

# Der Oberbauschotter

## Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung

Der Oberbauschotter hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität und Haltbarkeit des Gleises. Es müssen daher eine Reihe von Anforderungen an den Schotter und an das Schotterbett gestellt werden. Die Schotterbeanspruchung infolge der dynamischen Kräfte wird an Hand bekannter Berechnungsmethoden beschrieben.



Der Schotteroberbau kann als schwimmende Konstruktion betrachtet werden. Sind Schienen, Befestigungsmittel und Schwellen richtig bemessen, ist der Schotter das schwächste Glied.

Damit der Schotter seine Funktion optimal erfüllen kann, muss er sowohl den stofflichen als auch den granulometrischen Forderungen entsprechen.

Das Schotterbett muss so bemessen sein, dass die Verkehrslasten, die von den Schienen über die Schwellen auf den Schotter wirken, möglichst gleichmäßig auf den Unterbau abgeleitet werden. Bettungsstärke und Entwässerung des Planums sind für die Funktion des Schotterbettes wesentliche Faktoren. Unter der Einwirkung der Verkehrslasten wird das Schotterbett statisch und dynamisch beansprucht. Die von den vertikalen Kräften verursachten Pressungen und Spannungen müssen vom Schotterbett und vom Untergrund aufgenommen werden.

Die theoretischen Kenntnisse aller Beanspruchungen zeigen die Komplexität der Konstruktion Gleisrost, Schotterbett und Untergrund auf. Für die Tragfähigkeit des Schotterbettes ist dessen Scherfestigkeit von besonderer Bedeutung.

### 1. GESTEIN FÜR OBERBAUSCHOTTER

#### 1.1. ANFORDERUNGEN AN DAS ROHGESTEIN

Das Rohgestein für Oberbauschotter soll folgende Bedingungen erfüllen:

- Wetterbeständigkeit,
- große Zähigkeit,
- große Druckfestigkeit,

- keine Beimengungen, die die Luft- und Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigen, wie z. B. Lehm, Erde,
- das Gestein soll würfelig und scharfkantig brechen und
- der gebrochene Schotter soll schlag- und kantenfest sein.

Die Feststellung der obgenannten Eigenschaften erfolgt durch in Normen (z. B.: Europäische Norm EN bzw. ÖNORM) festgelegte Versuche.

Am besten eignen sich Hartgesteine (Granit, Basalt, Diabas usw.). Weichgesteine (Kalk, Dolomit, Sedimentgesteine usw.) haben eine geringere Druckfestigkeit.

#### 1.2. DIE WICHTIGSTEN GESTEINE FÜR OBERBAUSCHOTTER – ÜBERBLICK

##### Granit

Granite sind massige, relativ grobkristalline, magmatische Tiefengesteine, die reich an Quarz und Feldspäten sind, aber auch dunkle Minerale, z. B. Glimmer, enthalten.

Im Allgemeinen ist Granit mittel- bis grobkörnig mit einer homogenen Mineralverteilung. Die Größe der Kristalle schwankt meistens zwischen 1 mm und mehreren cm. Man kann für gewöhnlich alle Kristalle mit bloßem Auge erkennen.

Das Farbspektrum reicht bei Graniten von hellem Grau bis bläulich, rot und gelblich. Dabei spielen die Art der Erstarrung und Umwelteinflüsse, denen das Gestein ausgesetzt war, ebenso eine Rolle, wie der Mineralgehalt. Die gelbe Farbe angewitterter Granite kommt von Eisenhydroxidverbindungen, die infolge von Verwitterungseinflüssen aus den im Granit enthaltenen, Eisen führenden Mineralen entstanden sind.

Es gelten grob folgende Regeln: Gelbe Granite



**Dipl.-Ing. Erwin Klotzinger**  
Konsulent für Gleisbau  
bei Plasser & Theurer, Villach

erwin.klotzinger@aon.at

sind meistens technisch schlechter als graue. Bei diesen wurden die Feldspäte zum Teil in Tonminerale umgewandelt, was mit einem deutlichen Rückgang der Festigkeitseigenschaften verbunden ist.

##### Basalt

Basalt ist ein basisches (kieselsäurearmes), vulkanisches Ergussgestein. Es besteht vor allem aus einer Mischung von Eisen- und Magnesium-Silikaten mit Olivin und Pyroxen sowie kalziumreichen Feldspäten. Basalt entsteht, wenn dünnflüssige, kieselsäurearme Lava an der Erdoberfläche austritt und relativ schnell erkaltet.

Basalt ist für gewöhnlich dunkelgrau bis schwarz. Er besteht zum größten Teil aus einer feinkörnigen Grundmasse. Als Baustoff findet Basalt aufgrund seines druckfesten, schwer zu bearbeitenden, aber nicht zu spröden Charakters hauptsächlich für den Unterbau von Straßen und Bahngleisen Verwendung.

Eine Sonderform stellt der so genannte Sonnenbrennerbasalt dar, der leicht zerfällt, und daher für viele technische Anwendungen nicht geeignet ist. Die Ursache für den Zerfall liegt in seinem hohen Gehalt an Olivin, welcher gegenüber der Verwitterung extrem anfällig ist.

Die Erscheinungsform erkalteter basaltischer Lava hängt hauptsächlich von zwei Faktoren

ab. Kühlt eruptierte Lava schnell ab, entsteht ein zusammenhängendes Gesteinsgefüge. Findet die Abkühlung jedoch verzögert statt, entstehen durch das Zusammenziehen mehreckige (in der Regel sechseckige) Basaltsäulen.

### Diabas

Diabas zählt zu den so genannten Vulkangesteinen (Magmatite) und ist durch die Umwandlung 500 Millionen Jahre alter basaltischer Lava entstanden.

Diabase sind dicht bis mittelkörnig. Durch Feldspateinsprenglinge erhält das Gestein bisweilen ein porphyrisches Gefüge. Die Druckfestigkeit von Diabas ist ungefähr gleich oder etwas niedriger als jene von Basalt.

### Granulite

Granulite sind metamorphe Gesteine, d.h. die Struktur des Mineralbestandes wurde durch Druck und hohe Temperaturen grundlegend umgestaltet. Sie sind grau oder (selten) rötlich und enthalten vorwiegend Feldspat und Quarz. Ist der Feldspatanteil zu groß, ist das Gestein als Oberbauschotter nicht geeignet.

### Andere Hartgesteine

Aus vereinzelt auftretenden Ultramafitstöcken (z.B. in Österreich im oberen Murtal) werden mehr oder weniger stark serpentinisierte Dunite und Periododite sowie Bronzite abgebaut. Der vorliegende Rohstoff zeichnet sich als hart, zäh, griffig und abriebfest aus.

