Ein Beitrag zur Dimensionierung des Eisenbahnunterbaus

Autor(en): **Schmutz, Gerhard**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **98 (1980)**

Heft 30-31

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-74159

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Ein Beitrag zur Dimensionierung des Eisenbahnunterbaus

Von Gerhard Schmutz, Bern

Die Bemessung der Fundationsschicht ist von der Schwellenart und dem Schienenprofil abhängig. In Hauptgleisen I mit mehr als 25000 Bruttotonnenbelastung pro Tag werden bei den SBB in der Regel Einblockbetonschwellen und Schienen mit Profil VI verlegt. Bei dieser Oberbauart ist bei einem CBR-Wert grösser als 22% bezüglich Tragfähigkeit keine Fundationsschicht notwendig. Falls eine Fundationsschicht notwendig ist, sollte ihre Dicke unter Berücksichtigung der im Tiefbau üblichen Einbautoleranzen nicht weniger als 20 cm betragen.
Verbindungs- und schwach belastete Nebengleise benötigen nur dann eine Fundationsschicht von höchstens 20 cm Dicke, wenn der CBR-Wert weniger als 8% beträgt.
Die Frostschutzschicht kann im Eisenbahnbau im allgemeinen aufgrund der mittleren Frosteindringtiefe X_{10} bemessen werden, wobei in Einschnitten das Schotterbett bei der Festlegung der Frosteindringtiefe vollständig mitberücksichtigt werden kann. Im Mittelland genügt im allgemeinen eine Frostschutzschichtdicke unter dem Schotterbett von 30 bis 40 cm.
Die Entwässerung des Eisenbahnkörpers ist von grosser Wichtigkeit. Sie sollte grosszügig projektiert, sorgfältig erstellt und während des Betriebes periodisch kontrolliert und gereinigt werden. Unterbausanierungen von bestehenden Strecken sind nur dann sinnvoll, wenn auch die Entwässerungsverhältnisse saniert werden.
Die Tragwirkung eines Gleises ist bedeutend grösser als die einer bituminös befestigten Strasse im Sommer.
Zweiblockschwellen erzeugen auf der Planie im Mittel rund 15% und auf dem Planum rund 10% höhere Spannungen als Holzschwellen.
Bei zementstabilisierten Fundationsschichten ist darauf zu achten, dass die zulässige Dauerbiegezugfestigkeit und die zulässige Schotterpressung nicht überschritten werden. Ihr Einsatz dürfte nur in Ausnahmefällen wirtschaftlich vertretbar sein.
Ob der Einbau von Kiessand I oder Kiessand II zweckmässig ist, hängt von der Durchlässigkeit und der Wasserempfindlichkeit des Untergrundes sowie der Wasserdurchlässigkeit der Planie ab.
Falls der Fundationskiessand nicht als Filter gegenüber dem Untergrund wirkt, ist unter die Fundation eine spezielle Filterschicht einzubauen.

Allgemeines

Im Jahre 1887 hat *Zimmermann* eine Berechnungsmethode für den Eisenbahnoberbau [1] veröffentlicht. Das Buch wurde 1930 und 1941 unverändert nochmals gedruckt, was für die Güte des angegebenen Berechnungsverfahrens sprechen dürfte. Zimmermann nahm aufgrund zahlreicher Messungen *Proportionalität zwischen der Flächenbelastung einer Schwelle und ihrer Einsenkung ins Schotterbett* an. Den Proportionalitätsfaktor bezeichnete er als *Bettungsziffer*. Die Schiene wird als ein unendlich langer, von den Schwellen elastisch gestützter Balken betrachtet. Dieses Verfahren, das sogenannte *Bettungszifferverfahren*, wird ebenfalls bei der Dimensionierung von Flächengründungen verwendet, doch dürfte es hier, im Gegensatz zum Eisenbahnoberbau, das wirkliche Verhalten im allgemeinen nur sehr grob erfassen. Das Bettungszifferverfahren von Zimmermann wird noch heute bei den Bahnen für Oberbauberechnungen angewandt.

Da die Lastverteilung des Gleisrostes genügte, wurden früher die Bahnlinien ohne besonderen Unterbau gebaut. Erst mit dem Ansteigen von Achslasten, Zugsgeschwindigkeiten, Komfortbedürfnissen der Reisenden und Unterhaltsaufwand ergab sich die Notwendigkeit, unter dem Schotterbett einen eigentlichen *Unterbau* zu erstellen. Auch bei den bestehenden Strecken muss heute vermehrt im Zuge der Oberbauerneuerung (Auswechseln von Schienen, Schwellen und allenfalls Schotter) eine verdichtete Kiessandschicht als Unterbau eingebaut werden. Da diese Arbeiten oft abschnittweise in Nachtpausen, die bei stark befahrenen Linien nur einige Stunden dauern, ausgeführt werden müssen, kann nur eine minimale Schichtdicke eingebaut werden. Falls ein Gleis über längere Zeit ausser Betrieb genommen werden kann, was wünschbar, aber aus betrieblichen Gründen leider nicht immer durchführbar ist, wird der Unterbau strassenbaumässig erstellt, wobei die Arbeiten bei besserer Qualität viel kostengünstiger ausgeführt werden können.

Berechnung der Schotterpressung

In Tabelle 1 sind einige Kennwerte der Schienen, in Tabelle 2 der Schwellen, die bei den SBB verwendet werden, angegeben.

Tabelle 1. Schienenkennwerte

Profil	*SBB I*	*SBB IV*	*SBB VI*
Trägheitsmoment I_x [cm⁴]	1631	2308	3055
Gewicht [kg/m]	46	54	60
Elastizitätsmodul [N/mm²]	$2{,}1 \cdot 10^5$		

Tabelle 2. Schwellenkennwerte

Schwellenart	*Holz*	*Zweiblockbeton*	*Einblockbeton*
Breite [mm]	260	290	280
Höhe [mm]	150	210	214
Länge [mm]	2500	2·720	2600
Gewicht [kg]	90	200	280

Die Berechnung der Schotterpressung nach *Zimmermann* erfolgt mit folgenden Gleichungen:

$$p = \frac{Q}{2\,b\,L}$$

$$\eta = e^{-\frac{x}{L}} \left(\cos \frac{x}{L} + \sin \frac{x}{L} \right)$$

$$L = \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot c}}$$

p = Schotterpressung (maximale Pressung UK Schwelle)
Q = Radlast
b = Ersatzbreite
η = Einflusszahl
L = Elastische Länge
x = Achsabstand
E = Elastizitätsmodul des Schienenstahls
I = Trägheitsmoment der Schiene
c = Bettungsziffer

Die effektiv auftretenden Schotterpressungen entsprechen aber nicht den nach Zimmermann berechneten Werten. Mögliche Hohllagen von Schwellen, unrunde Räder, Flachstellen, Gleisla-

gefehler sowie die Radlastverlagerung, die in Kurven unter dem Einfluss der Fliehkraft auftritt, bewirken eine höhere Schotterpressung. Die Erhöhung kann durch dynamische Zuschläge in Funktion des Oberbauzustandes und der Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt werden.

