

Bodenmechanische und erdbautechnische Randbedingungen bei Feste Fahrbahn-Konstruktionen im Eisenbahnbau

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert, Ingenieurgesellschaft Kempfert + Partner, Konstanz
Dipl.-Ing. W. Vogel, Bundesbahn-Zentralamt München

Kurzfassung

Als Grundlage für einen möglichen Einsatz von Festen Fahrbahn-Konstruktionen auf Neubau-strecken der Deutschen Bundesbahn (DB) wurden für die Erdbauwerke umfangreiche boden-mechanische und bodendynamische Untersuchungen durchgeführt. In diesem Beitrag werden die Untersuchungen beschrieben und bewertet. Außerdem werden die erdbautechnischen Anforder-ungen für den Unterbau und für Dammschüttungen dargestellt.

Summary

The Federal German Railway (DB) plans to use ballastless track constructions with concrete slabs or asphalt layers on new railway lines. Comprehensive soil mechanical and soil dynamical in-vestigations were performed with regard to the use of these constructions on earth works. This paper describes and assesses the investigations. Furthermore, quality requirements for substruc-ture and embankments are shown.

1. Einleitung

Die Deutsche Bundesbahn (DB) erwägt den Einsatz von Festen Fahrbahnen als Oberbaukonstruk-tion mit Beton- oder Asphalttragschichten. Damit sollen folgende Vorteile erreicht werden:

- hohe Lagegenauigkeit bei hohen Geschwindigkeiten
- hohe Belastbarkeit und lange Nutzungsdauer
- geringstmöglicher Instandhaltungsaufwand und hohe Verfügbarkeit.

Bei Festen Fahrbahnen auf Erdbauwerken (auf Dämmen, in Einschnitten, ggf. auch über Durchläs-sen sowie auf Hinterfüllbereichen von Kunstbauwerken wie Brückenwiderlager und Tunnelpor-tale) kommt hierbei dem eigentlichen Erdbauwerk mit Unterbau und Gründung sowie Entwässe-rungseinrichtungen neben den Komponenten des Oberbaus (Gleisträger, Schienenbefestigung, Tragplatten bzw. Asphalttragschichten) entscheidende Bedeutung zu.

Im Fachgebiet Erd- und Grundbau wurden vom BZA München der DB seit 1985 zu dieser Frage-stellung teilweise vom BMFT geförderte F + E-Aktivitäten durchgeführt. An den umfangreichen Untersuchungen waren zahlreiche Institute und Ingenieurbüros beteiligt (TU München, FMFA Stuttgart, TU Karlsruhe, BAM Berlin, Ast, Obermeyer P + B, Alber, Kempfert).

In dem Beitrag wird der Kenntnisstand hinsichtlich der einzuhaltenden bodenmechanischen und erdbautechnischen Randbedingungen bei Feste Fahrbahn-Konstruktionen im Hochgeschwindig-keits-Eisenbahnbau mitgeteilt und zur Diskussion gestellt. Die durchgeführten Versuche und Untersuchungen können aus Platzgründen nur auszugsweise angesprochen werden. Detailliertere Darstellungen sind an anderer Stelle vorgesehen. Mit den zusammengestellten Unterbau- /Unter-grundanforderungen liegen einheitliche Vorgaben vor, auf deren Grundlage zu weiteren innovati-ven Entwicklungsprozessen angeregt wird.

2. Oberbautechnische Anforderungen und Vorgaben

2.1 Anforderungen zur Gebrauchsfähigkeit und zur Gleislage

Beim derzeitigen Entwicklungsstand im Schienenverkehr wird für die Planung von Neubaustrrecken mit Festen Fahrbahnen von Geschwindigkeiten bis 300 km/h, ggf. auch darüber, von Lasten entsprechend dem gültigen UIC-71-Lastbild, von Leistungstonnen bis 80 000 LT/d und von einer Nutzungsdauer von mindestens 60 Jahren ausgegangen.

Sowohl bei Schotteroberbau als auch bei Festen Fahrbahnen stellt der Hochgeschwindigkeitsverkehr hohe Anforderungen an die Lagegenauigkeit des Gleises und damit an die Formbeständigkeit der Erdbauwerke.

Beim Schotteroberbau lassen sich Abweichungen der Gleislage vom Sollwert durch Nachstopfen des Schotterbettes in einfacher Weise wiederholt bis zu großen Gesamtbeträgen ausgleichen. Dadurch sind Risiken, die sich aus einem unplanmäßigen Verformungsverhalten von Erdbauwerken ergeben, für die Fahrbahn gering. Jedoch müssen diese Risiken auch beim Schotteroberbau soweit wie möglich eingeschränkt werden. Außerdem sollen die Regelabstände für Instandhaltungsmaßnahmen aus betrieblichen Gründen möglichst mehrere Jahre (5 bis 6 Jahre) nicht unterschreiten.

Die Gebrauchsfähigkeit der Fahrbahn wird dadurch bestimmt, daß beim Befahren nur in begrenztem Umfang dynamische Beanspruchungen in den Fahrzeugen infolge von Gleislagefehlern auftreten. Diese Gleislagefehler sind lokale oder langgestreckte Lageabweichungen des Gleisrostes in horizontaler und vertikaler Richtung von einer idealen geraden oder bogenförmigen Sollage des Gleises, die durch Trassierungsparameter festgelegt ist, sowie lokale Lageabweichungen der Schienen untereinander (Verwindungen).

Nach dem jetzigen Kenntnisstand sind auch für Feste Fahrbahnen nur Abschätzungen über die zulässigen lokalen Gleislageabweichungen möglich. Es ist anzunehmen, daß zwischen den zulässigen Abweichungen in Form und Größe, in Häufigkeit und Verteilung Beziehungen bestehen, die auch von den jeweiligen Trassierungsparametern beeinflusst werden, im wesentlichen aber geschwindigkeitsabhängig sind. Auf der sicheren Seite liegend ist die Annahme einer Abweichung auf der Basis der DS 800 02 [1] mit einem Ausrundungsradius $r_a = 0,4 v_e^2$ (v_e in km/h, r_a in m) bei einer Beschleunigung von $0,2 \text{ m/s}^2$. Ein daraus abgeleitetes Diagramm zeigt Bild 1.

Aus dem Diagramm sind die mit der Geschwindigkeit stark abnehmenden zulässigen Abweichungen zu erkennen. Auf eine Länge von 20 m ergibt sich bei 300 km/h eine zulässige Abweichung von 3 mm, auf 40 m von 11 mm. Auf der Basis von Bild 1 wurde der für die Konstruktion des Unterbaus auftretende Setzungseinfluß beurteilt, siehe Abschn. 4.4. Auf größere Längen bezogen müssen Lageabweichungen innerhalb der durch die Trassierungselemente vorgegebenen Grenzen eingehalten werden.

Von wesentlichem Einfluß auf die Ausbildung der Erdbauwerke ist dabei die Nachregulierbarkeit der Gleislage. Bei Festen Fahrbahnen ist diese im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen nur in der Schienenbefestigung möglich. Vom Oberbau wurden für die Regulierungsmöglichkeit folgende Maße genannt:

- Anhebung bis 25 mm
- Absenkung bis 4 mm.

Zusätzliche Ausgleichsmöglichkeiten durch Lösen und Anheben des Gleisrostes werden nicht als Regellösung für die Beurteilung der Erdbauwerke herangezogen.

Neben der Gebrauchsfähigkeit muß auch die Tragfähigkeit der Oberbaukonstruktion beachtet werden. Zur Vermeidung von Überbeanspruchungen in der Tragplatte dürfen bestimmte Krümmungsradien nicht überschritten werden. Es wird ein Wert von $r_a \geq 1000 \text{ m}$ (d. h. z. B. 1 cm auf 5 m Länge) genannt.

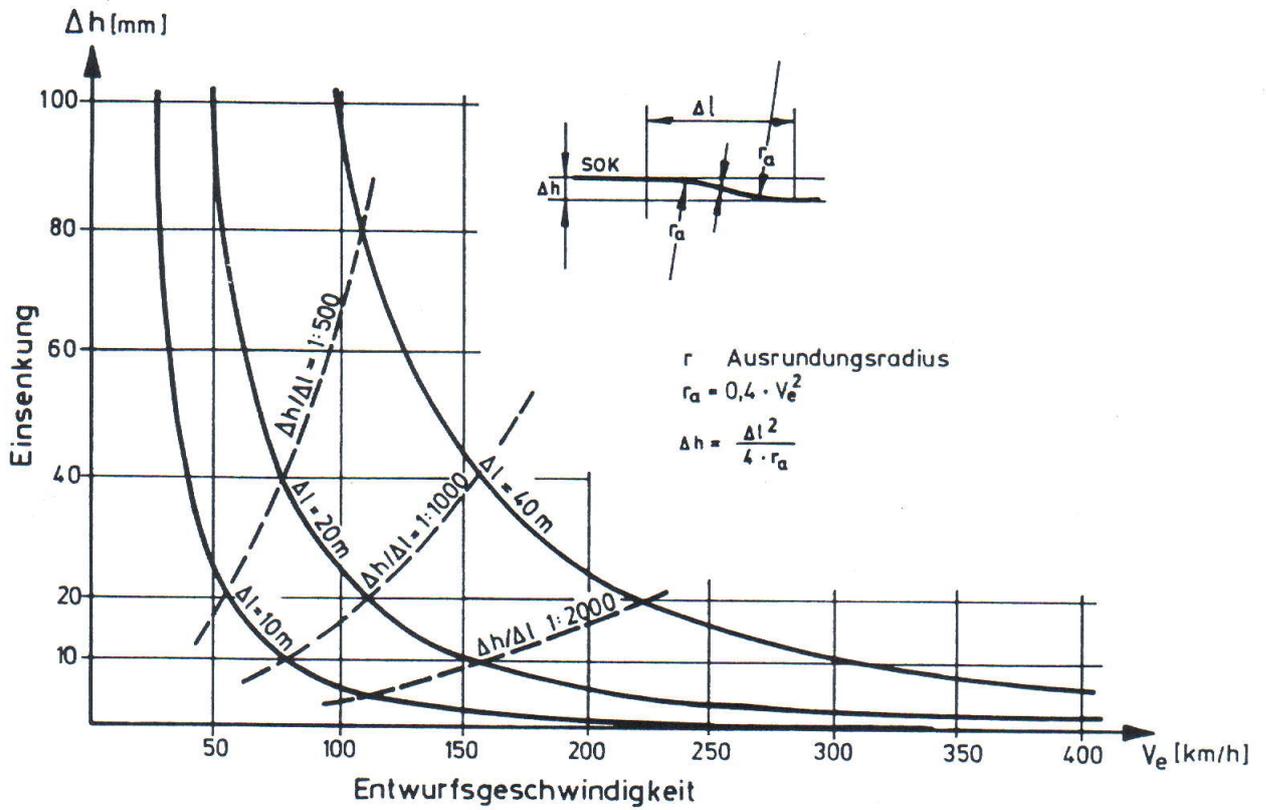


Bild 1: Einfluß der Geschwindigkeit auf vertikale Lageabweichungen (Basis DS 800 02) [1]

