

10th Danube-European Conference on Soil Mechanics  
and Foundation Engineering

10. Donau-Europäische Konferenz für Grundbau  
und Bodenmechanik

Mamaia, Romania 1995

# Proceedings

GEOTECHNICAL ENGINEERING FOR  
TRANSPORTATION SYSTEMS AND  
ENVIRONMENTAL PROTECTION

GEOTECHNIK FÜR VERKEHRSSYSTEME  
UND UMWELTSCHUTZ

Volume 1

Edited by ROMANIAN SOCIETY FOR SOIL MECHANICS  
AND FOUNDATION ENGINEERING

Published by TECHNICAL UNIVERSITY OF CIVIL  
ENGINEERING OF BUCHAREST

## Untergrundverformungen und dynamische Beanspruchungen bei ausgeführten Festen Fahrbahnen im Eisenbahnbau

Subsoil deformations and dynamic loading of slab track constructions for railway lines

Hans-Georg Kempfert  
Ingenieurbüro Kempfert+Partner GmbH, Konstanz

Für die erste zweigleisige Baumaßnahme mit einer Festen Fahrbahn auf einem etwa 6 km langen Teilschnitt der Ausbaustrecke Hamburg-Berlin werden die 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. Nach etwa 20.000 Zugüberfahrten liegen die Setzungen bei etwa 2 bis 3 mm. Die gemessenen Schwinggeschwindigkeiten unter Eisenbahnverkehrslasten zeigen, daß die dynamischen Verkehrslasteinwirkungen deutlich tiefer reichen als bisher vermutet. Damit kommt insbesondere der setzungsarmen Ausbildung des Gründungsauflagers der Festen Fahrbahn eine große Bedeutung zu. Zusätzlich werden Messungen aus früheren Versuchsstrecke mitgeteilt.

### 1 Einleitung

In Deutschland werden im Rahmen von Verkehrsprojekten zur Deutschen Einheit in Teilschnitten 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 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, Kempfert/Vogel (1992), Fastenau et al (1991).

Auf der Strecke Hamburg-Berlin wurde ein etwa 6 km langer Abschnitt zwischen Wittenberge und Dergenthin (Land Brandenburg) zweigleisig mit der neuen Oberbauform ausgeführt, Kempfert/Wahrmund (1995). Für den erneuerten Abschnitt ist eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 160 km/h, optional bis 200 km/h, vorgesehen. In diesem Abschnitt 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 eingeleisigen Bahnbetriebes mit Fahrgeschwindigkeiten bis 120 km/h einzuhalten.

### 2 Alte Bahnanlage und Untergrundverhältnisse

Die vor den Erneuerungsmaßnahmen vorhandene Bahnanlage war durch eine schlechte Gleislage sowie bereichsweise vorhandene Schottertäcke 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 eingeebne-



tes Altmoränengebiet. 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. Feuchtschütle 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 Randbedingungen und Bauausführung

#### 3.1 Erdbautechnische Anforderungen und Konstruktion

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

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

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 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 Feste Fahrbahn.

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 Frostschuttschicht (FSS) hat eine Mindeststärke von 40 cm zwischen den Gleisen und nimmt nach außen hin gefällebedingt (1:20) bis auf 60 cm Dicke zu.

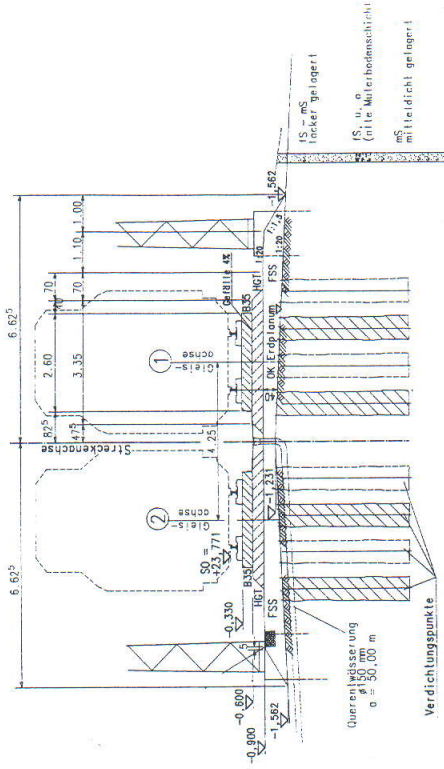


Bild 1. Ausgeführter Querschnitt Feste Fahrbahn Bauart Züblin auf dem Streckenabschnitt Wittenberge - Dergenthin

Die Entwässerung der Gleise erfolgt über eine Mittentwässerung, 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 Bauausführung

Da die Tiefenverdichtung in relativer Nähe zum befahrenen Nachbargleis ausgeführt wurde, war für das jeweilige Betriebsgleis die Lagestabilität zu sichern und ständig zu überwachen. Dabei ergaben sich maximale Höhenverschiebungen der Schienen im alten Schottergleis zwischen -3 mm und +1,5 mm, wobei Verschiebungen von mehr als 1 mm die Ausnahme bildeten. Die horizontalen Lageveränderungen waren in der Regel so gering, daß die Meßtoleranz von  $\pm 3$  mm unterschritten wurde.