Eisenmann gibt in [2] eine Radlastverlagerung an, die im ungünstigsten Fall 20% betragen kann. In derselben Publikation schlägt er folgende *dynamische Schotterpressung* vor:

$$p = \bar{p}(1 + t\,\bar{s})$$

$\bar{s}$ stellt die auf den Mittelwert bezogene Standardabweichung dar und wird in Funktion des Oberbauzustandes wie folgt angegeben:

$\bar{s} = 0{,}1\varphi$ Oberbauzustand sehr gut
$\bar{s} = 0{,}2\varphi$ Oberbauzustand gut
$\bar{s} = 0{,}3\varphi$ Oberbauzustand schlecht

Der Beiwert φ stellt den *Geschwindigkeitseinfluss* dar, der mit folgenden Ansätzen berücksichtigt wird:

$v \leq 60$ km/h: $\varphi = 1$

$60 < v < 200$ km/h: $\varphi = 1 + \dfrac{v - 60}{140}$

Der Faktor t berücksichtigt die gewünschte statistische Sicherheit P:

$P = 68{,}3\%$: $t = 1$
$P = 95{,}4\%$: $t = 2$
$P = 99{,}7\%$: $t = 3$

Bei der Berechnung der Spannungen unterhalb des Schotterbettes darf eine statistische Sicherheit von 68,3% eingesetzt werden, da durch die lastverteilende Wirkung des Schotterbettes ein Ausgleich von unregelmässigen Schwellenauflagerungen erreicht wird.
Bild 1 zeigt die mit einem Stosszuschlag von 1,5 multiplizierte Schotterpressung unter einer Einblockbetonschwelle und einem Schienenprofil SBB VI, das mit einer Radlast von 100 kN belastet ist. Es sind die Achsabstände der Lokomotiven Re 4/4 II (x = 2,80 m) und Ae 6/6 (x = 2,15 m) sowie des Flachwagens Rs-y (x = 1,80 m) berücksichtigt.

Berechnung der Vertikalspannung auf dem Planum

Grundsätzlich steht für die Spannungsberechnung die *Halbraumtheorie von Boussinesq* zur Verfügung. Sie setzt aber Isotropie voraus, die weder im Eisenbahnkörper noch bei Strassen oder

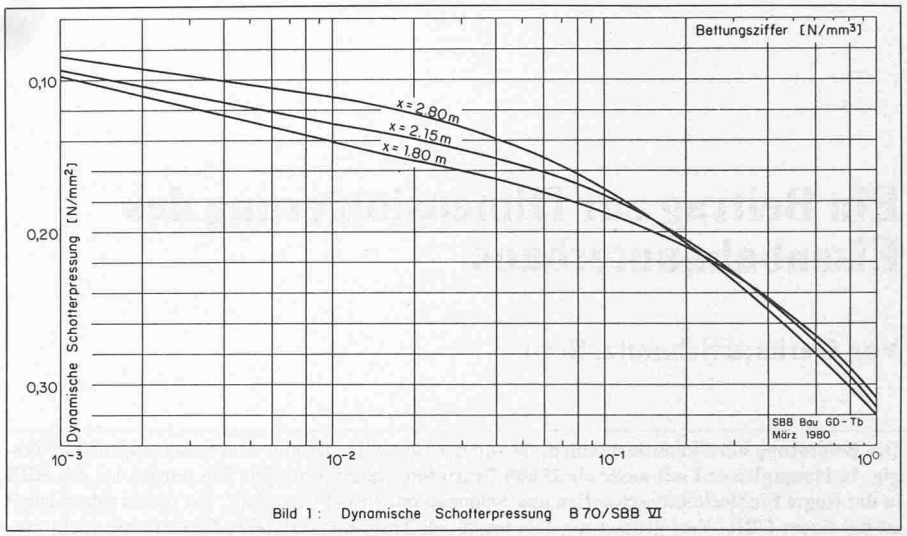

Bild 1. Dynamische Schotterpressung B70/SBB VI

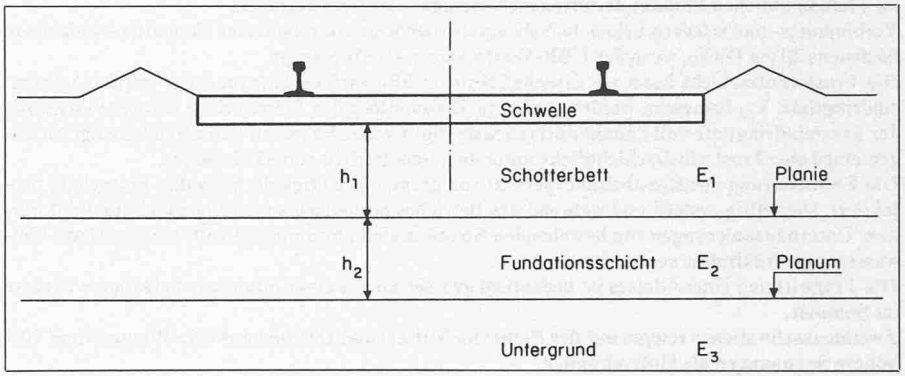

Bild 2. Bodenaufbau unter dem Gleis

Flugpisten vorhanden ist, da in diesen Fällen die Lasteinleitung in den Untergrund über verschiedene, horizontale Schichten mit unterschiedlichen Elastizitätseigenschaften erfolgt. Als grundlegende Arbeit auf dem Gebiet der *Schichtentheorie* kann die Veröffentlichung von *Burmister* [3] bezeichnet werden. Darauf aufbauend hat *Odemark* ein Näherungsverfahren, die sogenannte *Äquivalenzmethode* entwickelt [4], die davon ausgeht, dass die Spannungen nach *Boussinesq* bestimmt werden können, nachdem das Mehrschichtensystem in einen äquivalenten Halbraum umgerechnet worden ist. Aufgrund der Gleichungen von *Burmister* hat *Jones* [5] Tabellen für die verschiedenen Spannungen im Dreischichtensystem publiziert. In diesen Tabellen wird eine Poissonzahl von 0,5 und eine volle Reibung in den Schichtflächen vorausgesetzt.
In Bild 2 ist der Standardfall des Eisenbahnkörpers dargestellt. Die Regeldikke des Schotterbettes unter UK Schwelle beträgt bei den SBB 25 cm unter Holzschwellen sowie ca. 24 cm unter Betonschwellen. Der Elastizitätsmodul des Schotterbettes dürfte zwischen 100 und 200 N/mm² liegen, während für eine Fundationsschicht aus verdichtetem Kiessand ein mittlerer E-Wert von 50 N/mm² auf der sicheren Seite liegen dürfte.
Da die Schotterpressung von der Bettungsziffer abhängt, muss zwischen Bettungsziffer und E-Modul eine Beziehung gefunden werden. Aus den Elastizitätsmoduli der einzelnen Schichten kann ein *fiktiver E-Modul des Gesamtsystems* bestimmt werden, indem die Deformationen an der Oberfläche des Dreischichtensystems und des Halbraumes, dem der fiktive E-Modul zugeordnet wird, gleich gross gesetzt werden. Dazu können das Verfahren von *Odemark* und die von ihm angegebenen Diagramme verwendet werden. Eine

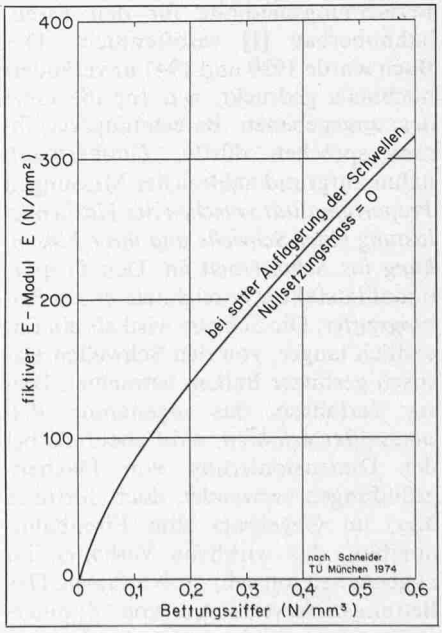

Bild 3. Zusammenhang zwischen Bettungsziffer und fiktivem E-Modul

Funktion zwischen dem fiktiven E-Modul und der Bettungsziffer hat *Schneider* [6] angegeben. Danach ergibt sich bei Eisenbahnen der in Bild 3 dargestellte Zusammenhang.

