

Grundsatzfragen des Erd- und Grundbaus für Hochgeschwindigkeitsstrecken

Das große Bauvolumen für Erdbauwerke und Bauwerksgründungen sowie die besonderen Anforderungen für Strecken, die langfristig ohne betriebliche Einschränkungen mit hohen Geschwindigkeiten befahren werden sollen, haben die Notwendigkeit geschaffen, sich mit den damit entstandenen technischen Fragestellungen in grundsätzlicher Weise zu befassen. Die Besonderheiten, die sich für Erdbauwerke von Hochgeschwindigkeitsstrecken ergeben, werden beschrieben.

Außerdem werden zu ausgewählten erd- und grundbautechnischen Aufgaben bei Erstellung von Neu- und Ausbaustrecken Erkenntnisstände und Erfahrungen mitgeteilt. Daraus sind Empfehlungen für ähnliche Überlegungen bei zukünftigen Hochgeschwindigkeitsstrecken abgeleitet.

1 Einleitung

Mit der Entscheidung Anfang der 70er Jahre über den Bau von neuen Strecken und den Ausbau bestehender Strecken in einem für die Deutsche Bundesbahn (DB) bis dahin nicht erreichten Umfang sind grundsätzliche Fragestellungen für Planung und Bauausführung der Ingenieurbauwerke verbunden gewesen. Einen bedeutenden Bereich stellt dabei der Erd- und Grundbau dar, der sich zum einen mit der Erstellung von Erdbauwerken (Dämme, Einschnitte, Fahrbahnunterbau, flexible Stützkonstruktionen), zum anderen mit der Gründung von Kunstbauwerken (Brücken, Tunnel, Hochbauten, Stützmauern) sowie deren Beanspruchung aus Boden und Wasser befaßt. In vielen Fällen greifen erdbautechnische und grundbautechnische Fragestellungen ineinander.

Im folgenden werden Erd- und Grundbauprobleme aus der Sicht des für bautechnische Grundsatzfragen zuständigen Bundesbahn-Zentralamtes (BZA) München behandelt. Aus den bearbeiteten zahlreichen erd- und grundbautechnischen Fragen und Problemen werden in Abschnitt 2 (Erdbau) und 3 (Grundbau) einige Beispiele herausgegriffen.

Zu den Aufgaben des BZA München zählt auch, die vorhandenen Erfahrungen und Erkenntnisse auszuwerten und den Anwendern, d. h. den planenden und bauausführenden Stellen, in Form des bautechnischen Regelwerks oder durch projektbezogene Beratung zur Verfügung zu stellen. Hierzu dienen die vom BZA München erarbeiteten und im Geschäftsbereich der Deutschen Bundesbahn eingeführten Vorschriften, herausgegeben als sogenannte Druckschriften (DS). Soweit im Rahmen dieses Beitrags von Bedeutung, wird die Entwicklung dieser Vorschriften dargestellt.

2 Grundsatzfragen des Erdbaus

2.1 Aufgabenstellung

Während in den vergangenen Jahren auf Grund der relativ begrenzten Bautätigkeit im Bereich der DB die erdbautechnischen Festlegungen überwiegend im Einzelfall erfolgten, mußten für die vorgesehenen umfangreichen Baumaßnahmen der Neubaustrecken (NBS) und Ausbaustrecken (ABS) allgemeingültige umfassende Regelungen getroffen werden, um einen gleichmäßig hohen Qualitätsstand der Erdbauwerke bei zugleich hoher Wirtschaftlichkeit sicherzustellen. Diese Regelungen sollen den beratenden und planenden Ingenieuren, den ausführenden

den Firmen und nicht zuletzt auch den eigenen ausschreibenden und überwachenden Stellen der DB als „Leitfäden“ für die Herstellung und spätere Instandhaltung der Erdbauwerke dienen. Als Erdbauwerke werden dabei generell Dämme, Einschnitte und im besonderen bei Eisenbahnstrecken auch die nicht gebundenen Tragschichten des Unterbaus bei ebenerdiger Streckenführung bezeichnet. Besondere Bedeutung für Hochgeschwindigkeitsstrecken hat weiterhin die Ausbildung der Übergangsbereiche an Erdbauwerken zu Kunstbauwerken.

Zunehmend gewinnt aus ökonomischen Gründen der Ersatz von Böschungen durch Stützkonstruktionen, häufig als sogenannte flexible Stützwände bezeichnet, an Bedeutung; deren rechnerische und konstruktive Behandlung reicht zwar bereits in das Aufgabengebiet des Grundbaus, ihre Herstellung und Instandhaltung wird jedoch dem Erdbau zugerechnet.

Über den Umfang der erforderlichen Erdbaumaßnahmen wurde an anderer Stelle berichtet [1,2]. Erwähnt werden sollte vor allem, daß bereits nach dem Bundesverkehrswegeplan in seiner ersten Stufe im Jahre 1973 der Neubau von zwei Strecken von 426 km Länge mit einem Streckenanteil an Erdbauwerken von 56 % (238 km) und der Ausbau von 1083 km Bahnstrecken mit weit überwiegendem Anteil auf Erdbauwerken vorgesehen waren. Diese Absolutzahlen sind aus heutiger Sicht erheblich zu vergrößern. Setzt man dem entgegen, daß bis zu diesem Zeitpunkt kaum größere Um- bzw. Neubaumaßnahmen für den Fernverkehr erfolgten, läßt sich die Bedeutung der Aufgabenstellung ermessen.

Die Aufgabe, Grundsatzfragen zu klären, ergibt sich allerdings nicht allein aus dem Umfang der Baumaßnahmen, sondern auch im Bezug darauf, welche besonderen Anforderungen durch die beabsichtigten höheren Geschwindigkeiten und durch die sofortige Verfügbarkeit für den Hochgeschwindigkeitsverkehr an die Erdbauwerke zu stellen sind. Der Weg der Bearbeitung dieser Aufgabenstellung läßt sich mit folgenden Fragen konkretisieren:

- ▷ Welche Anforderungen sind für Erdbauwerke der Hochgeschwindigkeitsstrecken zu erfüllen?
- ▷ Wie ist das vorhandene Regelwerk im Hinblick auf die gestellten Anforderungen fortzuschreiben?
- ▷ Welche Angaben sind in einem solchen fortgeschriebenen Regelwerk erforderlich?
- ▷ In welchen Bereichen ergeben sich offene Fragestellungen, die wissenschaftlich-technische Untersuchungen zur Abklärung erfordern?

2.2 Anforderungen

2.2.1 Allgemeines

Grundlage für die Planung der Erdbauwerke und die Formulierung angemessener Konstruktionsregeln ist die Beschreibung der Anforderungen, die an die Erdbauwerke für Hochgeschwindigkeitsstrecken zu stellen sind. Dabei gelten auch für Erdbauwerke die Anforderungen, die für Ingenieurbauwerke von Hochgeschwindigkeitsstrecken grundsätzlich bestehen. Als Stichworte hierfür sind zu nennen:

- ▷ Sichere langfristige Belastbarkeit,
- ▷ komfortgerechte und fahrzeugschonende Gebrauchsfähigkeit sowie
- ▷ sonstige Anforderungen, wie
 - erwartungsgemäße Dauerhaftigkeit mit ausreichendem Schutz gegen äußere Einwirkungen,
 - sofortige und möglichst uneingeschränkte Verfügbarkeit,
 - hohe Wirtschaftlichkeit,
 - gute Umweltverträglichkeit und schonende Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen,
 - geringer Instandhaltungsaufwand mit geringen Überwachungs- und Reparaturanteilen,
 - leichte Instandsetzungsmöglichkeiten ohne schwer zu beseitigende Abfallstoffe.

2.2.2 Belastbarkeit

Die Erdbauwerke müssen so beschaffen sein, daß die Eisenbahnlasten bei hohen Geschwindigkeiten in dichter Zugfolge langfristig ausreichend sicher aufgenommen werden können.

Diese Forderung kann auch als Tragfähigkeit bezeichnet werden und bezieht sich auf die sogenannte Grenztragfähigkeit, die mit ausreichender Sicherheit nicht erreicht werden darf.

Nach dem UIC-Lastbild, das die Grundlage für die Bemessung von Eisenbahnbrücken und sonstigen Ingenieurbauwerken (DS 804 [3]) bildet, sind Achslasten in Höhe von 250 kN bzw. Ersatzlasten von 52 kN/m² auf 3 m Breite aufzunehmen. Statisch gesehen stellt diese Belastung an Erdbauwerke nur geringe Anforderungen, vergleicht man diese z. B. mit Fundamentlasten von Hochbauten. Dies ist auch der Grund, weshalb Eisenbahnstrecken durch wenig tragfähige Gebiete, wie Moore, geführt werden können. Jedoch wirkt sich der Einfluß der Geschwindigkeit in zunehmenden dynamischen Einwirkungen aus, die den Unterbau mit wachsender Geschwindigkeit in unterschiedlichen Frequenzen und Spannungsgrößen beanspruchen.

Mit den Belastungen des Straßenbaus sind die Eisenbahnverkehrslasten nur schwer zu vergleichen, da die eher punktförmige Lasteintragung vom Rad eines Straßenfahrzeuges zu einer andersartigen Beanspruchung des Unterbaus bzw. Untergrunds führt als die flächige Lasteintragung bei Eisenbahnstrecken mit Schottergleis. Durch die höheren Gesamtlasten von Triebfahrzeugen und Wagen, durch die Spurführung und durch den regelmäßigen Schwellenabstand entstehen bei Eisenbahnstrecken im Vergleich zum Straßenverkehr höhere gleichförmige dynamische Einwirkungen. Diese Einwirkungen können zwar im einzelnen erfaßt werden, jedoch ist das bodenmechanische Verhalten von Böden bei dieser Art von dynamischer Belastung bisher nur ansatzweise erforscht. Insbesondere fehlen Berechnungsansätze zur Abschätzung des dynamischen Lasteinflusses auf das Untergrundverhalten.

Grundsätzlich stellen jedoch die dynamischen Einwirkungen aus Eisenbahnverkehrslasten für die bestehenden Erdbauwerke ebenso wie für Neubaumaßnahmen weniger ein Problem der Tragfähigkeit selbst dar, sondern beeinflussen mehr die Gebrauchsfähigkeit und Dauerhaftigkeit. Dies gilt allerdings nur, solange keine Materialien eingesetzt werden, die ein sprödes Bruchverhalten oder einen schlagartigen Festigkeitsabfall bei Langzeitbelastung aufweisen. Dies ist bei der Konstruktion z. B. von flexiblen Stützwänden zu berücksichtigen.

Hinsichtlich der Standsicherheit der Erdbauwerke ohne Einfluß dynamischer Einwirkungen legen die DIN-Normen Mindestwerte der Sicherheit fest, die auch im Eisenbahnbau grundsätzlich gültig sind. Es kann davon ausgegangen werden, daß mit diesen Sicherheiten ein plötzliches, durch größere Verformungen nicht vorangekündigtes Versagen von Erdbauwerken weitgehend vermieden werden kann.

In Sonderfällen, insbesondere für bestehende Bauwerke von Ausbaustrecken, müssen u. U. besondere Festlegungen getroffen werden, um Aspekten der Wirtschaftlichkeit und des Umweltschutzes Rechnung zu tragen. Hier ist auch ein von den Normen abweichendes Sicherheitsniveau zu vertreten, wenn etwa die Standsicherheit durch entsprechend langen Bestand als ausreichend nachgewiesen gelten kann.

2.2.3 Gebrauchsfähigkeit

Neben der ausreichenden Belastbarkeit müssen die Bauwerke des Unterbaus von Eisenbahnstrecken eine ausreichende Gebrauchsfähigkeit aufweisen. Um diese zu gewährleisten, müssen die Verformungen so gering bleiben, daß ein Befahren der Strecken ohne unzutraglich große Quer- und Vertikalbeschleunigungen bzw. Verwindungen möglich ist. Damit werden hohe Anforderungen an die Steifigkeit und an das Setzungsverhalten der Erdbauwerke gestellt. Zahlenangaben über zulässige Gleislageabweichungen liegen für den Erdbau nicht vor. An Hand der erforderlichen Längsausrundungsradien, die zur Trassierung von Eisenbahnstrecken verwendet werden, läßt sich jedoch abschätzen, wie sehr die Gleislageanforderungen der Schienen mit der Geschwindigkeit ansteigen. Eine solche Abschätzung ist in Bild 1 dargestellt; es zeigt die Abhängigkeit der zulässigen Einsenkung von der Geschwindigkeit, wenn von einem Ausrundungsradius mit $r_a = 0,4 \cdot V_e^2$ („Komfort“-Kriterium) ausgegangen wird. Man erkennt, daß bei Geschwindigkeiten von 250 km/h und darüber die Einsenkungen auch auf größere Längen nur wenige Millimeter betragen dürfen, wohingegen bei niedrigen Geschwin-

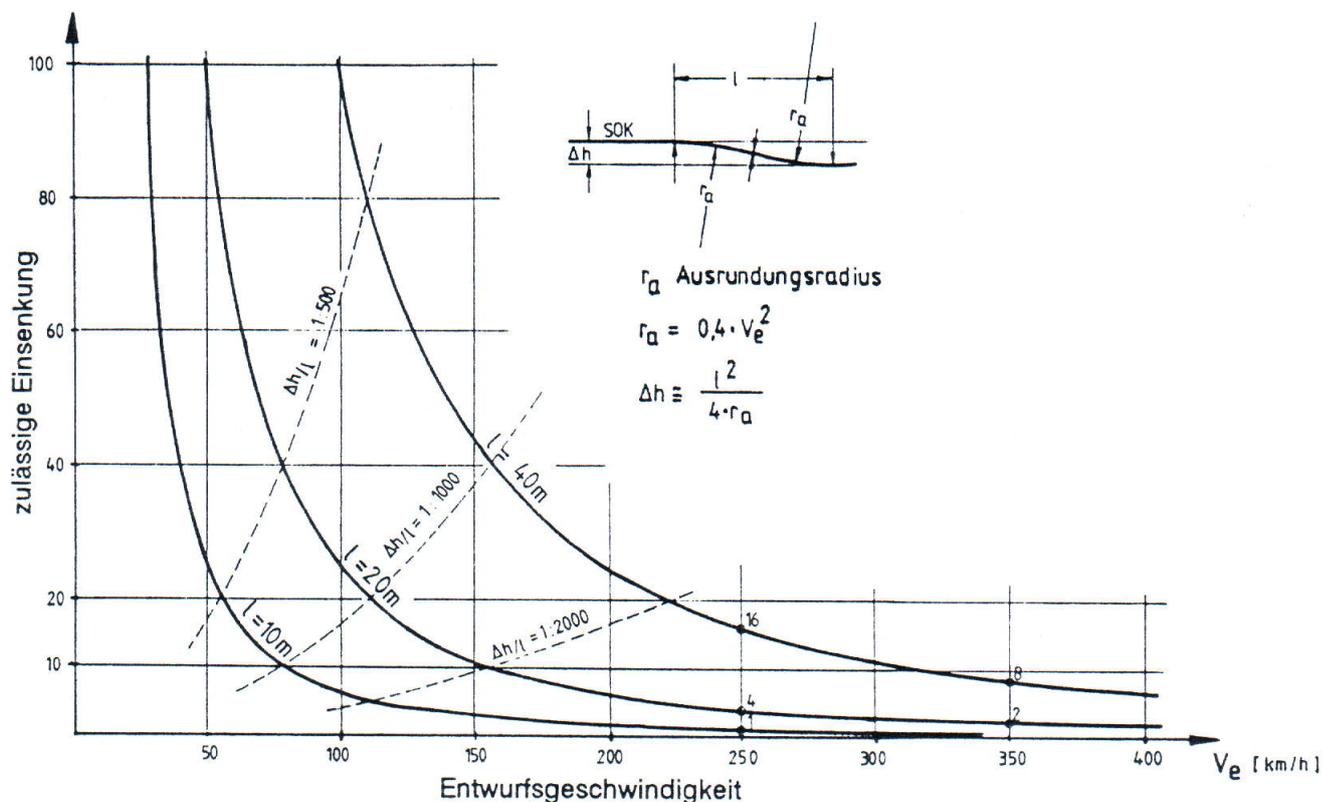
Δh [mm]

Bild 1: Zulässige Abweichungen der Gleisanlage von der Sollage auf der Basis zulässiger Längsausrundungsradien bei Eisenbahnstrecken

digkeiten Einsenkungen im Zentimeter-Bereich auch auf kürzere Längen noch nicht zu einer Beeinträchtigung des Fahrkomforts führen würden.

Die dargestellten hohen Lagegenauigkeitsanforderungen können durch die Erdbauwerke allein nicht eingehalten werden. Insbesondere bei neuen Erdbauwerken sind Setzungen (in Dämmen), aber auch Hebungen (in Einschnitten) selbst nach Fertigstellung der Baumaßnahme noch zu erwarten, die nur in Ausnahmefällen so gering bleiben, daß ein Gleis ohne Korrekturmaßnahmen auf Dauer im beschriebenen Maß gebrauchsfähig bleibt. Hier bietet das Schottergleis den technisch nicht hoch genug zu bewertenden Vorteil, daß sich Verformungen — sei es, daß sie durch Setzungen des Schotterbetts oder der Schwellen im Schotterbett selbst hervorgerufen wurden oder daß tatsächlich Untergrundverformungen eingetreten sind — durch einfache Stopfvorgänge des Schotters ausgleichen lassen.

Diese herausragende Eigenschaft des Schottergleises ist nicht zuletzt Grund dafür, daß eine eingehende theoretische und experimentelle Auseinandersetzung mit den schwierigen Fragen des dynamischen Verhaltens von Böden unter Eisenbahnverkehrslasten bisher nur ansatzweise erfolgt ist. Mit zunehmenden Belastungen und Geschwindigkeiten müssen diese Fragen jedoch mit aussagefähigem Ergebnis behandelt werden, um wirtschaftliche und vor allem technisch abgesicherte Konstruktionen entwickeln zu können.

Die erdbautechnischen Anforderungen bei „Festen Fahrbahnen“, d. h. tragschotterlosem Oberbau, werden unter Ziffer 2.5.4 dieses Beitrages behandelt.