### Kalkstein

Kalkstein ist ein biogenes Sedimentgestein (Absatzgestein), das hauptsächlich aus kohlenstoffhaltigem Kalk (Calciumcarbonat  $[CaCO_3]$ , oft mit tonigen und sandigen Anteilen) sowie aus Dolomit  $[CaMg(CO_3)_2]$  besteht. Überwiegt der Dolomitanteil, so redet man von Dolomit.

Kalkstein hat eine wesentlich geringere Druck- und Abriebfestigkeit als die vorgenannten Hartgesteine und verwittert schneller.

### Gewinnung des Rohgesteines

Das Rohgestein für die Schotterherzeugung wird gewöhnlich aus Steinbrüchen im Tagbau gewonnen. Beim Abbau des Rohgesteins ist besonders darauf zu achten, dass das Gestein nur aus einwandfreien Zonen gewonnen wird, die keine Verwitterungserscheinungen und sonstige Verunreinigungen aufweisen.

## 1.3. TECHNISCHE ANFORDERUNGEN AN DEN OBERBAUSCHOTTER

### Stoffliche Eigenschaften

Der Schotter muss **verwitterungsbeständig** sein (Prüfung durch Kochen in einer Salzlösung). Die Wasseraufnahme darf 0,5 Gew.-%

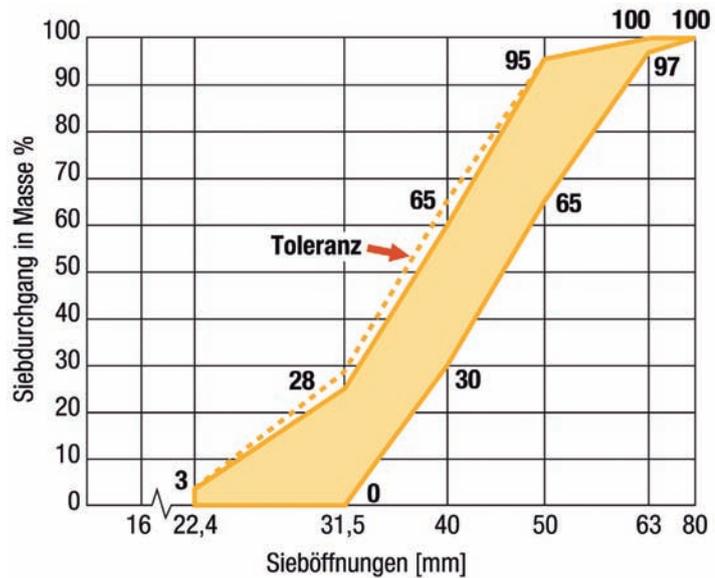


BILD 1: Sieblinie der Lieferkörnung 31,5/63 (ÖBB BH 700)

(Quelle: ÖBB)

nicht überschreiten. Beträgt die Wasseraufnahme mehr als 0,5 Gew.-%, ist eine Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel und ein Kristallisationsversuch durchzuführen und die Verwitterungsbeständigkeit nachzuweisen.

Der Schotter muss **raumbeständig** sein. Wenn bei einer Lieferung Basalt der Verdacht auf „Sonnenbrand“ (siehe Pkt. 1.2.2) besteht, muss eine petrografische Untersuchung (Zusammensetzung der Kristalle, Entstehung, Verwendbarkeit) durchgeführt werden.

Der Schotter muss eine hohe **Schlag- und Druckbeständigkeit** aufweisen. Bei den ÖBB erfolgt die Bestimmung der Schlag- und Druckbeständigkeit gemäß ÖNORM B 3127.

Der Schotter muss **widerstandsfähig** gegen **Zertrümmerung und Abrieb** sein. Die Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung erfolgt nach dem Los Angeles-Test gemäß EN 13450. Eine Probe von 10 kg (5 kg Körnung 31,5/40 und 5 kg Körnung 40/50) wird zusammen mit 12 Stahlkugeln (Gesamtgewicht  $5210 \pm 90$  g) mit einer Geschwindigkeit von 31-33 U/min 1000x in einem Zylinder um seine Achse gedreht. Nach Ablauf des Testes wird der Siebdurchgang durch ein 1,6 mm-Sieb bestimmt und daraus der LA-Koeffizient berechnet.

$$LA = \frac{10\,000 - m}{100}$$

m = Siebdurchgang durch das 1,6 mm-Sieb.

Der Schotter ist umso besser, je niedriger der LA-Koeffizient ist.

Der LA-Wert muss  $\leq 24$  Gew.-% betragen

Typische LA-Koeffizienten einiger Schotterarten:

Granit	12 – 15
Basalt	8,7 – 9,5
Diabas	9,5 – 10,5
Kalkstein	13,7 – 23

### Granulomerische Eigenschaften des Oberbauschotters

Die **Körnung** muss den Anforderungen des Infrastrukturunternehmens genügen. Die Kornzusammensetzung wird durch Siebung mittels Quadratlochsieben festgestellt. Die Lieferkörnung wird durch das Paar Siebe bezeichnet, zwischen denen der Hauptanteil der Körner liegt, z.B. ÖBB: Lieferkörnung 31,5/63 (Schotter I) für Hauptgleise und Lieferkörnung 16/31,5 (Schotter II) für Nebengleise.

Den Verlauf der Sieblinie und die zulässige Toleranz für Lieferkörnung 31,5/63 zeigt Bild 1.

Unbeanstandet bleiben für Lieferkörnung 31,5/63:

- Unterkornanteile < 22,4 mm bis zu 3 Gew.-% bei der Probenahme im Werk und bis zu 5 Gew.-% bei der Probenahme auf der Baustelle.
- Unterkornanteile < 0,5 mm bis zu 1 Gew.-% bei Trockensiebung.

Mehr als 6 Gew.-% Körner mit einer Länge > 100 mm sind in einer Schotterprobe nicht zugelassen.

Hinsichtlich der **Kornform** muss der Oberbauschotter aus unregelmäßig geformten, scharfkantigen Körnern bestehen.

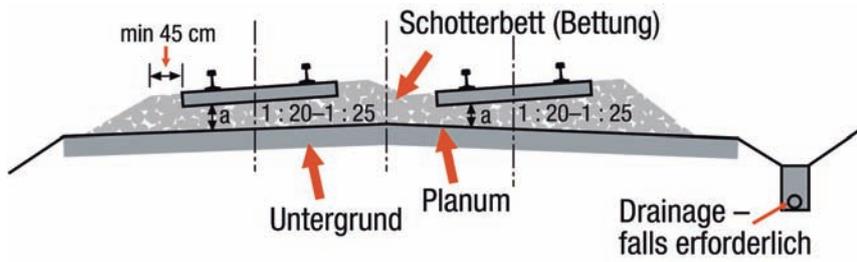
Der Anteil an Körnern mit einem Verhältnis l:d (Länge/Dicke) > 3:1 muss zwischen 5 und 30 Gew.-% liegen. Geprüft werden die Korngruppen 31,5/50 bzw. 16/31,5.