Für die folgenden Berechnungen wurden die Kennziffern wie folgt angenommen: $E_1 = 100\ N/mm^2$, $E_2 = 50\ N/mm^2$, E_3 = variabel, Stosszuschlag = 1,5, Achsabstand $x = 2{,}15$ m. Die Vertikalspannungen wurden nach *Jones/Burmister* bestimmt.

Somit können die unter den verschiedenen Schwellen- und Schienentypen entstehenden *Vertikalspannungen* im Untergrund bestimmt werden. Aus Tabelle 3 ist der Einfluss des Schienenprofils ersichtlich. Die Werte gelten für Holzschwellen und eine Fundationsschicht von 25 cm Dicke unter dem Regelschotterbett. Im Vergleich zum Schienenprofil SBB I sind die Normalspannungen auf der Planie und dem Planum beim Profil SBB IV 4 bis 9% und beim Profil SBB VI 7 bis 16% geringer.

Aus Tabelle 4 ist der *Einfluss des Schwellentyps* ersichtlich. Die Werte gelten für das Schienenprofil SBB I und eine Fundationsschicht von 25 cm Dikke unter dem Regelschotterbett. Im Vergleich zur Holzschwelle sind die Normalspannungen unter der Einblockbetonschwelle auf der Planie 0 bis 7% geringer und auf dem Planum 5 bis 9% höher. Unter der Zweiblockschwelle sind die entsprechenden Werte 9 bis 19% höher beziehungsweise 7 bis 11% höher.

Eine Vergrösserung des Elastizitätsmoduls des Schotters von 100 auf 200 N/mm² bewirkt auf dem Planum eine Spannungsverminderung um ca. 15%. Die Annahme eines *E*-Wertes von 100 N/mm² erscheint als gerechtfertigt.

Zulässige Normalspannung auf dem Planum

Die zulässige Normalspannung auf dem Planum hängt von den Untergrundeigenschaften und der Beanspruchung ab. Die wesentlichen Einflüsse sind folgende:

- Scherfestigkeit beziehungsweise Tragfähigkeit des Untergrundes,
- Ermüdungsfestigkeit des Planums,
- Grösse der Achslast und Zugsgeschwindigkeit,
- Anzahl schwerer Achslasten während der Gebrauchsdauer der Strecke.

Im Rahmen des ORE (Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnverbandes) werden zurzeit *Dauerfestigkeitsversuche* durchgeführt, die es erlauben sollten, die zulässige Normalspannung zu bestimmen. Konkrete Ergebnisse sind noch nicht vorhanden.

Tabelle 3. Normalspannungen in N/mm² unter Holzschwellen

E_3 [N/mm²]	SBB I		SBB IV		SBB VI	
	Planie	Planum	Planie	Planum	Planie	Planum
250	0,234	0,153	0,213	0,139	0,197	0,129
25	0,104	0,046	0,099	0,043	0,095	0,042
2,5	0,068	0,011	0,065	0,010	0,063	0,010
0,25	0,054	0,002	0,052	0,002	0,050	0,002

Tabelle 4. Normalspannungen in N/mm² unter dem Schienenprofil SBB I

E_3 [N/mm²]	Holzschwellen		Einblockbeton-schwellen		Zweiblockbeton-schwellen	
	Planie	Planum	Planie	Planum	Planie	Planum
250	0,234	0,153	0,234	0,160	0,255	0,163
25	0,104	0,046	0,102	0,048	0,119	0,051
2,5	0,068	0,011	0,064	0,011	0,080	0,012
0,25	0,054	0,002	0,050	0,002	0,064	0,002

Angaben über die zulässige Normalspannung des Bodens sind in der Literatur leider nur spärlich vorhanden. *Heukelom* und *Klomp* [7] geben aufgrund von Angaben nach *Kerkhoven* und *Dorman* folgende Gleichung an:

$$\sigma_{zul} \approx \frac{0{,}006 \cdot E_{dyn}}{1 + 0{,}7 \cdot \log n}$$

Unter der Annahme, dass $E_{dyn} \approx 2 \cdot E_3$ ist, ergibt sich

$$\sigma_{zul} \approx \frac{0{,}012 \cdot E_3}{1 + 0{,}7 \cdot \log n}$$

σ_{zul} = Zulässige Normalspannung auf dem Planum in N/mm²
E_3 = Elastizitätsmodul des Untergrundes in N/mm²
n = Anzahl schwerer Achslasten während der Gebrauchsdauer der Strecke

n wird wie folgt festgelegt:
$n = 10^9$ für Hauptgleise (UIC Lastgruppe 1)
$n = 5 \cdot 10^6$ für Neben- und Verbindungsgleise (UIC Lastgruppe 8)

Die Anzahl Achsdurchgänge von 10^9 entspricht einer Verkehrslast von 450 Güterzügen zu 1200 Tonnen pro Tag während 100 Jahren. Die Grösse $n = 5 \cdot 10^6$ entspricht 70 Wagen zu 40 Tonnen pro Tag während 100 Jahren. Somit ergibt sich eine zulässige Normalspannung auf dem Planum von

$\sigma_{zul} = 1{,}64\ 10^{-3} \cdot E_3$ für Hauptgleise und
$\sigma_{zul} = 2{,}11\ 10^{-3} \cdot E_3$ für Neben- und Verbindungsgleise

Dimensionierung der Fundationsschicht

Der Vergleich zwischen vorhandener und zulässiger Normalspannung auf dem Planum ermöglicht die Bestimmung der notwendigen Fundationsschichtdicke. Um einen *Vergleich mit der Dimensionierung im Strassenbau* zu ermöglichen, werden die Diagramme in Funktion des CBR-Wertes angegeben, wobei angenommen wurde, dass zwischen dem CBR-Wert und dem E_3-Wert folgende Beziehung besteht: CBR [%] $\approx 0{,}2 \cdot E_3$[N/mm²]. Es hat sich gezeigt, dass die Dicke der Fundationsschicht eine lineare Funktion des Logarithmus des CBR-Wertes darstellt. In Tabelle 5 sind die Funktionen für die verschiedenen Oberbautypen angegeben. Sie gelten für Hauptgleise. Mit diesen Gleichungen kann die Fundationsschicht, abgestimmt auf die Tragfähigkeit des Untergrundes, bemessen werden. Die eingeklammerten Funktionen haben keine praktische Bedeutung, da die entsprechenden Schwellen/Schienenkombinationen nicht verwendet werden. Ein Untergrund, der nicht mit Baumaschinen befahren werden kann, muss bei Neubauten im allgemeinen zuerst stabilisiert oder ersetzt werden.