2.2.4 Weitere Anforderungen und Folgerungen

Die in der Einleitung zu diesem Abschnitt genannten weiteren Anforderungen, wie Dauerhaftigkeit, sofortige Verfügbarkeit, hohe Wirtschaftlichkeit, Umweltverträglichkeit, geringer Instandhaltungsaufwand und leichte Instandsetzungsmöglichkeiten, können hier nicht im einzelnen abgehandelt werden. Sie verstehen sich als Anforderungen an Ingenieurbauwerke allgemein und sind selbstverständlich bei den umfassenden Neu- und Ausbaumaßnahmen jeweils für sich und im Zusammenwirken zu beachten.

Hinzuweisen ist, daß auch Erdbauwerke instandzuhalten sind, daß aber ohne Einschränkung der Verfügbarkeit der Strecken nur sehr begrenzte Instandsetzungsmöglichkeiten bestehen. Es muß daher Prinzip der Konstruktion von Erdbauwerken sein, diese möglichst einfach und mit geringen inneren Risiken zu konstruieren, z. B. auf Verbundkonstruktionen mit anderen Baustoffen soweit wie möglich zu verzichten; außerdem müssen Instandhaltungsstrategien von Erdbauwerken entwickelt werden, um u. a. eine hohe Verfügbarkeit sicherzustellen. Der Forderung nach Umweltverträglichkeit wird dadurch besonders Beachtung geschenkt, daß regionale und kleinklimatische Einflüsse auf den Bewuchs von Erdbauwerken auch im Vorschriftenwerk Berücksichtigung finden und generell die Fragen der „Begrünung“ einen breiteren Raum als früher einnehmen. Hier liegen die Anforderungen an den Eisenbahnbau auch aus Gründen der Akzeptanz von Baumaßnahmen durch die Öffentlichkeit höher als bei anderen Verkehrsträgern.

An Materialauswahl und das Einhalten von Verdichtungsanforderungen sind bei Erdbauwerken von Neubaustrecken besondere Ansprüche zu stellen, um Nachsetzungen so gering zu halten, daß diese im Rahmen der für den Oberbau erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen ausgeglichen werden können. Diese Ansprüche ergeben sich auch aus der Forderung nach sofortiger uneingeschränkter Verfügbarkeit — im Gegensatz zum Erdbau früherer Zeiten mit langsam steigenden Belastungen und abschnittsweiser Inbetriebnahme des Eisenbahnnetzes. Mit den Anforderungen an die Verfügbarkeit stellt der Eisenbahnbau höhere Ansprüche an die Qualität der Erdbauwerke als der Straßenbau, da eine Sperrung von Gleisen nicht in gleichem Maße möglich ist wie eine zeitweise oder längerfristige Reduzierung von Fahrspuren. Insgesamt kann aus der Beschreibung der Anforderungen geschlossen werden, daß zwar hohe, aber auf Grund der äußerst flexiblen und anpassungsfähigen Konstruktion des Schotteroberbaues keine weit über den Stand der Technik hinausgehenden Anforderungen an die Erdbauwerke für Hochgeschwindigkeitsstrecken gestellt werden. Einzelne Fragen, insbesondere hinsichtlich der Beschreibung des Unterbau-/Untergrundverhaltens bei dynamischen Lasteinwirkungen, sind allerdings zu klären. Wesentlich ist eine gesicherte Qualität der Erdbauwerke, durch die eine sofortige und uneingeschränkte Verfügbarkeit für den Hochgeschwindigkeitsverkehr möglich wird.

2.3 Stand der Technik — Vorschriften

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, ist mit der Behandlung von Grundsatzfragen die Beschreibung des Standes der Technik eng verbunden. Im Baubereich spiegelt sich dieser in den jeweiligen Vorschriften wider. Es ist deshalb im Rahmen dieses Beitrages erforderlich, kurz auf diese Vorschriften einzugehen.

Mit Einrichtung des Fachdienstes „Erd- und Grundbau“ im Jahre 1952, später erweitert auf „Tunnelbau- und Felsbau“, wurden im Bundesbahn-Zentralamt München Regelungen für die Herstellung von Erdbauwerken erarbeitet und der laufenden Entwicklung angepaßt. Eine eingehende Darstellung dieser Entwicklung ist in [4] vorgelegt worden, so daß sich eine Wiederholung erübrigt. Hingewiesen sei darauf, daß für die erdbautechnischen Aufgaben der DB zunächst Regelungen in Form von „Richtlinien für die Entwässerung und Festigung der Erdbauten (Erdbaurichtlinien)“, Ausgabe 1957, vorlagen. Diese Richtlinien beschrieben bereits umfassend die erforderlichen Maßnahmen für den Unterbau und für die Entwässerung, mit der eine instandhaltungsarme Fahrbahn prinzipiell auch für höhere Geschwindigkeiten hergestellt werden konnte. Gemeinsam mit den im Zuge der Vorplanung der Neubaustrecken 1974 und 1976 erarbeiteten „Vorläufige Richtlinien für Planung und Herstellung der Erdbauwerke von Strecken mit Geschwindigkeiten über 160 km/h“ gingen diese Richtlinien in der nunmehr gültigen „Vorschrift für Erdbauwerke (VE)“ auf, die als Vorauskgabe 1982 und als uneingeschränkt geltende Vorschrift 1985 erschien. Diese Vorschrift für Erdbauwerke gab die DB als DS 836 heraus. Sie regelt die auftretenden grundsätzlichen Fragen bei Erstellung von Erdbauwerken und wird laufend ergänzt sowie dem Stand der Technik angepaßt („fortgeschrieben“).

Da der Straßenbau die technische Entwicklung im Bereich des Erdbaus zunächst wesentlich getragen hatte, edierte der Bundesminister für Verkehr die „Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau“, Ausgabe 1976 und Ergänzung 1978, (ZTVE-StB 76/78 [5]). Auf diese Vorschrift wird in der DS 836 [6] mehrfach Bezug genommen.

Als eine wesentliche weitere Hilfe bei Ausführung von Bauwerken für die DB gilt das Regelwerk der DIN-Normen, an deren Erstellung Fachleute der DB beteiligt sind. Wichtige, die Sicherheit von Bauwerken beeinflussende Normen führt die DB bauaufsichtlich ein. Sie erhalten damit eine besondere Bedeutung. Mit der Einführung werden eisenbahnspezifische Auflagen für die Anwendung der Normen veröffentlicht, die vorrangig zu beachten sind (DS 839/1 [7]).

Weiterhin muß in diesem Zusammenhang auf die Zulassungen des Instituts für Bautechnik, Berlin, verwiesen werden, die u. a. Baustoffe, Bauteile und Bauverfahren des Erd- und Grundbaus enthalten. Durch Veröffentlichung einer Zulassung werden zunächst neue Systeme als bewährt bestätigt und deren Anwendungsbedingungen beschrieben. Die DB gibt auch diese Zulassungen ggf. mit eisenbahnspezifischen Ergänzungen bekannt.

Soweit sich aus der Bauausführung und den Erfahrungen der zwischenzeitlich in Betrieb gegangenen Strecken ableiten läßt, haben sich die Regelungen der DS 836, gemeinsam mit den anderen Regeln, beim Bau der Hochgeschwindigkeitsstrecken bewährt. Maßgeblich hierfür ist allerdings auch eine gezielte und geschulte Bauüberwachung, für die der Auftraggeber sorgen muß.

2.4 Beispiele für Angaben zur Ausführung von Erdbauwerken

2.4.1 Allgemeines

Die qualitativ abgesicherte Herstellung von Erdbauwerken erfordert eine Vielzahl von Einzelangaben, die im Rahmen dieses Beitrages nicht vollständig dargestellt werden können. Es werden vielmehr einige beispielhafte Gesichtspunkte angesprochen und Lösungswege aufgezeigt. Wie häufig in der Erdbautechnik sind diese Lösungen überwiegend aus empirischen Erkenntnissen entwickelt; bodenmechanische Nachweise gelingen nur in Einzelfällen oder sind noch der weiteren Forschung vorbehalten. In vielen Fällen schreitet die Praxis der theoretischen Aufbereitung voran.

2.4.2 Unterbau von Neu- und Ausbaustrecken

Ähnlich wie im Straßenbau eine oder mehrere Schichten aus nichtbindigem Bodenmaterial zwischen Fahrbahnplatte und anstehendem Untergrund bzw. dem künstlich erstellten Erdkörper eines Dammes bzw. Bodenaustausches für den Aufbau des Verkehrswegs erforderlich sind, so müssen auch bei Eisenbahnstrecken zwischen Schotterbett und Untergrund bzw. Erdkörper solche Zwischenschichten aus mehreren Gründen eingebaut werden.

Für Neu- und Ausbaustrecken ist zunächst auch weiterhin der sogenannte klassische Oberbau mit einem Gleisrost aus Schienen und Schwellen im Schotterbett vorgesehen. Diese Konstruktion hat sich bewährt und ist nach bisherigen Erkenntnissen auch für Hochgeschwindigkeitsstrecken gut geeignet, vorausgesetzt, daß dieser Oberbau auf einem ausreichend tragfähigen Unterbau aufliegt. In diesem Fall weist die Fahrbahn folgenden Aufbau von oben nach unten auf (Bild 2):

- ▷ Gleisrost mit Schienen und Schwellen (Breite etwa 2,6 m, Höhe etwa 0,4 m),
- ▷ Schotterbett mit einer Mindestdicke von 0,3 m (neuerdings 0,35 m bei Geschwindigkeiten über 200 km/h) unter den Schwellen, einer seitlichen Einschüttung der Schwellen von 0,5 m Breite und einer Böschung mit Neigung 1:1,5,
- ▷ Planumsschutzschicht aus einem definierten Mineralgemisch, das einerseits frostsicher, andererseits gering wasserdurchlässig (k -Wert $< 10^{-6}$ m/s) sein soll und sowohl gegenüber den darunterliegenden Schichten als auch gegenüber dem Schotter eine ausreichende

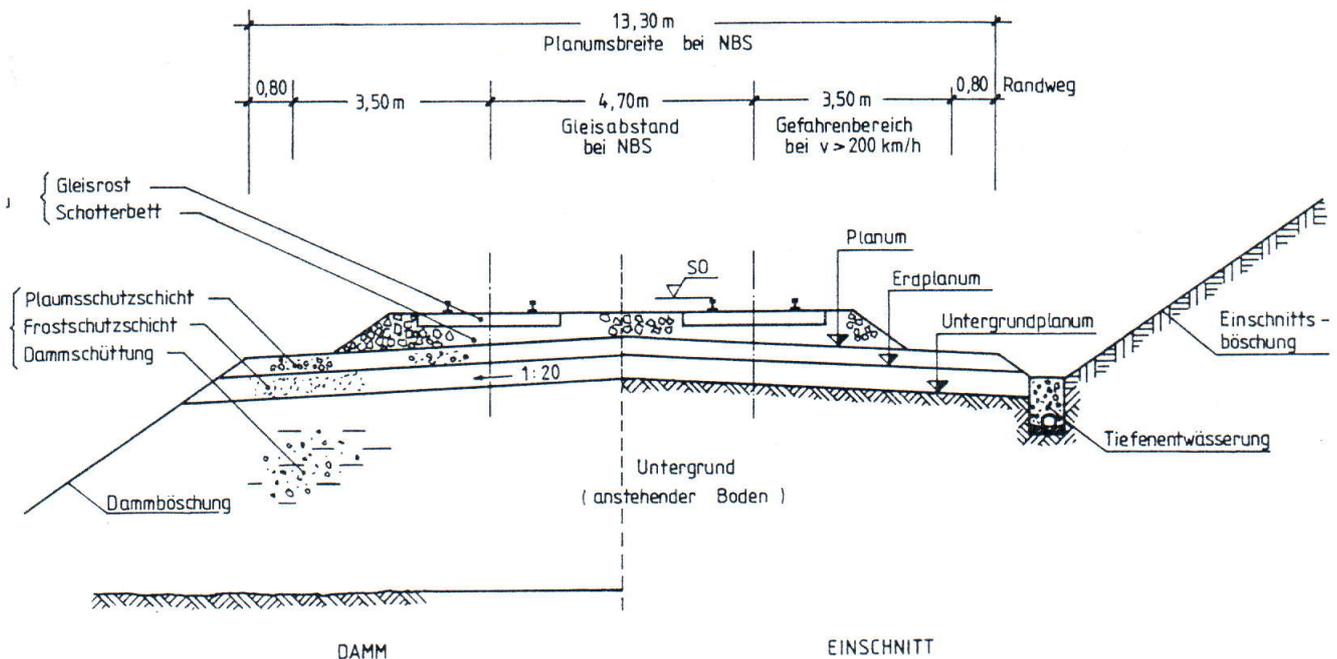


Bild 2: Regelquerschnitt von Hochgeschwindigkeitsstrecken — Bezeichnungen —

Stabilität gegen Eindringen von Bodenkörnern bei hohen dynamischen Belastungen aufweisen muß („Trennstabilität“ oder auch „Schichtgrenzenstabilität“, üblicherweise nachgewiesen mit den Methoden der Filterstabilität),

- ▷ ggf. Frostschuttschicht aus nichtbindigem Boden, falls die Dicke der Planumsschutzschicht für einen frostsicheren Aufbau allein nicht ausreicht,
- ▷ ggf. Dammschüttung aus nichtbindigen oder bindigen natürlichen Böden oder gebrochenem Felsmaterial (Tunnelausbruch) bzw. Bodenaustausch,
- ▷ natürlicher Untergrund.

Die Fläche zwischen Schotterbett und Planumsschutzschicht wird als Planum, diejenige zwischen Planumsschutzschicht und Untergrund bzw. Frostschuttschicht nach DS 836 [6] als Erdplanum bezeichnet. Im Gegensatz zum Straßenbau, bei dem die Frostschuttschicht dem Oberbau zugeordnet wird, gehört die Frostschuttschicht im Eisenbahnbau dem Erdbau an, die Planumsschutzschicht hingegen dem Oberbau. In beiden Bereichen ist die Dammschüttung Teil des Erdbaus. Allerdings sind hier begriffliche Umdefinitionen in Vorbereitung. Im Rahmen dieses Beitrages wird der Bereich zwischen Planum und Oberfläche des natürlichen Untergrundes (Untergrundplanum) als Unterbau bezeichnet. Die Festlegung der Material- und Verdichtungsanforderungen sowie der Abmessungen der einzelnen Schichten des Unterbaus hat aus wirtschaftlichen Gründen eine besonders hohe Bedeutung für die Vorplanung von Hochgeschwindigkeitsstrecken. Die hierfür erforderlichen Angaben sind nur in Ausnahmefällen aus theoretischen Untersuchungen oder experimentellen Laborauswertungen abzuleiten. Vielmehr ergeben sie sich aus der Fortschreibung des bisherigen Kenntnisstandes bei der Instandhaltung im bestehenden Streckennetz, aus grundsätzlichen Überlegungen und aus einer Vielzahl von Felduntersuchungen für einzelne Fragestellungen [8]. Von Wert sind außerdem die Erfahrungen des Straßenbaues.

Einzelheiten über Verdichtungsanforderungen und Abmessungen des Unterbaus sind in Bild 3 enthalten, das eine Tabelle der DS 836 wiedergibt. Diese Tabelle enthält außerdem Angaben über Tragfähigkeitswerte (Verformungsmodul E_{v2} aus Plattendruckversuchen mit der 30-cm-Platte), die neben dem Verdichtungsgraden D_{pr} nachzuweisen sind. Dadurch sollen Risiken durch ungeeignete Materialauswahl vermieden werden. Diese Tragfähigkeitswerte sind als „Ersatzwerte“ für Kennwerte von Systemeigenschaften anzusehen, die versuchstechnisch nach heutigem Stand der Technik für baupraktische Zwecke weder definiert oder ermittelt noch geprüft werden können. Bei diesen Systemeigenschaften handelt es sich um das Verhalten des Bodens bei dynamischen Belastungen aus dem Eisenbahnverkehr.

Streckenart		Planum		Erdplanum (Unterbaukrone)		Mindestdicke der Frostschutzschicht einschl. Planumsschutzschicht			
		E_{v2} (MN/m ²)	D_{Pr}	E_{v2} (MN/m ²)	D_{Pr}	Frosteinwirkungsgebiet			
						I (m)	II (m)	III (m)	
Neubau	durchgehende Hauptgleise von Hauptbahnen (außer S-Bahnen)	120	1,03	80	1,00	0,50	0,60	0,70	
	durchgehende Hauptgleise von S-Bahnen und Nebenbahnen	100	1,00	60	0,97	0,40	0,50	0,60	
	übrige Gleise	80	0,97	45	0,95	0,30	0,40	0,50	
Erhaltung	Bestehende Eisenbahnstrecken	$V > 160 \text{ km/h}$	80	0,97	45	0,95	0,30	0,40	0,50
		$V \leq 160 \text{ km/h}$	50	0,95	20	0,93	0,20	0,25	0,30

E_{v2} = Verformungsmodul aus der Zweitbelastung des Plattendruckversuchs nach DIN 18134 (gemessen an der Oberfläche der jeweiligen Schicht) in MN/m²

$D_{Pr} = \frac{\varrho_d}{\varrho_{Pr}}$ = Verdichtungsgrad, wobei

ϱ_d = Trockendichte des verdichteten Bodensstoffes (wird unterhalb der Oberfläche der jeweiligen Schicht gemessen)

ϱ_{Pr} = max. Trockendichte im einfachen Proctorversuch.

Bild 3: Mindestanforderungen an Planum und Erdplanum (aus [6])

Solange über die Beziehungen zwischen dem dynamischen Verhalten der Bodenschichten und den statischen Ersatzkenngrößen keine gesicherten Kenntnisse vorliegen, müssen die Anforderungen möglichst auf der sicheren Seite liegend festgelegt werden. Es wurden deshalb hohe Verdichtungswerte für die oberen Schichten des Unterbaues gefordert, um Auflockerungen durch dynamische Einwirkungen zu vermeiden, die bei hohen Geschwindigkeiten unmittelbar nach Inbetriebnahme auftreten, so daß keine Konsolidierung erfolgen kann. Diese Werte liegen jedoch nicht über den aus dem Straßenbau bekannten und den schon früher für Planumsschutzschichten geforderten.