Bauart Rheda II (mod.) Bauart SBV

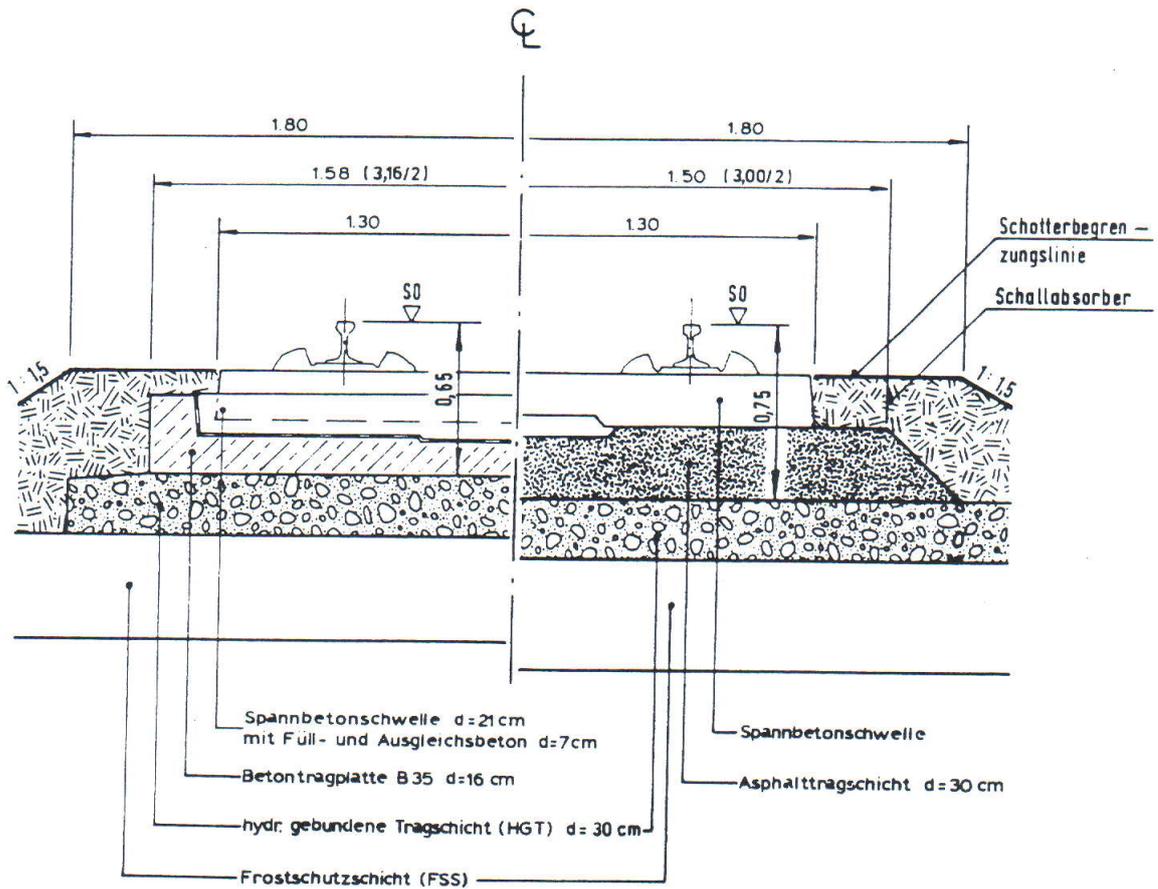


Bild 2: Modifizierter Rheda-Oberbau und Bauart SBV

2.2 Oberbauvorgaben zur Bauart

Vom Oberbau wurden nach dem derzeitigen Stand zwei Konstruktionsarten der Festen Fahrbahn vorgegeben, für die die erdbautechnischen Bedingungen zur Herstellung der Fahrbahn auszuarbeiten waren (Bild 2):

- a) Einbetonierter Stahlbetonschwellenrost auf Betontragplatte (System Rheda II modifiziert)
- b) Stahlbetonschwellenrost mit bituminösem Verguß auf Asphalttragschicht (SBV).

Die Abmessungen dieser Oberbauformen waren vorgegeben und sind den Entwicklungen der Regelquerschnitte (Abschn. 5.2) zugrunde gelegt worden. Bei den ausgeführten Versuchsstrecken (Abschn. 3) waren weitere konstruktive Varianten zum Oberbau untersucht worden.

Die beiden Oberbauformen nach Bild 2 führen hinsichtlich der erdbautechnischen Anforderungen an den Unterbau nach den jetzigen Stand der Kenntnisse zu keinen Unterschieden. Der höheren Steifigkeit der Betonplatte mit dadurch geringeren, gleichmäßigeren Spannungen bei Eisenbahnüberfahrt steht die höhere Elastizität der Asphalttragplatte mit geringeren dynamischen Belastungen des Untergrundes gegenüber. Denkbare Optimierungen der Steifigkeitsanforderungen des Unterbaus bei unterschiedlichen Oberbauformen können derzeit jedoch weder theoretisch noch versuchstechnisch ausreichend begründet werden. Unterschiede ergeben sich aufgrund der größeren Breite der Asphalttragschicht gegenüber der Betontragplatte in der Ausführung der Mittenentwässerung (Abschn. 5.2).

3. Erfahrungen aus Versuchsstrecken

3.1 Ältere Versuchsstrecken

In [2] wurde über ältere Versuchsergebnisse aus der Literatur bzw. der DB berichtet. Dabei konnte für erdbautechnische Fragestellungen nur wenige Ergebnisse verwertet werden. Dies war vor allem damit zu begründen, daß diese Versuchsstrecken mehr oberbautechnischen Fragen galten. Ein für den Erdbau wichtiges Ergebnis wurde in [3] mitgeteilt, siehe Abschn. 3.2.

3.2 Versuchsstrecken ab 1988

Ab 1988 wurden an Versuchsabschnitten mit unterschiedlichen Oberbauformen systematische Messungen zur Erfassung der Unterbau-/Untergrundbeanspruchung durchgeführt. Gemessen wurden im wesentlichen Spannungen und Schwinggeschwindigkeiten.

Die Untersuchungen erfolgten bei den Konstruktionsformen Schotteroberbau, modifizierter Rheda-Oberbau, SBV-Oberbau, Fertigteiltrahmenoberbau (FTR) sowie im Übergangabschnitt Feste Fahrbahn zum Schotter. Die Messungen auf den zwei Versuchsstrecken (Kutzenhausen und Hösbach) wurden an jeweils zwei Tagen pro Jahr durchgeführt [4], [5].

In Bild 3 ist als Beispiel ein Meßergebnis der Druckspannungen bei einer Zugüberfahrt aus [5] wiedergegeben. Dabei wird neben den allgemeinen Angaben wie die Nummer des Querschnittes, Fahrgeschwindigkeit und Loktyp auch die jeweils auftretende maximale Druckspannung aufgeführt.

Für die unterschiedlichen Meßtermine über den Beobachtungszeitraum waren erhebliche Streuungen in den Ergebnissen der Spannungsmessungen im Unterbau/Untergrund vorhanden. In Bild 4 sind die gewichteten und über alle Messungen gemittelten Maximalwerte der Spannungskomponenten für die Überfahrt einer Achse der Lok 103 abhängig von der Oberbauform (MQ) und der Tiefenlage im Unterbau/Untergrund dargestellt.

Die in Bild 4 zusammenfassend dargestellten Meßergebnisse der Versuchsstrecken mit Festen Fahrbahnen wurden den Ergebnissen von älteren Spannungsmessungen (Gütersloh/Neubeckum) nach [3] in Bild 5 gegenübergestellt, wobei eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von etwa 160 km/h zugrunde gelegt ist.

Man 0
 Dose 1
 0
 0 kN/qm

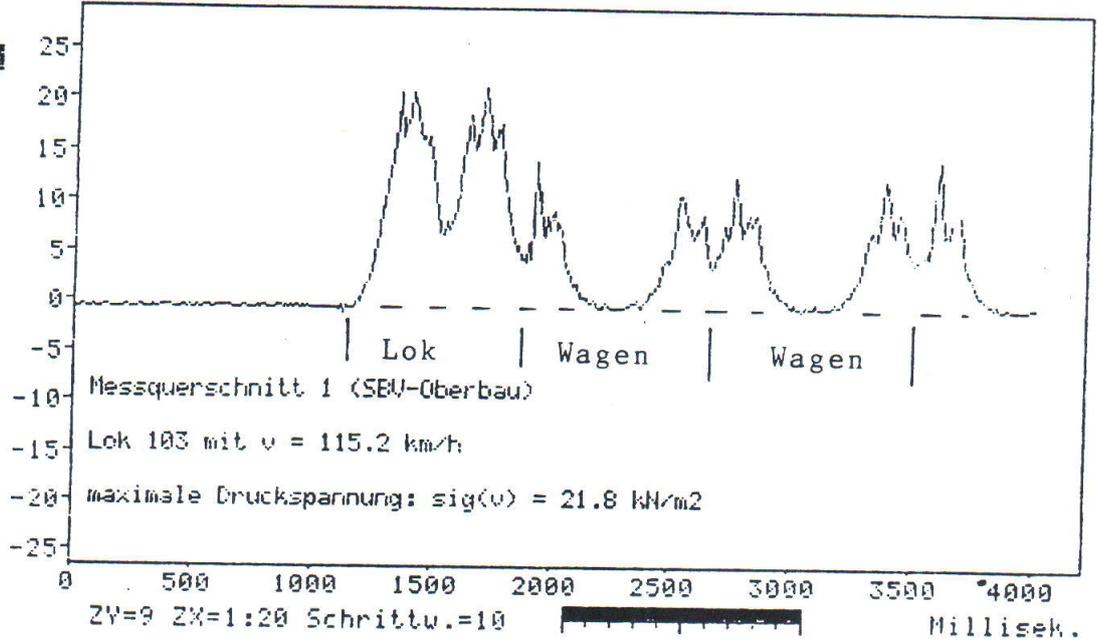


Bild 3: Zeitsignaldarstellung bei Überfahrt von Loktyp 103 (Hösbach, MQ 1) aus [5]