Bei Neben- und Verbindungsgleisen braucht kein Stosszuschlag berücksichtigt zu werden, so dass bei Holz- und Stahlschwellen mit Schienenprofil SBB I die *Dicke der Fundationsschicht* nach folgenden Gleichungen bestimmt werden kann:

- Belastung 1 Mio Tonnen/Jahr:
  $d(cm) = 26 - 29{,}4 \cdot \log CBR$
- Belastung 0,2 Mio Tonnen/Jahr:
  $d(cm) = 23 - 28{,}9 \cdot \log CBR$

Tabelle 5. Dicke der Fundationsschicht in cm unter einem Regelschotterbett bei Hauptgleisen in Funktion des CBR-Wertes (%)

Schwellentyp	Schienenprofil	Dicke der Fundationsschicht [cm]
Holz oder Stahl	SBB I	55–37,5 · log CBR
	SBB IV	53–37,3 · log CBR
	SBB VI	51–37,7 · log CBR
Zweiblockbeton	SBB I	59–38,4 · log CBR
	SBB IV	57–38,8 · log CBR
	SBB VI	(55–38,4 · log CBR)
Einblockbeton	SBB I	(60–39,7 · log CBR)
	SBB IV	(57–40,5 · log CBR)
	SBB VI	55–40,9 · log CBR

In Bild 4 bis 7 sind die *Bemessungskurven* aufgezeichnet.

Für das Vorprojekt oder für die Bemessung von Verbindungsgleisen kann in erster Annäherung eine Schätzung des Tragfähigkeitswertes CBR gemäss SN 640 317 vorgenommen werden. Dabei kann von der Bodenart (Klassifikation nach USCS) und vom Trockenraumgewicht ausgegangen werden. Die Werte der Tabelle 6 gelten für Materialien der Dammschüttung, die mit dem optimalen Wassergehalt verdichtet wurden sowie in geringen Einschnitten mit bestehender Drainage und günstigen hydrologischen Bedingungen, wenn der Boden bis mindestens 60 cm verdichtet ist.

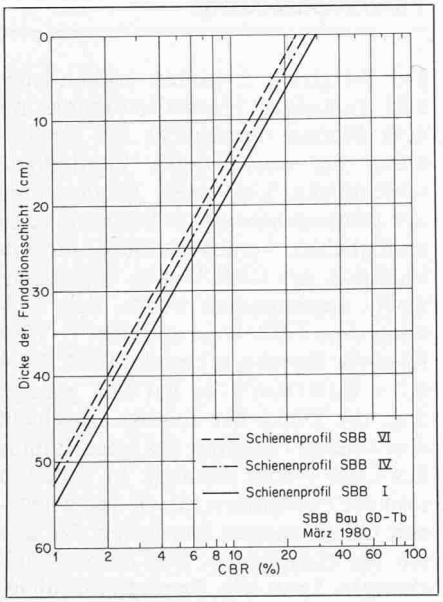

Bild 4. Dicke der Fundationsschicht in Hauptgleisen unter Holzschwellen

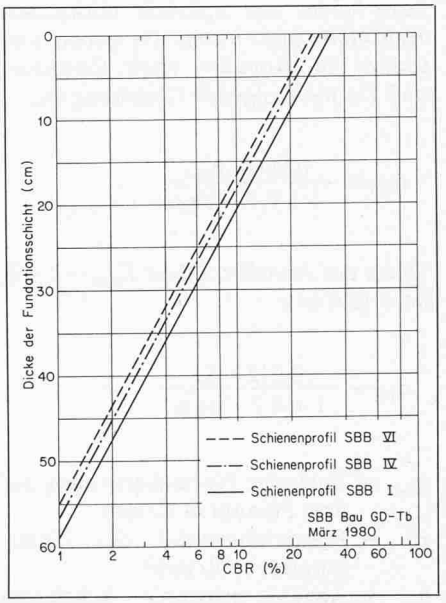

Bild 5. Dicke der Fundationsschicht in Hauptgleisen unter Zweiblockbetonschwellen

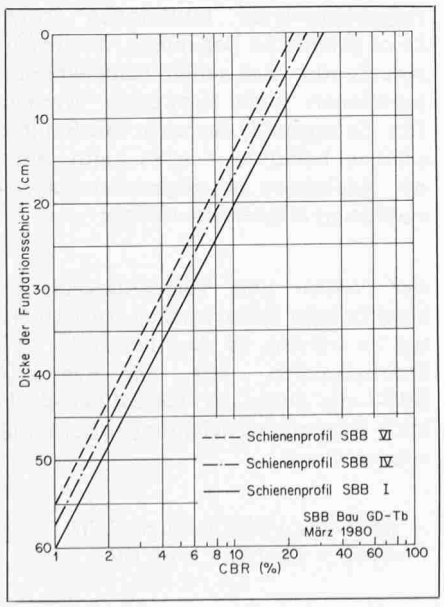

Bild 6. Dicke der Fundationsschicht in Hauptgleisen unter Einblockbetonschwellen

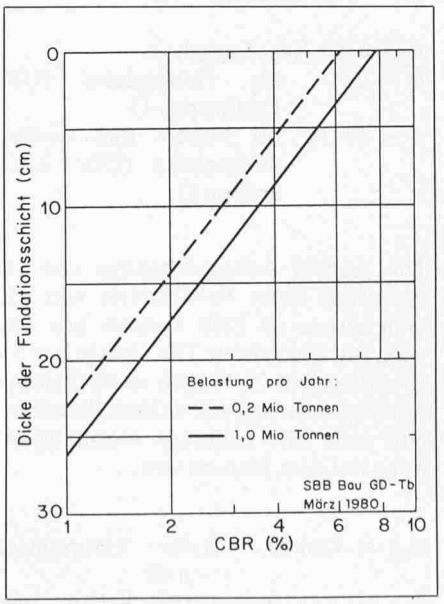

Bild 7. Dicke der Fundationsschicht in Neben-, und Verbindungsgleisen unter Holz- und Stahlschwellen mit Schienenprofil SBB I

Vergleich mit Messungen und mit bestehenden Eisenbahnkörpern

Leider fehlt bei den in der Literatur angegebenen Messungen oft eine qualitative oder quantitative Beschreibung des Untergrundmaterials, das einen massgebenden Einfluss auf die Normalspannung unter der Schwelle ausübt. In einem Bericht des ORE [8] wird folgender Wert, der auf einer Strecke der Deutschen Bundesbahn bei Neustadt gemessen wurde, angegeben: $\sigma = 0{,}44\ kg/cm^2$ in einer Tiefe von 45 cm unter Schwellenunterkante. Bei der Messstelle war folgender Schichtenaufbau unter der Schwelle vorhanden: Unter dem Schotterbett von 30 cm lag eine 15 cm dicke Fundationsschicht auf einem Untergrund, der aus stark feinsandigem Silt bestand. Der CBR-Wert des Untergrundes ist nicht angegeben, er dürfte schätzungsweise 10% betragen haben. Das Schienenprofil wies ein Trägheitsmoment von 1819 cm^4 auf und der Schwellenabstand betrug 63 cm.

Dieser Gleisrost dürfte im Untergrund bei gleicher Achslast ungefähr dieselbe Normalspannung erzeugen wie der Regeloberbau der SBB mit Holzschwellen und Schienenprofil SBB I. Die theoretische Berechnung ergibt für den beschriebenen Aufbau auf dem Planum eine Vertikalspannung von 0,43 kg/cm^2 ohne Stosszuschlag beziehungsweise 0,64 kg/cm^2 mit Stosszuschlag. Das theoretische Verfahren stimmt demnach recht gut mit dem Messwert aus einem Betriebsgleis überein.