Bei den zwischenzeitlich in Betrieb gegangenen Neubaustrecken wurden hohe Steifigkeiten der Fahrbahn gemessen, die auf die hohe Verdichtung des Unterbaus zurückgeführt wurden und die u. U. zu einer erhöhten Beanspruchung des Fahrweges wie der Fahrzeuge führen können. Hier sind ggf. Optimierungen (beispielsweise Begrenzung der Verdichtungsgrade nach oben) vorzunehmen, die allerdings erst eine genauere bodenmechanische Erfassung des Tragverhaltens bei dynamischen Lasteinwirkungen aus Eisenbahnverkehr erfordern (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Planumsbreiten und Planumshöhen sind aus betrieblichen Gründen festgelegt, auf die der Erdbau keinen Einfluß hat. Das Planum wird dachförmig ausgeführt, um für raschen Abfluß von in den Schotter eindringendem Oberflächenwasser nach beiden Seiten zu sorgen. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit der Planumsschutzschicht sickern nur noch geringe Wassermengen in tiefere Schichten ein, die in Einschnittslagen durch tiefliegende seitliche Entwässerungseinrichtungen aufgenommen werden.

Vorteilhaft ist eine dränierende Zwischenschicht zwischen der Planumsschutzschicht und einem bindigen Untergrund. Ein Beispiel einer solchen Zwischenschicht ist die Frostschutzschicht. Bei ausreichender Tragfähigkeit des Untergrundes und bei geringer Frosteindringtiefe, die die Dicke der Planumsschutzschicht nicht überschreitet, kann auch ein dränierendes Geotextil verwendet werden.

Ein darüber hinausgehender Einsatz von Geokunststoffen im Unterbau von Hochgeschwindigkeitsstrecken ist in der Regel nicht vorgesehen. Hierfür sind sowohl umweltschützerische als auch technische Gesichtspunkte maßgebend. Die häufig genannte vorteilhafte bewehrende Wirkung von Geokunststoffen ist systemabhängig. Bei der relativ flächenhaften Lasteintragung der Eisenbahnlasten über dem Gleisrost kann derzeit eine bewehrende Wirkung im Sinne einer Zugkraftaufnahme für dieses System nicht nachgewiesen werden im Gegensatz zu einer Belastung durch Einzelräder oder auch durch die Lastplatte des Plattendruckversuchs.

Die Regeln der DS 836 gehen davon aus, daß im Zweifelsfall eine Verbesserung oder ein Austausch der tieferliegenden Schichten vorgenommen werden sollte, da für die Konstruktion des Fahrweges weniger der lokale Nachweis eines Verformungsmoduls durch künstliche Einlagen als eher ein tiefreichender verformungsarmer Aufbau der Bodenschichtung angestrebt werden sollte. Solange hierüber keine anderen Erkenntnisse abgesichert vorliegen, müssen die dadurch entstehenden Aufwendungen zur Sicherung von Betriebsgleisen in Kauf genommen werden.

An die Verdichtungsgrade und die Materialauswahl für Dammschüttungen werden im wesentlichen die für Straßendämme bekannten Anforderungen gestellt. Gemäß Abschnitt 2.2.4 kann erwartet werden, daß bei fachgerechter Ausführung und sorgfältiger Überwachung die Dämme damit so konstruiert sind, daß Setzungen nur in dem Maße auftreten, wie sie sich durch oberbautechnisch begründete Instandhaltungsmaßnahmen (Nachstopfen des Gleisrostes) ausgleichen lassen.

Über die Anforderungen an den Untergrund unterhalb des Unterbaus in Einschnitten und auf niedrigen Dämmen sind nur wenige Angaben zu machen. Bei Festlegung der unter einer Frostschuttschicht zu fordernden Mindestwerte des Verformungsmoduls (45 MN/m^2 bei bindigem Untergrund, 60 MN/m^2 bei nichtbindigem Untergrund) wurde davon ausgegangen, daß dadurch zugleich eine ausreichende Tragfähigkeit und dynamische Stabilität für die auftretenden dynamischen Lasten gegeben ist. Allerdings ist neben diesem Nachweis einige Sorgfalt bei Auswertung bzw. geotechnischer Interpretation von Untergrunduntersuchungen angezeigt, die im allgemeinen eine eingehende Begutachtung durch erfahrene geotechnische Sachverständige benötigt.

2.4.3 Böschungen von Erdbauwerken

Damm- und Einschnittsböschungen sind standsicherheitsbeeinflussende Bauteile von Erdbauwerken. Deshalb kommt ihrer fachgerechten Ausführung besondere Bedeutung zu.

Maßgebend wird die Standsicherheit bei vorgegebener Höhe des Geländesprungs und vorgegebenen Bodeneigenschaften von der Böschungsneigung beeinflusst. Für die Ermittlung der Böschungsneigung gelten einschlägige Normen (DIN 4084); allerdings bereitet die zutreffende Erfassung der Bodenkenngößen, insbesondere bei bestehenden Erdbauwerken und Schüttungen aus veränderlich festem Gestein, einige Probleme. Außerdem wären für eine wirtschaftliche Ausführung der umfangreichen Baumaßnahmen besondere Festlegungen für die Standsicherheitszahlen notwendig, um den Grunderwerb und die Massen der Erdbauwerke wirtschaftlich zu optimieren. Eine ins einzelne gehende Beratung für jedes Erdbauwerk hätte die Kapazität der DB weit überbeansprucht, weshalb hier Regelwerte für die Neigung von Böschungen in einfachen Fällen dringend erforderlich waren.

Aus dem Straßenbau sind Böschungsneigungen von 1:1,5 als Regelneigung bekannt. Dabei können allerdings, wie die Praxis zeigt, gelegentlich auftretende Rutschungen nicht in dem Maße ausgeschlossen werden, wie es die hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit von Hochgeschwindigkeitsstrecken geboten erscheinen lassen. Für die Böschungen von Erdbauwerken der DB wurde deshalb dieser Wert entsprechend Böschungshöhe und Bodenart modifiziert, um auch bei Verwendung von Böden mit geringer Scherfestigkeit eine ausreichende Standsicherheit zu gewährleisten. Die in zwei Tabellen sowohl für Dämme als auch für Einschnitte

Bodenart		Gruppen- symbol nach DIN 18196	Dammhöhe m	Böschungs- neigung
grobkörnige Bodenarten	weitgestufte und inter- mittierend gestufte Kiese und Sande, enggestufte Kiese	GW, GI	0...12	1 : 1,5
		GE, SI, SW	0...12	1 : 1,7
	enggestufte Sande	SE	0...12	1 : 2,0
gemischt- körnige Bodenarten	schluffige Kiese	GU, GÜ	0...6	1 : 1,6
	tonige Kiese	GT, G \bar{T}	6...9	1 : 1,8
	schluffige Sande	SU, SÜ	9...12	1 : 2,0
	tonige Sande	ST, S \bar{T}		

Bild 4: Regelneigungen von Dammböschungen

zusammengefaßten Regelwerte der Böschungsneigungen sind das Ergebnis von Erfahrungen und vergleichenden Berechnungen (Bild 4).

Einen breiten Raum nimmt in der Fachwelt nach wie vor die Frage der Ausführung von *Bermen* ein. Da die Erfahrung zeigt, daß *Bermen* immer wieder fehlerhaft ausgeführt werden oder sich wegen fehlender Instandhaltung ungewollt konzentrierte Wassereinleitungen in die Böschungen ergaben, wurde empfohlen, auf *Bermen* bei Böschungen bis 12 m Höhe zu verzichten.

Besondere Sorgfalt ist aus Umweltverträglichkeitsgründen, aus Gründen der Akzeptanz von Erdbauwerken durch die Öffentlichkeit, aber auch zur rechtzeitigen Sicherung gegen Erosions-schäden der Vorplanung und der Ausführung von Begrünungsmaßnahmen zu widmen. Hier erfolgten Einzelüberlegungen unter Beteiligung von Fachleuten des Landschaftsbaues, die sich in einer Ergänzung zur DS 836 niedergeschlagen haben und die durch bundesbahninterne Schriften (Information Bautechnik) fortgeschrieben werden.

2.4.4 Übergänge zu Kunstbauwerken

Der Übergang von Erdbauwerken (Dämmen) zu Kunstbauwerken (Brücken, Tunnel) stellt wegen der Steifigkeitsunterschiede und wegen der unterschiedlichen Gründungen eine Störung im Unterbau von Strecken dar, der bei Hochgeschwindigkeitsstrecken besonderer Beachtung bedarf, um Abweichungen der Gleislage von der Sollage auf ein Mindestmaß zu begrenzen. Aufgrund vorliegender Erfahrungen aus dem Straßenbau und auch aufgrund inter-nationaler Erfahrungen wird für Neubaustrecken ein Übergangsbereich aus nichtgebundenem Bodenmaterial vorgeschlagen (Bild 5), der bei Brückenbauwerken ohne Flügelwände noch durch einen zementverfestigten Bodenkeil ergänzt werden kann.

Schlepp-Platten oder oberflächennahe Verfestigungen können nicht empfohlen werden, da diese meist eine unzureichende Biegesteifigkeit und Länge aufweisen, um Einsenkungen im Übergangsbereich überbrücken zu können oder bei entsprechend massiver Ausbildung zu ört-licher Verlagerung der Übergangseinsenkungen führen, ohne ihre Größenordnung wesentlich zu reduzieren.

Von Bedeutung für die Ausbildung der Dammschüttung im Übergangsbereich ist auch die Beachtung einer verformungsarmen Gründung. Deshalb sind in diesen Bereichen vermehrt Baugrundverbesserungsmaßnahmen, wie Vertikaldränagen oder das Rüttelstopfverfahren (Grobkornsäulen), einzusetzen, als das bei gering belasteten Strecken mit niedrigen Geschwin-digkeiten der Fall ist.

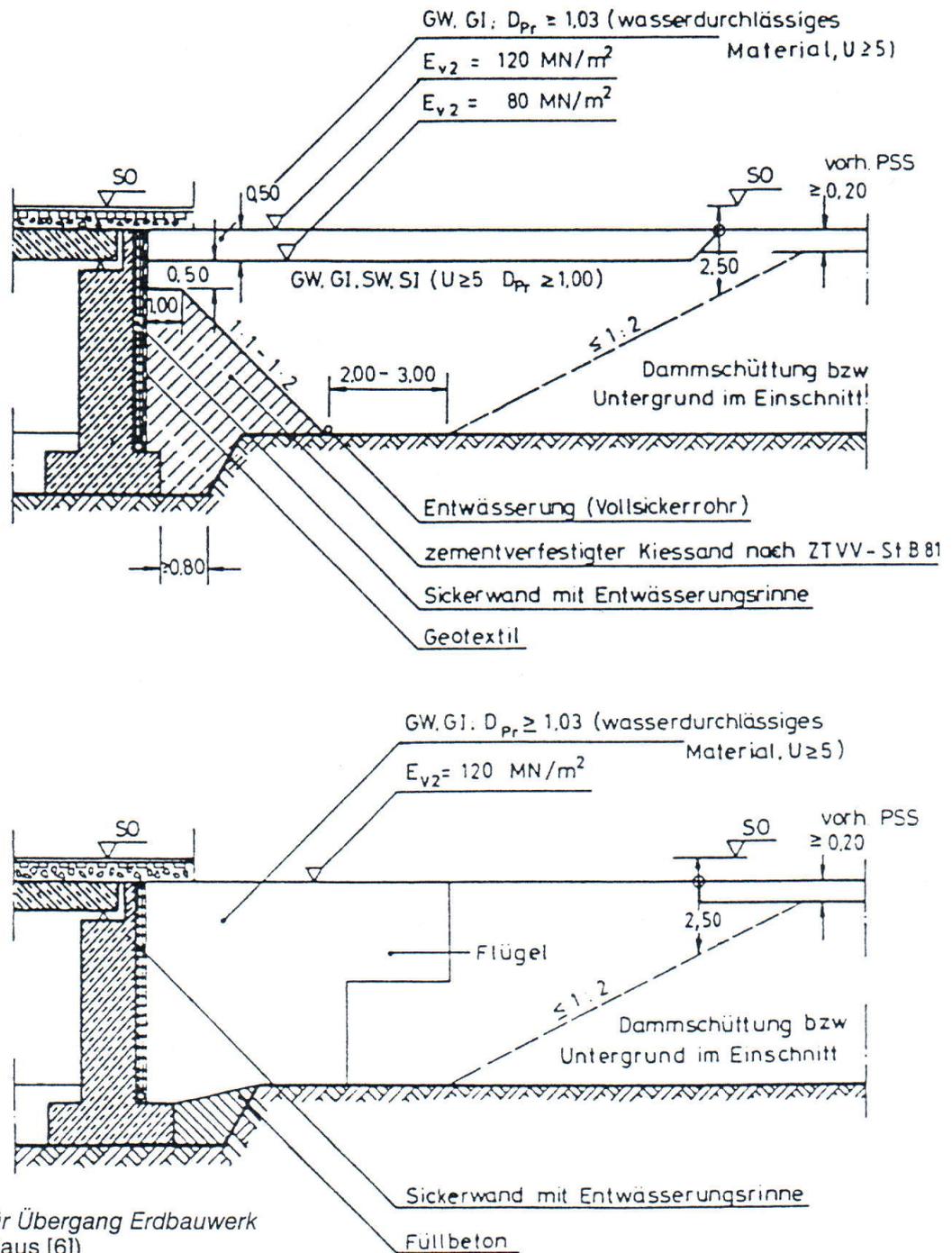


Bild 5: Beispiele für Übergang Erdbauwerk zu Kunstbauwerk (aus [6])

2.4.5 Flexible Stützkonstruktionen

Sicherungen von Geländesprüngen durch freistehende Böschungen, wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben, erfordern einen relativ hohen Grundstücksbedarf und ein großes Einbauvolumen von Bodenmaterial. Aus diesen Gründen ist es häufig günstiger, Stützwände zu bauen; bei fehlender Grundfläche ist dies unvermeidlich.

Während in der Vergangenheit überwiegend Stützwände als massive Stützmauern konstruiert wurden, können heute häufiger sogenannte flexible Stützwände in Betracht kommen. Sie bieten Vorteile hinsichtlich Kosten, Bepflanzbarkeit und damit Akzeptanz in der Öffentlichkeit sowie hinsichtlich Anpassung an Gründung und Belastung. Nachteilig sind jedoch ihre u. U. begrenzte Lebensdauer und ein höherer Instandhaltungsaufwand. Meist ist auch die technische Ausführbarkeit in der Höhe eingeschränkt. Beispiele für Systeme flexibler Stützwände können dem Bild 6 entnommen werden.

Grundsätzlich lassen sich flexible Stützwände in vorgesetzte Mauerelemente (Raumgitter-

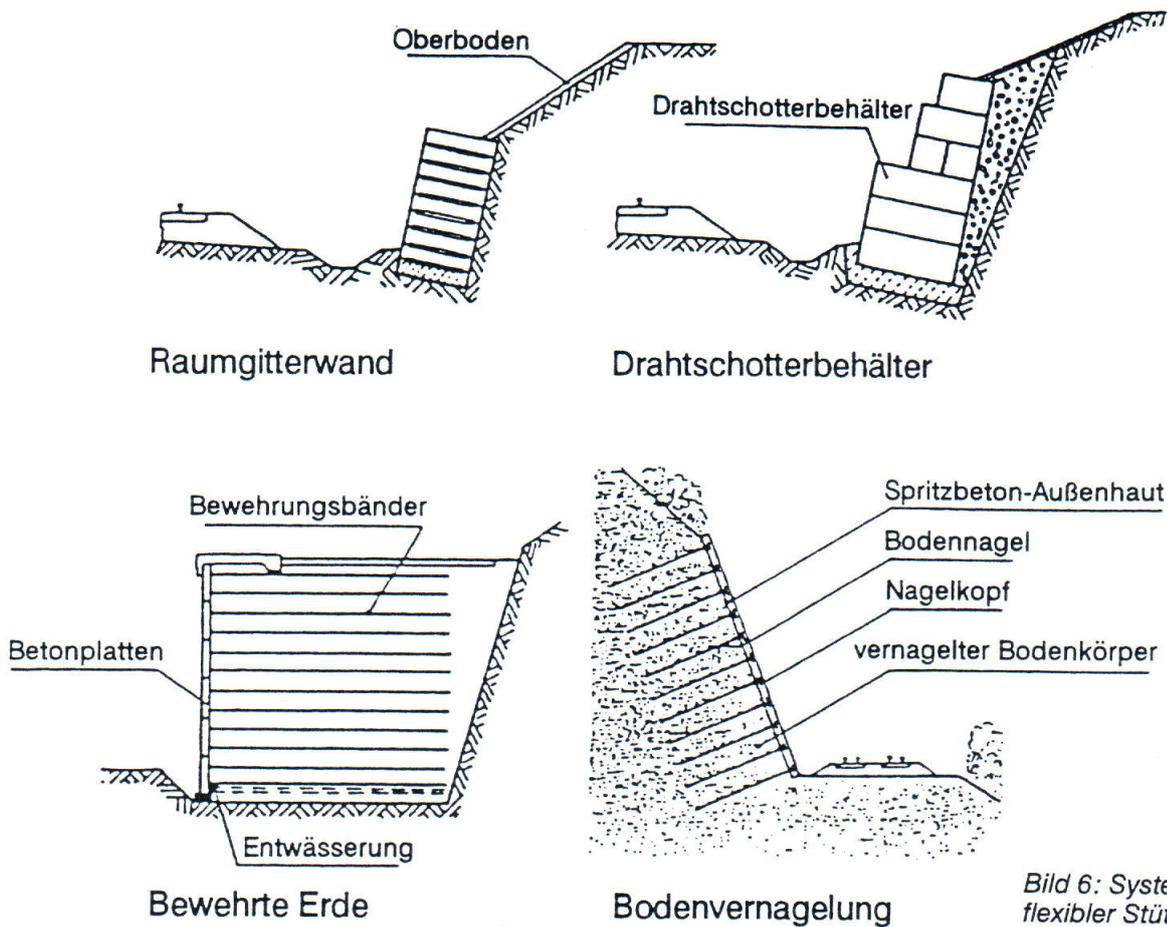


Bild 6: Systeme flexibler Stützwände

wände, Drahtschotterbehälter) und in rückverankerte Wandelemente (Bewehrte-Erde-Konstruktionen, Vernagelungen) unterscheiden.

