1

# Oberbauschotter – Kompendium für Österreich

Dipl.-Ing. Christoph Kuttelwascher
ÖBB-Infrastruktur AG, Wien
Dipl.-Ing. Michael Zuzic
ehem. Geschäftsbereichsleiter Fahrweg ÖBB

Im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und Langlebigkeit der Schieneninfrastruktur hat die enge Zusammenarbeit der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) mit österreichischen und anderen europäischen Universitäten sowie Zivilingenieuren lange Tradition. Eine effiziente Nutzung von Wissensressourcen und deren Kombination mit Praxiserfahrungen wird dadurch ermöglicht und bereits vorhandene Kenntnisse [1, 2] werden immer wieder um neue Aspekte ergänzt. Als Bespiel dienen in diesem Artikel Hinweise und Auszüge aus Untersuchungen, die von der TU Graz, TU München, Universität Innsbruck oder HTL Saalfelden in den vergangenen Jahren im Auftrag der ÖBB zum Thema Oberbauschotter durchgeführt wurden.

## 1 Aufgaben und Anforderungen

Der Oberbauschotter ist im Zusammenspiel mit anderen Gleisbaustoffen, Untergrund, Entwässerung und elastischen Elementen eine bedeutsame Komponente mit wesentlichem Einfluss auf die Qualität und Haltbarkeit des Gleises.
Die Hauptaufgaben von Oberbauschotter und Schotterbett lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Lastverteilung und 3-axiale Lastabtragung,
- Widerstand gegen Schwellenverschiebungen in alle Richtungen,
- einfache Wiederherstellung der ursprünglichen Gleislage,
- Drainage und Erhaltung der Tragfähigkeit des Untergrunds,
- Retention von Niederschlagswasser,
- Belüftung.

Aus diesen Aufgaben ergibt sich eine Reihe von Anforderungen an die Schotterqualität selbst. Aufgrund steigender Belastungen durch höhere Achslasten, Zugzahlen und Fahrgeschwindigkeiten auf den Hauptstrecken wird danach gestrebt, die Widerstandsfähigkeit aller Gleiskomponenten gegenüber den Einwirkungen zu verbessern und deren Lebensdauer zu erhöhen.
Die Erhöhung des Widerstandes erfolgt zumeist durch Verbesserung der Materialgüte und technologische Fortschritte beim Herstellungsprozess. Bei Gleiskomponenten wie Holzschwellen oder Oberbauschotter ist man im Wesentlichen auf natürliche Ressourcen bzw. geologisch gewachsene Strukturen angewiesen. Oberbauschotter wird durch Abschlagen, Brechen und Sieben von Festgestein produziert und kann grundsätzlich nur dort gewonnen werden, wo die Gesteinsvorkommen nicht von Lockersedimenten wie Sand oder Kies überdeckt sind. In Österreich existieren erschlossene Vorkommen der unter Kapitel 2 angeführten Gesteinsarten.
Für die Gleisschotterproduktion heranzuziehende Festgesteine sollen grundsätzlich folgende Bedingungen erfüllen:

### 1.1 Verwitterungsbeständigkeit und geringe Rissbildung

Die Verwitterungsbeständigkeit muss durch entsprechende Gutachten nachgewiesen werden. Anzahl, Abstände und Breiten von Rissen im Gestein haben einen wesentlichen Einfluss auf die Gesteinsfestigkeit. Beim Abschlag von Festgestein mittels Sprengladungen kommt es zur Bildung von Rissen verschiedener Ausprägung und Größe. Werden Mikrorisse im weiteren Aufbereitungsprozess nicht vollständig aufgebrochen, kann dies die Festigkeit und Beständigkeit des Gleisschotters herabsetzten. Rohstoffgewinnung und Aufbereitung müssen daher für beste Qualität und Produktivität optimal an das jeweilige Gestein und die jeweilige Lagerstätte angepasst sein.

### 1.2 Zähigkeit, Härte und geringe Spaltbarkeit

Die Zähigkeit ist die Widerstandsfähigkeit gegen Bruch oder Rissausbreitung und kann durch Last-Verformungs-Diagramme zum Ausdruck gebracht werden. Rissablenkung, Rissverzweigung oder Rissstoppvermögen sind dabei beeinflussende Faktoren (vgl. [3, 4]).

Die Härte eines Gesteins ist der Widerstand gegen mechanische Eindringung und ergibt sich aus Mineralhärte, Kornbindung und Härte des Bindemittels zwischen den Mineralien. Mit der Härteprüfung nach Mohs werden die Mineralien nach der Größe ihrer Ritzhärte geordnet.

Bei Mineralien bezeichnet man als Spaltbarkeit die Tendenz, an bestimmten parallelen Ebenen im Kristallgitter zu brechen. Die Festigkeit eines Gesteins wird durch Mineralienbestandteile geringer oder fehlender Spaltbarkeit begünstigt. Zwei- oder dreiaxial spaltbare Mineralien wirken sich hingegen negativ auf die Festigkeit aus (vgl. [5]).

### 1.3 Keine Beimengungen von Lehm, Erde oder Feinteilen

Nach Niederschlagsereignissen soll die Schotterbettung möglichst rasch wieder austrocknen, was nur bei hoher Luftdurchlässigkeit optimal gewährleistet ist. Größere Mengen von Feinanteilen behindern die Drainagefähigkeit des Schotters, was die Tragfähigkeit des Untergrunds langfristig negativ beeinflussen kann. Weiterhin wirken Feinanteile, die das lastabtragende Korngerüst umhüllen, im nassen Zustand als Schmierstoff, verkleinern den Reibungswinkel und setzten so die Scherfestigkeit herab (vgl. Kap. 6.2).

### 1.4 Gutes Bruchverhalten (z. B. Scharfkantigkeit)

Je besser das Bruchverhalten, desto besser ist die Verzahnung der Schotterkörner untereinander und mit den Gleisschwellen, wodurch sich günstigere Lastabtragungseigenschaften und höhere Widerstände gegen Längs- und Querverschiebungen des Gleisrosts ergeben.

## 2 Geologie und Gesteinsvorkommen in Österreich

Folgende Gesteinsarten werden in Österreich zur Produktion von Gleisschotter herangezogen:

### 2.1 Granite

Die Böhmische Masse liegt zum größten Teil nördlich der Donau und beherbergt wesentliche Granitvorkommen, aus denen Gleisschotter gewonnen wird.

Granite sind magmatische Tiefengesteine, die sich unter hohem Druck und hohen Temperaturen bilden. Sie sind mittel- bis grobkörnig, ihre Kristalle kann man für gewöhnlich mit freiem Auge erkennen. Ihre hohe Farbvariabilität wird meist durch ihre Feldspatanteile bestimmt. Das Farbenspektrum reicht von hellem Grau bis bläulich, sowie rötlich-rosa und orange bis gelb.

Gelbe Färbungen von Graniten können auch durch Verwitterung der eisenführenden Minerale (z. B. Hämatit) zu Limonit

entstehen oder durch Verwitterung der Feldspäte zu Tonmineralen (Kaolinisierung). Gelbe Granite sind meist technisch schlechter als graue. Selektiver Abbau und regelmäßige Kontrollen der Verwitterungsanzeichen sind hier von wesentlicher Bedeutung. Verfärbungsprozesse können allerdings auch durch enthaltene Erzminerale entstehen, ohne dass sich die technischen Eigenschaften nachteilig verändern.
Aufgrund ihrer Genese können quarzreiche Gesteine eine erhöhte Schlagempfindlichkeit aufweisen (Quarz-Sprung). In Karbonatgesteinen erhöhen Quarzbeimengungen hingegen die Druckfestigkeit. Ein hoher Anteil an größeren Feldspäten und Glimmer kann wegen ihrer vollkommenen Spaltbarkeit die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen (vgl. [5]).

### 2.2 Granitporphyr

In Österreich finden sich im Grenzbereich zwischen Böhmischer Masse und Molassezone Vorkommen von Granitporphyr, die ebenfalls zur Gleisschotterproduktion geeignet sind. Granitporphyr ist eine Art des Granits, allerdings von porphyrischer Struktur. In der feinkörnigen bis dichten Grundmasse sind größere helle Feldspatkristalle oder braune Biotit-Tafeln eingelagert, die mit dem freien Auge erkennbar sind. Aufgrund der dichten Struktur ertönt beim Anschlagen mit dem Hammer oft ein metallähnlicher Klang.