Der Oberbauschotter muss **rein** sein. Er darf keine Fremdstoffe, wie organische, mergelige und tonige Verunreinigungen aufweisen.

Die abschlämmbaren Bestandteile < 0,063 mm dürfen 1 Gew.-% nicht überschreiten.

Um einen möglichst großen Reinheitsgrad zu erreichen, soll der Oberbauschotter im Lieferwerk gewaschen werden.

»



**BILD 2:** Querschnitt des Schotterbettes, zweigleisige Strecke, Bogen mit Überhöhung  
(Quelle aller weiteren Bilder und Tabellen, wenn nicht anders angegeben: Autor)

Diese Aufgaben werden erfüllt durch

- Wahl der Bettungsstärke,
- Wahl des Bettungsquerschnittes,
- Wahl der Schotterqualität,
- Güte der Verdichtung des Schotters.

### 2.3. BETTUNGSSTÄRKE

Zur Erzielung einer möglichst günstigen Übertragung der Betriebslasten auf den Untergrund ist eine möglichst große Bettungsstärke anzustreben (Bild 2).

Die Bettungsstärke muss so groß sein, dass sich die Druckverteilungslinie benachbarter Schwellen über der Unterbaukrone (Planum) schneiden, da sonst der Untergrund zwischen den Schwellen hochgedrückt wird (Bild 3). Die Bettungsstärke ist daher abhängig von

- Abstand der Schwellen,
- Breite der Schwellen,
- Druckverteilungswinkel.

Bei Achslasten von 220 kN, wie sie in Europa üblich sind, soll bei einem Schwellenabstand von 60 cm und einer Schwellenbreite von 26 cm eine Bettungsstärke von mindestens 30 cm vorhanden sein. Für Hochleistungsstrecken wird eine Bettungsstärke von 40 cm angestrebt.

### 2.4. BETTUNGSQUERSCHNITT

Die Bettungsbreite beeinflusst den Verschiebewiderstand der Schwellen in der Schwellenlängsachse wesentlich. Der Verschiebewiderstand ist umso größer, je mehr Schotter vor den Schwellenköpfen gelagert ist. Die Mindestbreite des Schotterbettes vor den Schwellenköpfen soll 45 cm betragen (siehe Bild 2).

### 2.5. KORNFORMEN IM SCHOTTERBETT

Das belastete Schotterbett besteht hauptsächlich aus dem **Skelettkorn** (Kornform des gelieferten reinen Schotters) und anteilig – je nach Betriebsbelastung und Oberbauverhältnissen – aus dem **Distanzkorn** und dem **Füllkorn** (Bild 4).

Ein neu hergestelltes Schotterbett besteht fast zur Gänze aus dem Skelettkorn.

Durch die Betriebsbelastung werden die Kanten des neuen Schotters stark beansprucht. Der Abrollvorgang des Rades auf der Schiene bewirkt vor dem Erreichen der Schwelle ein geringfügiges Anheben und beim Überrollen ein schlagartiges Aufsetzen der Schwelle auf den Schotter. Dies führt zu Absplitterungen der Schotterkörner an den Berührungspunkten bis die Kontaktflächen so zahlreich sind, dass die geforderten Lasten durch den Schotter abgeleitet werden.

Das Distanzkorn, welches sich durch die Absplitterung bildet, verbessert die Scherfes-

## 2. DAS SCHOTTERBETT

### 2.1. ANFORDERUNGEN AN DAS SCHOTTERBETT

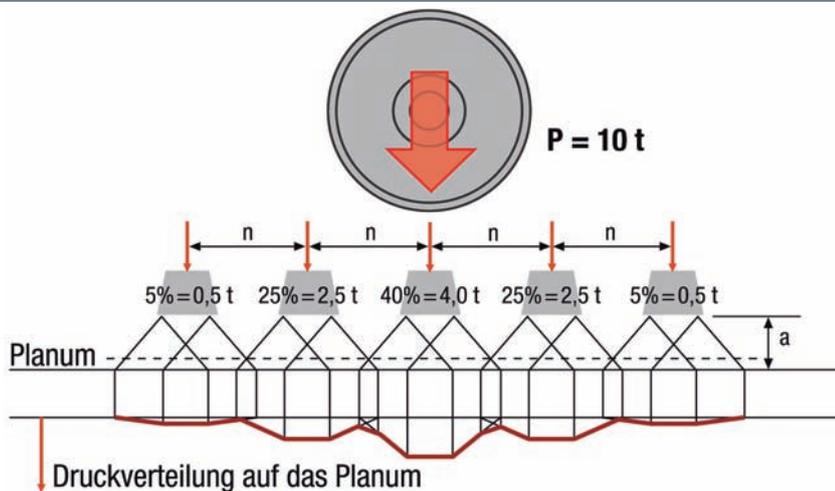
Ein sauberes, elastisches und homogenes Schotterbett ist eine wesentliche Voraussetzung für eine problemlose Funktion des Rad-Schiene-Systems. Das Schotterbett hat auf die Lebensdauer und auf die Güte der Gleislage und damit auch auf die Wirtschaftlichkeit der Oberbauinstandhaltung einen erheblichen Einfluss.

### 2.2. AUFGABEN DES SCHOTTERBETTES

Das Schotterbett hat folgende Aufgaben zu

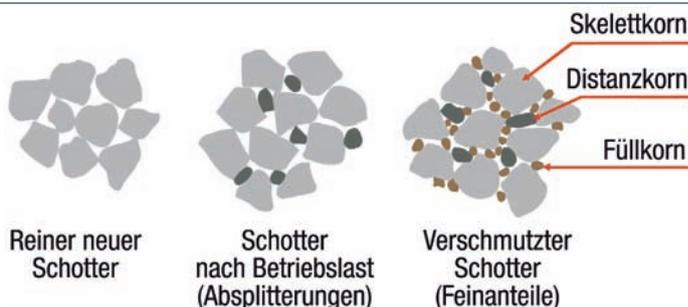
erfüllen:

- Möglichst gleichmäßige Verteilung des von den Radlasten auf die Schwellen ausgeübten Druckes auf den Unterbau.
- Gewährleistung der Gleiselastizität zur Minimierung der dynamischen Kräfte.
- Sicherung der festen und unverschiebbaren Lage der Schwellen, d.h. großer Widerstand gegen Längs- und Querverschiebungen der Schwellen.
- Leichte Wiederherstellung der Gleislage nach deren Veränderung durch die Betriebslasten.
- Gute Wasser- und Luftdurchlässigkeit zur Sicherung einer langen Lebensdauer der Schwellen und Erhaltung der Tragfähigkeit des Unterbaues.