Die vorgesetzten Mauerelemente können nur geringe Erddrücke aufnehmen und dürfen nicht im Einflußbereich von Eisenbahnverkehrslasten angeordnet werden, wobei für diesen Einflußbereich vereinfachte Modelle zu Grunde gelegt werden. Der Einsatzbereich der Mauerelemente ist überwiegend auf die Sicherung von Böschungsfüßen und niedrigen Böschungen sowie auf Futtermauern für Felsböschungen beschränkt.

Bei den rückverankerten Wandelementen kamen zunächst die Bewehrte-Erde-Konstruktionen mit Stahlbändern auf den Markt. Diese größere Kräfte aufnehmenden und größere Höhe erreichenden Konstruktionen wurden im Bereich des Straßenbaus bereits mehrfach eingesetzt. Für die Anwendung bei der DB wurde das ohnehin für Verankerungen übliche Maß, wonach Verankerungselemente, die ihre Kräfte über Schub auf den Boden übertragen, nicht in einen Bereich bis 4 m Tiefe unter Schwellenoberkante verlegt werden dürfen, da das Tragverhalten der Verankerungen bei dynamischen Einwirkungen nicht bekannt ist, wegen der vermuteten geringen Reibung der Stahlbänder auf 5 m vergrößert.

In den letzten Jahren werden auch zunehmend Wandelemente, teilweise begrünbar, mit Verankerungen aus Geokunststoffen angeboten. Hier fehlen allerdings Erfahrungen über das Langzeitfestigkeitsverhalten, so daß deren Einsatz aus derzeitiger Sicht für Bauwerke mit langer Lebensdauer nicht in Frage kommt.

Vernagelungen, bei denen der anstehende Boden durch ein relativ enges Raster von vermörtelten Stahlstäben „bewehrt“ wird, unterliegen in der Anwendung den Zulassungen des Instituts für Bautechnik, Berlin. Diese werden von der DB im allgemeinen übernommen mit der Einschränkung des angeführten 4-m-Bereiches unter den Gleisen.

Inwieweit diese flexiblen Stützkonstruktionen die Lebensdauer und den geringen Instandhaltungsaufwand der teilweise bis 100 Jahre alten bestehenden massiven Stützmauern erreichen können bzw. erreichen sollten, wird derzeit diskutiert.

2.5 Weiterentwicklungen und Forschungsaufgaben

2.5.1 Allgemeines

Offene Fragen bei der Aufstellung von Regeln, technische Probleme bei der Bauausführung sowie außerhalb und innerhalb des Bahnbereiches stattfindende technische Entwicklungsinitiativen führen dazu, daß sich die DB schwerpunktmäßig mit einzelnen Fragestellungen auseinandersetzt, um den Stand der Technik in ihrem Bereich abgesichert im Sinne der Verantwortung für die öffentliche Sicherheit weiterzuentwickeln.

Die Durchführung entsprechender Forschungsvorhaben obliegt dem Bundesbahn-Zentralamt München u. a. auch für den Bereich des Erd- und Grundbaus, wobei die Hauptaufgabe des Fachdienstes in der Steuerung eines Know-how-Transfers der Erkenntnisse von Hochschulinstituten, qualifizierten Ingenieurbüros und einschlägig fachkundigen Firmen in den Wissensbereich der DB und auch umgekehrt liegt.

Zumeist sind viele Fragestellungen bzw. Aufgabenstellungen schon seit längerer Zeit bekannt. Ihre Behandlung erhielt jedoch durch die Bauaufgaben der Hochgeschwindigkeitsstrecken eine Beschleunigung. Solche langfristigen Aufgaben sind die Erforschung der Beanspruchung des Unterbaus bzw. Untergrundes durch Eisenbahnverkehrslasten und dessen Reaktionen bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen in einem weiten Geschwindigkeitsbereich, die Erforschung des Schwingungsverhaltens von Fahrbahnen auf nachgiebigem Untergrund sowie die Festlegung erdbautechnischer Anforderungen bei alternativen Fahrbahnsystemen.

Als Innovation in der Erdbautechnik, die sich zugleich mit dem Bau der ersten Neubaustrecken ergab, kann die „Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle“ gelten als ein Beispiel für eine außerhalb der DB initiierte Entwicklung, deren Anwendung für die Belange der DB von großem Wert ist und deshalb beim Bau der Neubaustrecken weitergeführt wurde.

2.5.2 Unterbaubeanspruchung

Im Vergleich zu Gebäudelasten oder Lasten aus Erdbauwerken sind die Lasten aus Eisenbahnverkehr in statischer Hinsicht gering. Mit zunehmender Geschwindigkeit und höheren Lasten und Lastwechselzahlen entstehen jedoch zyklische und dynamische Belastungen, die kurz- und langfristig zu größeren elastischen Verformungen und plastischen Setzungen führen können und bei bestimmten Bodenverhältnissen sogar die Tragfähigkeit (die allerdings erst definiert werden muß) des Systems überschreiten.

Bodendynamische Gesetzmäßigkeiten (Modelle), die den Zusammenhang zwischen der zyklisch-dynamischen Einwirkung und dem Verhalten des Systems befriedigend und nachvollziehbar beschreiben könnten, sind bis heute nicht vorhanden. Im Rahmen von Forschungsaktivitäten des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (Rad/Schiene-Forschung) in Zusammenarbeit mit der DB und wissenschaftlichen Institutionen erfolgten sogenannte

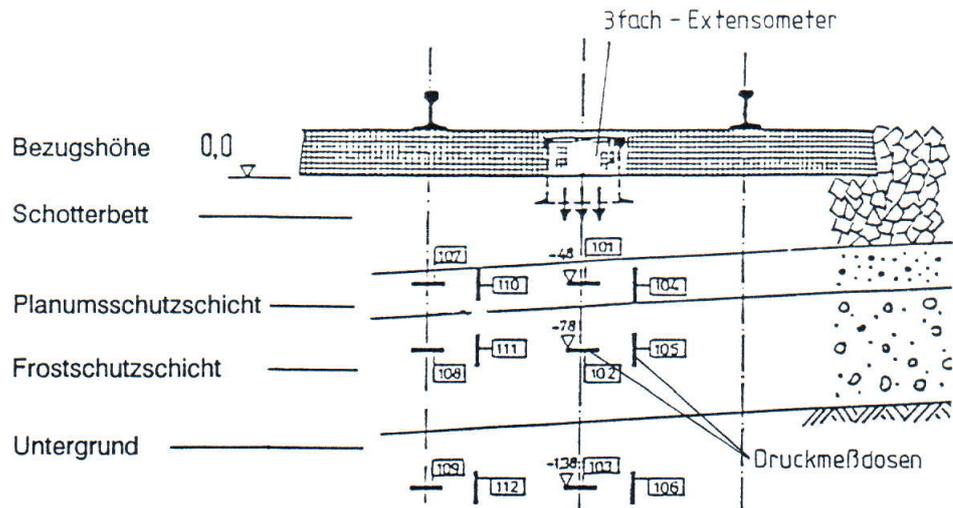


Bild 7: Beispiele für die Ausstattung eines Meßquerschnittes

Tendenzuntersuchungen, die jedoch im allgemeinen noch nicht als Rechenmodelle für das System Fahrzeug-Fahrweg-Unterbau-Untergrund herangezogen werden können. Hier bleibt noch ein weites bodenmechanisches Forschungsgebiet.

Da die DB ihre Verkehrswege nur abgesichert freigeben kann, müssen an Stelle rechnerischer Nachweise Versuchsfahrten treten, bei denen charakteristische Beanspruchungen gemessen und ausgewertet werden. Durch Vergleich mit vorliegenden Messungen läßt sich die Zunahme bestimmter Beanspruchungen abschätzen. Solange diese stetig verläuft und keine sprunghaften Zunahmen aufweist, kann, ggf. unter Inkaufnahme höherer Instandhaltungsaufwendungen, eine Freigabe erfolgen.

Auf diese Weise wurden auch Untersuchungen im Rahmen von Versuchsfahrten auf den Streckenabschnitten Würzburg—Gemünden(M) der NBS Hannover—Würzburg, die sich an frühere Untersuchungen bei Versuchsfahrten auf der Strecke Gütersloh—Neubeckum anschließen [9], wieder aufgenommen. Die neueren Untersuchungen wurden für Geschwindigkeiten bis etwa 400 km/h durchgeführt. Die Messungen erfordern sogenannte Meßquerschnitte, in denen an ausgesuchten Positionen der Strecke im Untergrund bzw. Unterbau unter dem Gleis Spannungs- und z. T. Beschleunigungsaufnehmer sowie Extensometer eingebaut sind (Bild 7).

Bei Zugüberfahrten nahm man Meßwerte in kurzen Zeitabständen (im Millisekundenbereich) auf und speicherte sie. Charakteristische Meßschriebe für Spannungsmessungen an einer Meßdose bei Geschwindigkeiten von 100 km/h und 400 km/h mit dem ICE/V als Meßzug zeigt Bild 8.

Die Auswertung erstreckte sich u. a. darauf, inwieweit sich die maximalen Spannungen mit der Geschwindigkeit verändern. Da diese Veränderungen, ebenso wie andere Meßgrößen, im Prozentbereich der Beanspruchungsgröße bei niedrigen Geschwindigkeiten liegen, konnte eine Freigabe erfolgen. Beachtenswert sind die erst bei höheren Geschwindigkeiten auftretenden negativen Spannungen (hier Zugspannungen) unmittelbar hinter den Achsüberfahrten, die auf eine dynamische Reaktion des Unterbaues im Bereich der Meßdosen hindeuten könnten.

Die meßbare Zunahme von dynamischen Lastanteilen — hierzu gehören neben den genannten Entlastungsspannungen in höheren Frequenzbereichen und linear zunehmende Schwingbeschleunigungen — bestätigt in jedem Fall die in Abschnitt 2.4.2 dargestellten Festlegungen für eine möglichst hochverdichtete Planums- bzw. Frostschuttschicht mit ausreichender Dicke, um dynamische Beanspruchungen aufnehmen zu können.

Weitergehende Auswertungen sind für spätere Entwicklungsphasen des Systems Fahrweg-Unterbau vorgesehen.

2.5.3 Schwingungsverhalten von Fahrbahnen auf nachgiebigem Untergrund

Im Gegensatz zu Neubaustrecken, bei denen der Unterbau ohne Behinderung des vorhandenen Betriebs den Vorschriften entsprechend hergestellt werden kann, sind bei Ausbaustrecken häufig nur unvollständige Instandsetzungsmaßnahmen wirtschaftlich zu vertreten. Insbesondere bei Strecken mit sogenannten Weichschichten (bindige Böden plastischer Konsistenz, Torfe) im Untergrund ergibt sich die Frage, inwieweit diese Schichten ausgetauscht bzw. verbessert werden müssen. Ein vollständiger Austausch ist aus wirtschaftlichen oder betrieblichen Gründen oft nur sehr schwer ausführbar.

Andererseits können verbleibende Weichschichten im Untergrund bei Anregung durch Eisenbahnverkehrslasten zu starken Schwingungen führen, die eine Destabilisierung des Gleisbettes zur Folge haben. Dabei kommen u. U. die Körner des Schotters in Bewegung; im Gleisrost treten größere, mehrere Millimeter erreichende horizontale Schwingungen auf. Diese Erscheinungen sind sowohl geschwindigkeits- als auch bodenabhängig.

Durch Schwingungsmessungen mit Geophonen bei Versuchsfahrten läßt sich ein Fahrgeschwindigkeitsbereich mit maximalen Schwinggeschwindigkeiten im Unterbau/Untergrund

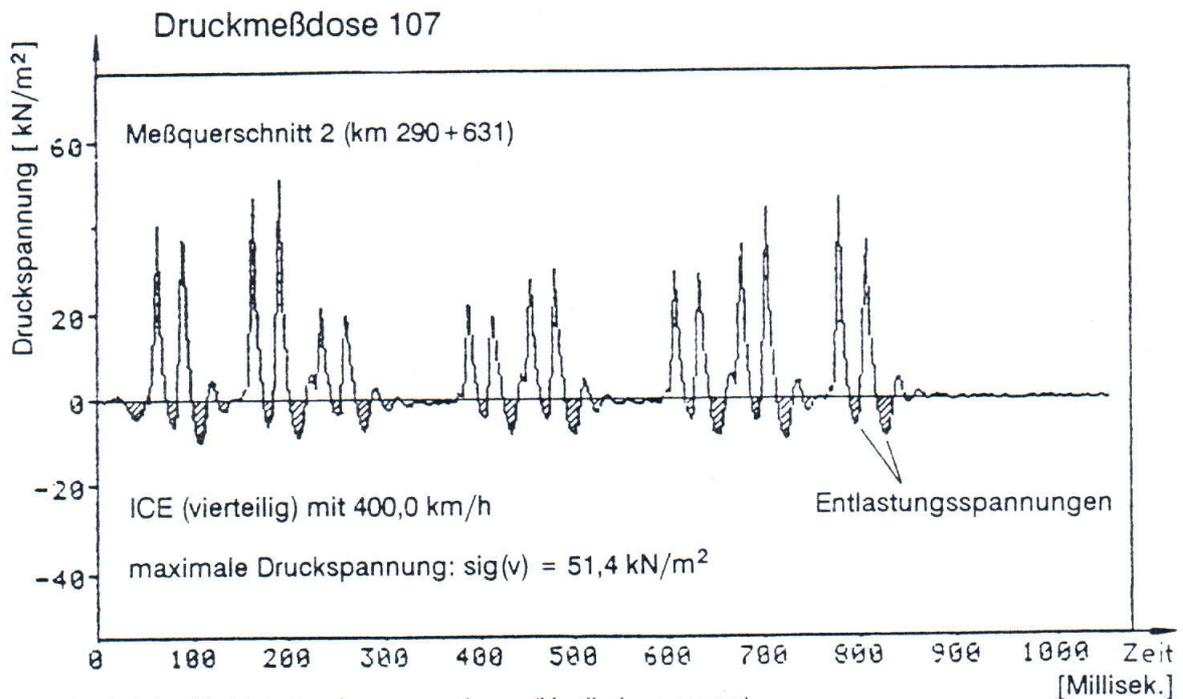
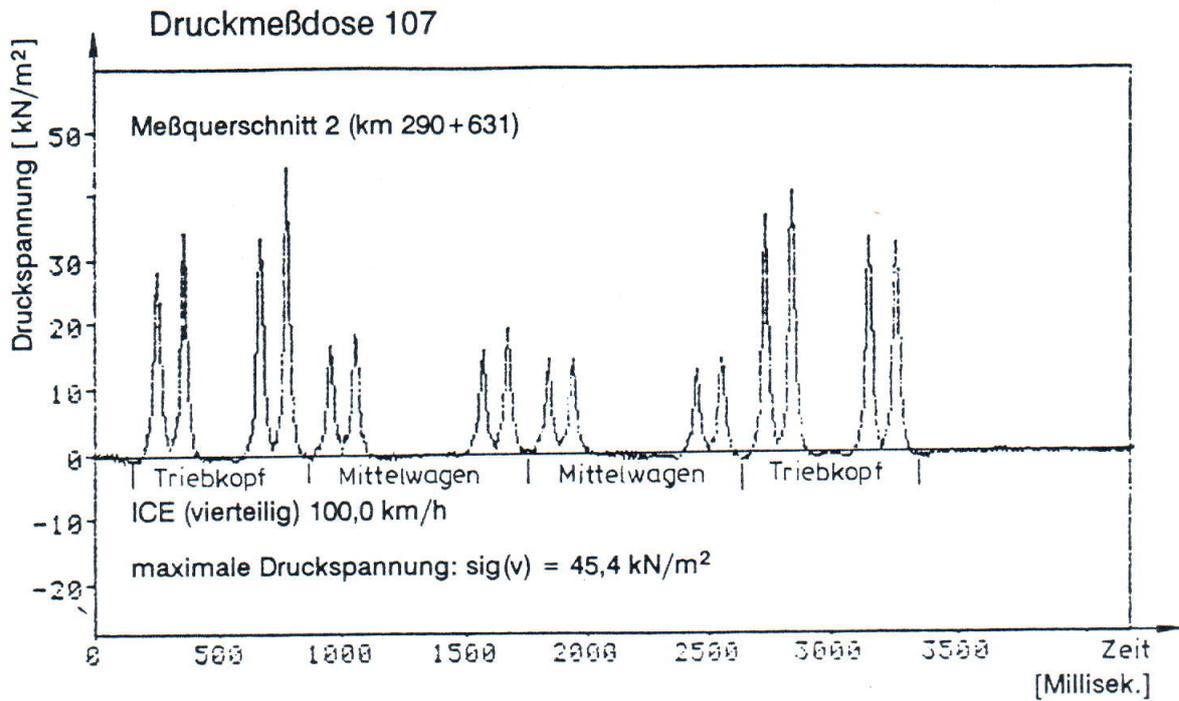


Bild 8: Meßschriebe für Unterbaubeanspruchung (Vertikalspannung) bei Überfahrt mit ICE/V

ermitteln. Dieser Geschwindigkeitsbereich ist abhängig von den Eigenfrequenzen des Systems. Bei entsprechenden Einwirkungsfrequenzen (Impulsen) durch Eisenbahnlasten können resonanzähnliche Erscheinungen auftreten. Zusammenhänge zwischen geschwindigkeitsabhängigen Impulsen und schichtdickenabhängigen Eigenfrequenzen des Systems wurden in [10] dargestellt (Bild 9).