### 2.3 Granulit

In alten Grundgebirgsmassiven, wie beispielsweise im Moldanubikum, der Böhmischen Masse des Waldviertels treten Granulitvorkommen auf. Granulite sind hochmetamorphe Gesteine, die unter mittlerem Druck und hoher Temperatur entstanden sind. Ihre Hauptbestandteile sind Feldspat und Quarz. Allenfalls enthaltene (braunrote) Granate lassen sich in den oft weiß- bis dunkelgrauen oder auch bräunlichen Granuliten mit freiem Auge erkennen.
Das lateinische Granulum (Körnchen) war für den Granulit namengebend. Es bezieht sich auf die meist feinkörnige bis mittelkörnige Struktur (feinkörniger als Granit) und das gleichmäßige Gefüge. Granulite eignen sich aufgrund ihrer hohen Druckfestigkeiten und sehr hohen Verschleißwiderständen gut zur Nutzung als Gleisschotter. Die Granulitvorkommen des Dunkelsteiner Waldes sind teilweise von Serpentiniten durchzogen. Diese lassen sich allerdings visuell gut erkennen und durch selektiven Abbau ausschalten.

### 2.4 Diabas

Diabase sind durch Metamorphose (Umwandlungsprozesse unter Druck- und Temperatureinfluss) von Basalten entstanden. Nur wenige Diabasvorkommen in Österreich erfüllen die strengen Eignungskriterien für Gleisschotter (z. B. nördl. Grauwackenzone und Bleiberger Hochtal). Die dunkelgrüne bis schwarzgrüne Farbe ergibt sich aus Vorstufen der Metamorphose, weshalb Diabas früher häufig auch als Grünstein bezeichnet wurde. Der durch Chloritisierung entstandene Anteil an Chlorit ist ausschlaggebend für das Festigkeitsverhalten. Im Bereich des Bleiberger Hochtals und des Gailtals werden auch Diabase mit teilweise rötlicher Färbung abgebaut, welche durch Minerale wie Hämatit oder Magnetit bedingt ist. Nachteilige Auswirkungen auf die Festigkeitseigenschaften wurden nicht festgestellt.
Diabase sind dicht bis mittelkörnig, teilweise erhält das Gestein aufgrund von Feldspateinsprenglingen ein porphyrisches Gefüge.

### 2.5 Basalt

Basalt ist ein basisches Vulkangestein und als Lava beim Vulkanausbruch sehr dünnflüssig. Er besteht vor allem aus einer Mischung von Eisen- und Magnesium-Silikaten mit Olivin und Pyroxen sowie calciumreichem Feldspat.

Basalt ist für gewöhnlich dunkelgrau bis schwarz. Auch bräunliche, rötliche oder graugrüne Farbtönungen sind möglich, und er besteht zu großen Teilen aus einer feinkörnigen Grundmasse. Aufgrund seiner hohen Druck- und Verschleißfestigkeit eignet sich Basalt im Allgemeinen sehr gut zur Gleisschotterproduktion. Davon ausgenommen sind Basalte mit der Neigung zu Sonnenbrand. Sonnenbrennerbasalte sind aufgrund ihres Mineralbestandes extrem verwitterungsanfällig, zerfallen rasch und sind für technische Anwendungen ungeeignet. Sonnenbrandgefährdeter Basalt ist von einer Lieferung an die ÖBB grundsätzlich ausgeschlossen.
Basalte kommen in Österreich nur im Osten und Südosten (Burgenland, Steiermark und Kärnten) vor, wobei hier in der Entstehung drei vulkanische Phasen unterschieden werden. Die an Auswurf ergiebigste Phase findet sich im südoststeirischen Vulkangebiet (vgl. [6]).

### 2.6 Dunit, Peridodit und Bronzit

In der mittleren austroalpinen Grundgebirgsdecke der Steiermark finden sich ultrabasische und ultramafische Gesteine mit unterschiedlichem Serpentinisierungsgrad. Als ultrabasisch gelten Gesteine mit einem $SiO_2$-Gehalt von unter 45 %, ultramafisch sind Gesteinsanteile mit über 90 % dunklen Mineralen der magmatischen Gesteine (vgl. [7]).
Dunite bestehen zu mindestens 90 Volumenprozent aus Olivin, im Unterschied zu den Peridotiten, die aus 40 bis 90 Volumenprozent Olivin bestehen. Für die technische Verwertbarkeit ist der Serpentinisierungsgrad von entscheidender Bedeutung. Dunite und Perdidotite besitzen gute Festigkeitseigenschaften, solange die Serpentinisierung nicht weit fortgeschritten ist. Hohe Hornblende- und Augitgehalte erhöhen die Zähigkeit des Gesteins. Serpentinisierte Dunite sind vorwiegend dunkelgrün bis blauschwarz, Serpentinite hingegen braun und braungrau bis schwarz. Bronzite sind sehr zähe, mittel- bis grobkörnige Gesteine mit grünlich brauner Färbung.

### 2.7 Kalkstein (Dolomit)

Kalkstein ist ein Sedimentgestein meist biogener Abstammung. Er kann aber auch durch chemische Prozesse aus Wasser ausgefällt werden und besteht überwiegend aus Calciumcarbonat. In Anteilen kommen auch andere Minerale wie Tonminerale, Dolomit, Quarz und Gips vor. Bei sehr hohen Anteilen des Dolomit-Minerals spricht man handelsüblich von Dolomit oder Dolomitstein.
Die Gesteinseigenschaften und dadurch auch die technische Verwendbarkeit von Kalkstein können sehr stark variieren. Während Dolomite und Kalksteine häufig zu den mittelharten Gesteinen gezählt werden, gibt es Kieselkalke, die den Hartgesteinen zugeordnet werden. Die Verkieselung verbessert den mechanischen Widerstand, was sich in bis zu doppelt so hohen Druckfestigkeiten (verglichen mit Kalkstein) bemerkbar macht. Kieselkalkvorkommen in der Schweiz werden daher ebendort zur Gleisschotterproduktion herangezogen.
In Österreich erstrecken sich die nördlichen Kalkalpen von Vorarlberg bis nach Niederösterreich und bestehen überwiegend aus Kalkstein oder Dolomit. Zur Gleisschotterproduktion sind diese Gesteine aufgrund ihrer Festigkeitseigenschaften nur bedingt geeignet.

## 3 Lieferbedingungen der ÖBB

Oberbauschotter ist ein Naturprodukt und damit auch Qualitätsschwankungen unterworfen.
Um die Haltbarkeit von Oberbauschotter über eine lange Lebensdauer zu gewährleisten, kommen im österreichischen Kernnetz ausschließlich Hartgesteine zum Einsatz. Die Zuordnung zu dieser Gesteinsgruppe erfolgte lange Zeit über die

Definition der Würfeldruckfestigkeit, den Gehalt an harten Mineralien (Härteskala nach Mohs) oder die Eignung zum Einsatz als Edelsplitt. Die Kriterien zur Eignung als Gleisschottermaterial ergeben sich heute aus den technischen Lieferbedingungen der ÖBB BH 700 [8] auf Basis der europäischen Norm EN 13450 [9].
2011 wurde von den ÖBB ein Prüfsystem über die „Herstellung und Lieferung von Oberbauschotter der Körnung I und II" [10] erstellt. Damit besteht die Möglichkeit zur Eignungsprüfung von Unternehmen auch ohne konkreten Auftrag. Die hierbei qualifizierten Lieferwerke können direkt zur Angebotslegung aufgefordert werden.
Im Wesentlichen wird zwischen geometrischen, physikalischen und chemischen Anforderungen unterschieden.