**BILD 3:** Druckverteilung unter einer Einzellast von 10 t

**BILD 4:** Kornformen



tigkeit (siehe Pkt. 3.6: „Scherfestigkeit des Schotterbettes“). Im Laufe der Zeit nimmt jedoch der Anteil an Distanzkorn zu, es bildet sich zusätzlich feineres Material, das Füllkorn, welches nach einer Betriebsbelastung von mehreren Mio. Lastwechsel die Skelettkörner umschließt. Dadurch wird der innere Reibungswinkel des Materials kleiner, die Scherfestigkeit wird verringert und damit auch die Tragfähigkeit. Füllkorn kann aber auch durch aufsteigendes Feinkorn aus lehm- oder tonhaltigem Untergrund in das Schotterbett gelangen.

Im Bild 5 sind die charakteristischen Sieblinien der oben genannten Kornformen dargestellt. Die eingezeichnete Fullerkurve entspricht einer sehr ungleichförmigen Körnung mit größter Dichte.

### 3. SCHOTTERBEANSPRUCHUNG

#### 3.1. ALLGEMEINES

Unter der Einwirkung des Betriebes wird das Schotterbett quasi statisch und dynamisch beansprucht. Es sind vor allem die vertikalen Kräfte, welche Pressungen und Spannungen im Schotterbett und Untergrund erzeugen und von diesen aufgenommen werden müssen. Das Tragsystem Gleis ist daher so zu bemessen,

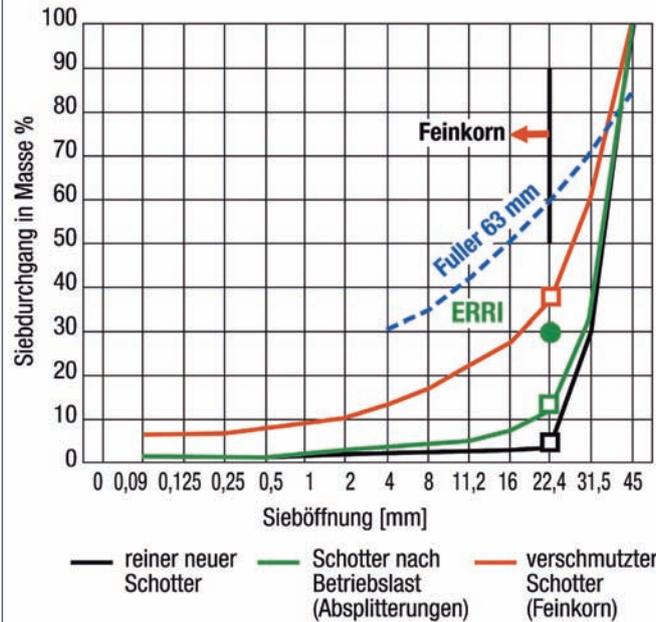


BILD 5:  
Charakteristische  
Sieblinien

sen, dass keine unzulässigen elastischen und plastischen Verformungen entstehen können. Dabei ist zu beachten: Auf Grund der nicht gleichmäßigen Auflagerung der Schwellen im Schotterbett, der nicht gleichmäßigen Verdichtung des Schotters und Untergrundes

sowie der Unregelmäßigkeit im Bereich der Schienen- und Radfahrfläche streuen die Beanspruchung und Verformung des Oberbaues stark. Die Streuung liegt je nach Oberbauzustand, Fahrzeug und Geschwindigkeit zwischen 10 und 30 %.

# Im Schnellzugtempo zu IRIS

Der Qualitätsstandard des International Railway Industry Standard ist vergleichbar mit dem aus der Automobilindustrie bekannten Standard ISO/TS 16949. Dabei legt der IRIS-Standard besonderen Wert auf die Überwachung und Steuerung von Projekten und Prozessen, und geht damit weit über die Anforderungen der DIN EN ISO 9001 hinaus. Damit entfällt für Zulieferer der Bahnindustrie, die auf WAGO Produkte setzen, zukünftig der Aufwand für kundenspezifische Auditierungen und Beurteilungen.

Im Rahmen der WAGO Qualitätsstrategie stellt die erfolgreiche IRIS-Zertifizierung einen bedeutenden Schritt dar, hochwertige Produkte und Leistungen sowohl im Bahnbereich als auch in anderen Industrie- und Gebäudetechnik-Anwendungen anzubieten.



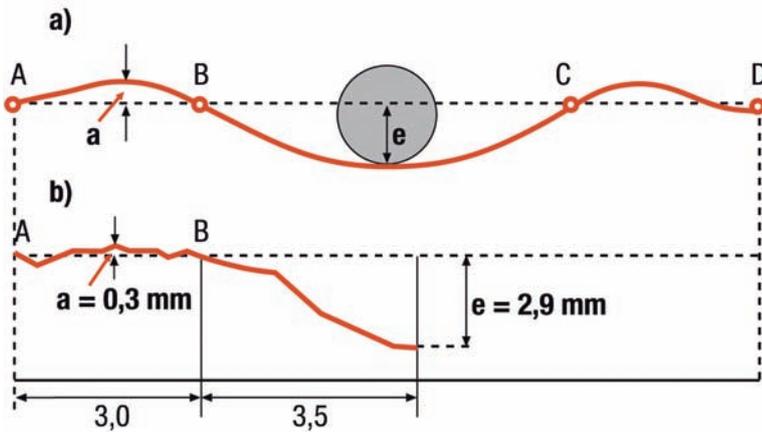


BILD 6: Durchbiegung der Schiene

Qualität der Bettung, des Unterbaues und des Untergrundes	Bettungszahl $C_b$ [N/cm <sup>3</sup> ]
Sehr schlecht (weicher Ton, organische Böden, gleichkörniger Sand)	< 50
Schlecht (halbfester Ton, lockerer Sand)	≥ 50
Gut (lehmiger und sandiger Kies)	≥ 100
Sehr gut (Kiessand, Planumsschutzschicht)	≥ 150
Betonsohle (Brücken, Tunnel, feste Fahrbahn)	≥ 300

TABELLE 1: Erfahrungswerte für Bettungszahl

### 3.2. VERTIKALE KRÄFTE

#### Beanspruchung des Schotterbettes und des Untergrundes durch vertikale Kräfte

Als vertikale Kräfte wirken

- die Radlasten,
- vertikal nach unten wirkende Schläge,
- vertikal nach oben wirkende Kräfte.

Die Radlasten für stehende Fahrzeuge sind im Allgemeinen bekannt (z. B. Lokomotive bis zu 125 kN). Während der Fahrt ändern sich jedoch die Radlasten sehr erheblich. Diese Änderungen sind abhängig von der Geschwindigkeit, dem Erhaltungszustand des Gleises und der Federung der Fahrzeuge.