Das Bundesbahn-Zentralamt München führt seit längerem Forschungsarbeiten durch, mit denen die Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und Schwingungsverhalten geklärt werden sollen. Ziel ist, den für einen langfristig gesicherten und instandhaltungsarmen Betrieb erforderlichen Mindestaufwand an Instandsetzungsmaßnahmen angeben zu können. Auf Grund theoretischer Zusammenhänge zwischen der Dichte des Bodens und der Eigenfrequenz des Systems wird z. B. die Erhöhung der Masse in Weichschichten durch Einmischen

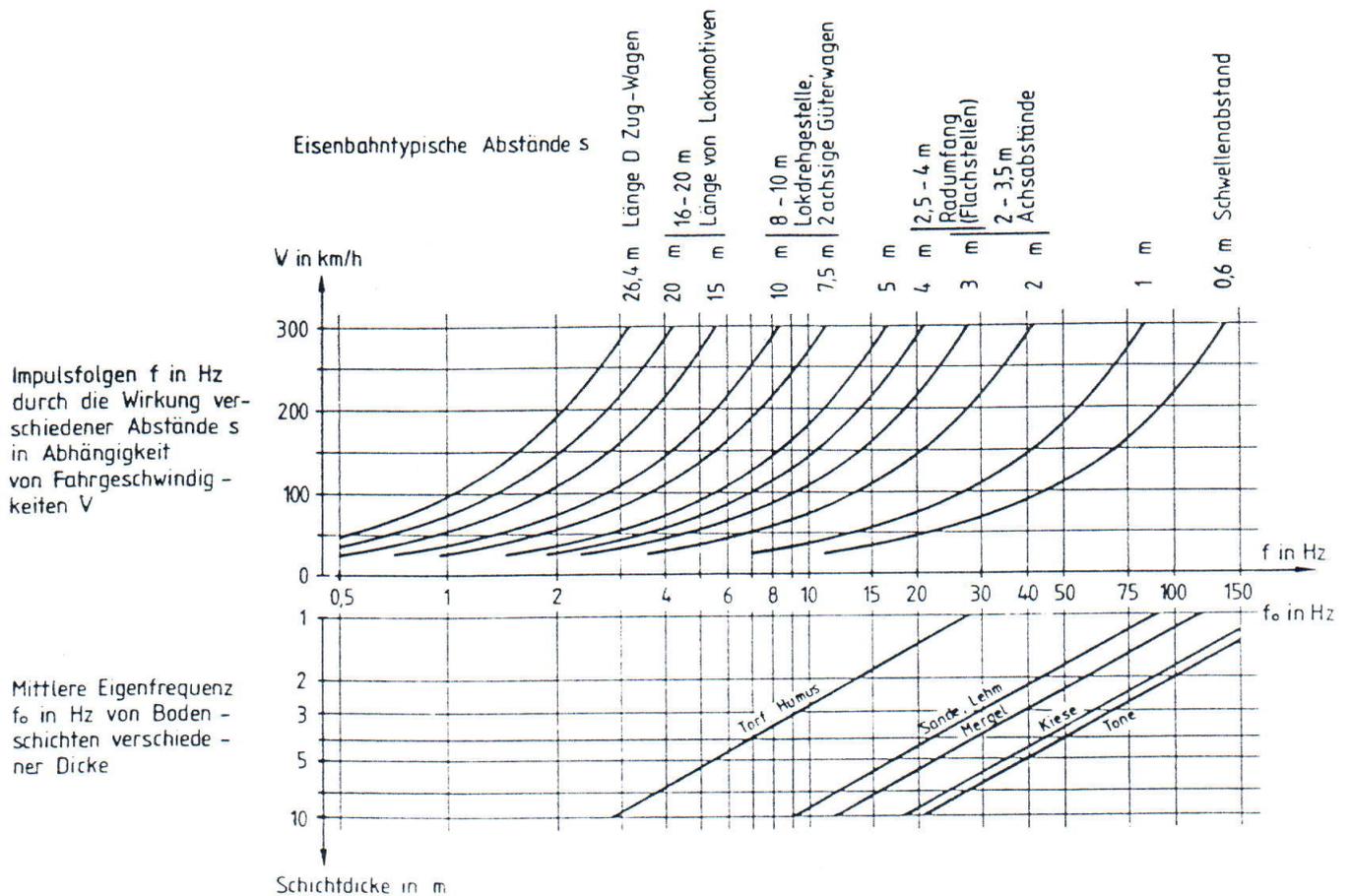


Bild 9: Zusammenhang von Einwirkungsfrequenzen (Impulsen) und Systemeigenfrequenzen (aus [10])

von Kies als Lösung in Erwägung gezogen, was der Vorstellung einer „Systemverstimmung“ entspräche. Inwieweit dies umsetzbar sein wird oder ob nicht bautechnische Maßnahmen, wie vermörtelte Rüttelstopfsäulen oder andere Verfahren, vorteilhafter sind, ist derzeit noch Gegenstand von Untersuchungen, die noch längere Zeit in Anspruch nehmen werden.

2.5.4 Erdbautechnische Anforderungen bei Festen Fahrbahnen

Auch wenn sich der sogenannte klassische Schotteroberbau als Fahrbahn für schienengebundene Fahrzeuge bisher in vielen Belangen sehr gut bewährt hat, so untersucht aus verschiedenen Gründen die DB, ob der Einsatz alternativer Oberbauformen bei Hochgeschwindigkeitsstrecken vorteilhaft ist. Ihr wesentliches Charakteristikum ist der Ersatz des Schotterbettes durch eine Betontragsplatte oder eine Asphalttragschicht, in die der Gleisrost in unterschiedlicher Weise fest eingebunden werden kann. Diese Fahrbahnarten werden als „Feste Fahrbahn“ bezeichnet. Beispiele zeigt Bild 10 [11]. Für die Fahrbahn ergäbe sich zunächst der Vorteil besserer Lagestabilität des Gleises und das Entfallen von Stopfarbeiten für das Schotterbett zur Wiederherstellung der Gleissollage. Allerdings setzt dies voraus, daß nur kleine Verformungen im Unterbau bzw. Untergrund unter der Tragsplatte in der gesamten Nutzungszeit der Strecke auftreten. Um solche Anforderungen auch nur annähernd erfüllen zu können, haben die Vorplanung und Herstellung des Unterbaus und die Voruntersuchungen über mögliche bzw. wahrscheinliche Eigensetzungen von Dämmen und Setzungen oder Hebungen des Untergrundes eine weitaus größere Bedeutung als beim Schotteroberbau. Hinzu kommt die Aufgabe, eine auf Dauer funktionierende Mittenentwässerung zwischen den Gleisen sicherzustellen, da einerseits durch die Feste Fahrbahn ähnlich wie im Straßenbau die Fahrbahnoberfläche dicht ist und andererseits ein konzentriertes Einsickern von Oberflächenwasser in den Unterbau zu Pumperscheinungen und zu Schäden an der Fahrbahn führen kann (Bild 11).

Für den Unterbau ist bei allen Feste-Fahrbahn-Systemen neben einer hydraulisch gebundenen Tragschicht eine Frostschuttschicht sowie eine untere Tragschicht mit nachgewiesenen Eigenschaften bis in eine Tiefe von etwa 2,5 m unter Tragsplatte bzw. Asphalttragschicht erforderlich.

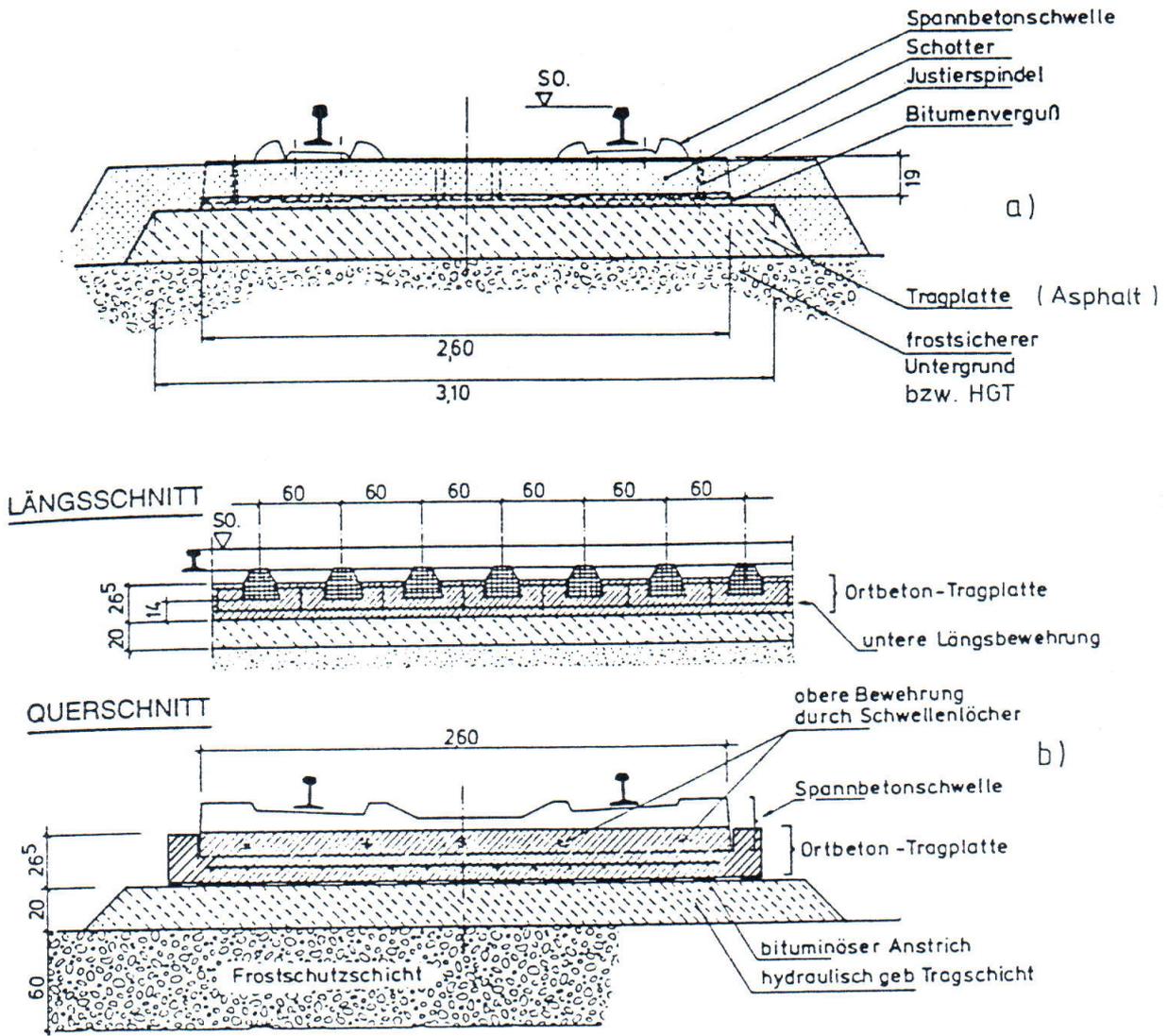


Bild 10: Beispiele für Feste Fahrbahnen a) Asphalttragschicht b) Betontragplatte (aus [11])

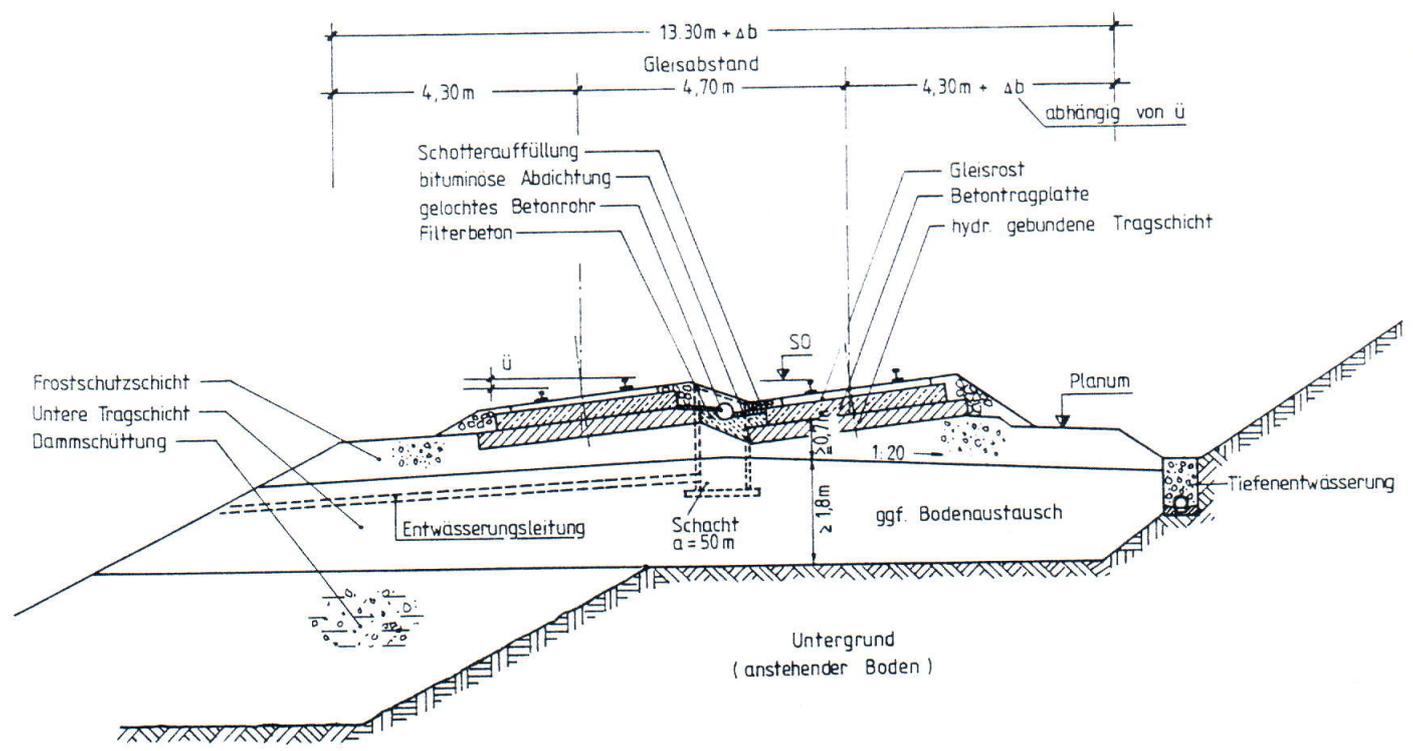


Bild 11: Mittenentwässerung und Unterbau bei Festen Fahrbahnen (Beispiel)

Das kann u. U. in Einschnitten zu höheren Aufwendungen für Bodenaustausch gegenüber dem Schotteroberbau führen, da insbesondere anfänglich auftretende Setzungen bei nachgiebigem Untergrund für Feste Fahrbahnen weitgehend ausgeschlossen werden müssen.

Ein von BZA München durchgeführtes Forschungsvorhaben enthält neben der konstruktiven Gestaltung des Unterbaus und der Entwässerung auch Untersuchungen zu dynamischen Beanspruchungen, Vergleichsmessungen im Unterbau und Überlegungen zur Ausführung von Übergängen zu Kunstbauwerken, die erforderlich sind, um Steifigkeitssprünge im Unterbau abzumindern. Die Forschungsarbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

2.5.5 Qualitätssicherung bei Erdbauwerken

Die Neubaustrecken des Hochgeschwindigkeitsverkehrs werden im allgemeinen kurz nach Fertigstellung in Betrieb genommen. Nachträgliche Arbeiten zur Ausbesserung von Mängeln müssen so weit wie möglich ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund kommt der gesicherten Qualität der neu erstellten Erdbauwerke eine besondere Bedeutung zu. Da auch im Straßenwesen (ebenso wie in anderen Gebieten des Bauwesens generell) die Qualitätssicherung der Erdbauwerke eine zunehmend wichtige Rolle spielt und in diesem Bereich besondere Erfahrungen und eingeführte Kapazitäten vorhanden sind, wird die Frage der Qualitätssicherung unter Beteiligung der DB dort behandelt (vgl. Abschnitt 2.3). Auf Grund der kurzfristigen Erstellung der umfangreichen Erdbauwerke ergab sich jedoch für die DB die Notwendigkeit, vorab bereits neuere Verfahren der Qualitätssicherung anzuwenden.

Im Bereich des Erdbaues ist hier das Verfahren der „Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK)“ zu nennen. Dabei wird während der Verdichtungs Vorgänge durch Vibrationswalzen das Schwingungsspektrum der Walze gemessen und ausgewertet. Zwischen der statischen Steifigkeit eines Bodens und dem dynamischen Schwingungsverhalten der Walze besteht ein eindeutiger Zusammenhang, so daß eine laufende Kontrolle (über die Länge der Fahrstrecke und Breite der Walze, also flächendeckend) der erreichten Verdichtung des Bodens unter der Walze sowie ein gezieltes Nachverdichten und ein Erkennen von „Schwachstellen“ möglich wird. Dies sind erhebliche Verbesserungen gegenüber den konventionellen Prüfverfahren, z. B. durch Dichtebestimmung, Plattendruckversuch oder Sondierungen, die

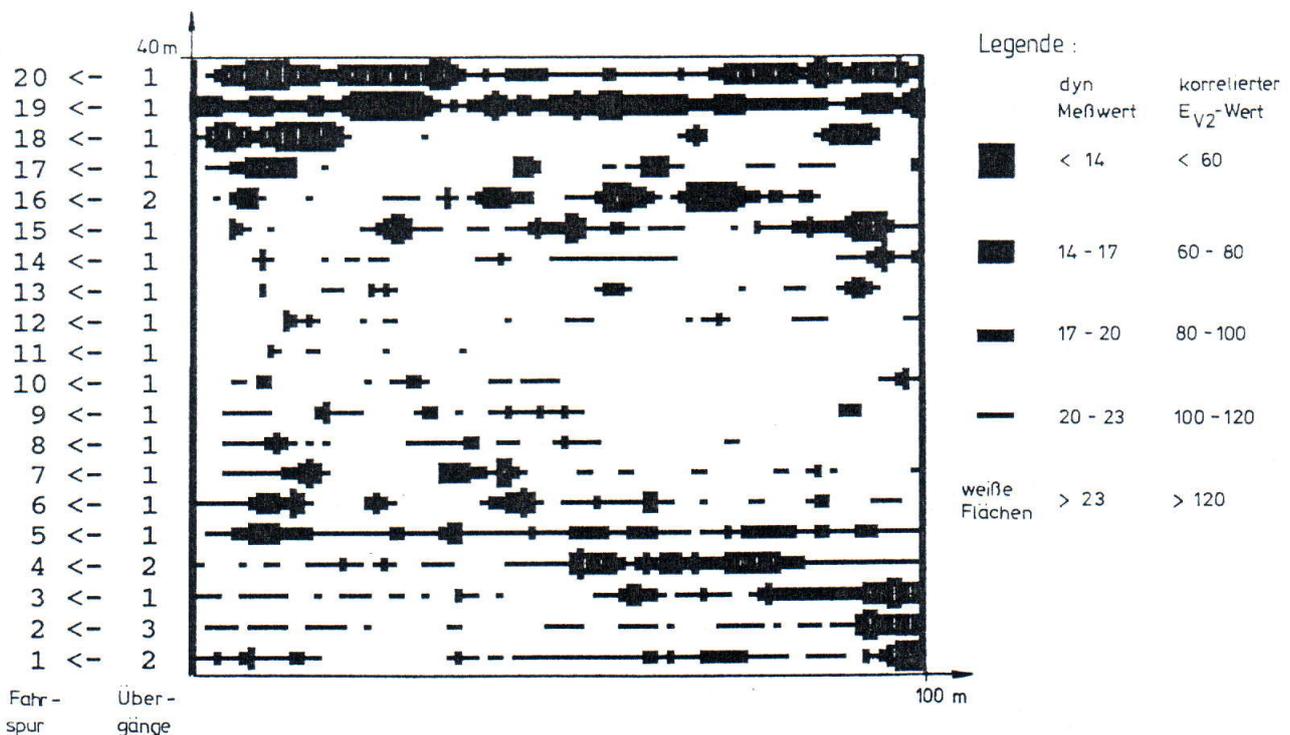


Bild 12: Beispiel für eine dynamische Verdichtungs nachprüfung, Flächendarstellung mit teilweise unzureichend verdichteten Bereichen

nur punktuelle Ergebnisse liefern. Meßergebnisse der Abnahme eines Zwischenplanums bei einer Baumaßnahme der DB für einen Containerbahnhof zeigt Bild 12. Auf Grund des Protokolls konnten die Mängel in den Fahrspuren 19 und 20 sofort erkannt werden.