Sehr oft wird angenommen, eine Eisenbahnfundation müsse wegen den relativ hohen Achslasten mindestens so dick oder dicker sein als eine Strassenfundation. Die vor Totalumbauten (Auswechseln von Schienen, Schwellen und allenfalls Schotter) durchgeführten Streckenuntersuchungen zeigen aber immer wieder, dass selbst stark belastete Strecken mit 400 MN Last pro Tag, entsprechend 80 Güterzügen zu 500 Tonnen, oder mehr, einen Unterbau aufweisen, der schwächer ist als der einer untergeordneten Quartierstrasse oder eines Forstweges. In diesem Sinne sei nur der Gleisabschnitt Hindelbank – Schönbühl der Strecke Zürich – Bern erwähnt, auf dem vor der kürzlich erfolgten Sanierung das Schotterbett lokal direkt auf einem Untergrund aus tonigem Silt ruhte. Auf diesem «Unterbau» rollte seit Jahrzehnten ein Verkehr von durchschnittlich rund 150 MN pro Tag. Es ist klar, dass bei derartigen Verkehrslasten ein Gleisunterhaltsaufwand getrieben werden muss, der beträchtlich reduziert werden kann, wenn eine entsprechend bemessene Fundation eingebaut wird.

Tabelle 6. Schätzung der notwendigen Fundationsschichtdicke

Klassifikation USCS	γ_d [kN/m³]	CBR (%)	Dicke der Fundationsschicht [cm]	
			Hauptgleis Einblockbeton SBB VI	Verbindungsgleis Holz/Stahl SBB I
GW	20,0...22,5	60...80	0	0
GP	17,5...21,0	25...60	0	0
GM	21,0...23,0	40...80	0	0
GC	19,0...22,5	20...40	20...0	0
SW	17,5...21,0	20...40	20...0	0
SP	16,0...19,0	10...25	20...0	0
SM	19,0...21,5	20...40	20...0	0
SC	17,0...21,0	10...20	20	0
ML	16,0...20,0	5...15	30...20	20...0
CL	16,0...20,0	5...15	30...20	20...0
* OL	-	< 8	> 20	> 0
* MH	-	< 8	> 20	> 0
* OH	-	< 5	> 30	20
* CH	-	< 5	> 30	20

* Diese Böden sind im allgemeinen stark zusammendrückbar und verlangen wegen den zu erwartenden grossen Setzungen Spezialmassnahmen.

Vergleich mit Vorschriften ausländischer Bahnen

Die *Deutsche Bundesbahn* (DB) schreibt bei Umbauten, falls eine Planumsschutzschicht notwendig ist, eine Dicke von 30 cm vor. Bei Neubauten wird je nach Gleisart eine frostsichere Kiessandschicht von 50–70 cm Dicke eingebracht.

Die *Deutsche Reichsbahn* (DR) bestimmt die Fundationsschichtdicke aufgrund der Bodenart, des Konsistenzindexes, der Tragfähigkeit sowie der hydrologischen Bedingungen des Untergrundes.

Tabelle 7. Auf Tragfähigkeit bemessene Fundationsschicht in Hauptgleisen ausländischer Bahnen

Gesellschaft	Schotterbettdicke unter UK-Schwelle [cm]	Dicke der Fundationsschicht [cm]
DB	30	0 oder 30
DR	30	0–45
SNCF	15–20	0–30
	32–35	0–40
BR	23	15–38
SBB	25	0–60

Bei der *Französischen Staatsbahn* (SNCF) wird je nach Bodenart und Verkehrslast eine Fundationsschicht von 0–30 cm Dicke eingebaut, die durch 10 cm Filtersand ergänzt wird, falls Schotterbettverschlammungen befürchtet werden müssen. Bei Schnellbahnen beträgt die Fundationsschichtdicke bis 40 cm und die Dicke der allenfalls notwendigen Filterschicht 15 cm.

Die *Britische Staatsbahn* (BR) bestimmt die notwendige Fundation einer Strekke aufgrund der Verkehrslast und der zugelassenen Höchstgeschwindigkeit.

In Tabelle 7 sind die verschiedenen Vorschriften einander gegenübergestellt.

In *Norwegen, Schweden* und *Finnland steht die Bemessung bezüglich Frost* im Vordergrund. In Norwegen beträgt die frostsichere Schicht unter UK-Schwelle bis zu ca. 1,5 m, in Finnland sogar bis zu ca. 1,8 m. In diesen Ländern werden infolge grosser Frosteindringtiefe oft *Wärmedämmschichten aus Kunststoff* eingebaut.

Vergleich mit der Strasse

Flexible Strassen werden in der Schweiz gemäss SN 640 322 bemessen. In Tabelle 8 ist eine Strassenbemessung gemäss dieser Norm einer Gleisbemessung gemäss Bild 6 gegenübergestellt. Kennwerte des Eisenbahnkörpers: Schienenprofil SBB VI, Schotterbett mit $E = 100$ N/mm², Fundationsschicht aus Kiessand mit $E = 50$ N/mm². Kennwerte des Strassenkörpers: Tragschicht aus HMT und Belag mit $E = 1000$ N/mm² sowie Fundationsschicht aus Kiessand I mit $E = 50$ N/mm².

Im Vergleich zu den Werten des Gleises sind die Fundationsschichtdicken der Strasse um rund 100 bis 450% und die Normalspannungen auf dem Planum um rund 20 bis 200% höher. Der Vergleich zeigt, dass ein *Gleisrost die Lasten sehr günstig zu verteilen vermag*. Liegt ein Gleisoberbau auf einem Unterbau mit $E = 50$ N/mm², beträgt die Schotterpressung (Pressung UK-Schwelle) unter einer Radlast von 50 kN 0,05 N/mm² ohne Stosszuschlag. Um dieselbe Spannung unter einer bituminösen Befestigung auf demselben Unterbau zu erzeugen, ist bei einer Dikke von 17 cm ein E-Wert von 5000 N/mm² und bei einer Dicke von 22 cm ein E-Wert von 2500 N/mm² erforderlich. Da der E-Wert von bituminösen Schichten stark temperaturabhängig ist, treten diese Werte erst bei ungefähr 0 Grad Celsius beziehungsweise 10 Grad Celsius auf. *Blumer* [9] gibt bei einer Radlast von 50 kN unter einer 10 cm dicken bituminösen Befestigung eine Normalspannung von 0,2 N/mm² im Frühjahr beziehungsweise 0,5 N/mm² im Sommer an.

Die Erkenntnis, dass der Gleisrost die Lasten sehr gut verteilt, machten sich die Bahnbauer im letzten Jahrhundert zunutze, indem sie höchstens die Humusschicht entfernten und anschliessend, meistens ohne einen Unterbau einzubringen, direkt das Schotterbett aufbrachten. Während Jahrzehnten bestand der Gleisbau im wesentlichen aus dem Schütten von Schotter und dem Verlegen von Schwellen und Schienen. Ein eigentliches Wissen um die Probleme des Unterbaus hat sich im Eisenbahnbau erst in den letzten Jahren entwickelt. So kam und kommt es heute noch vor, dass durch den Strassenbau geprägte Ingenieure auch im Bahnbau Fundationsschichten von 60 bis 80 cm Dicke oder mehr, oft noch verbunden mit Untergrundstabilisierungen, vorschlagen.

Tabelle 8. Vergleich der Schichtdicken und Normalspannungen von Gleis und Strasse

CBR (%)	Gleis			Strasse								
				TF = 100			TF = 300			TF = 1000		
	h_1 [cm]	h_2 [cm]	σ_2 [N/mm²]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	σ_2 [N/mm²]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	σ_2 [N/mm²]	h_1 [cm]	h_2 [cm]	σ_2 [N/mm²]
5	24	26	0,027	10	51	0,078	13	*	-	17	*	-
10	24	14	0,055	10	35	0,152	13	42	0,107	17	52	0,067
15	24	7	0,082	10	28	0,221	13	32	0,163	17	38	0,104

* Verbesserung des Untergrundes oder Stabilisierung der Fundationsschicht notwendig

h_1 Dicke des Schotterbettes unter UK Schwelle bzw. Dicke der Tragschicht

h_2 Dicke der Fundationsschicht

σ_2 Normalspannung auf dem Planum infolge einer Radlast von 100 kN ohne Stosszuschlag

Der Vergleich Gleis - Strasse lässt sich wie folgt zusammenfassen: Bei höherer Achslast, dünnerer Fundationsschicht, schmälerer Fahrbahn und geringerer Normalspannung vermag *ein Gleis während der Lebensdauer des Unterbaus viel mehr Verkehrslast zu tragen als eine vergleichbare Strasse. Die Eignung der Eisenbahn für den Transport schwerer Lasten wird dadurch eindrücklich untermauert.* In Bild 8 ist der Vergleich Gleis - Strasse bezüglich Bemessung der Fundationsschicht dargestellt.