a) VA Kutzenhausen

b) VA Hösbach

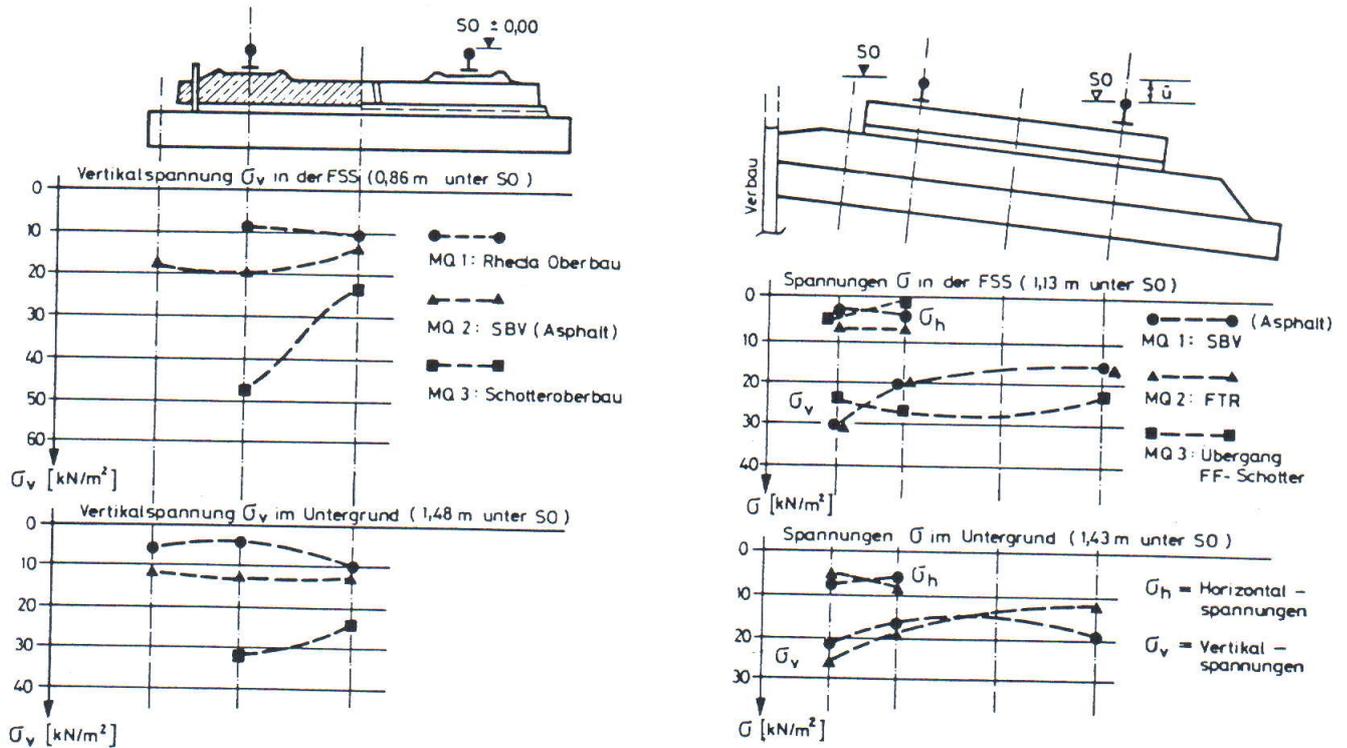


Bild 4: Gemessene Spannungskomponenten (gemittelte Maximalwerte) abhängig von der Oberbauform nach [4], [5]

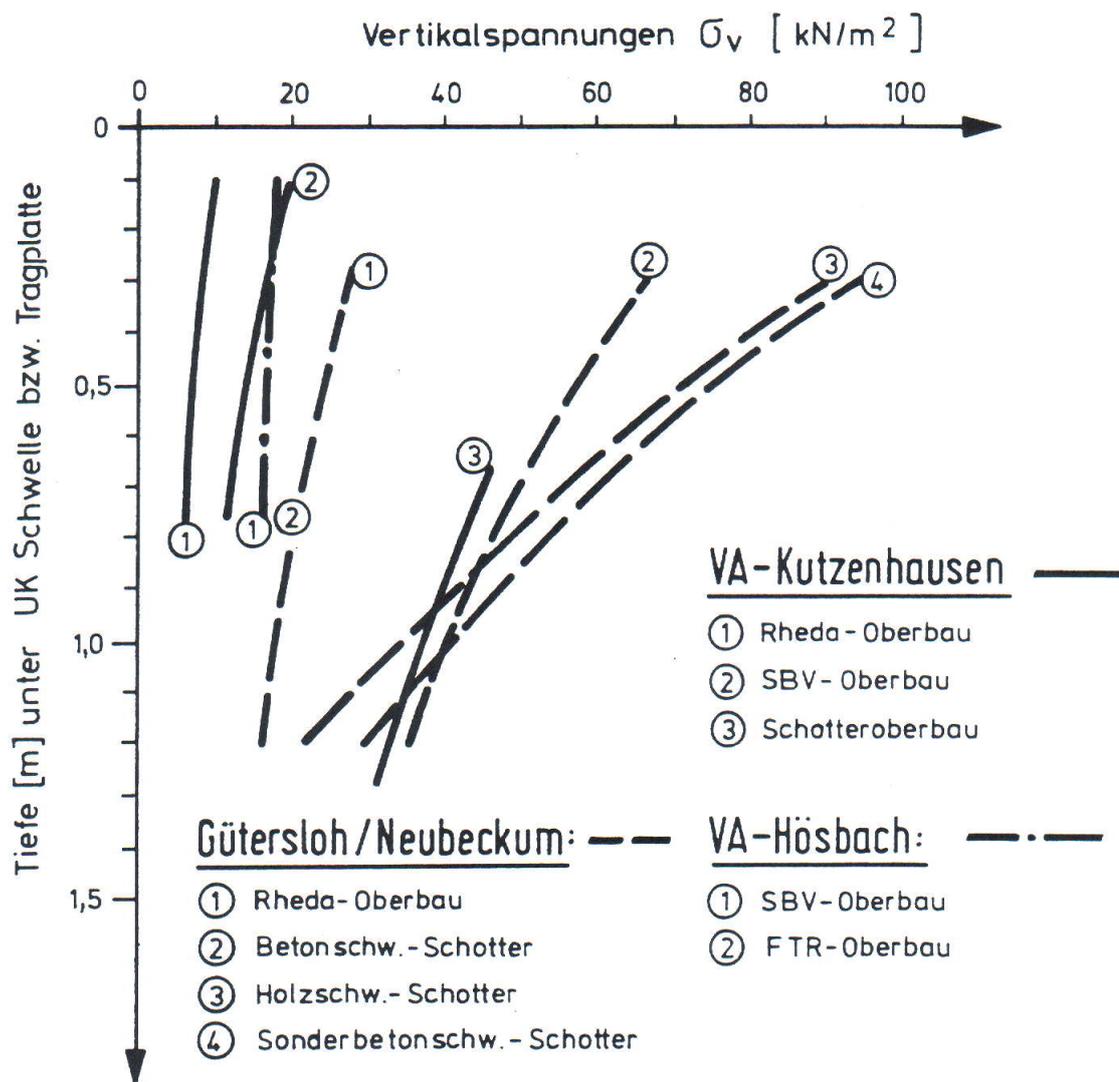


Bild 5: Vergleichende Darstellung von Spannungsmessungen im Unterbau/Untergrund für verschiedene Oberbauformen aus den Jahren 1973-77 und 1988-90 bei Fahrgeschwindigkeiten von i. M. 160 km/h

Erfahrungsgemäß ergeben sich hinsichtlich der Absolutwerte gemessener Spannungen im Unterbau Unterschiede bei verschiedenen Einbauorten und zu verschiedenen Meßzeiten. Dies ist mit den unterschiedlichen Lagerungsbedingungen der Druckmeßdosen zu erklären. Dennoch zeigen die Darstellungen in Bild 5 der Messungen von Gütersloh-Neubeckum mit den neueren Messungen in Kutzenhausen bzw. Hösbach tendenziell eine gute Übereinstimmung. Die Einflüsse der Oberbauform sind deutlich erkennbar. Die niedrigsten Spannungen werden unter den Betonplatten des Rheda-Oberbaus gemessen. Die Spannungen unter einer Asphalttragschicht (ohne HGT) sind bereits deutlich höher, liegen allerdings noch mit weitem Abstand unter den Spannungen des Schotteroberbaus in vergleichbarer Tiefe.

Die in [4] und [5] enthaltenen Meßergebnisse der Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer zeigen deutliche Unterschiede zwischen den Festen Fahrbahnformen und dem Schotteroberbau. In Kutzenhausen wurden unter den Festen Fahrbahnen maximale Schwinggeschwindigkeiten bis ca. 10 mm/s in der Frostschuttschicht und im Untergrund registriert, dagegen beim Schotteroberbau Werte von ca. 30 mm/s in der Frostschuttschicht und noch 20 mm/s im Untergrund. Auf dem Versuchsabschnitt Hösbach ergaben sich unter den Festen Fahrbahnen maximale Schwinggeschwindigkeiten bis ca. 5 mm/s in der Frostschuttschicht und im Untergrund sowie beim Schotteroberbau Werte von ca. 10 mm/s in der Frostschuttschicht.

Hinsichtlich der dynamischen Einwirkungen wurden in [4] und [5] die Messungen nach Frequenzspektren ausgewertet. Danach wurden in Kutzenhausen unter dem Rheda-Oberbau wesentliche Frequenzanteile im Bereich zwischen 40 und 90 Hz, beim SBV-Oberbau zwischen 40 und 60 Hz und beim Schotteroberbau unter 20 Hz gemessen. In Hösbach ergaben sich unter dem SBV-Oberbau die wesentlichen Frequenzanteile zwischen 40 bis 60 Hz sowie um 90 Hz, während beim FTR-Oberbau und Übergang zum Schotteroberbau die dominierenden Anteile zwischen 30 bis 60 Hz lagen.

Zusammengefaßt liegen die dynamischen Beanspruchungen des Unterbaus und Untergrunds beim Schotteroberbau deutlich mehr im niederfrequenten Bereich und bei den steiferen Oberbauformen (Feste Fahrbahn) im höherfrequenten Bereich.

Beeinträchtigungen der Gleislage nach Einbau der Festen Fahrbahnen wurden bisher nicht festgestellt, trotz relativ ungünstiger Untergrundverhältnisse. Lediglich in den Übergangsbereichen traten Gleislageveränderungen auf, die eine Nachregulierung des Gleisrostes und ein Nachstopfen des Schotters erforderten.

4. Erdbautechnische, bodenmechanische und dynamische Untersuchungen

4.1 Allgemeines

Als Grundlage für die Abschn. 5 dargestellten Ergebnisse, Empfehlungen und Schlußfolgerungen für die Erdbauwerke von Festen Fahrbahnen wurden zahlreiche erdbautechnische, bodenmechanische und dynamische Untersuchungen ausgeführt, deren wesentliche Ergebnisse nachfolgend zusammengefaßt sind.

4.2 Dynamische Lasteinwirkungen bei Festen Fahrbahnen

Nach [6] ergeben sich hinsichtlich der zusätzlich zu berücksichtigenden dynamischen Achslasten folgende Ergebnisse:

- Bis zu einer maximalen Fahrgeschwindigkeit von 250 km/h ist für die Berücksichtigung der dynamische Lastwirkung zusätzlich näherungsweise 1/3 der statischen Last anzusetzen. Dies gilt gleichermaßen für Schotteroberbau und Feste Fahrbahn.
- Die dynamische Last wächst nicht unbegrenzt an. Sowohl für Schotteroberbau wie für die Feste Fahrbahn bleibt die dynamische Last nach Überschreiten einer gewissen Grenzggeschwindigkeit konstant. Bei Schotteroberbau ist die Grenzggeschwindigkeit von den Unterbau/Untergrundsteifigkeit abhängig und beginnt ab Fahrgeschwindigkeiten von ca. $v = 220$ km/h. Bei der Festen Fahrbahn nehmen die Kräfte unabhängig von der Unterbau/Untergrundsteifigkeit (aber abhängig von der Oberbausteifigkeit) bis etwa $v = 320$ km/h zu. Danach bleiben die Kräfte in etwa konstant.

4.3 Verhalten von Unterbau/Untergrund infolge zyklischer Einwirkungen

Aus den durchgeführten Literaturlauswertungen [6] ergab sich, daß die Setzungen aus zyklischer Belastung (z.B. Eisenbahnverkehrslasten) durch den bekannten empirischen Ansatz

$$s_N = s_1 (1 + C_N \cdot \ln N)$$

zu beschreiben sind. Dieser Ansatz gilt für alle Oberbauformen. Hierin ist s_1 die Setzung nach der 1. Überfahrt. Für deren Ermittlung sind die statischen Achslasten, die dynamischen Achslasten, die Biegesteifigkeit des Gleisoberbaus sowie die Steifigkeit des Untergrunds von Bedeutung.