Die Vorteile des Verfahrens, einen Schichtaufbau mit hoher Gleichmäßigkeit zu erreichen, sind angesichts der hohen Lagegenauigkeitsanforderungen bei Hochgeschwindigkeitsstrecken deutlich. Andere Einsatzgebiete im Bereich der DB ergeben sich für die hochbeanspruchten Container-Umschlagflächen, für Kranbahnen auf Schotter und vor allem auch für den Unterbau von Festen Fahrbahnen.

Das Verfahren wurde in seinen Grundzügen Ende der 70er Jahre an der Technischen Universität (TU) München entwickelt [12]. Nach einer erfolgreichen Anwendung der FDVK beim Bau von Abschnitten der NBS Mannheim—Stuttgart [13], wo vor allem die Anwendung für linienförmige Baustellen adaptiert wurde, wurden statistische Auswertungen der dort gesammelten umfangreichen Daten zur Absicherung des Verfahrens in Auftrag gegeben. Weitere Aufgaben der Qualitätssicherung für Erdbauwerke sind eine fachgerechte Erfassung der Daten von Erdbauwerken sowie eine Dokumentation der Untergrundverhältnisse längs der Neu- bzw. Ausbaustrecken. Die erforderlichen Vorgaben hierfür werden im Zuge der Fortschreibung des Regelwerks der DB, insbesondere der DS 836, entwickelt.

3 Ausgewählte Grundbauprobleme

3.1 Allgemeines

Die bei den Baumaßnahmen für die Neubaustrecken und zukünftigen Hochgeschwindigkeitsstrecken ausgelösten grundbautechnischen Fragen und Probleme sind zahlreich und beziehen sich nahezu auf die gesamte Bandbreite der Grundbautechnik. Aufgrund der linienförmigen Erstreckung der Gesamtbaumaßnahme über mehrere hundert Kilometer ergaben sich viele untergrundabhängige Fragestellungen, die eine unmittelbare Übertragung von an einer Stelle mit spezifischen Untergrundverhältnissen gewonnenen Erfahrungen auf regional andere geologische Randbedingungen nicht immer zulassen. Hinzu kommt, daß die an der Planung und Ausführung beteiligten geotechnischen Berater oftmals vorwiegend regionale Erfahrungen besitzen und mit besonderen eisenbahnspezifischen Fragestellungen wenig vertraut sind.

Im BZA München werden viele überregionale grundbautechnische Fragen, projektbezogen in Zusammenarbeit mit den bauausführenden Stellen und den örtlichen geotechnischen Beratern, bearbeitet. Nachfolgend ist eine Auswahl von Projekten zusammenfassend wiedergegeben. Schwerpunkte bilden dabei Fragestellungen, die teilweise federführend vom BZA München bearbeitet wurden. Weitere Einzelprojekte lassen sich teilweise dem Schrifttum entnehmen; Auszüge finden sich z. B. in [14] und [15].

3.2 Erddruckbelastung aus Eisenbahnverkehrslasten

Bei NBS-Bauwerken sind häufig Geländesprünge durch Stützmauern oder Pfahlwände abzufangen, wobei eine unmittelbare Belastung der Stützwand aus dem Eisenbahnverkehr vorhanden sein kann. Sofern sich die begrenzten Flächenlasten, die nachfolgend als Streifenlasten bezeichnet werden, im Rahmen der üblichen Lasten aus dem Straßenverkehr bewegen, ist der Einfluß auf die Stützwandberechnung nur von geringer Bedeutung. Bei Einwirkungen aus dem Eisenbahnverkehr dagegen kann die wirklichkeitsnahe Erfassung dieses Erddruckanteils die Dimensionierung der Stützwand erheblich beeinflussen. So beträgt die Streifenlast aus Eisenbahnverkehr nach DS 804 [3] $p' = 52 \text{ kN/m}^2$ auf einem Laststreifen von 3 m Breite. Darüber hinaus können Fliehkräfte und Seitenstoß eine zusätzliche waagerechte Belastung auf die Stützkonstruktion bewirken, deren maximaler Wert etwa $1/5$ der vertikalen Verkehrslast betragen und die zu einer bis etwa $\varepsilon = 10^\circ$ geneigten resultierenden schrägen Streifenlast führen kann. Vergleicht man die bisher üblichen Regelungen [3] zur Erfassung der Erddrucklast

aus Eisenbahnverkehrslasten mit Ansätzen nach der wirklichkeitsnäheren Grenzgleichgewichtsmethode [16], dann führen erstere zu einer relativ hochliegenden resultierenden Erddrucklast aus dem Eisenbahnverkehr, was eine entsprechend unwirtschaftliche Wandbemessung zur Folge hatte.

Auf der Grundlage von umfangreichen Vergleichsberechnungen und Parametervariationen mit der Grenzgleichgewichtsmethode und der Methode der finiten Elemente sowie Modellversuchen [17] (Bild 13) konnte als ein zutreffendes Näherungsverfahren ein auf Ohde [18] zurück-

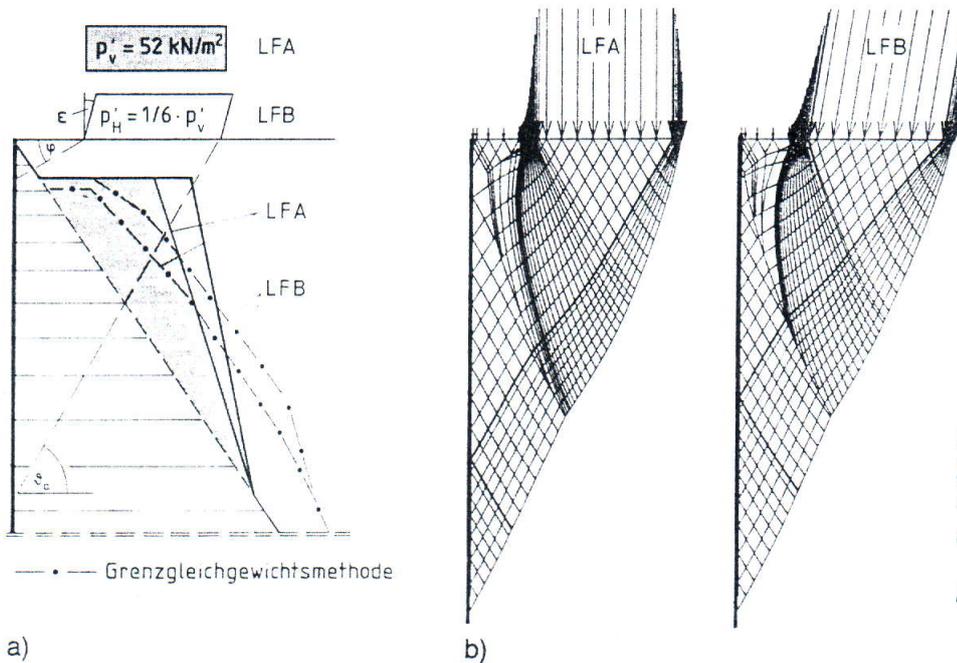


Bild 13: Berechnungsbeispiel zum Erddruck aus Eisenbahnverkehrslasten
 a) Berechnung nach DS 804 [3]
 b) Grenzgleichgewichtsmethode [16]

gehender Ansatz zur Anwendung empfohlen werden (Bild 14a). In [19] wurde dieser Ansatz mit den für Baugruben aus der EAB [20] bekannten Berechnungsvorschlägen (Bild 14b) verglichen. Die Abweichungen betragen etwa maximal 10%, bezogen auf die Erddrucklast, so daß beide Verfahren für die Fragestellung brauchbare Ergebnisse liefern. Damit können auch die Regelungen der EAB verwendet werden. Eine entsprechende Änderung der DS 804 mit einer weiteren Vereinfachung, näherungsweise als Rechteck, wurde vorgenommen.

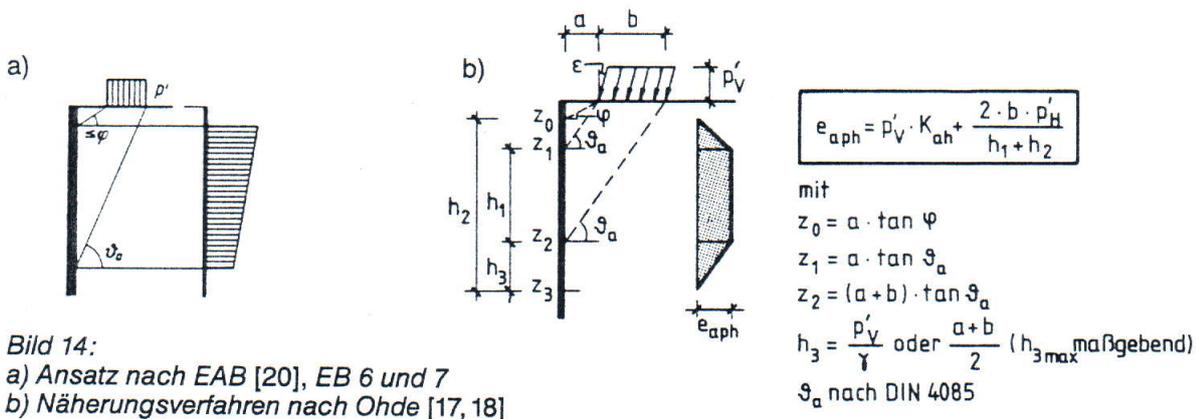


Bild 14:
 a) Ansatz nach EAB [20], EB 6 und 7
 b) Näherungsverfahren nach Ohde [17, 18]

3.3 Tragfähigkeit von Großbohrpfählen

Zahlreiche NBS-Brücken sind auf Großbohrpfählen gegründet. Die in der Vornorm DIN 4014 Teil 2 [21], Ausgabe September 1977, enthaltenen Angaben für die Bestimmung der äußeren Tragfähigkeit von Großbohrpfählen führte nicht immer zu einer wirtschaftlichen Dimensionierung der Pfähle. Aus diesen Gründen wurden den bauausführenden Stellen — insbesondere in nichtbindigen, dicht gelagerten tragfähigen Baugrundsichten — Probelastungen empfohlen, deren Ergebnisse für das jeweilige Brückenprojekt eine geringere Pfahlanzahl und -länge zuließen. Darüber hinaus konnte das BZA München die in [22] zusammenfassend und ver-

a) Pfahlspitzendruck

($q_s = 10 \dots 15 \text{ MN/m}^2$)

Pfähle ohne Fußverbreiterung	
Setzung s cm	Pfahlspitzendruck**) σ_s MN/m ^{2*})
1	0,5
2	0,8
3	1,1
15***)	3,4
Pfähle mit Fußverbreiterung	
1	0,35
2	0,65
3	0,9
15***)	2,4

*) $1 \text{ MN/m}^2 = 10 \text{ kp/cm}^2$
 **) Zwischenwerte sind linear einzuschalten
 ***) bei der Grenzlast Q_g angenommene Setzung

b) Pfahlmantelreibung

Festigkeit des nichtbindigen Bodens	Sondierdruck*) q_s MN/m ^{2***)}	Tiefe unter Gelände m	Mantelreibung τ_m MN/m ^{2***)}
sehr gering	unter 5	—	0
gering	5 bis 10	0 bis 2	0
		2 bis 5	0,03
		über 5	0,05
mittel	10 bis 15	0 bis 2	0
		2 bis 7,5	0,045
		über 7,5	0,075
groß	über 15	0 bis 2	0
		2 bis 10	0,06
		über 10	0,1

*) $1 \text{ MN/M}^2 = 10 \text{ kp/cm}^2$
 **) Drucksonde nach DIN 4094 Teil 1
 ***) Entsprechende Rammsondierwerte siehe Erläuterungen zu Abschnitt 7.1.2

Bild 15: Pfahltragfähigkeitsangaben für nichtbindige Böden nach Vornorm DIN 4014 Teil 2 — 9/77 —

gleichend ausgewerteten Ergebnisse für andere Projekte übernehmen und auch in die laufende Pfahlnormung einbringen. Bild 15 zeigt die für nichtbindige Untergrundverhältnisse in der Vornorm [21] enthaltenen Angaben zum Pfahlspitzendruck und zur Mantelreibung. Im Vergleich dazu enthält Bild 16 die neuen Regelungen ($D = \text{Pfahlfußdurchmesser}$) aus DIN 4014, Ausgabe -3/90- [23], in die Probebelastungsergebnisse auf den Neubaustrecken mit eingeflossen sind, wobei sie teilweise zu wirtschaftlicheren und differenzierteren Angaben geführt haben.

Eine andere Frage bei der Gründung großer Talbrücken lautete, wie die Tragfähigkeit von Großbohrpfählen im stärker verwittertem Buntsandstein in Abhängigkeit von den Tonsteinanteilen zu beurteilen ist. Ging man von der Felstabelle der Vornorm [21] nach Bild 17 aus, so ergab sich das Problem, welche der im Bild besonders gekennzeichneten Spitzendrücke für die Pfahldimensionierung im Buntsandstein zutraf. Da hierüber kaum Erfahrungen vorlagen, wurden mehrere Pfahlprobebelastungen durchgeführt. An der Rombachtalbrücke sind im Untergrund mitteldicht gelagerte Deckschichten aus Hangschutt vorhanden. Die Pfähle binden in den darunter anstehenden Mittleren Buntsandstein ein. Dieser Sandstein besteht aus 15cm bis 40cm dicken Bänken mit Ton- und Schluffsteinzwischenlagen, engstehender Klüftung mit Öffnungsweiten in Millimeter- bis wenige Zentimeter-Größenordnungen. Vereinzelt sind auch

b) Pfahlmantelreibung

Bruchwert τ_{mf} der Mantelreibung in nichtbindigen Böden

Festigkeit des nichtbindigen Bodens bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_s MN/m ²	Bruchwert τ_{mf} der Mantelreibung MN/m ^{2*})
0	0
5	0,04
10	0,08
≥ 15	0,12

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

a) Pfahlspitzendruck

Pfahlspitzenwiderstand σ_s in Abhängigkeit von der auf den Pfahl(fuß)durchmesser bezogenen Pfahlkopfssetzung s/D bzw. s/D_F in bindigen Böden

bezogene Pfahlkopfssetzung s/D bzw. s/D_F	Pfahlspitzenwiderstand σ_s MN/m ^{2*})			
	bei einem mittleren Sondierspitzenwiderstand q_s MN/m ²			
	10	15	20	25
0,02	0,7	1,05	1,4	1,75
0,03	0,9	1,35	1,8	2,25
0,10 = s_g	2,0	3,0	3,5	4,0

*) Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden. Bei Bohrpfählen mit Fußverbreiterung sind die Werte auf 75% abzumindern.

Bild 16: Pfahltragfähigkeitsangaben für nichtbindige Böden nach DIN 4014 — 3/90 —

Gesteinsart \ Verwitterungs- zustand und Grad der mineralischen Bindung*)	Massige Erstarrungs- gesteine und Metamorphite, z. B. Granit, Gabbro, Ba- salt, Gneis	Konglomerate, Breccien, Sandstein, Kalkstein, Dolomitstein	Mergelstein, Schluffstein, Tonstein
unverwittert, sehr gute mineralische Bindung	16	11	8
angewittert, gute mineralische Bindung	9	6	4
stärker verwittert, mäßige mineralische Bindung	4	3	Es gelten die Kriterien für Lockergesteine
entfestigt oder zersetzt, schlechte oder ohne mineralische Bindung	Es gelten die Kriterien für Lockergesteine nach Abschnitt 6.1		
*) Mineralische Bindung nach DIN 4022 Teil 1, Ausgabe November 1969, Abschnitt 10.2.2			

Bild 17: Grenzwerte für den Pfahlsitzendruck σ_s in Fels nach Vornorm DIN 4014 Teil 2 — 9/77 —

größere Klüfte vorhanden. So ergab sich am Probepfahl II eine steil stehende etwa 13 cm weit geöffnete Kluft. Es bestand bei den Probelastungen die Hoffnung, einen Pfahlsitzendruck von $\sigma_s \approx 6 \text{ MN/m}^2$ zu erreichen. Bei den Probelastungen an der Kehrenbachtalbrücke war der Mittlere Buntsandstein stark verwittert und wesentlich tonsteinreicher als bei der Rombachtalbrücke.

Den für derartige Versuche an Großbohrpfählen notwendigen Aufwand allein bei der Belastungseinrichtung zeigt beispielhaft das Bild 18.

In Bild 19a sind vergleichend die Last-Setzungskurven der Probelastungen und in Bild 19b die Pfahlsitzendruck-Setzungskurven dargestellt, wegen weiterer Detailergebnisse vgl. [24] und [25]. Danach waren die Pfahltragfähigkeiten im Buntsandstein teilweise erheblich ungünstiger als erwartet und kamen einem Pfahlverhalten im Lockergestein nahe. Die erheblichen Kosten für derartige Probelastungen konnten in diesen Fällen nicht durch wesentliche Einsparungen bei den Pfählen aufgefangen werden. Es ist aber hervorzuheben, daß diese Versuche das Gründungsrisiko bei den schwierigen Untergrundverhältnissen minimiert und damit zu einer Erhöhung des vorhandenen Sicherheitsniveaus geführt haben. Weiterhin lagen damit besser abgesicherte Ergebnisse vor, die für die zahlreichen nachfolgenden Talbrücken Gründungen auf Pfählen im Buntsandstein genutzt werden konnten.