Die Reihenfolge der Herstellung der Stopffreien war so festgelegt, daß zuerst die innere Reihe ausgeführt wurde, um dadurch eine abschirmende Wirkung für das Betriebsgleis während der Ausführung der restlichen drei Stopffreien 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 Weichsicht 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



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 die bisher vorliegenden Meßergebnisse zur Überprüfung des Setzungsverhaltens und der dynamischen Einwirkungen auf den Unterbau/Untergrund und deren Tiefenwirkung mitgeteilt.

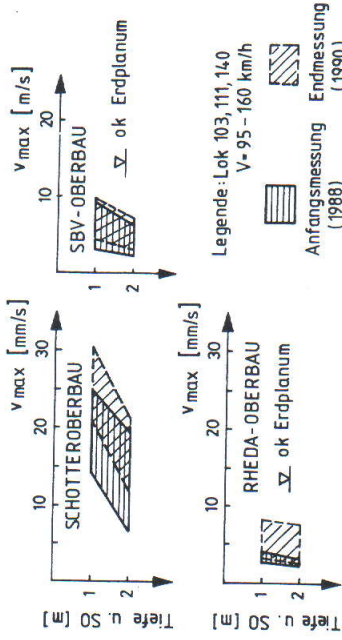


Bild 2: Schwingungsgeschwindigkeiten  $v_{max}$  in der FSS und unter dem Erdplanum für unterschiedliche Oberbauformen

4.2 Setzungen der Fahrbahnplatte

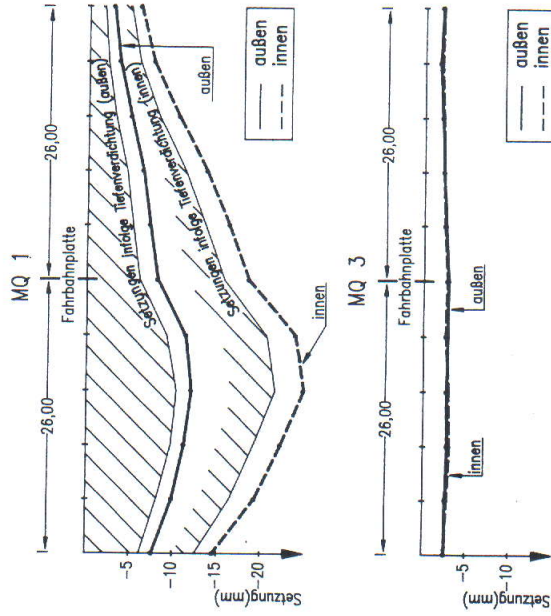


Bild 3: Setzungen der Fahrbahnplatte in Streckenlängsrichtung bei MQ 1 (Gleis 1) während der Tiefenverdichtung im Gleis 2

neben der nun in Betrieb befindlichen Festen Fahrbahn in diesem Abschnitt nach Herstellung der inneren zwei Stopfweihen auf einer Länge von 50 m abgebrochen, da an der Festen Fahrbahn Setzungen von maximal 16 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 schluffigen Feinsanden und weichen Schluffen 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 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. 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 Erdplaums nicht von starren Bauelementen durchstoßen wird und die Tragwirkung den durchgängigen Stopfsäulen etwa entspricht. Bei Anwendung dieses Verfahrens traten noch maximal weitere 4 mm Setzung ein, so daß insgesamt maximal rd. 20 mm Gesamtsenkung durch das Bauverfahren verursacht wurden, siehe Abschn. 4.2. Nach Abschluß der Tiefenverdichtung erfolgte ein Abtrag der oberen Dammschüttung bis auf Höhe des späteren Erdplaums 1,3 m unter Schienenoberkante.

Für die Verdichtung des Erdplaums kam eine 10 t Vibrationsglättmantelwalze zum Einsatz, die gleichzeitig Prüfwalze für die erdbautechnische Qualitätssicherung mit der Flächenmeß Bild 1 infolge der Quermeißelung des Erdplaums unterschiedlich dicke FSS (innen 40 cm und außen 60 cm) wurde in zwei Lagen eingebaut. Die erdbautechnische Qualitätssicherung erfolgte wiederum mit der FDVK.