Aus der Auswertung von Modellversuchen und Messungen an Versuchsstrecken konnte die Gültigkeit des o.g. Gesetz zur Abschätzung der Oberbausetzungen unter wiederholter (zyklischer) Verkehrsbelastung bestätigt werden. Für die Konstante C_N (Setzungsrate Zyklisch) wurden aus den Versuchsauswertungen folgende Werte ermittelt:

$$\text{Einzelschwelle } C_N = 0,25 \text{ bis } 0,55$$

$$\text{Schottergleis } C_N = 0,43$$

$$\text{Feste Fahrbahn } C_N = 0,32.$$

Die C_N -Werte können nach [7] auch zusätzlich abhängig sein von der zyklischen Lastgröße. In der Setzungsgleichung ist N die Anzahl der Lastübergänge, die in [8] den Achsübergängen gleichgesetzt wurde. Liegt die Belastung in Leistungstonnen (LT) vor, dann kann N aus

$$N = LT / \text{mittlere Achslast}$$

errechnet werden.

Für die zyklische Lastgröße (Achslast) P wurde in [8] empfohlen, die Summe aus statischer und dynamischer Achslast (siehe Abschn. 4.2) anzusetzen. Andere Überlegungen gehen dahin, insbesondere bei Festen Fahrbahnen (steifer Oberbau) die Zugüberfahrt als ein zyklisches Belastungsereignis zu werten.

Die theoretische Ermittlung der Setzung s_1 infolge der ersten Überfahrt konnte noch nicht abschließend geklärt werden. Es existieren Vorschläge, hierfür eine konventionelle Setzungsrechnung in Anlehnung an DIN 4019 wie für statische Lasten durchzuführen (statische Ersatzlast = statische Last + dynamische Last). Dies kann für einen nichtbindigen Untergrund näherungsweise zutreffen. Für einen bindigen Untergrund sind aber auch Konsolidationsfragen zu berücksichtigen.

4.4 Rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten Fester Fahrbahnen

4.4.1 Überprüfung bisheriger Vorstellungen zur Berechnung Fester Fahrbahnen

Für die bisher ausgeführten Versuchsstrecken mit Festen Fahrbahnen wurde für die Berechnung der Oberbaukonstruktion das Verfahren Eisenmann [9], [10] angewendet.

Aus den durchgeführten Vergleichsberechnungen am modifizierten Rheda-Oberbau mit dem Verfahren Eisenmann, dem Bettungsmodul-, dem Steifemodulverfahren sowie der FEM ergeben sich durchaus ähnliche Größenordnungen der Beanspruchungen für die Oberbaukonstruktion. Daraus wurde gefolgert, daß angesichts der einfachen und guten Handhabbarkeit des Verfahrens Eisenmann diesem Verfahren für die Anwendung in der Praxis gegenüber Steifemodul- und Bettungsmodul und besonders gegenüber der FEM (zu aufwendig) den Vorzug zu geben ist. Diese Aussagen beziehen sich aber nur auf die Frage der oberbautechnischen Dimensionierung Fester Fahrbahnkonstruktionen. Demgegenüber ist das Verformungsverhalten des gesamten Tragsystems Oberbau-Unterbau-Untergrund nach anderen, vornehmlich bodenmechanischen und erdbautechnischen Gesichtspunkten zu betrachten.

4.4.2 Verformungsverhalten des Gesamtsystems Oberbau-Unterbau-Untergrund

Die besonders auch im Hinblick auf den Unterhaltungsaufwand ausgerichtete Fragestellung zum Verformungsverhalten des Gesamtsystems Oberbau-Unterbau-Untergrund wurde in [11] behandelt. Dabei wurde zunächst aus vergleichenden Berechnungen zwischen der klassischen bodenmechanischen Theorie nach Boussinesq/Fröhlich und der FEM ebene FE-Berechnungssysteme

abgeleitet. Unter der Voraussetzung von Verformungen vergleichbarer Größenordnungen sind für auf ebene FE-Systeme reduzierte Berechnungen näherungsweise folgende Lastminderungsfaktoren anzusetzen:

0,4 für das Längssystem und

0,6 für das Quersystem,

da sonst das Setzungsverhalten unter der Konstruktion zu ungünstig beurteilt wird. Räumliche FE-Berechnungen, für die selbstverständlich die tatsächlich wirkenden Lasten anzusetzen sind, gestalten sich zu aufwendig.

Ausgehend von einer mittleren Grenztiefe ab Unterkante Tragplatte von etwa 5 m, wurden zunächst Vergleichsberechnungen mit unterschiedlichen FE-Systemen und Modellvariationen durchgeführt. Aus der Variation des Stoffgesetzes (linear-elastisch, elasto-plastisch, nichtlinear-elastisch) konnte gefolgert werden, daß das System rechnerisch ausreichend weit von möglichen Plastifizierungen im Unterbau-Untergrund entfernt ist, so daß hier rechnerisch kein Einfluß zwischen den Stoffgesetzen vorhanden ist und ein linear-elastischer Ansatz ausreichend erscheint. Diese Aussage gilt für die bisher üblichen Stoffgesetze in der Bodenmechanik. Ein Fortschritt in der zutreffenden numerischen Modellierung von Festen Fahrbahnen einschließlich Unterbau/Untergrund wäre zu erwarten, wenn ein zutreffendes Stoffgesetz zur Berücksichtigung zyklisch wiederholter Belastungen vorhanden wäre, siehe Abschn. 4.3.

Desweiteren wurden die durchgeführten Modellversuche an der FMPA Stuttgart und TU Karlsruhe durch umfangreiche Vergleichsberechnungen mit verschiedenen Verfahren analysiert. Daraus konnten interessante Detailergebnisse gewonnen werden.

Als Grundlage für rechnerische Parameterstudien mit Festen Fahrbahnen wurden weiterhin aus den bisherigen Erkenntnissen eine grundsätzliche Einordnung der Beanspruchungsformen Fester Fahrbahnkonstruktionen im Hinblick auf das Verformungsverhalten vorgenommen. Danach ist wie bereits aufgeführt, zu unterscheiden zwischen folgenden Setzungsanteilen

s_1	Setzungen aus der 1. Überfahrt
s_{zyk}	Setzungsanteile aus der wiederholten Überfahrt
s_N	Gesamtsetzungen aus N Überfahrten
s_{dyn}	Reversible Setzungen infolge der beweglichen Last in dem betrachteten Lastzyklus,

wobei die einzelnen Komponenten bodenmechanisch unterschiedlich zu behandeln und jeweils die Beanspruchungsformen in Quer- und Längsrichtung zu unterscheiden sind. Bild 6 und 7 zeigt hierzu die schematischen Zusammenhänge in Quer- und Längsrichtung zur Festen Fahrbahn.

4.4.3 Berechnungen mit Variation der Steifigkeit in Längsrichtung und weiterer Einflußparameter (Parameterstudie)

Aus den Berechnungen zur Beurteilung von längenabhängigen Steifigkeitunterschieden, die z.B. geologisch bedingten sein können oder aber aus Schwankungen der erdbautechnischen Einbaubedingungen resultieren, konnten folgende wesentlichen Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die Grenze für die Größe der Bereichslänge L (schlechter Untergrundbereich), die sich unmittelbar auf die Fahrdynamik auswirkt liegt etwa bei 20 m. Für Bereichslängen $L > 20$ m ändert sich die Größe der rechnerischen Setzungsmulden sowie deren Länge nur mehr unwesentlich und hat damit keinen zusätzlichen Einfluß mehr auf die Fahrdynamik.

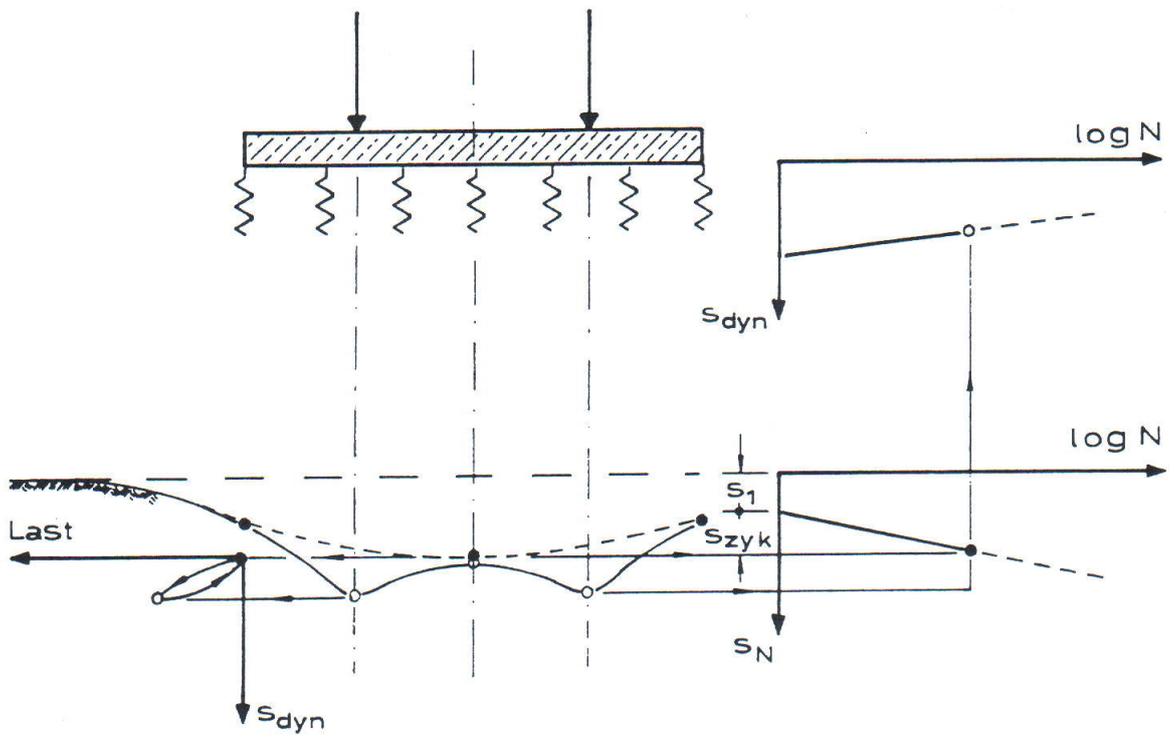


Bild 6: Setzungsanteile infolge Verkehrsbelastung in Querrichtung (überhöht gezeichnet) nach [11]