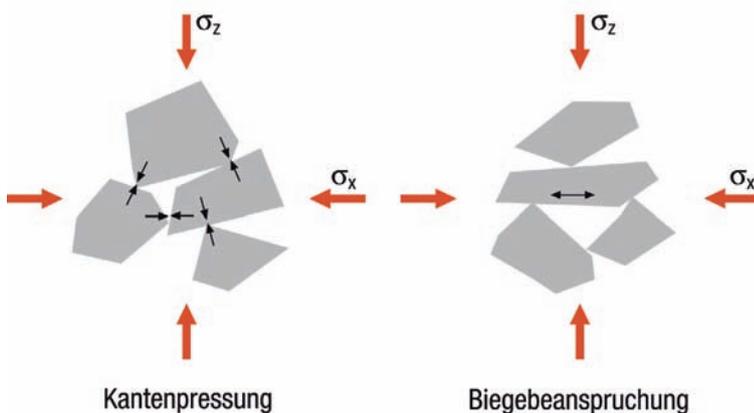
Vertikal nach unten wirkende Schläge treten an den Stoßlücken und bei unrunder Rädern (Flachstellen) auf.

Da die Schiene als ein Träger auf vielen elastischen Stützen zu betrachten ist, erklärt sich auch das Auftreten der nach oben wirkenden Kräfte. Diese Kräfte wirken auf die Schienenbefestigung.

#### Durchbiegung der Schiene

Das Bild 6 zeigt die Gegenüberstellung der theoretischen Durchbiegungslinie [a] der Schiene mit wirklichen Verformungen [b] nach Messungen der Deutschen Bahn (DB). Die Größe der Verformung ist abhängig von der Radlast, Steifheit der Schiene, Steifheit der Schwelle, vom Schwellenabstand, von der

BILD 7: Schotterbeanspruchung in der Lastachse



Elastizität der Bettung und von der Nachgiebigkeit des Untergrundes. Für die Oberbauberechnung werden die Schienen als lange Träger auf einer elastischen Unterlage mit der Bettungsziffer  $C_b$  betrachtet. Mit der Bettungsziffer  $C_b$  wird die Elastizität des Schotterbettes und des Untergrundes berücksichtigt.

$$C_b = \frac{p}{y}$$

- $C_b$  Bettungsziffer [N/cm<sup>3</sup>]
- $p$  Bettungsdruck [N/cm<sup>2</sup>]
- $y$  Elastische Einsenkung der Schiene [cm]

Mit der Bettungsziffer  $C_b$  wird das Verformungsverhalten des Gleises beschrieben.

Aus der Formel lässt sich ableiten: Bei großer Bettungszahl, z. B. Betonsohle, ist die Einsenkung gering und die Schotterpressung hoch. Bei niedriger Bettungszahl, z. B. weicher Ton, ist die Einsenkung groß und die Schotterpressung gering.

Für die Bettungszahl  $C_b$  gelten, in Abhängigkeit von der Qualität der Bettung, des Unterbaues und des Untergrundes die in Tabelle 1 angeführten Richtgrößen.

#### Auswirkungen der vertikalen Belastung

Unter Belastung treten an den Kanten der einzelnen Schotterkörner hohe, z.T. schräg zur Kontaktfläche gerichtete Druckkräfte auf, die zu Absplitterungen führen. Die insbesondere bei plattigen Steinen auftretende Biegebeanspruchung führt zu Brüchen und damit zu einer Veränderung des Kornaufbaues. Die Stelle der größten Beanspruchung liegt dabei in einer Tiefe entsprechend der halben Schwellenbreite (Bild 7).

### 3.3. SCHOTTERPRESSUNG UNMITTELBAR UNTER DER SCHWELLE

Die Größe der Schotterpressung unmittelbar unter der Schwelle kann mittels des bekannten Rechenverfahrens von Zimmermann ermittelt werden.

Nach der Theorie von Zimmermann werden die Auflager der Querschwellen in flächengleiche Langschwellen umgewandelt (siehe Bild 8).

Damit ergeben sich:

→ für die elastische Einsenkung:

$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C_b \cdot L} \cdot \sum \eta \text{ [cm]}$$

→ für die Schotterpressung unter der Schwelle:

$$p = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot L} \cdot \sum \eta = C_b \cdot y \text{ [N/cm}^2\text{]}$$

→ für die Stützpunktkraft:

$$S = b \cdot C_b \cdot a \cdot y \text{ [kN]}$$

Es bedeuten:

- $Q$  : Wirksame Radkraft = statische Radkraft + Zuschlag für Radkraftverlagerung [kN],
  - $Q = \text{stat } Q + \text{stat } \Delta Q$ .
- (Der Zuschlag für Radkraftverlagerung

beträgt je nach Bogenhalbmesser, Überhöhung und Schwerpunkthöhe des Fahrzeuges bei Bogenfahrt 10 bis 30 %.)

$b$  : Breite der Langschwelle [cm]

$C_b$  : Bettungsziffer [N/cm<sup>3</sup>]

$a$  : Schwellenabstand [cm]

Um den Einfluss mehrerer Achsen eines Fahrzeuges oder einer Lokomotive berücksichtigen zu können, wird der *Zimmermannsche* Einflussfaktor  $\eta$  herangezogen (siehe Tabelle 2). Für eine Einzellast in Schwellenmitte ist  $\eta$  mit dem Wert 1,0 anzusetzen. Für eine Einzellast beträgt daher unter Berücksichtigung des Oberbauerhaltungszustandes und der Fahrgeschwindigkeit die Einsenkung:

$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} = 1 + 3 \cdot s_a \cdot \varphi$$

$s_a$  Faktor zur Berücksichtigung des Oberbauerhaltungszustandes

0,1 bei sehr gutem Oberbauzustand

0,2 bei gutem Oberbauzustand

0,3 bei schlechtem Oberbauzustand

$\varphi$  Faktor für den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit  $V$ :

$V \leq 60$  km/h  $\varphi = 1,0$

$V > 60$  km/h bis  $V \leq 300$  km/h (Reisezüge)

$$\varphi = 1,0 + 0,5 \frac{V - 60}{190}$$

$V > 60$  km/h bis  $V \leq 140$  km/h (Reisezüge)

$$\varphi = 1,0 + 0,5 \frac{V - 60}{80}$$

### Beispielrechnung zur Schotterpressung unter Einzellast

#### Annahmen:

Fahrzeug

Statische Radlast: stat  $Q = 100$  kN

Zuschlag für Radlastverlagerung: 20 %

stat  $\Delta Q = 0,2 \cdot \text{stat } Q$

Wirksame Radlast:  $Q = \text{stat } Q \cdot 1,2 = 120$  kN

Geschwindigkeit:  $V_{\max} = 140$  km/h

Oberbau

Schiene UIC 60, lückenlos verschweißt:

$E = 21 \cdot 10^6$  N/cm<sup>2</sup>

$I = 3055$  cm<sup>4</sup>

Schwelle B70, wirksame Auflagerfläche

(50 cm auflagerfrei):  $F = 5930$  cm<sup>2</sup>

Schwellenabstand:  $a = 60$  cm

Bettungszahl (guter Untergrund):  $C_b = 100$  N/cm<sup>3</sup>

Guter Oberbauzustand:  $s_a = 0,2$

Zulässiger Bettungsdruck:  $p_{\text{zul}} = 30$  N/cm<sup>2</sup>

#### Berechnung bei gutem Untergrund mit einer Bettungszahl $C_b = 100$ N/cm<sup>3</sup>:

Einsenkung  $y = 0,271$  cm,

Schotterpressung  $p = 27,1$  N/cm<sup>2</sup> <  $p_{\text{zul}} =$

30,0 N/cm<sup>2</sup>

Stützkraft  $S = 80,5$  kN

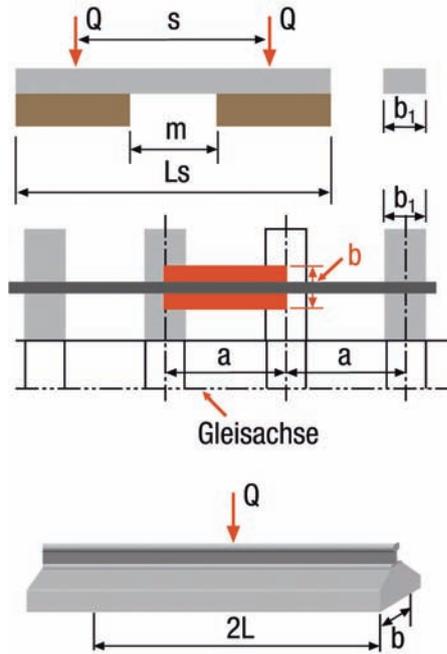
#### Berechnung bei schlechtem Untergrund mit einer Bettungszahl $C_b = 50$ N/cm<sup>3</sup>:

Einsenkung  $y = 0,444$  cm,

Schotterpressung  $p = 22,2$  N/cm<sup>2</sup> <  $p_{\text{zul}} =$

30,0 N/cm<sup>2</sup>

Stützkraft  $S = 65,9$  kN



$Q$  Radlast [N]  
 $s$  Spurweite [cm]  
 $L_s$  Schwellenlänge [cm]  
 $m$  ohne Auflager [cm]  
 $a$  Schwellenabstand [cm]  
 $b_1$  Schwellenbreite [cm]  
 $F = (L_s - m) \cdot b_1$  [cm<sup>2</sup>]  
 $b$  Breite der Langschwelle [cm]  
 $b = \frac{F}{2a}$

Für die fiktive Länge  $L$  gilt die Formel:

$$L = 4 \sqrt{\frac{4 \cdot E \cdot I}{b \cdot C}} \quad [\text{cm}]$$

$E$  Elastizitätsmodul [N/cm<sup>2</sup>]  
 $I$  Trägheitsmoment der Schiene [cm<sup>4</sup>]  
 $b$  Breite der fiktiven Langschwelle [cm]  
 $C$  Bettungsziffer [N/cm]

**BILD 8: Umwandlung des Querschwellenoberbaus in einen Langschwellenoberbau**

Für **sehr guten Untergrund** mit

$C_b = 250$  N/cm<sup>3</sup> ergibt sich:

Einsenkung  $y = 0,162$  cm,

Schotterpressung  $p = 40,5$  N/cm<sup>2</sup> >  $p_{\text{zul}} =$

30,0 N/cm<sup>2</sup>

Stützkraft  $S = 120,3$  kN

Aus diesen Berechnungen ist **zu ersehen**:

Kleine Bettungsziffer:

→ Größere Einsenkung  $y$ , dadurch stärkere Beanspruchung der Schiene.

→ Verringerung der Pressung  $p$  und der Stützkraft  $S$

Größere Bettungsziffer:

→ Hohe Pressung  $p$  und Stützkraft  $S$ , dadurch erhöhte Schotterbeanspruchung, welche Kornzertrümmerungen zur Folge

haben kann. Der Untergrund ist zu wenig elastisch.

Den hohen Schotterbeanspruchungen kann durch den Einbau von elastischen Zwischenlagen zwischen Schiene und Schwelle, Schwellenbesohlungen und Unterschottermatten entgegen gewirkt werden.

### 3.4. GESAMTSPANNUNGEN IN SCHOTTERBETT UND UNTERGRUND

Neben den vertikalen und waagrechten Hauptspannungen  $\sigma_z$  und  $\sigma_x$  treten auch Schubspannungen auf (Bild 9).

Unter Schubspannung versteht man gemäß allgemeiner Statik die im Querschnitt eines



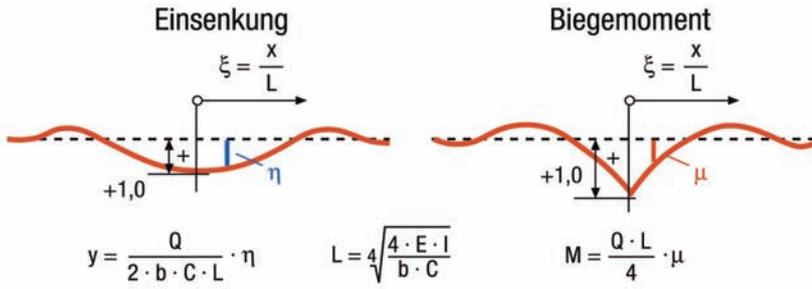
**GMUNDNER  
FERTIGTEILE**

# BODAN®

GLEISEINDECKUNGSSYSTEME  
LEVEL - CROSSING - SYSTEMS

E-Mail: [gf.bodan@gmundner-ft.at](mailto:gf.bodan@gmundner-ft.at)

[www.gmundner-ft.at](http://www.gmundner-ft.at) • [www.bodan.at](http://www.bodan.at)



xi	eta	mu	xi	eta	xi	eta	mu
0,0	1,00000	1,00000	2,2	0,02440	4,4	-0,01546	0,00791
0,1	0,99070	0,81000	2,3	0,00800	4,5	-0,01320	0,00852
0,2	0,96510	0,63980	2,4	-0,00560	4,6	-0,01112	0,00886
0,3	0,92670	0,48880	2,5	-0,01660	4,7	-0,00921	0,00891
0,4	0,87840	0,35640	2,6	-0,02540	4,8	-0,00748	0,00892
0,5	0,82310	0,24150	2,7	-0,03200	4,9	-0,00593	0,00870
0,6	0,76280	0,14310	2,8	-0,03690	5,0	-0,00455	0,00837
0,7	0,69970	0,05990	2,9	-0,04030	5,1	-0,00334	0,00795
0,8	0,63540	-0,00930	3,0	-0,04226	5,2	-0,00229	0,00746
0,9	0,57120	-0,06570	3,1	-0,04314	5,3	-0,00139	0,00692
1,0	0,50830	-0,11080	3,2	-0,04307	5,4	-0,00063	0,00636
1,1	0,44760	-0,14570	3,3	-0,04224	5,5	0,00001	0,00578
1,2	0,38990	-0,17160	3,4	-0,04079	5,6	0,00053	0,00520
1,3	0,33550	-0,18970	3,5	-0,03887	5,7	0,00096	0,00464
1,4	0,28490	-0,20110	3,6	0,03659	5,8	0,00127	0,00409
1,5	0,23840	-0,20860	3,7	-0,03407	5,9	0,00152	0,00356
1,6	0,19590	-0,20770	3,8	-0,03138	6,0	0,00169	0,00307
1,7	0,15760	-0,20470	3,9	-0,02862	6,1	0,00180	0,00261
1,8	0,12340	-0,19850	4,0	-0,02583	6,2	0,00185	0,00219
1,9	0,09320	-0,18990	4,1	-0,02309	6,3	0,00187	0,00181
2,0	0,06670	-0,17940	4,2	-0,02042	6,4	0,00184	0,00146
2,1	0,04390	-0,16750	4,3	-0,01787	6,5	0,00179	0,00115