4 Messungen

4.1 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 Lastenwirkungen 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 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 Einfluftiefe 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. In Bild 2 sind dazu Messungen aus TU München (1988-90) in Form von Schwingungsgeschwindigkeiten  $v_{max}$  (mm/s) für unterschiedliche Oberbauformen wiedergegeben.

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



Bild 3 zeigt die bisher gemessenen Setzungen der Fahrbahnplatte in den Bereichen um die Meßquerschnitte 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 1 (Gleis 1) und MQ 3 (Gleis 2) liegen jeweils nebeneinander auf der zweigleisigen Strecke. Für MQ 2 und MQ 4, wurden vergleichbare Größenordnungen der Setzungen wie in MQ 3 gemessen.

Die hohen Setzungen am MQ 1 resultieren hauptsächlich aus Setzungen, die wie in Abschn. 3.2 beschrieben, während der Tiefenverdichtung in Gleis 2 infolge der sehr schlechten Bauverhältnisse in diesem Bereich auftraten. Der Einfluß der Tiefenverdichtung nimmt deutlich nach außen hin ab, wie an den unterschiedlichen Setzungen von „innen“ (zur Tiefenverdichtung hingewandt) nach „außen“ zu erkennen ist.

Die übrigen Messungen zeigen Setzungen der Festen Fahrbahn von durchschnittlich etwa 2 bis 3 mm unter Betrieb nach ca. 20.000 Zugüberfahrten.

4.3 Untergrundsetzungen

Die Messung der Setzungen des Untergrunds unter der Festen Fahrbahn erfolgt mit Extensometern, deren Ankerpunkte in verschiedenen Tiefen unter den Meßquerschnitten eingebaut sind. In Bild 4 sind die aus den Extensometermessungen hervorgehenden Setzungen der verschiedenen Tiefenbereiche wiederum nur MQ 1 und 3 dargestellt. Die hohen Setzungen bei MQ 1 sind, wie in Abschn. 4.2 ausgeführt, hauptsächlich der Tiefenverdichtung unter Gleis 2 in Verbindung mit dem sehr schlechten Baugrund zuzuordnen.

In den oberen Meßpunkten zeigt sich wie zu erwarten eine Abnahme der Setzungen mit der Tiefe. Zum untersten Meßpunkt hin wurde unter MQ 3 ein geringfügiger Anstieg gemessen, der jedoch bodenmechanisch nicht zutreffend sein kann und größenordnungsmäßig im Bereich der Meßgenauigkeit liegt. Unter MQ 1 und MQ 2 zeigt sich zum untersten Meßpunkt hin wie im oberen Bereich eine Abnahme der Setzungen. Insgesamt ist jedoch nach den dargestellten Messungen auch eine deutliche, in der Größenordnung der Gesamtsetzung der Fahrbahnplatte liegende Setzung des in Tiefen zwischen 8 und 10 m unter SO liegenden untersten Extensometermeßpunktes eingetreten.

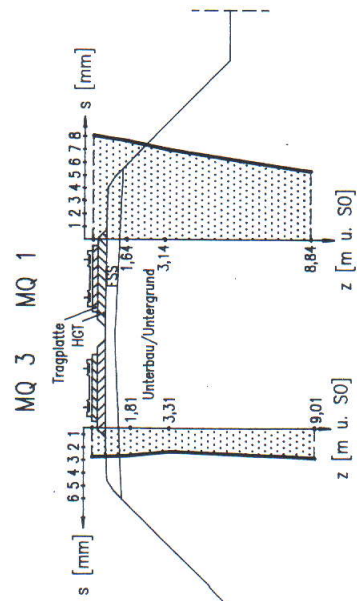


Bild 4: Darstellung der über die Extensometermessungen ermittelten Setzungen von verschiedenen Tiefenbereichen unter der Festen Fahrbahn. Die Extensometermessungen wurden auf die Setzungen der Fahrbahnplatte bezogen

4.4 Schwinggeschwindigkeiten im Untergrund

Mit den in verschiedenen Tiefen im Untergrund eingebauten Geophonen wurden die Schwinggeschwindigkeiten bei Zugüberfahrten gemessen. In Bild 5 sind die Bereiche über die Tiefe dargestellt, innerhalb derer die bisher gemessenen jeweils maximalen Schwinggeschwindigkeiten liegen. Anhand der Darstellungen ist zu erkennen, welche Schwingungsbreite 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 130 km/h vorlagen. Die Messungen zeigen weiterhin, daß die maximalen Schwinggeschwindigkeiten  $v_{max}$  hauptsächlich aus der Vertikalcomponente  $v_z$  resultieren.