### 3.1 Geometrische Anforderungen

#### 3.1.1 Korngrößenverteilung, Kornform und Kornlänge

Die gewählte Korngrößenverteilung muss eine geeignete Lastausbreitung, Lastabtragung und Drainage gewährleisten. Enggestufte Gesteinskörnungen wirken sich positiv auf die Drainagefähigkeit und die elastischen Eigenschaften aus. Mit zunehmend enger Stufung sinkt allerdings auch die Scherfestigkeit, was mit ungünstigeren lastabtragenden Eigenschaften einer geringeren Schotterbettstabilität einhergeht.
Hier kommt der Kornform (durch ihre ausgleichende Funktion) eine besondere Bedeutung zu. Sie kann die angeführten negativen Aspekte einer engen Kornabstufung ausgleichen und aufgrund der Verzahnung der Schotterkörner untereinander bleibt die Stabilität daher auch bei eng gestuftem Material erhalten. Unweigerlich ergeben sich dabei allerdings auch erhöhte Spitzendrücke und damit ein vermehrtes Abbrechen oder Abplatzen von Gesteinskanten.
Durch die dynamische Gleisstabilisierung werden Kornumlagerungsvorgänge und damit Setzungen im Betrieb vorweggenommen, die Anzahl der Berührpunkte der Schotterkörner untereinander wird erhöht und damit der Spitzendruck verringert. Die in Österreich eingesetzte Lieferkörnung K1 (31,5/63) orientiert sich (ebenso wie die Lieferkörnung für Gleisschotter in Deutschland) an der Kategorie Gc RB B (vormals Kategorie D) der EN 13450 [9]. Oberbauschotter der Körnung K2 (16/31,5) wird aus Gründen des Arbeitnehmerschutzes dort eingesetzt, wo Arbeitnehmer regelmäßig das Gleis betreten müssen, um Arbeiten an Fahrzeugen durchzuführen (z.B. Abstell- und Verschubbereiche).
Der Anteil von Feinkorn (<0,5 mm) und Feinstkorn (<0,063 mm) ist mit maximal 1,0 M-% begrenzt, da Feinanteile in größerer Menge sowohl die Drainage behindern, als auch die Scherfestigkeit der Bettung herabsetzen können (vgl. Kap. 6.2). Trotz ordnungsgemäßer Absiebung kann es auf freien Zwischenlagern im Zuge von Niederschlagsereignissen zum Abspülen feiner Kornfraktionen der oberen und mittleren Schüttungsbereiche in die unteren Abschnitte des Schüttkegels und dortiger Ansammlung kommen. Bei Trichterabzug oder Abtransport durch Radlader besteht die Gefahr, dass ebendiese Bereiche konzentriert zur Verladung kommen. In Österreich ist daher eine Nachversiebung des gesamten Gleisschottermaterials unmittelbar beim Verladevorgang vorgeschrieben. In den meisten Fällen findet dabei gleichzeitig eine Waschung des Produkts zur zusätzlichen Reduktion von Feinanteilen statt, wobei der Wasserdurchfluss dem Materialdurchsatz am Rüttelsieb angepasst sein muss. Wird für besondere Anwendungsfälle (z. B. Tunnel) staubarmer Schotter verlangt, darf der Gehalt an Feinstkorn 0,5 M-% nicht überschreiten und soll allenfalls nur gewaschener Schotter zum Einsatz kommen.
Einer möglichen Kornzerkleinerung und Entmischung bei Verladung, Transport und

# bbw - bewusst, besser, wirtschaftlicher

STOPFEXPRESS 09-4X DYNAMIC

SCHOTTERBEWIRTSCHAFTUNGSSYSTEM BDS 2000

- GLEIS- UND WEICHENSTOPFARBEITEN
- GLEIS- UND WEICHENNEULAGEN
- SCHIENENSCHLEIFEN
- ARBEITEN MIT GLEISBAUKRÄNEN
- PORTALKRANARBEITEN
- HÄNDISCHER OBERBAU
- MODERNER MASCHINENPARK

NEU: STOPFEXPRESS 09-3X DYNAMIC, BDS 2000

USP 2010 SWS

GLEISBAUKRAN KIROW KRC 1200

bbw BAHNBAU WELS

RHOMBERG sersa Group

Gemeinsam bewegen.

Bahnbau Wels GmbH
Haidestraße 53
4600 Wels
Tel.: +43 (0)7242 47045 0
Fax: +43 (0)7242 47045 1
www.bbw.at, office@bbw.at

**Abb. 1:** Gesteinsprobe vor und nach einem Los-Angeles-Versuch gemäß [12] Quelle: ÖBB

Entladung wird dadurch Rechnung getragen, dass der Unterkornanteil <22,4 mm bei Probenahme auf der Baustelle maximal 5 M-% betragen darf (im Werk maximal 3 M-%).
Die Bestimmung der Kornform erfolgt nach EN 933-4 [11] und das Ergebnis ist als Kornformkennzahl anzugeben. Der Anteil an Körnern mit einem Verhältnis l:d (Länge:Dicke) >3:1 muss zwischen 5,0 und 30,0 M-% liegen. Die Prüfung wird an den Korngruppen 31,5/50 mm bzw. 16/31,5 mm durchgeführt.
Die Kornlänge wird durch Ausmessen mit entsprechenden Kornform-Messschiebern ermittelt. Bei einer Probe von mehr als 40 kg darf für die Lieferkörnung 31,5/63 mm der Masseanteil von Körnern mit einer Länge ≥100 mm höchstens 6% betragen.

### 3.2 Physikalische Anforderungen

#### 3.2.1 Schlag-Abrieb-Festigkeit (Los-Angeles-Koeffizient)

Die Bestimmungen der Schlag-Abrieb-Festigkeit erfolgt nach dem Los-Angeles-Prüfverfahren gemäß EN 13450 [9] und EN 1097-2 [12].
Bei der Versuchsdurchführung wird eine Probemenge von 10 kg (Körnung 31,5/50) nach Waschung und Trocknung gemeinsam mit zwölf Stahlkugeln (Gesamtgewicht ca. 5,2 kg) in einer Stahltrommel (Durchmesser ca. 70 cm) 1.000-mal um die Rotationsachse gedreht. Die Umdrehungsgeschwindigkeit beträgt etwa 30 Umdrehungen pro Minute. Dabei wird das Probematerial über eine an der Innenschale der in der Trommel befestigten Mitnehmerleiste durch die Drehung angehoben und wieder abgeworfen. Die mechanische Belastung des Gesteins erfolgt sowohl schlagend als auch reibend über die Wechselwirkungen von Stahlkugeln, Gesteinskörnern und Trommelwand. Abb. 1 zeigt eine Gesteinsprobe vor und nach Versuchs-

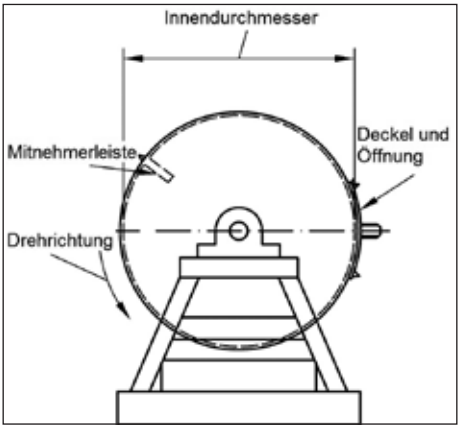


**Abb. 2:** Typische Los-Angeles-Prüfmaschine
Quelle: [12]

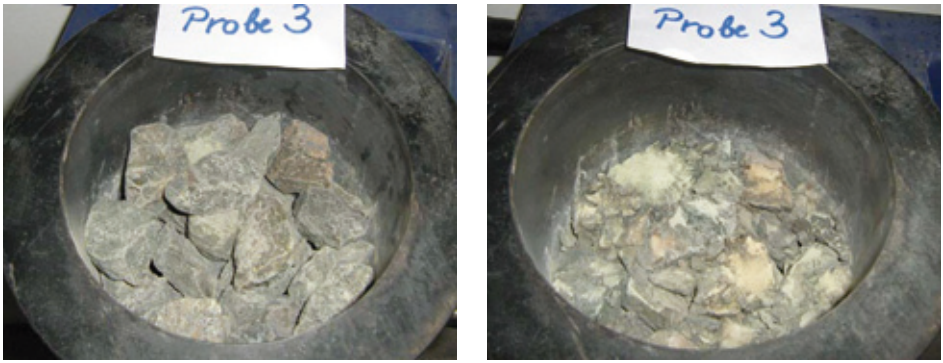


**Abb. 3:** Gesteinsprobe vor und nach einem Schlagzertrümmerungsversuch gemäß [12] Quelle: ÖBB

durchführung und Abb. 2 einen Querschnitt durch die Los-Angeles-Trommel.
Der Los-Angeles-Koeffizient $LA_{RB}$ ergibt sich nach Absiebung über ein 1,6-mm-Sieb gemäß der Formel

$$LA_{RB} = \frac{10000 - m}{100}$$

m = Siebdurchgang durch das 1,6-mm-Sieb.
Das Gestein ist gegenüber Schlag- und Abriebsbelastungen umso beständiger, je niedriger der Los-Angeles-Koeffizient.
Als Oberbauschotter im Streckennetz der ÖBB kommt grundsätzlich nur Gestein mit Los-Angeles-Koeffizienten von max. 22 zum Einsatz. Typische $LA_{RB}$-Werte unterschiedlicher Gleisschottergesteine Österreichs sind in Abb. 7 ersichtlich.