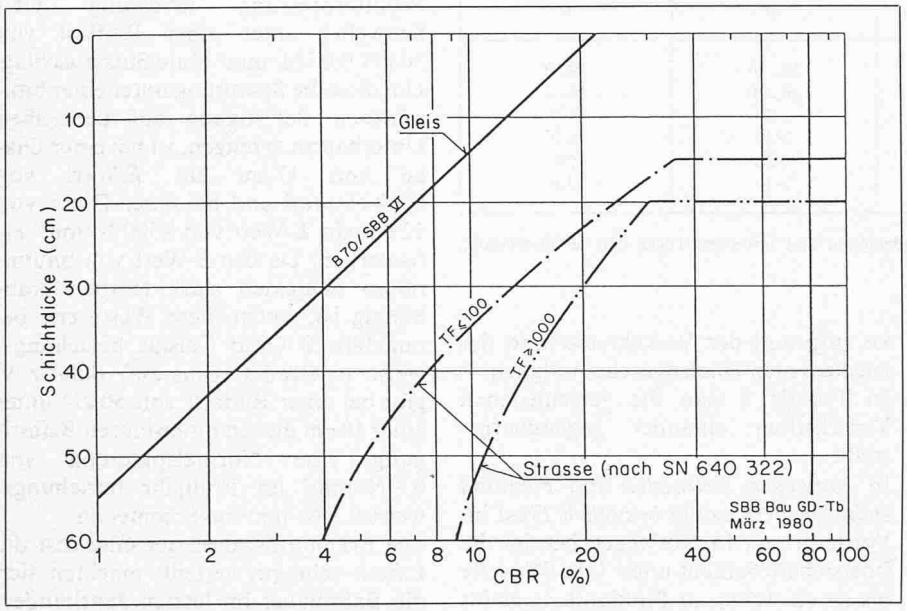

Bild 8. Vergleich der Fundationsschichtdicke Gleis-Strasse

Bemessung bezüglich Frost

Die Bemessung bezüglich Frost könnte grundsätzlich aufgrund der SN-Normen vorgenommen werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass der *Eisenbahnoberbau weniger sensibel auf Frost* reagiert als der Strassenoberbau, da seine Konstruktion die Überwindung von örtlichen Schwachstellen erlaubt. Wichtig ist, dass allfällige Frosthebungen quer zur Gleichsachse gleichmässig auftreten, keine Verwindungen bewirken und dass die Unterbautragfähigkeit nach einer Frostperiode nicht geringer ist als vorher. Im allgemeinen wird deshalb eine Bemessung auf die mittlere Frosttiefe genügen. In Tabelle 9 ist die aus [10] entnommene mittlere Frosteindringtiefe während 10 Jahren von einigen Orten, nach SBB-Kreisen geordnet, angegeben.

Annähernd kann die *mittlere Frosttiefe in Funktion der Meereshöhe* auch mit folgenden Gleichungen bestimmt werden:

- Tessin, Wallis, Genferseegebiet:
  X_{10} [cm] = 0,08 · H [m] + 15
- Einzugsgebiet der Aare, Westschweiz:
  X_{10} [cm] = 0,05 · H [m] + 53
- Zentralschweiz:
  X_{10} [cm] = 0,16 · H [m] − 7
- Ostschweiz:
  X_{10} [cm] = 0,08 · H [m] + 47
- Jura, Graubünden, Alpennordtäler:
  X_{10} [cm] = 0,15 · H [m] − 14

Mittels dieser Gleichungen bestimmt man zum Beispiel bei den SBB-Stationen mit den entsprechenden Meereshöhen für Genf 46 cm, Sitten 54 cm, Bern 78 cm, Luzern 63 cm, Airolo 106 cm, Bellinzona 34 cm, Zürich 80 cm, Chur 74 cm, St. Gallen 101 cm. Es stellt sich noch die Frage, wie weit das Schotterbett bei der Bemessung auf Frost mitberücksichtigt werden kann. Auf *Dämmen*, die *dem Wind voll ausgesetzt* sind, ist die isolierende Wirkung des Schotterbettes relativ gering. Hier spielt die Bemessung auf Frost aber eine untergeordnete Rolle, da meistens günstige hydrologische Bedingungen herrschen. In der Ebene und im Einschnitt darf das Schotterbett hingegen erfahrungsgemäss ganz zur Frostschutzschicht gezählt werden, sofern kein Durchblasen des Schotterbettes durch den Wind erfolgen kann. Dies hat zur Folge, dass zum Beispiel im Mittelland bei einer Meereshöhe von 500 m im allgemeinen die frostsichere Schicht unter dem Schotterbett eines Gleises mit Betonschwellen bei ungünstigen hydrologischen Bedingungen nicht dicker als etwa 30–40 cm gewählt werden muss. Im ausserordentlich kalten und frostintensiven Februar 1956 wurden auf der Strecke Saxon–Charrat bei ungünstigen hydrologischen Bedingungen und extrem frostgefährlichem Untergrundmaterial Frosteindringtiefen von 40–50 cm ab UK Schotterbett festgestellt. Die Frosttiefe X_{30} (mittlere Frosteindringtiefe der drei kältesten Winter in 30 Jahren) ist im Mittel rund 40 bis 80% grösser als X_{10}.

Zementstabilisierte Fundationsschichten

Wenn zementstabilisierte Fundationsschichten vorgesehen werden, ist bei der Bemessung folgendes zu beachten:

- Unter Verkehrslast wird die Unterseite der Schicht auf *Biegung* beansprucht, weshalb die *Dauerbiegezugfestigkeit der stabilisierten Schichten auf ihrer Unterseite nicht überschritten werden darf.*
- Eine zementstabilisierte Schicht weist einen *sehr hohen E-Modul* auf; dies ergibt eine hohe Bettungsziffer des Gesamtsystems, wodurch hohe Schotterpressungen erzeugt werden. Die Liegedauer des Schotters kann dadurch stark beeinträchtigt werden.