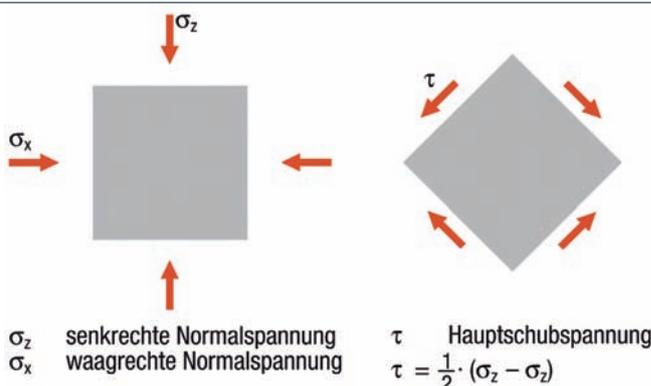
TABELLE 2: Einflusszahlen für Einsenkungs- und Momentverlauf nach Zimmermann

auf Abscherung beanspruchten Körpers (z. B. Stab) herrschende Spannung. Der Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_z$  in senkrechter und  $\sigma_x$  in waagrechter Richtung sowie die unter 45° wirkende Hauptschubspannung  $\tau$  kann für die Lastachse unter der Annahme einer Streifenlast (Schotterpressung unter Schwelle) aus Bild 11 entnommen werden. Die Stelle der größten Schubspannung (Scher-spannung) liegt dabei in einer Tiefe von ungefähr der halben Schwellenbreite.

3.5. BERECHNUNG DER BODENDRUCKSPANNUNG

Ist die Schotterpressung, die Stärke und der E-Modul des Schotters ( $E_1$ ) sowie eventuell zwischengeschalteter Planumsschutzschichten ( $E_2$ ) und der E-Modul des Unterbaues ( $E_3$ ) bekannt, kann die Bodendruckspannung berechnet werden. Für die Berechnung kann das von Ode-mark entwickelte Näherungsverfahren für mehrschichtige Systeme zur

BILD 9: Spannungen im Schotterbett und Untergrund



Anwendung kommen (Bilder 10 und 11). Das mehrschichtige Tragsystem wird dabei in einen so genannten äquivalenten Halbraum umgerechnet. Näherungsverfahren von Ode-mark zur Ermittlung des Bettungsmodul mehrschichtiger Systeme (Bild 10).

$$h'_1 = h_1 \cdot 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_3}} \quad h'_2 = h_2 \cdot 0,9 \cdot \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_3}}$$

Rechenbeispiel:

Schotterbett:  $E_1 = 150 \text{ N/mm}^2$ ,  $h_1 = 300 \text{ mm}$   
 Planumsschutzschicht:  $E_2 = 100 \text{ N/mm}^2$ ,  $h_2 = 400 \text{ mm}$   
 Untergrund:  $E_3 = 50 \text{ N/mm}^2$   
 $h_1 = 390 \text{ mm}$        $h_2 = 544 \text{ mm}$

Berechnung der Bodendruckspannung für Streifenlast

Die Spannungen in der Lastachse ergeben sich zu:

$$\sigma_z = -\frac{2 \cdot p}{\pi} \left( \arctan \frac{b_1}{2 \cdot z} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot z}{b_1^2 + 4 \cdot z^2} \right)$$

$$\sigma_x = -\frac{2 \cdot p}{\pi} \left( \arctan \frac{b_1}{2 \cdot z} + \frac{2 \cdot b_1 \cdot z}{b_1^2 + 4 \cdot z^2} \right)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}$$

- p Schotterpressung unter der Schwelle (Pkt. 3.3)
- $b_1$  Schwellenbreite
- $\sigma_z$  vertikale Bodendruckspannung
- $\sigma_x$  horizontale Bodendruckspannung
- $\tau_{\max}$  Schubspannung (Scherspannung)
- z Tiefe unter der Schwellenunterkante
- x Gleislängsachse

Berechnung des Beitrages von Nachbarschwellen

Mit zunehmender Tiefe ist auch die Auswirkung der Lastausstrahlung durch die Nachbarschwellen in Betracht zu ziehen

$$\sigma_z = -\frac{p}{\pi} \left[ \frac{\alpha_2^* - \alpha_1^* \sin(2 \cdot \alpha_2) - \sin(2 \cdot \alpha_1)}{2} \right]$$

$$\sigma_x = -\frac{p}{\pi} \left[ \frac{\alpha_2^* - \alpha_1^* \sin(2 \cdot \alpha_2) - \sin(2 \cdot \alpha_1)}{2} \right]$$

mit  $\alpha^* = \frac{\alpha^0 \cdot \pi}{180}$

3.6. SCHERFESTIGKEIT (SCHUBFESTIGKEIT) – INNERER REIBUNGSWINKEL

Unter **Scherfestigkeit** (Schubfestigkeit) versteht man gemäß allgemeiner Statik die Kraft, die erforderlich ist, um einen Körper (z. B. einen Stahlstab) abzuscheren (zu zerschneiden).

Die Scherfestigkeit von Tragschichten kann im Labor mit Großschergeräten untersucht werden. Dabei werden die Proben in einem Schergerät bei konstanten Normalspannungen durch steigende Horizontalkräfte bis zum Bruch belastet, die im Bruchzustand auftretende Spannung gemessen und dar-

aus die Größe der Scherkraft bestimmt. Aus mehreren Versuchen mit steigenden Normalspannungen können die Wertepaare  $\sigma$  und  $\tau$  bestimmt werden. Daraus ergibt sich das so genannte Scherdiagramm mit der *Coulombschen* Bruchgeraden (Bild 12).