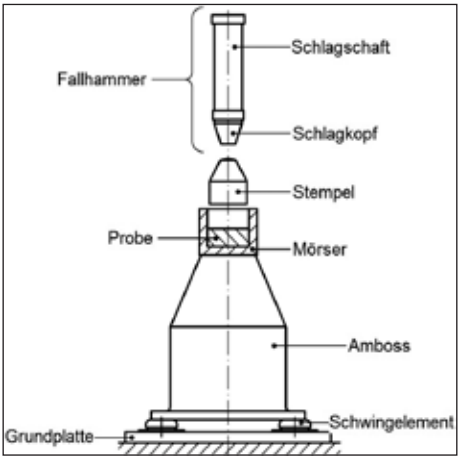


**Abb. 4:** Typisches Schlagprüfgerät Quelle: [12]

### 3.2.2 Schlagfestigkeit (Schlagzertrümmerungswert)

Die Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung erfolgt gemäß EN 13450 und EN 1097-2 [12].
Der Schlagzertrümmerungskoeffizient $SZ_{RB}$ ergibt sich aus dem Mittelwert von drei Einzelbestimmungen. Hierbei wird jeweils eine Masse von etwa 2,8 kg (Körnung 31,5/40) nach Waschung und Trocknung in einen Mörser (17 cm Innendurchmesser) gefüllt und durch 20 Schläge eines Fallhammers beansprucht. Die Masse des Hammers beträgt 50 kg, seine Fallhöhe 42 cm. Das hierdurch zertrümmerte Gestein wird nach Versuchsdurchführung auf dem 8-mm-Sieb abgesiebt.
Die Belastung des Gesteins hat schlagenden Charakter, der auftretende Kornbruch ergibt sich aus der Aufprallenergie des Fallhammers auf die Probe. Abb. 3 zeigt eine Gesteinsprobe vor und nach Versuchsdurchführung, Abb. 4 ein typisches Schlagprüfgerät.
Der Schlagzertrümmerungswert $SZ_{RB}$ berechnet sich nach der Formel

$$SZ_{RB} = \frac{M_1}{M}$$

$M_1$ = Siebdurchgang durch das 8-mm-Sieb
M = Masse der Einzelmessprobe vor der Prüfung.
Das Gestein ist gegenüber Schlagbelastungen umso beständiger, je niedriger der Schlagzertrümmerungswert.
Als Oberbauschotter in Österreich kommt grundsätzlich nur Gestein mit Schlagzertrümmerungswerten von max. 22 % zum Einsatz. Typische $SZ_{RB}$-Werte unterschiedlicher Gleisschottergesteine Österreichs sind in Abb. 7 ersichtlich.

### 3.2.3 Widerstand gegen Verschleiß (Micro-Deval-Koeffizient)

Die Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß erfolgt gemäß EN 13450 und EN 1097-1 [13].
Der Micro-Deval-Koeffizient ergibt sich aus dem Mittelwert von zwei Einzelbestimmungen. Jede Einzelmessprobe besteht aus einer Masse von 10 kg der gewaschenen und getrockneten Kornfraktion 31,5/50. Diese wird in einer mit 2 l Wasser befüllten Trommel (Durchmesser 20 cm) und einer Geschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute durch Abrieb an der Trommelinnenwand mechanisch beansprucht. Nach 14 000 Umdrehungen erfolgt eine Absiebung über das 1,6-mm-Sieb.
Der Micro-Deval-Koeffizient berechnet sich nach der Formel:

$$M_{DE}RB = \frac{10000 - m}{100}.$$

m = Masse des Siebrückstandes auf dem 1,6-mm-Sieb in Gramm.
Das Gestein wird beim Micro-Deval-Versuch ausschließlich durch Reibung beansprucht. Das Gestein ist gegenüber Verschleiß umso beständiger, je geringer der Micro-Deval-Koeffizient, also je größer der Siebrückstand auf dem 1,6-mm-Sieb ist. Abb. 5 zeigt eine Gesteinsprobe vor und nach Versuchsdurchführung, Abb. 6 eine übliche Prüfeinrichtung. Als Oberbauschotter im Streckennetz der ÖBB kommt grundsätzlich nur Gestein mit Micro-Deval-Koeffizienten von max. 16 zum Einsatz.
Typische $M_{DE}RB$-Werte unterschiedlicher Gleisschottergesteine Österreichs sind in Abb. 7 ersichtlich.

### 3.2.4 Rohdichte

Die Bestimmung der Rohdichte erfolgt nach EN 1097-6 [14]. Es handelt sich dabei

**Abb. 5:** Gesteinsprobe vor und nach einem Micro-Deval-Versuch gemäß [13] Quelle: ÖBB

www.eurailpress.de

# Der Impulsgeber für das System Bahn

**Seit über 60 Jahren ist die ETR das Markenzeichen für Premium-Fachinformationen rund um Schienenverkehr, Technik, Wissenschaft und Forschung.**

Die ETR informiert Top-Manager und Führungskräfte aus Betrieb, Technik und Forschung bei Bahnen und Industrie, Monat für Monat über alle bedeutsamen Entwicklungen in der Bahnbranche.

Jetzt Testheft bestellen unter **www.eurailpress.de/etr** oder Testzugang für das iPad oder iPhone unter **www.eurailpress.de/kiosk** nutzen.

**Exklusiv für Abonnenten:** Das digitale Archiv der ETR auf **www.eurailpress.de** mit Recherchemöglichkeit in allen erschienenen Ausgaben.

## Blickpunkte Österreich und Schweiz

ETR Austria und ETR Swiss

Die Specials „ETR Austria“ und „ETR Swiss“ ergänzen die ETR mit Bahn-Fachinformationen aus Österreich und der Schweiz.

**Jeweils eingebunden in die ETR, nicht separat zu beziehen.**

DVV Media Group

Eurailpress

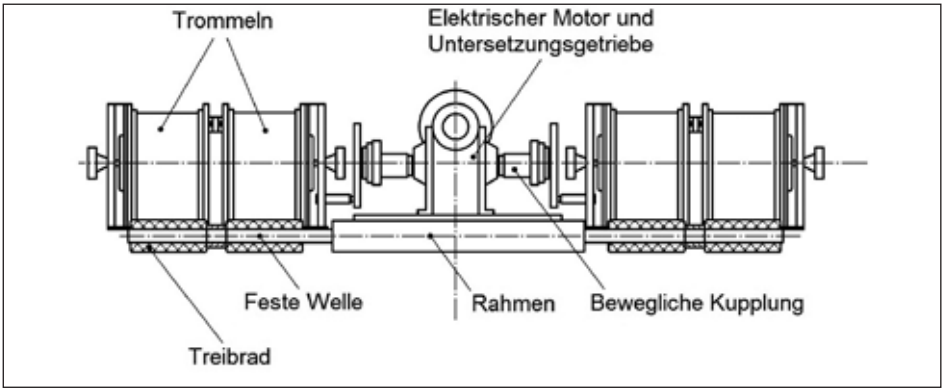


**Abb. 6:** Übliche Prüfeinrichtung zum Micro-Deval-Versuch Quelle: [13]

um die Dichte des Rohgesteins als Verhältnis Masse zu Volumen. Die Masse wird durch Wägung der Probe im wassergesättigten und oberflächentrockenen Zustand und nochmals im ofentrockenen Zustand bestimmt. Das Volumen beinhaltet sämtliche gesteinseigene Poren und Hohlräume. Für die Rohdichte ist kein Prüfwert festgelegt, generell sind jedoch hohe Rohdichten gefordert.

Im Unterschied zur Rohdichte beschreibt die Schüttdichte das Verhältnis aus Masse zu Volumen einer unverdichteten, trockenen Gesteinskörnung (Schüttgut). Sie entspricht der geringsten Lagerungsdichte einschließlich aller Haufwerksporen und Rohgesteinsporen. Erfahrungsgemäß entspricht sie etwa der halben Rohdichte und liegt demnach für Gleisschotter bei etwa 1,3 – 1,5 to/m³.

Die Rütteldichte ist jene Dichte eines Haufwerks, die durch Rütteln erreicht wird. Sie entspricht der maximal erreichbaren Trockendichte bei enggestuften, grobkörnigen Gesteinskörnungen.

### 3.2.5 Verwitterungsbeständigkeit

Das als Oberbauschotter eingesetzte Gestein muss verwitterungsbeständig sein. Verwitterung ist ein Prozess der Gesteinszersetzung durch physikalische, chemische oder biogene Einflüsse und deren Kombinationen (z. B. Temperaturschwankungen, Frost, Eis, Salze, Säuren).

Die Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit kann auf vielfältige Art nach dem Augenschein (in der Lagerstätte und am gebrochenen Material), durch gesteinskundliche Gutachten sowie durch eine Reihe von Laboruntersuchungen beurteilt werden. Zu den Laboruntersuchungen zählen unter anderen die Bestimmung der Wasseraufnahme [14], der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel [15] oder die Beständigkeit gegen Magnesiumsulfat [16]. Bei Verdacht auf Sonnenbrand bei Basaltgesteinen muss die Raumbeständigkeit gemäß EN 1367-3 [17] nachgewiesen werden.