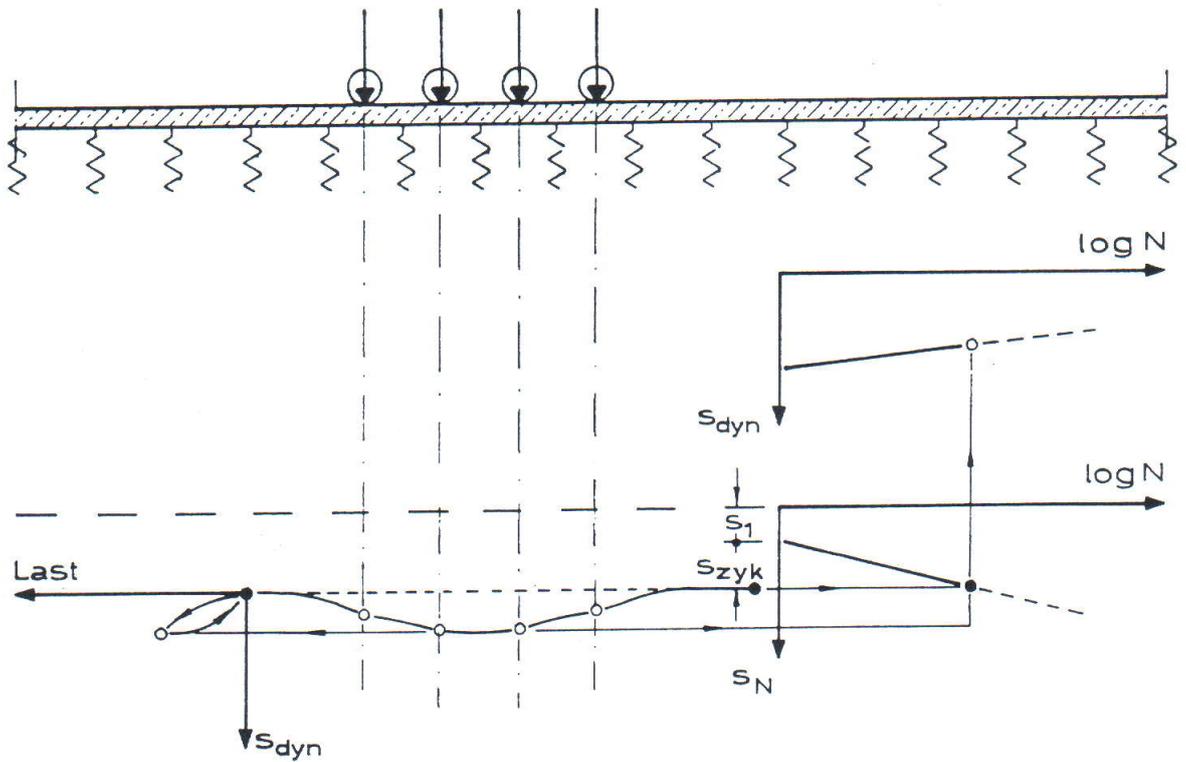


Bild 7: Setzungsanteile infolge Verkehrsbelastung in Längsrichtung (überhöht gezeichnet) nach [11]

- Der Größe der in Abschn. 4.3 angegebenen Konstanten C_N kommt für die praktische Fragestellung zum Setzungsverhalten und damit der Beurteilung der Fahrdynamik im konkreten Fall eine zentrale Bedeutung zu.
- Die in Abschn. 5 dargestellten neu entwickelten Regelquerschnitten von Neubaustrecken mit fester Fahrbahn und die darin festgelegte Schichtdicke von 1,8 m für den Untergrund- bzw. Unterbau mit erhöhten Anforderungen (untere Tragschicht) hat sich unter Berücksichtigung des damit verbundenen erdbautechnischen Aufwands und den erreichbaren bautechnischen Verbesserungen als ein guter praktischer Kompromiß herausgestellt.
- Der Einfluß der Steifigkeit des Tragsystems bei längenabhängigen Steifigkeitsänderungen im Untergrund hat einen geringen Einfluß auf die Fahrdynamik und kann für die praktische Fragestellung vernachlässigt werden.
- Die aus dynamisch wirkenden Lasten resultierenden Setzungsanteile können aufgrund ihres geringen Anteils an den Gesamtsetzungen ebenfalls vernachlässigt werden.

Bild 8 zeigt als Beispiel ein Ergebnis aus der Parameterstudie (ebene FE-Berechnungen), wobei über die variable Länge L (hier 20 m) eine Steifigkeitsverschlechterung E_{V2} bezogen auf einen angrenzenden Bereich mit $E_{V2}^* = 60 \text{ MN/m}^2$ als Bezugsgröße variiert wurde.

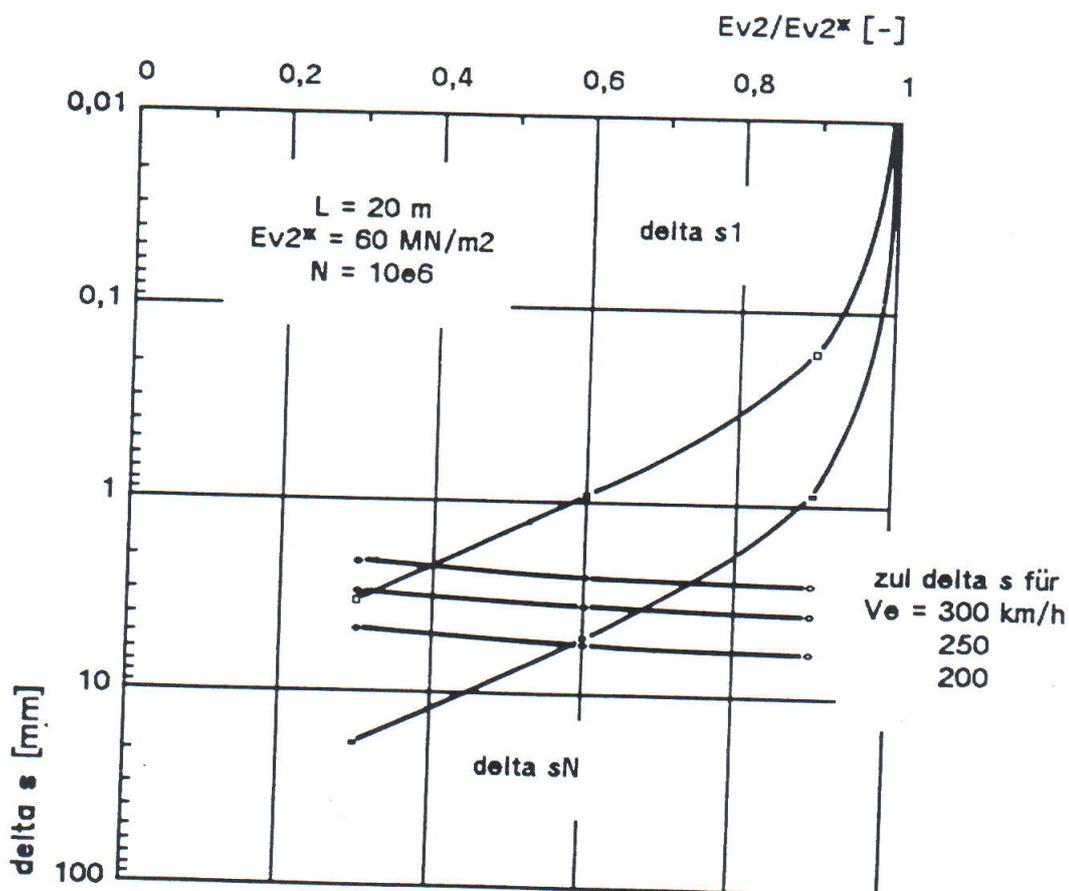


Bild 8: Setzungsdifferenzen Δs_1 und Δs_N für Steifigkeitsänderungen E_{V2} über einen Bereich von $L = 20 \text{ m}$ nach [11]

4.5 Setzungen bei Dammbauwerken

Hinsichtlich der Setzungen von Erdbauwerken, insbesondere Dämmen, für Feste Fahrbahnen sind folgende Anteile zu unterscheiden. Die daraus resultierenden Empfehlungen zum zeitlichen Einbau der Festen Fahrbahn enthält Abschn. 5.3.

a) Setzungen aus Verkehrsbelastung s_V :

Die Setzungen des Unterbaus (hier oberer Dammbereich) resultiert aus statischen, dynamischen und zyklischen Einwirkung gemäß Abschn. 4.2 bis 4.4. Die Einwirkungstiefe ist abhängig von den Bodenverhältnissen. Für die Konstruktion des Unterbaus, siehe Abschn. 5.2, wurde aufgrund der o. g. Untersuchungen von einer Einwirktiefe bis zu 2,5 m ausgegangen. Tieferliegende Schichten führen nur noch zu vernachlässigbar kleinen Verformungen, wenn diese eine festgelegte Mindeststeifigkeit aufweisen.

b) Setzungen aus Eigenverformungen s_E :

Diese Setzungen treten in Dammkörpern (auch in Bodenaustausch) aus der Zusammendrückung infolge der darüber aufgebrachten Bodenschichten innerhalb der eingebrachten Lagen auf. Nach bisherigen Erfahrungen betragen die Eigensetzungen der Dammoberfläche nach Abschluß der Dammerstellung in der Größenordnung um 1 % der Dammhöhe.

Nach im Rahmen des Projektes Feste Fahrbahn durchgeführten Untersuchung [12] sollte demgegenüber von einer empirischen Funktion $s_E = 0,025 \times h^2$ (h in m, s_E in cm) ausgegangen werden. Die quadratische Abhängigkeit der Dammeigensetzung s_E von der Dammhöhe h entspricht auch eher bodenmechanischen Grundlagen.

Besondere Überlegungen bzw. Einzeluntersuchungen sind bei Verwendung von veränderlich festen Gestein z. B. aus Tunnelausbrüchen oder aus Einschnitten erforderlich.

c) Setzungen aus Verformungen des Untergrundes s_U

Desweiteren sind Untergrundverformungen aus Konsolidationsvorgängen zu berücksichtigen.

5. Schlußfolgerungen für die konstruktive Ausbildung der Erdbauwerke für Feste Fahrbahnen

5.1 Entwurfsgrundlagen

Grundlage der Entwicklung von Regelquerschnitte für die Erdbauwerke unter Festen Fahrbahnen waren die Anforderungen der DS 800 02 [1] für den Schotteroberbau. Die darin festgelegten Entwurfsgrundsätze wurden weitgehend auch für die Entwicklung der erdbautechnischen Regelquerschnitte bei Fester Fahrbahn beachtet. Auf die Feste Fahrbahn ausgerichtet Änderungen der Vorgaben der DS 800 02 wurden zunächst nicht verfolgt. Optimierungsmöglichkeiten erscheinen denkbar, bedürfen aber einer späteren Abstimmung mit allen Fachdiensten der DB.

5.2 Erdbautechnische Konstruktionselemente

5.2.1 Zweigleisige Regelquerschnitte für Neubaustrecken

Die Elemente des Unterbaus und der Entwässerung werden im Zusammenwirken mit den weiteren für die Fahrbahn erforderlichen Komponenten wie Oberbau, Fahrleitungsmaste, Kabelkanäle

und Planumsgestaltung (Abstände, Höhen, Randwege) in erdbautechnischen Regelquerschnitten dargestellt.

Bei den Angaben für den Unterbau wurden auch die Ergebnisse der in Abschn. 3 und 4 aufgezeigten Messungen, theoretischen Untersuchungen zur Unterbaubeanspruchung berücksichtigt. Dabei stellen diese Untersuchungsergebnisse allerdings weniger Eingangswerte für die Bemessung der Konstruktion dar, sondern dienen der Absicherung der empirisch begründeten erdbautechnischen Vorschläge. Für die vorgelegten Regelquerschnitte wurden mehrere Varianten ausführlich diskutiert und hinsichtlich ihrer Vor- und Nachteile beurteilt [13].