Die wirtschaftlichen Verwendungsmöglichkeiten von zementstabilisierten Fundationsschichten dürften recht beschränkt sein, da wegen der relativ geringen Dauerbiegezugfestigkeit eine Mindestschichtdicke notwendig ist *und* wegen den möglichen hohen Schotterpressungen eine Maximalschichtdicke nicht überschritten werden darf, bzw. zwischen Schotter und Zementschicht noch eine Ausgleichsschicht notwendig ist. Bei Überschreitung der Dauerbiegezugfestigkeit bilden sich Risse, die sich unter der Verkehrslast sukzessive vergrössern. Die Schicht wird allmählich zerstört, was eine rasche Verschlechterung der Gleislage bewirkt. Nach *Eisenmann* [11] beträgt die *Dauerbiegezugfestigkeit* einer zementstabilisierten Schicht ca. 0,5 N/mm². Dies bedeutet, dass die Mindestschichtdicke ca. 20 cm

Tabelle 9: Mittlere Frosteindringtiefe während 10 Jahren

Kreis	Temperaturmessstation	Höhe der Messstation (m ü.M.)	X_{10} [cm]
I	Bern	572	78
	Freiburg	670	85
	Genf	405	47
	La Chaux-de-Fonds	990	108
	Lausanne	589	58
	Neuenburg	487	65
	Sitten	549	55
II	Aarau	406	71
	Airolo	1170	103
	Altdorf	456	54
	Basel	318	69
	Bellinzona	236	27
	Luzern	497	70
	Sarnen	474	69
	Solothurn	470	70
III	Chur	609	77
	Frauenfeld	432	79
	Glarus	503	96
	Kloten	440	77
	Kreuzlingen	445	78
	Sargans	510	75
	Schaffhausen	448	77
	St. Gallen	664	100
	Zürich	569	78

betragen muss. Bei hohen Bettungsziffern wird die Tragwirkung der Schiene nicht ausgenützt. Bei *hohen Schotterpressungen* ergeben sich *Spannungskonzentrationen*, die zu *Kornverschiebungen* und *Kornabrieb im Schotterbett* führen, wodurch die Gleislage ebenfalls negativ beeinflusst wird. Nach *Eisenmann* [12] sollte deshalb insbesondere bei hohen Fahrgeschwindigkeiten die Bettungsziffer kleiner als 0,15 N/mm³ sein. Wie Messungen gezeigt haben, sind die Bettungsziffern bei zementstabilisierten Unterbauten im allgemeinen bedeutend höher. Bereits kleine Reduktionen der Schotterpressung verringern die Unterhaltungsintensität und wirken sich günstig auf das Langzeitverhalten der Gleisanlage aus.

Die beschriebenen Wirkungen und die Tatsache, dass in den meisten Fällen eine Fundationsschichtdicke von 20 bis 40 cm genügt, führt dazu, dass zementstabilisierte Fundationsschichten *nur für Ausnahmefälle* als zweckmässig erscheinen.

Anforderungen an den Fundationskiessand und die Schichthomogenität

Es ist grundsätzlich *Kiessand* gemäss den Qualitätsvorschriften nach SN 670 120a zu verwenden. Ob Kiessand I oder II eingebaut werden muss, hängt von der Durchlässigkeit und der Wasserempfindlichkeit des Untergrundes sowie der Oberflächenbehandlung der Planie ab. Da das Schotterbett extrem durchlässig ist, sickert sämtliches Oberflächenwasser ins Schotterbett ein. Bei einem *Durchlässigkeitskoeffizienten k* nach *Darcy* des Untergrundes grösser als etwa 10^{-5} m/s (Bodenarten GW, GP, evtl. GM) und tiefem Grundwasserspiegel kann das Niederschlagswasser versickern und die Fundationsschicht wird zweckmässigerweise aus Kiessand I hergestellt. Bei einem k-Wert kleiner als etwa 10^{-5} m/s und wasserunempfindlichem Untergrund (GM, SW, SP) kann ebenfalls Kiessand I eingebaut werden. Das Wasser sickert in diesem Fall durch Schotterbett und Fundationsschicht und muss auf dem Planum abgeleitet und in eine Entwässerung geführt werden. Häufig ist der Untergrund wenig durchlässig und wasserempfindlich (CL, ML, SC, SM), weshalb seine Scherfestigkeit durch hinzufliessendes Wasser bei dynamischer Beanspruchung verringert wird. Für die Sanierung von bestehenden Linien schreiben die SBB in diesem Fall einen speziellen Kiessand vor. Es handelt sich um einen Kiessand II gemäss SN 670 120a mit Zusatzbedingungen bezüglich Kornverteilung. In Bild 9 ist das *Kornverteilungsband* dargestellt. In bestehenden Gleisen wird die Fundationsschicht zutreffenderweise als *Planumsschutzschicht* bezeichnet. Sie hat im wesentlichen folgende Funktionen:

- Erhöhung der Tragfähigkeit,
- Ableitung des Niederschlagswassers auf ihrer Oberfläche,
- Filter gegenüber dem feinkörnigen Untergrund.

Ein solcher *Kiessand* kann nur in den seltensten Fällen direkt ab Wand gewonnen werden. Im Regelfall wird das *Gemisch aus einzelnen Fraktionen* im Kieswerk hergestellt, wobei eine stetige Kontrolle der Lieferungen durch die Werke und die SBB für gleichbleibende Qualität bürgt. Früher wurde anstelle

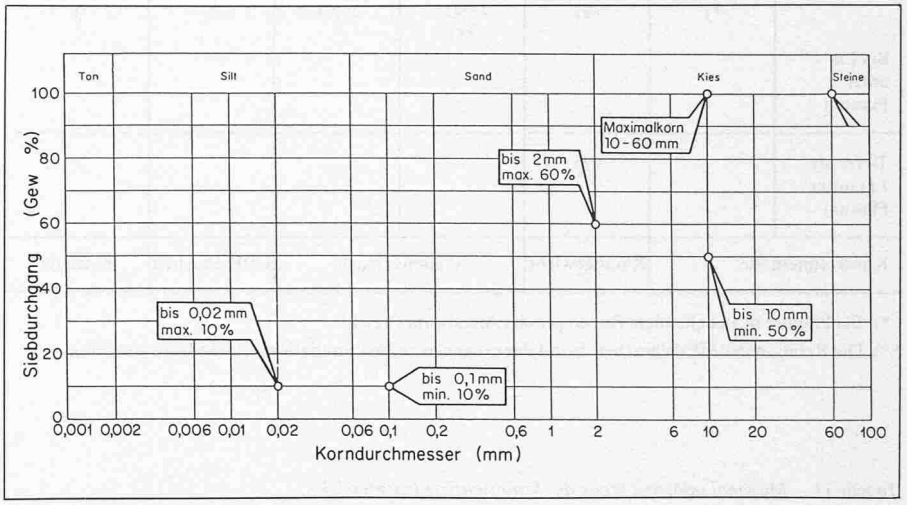

Bild 9. Zusatzbedingungen zu SN 670 120a für Kiessand II als Planumsschutzmaterial

Eine *hohe Tragfähigkeit der Schutzschicht* wird dadurch erreicht, dass ein Verdichtungsgrad von mindestens 95 bis 97% vorgeschrieben wird. Der Verdichtungsgrad wird als Verhältnis des Trockenraumgewichts zum optimalen Trockenraumgewicht nach Proctor Standard in Prozent definiert. Ein höherer Verdichtungsgrad ist, ausser bei Neubauten, praktisch kaum erreichbar, da die Umbauten meistens abschnittsweise in Nachtpausen und unter betrieblichen Behinderungen bei jeder Witterung durchgeführt werden müssen.

Die *Ableitung des Niederschlagswassers* erfolgt zu einem grossen Teil auf der *Schichtoberfläche*, deren Querneigung 4 bis 5% betragen muss, da das Kiessandmaterial infolge des hohen Feinanteilgehalts relativ undurchlässig ist und einen *k*-Wert kleiner als etwa 10^{-6} m/s aufweist. Die *Filterwirkung* wird durch den *relativ hohen Silt- und Sandanteil* sichergestellt. Die Funktionen der in Bild 9 dargestellten *Kornverteilungsbedingungen* können wie folgt umschrieben werden:

0,02 mm:	Begrenzung der Frostwirkungen auf ein zulässiges Mass
0,10 mm:	Sicherstellung der geringen Durchlässigkeit und Einhalten des Filterkriteriums
2/10 mm:	Sicherstellung von Verdichtbarkeit (Annäherung an Fullerkurve) und Tragfähigkeit (genügend Grobkorn)

dieses Kiessandes oft gleichförmiger Brechsand 0/3 mm verwendet, der nur einen Teil der Anforderungen an eine Planumsschutzschicht abdeckt und sich daher in vielen Fällen nicht bewährt hat. Seine Durchlässigkeit war zu gross, weshalb das Wasser in den Untergrund versickerte und diesen aufweichte, was zu Schlammaufstössen und Tragfähigkeitsverlusten führen musste.