## 3.3 Chemische Anforderungen

Die chemischen Anforderungen stellen die Umweltverträglichkeit des Gesteinsmaterials sicher und beruhen auf den nationalen Vorschriften für Recycling und Deponierung. In Österreich sind dies im Wesentlichen Abfallwirtschaftsgesetz, Bundesabfallwirtschaftsplan und Deponieverordnung. Es soll damit sichergestellt sein, dass der eingesetzte Gleisschotter am Ende seiner technischen Lebensdauer aufbereitet oder nötigenfalls kostengünstig entsorgt werden kann.

### 3.4 Alternative Prüfverfahren

Neben den festgeschriebenen Prüfverfahren zu Verschleiß und Schlagfestigkeit von Gleisschotter (vgl. [18]) sind prinzipiell auch alternative Verfahren denkbar. Im Auftrag der ÖBB wurden an der TU Graz und an der HTL Saalfelden Untersuchungen von insgesamt fünf alternativen Prüfverfahren vorgenommen (vgl. [19]).

Der Versuch zur Bestimmung der Druckfestigkeit am Haufwerk [20] stellt einen groß dimensionierten Druckversuch mit einem Versuchsbehälter in der Art eines Ödometers dar.

Zwei weitere Testverfahren, nämlich der Versuch zur Schleifbarkeit von Gestein mittels Ritzprobe (Cerchartest) und die Schleif- und Mahlbarkeitsprüfung für Granulate (Abroytest) wurden zur Abschätzung der Verschleißrate an Abbauwerkzeugen entwickelt. Sie erlauben aber auch Rückschlüsse auf die Abrasivität als Maß der Verschleißfestigkeit.

Beim Punktlastversuch [21] wurde mittels eines adaptierten Triax-Versuchsgeräts mit einer konstanten Verschiebung die Krafteinwirkung bis zum Bruch des Gleisschotterkorns geführt. Dadurch kann auf die Spaltbarkeit und das Last-Verformungsverhalten des jeweilig geprüften Gesteins geschlossen werden.

Im Zuge eines modifizierten Schlagzertrümmerungsversuchs [21] erfolgt eine dynamische Belastung am Haufwerk einer Gleisschotterkörnung K1 (31,5/63 mm) mit einem Fallgewicht unter einer ständig wirkenden Vorlast von 70 kg. Die Feinkornanreicherung wird per Definition in die Zerkleinerung (Massenanteile < 22,4 mm) und in die Verfeinerung (Massenteile < 4 mm) unterteilt.

Alle Prüfverfahren wurden exemplarisch mit Proben der für Gleisschotter maßgeblichen Gesteinsarten durchgeführt und Korrelationen mit Ergebnissen der etablierten Verfahren untersucht. Die Ergebnisse sind zum Teil veröffentlicht und lassen weitere

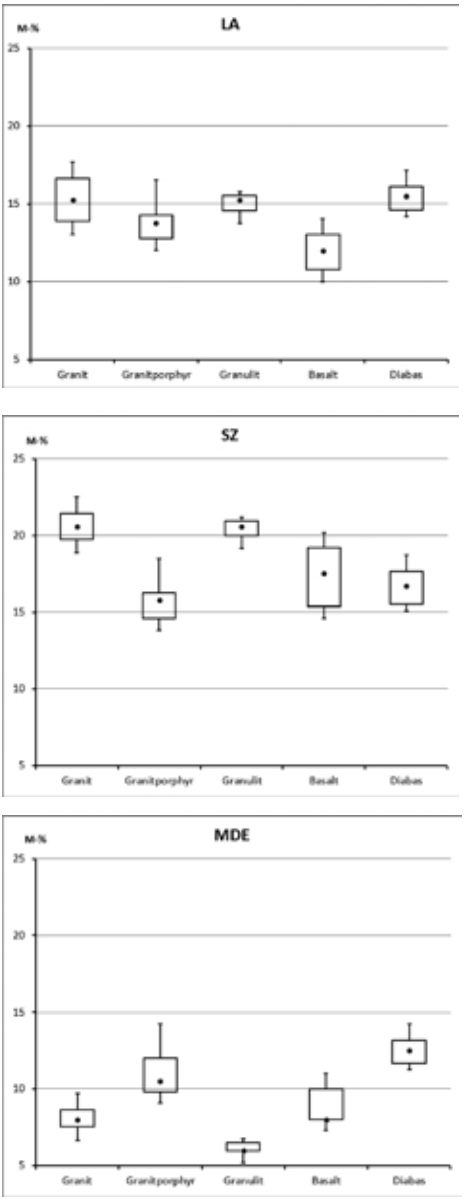


**Abb. 7:** Prüfergebnisse bedeutsamer Gleisschottergesteine in Österreich: Mittelwerte und Streuungen der mechanischen Kennwerte (2004 – 2011) gemäß EN 13450

Entwicklungen auf dem Gebiet der standardisierten Qualitätskontrollen erwarten.

## 4 Gesteinsgewinnung und selektiver Abbau

Zur Durchführung aller Baustellen (Neubau und Instandhaltung) benötigte die ÖBB in den vergangenen Jahren mehr oder weniger schwankend etwa 1 Mio. t Gleisschotter jährlich. Abhängig vom verwendeten Wagenmaterial (Lademenge) entspricht dies einer Anzahl von etwa 25 000 bis 35 000 Waggonladungen im Jahr. Im Unterschied zu anderen Oberbaukomponenten entsteht ein erheblicher Kostenanteil durch den Transport des Materials zur Baustelle. Um eine zuverlässige Baustellenversorgung zu gewährleisten, werden neben technischen und qualitätssichernden Aspekten ebenso hohe Anforderungen an tägliche Verladekapazitäten, wöchentliche Produktionskapazitäten und langfristige Verfügbarkeiten gestellt.
Die Anforderungen an Gleisschotter zählen zu den höchsten an Gesteinsprodukte überhaupt, wodurch die Anzahl an leistungsfähigen Lieferanten zwangsläufig eingeschränkt ist. Je nach geologischen Entstehungsprozessen liegen diese Rohstofflager homogen vor oder sind von Störzonen minderer Qualität durchzogen. Das Ausschließen dieser Zonen von der Gleisschotterproduktion gelingt mit Hilfe geologischer Gutachten zur gründlichen Lagerstättenerkundung, genauer Abbruchplanung und selektivem Abbau – einer Voraussetzung für gleichbleibend hohe Materialgüte.
Üblicherweise werden Abbau und Gesteinsaufbereitung bei der Produktion von Oberbauschotter in folgenden groben Schritten ausgeführt: Abräumen, Bohren, Sprengen, Transportieren, Vorabscheiden, Vorbrechen, Erstaufbereiten, Nachbrechen, Versieben, Lagern, Nachversieben und Verladen.
Das Lösen des Gesteins im Steinbruch erfolgt üblicherweise mittels Großbohrlochsprengung, wodurch Risse unterschiedlichster Größe entstehen. Optimale Bohrlochabstände und Sprengmittelladungen minimieren die Entstehung von Mikrorissen. Die Herstellung der geforderten Lieferkörnung K1 erfolgt in der Regel nach der zweiten Brechstufe durch Absiebung mittels vibrierender Quadratlochsiebung mit Stahl- oder Kunststoffsieben. Es wird danach getrachtet, alle Mikrorisse im Aufbereitungsprozess vollständig aufzubrechen, da im Endprodukt verbleibende Mikrorisse die Festigkeitseigenschaften negativ beeinflussen.

## 5 Qualitätssicherung

Die ÖBB verwenden ein mehrstufiges Qualitätssicherungssystem. Alle Lieferwerke für Eisenbahnschotter müssen CE-Konformitätsbescheinigungen nachweisen und verfügen über eine zertifizierte regelmäßige werkseigene Produktionskontrolle nach EN 13450 [9].

### 5.1 Eignungsprüfung, Kontrollprüfungen, Zwischenprüfungen

Die Eignungsprüfung (Erstprüfung) ermöglicht eine Aussage darüber, ob das gerade in Abbau befindliche Material den festgelegten Anforderungen entspricht und berücksichtigt alle wesentlichen Parameter der EN13450 [9]. Geologische, petrografische und tektonische Gutachten geben Aufschluss über mittel- bis längerfristige Gesteinseigenschaften im Abbaugebiet und ermöglichen eine Abschätzung der künftigen Qualitätsentwicklung.
Die Betriebsbeurteilung selbst erfolgt durch die ÖBB. Im Zuge der Betriebsbeurteilung werden Gutachten und Prüfergebnisse zusammengefasst. Schotterproben vor Ort werden für einen weiteren Prüfkanon entnommen und die technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit des

Lieferanten wird auf Basis der gelieferten Nachweise beurteilt. In jedem Lieferwerk werden zumindest zweimal jährlich Kontrollprüfungen (Konformitätsprüfungen) durch Vertreter der ÖBB durchgeführt. Sie dienen zur Feststellung, ob die Güteeigenschaften den vertraglichen Anforderungen entsprechen und als Konformitätsnachweis der Eigenüberwachung des Herstellers. Die dabei entnommenen Schotterproben im Werk liefern Prüfdaten, die zentral gesammelt werden. Abb. 7 zeigt beispielhaft Zeitreihen typischerweise erreichter mechanischer Kennwerte unterschiedlicher Gesteinsarten in Österreich.