Die Vorschläge für Regelquerschnitte zweigleisiger Strecken mit Fester Fahrbahn sind für den Rheda-Oberbau und für den SBV-Oberbau bei Strecken auf Dämmen bzw. in Einschnitten bei den Trassierungsbedingungen für gerader Streckenführung bzw. in Kurven mit einer Überhöhung von 160 mm in [14] dargestellt. Bild 9 zeigt dazu auszugsweise ein Beispiel.

Die Feste Fahrbahn soll eine den Begrenzungen des Schottergleises entsprechende Schallabsorptionsabdeckung erhalten. Da auch die Dicke der Fester Fahrbahn bis UK-Tragplatte bzw. Asphalttragschicht der Dicke des Schotteroberbaus in etwa entspricht, ergeben sich nur geringfügige Abweichungen der Berandung gegenüber denjenigen nach den bestehenden Regelungen der DS 800 02. Hinsichtlich folgender Elemente sind erdbautechnische Gesichtspunkte zu beachten:

- Tragschichtenaufbau
- Frostschutzschicht
- Untere Tragschicht
- Material- und Verdichtungsanforderungen
- Entwässerungsfragen.

Diese Teilaspekte werden in den nachfolgenden Abschnitten erläutert.

5.2.2 Tragschichtenaufbau

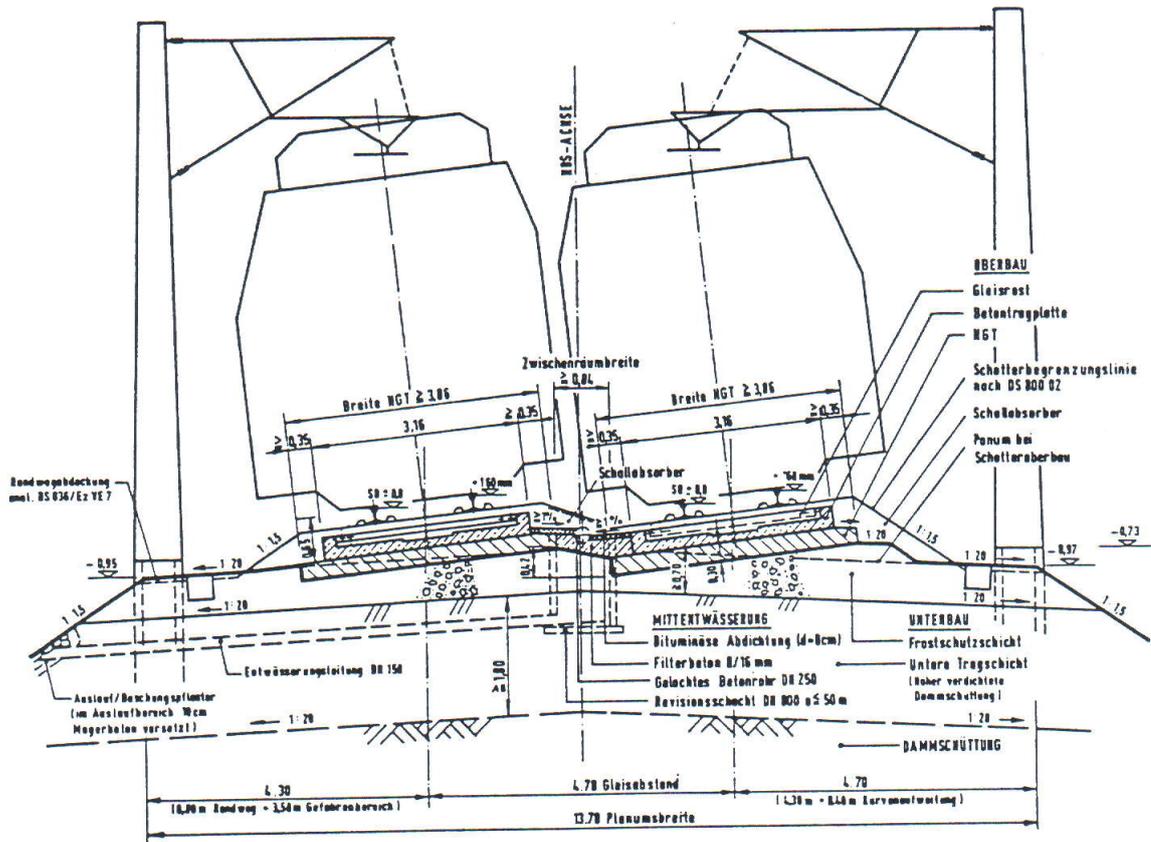
Sowohl für den modifizierten Rheda-Oberbau als auch für den SBV-Oberbau ist das grundsätzliche Konstruktionsprinzip ein Mehrschichtenaufbau mit von oben nach unten abnehmender Steifigkeit. Bei beiden Bauarten wird unter der Tragplatte bzw. Asphalttragschicht eine hydraulisch gebundene Tragschicht (HGT) vorgesehen.

Unter den gebundenen Tragschichten sind die nichtgebundenen Tragschichten des Unterbaus vorzusehen, die aus zwei Schichten bestehen sollen:

- Obere ungebundene Tragschicht, zugleich Frostschutzschicht (FSS)
- Untere ungebundene Tragschicht (sogenannte Untere Tragschicht), in Dämmen als Damm-schüttung mit erhöhten Anforderungen und in Einschnitten als Untergrund mit nachgewiesenen Eigenschaften oder als Bodenaustausch.

Dieser Vorschlag kam aus der Überlegung zustande, daß zwar einerseits die Belastung aus Festen Fahrbahnen gleichmäßiger und niedriger als im Schotteroberbau ist, was zu einer Verringerung der Anforderungen an den Unterbau führen würde, daß aber andererseits die Anforderungen an die Gleislage und die Formschlüssigkeit des Oberbaus mit dem Unterbau nur geringe Setzungsdifferenzen zulassen, die langfristig zuverlässig begrenzt werden müssen (siehe Abschn. 2). Aufgrund der großen setzungswirksamen Tiefe der Eisenbahnlasten (z.B. Drehgestell mit 40 t bis ca. 3 m Tiefe) unter der Tragplatte wurde die Einführung einer sogenannten unteren Tragschicht (1.8 m) für notwendig gehalten. Auch die rechnerischen Untersuchungen nach [11] und die theoretischen Überlegungen zur Dynamik nach [6] und [8] rechtfertigen die Festlegungen für eine solche Schicht.

a) Bauart Rheda (mod)



b) Bauart SBV:

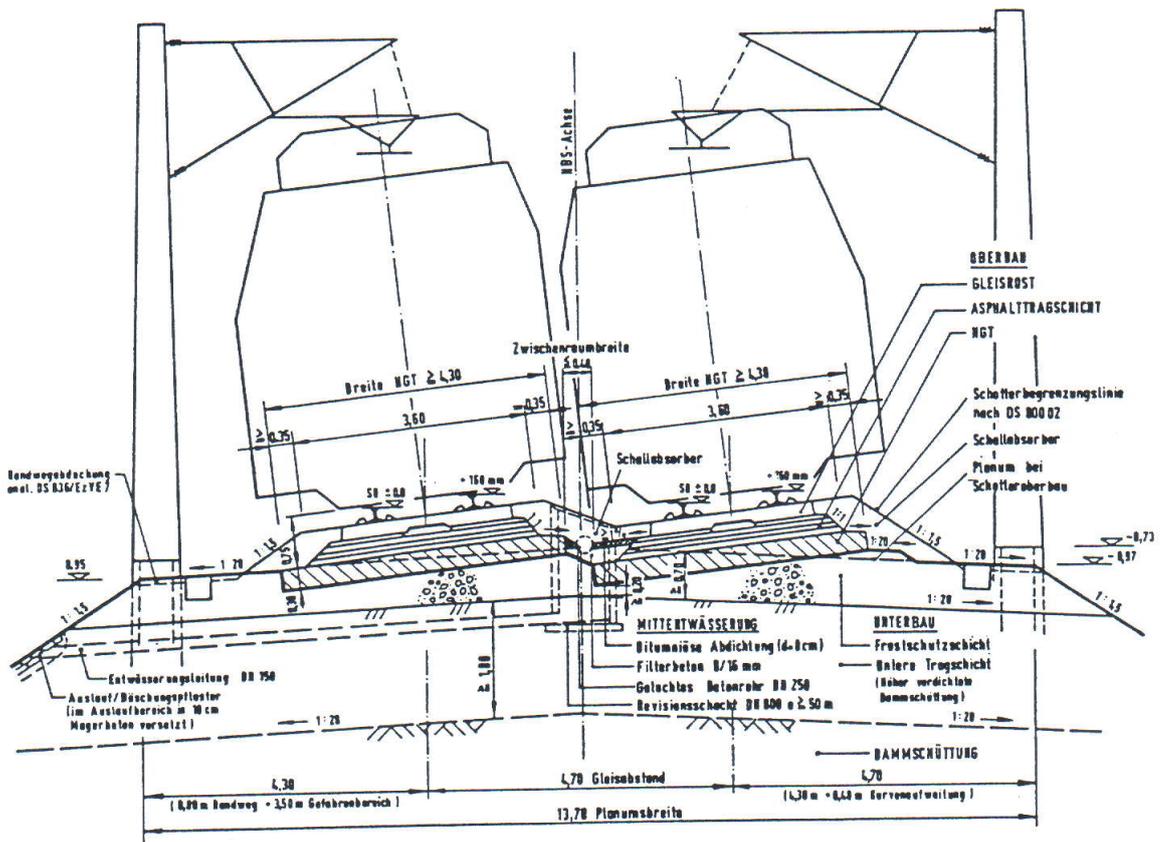


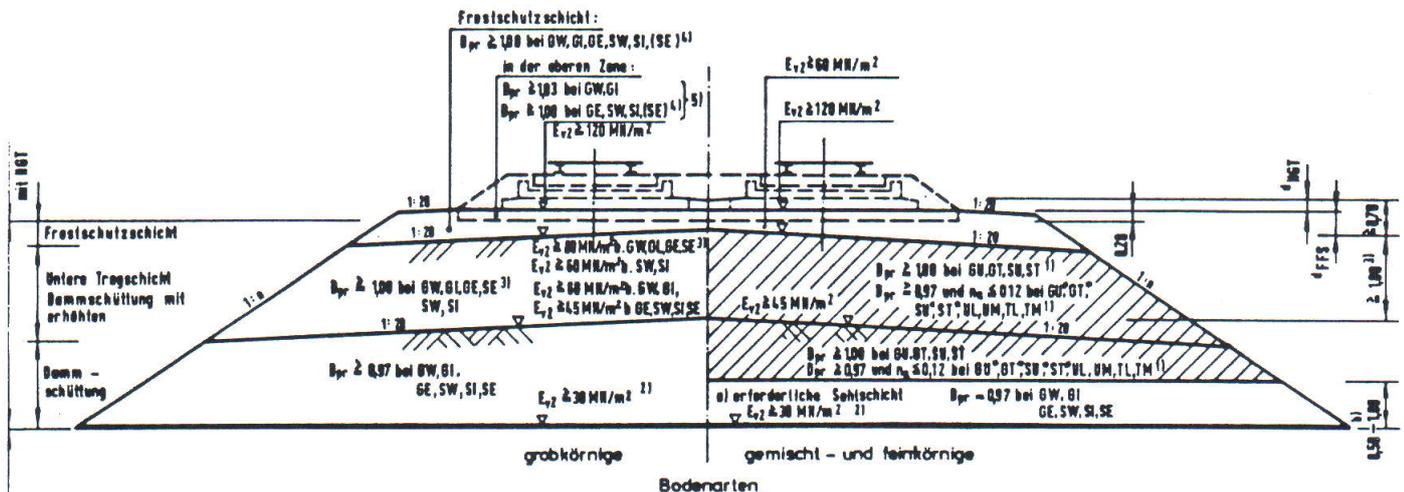
Bild 9: Erdbautechnische Regelquerschnitte für Feste Fahrbahnen auf Erdbauwerk ($u = 160 \text{ mm}$) nach [13], a) modifizierter Rheda-Oberbau auf Damm, b) SBV-Oberbau auf Damm