- V Vertikalkraft
- H Horizontalkraft
- A Abscherfläche
- $\sigma$  Normalspannung =  $V/H$
- $\tau$  Schubspannung =  $H/A$

Die Gleichung für die Bruchgerade und gleichzeitig für die Scherfestigkeit lautet:

$$\tau_f = c' + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

- $c'$  Verzahnungswiderstand (Haftfestigkeit oder Kohäsion)
- $\sigma$  Vertikalspannung
- $\varphi$  Winkel der inneren Reibung (kurz genannt: Reibungswinkel)

Die Tragfähigkeit des **Schotterbettes** hängt vor allem von der Scherfestigkeit ab. Der **innere Reibungswinkel** bestimmt im Scherdiagramm den Anstieg der Scherfestigkeit. Seine Größe hängt im Wesentlichen von der Ungleichförmigkeit, der Korngröße, Kornform und Kornrauhigkeit sowie von der Dichte ab. Je größer der Reibungswinkel ist, umso höher ist die Scherfestigkeit.

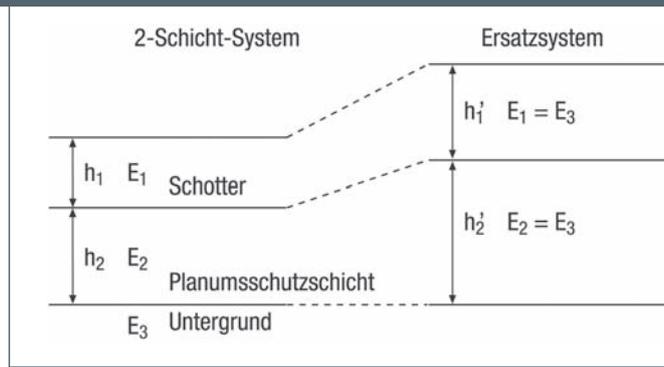
Daraus folgt: Die Scherfestigkeit und damit die Standsicherheit des Schotterbettes ist besonders groß, wenn der Schotter den Anforderungen hinsichtlich Körnung, Kornform und Reinheit gem. Pkt. 1.3 entspricht. Verunreinigter und nasser Schotter führt zu einer Reduzierung seines Scherverhaltens. Versuche der TU Graz mit verschmutztem, gereinigtem, aufbereitetem Schotter und Rundkies brachten das in der Tabelle 3 angeführte Ergebnis.

Daraus ist ersichtlich, dass das Scherverhalten von verschmutztem Schotter etwa dem von Rundkies entspricht. Gereinigter Schotter weist eine wesentlich höhere Scherfestigkeit auf; infolge Abrundung der Schotterkanten ist der Wert etwas geringer als für aufbereiteten Schotter.

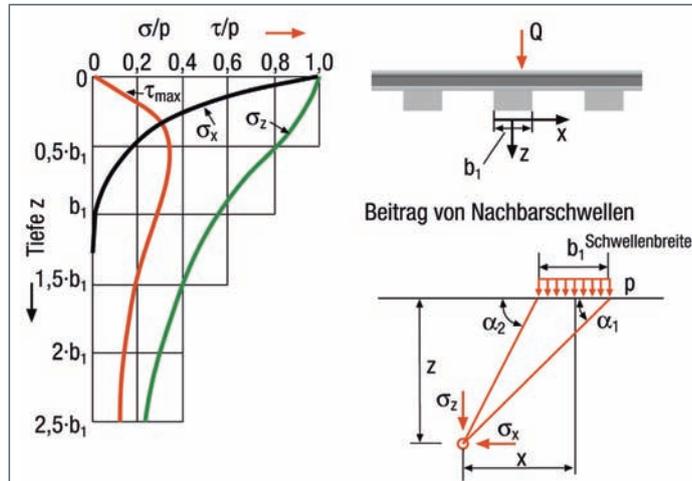
Versuche der TU Graz haben gezeigt, dass das Scherverhalten von Schotter der Körnung 30/60 mm erhöht werden kann, wenn dem Schotter ein Anteil der Körnung 15/30 mm beigemischt wird. Als optimale Beimischung wurden 15 % ermittelt. ←

**Literatur**

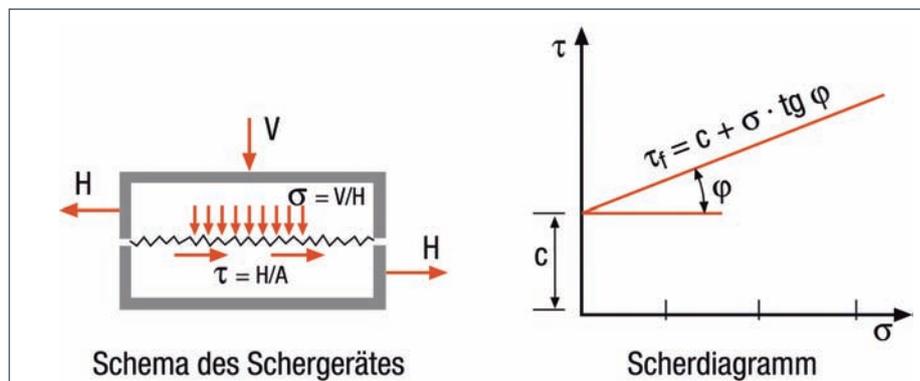
Eisenmann und Kaess: Das Verhalten des Schotters unter Belastung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (29) 3-1980.  
 Eisenmann, J.: Qualität des Oberbauzustandes, Der Eisenbahningenieur, Heft 3/1980.  
 Eisenmann, J.: Auswirkung der Oberbaukonstruktion auf die Schotter- und Untergrundbeanspruchung, 1982.  
 Fastenrath, F.: Die Eisenbahnschiene, Verlag von Wilhelm Ernst Sohn, Berlin, München, Düsseldorf 1977.



**BILD 10:** Mehrschichtsystem - schematisch



**BILD 11:** Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_z$  und  $\sigma_x$  sowie Hauptschubspannungen in der Lastachse



**BILD 12:** Scherdiagramm mit der Coulombschen Bruchgeraden

Bezeichnung	Verzahnungs-Anteil $c'$ [N/cm <sup>2</sup> ]	Innere Reibungswinkel $\sigma$ [°]	$\operatorname{tg} \varphi$
Verschmutzter Schotter	5,2	57,7	1,58
Gereinigter Schotter	8,1	63,4	2,0
Rundkies	4,2	57,4	1,56
Aufbereiteter Schotter	9,2	65,2	2,16

**TABELLE 3:** Verzahnungsanteil und innerer Reibungswinkel verschiedener Schottermaterialien (Quelle: TU Graz)

Göbel, Lieberenz: Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, Eurailpress, 2004.  
 Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, Tetzlaff Verlag, 2004.  
 ÖBB, Technische Lieferbedingungen für Oberbauscotter, BH 700, Ausgabe 1998.  
 ÖNORM EN 13450, Gesteinskörnungen für Gleisschotter, Ausgabe: 2004-11-01.

In einem Teil 2 behandelt Dipl.-Ing. Erwin Klotzinger Qualitätsveränderungen des Oberbauscotters und die Eingriffsschwellen für Gleisschotter und Bettungsreinigung – voraussichtlich in ETR 3/2008.