In der Literatur wird häufig auf gute Korrelationen zwischen LA- und SZ-Wert verwiesen. In Österreich zeigt sich eine derartige Korrelation nur bei manchen Gesteinsarten (z.B. Basalt), während andere Gesteine (z. B. Granulit) keine Korrelation aufweisen (vgl. [19]). Auch aus diesem Grund finden in Österreich beide Prüfverfahren im Prüfkanon Anwendung.

Zwischenprüfungen (Identitätsprüfungen) dienen zur Überwachung der Schotterqualität an der Einbaustelle und können von den ÖBB jederzeit durchgeführt werden. Ab einer Liefermenge von 1000 t ist auf der jeweiligen Baustelle zumindest eine Zwischenprüfung durchzuführen. Für Baustellen mit Liefermengen von über 5000 t ist pro angefangener 1000 t Liefermenge zumindest eine Zwischenprüfung durchzuführen. Geprüft wird üblicherweise die Korngrößenverteilung, aber auch andere

**Abb. 8:** Standbilder einer automatisierten Ladekontrolle eines Gleisschotterlieferanten der ÖBB durch Videoüberwachung bei unterschiedlichen Ladezuständen (Dokumentation von Wagennummer, Wagenleerstand, Beladevorgang und Ladegewicht) Quelle: ÖBB

Gesteinsparameter können bei Bedarf untersucht werden.

### 5.2 Verladung

Zur Vermeidung von Fehlverladungen oder Durchmischung mit eventuell vorhandenem Restladegut im Schotterwaggon, muss jeder Waggon vor der Beladung im Lieferwerk einer Wagenleerstandskontrolle unterzogen werden. Diese kann augenscheinlich oder mittels automatischer Videoüberwachungsanlagen erfolgen. Letztere ermöglicht gegebenenfalls eine Kontrolle des Verladevorgangs durch den Besteller in Echtzeit.
Abb. 8 zeigt die Ladekontrolle eines Lieferanten der ÖBB durch automatisierte Videoüberwachung (Inbetriebnahme 2011). Zu Zeitpunkten fix definierter Ladezustände wird jeweils ein Standbild generiert. Die Dokumentation von Wagennummer und Wagenleerstand erfolgt durch zwei Aufnahmen vor der Beladung, die Dokumentation der Beladung durch Aufnahmen beim Ladevorgang selbst. Der automatische Aufnahmeprozess wird über eine Schnittstelle mit der (amtlich geeichten) Bandwaage gesteuert und die aktuelle Lademenge dokumentiert. Sämtliche Ladedaten und Bildinformationen werden in Echtzeit auf einem Server abgelegt, auf den der Besteller (ÖBB-Disposition) Zugriff hat.

## 6 Lastabtragung und Dimensionierung der Schotterbettung

### 6.1 Hertzsche Pressung an der Schiene

Eine der wesentlichen Aufgaben der Schotterbettung ist die Aufnahme und Verteilung der statischen und dynamischen Radlasten und deren Weiterleitung in den Untergrund. Die Rad-Schiene-Kontaktfläche beträgt etwa nur 1 – 3 cm², abhängig von ihrer lateralen Position, den aufgebrachten Radlasten und der Berührgeometrie (Schienenabnützung). Die Theorie nach Heinrich Hertz ermöglicht die Berechnung der Spannungen und deren Verteilung an den Berührflächen elastischer Körper.
Für die Berechnung der auftretenden Schubspannung an der Berührungsfläche Rad-Schiene gelten nach der Theorie von Hertz bei Annahme einer Walzenberührung folgende Formeln:

$$2a = 3{,}04 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{2 \cdot b \cdot E}} \qquad (mm)$$

Bezeichnungen:
F = wirksame Radkraft (N)
r = Radhalbmesser (mm)
b = halbe Fahrspiegelbreite (mm)
E = Elastizitätsmodul des Schienenstahles ($2{,}1 \cdot 10^5$ N/mm²)
$p_{RS}$= Kontaktdruck (N/mm²)
Unter der vereinfachten Annahme (nur gültig für r ≥ 300 mm)

$$p_{RS} = \frac{F}{2a \cdot 2b} = \frac{F \cdot \sqrt{2 \cdot b \cdot E}}{3{,}04 \cdot \sqrt{F \cdot r \cdot 2b}} \qquad (N/mm^2)$$

mit E = $2{,}1 \cdot 10^5$ N/mm² und 2b = 12 mm (Fahrspiegelbreite) gilt:

$$p_{RS} = 43{,}5 \cdot \sqrt{\frac{F}{r}} \qquad (N/mm^2)$$

Die maximale Schubspannung $\tau_{max}$, die in einer Tiefe von 4 bis 7 mm auftritt, wird nach der Halbraumtheorie berechnet.

$$\tau_{max} = c \cdot p_{RS}$$

c ist ein Faktor, der bei konstanter Flächenpressung je nach Form der Berührungsfläche zwischen 0,31 und 0,33 liegt.
Für die maximale Schubspannung $\tau_{zul}$ gilt daher näherungsweise

$$\tau_{max} = 0{,}3 \cdot p_{RS} = 13{,}05 \cdot \sqrt{\frac{F}{r}}$$

### 6.2 Lastausbreitung im Schotterbett

Bei einer angenommenen Berührfläche von 3 cm² und Radsatzlasten von 225 kN ergeben sich Drücke von etwa 42 000 N/cm² an der Schienenoberfläche. Diese Drücke

können sich bei anderen Berührgeometrien noch weiter erhöhen und müssen durch die einzelnen Oberbaukomponenten kontinuierlich aufgenommen und verteilt werden. Bei einer theoretischen Schwellenauflagerfläche von etwa 2400 cm² ergeben sich beispielsweise an der Schwellenunterseite noch Drücke von etwa 37 N/cm² [23]. Die effektive Schwellenauflagerfläche liegt nach Untersuchungen der TU München allerdings bei unbesohlter Schwelle nach Konsolidierung je nach Anzahl der Lastwechsel bei nur etwa 1 bis 2 % der gesamten Schwellensohlfläche. Bei der österreichischen Spannbetonschwelle K1 entspricht dies etwa 100 cm² und lässt auf sehr hohe Kontaktspannungen (bis ca. 4000 N/cm²) schließen [24].

Um die Betriebslasten auf eine genügend große Fläche des Unterbaus bzw. Untergrunds zu verteilen und dessen Tragfähigkeiten nicht zu überschreiten, ist eine ausreichend groß dimensionierte Schotterbettung nötig. Aufgrund der Schienendurchbiegung, elastischer Zwischenelemente und ungleichförmigen Auflagerbedingungen ist eine Anfangseinsenkung nötig, um die Radlast auf mehrere Schwellen zu verteilen und die darunterliegende Widerstandskraft der Schotterbettung auch unter den benachbarten Schwellen zu aktivieren. Je größer die Biegesteifigkeit der Schiene und je geringer die Steifigkeit der Bettung, desto mehr Schwellen werden für die Lastabtragung herangezogen. Der Gleisrost selbst ist im Haufwerk der Schotterbettung schwimmend gelagert, nur bei homogenen Auflagerbedingungen können die auftretenden Verkehrslasten gleichmäßig in den Untergrund abgeleitet werden.

