt, die Schwinggeschwindigkeiten aber zur Tiefe stärker abklingen. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten unter der Festen Fahrbahn Bauart Züblin in dem hier dargestellten Streckenabschnitt Wittenberge-Dergenthin korrespondieren größenordnungsmäßig mit den in Bild 6 zusammengestellten älteren Messungen auf Versuchsstrecken mit anderen Oberbauformen der Festen Fahrbahn. An den Ergebnissen in Bild 8 und 9 ist besonders der Umstand hervorzuheben, daß die Erschütterungseinwirkungen infolge Verkehrsbelastung 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 9 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-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 im Unterbau/Untergrund für die Feste Fahrbahn zeigen einen Hauptfrequenzbereich zwischen 40 und 60 Hz mit größeren Anteilen auch unter 20 Hz, während beim Schotteroberbau der letztere Anteil dominiert. 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 Horizon-

talkomponenten und letztere aus den Vertikalkomponenten der Schwinggeschwindigkeiten resultieren. Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Meßergebnisse können die erdbautechnischen Anforderungen und durchgeführten Maßnahmen für den Abschnitt Wittenberge-Dergenthin als abgesichert im Hinblick auf die Ausbildung eines für die Feste Fahrbahn notwendigen verformungsarmen Auflagers angesehen werden. Meßergebnisse zum Streckenabschnitt Breddin-Glöwen liegen dem Verfasser nicht vor. Letztlich werden die Erfahrungen über Qualität, Langzeitbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser ersten und weiterer Streckenabschnitte entscheidenden Einfluß darauf haben, ob sich die Bauweise Feste Fahrbahn gleichberechtigt neben dem bisher vorherrschenden Schotteroberbau etablieren wird und sich vielleicht sogar als Regelbauweise für Strecken mit hohen Fahrgeschwindigkeiten durchsetzen wird.

Literatur

BAM (1990)

Dynamische Einwirkungen: Momentendynamik und Setzungen aus zyklischer Belastung. Statusbericht Feste Fahrbahn, Berlin (unveröffentlicht)

Berner, U., Floss, R. (1992)

Anforderungen an die Durchlässigkeit von ungebundenen Tragschichten. BMV Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 619, 49-79, Bonn

DB AG (1994)

Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn

Fastenau, W., Widmann, H., Jetter, A. (1991)

Die Feste Fahrbahn Bauart Züblin, ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, Hestra-Verlag Darmstadt, Heft 7, 443-449

Floss, R., Bräu, G., Gabauer, M., Gruber, N. und Obermayer, J. (1991)

Dynamische Verdichtungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, Bonn

Kempfert, H.-G., Vogel, W. (1992)

Bodenmechanische und erdbautechnische Randbedingungen bei Feste Fahrbahn - Konstruktionen im Eisenbahnbau. Vorträge der Baugrundtagung in Dresden, Eigenverl. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., 477- 496

Kempfert, H.-G., Wahrmund, H. (1995)

Feste Fahrbahn - Gründungstechnische Erfahrungen bei der ersten planmäßigen Anwendung für die Erneuerung eines Abschnitts der Bahnstrecke Hamburg-Berlin. Bautechnik 72, Heft 1, 2-10