Auch diese Probelastungsergebnisse haben ihren Eingang in die neue DIN 4014 [23] gefunden, leider allerdings mit dem Ergebnis, daß bei derartigen Untergrundverhältnissen auf Tragfähigkeitsangaben in einer Norm zunächst nur noch bedingt zurückgegriffen werden kann, weil die damit verbundenen Unsicherheiten eine detaillierte Normung für diesen Teilbereich bis auf weiteres nicht zulassen, vgl. auch [26].

Über die angesprochenen Probleme mit Großbohrpfählen hinausgehend, waren gerade zu diesem Thema weitere zahlreiche Fragestellungen vorhanden, bei denen das BZA München ebenfalls beratend mitgewirkt hat, vgl. hierzu als Beispiel [27] und [28].

3.4 Gründung von Lärmschutzwänden

In dicht besiedelten Gebieten werden häufig Lärmschutzwände, bestehend aus Pfosten und flexiblen Wandelementen, verlangt. Als Gründungselemente kommen dabei in der Regel kurze Pfähle zum Einsatz. Das System und die Belastung zeigt Bild 20. Das mögliche Belastungs-/

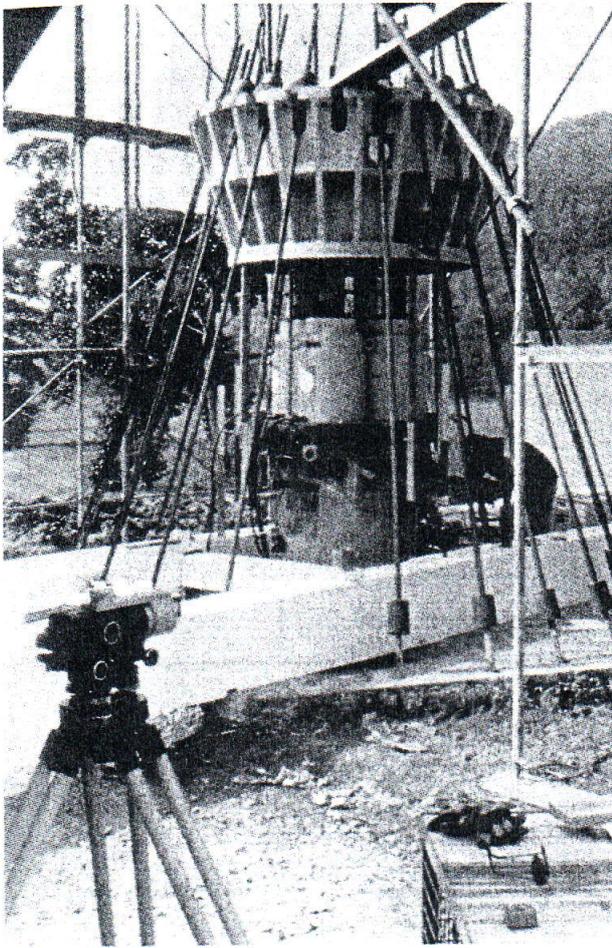


Bild 18: Belastungseinrichtung, Versuche Kehrenbachtalbrücke

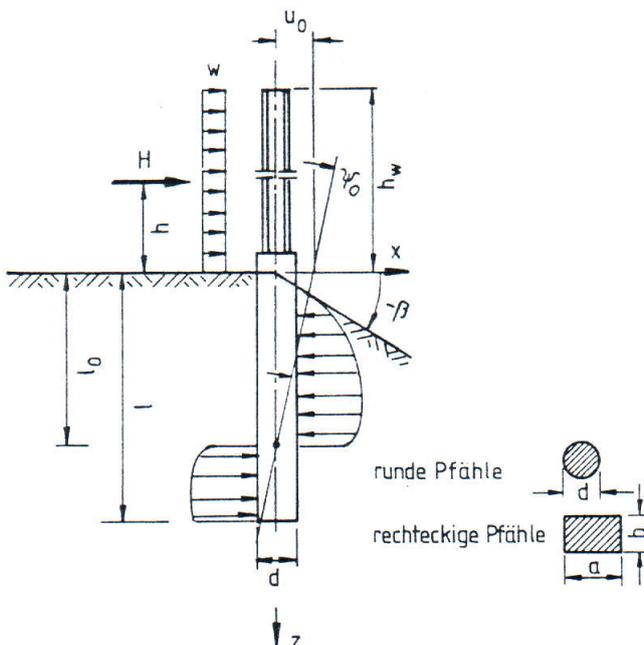
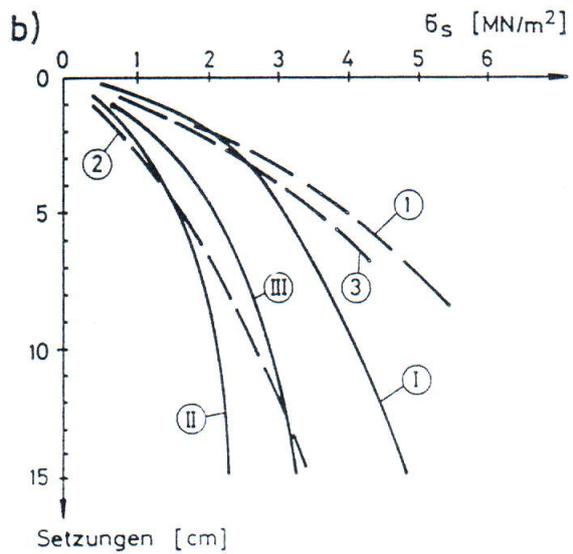
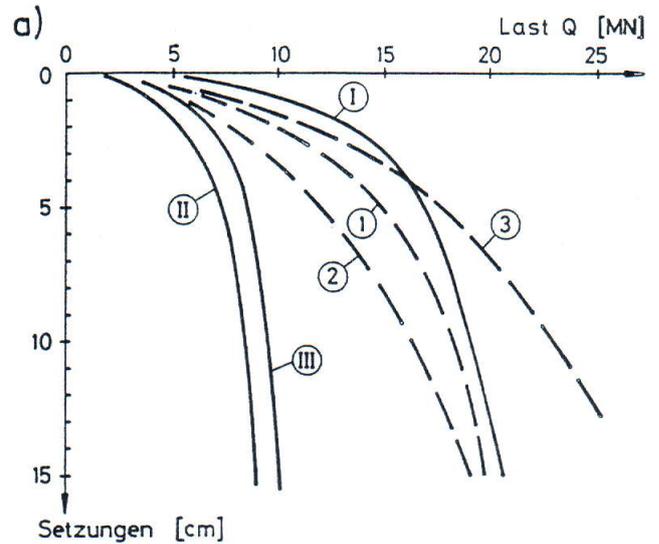


Bild 20: System und Belastung von Lärmschutzwänden

Zeitdiagramm geht aus Bild 21 hervor. Hinsichtlich der Dimensionierung dieser überwiegend horizontal beanspruchten Pfähle lagen keine einheitlichen und allgemein anerkannten Berechnungsverfahren vor [29]. Aufbauend auf Modellversuchsergebnissen wurden Bemessungsnomogramme für Regelfälle von Lärmschutzwänden neben Eisenbahnverkehrswegen ent-

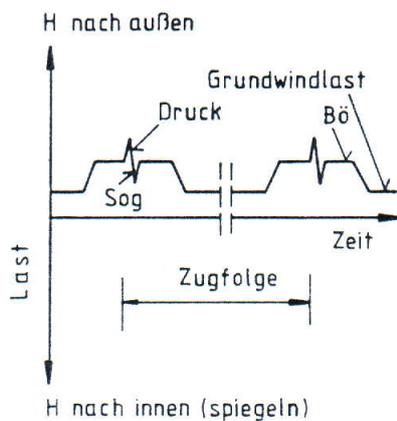


- LEGENDE:
- Versuche Rombach - TB
 - ⓪ I d=1,2 m , l = 15,2 m
 - ⓪ II d=1,2 m , l = 9,2 m
 - ⓪ III d=0,9 m , l = 10,9 m
 - - - Versuche Kehrenbach - TB
 - ⓪ 1 d=1,2 m , l = 15,0 m
 - ⓪ 2 d=1,2 m , l = 20,0 m
 - ⓪ 3 d=1,2 m , l = 25,0 m

Bild 19: Probelastungsergebnisse an Großbohrpfählen im Buntsandstein

- a) Last-Setzungslinien
- b) Spitzendruck-Setzungslinien

a) Wind senkrecht zur Wand



b) Wind parallel zur Wand

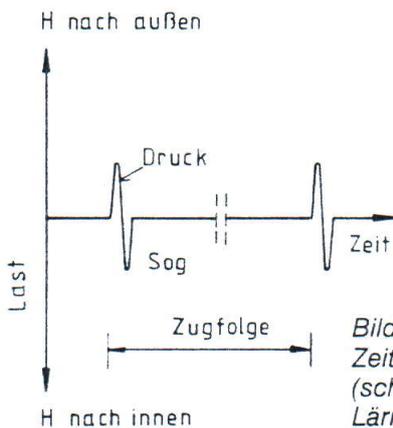


Bild 21: Belastungs-Zeitdiagramm (schematisch) von Lärmschutzwänden

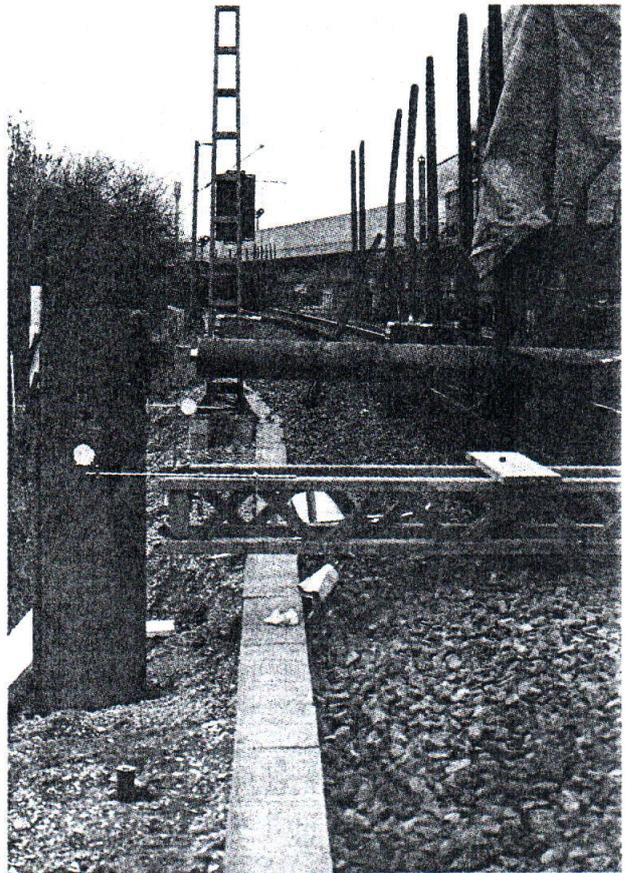


Bild 22: Probelastung an Pfählen für Lärmschutzwandgründungen an der Neubaustrecke

wickelt und in DS 800 [30] zur probeweisen Anwendung empfohlen. Diese Nomogramme haben sich auch im Vergleich zu Probelastungen weitgehend bewährt. Um jedoch auch abgesicherte Berechnungsverfahren für diese Gründungsart, unabhängig von Regelabständen und Randbedingungen, zur Verfügung zu stellen, wurden hierzu auf den Grundlage umfangreicher Modell- und Großversuche Ergebnisse [31,32] erarbeitet, die in zukünftige Empfehlungen einfließen könnten.

Gleichwohl können für dieses Pfahlsystem auch Probelastungen sehr sinnvoll sein und mit einem relativ geringen Kostenaufwand durchgeführt werden. Damit lassen sich oftmals wirtschaftlichere Dimensionierungsansätze finden. Bild 22 gibt dazu ein Beispiel von einer entsprechenden Probelastung bei Neubaustrecken. Andere ebenso einfache und kostengünstige Belastungseinrichtungen sind möglich.

3.5 Gründungssteifigkeit von Talbrücken

Bei den häufig ausgeführten einfeldrigen Brückensystemen mit durchgehend geschweißter Schiene treten in der Schiene zusätzliche Längskräfte aus Temperaturänderungen sowie Brems- und Anfahrlasten auf. Die Längskräfte werden aus dem Gleisrost über den Schotter auf den Brückenüberbau und von dort über die festen Lager auf die Pfeiler und Gründungselemente übertragen. Je nach der vorhandenen Unterbausteifigkeit der Auflagerpunkte, die sich aus der Pfeiler- und Gründungssteifigkeit zusammensetzt, ergeben sich in der durchgehend geschweißten Schiene Längsspannungen, die ein bestimmtes Maß nicht überschreiten dürfen. Insofern sind die Größe der Unterbausteifigkeit und deren Unterschiede je Auflagerpunkt mitentscheidend für die Ausführbarkeit einfeldriger Brückensysteme. Dabei lagen über den Anteil der Gründungssteifigkeit aus der Fundamentverschiebung bzw. Verdrehung unter teilweiser

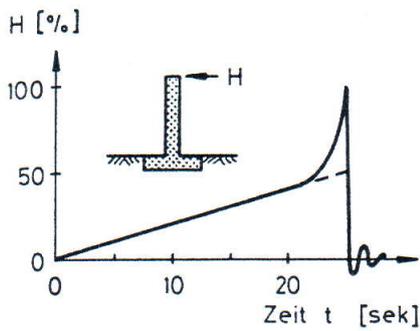


Bild 23: Last-Zeitverhalten bei Zugbremsungen auf Talbrücken

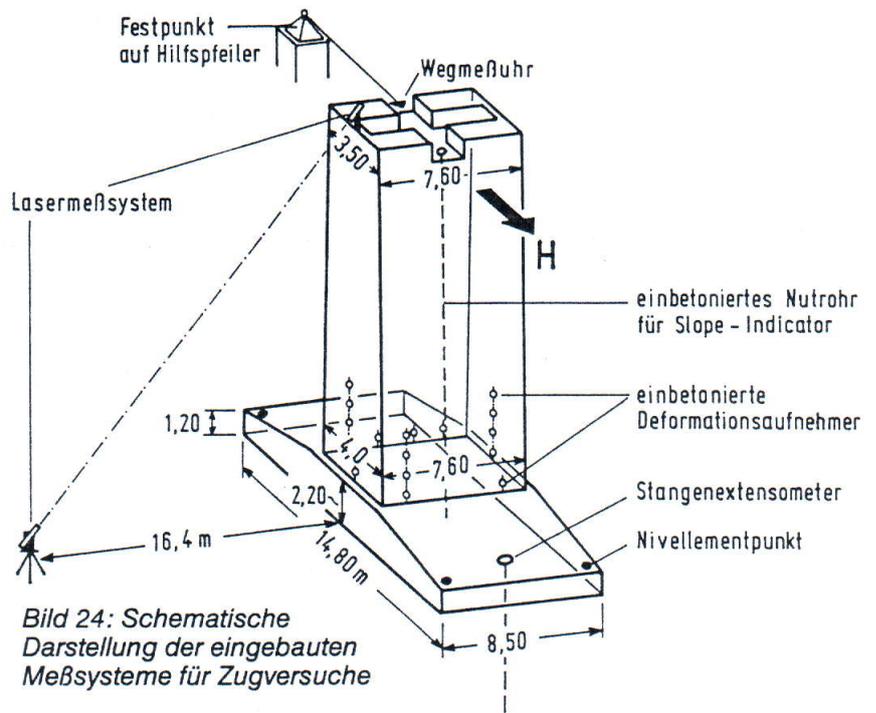


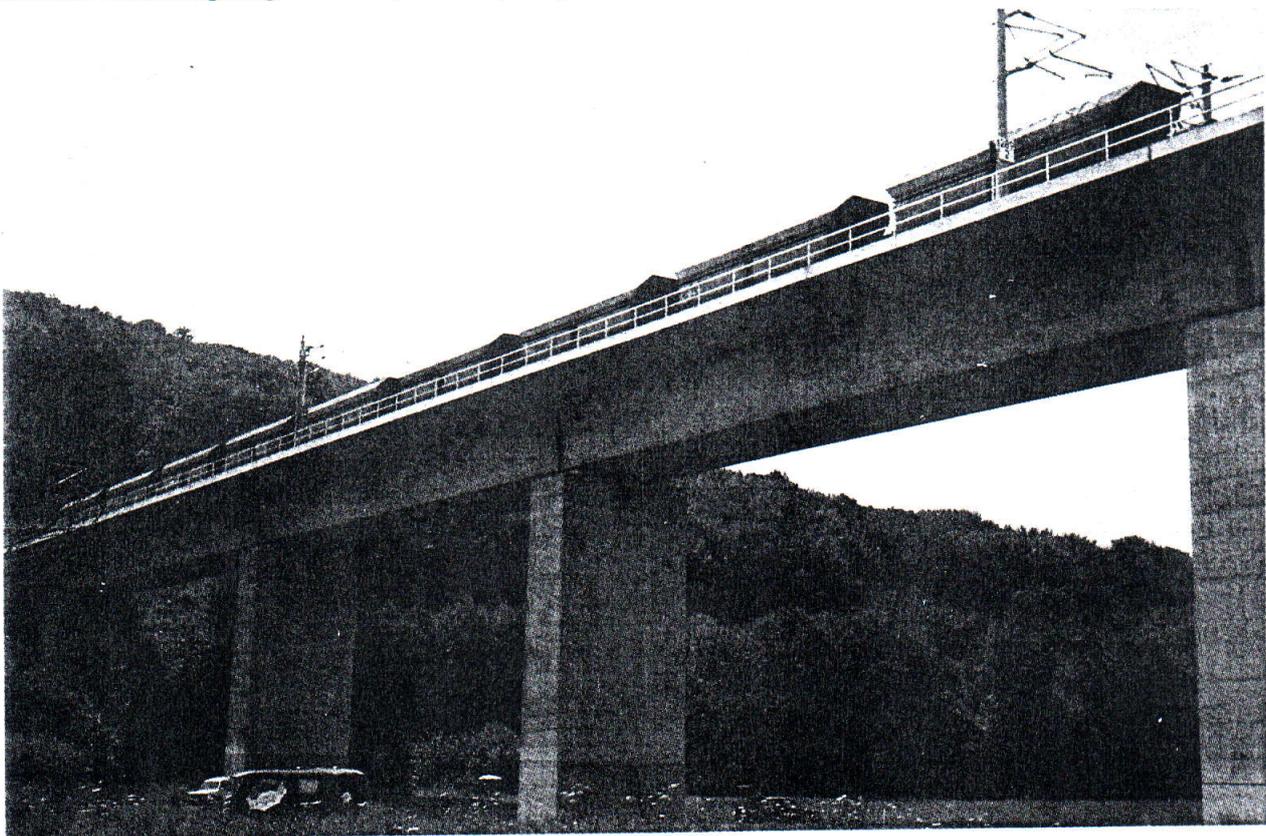
Bild 24: Schematische Darstellung der eingebauten Meßsysteme für Zugversuche

Kurzzeitbelastung nur wenige abgesicherte Erkenntnisse vor. Die wirkende Bremslastcharakteristik, die als Horizontallast in den Pfeilerkopf eingeleitet wird, zeigt Bild 23.