Bei wasserempfindlichem Untergrund kann die Fundationsschicht dann aus Kiessand I hergestellt werden, wenn die Planie durch besondere Massnahmen, eine z.B.geschlämmte Schicht, abgedichtet werden kann.

Im Eisenbahnbau ist nicht unbedingt eine maximale Verdichtung, sondern in höherem Masse eine homogene Verdichtung im Bereich des Planums und der Fundationsschicht wichtig. In Tabelle 10 sind die minimal notwendigen Verdichtungs- und Tragfähigkeitswerte angegeben. Als Mass für die zulässige Streuung der Messwerte in einem bestimmten Abschnitt wird ein maximal zulässiger Variationskoeffizient CV vorgeschrieben, der in Tabelle 11 angegeben ist. Da die Fundationsschichtdikke meistens dünner als die Einflusstiefe der Platte beim Plattendruckversuch ist, wird zweckmässigerweise das Raumgewicht und nicht der ME-Wert für die Prüfung der Verdichtung gemessen. Werden Plattendruckversuche durchgeführt, so wird das Verhältnis von Zweitbelastungswert zu Erstbelastungswert für die Prüfung der erreichten Verdichtung als massgebend erachtet.

Tabelle 10. Minimale Verdichtungs- und Tragfähigkeitswerte

Schicht bzw. Fläche		Verdichtungsgrad %	ME-Wert [kg/cm²]	ME'/ME	CBR-Wert %	Setzung Δ h [mm]
Fundation	Planie	100	600 **)	≤2,3		
Bis 1 m unter Planum	Planum *)	97	150 **)	≤2,3	8	3
Tiefer als 1 m unter Planum		95				5
Kontrollmethode		Raumgewicht	Plattenversuch		CBR-Versuch	Achslast

*) Bei Planum in anstehendem Boden gemäss Angabe im Projekt

**) Die Relation der ME-Werte beruht auf der oft angewandten Fundationsschichtdicke von 50 cm

Tabelle 11. Maximal zulässige Werte des Variationskoeffizienten CV

Kontrollmethode		Raumgewicht		Plattenversuch	CBR-Versuch	Achslast
Messwert		Feuchtraumgewicht	Wassergehalt	M_E-Wert	CBR-Wert	Setzung
CV_{max}	Planie	0,03	0,20	0,30		
	Planum	0,05	0,30	0,50	0,45	0,50

Die zulässigen Toleranzen der Kontrollversuchswerte sind in Norm SN 640585a Ziff. 4 geregelt.

Entwässerung

Die Entwässerung des Eisenbahnkörpers ist *entscheidend für die Lebensdauer des Unterbaus und damit des Gleises*. Im Gegensatz zu einer befestigten Strasse, deren Tragschicht und Belag relativ undurchlässig ist, weist das Schotterbett eine *extrem hohe Durchlässigkeit* auf und das Niederschlagswasser sickert sehr rasch durch die Bettung auf die Unterbau- beziehungsweise Untergrundoberfläche und entfaltet dort in wasserempfindlichem Material seine zerstörende Wirkung. Bleibt das Wasser unter dem Schotterbett liegen, werden durch die Verkehrslast *Porenwasserspannungen* aufgebaut, welche die Scherfestigkeit sowie die Tragfähigkeit des Bodens und damit die Lebensdauer des Gleises herabsetzen. Die Verformungen des Planums nehmen zu, es bilden sich Mulden, die ständig mit Wasser gefüllt sind und eigentliche Schottersäcke, da die Schotterkörner nach unten rutschen. Um das Gleis lagegerecht zu halten, muss ständig neuer Schotter zugeführt werden. In bestehenden Gleisen wurden schon Schottersäcke bis zu 1 Meter Tiefe oder mehr festgestellt. In gewissen Böden wird Feinmaterial hochgepumpt, das die Schotterporen füllt und sogenannte Spritzstellen bildet. Ein verschlammtes Schotterbett kann nicht mehr reguliert werden, es verliert seine Elastizität und muss saniert werden. Aus diesen Gründen ist eine grosszügig bemessene Entwässerung, die periodisch kontrolliert und gereinigt wird sowie ein genügendes Quergefälle (mindestens 4 bis 5%) der wasserableitenden Oberfläche äusserst wichtig. Der beste Unterbau nützt nicht viel, wenn er nicht richtig entwässert wird. Bei bestehenden Gleisen ist eine Sanierung des Unterbaus nur dann sinnvoll und verantwortbar, wenn gleichzeitig oder besser vorgängig die Entwässerungsverhältnisse in Ordnung gestellt werden.

Verbindungs- und Nebengleise müssen ebenfalls entwässert werden. Hier wird im allgemeinen ein Bahngraben, der bei engen Platzverhältnissen und fehlender Vorflut als Sickergraben ausgebildet werden kann, genügen.

Literaturverzeichnis

[1] *Zimmermann, H.:* «Die Berechnung des Eisenbahnoberbaues», Ernst + Sohn, Berlin 3. Auflage 1941

[2] *Eisenmann, J.:* «Forschungsarbeiten auf dem Gebiet des Eisenbahn- und Strassenoberbaus.» Ernst + Sohn, Berlin 1974

[3] *Burmister, D.M.:* «The theory of stresses and displacements in layered systems and applications to the design of airport runways». Highway Research Board, Proc. Twenty-third Annual Meeting, 1943.
«The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems». Journal of Applied Physics, 1945

[4] *Odemark, N.:* «Investigations as to the Elastic Properties of Soils and Design of Pavements according to the Theory of Elasticity». Mitt. Nr. 77, Statens Väginstitut, Stockholm, 1949

[5] *Jones, A.:* «Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems». Highway Research Board, Bulletin 342, Stress Distribution in Earth Masses, National Research Council Washington D.C., 1962

[6] *Schneider, E.* «Ein Beitrag zur Erforschung des dynamischen Verhaltens des Schotteroberbaus bei Eisenbahnen». H. 20 der Mitt. des Instituts für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, 1974

[7] *Heukelom, W. und Klomp, A.J.G.:* «Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction». Proc. Int. Conf. on structural design of asphalt pavements, Ann Arbor 1962

[8] *ORE, R. D 71:* «Beanspruchung des Gleises, der Bettung und des Unterbaus durch Verkehrslasten». Utrecht 1970

[9] *Blumer, M.:* «Oberbau mit bituminösem Belag». SNV 640322, Strasse und Verkehr Nr. 8, 1972

[10] *Schnitter, G.:* «Aufbau der Strasse». Strasse und Verkehr 1959, S.325

[11] *Eisenmann, J.:* «Neuere Entwicklung beim Bau von Betonfahrbahnen». Strasse und Autobahn, H. 10, 1973

[12] *Eisenmann, J.:* «Verformungsverhalten der Schiene. Auswirkungen auf die Oberbaubeanspruchung, Lagestabilität und Störfunktion». ZEV - Glas. Ann. 104, Nr. 2, 1980

Adresse des Verfassers: *G. Schmutz*, dipl. Ing. ETH, Bauabteilung der Generaldirektion SBB, Mittelstr. 43, 3030 Bern