Die Lastabtragung im Schotterbett erfolgt über die Kontaktflächen der Schotterkörner untereinander primär über Druckkräfte und sekundär über Schubkräfte. Die Annahme einer geradlinigen Druckverteilung nach Fröhlich [25] gilt nur für isotrope und homogene Stoffe, in der Realität er-

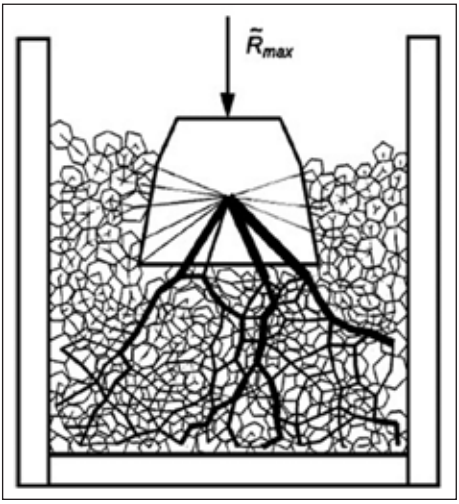


**Abb. 9:** Diskontinuierlicher Lastabtrag einer enggestuften Gesteinskörnung Quelle: [26]

folgt die Lastabtragung über zufällig ausgebildete Kräftepfade (Abb. 9).
Je nach Belastungsintensität und Schotterbettstärke reichen einzelne Kräftepfade auch außerhalb des angenommenen Lastausbreitungswinkels bis ans Planum. Fröhlich verwendet zur Berücksichtigung von Anisotropie und Inhomogenität den Konzentrationsfaktor $v_K$.
Die Flächenpressung am Planum ist vom angenommenen Lastausbreitungswinkel der Bettung abhängig. Um die Tragfähigkeit des Untergrunds (Unterbau) optimal auszunutzen und einen gleichmäßigen Druckverlauf am Planum zu erreichen, sollte die Schotterbettstärke theoretisch so groß sein, dass sich die Druckverteilungslinien benachbarter Schwellen über dem Planum schneiden [vgl. 1]. Sie ergibt sich aus

$$a = \frac{n}{2 \cdot \tan \alpha}$$

wobei a die Bettungsstärke unter der Schwelle, n den Schwellenabstand und $\alpha$ den Lastausbreitungswinkel darstellt. Praktische Erfahrungen zeigen wesentliche Abweichungen von einer homogenen Lagerung aufgrund von Streuungen in der Anfangsverdichtung, Kornzerstörungen als Folge von Betriebsbelastungen oder durch Fremdstoffeintrag veränderte Korngrößenverteilungen (z. B. Windverfrachtungen, Ladegut). Im Gleisneubau ist die Herstellung eines Schottergerüsts in Form einer qualitativ hochwertigen und homogen verdichteten Vorschotterung von besonderer Bedeutung. Das Erreichen der vorgegebenen Sollhöhen darf nicht auf Kosten eines gleichförmigen Korngerüsts hinsichtlich Dichte und Korngrößenverteilung erfolgen (z. B. Kornzerstörung aufgrund unzulässig hoher Verdichtungsenergien). Bei Schwellenhohllagen ergeben sich Steifigkeitsschwankungen in der Gleisbettung, die eine Konzentration der Belastungen auf einzelne örtlich begrenzte Teile im Korngerüst zur Folge haben [vgl. 27].
Im Scherdiagramm wird der Anstieg der Scherfestigkeit durch den Reibungswinkel $\varphi$ bestimmt. Große Reibungswinkel begünstigen die Schotterbettstabilität und sorgen für gute Lastverteilung, die Aktivierung großer Schottermengen und eine Reduktion der Untergrundbelastung. Der Reibungswinkel wird wesentlich durch die Korngrößenverteilung (Ungleichförmigkeit, Dichte), Kornform, Kornrauigkeit, Scharfkantigkeit und Kantenstabilität mitbestimmt. Manche dieser Parameter lassen sich durch Gesteinsaufbereitung nicht beeinflussen und sind im Wesentlichen durch die Gesteinseigenschaften und Mineralogie vorgegeben. Zur Erfassung zusätzlicher geometrischer Einflussparameter wie Sphärizität (Kugelähnlichkeit) und Rundungsgrad wurden seitens der ÖBB 2012 Versuche an allen für Oberbauschotter maßgeblichen Gesteinsarten mit dem Petroscope an der TU-Graz durchgeführt. Hierbei wird ein Kontingent von Einzelkörnern durch einen Laserstrahl abgetastet,

wodurch eine Ermittlung von Rundungsgrad, Formkennzahlen und Korngrößenverteilungen möglich ist.
Feinanteile in größerer Menge wirken im nassen Zustand als Schmierstoff, verkleinern den Reibungswinkel und setzten so die Scherfestigkeit herab. Daraus ergeben sich nachteilige Lastabtragungseigenschaften und hohe Spannungsspitzen. Außerdem binden sie durch Kapillarität Wasser, verzögern die Austrocknung des Untergrunds und können so langfristig die Tragfähigkeit verringern und zu Setzungen führen.
Der Lastausbreitungswinkel von neuem Gleisschotter im Schotterbett wird in der Literatur teilweise mit bis zu 45° angegeben. Für die ÖBB 2012 durchgeführte Versuche an der Universität Innsbruck ergaben bei Laboruntersuchungen wesentlich geringere Werte von etwa 20° (bei 90 % Lastquantile) für Neuschotter. Aufschlüsse über das Zusammenwirken von Besohlungen mit unterschiedlichen Gesteinsarten und deren Einfluss auf das Lastabtragungsverhalten unter hochdynamischer Belastung geben Messungen im realen Gleis. Diese wurden 2012 im Zuge von Schnellfahrversuchen auf der neuen Westbahnstrecke Wien-St. Pölten im Abschnitt Tullnerfeld durchgeführt.

### 6.3 Oberbauberechnung und Schotterbeanspruchung

Die Beanspruchung des Schotters wird üblicherweise durch die Schotterpressung zum Ausdruck gebracht. Sie ergibt sich durch die Last auf einer Schwelle, bezogen auf die effektive Auflagerfläche der Schwelle im Schotter. Die stärksten, die Schotterkörner zerstörenden, Lasten sind im Wesentlichen quasistatische und dynamische Vertikallasten. Unstetigkeiten im Gleis (z. B. Weichenherze, Stoßlücken) oder am Fahrzeug (z. B. Flachstellen) bewirken punktuelle, dynamisch wirksame Kraftspitzen. Abrupte Steifigkeitsunterschiede im Untergrund (z. B. Brückenübergänge) und ungleichmäßige Lagerungsdichten der Bettung wirken ihrerseits auf den Lastabtrag zurück (Baugrund-Tragwerk-Interaktion).
Zur Beurteilung der Beanspruchung der Oberbaukomponenten wird das Verfahren nach Zimmermann auf Basis der Überlegungen von Winkler [28] angewendet. Obwohl im Detail nicht bedingungslos akzeptiert, liefert das Verfahren nach Zimmermann [29] für Bemessungszwecke zuverlässige Ergebnisse und findet bei den ÖBB in Form der Vorschrift B 50-Teil 3 [22] Anwendung. Die Schienen werden dabei als Träger auf einer elastischen Unterlage mit dem Bettungsmodul C betrachtet. Das Bettungsmodul C beschreibt die Beziehung zwischen der Flächenpressung des Stützpunktes und der Einsenkung und beinhaltet damit auch die Elastizität des Schotterbetts und des Untergrunds.

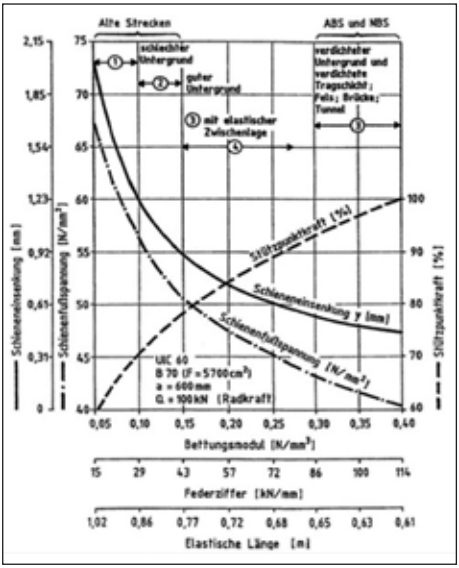


**Abb. 10:** Schieneneinsenkungen, Schienenfußspannungen und Stützpunktkraft bei unterschiedlichen Bettungsmodulen, Federkennziffern und elastischen Längen und einer Radsatzlast von 100 kN

Quelle [ 23]

1

$$C = \frac{p}{\gamma}$$

C = Bettungsmodul (N/mm³)
p = Flächenpressung zwischen Schwelle und Schotter (N/mm²)
y = Einsenkung der Schiene (mm).
Elastische Elemente wie Zwischenlagen, Besohlungen oder Unterschottermatten können durch Superposition berücksichtigt werden.
Die Schienenverformungen sind abhängig von Radlast, Schienensteifigkeit, Steifigkeit der Auflager und Schwellenabstand. Wie in Abb. 10 dargestellt, ergeben sich bei weichem Untergrund höhere Verformungen und dadurch erhöhte Schienenbeanspruchungen. Harter Untergrund führt hingegen zu hohen Stützpunktkräften und damit verbundenen erhöhten Schotterbeanspruchungen. Als Maßnahmen zur Reduktion dieser Belastungen auf den Schotter dienen beispielsweise Schwellenbesohlungen und Unterschottermatten [31].
In der ÖBB Vorschrift B 50-Teil 3 [22] kommen die in Tab. 1 dargestellten Bettungsmodule zur Anwendung.
Das Bettungsmodul kann über Einsenkungsmessungen, Schienenfußspannungen oder Kenntnis der Biegewelle bei gegebener Vertikallast über folgende Formeln bestimmt werden:
– aus der Schienenfußspannung:

$$C = \frac{4 \cdot E \cdot I \cdot a}{A} \cdot \frac{F}{4 \cdot \sigma_F \cdot W_u}^{4} \quad (N/mm^{3)}$$