Als eines der ersten Bauwerke dieser Art wurde die Sinntalbrücke Schaippach ausgeführt. Im Jahr 1982 (Phase 1) wurden Zugversuche an den Pfeilerköpfen vorgenommen. Aus den gemessenen Fundamentverschiebungen wurden dann die vorhandenen Gründungssteifigkeiten bestimmt [33]. Bild 24 zeigt die in zwei Pfeiler eingebauten Meßsysteme.

Nach Fertigstellung der Brücke wurden die Versuche im Jahre 1987 (Phase 3) unter realer Verkehrsbelastung aus einem Schotterzug wiederholt (Bild 25 und 26). Dabei konnte festgestellt werden, daß eine Steifigkeitserhöhung des Untergrundes unter der in Bild 23 dar-

Bild 25: Belastungszug Versuchsphase 3 (1987) auf der Sinntalbrücke



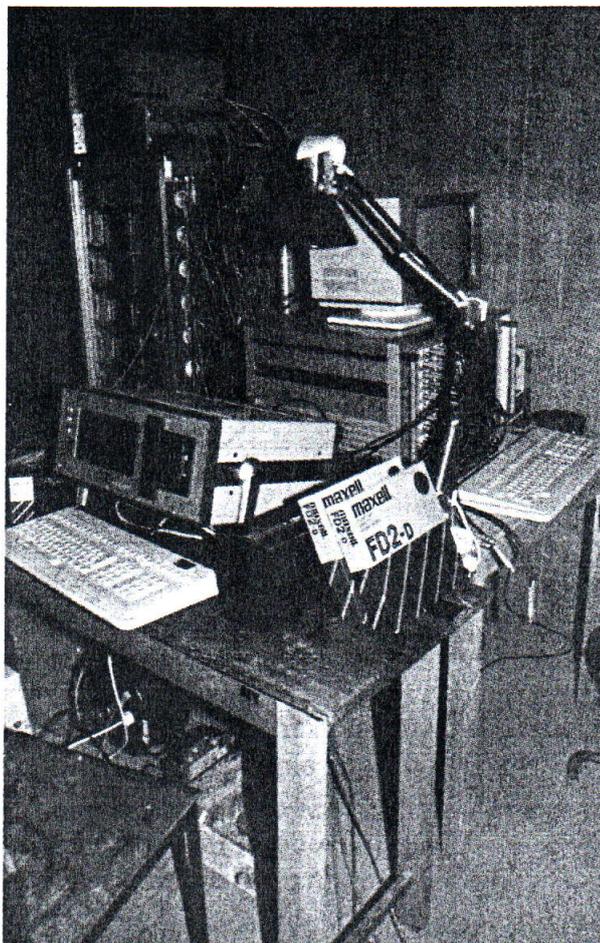


Bild 26: Meßwert-
erfassung an der Sinnthal-
brücke

gestellten Bremslastcharakteristik in einer Größenordnung von etwa einem Faktor 2 bis 4 zulässig ist. Als weiteres wichtiges Ergebnis bleibt festzuhalten, daß bei Beurteilung der Gründungssteifigkeit von flach gegründeten Brückenfundamenten auch die Biegelinie des Fundamentes berücksichtigt werden muß.

Zur Abschätzung der Gründungssteifigkeit von auf Pfählen gegründeten NBS-Brücken wurden bereichsweise Versuchspfähle ebenfalls mit der in Bild 23 angegebenen Bremslastcharakteristik axial belastet. Bild 27 zeigt als Beispiel die Belastungseinrichtung für Versuche an Ortbetonrammpfählen der Schwarzbachtalbrücke. Auch hierbei wurden Faktoren zwischen Bremsbelastung und statischer Belastung von 2,0 bis 4,0 festgestellt, je nachdem, ob bei der statischen Belastung die Erst- oder die Wiederbelastung zugrunde gelegt wurde.

Für einige in mächtigen Beckensedimenten zu gründende Talbrücken war zunächst das Rüttelstopfverfahren (Schottersäulen) vorgesehen, wobei die Abtragung der dynamischen Verkehrsbelastung problematisch erschien. Durch entsprechende Versuche konnte dann nachgewiesen werden, daß Ortbetonrammpfähle mit Kiesvorverdichtung insgesamt für die genannten Untergrundverhältnisse geeigneter waren und demzufolge dann bei zahlreichen Brücken dieser Art zur Anwendung kamen.

Derzeit werden weitere Untersuchungen für Empfehlungen zur abgesicherten Ermittlung der Gründungssteifigkeit abgeleitet [34]. Diese Ergebnisse können sowohl zur Berechnung von Brückengründungen der Hochgeschwindigkeitsstrecken als auch zur Abschätzung von Belastungsreserven bei vorhandenen Bauwerken für mögliche spätere Laststeigerungen (Achslasten, Geschwindigkeiten) verwendet werden.

3.6 Messungen im Grundbau

Abschließend soll noch kurz das Problem von baubegleitenden Messungen im Grundbau angesprochen werden. Messungen als Beobachtungsmethode der Standsicherheitsermitt-

lung haben sich für besondere Fälle bewährt, in denen Unsicherheiten bezüglich wirklichkeitsnaher Dimensionierungsansätze vorlagen, da die Berechnungsverfahren im Grundbau häufig nur Größenordnungen der zu erwartenden Beanspruchungen liefern. Die Beobachtungsmethode findet zunehmend auch Eingang in das Regelwerk (z. B. DIN 1054, Eurocode usw.). Aus den Erfahrungen von zahlreichen Messungen bei Grundbauaufgaben auf den Neubaustrrecken kann gefolgert werden, daß die reine baubegleitende Überprüfung meßtechnisch möglichst einfach konzipiert sein sollte. Aufwendigere Messungen, die mit erheblichen Kosten für die einzubauenden Meßelemente und die Durchführung der Messung verbunden sein können, sind nur dann zu rechtfertigen, wenn die Meßergebnisse auch unter allgemeinen Randbedingungen bezüglich einer möglichst weitgehenden Übertragbarkeit auf andere Bauwerke bzw. zur Ableitung von allgemeinen Erkenntnissen ausgewertet und interpretiert werden. Der dafür notwendige zusätzliche Aufwand kann durchaus in der Größenordnung der Kosten für die Messungen selbst liegen. Dies sollte beim Aufstellen von Meßprogrammen berücksichtigt werden.

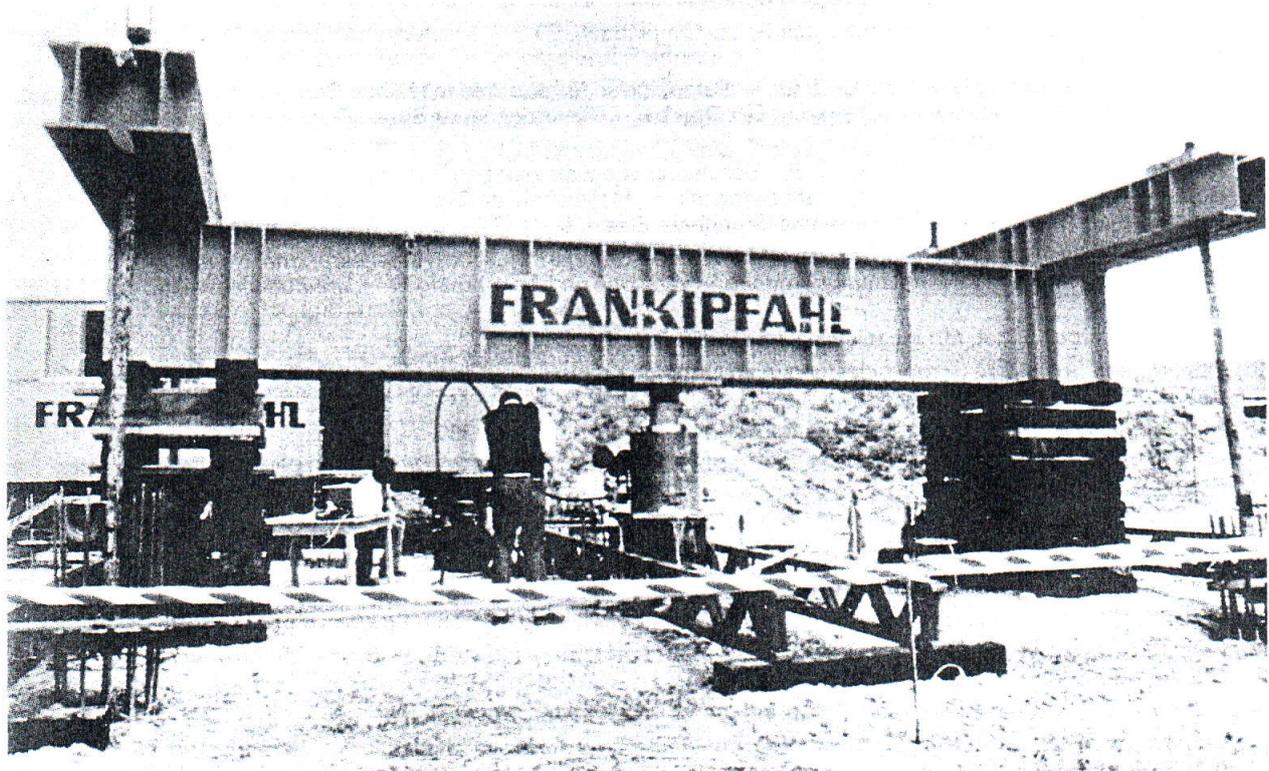


Bild 27: Probelastung an Ortbetonrammpfählen der Schwarzbachtalbrücke unter vorgegebener Bremsbelastung nach Bild 23

4 Zusammenfassung

Aus den Erfahrungen bei der Bearbeitung von Erd- und Grundbauproblemen auf den Neubaustrrecken, aber auch auf bestehenden Strecken, kann abgeleitet werden, daß die vorhandenen erd- und grundbautechnischen Vorschriften, Normen und Empfehlungen für eine wirtschaftliche und technisch sichere Planung und Ausführung auch bei Hochgeschwindigkeitsstrecken in der Regel ausreichend sind. Eine eisenbahnspezifische Erdbauvorschrift (DS 836) liegt vor, eine Grundbauvorschrift erscheint aus derzeitiger Sicht nicht notwendig. Besondere Regelungen lassen sich durch das bestehende bautechnische Regelwerk abdecken.

Der Grundbau entzieht sich darüber hinaus wegen der wechselnden untergrundspezifischen Randbedingungen der einzelnen Baumaßnahmen immer wieder Regellösungen. Er ist somit in einem besonderen Maße erfahrungsabhängig. Um Erfahrungen optimal weitergeben zu können, ist eine sinnvolle Zusammenarbeit der beteiligten Stellen über das unmittelbare Projekt hinaus unumgänglich.

Schrifttum

- [1] Grübmeier, J.: Bundesverkehrswegeplan in den 70er Jahren. In: Wege in die Zukunft — Neu- und Ausbaustrecken der DB, Hestra-Verlag, Darmstadt (1987), S. 38...43.
- [2] Martinek, K.: Erdbauwerke. In: Wege in die Zukunft — Neu- und Ausbaustrecken der DB, Hestra-Verlag, Darmstadt (1987), S. 72...76.
- [3] Deutsche Bundesbahn, DS 804: Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI), Ausgabe Jan. 1983.
- [4] Martinek, K., und Igl, G.: Vorschriften für Erdbauwerke (VE) — Neuherausgabe der DS 836; Eisenbahningenieur 33 (1982), H. 9, S. 389...395.
- [5] Der Bundesminister für Verkehr: Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau, Ausgabe 1976 und Ergänzung 1978 (ZTVE-StB 76/78).
- [6] Deutsche Bundesbahn, DS 836: Vorschrift für Erdbauwerke (VE), Ausgabe Januar 1985.
- [7] Deutsche Bundesbahn, DS 839/1: Sammlung von bauaufsichtlichen Bekanntgaben für den konstruktiven Ingenieurbau (SKBI 1), Ausgabe 1986.
- [8] Spang, J.: Erfahrungen und Neuerungen beim Schutz des Erdplanums unter Eisenbahngleisen bei der Deutschen Bundesbahn. ETR — Eisenbahntechnische Rundschau 26 (1977), H. 4, S. 207...215.
- [9] Martinek, K.: Bodendruckmessungen bei den Schnellfahrversuchen zwischen Gütersloh und Neubeckum. Zeitschrift für Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik, Berlin (1976), H. 12, S. 367...372.
- [10] Braune, W.: Erschütterungsmerkmale aus Spitzenamplituden. ETR — Eisenbahntechnische Rundschau 40 (1991), H. 8, S. 572...533.
- [11] Hilliges, D.: Feste-Fahrbahn-Konstruktionen — Perspektiven für Strecken mit hohen Geschwindigkeiten oder hohen Achslasten. In: Publikation zur Fachtagung „Der Oberbau — Basis der neuen Bahn“, Frankfurt (M), März 1988, Hestra-Verlag, Darmstadt, S. 25...30.
- [12] Gruber, N., Obermayer, J., und Floss, R.: Beschleunigungsmessungen an Vibrationswalzen zum Nachweis der Bodenverdichtung. In: Vortragsband zum Symposium „Meßtechnik im Erd- und Grundbau“, München, Nov. 1983, Hrsgb. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen, S. 71...77.
- [13] Samaras, A., und Spata, G.: Neubaustrecke Mannheim—Stuttgart: Qualitätsverbesserung im Erdbau mit der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle — Versuche und Anwendungen —. Die Bundesbahn 53 (1977), H. 5, S. 465...471.
- [14] Prommersberger, G., et. al.: Ingenieurbauwerke (IBW) Nr. 2 (7/86).
- [15] Otto, U., und Seitz, J. M.: Probelastungen an Ortbetonrammpfählen. Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau (1985), H. 9, 498...510.
- [16] Sokolovski, V. V.: Static of soil media. Butterworths Sci. Publ. London, 1960.
- [17] Kempfert, H.-G., und Martinek, K.: Aktiver Erddruck aus vertikalen und horizontalen Streifenlasten. Bautechnik 65 (1988), H. 8, S. 282...287.
- [18] Ohde, J.: Grundbaumechanik, Hütte III, Bautechnik, 28. Auflage 1956.
- [19] Weißenbach, A.: Abschnitt „Baugruben“. In: Tunnelbautaschenbuch 1990. Verlag Glückauf Essen.
- [20] EAB: Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“. 2. Auflage 1988, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.
- [21] Vornorm DIN 4014 Teil 2, Großbohrpfähle; Herstellung, Bemessung und zulässige Belastung. Ausgabe Sept. 1977.
- [22] Kempfert, H.-G.: Vergleichende Auswertung von Probelastungen der DB an Großbohrpfählen in nichtbindigem Untergrund. Geotechnik (1982), H. 1, S. 23...32.
- [23] DIN 4014: Bohrpfähle; Herstellung, Bemessung und Tragverhalten, Ausgabe März 1990.
- [24] Sommer, H., Wittmann, P., und Ripper, P.: Die Tragfähigkeit von Großbohrpfählen in der Detfurther Wechselfolge des nordhessischen Buntsandsteins. 6. Nat. Felsmechanik Symposium, 1984 Aachen.
- [25] Dürrwang, R.: Brückengründungen mit Großbohrpfählen in verwittertem Fels. Felsbau (1984). H. 2, S. 195...199.
- [26] Koreck, H.-W.: Tragfähigkeit von Bohrpfählen in Fels. In: Beiträge zur Felsmechanik. Lehrst. u. Prüfamf. f. Grundbau, Bodenmechanik u. Felsmechanik d. TU München, Schriftenreihe Heft 10 (1987), S. 101...119.
- [27] Romberg, W.: Besondere Maßnahmen für die Gründung der Talbrücken der Bundesbahn-Neubaustrecke im Buntsandstein Ostthessens. Vorträge der Baugrundtagung 1986, S. 407...418.
- [28] Timm, U., und Mayer, G.: Gründung eines Brückenpfeilers der Schwarzbachtalbrücke im Bereich eines Subrosionsschlotes. Vorträge der Baugrundtagung 1986, S. 419...451.
- [29] Kempfert, H.-G.: Zur Berechnung der Gründung von Lärmschutzwänden auf Pfählen. Tiefbau-Ingenieurbau-Straßenbau (1985), H. 2, S. 82...88.
- [30] Deutsche Bundesbahn, Voraussage DS 800/1/III: Richtlinien für bauliche Lärmschutzanlagen an Eisenbahnstrecken, Ausgabe 1984.
- [31] Kempfert, H.-G.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von im Baugrund eingespannten, nahezu starren Gründungskörpern bei ebener oder geneigter Geländeoberfläche. Schriftenreihe FG Baugrund-Grundbau, Universität Dortmund, 1 (1987).
- [32] Kempfert, H.-G.: Dimensionierung kurzer, horizontal belasteter Pfähle. Bauingenieur 64 (1989), H. 5, S. 201...207.
- [33] Kempfert, H.-G., und Schwarz, P.: In situ-Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach. Lehrst. u. Prüfamf. f. Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik d. TU München, Schriftenreihe Heft 3 (1984).
- [34] Kempfert, H.-G., und Stadel, M.: Ein Beitrag zur Ermittlung der Steifigkeit von Brückengründungen. (In Vorbereitung).