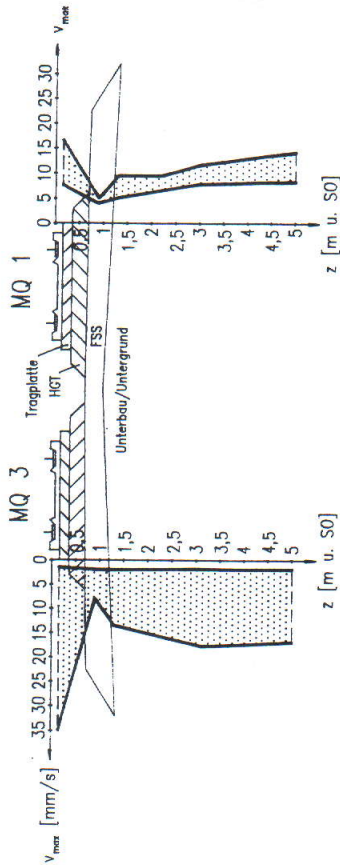


Bild 5: Bandbreite der gemessenen maximalen Schwinggeschwindigkeiten an der Fahrbahnplatte und im Unterbau/Untergrund (Fahrgeschwindigkeiten bis 130 km/h)

Der starke Abfall von  $v_{max}$  in Bild 5 und 6 unmittelbar unter der HGT in der FSS kann auch infolge Brückenbildung melotechnisch 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.

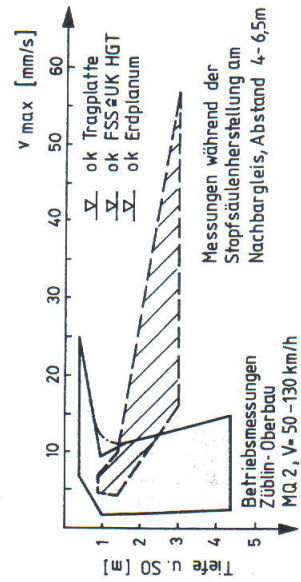


Bild 6: Schwinggeschwindigkeiten am MQ 2 infolge Eisenbahnbetrieb im Vergleich zur Erschütterungsbeanspruchung bei der Stopfsäulenherstellung



## 5 Bewertung

Aus dem Vergleich der in Bild 5 und 6 dargestellten Meßergebnisse mit früheren Messungen im Schotteroberbau nach *TU München (1988-90)*, siehe Bild 2, 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 größtenteils mit den in Bild 2 dargestellten älteren Messungen auf Versuchsstrecken mit anderen Oberbauformen der Festen Fahrbahn. An den Ergebnissen in Bild 5 und 6 ist besonders der Umstand hervorzuheben, daß die Erschütterungseinwirkungen infolge Verkehrsbelastung nahezu in gleicher Größenordnung bis in tiefere Bereiche unter der Festen Fahrbahn vorhanden sind. Möglicherweise lassen sich damit die aus den Extensometermessungen hervorgehenden Setzungen auch in größeren Tiefen erklären.

Der Vergleich zu den gemessenen Schwinggeschwindigkeiten bei der Tiefenverdichtung gemäß Bild 6 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 zeigen unter der einen Hauptfrequenzbereich zwischen 40 und 60 Hz mit größeren Anteilen auch unter 20 Hz, während beim Schotteroberbau der letztere Anteil dominiert. Der Frequenzbereich des Tiefenmittlers 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.

Auf der Grundlage der bisher vorliegenden Meßergebnisse können die erdbautechnischen Anforderungen und durchgeführte Maßnahmen als abgesichert im Hinblick auf die Ausbildung eines für die Feste Fahrbahn notwendigen verformungsarmen Auflagers angesehen werden. Letztlich werden die Erfahrungen über Qualität, Langzeitbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit dieser ersten 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).  
*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, S. 443 - 449.  
*Floss, R., Bräu, G., Gabauer, M., Gruber, N. und Obermayer, J. (1991)*: Dynamische Verformungsprüfung bei Erd- und Straßenbauten, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, Bonn.  
*Kempfert, H.-G./Vogel, W. (1992)*: Bodenmechanische und erdbautechnische Randbedingungen bei Fester Fahrbahn - Konstruktionen im Eisenbahnbau. Vorträge der Baugrundtagung in Dresden, Eigenverl. Deutsche Gesellschaft f. Erd- und Grundbau e. V., S. 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. Butechnik 72, H. 1, S. 2-10.  
*TU München, Prüfstamm für Grundbau, Boden- und Felsmechanik (1988-1990)*: Berichte zum Versuchsprogramm Feste Fahrbahn (unveröffentlicht)