5.2.3 Erdbautechnische Anforderungen an den Unterbau

Die erdbautechnischen Anforderungen an den Unterbau, siehe Bild 10, beziehen sich auf Art des Bodenmaterials, Verdichtung, Tragfähigkeit nach den Plattendruckversuch, Durchlässigkeit und andere Größen. Der Unterbau umfaßt dabei

- Frostschuttschicht
- Untere Tragschicht
- Dammschüttung.

a) Damm



Zeichenerklärung

E_{v2} = Verformungsmodul aus der Zweitbelastung des Plattendruckversuches

$B_{pr} = \frac{Q_1}{Q_{pr}}$ = Verdichtungsgrad

n_0 = Anteil der luftgefüllten Poren bei gemischt- oder feinkörnigen Boden

GW, GE usw. Bodenarten nach DIN 70 196

a) erforderliche Sohlschicht (vergl. DS 836 Absatz 51)

b) Anforderungen an die Frostschuttschicht bzw. den „Unterbau mit erhöhten Anforderungen“ sind ggf. vorrangig

grabbörniger Boden

gemischt- oder feinkörniger Boden

Verdichten des Untergrundes oder besondere Maßnahmen zur Verbesserung des Untergrundes nach DS 836 Absatz 4.7

1) erforderlichenfalls Bodenverbesserung (vergl. DS 836, Absatz 110)

2) Tragfähigkeit Erdplanum (unter Austauschschichten)

3) SE-Böden ggf. verbessern

4) SE-Böden nur nach Eignungsprüfung

5) bzw. gebrochene und nichtgebrochene Mineralstoffe nach DS Min

b) Einschnitt

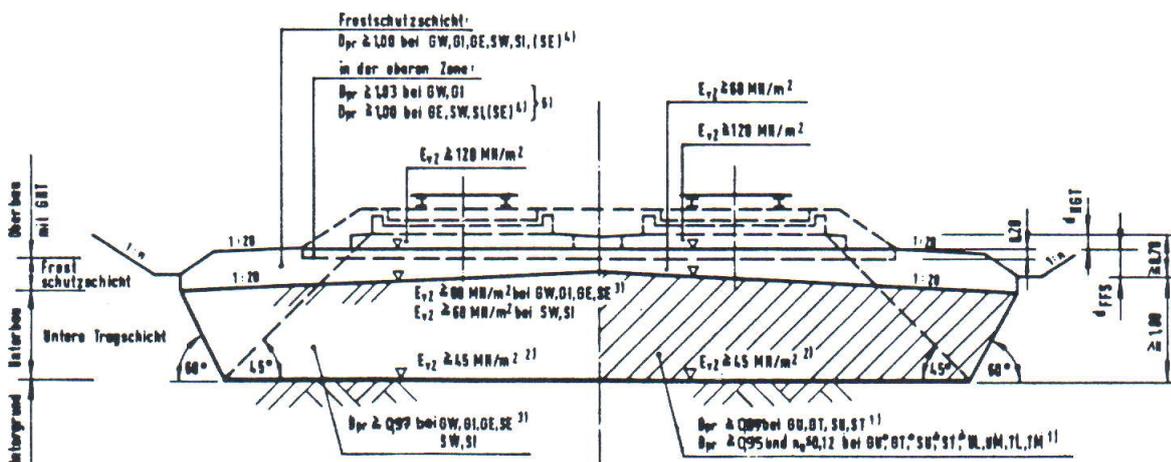


Bild 10: Erdbautechnische Anforderungen für den Unterbau/Untergrund von Festen Fahrbahnen

Im einzelnen ist folgendes zu erläutern:

a) Frostschutzschicht

Für die Frostschutzschicht werden alle natürlichen Böden der Bodengruppen GW, GI, GE, SW und SI nach DIN 18 196 zugelassen. In den obersten 20 cm der Frostschutzschicht sollen jedoch nur Böden der Gruppen GW und GI zugelassen werden. Damit sollen Nachverdichtungen unter Eisenbahnverkehr minimiert werden.

Maßgebend für die Auswahl der Baustoffe ist allerdings, daß neben der geforderten Tragfähigkeit die Böden im eingebauten Zustand eine relativ hohe Durchlässigkeit mit einem Durchlässigkeitsbeiwert von $k > 1 \times 10^{-4}$ m/s nachgewiesenermaßen aufweisen.

b) Untere Tragschicht

In Dammbereichen werden wie in DS 836 [15] alle nichtbindigen und bindigen Böden zum Einbau zugelassen.

Bei den feinkörnigen und den gemischtkörnigen Böden sowie bei Böden der Gruppen SE sind nach Beurteilung im Einzelfall Bodenverbesserungen nach der ZTVV-StB erforderlich. Dies gilt insbesondere für die obere Zone, um den geforderten Verformungsmodul auf dem Erdplanum zu erreichen. Veränderlich feste Gesteine (Tonsteine, Schluffsteine) müssen hinsichtlich ihrer Eignung gesondert beurteilt werden.

Die geforderten Verformungsmoduln auf der Oberfläche der unteren Tragschicht und die Verdichtungsgrade in dieser Schicht sind gegenüber der DS 836 [15] und den Straßenbauregeln etwas höher angesetzt, um Einflüssen aus dynamischen Belastungen insbesondere bei hohen Geschwindigkeiten entgegenzuwirken. Dies betrifft insbesondere die grobkörnigen Böden. Bei gemischt- und feinkörnigen Böden wurden die Verdichtungsanforderungen eher deshalb erhöht, um Langzeiteigenschaften weiter einzuschränken.

In Einschnittsbereichen wurden anstelle bodenmechanischer Kenngrößen wie Lagerungsdichte bzw. Konsistenz ebenfalls erdbautechnische Kriterien für die Anforderungen an die untere Tragschicht eingeführt. Dies erweist sich für die Praxis des Erdbaus als sinnvoll. Die geforderten Verdichtungsgrade liegen unter denjenigen in den Dammbereichen. Der Nachweis dieser Eigenschaften muß im anstehenden Untergrund in einem engen Raster erfolgen. Darüberhinaus sollte zur Abnahme der Sohlfläche die flächenhafte dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) eingesetzt werden.

c) Dammschüttung

Für die Dammschüttung wurden die Anforderungen hinsichtlich des Materials aus der DS 836 übernommen. Für die Bodenarten GE, SW, SI und SE wird ein Verdichtungsgrad von 0,97 gegenüber 0,95 in DS 836 gefordert. Dies ist zur Reduzierung der Eigensetzungen von Dämmen gerechtfertigt und technisch ohne größere zusätzliche Aufwendungen ausführbar. Ähnliches gilt für gemischt- und feinkörnige Böden, bei der die Verdichtungsanforderungen denjenigen der unteren Tragschicht entsprechen.

Ergänzend zur DS 836 wird sowohl auf dem Erdplanum unter der Dammschüttung als auch auf dem Planum unter der unteren Tragschicht eine Mindesttragfähigkeit gefordert, um einerseits eine Befahrbarkeit und Verdichtbarkeit auf dem Erdplanum und andererseits einen sachgemäßen Aufbau der unteren Tragschicht sicherstellen zu können. Für die Überprüfung der Verdichtung sollte die FDVK eingesetzt werden.

Bei Verwendung von gebrochenem Material (z. B. Tunnelausbruchmaterial) sind besondere Untersuchungen zur Feststellung der Eignung zum Einbau erforderlich. Dies bezieht sich insbesondere auf die Festigkeit bei angewitterten bzw. verwitterten oder gering verfestigten Gestein. In der Erdbaupraxis hat sich die Forderung nach Einhaltung eines maximalen Anteils von luftgefüllten Poren von 12 % des Gesamtvolumens zur Einschränkung von Nachsetzungen bzw. Sackungen bewährt. Im übrigen muß vom Einbau veränderlich festen Gesteins im oberflächennahen Bereichen abgesehen werden.

5.2.4 Entwässerung

An die Planung und Ausführung von Entwässerungsanlagen bei Fester Fahrbahnen sind hohe Anforderungen zu stellen. Die Erfahrung aus dem Eisenbahnbau ebenso wie aus dem Straßenbau zeigt, daß nicht ausreichend dimensionierte oder mangelhaft unterhaltene Entwässerungsanlagen oft zu einer Verminderung der Tragfähigkeit des Unterbaus / Untergrundes durch Pumpwirkungen bei zyklischen Lasten, durch Verflüssigungen bei dynamischen Lasten und durch Frost- und Tau-einflüsse führen. Gerade im Hinblick auf die geringen zulässigen Gleislageänderungen, den hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit und die erheblichen Aufwendungen bei nachträglichen Schadensbehebungen bei Festen Fahrbahnen ist der Planung, Ausführung und besonders der Wartung und Kontrolle der Entwässerungsanlagen ein hoher Stellenwert einzuräumen.

Im Gegensatz zum Schotteroberbau kann bei Festen Fahrbahnen Oberflächenwasser nicht ungehindert durch den Schotter seitlich abfließen, sondern wird an der Oberfläche der Tragkonstruktion gehalten und muß durch besondere Maßnahmen im Oberbau über die Fahrbahnränder abgeführt werden. Insbesondere in Kurvenlagen sammelt sich Wasser in den relativ schmalen Bereich zwischen den Gleisen. Es muß deshalb eine besondere Mittenentwässerung vorgesehen werden. Diese Mittenentwässerung kann grundsätzlich als sogenannte Sickerstrangentwässerung, bei der ein Sickerrohr in einer bestimmten Tiefe unter der Oberfläche eingebaut wird, zu dem das Oberflächenwasser über einen durchlässigen Filterboden zuströmt, oder als Oberflächenentwässerung, bei der das Wasser zwischen den Tragplatten gesammelt und abgeführt wird, ausgeführt werden. Für die Regelausführung wurde eine Oberflächenentwässerung bevorzugt. Maßgebend hierfür waren die Argumente, daß zum einen der Aufwand und die betrieblichen Einschränkungen für die Wartung bei einer Oberflächenentwässerung wesentlich geringer sind als bei einer Sickerstrangentwässerung und zum anderen aufgrund der engen Platzverhältnisse (im Gegensatz zum Autobahnbau) und der hohen dynamischen Einwirkungen durch den Eisenbahnverkehr ein planmäßiges Einströmen von Sickerwasser in den Unterbau unter der Fahrbahn ausgeschlossen werden muß, um Risiken für die langfristige Verfügbarkeit durch Schäden infolge Pump- und Verflüssigungserscheinungen auszuschließen.

Auch bei einer Entwässerung an der Oberfläche kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, daß in offene Fugen Wasser einsickert. Dieses muß abfließen können, weshalb unterhalb der Oberflächenentwässerung durchlässige Materialien zu verwenden sind. Dies bezieht sich auf die Auffüllung zwischen den Fahrbahnen und auf den Unterbau. Zu beachten ist insbesondere ein ausreichender Durchlässigkeitsbeiwert der Frostschutzschicht (siehe Abschn. 5.2.3) sowie die Ausbildung eines Gefälles an der Schichtgrenze Frostschutzschicht/Untere Tragschicht, vor allem, wenn letztere aus bindigen Böden besteht (hier Dachprofilneigung bei zweigleisigen Strecken).

Für die Wirksamkeit der Entwässerung ist auch die Zusammensetzung des vorgesehenen Schallabsorptionsmaterials von Bedeutung. Es wird davon ausgegangen, daß als Schallschutzmaterial Schotter oder ähnlich grobporiges Haufwerk vorgesehen wird. Bei Verklebungen ist unbedingt darauf zu achten, daß dadurch nicht der freie Zufluß des Oberflächenwassers zur Mittenentwässerung beeinträchtigt wird.

Die gesamte Entwässerung der Festen Fahrbahn setzt sich damit aus folgenden Elementen zusammen:

- Wasserableitung von der Oberfläche und den Fugen des Oberbaus:

Diese ist durch die Ausbildung des Oberbaus konstruktiv zu sichern und betrifft nicht den Erdbau. Es wird allerdings davon ausgegangen, daß die Entwässerung des Oberbaus in Richtung auf die erdbautechnisch vorgesehenen Entwässerungseinrichtungen erfolgt.

- Mittenentwässerung
- Randentwässerung
- Bahnseitengräben und Tiefenentwässerungen in Einschnitten
- Sonstige Entwässerungseinrichtungen wie Abfang- und Sammelgräben.

In [13] sind dazu mehrere Detaillösungen und Varianten zusammengestellt.

5.3 Empfehlungen zum zeitlichen Einbau von Festen Fahrbahnen

Für die Beurteilung der Eignung von Erdbauwerken für Feste Fahrbahnen wie für den Hochgeschwindigkeitsverkehr generell ist die Beachtung des zeitlichen Ablauf der Setzungen von erheblichem Einfluß. In Bild 11 sind die Zusammenhänge des zeitlichen Setzungsverlaufes der einzelnen Setzungsanteile wie in Abschn. 4.5 beschrieben qualitativ dargestellt. Maßgebend für die Festlegung zulässiger Setzungen sind zum einen die Setzungen s_V aus Verkehrsbelastung und zum anderen die nach Einbau der Feste Fahrbahn auftretenden Restsetzungen s_R aus Eigensetzungen und Untergrundsetzungen.

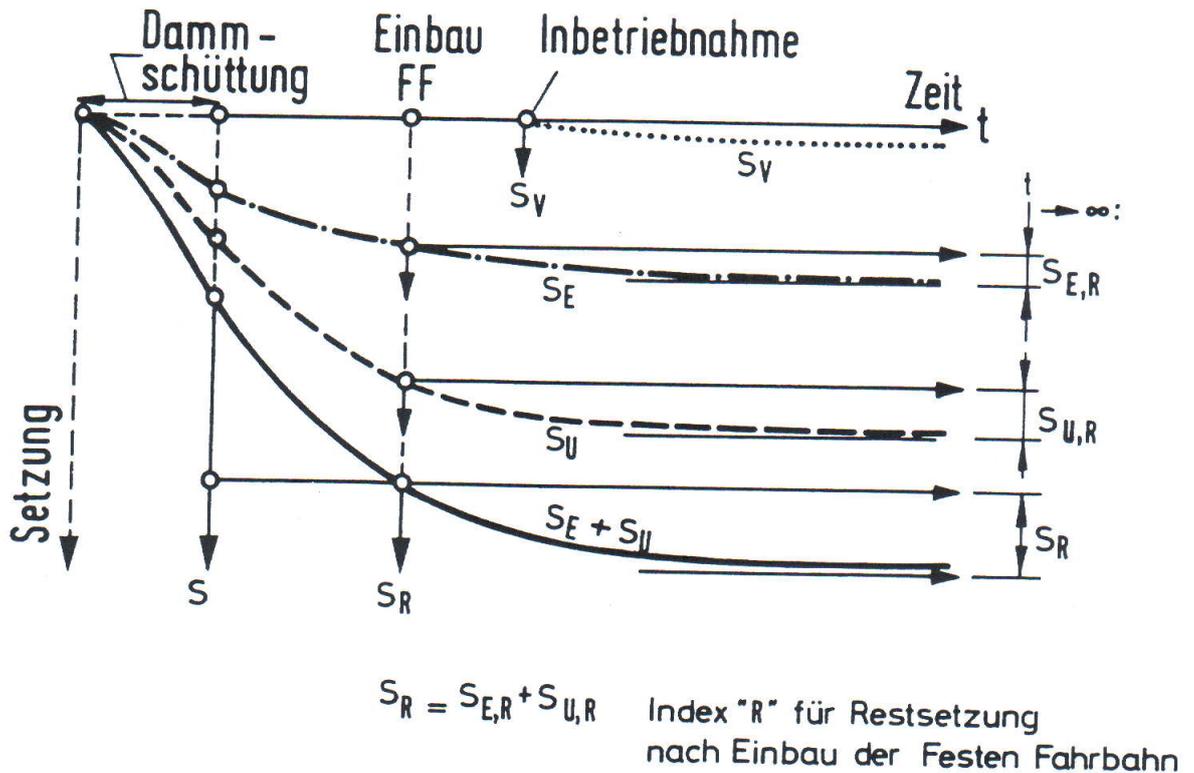


Bild 11: Zeitlicher Verlauf der Setzungsanteile aus Verkehr (s_V), Eigensetzung (s_E) und Untergrundsetzung (s_U)

Bei regelgerechter Ausführung der Erdbauwerke nehmen die Setzungen aufgrund von Konsolidierungsvorgängen mit der Zeit ab. Bei Neubaustrecken ist deshalb der Zeitpunkt des Einbaus der Fahrbahn nach Fertigstellung der Erdbauwerke von Bedeutung. Bei ungünstigen Verhältnissen ist das Abwarten von Konsolidierungsvorgängen oder die Durchführung von Maßnahmen zur Beschleunigung von Setzungen notwendig.

Die Festlegung zulässiger Restsetzungen bzw. Setzungsdifferenzen ergibt sich aus der Anforderung, über die Nutzungsdauer der Festen Fahrbahn die Gebrauchsfähigkeit unter Ausnutzung der Ausgleichsmöglichkeiten in der Schienenbefestigung aufrecht zu erhalten.

Bei einer Ausbildung des Unterbaus nach Abschn. 5.2 kann davon ausgegangen werden, daß die Gleislageabweichungen innerhalb der in Bild 1 angegebenen Grenzen bleiben. Es wird allerdings vorgeschlagen, ein Ausgleichsmaß von 5 mm für Setzungen aus Verkehr vorzuhalten. Für den Ausgleich von Resteigensetzungen von Dämmen und des Untergrundes kann die weitere Regulierungsmöglichkeit in der Schienenbefestigung in Anspruch genommen werden, d. h., daß die Setzungsdifferenz innerhalb einer beliebigen Strecke und damit die Restsetzung insgesamt in der Regel 20 mm nicht überschreiten darf.

In Einzelfällen kann ein nicht ausgeschöpfter Betrag aus der zulässigen Krümmung für eine wannenförmige Ausrundung nach DS 800 02 genutzt werden. In diesen Fällen ist allerdings die korrigierte Sollage des Gleises vermessungstechnisch dem Setzungsverlauf ggf. mehrfach anzupassen.

5.4 Übergänge bei unterschiedlichen Oberbauformen

Übergänge zwischen Kunstbauwerk-Erdbauwerk oder Schotteroberbau-Feste Fahrbahn stellen Steifigkeitssprünge dar, die konstruktiv auszugleichen sind. Hierfür sind in [14] Vorschläge enthalten bzw. weitere Entwicklungen notwendig.

6. Entwicklungsstand

Die Entwicklung für die konstruktive Ausbildung der Erdbauwerke für Feste Fahrbahnen im Hochgeschwindigkeitsverkehr ist weitgehend abgeschlossen. Vor einer endgültigen Freigabe sollte das Zusammenwirken der einzelnen Konstruktionselemente des Erdbaus und der gewählten Oberbauform durch eine zweigleisige Pilotanwendung (Beobachtungszeitraum mindestens 3 Jahre) bei hohen Fahrgeschwindigkeiten überprüft werden. Dabei sind eine weitere konstruktive Optimierung der erdbautechnischen Elemente der Festen Fahrbahn sowie eine weitgehende Klärung noch offener Fragen zu erwarten.

7. Literatur

- [1] DB, DS 800 02: Bahnanlagen entwerfen - Neubaustrecken, Entwurf Juli 1990 (zwischenzeitlich Ausgabe Januar 1991)
- [2] BZA Mü., Dez. 18A: Schlußbericht zum EA-Projekt „Feste Fahrbahn / Erdbau I“, Nov., 1988 (unveröffentl.)
- [3] Martinek, K.: Bodendruckmessungen bei den Schnellfahrversuchen zwischen Gütersloh und Neubeckum. ZEV-Glas. Ann. 100 (1976) Nr. 12, S. 367-372

- [4] Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, TU München: FF/E II; Berichte zum Versuchsprogramm Feste Fahrbahn Kutzenhausen 1988, 1989, 1990, 1991, (unveröffentl.)
- [5] Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik, TU München: FF/E II; Berichte zum Versuchsprogramm Feste Fahrbahn Hösbach 1988, 1989, 1990, 1991, (unveröffentl.)
- [6] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin: FF/E II; Dynamische Einwirkungen: Momentendynamik und Setzungen aus zyklischer Belastung, Statusbericht. Juli 1990 (unveröffentl.)
- [7] Holzlöhner, U.: Setzungen von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn, BAM-Bericht Nr. 48, 1977
- [8] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin: FF/E II; Dynamische Einwirkungen: Momentendynamik und Setzungen aus zyklischer Belastung, Endbericht. Juni 1991 (unveröffentl.)
- [9] Eisenmann, J.: Beitrag zur Berechnung der Beanspruchung von Straßendecken. Bericht zur Europäischen Straßenbautagung in München 1966. Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen, Köln
- [10] Eisenmann, J./Lempe, U.: Konstruktion und Bemessung eines Eisenbahnoberbaus aus einer Festen Fahrbahn. Mitteilungen des Instituts für Bau von Landverkehrswegen, Heft 18, TU München 1974
- [11] Kempfert, H.-G.: FF/E II; Rechnerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten Fester Fahrbahnen auf Erdbauwerken, Schlußbericht. Konstanz, Juli 1991 (unveröffentl.)
- [12] Ast, W.: FF/E II; Eigensetzungen und Untergrundeinflüsse auf Erdbauwerke bei Festen Fahrbahnen, Schlußbericht, Stuttgart, 1992 (unveröffentl.)
- [13] Planungsgemeinschaft Ast, W./Obermeyer P+B: FF/E II; Regelquerschnitte, Schlußbericht. Stuttgart 1991 (unveröffentl.)
- [14] Kempfert, H.-G./Vogel, W.: Erdbauwerke für Feste Fahrbahnen - Darstellung des Entwicklungsstandes - , Schlußbericht. Konstanz, München 1992 (unveröffentl.)
- [15] DB, DS 836; Vorschrift für Erdbauwerke (VE), Ausgabe Januar 1985