– aus der Einsenkung der Schiene:

$$C = \frac{F \cdot a}{4 \cdot \gamma \cdot A} \cdot \sqrt[3]{\frac{F}{E \cdot I \cdot \gamma}} \quad (N/mm^3)$$

– aus der Länge der Biegewelle zwischen den Punkten a und b (Abb. 11):

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I \cdot a}{A \cdot C}} \quad (mm)$$

und

$$C = 2000 \cdot \frac{E \cdot I \cdot a}{A \cdot D^4} \quad (N/mm^3) \cdot$$

| Art des Untergrunds | Bettungsmodul C (N/mm³) |
|---|---|
| Sehr schlechter Untergrund (Moorboden, einkörnige Sande | 0,02 |
| Schlechter Untergrund (bindiger Boden, nicht dauerhafte Gleislage) | 0,05 |
| Guter Untergrund (Kies) | 0,10 |
| Sehr guter Untergrund | 0,15 |
| Betonsohle (Brücken, Tunnel) | ≥0,30 |

**Tab. 1:** Bettungsmodule nach Art des Untergrundes

Quelle: [22]

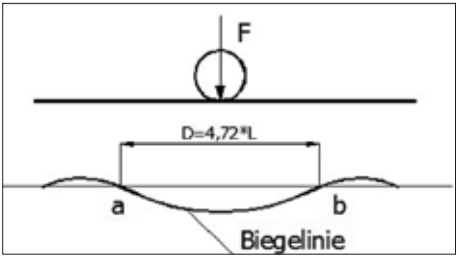


**Abb. 11:** Biegelinie zwischen den Punkten a und b

Quelle: [22]

### 6.3.1 Rechnerische Schotterpressung unter der Schwelle

Grundlage der Berechnung nach Zimmermann ist die in Abb. 12 dargestellte Umrechnung der Querschwellenauflager in flächengleiche Langschwellen.
a = Schwellenabstand
b = Breite des gedachten Längsträgers
ü = Schwellenüberstand
2ü = Schwellenlänge abzüglich Radaufstandspunktabstand (1500 mm bei Normalspur, 805 mm bei Schmalspur)
$A_1 = A_2 = A$
$A_1 = 2 \cdot ü \cdot b_1$
$A_2 = b \cdot a$

$$b = \frac{2 \cdot ü \cdot b_1}{a} = \frac{A_1}{a}$$

# Die Eurailpress-
# Handbücher Bahnwissen

**Kontakt :** DVV Media Group GmbH | Eurailpress
**Telefon :** +49 40/2 37 14 - 440 · Fax : +49 40/2 37 14 - 450 · **E-Mail :** buch@dvvmedia.com

***alle Preise sind inkl. MwSt. zzgl. Versandkosten**

DVV Media Group

**Bestellen Sie unter www.eurailpress.de**

Eurail press

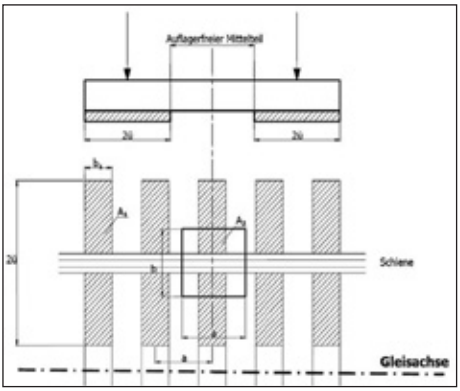


**Abb. 12:** Umwandlung des Querschwellengleises in ein theoretisches Langschwellengleis Quelle: [22]

b1: Bei Betonschwellen sind Abschrägungen und Einengungen in der Schwellenmitte zu berücksichtigen.

Die Schotterpressung p unter der Schwelle ergibt sich mit $p = C \cdot y$, die Einsenkung $y$ nach der Formel

$$y = \frac{F \cdot a}{2 \cdot A \cdot C \cdot L} \cdot \eta.$$

L beschreibt die fiktive Schwellenlänge und ergibt sich nach

$$L = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot E \cdot I_x \cdot a}{A \cdot C}}$$

A = halbe Auflagerfläche der Schwelle [mm²]
a = Schwellenabstand [mm]
C = Bettungsmodul [N/mm³]
p = Flächenpressung zwischen Schwelle und Schotter [N/mm²]
y = Einsenkung der Schiene [mm]
E = Elastizitätsmodul des Schienenstahles ($2{,}1 \cdot 10^5$ N/mm²)
F = wirksame Radkraft [N] gemäß EN 15528
L = fiktive Schwellenlänge als Grundwert des Langschwellenoberbaus
$I_x$ = Trägheitsmoment der Schiene (mm⁴)
η = Zimmermannscher Einflussfaktor
φ = Geschwindigkeitsfaktor
n = Lastspielzahl.

Die wirksame *Radkraft F* ergibt sich aus der statischen Radkraft und einem Zuschlag (10 bis 20 Prozent) für die Radkraftverlagerung bei Bogenfahrt.

Der Zimmermannsche Einflussfaktor η berücksichtigt den Einfluss mehrerer Fahrzeugachsen und ist in Tabellenform in der ÖBB Vorschrift B50-Teil3 enthalten. Für eine Einzellast in Schwellenmitte wird er mit 1,0 angesetzt.

Die Streuungen der Einwirkungen (quasistatische und dynamische Beanspruchungen) und Widerstände (Schotter, Hohllagen, Untergrund) werden durch Zuschläge für Geschwindigkeit und Erhaltungszustand berücksichtigt und im Faktor $\bar{s}$ zusammengefasst ($\bar{s} = n \cdot \varphi$). Der Geschwindigkeitsfaktor φ ergibt sich aus der maximalen Streckengeschwindigkeit und beträgt etwa 1 bis 1,5. Der Faktor n liegt zwischen 0,15 und 0,25 und ergibt sich aus dem Strecken- und Gleisrang.

### 6.4 Querverschiebewiderstände

Der Querverschiebewiderstand ist eine entscheidende Größe zur Bemessung der Lagesicherheit des Gleises gegen Verwerfungen und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig (Schwellengeometrie, Berührflächen, Korngrößenverteilung, Kornformen, Kantigkeit, Vorkopfschüttung,…). Er ist jene Reaktionskraft, die einer Verschiebung des Gleises orthogonal zur Gleisachse entgegenwirkt (üblicherweise nach 2 mm Verschiebeweg).

Der Querverschiebewiderstand setzt sich aus folgenden Teilwiderständen zusammen:

- Sohlreibung: Widerstände an der Schwellensohle abhängig von Auflast, Berührfläche und Verzahnung bzw. Reibungskoeffizient. Nach [24] kann zwischen primärem und sekundärem Sohlwiderstand unterschieden werden.
- Flankenwiderstand: aktiver Erddruck gemäß Erddrucktheorie abhängig von

Reibungskoeffizient, Schütthöhe und Materialkennwerten
- Vorkopfwiderstand: passiver Erddruck der Erddrucktheorie wird erst ab einer gewissen Bewegung wirksam.

Unmittelbar nach der Schotterbettreinigung oder Stopfung sind die Querverschiebewiderstände um 40 bis 50 % verringert. Die dynamische Gleisstabilisierung erhöht den Querverschiebewiderstand um 30 bis 40 % [23]. Die in der Literatur angegebenen Anteile der Teilwiderstände schwanken je nach angewendeter Messmethode. Übereinstimmend wird allerdings etwa die Hälfte des Gesamtwiderstandes gegen Querverschiebung durch die Sohlreibung bestimmt, bei besohlten Schwellen bis etwa 60 %.

Um den Einfluss unterschiedlicher Schotterarten (Granit und Dunit), Besohlungen und Sicherungskappen auf den Querverschiebewiderstand festzustellen, wurden 2010 von der ÖBB an der TU München Versuche nach der Einzelschwellenmethode beauftragt und zum Teil veröffentlicht [vgl. 24].

Für die Messungen wurde im Prüfstand ein Gleisrost mit zwei unbesohlten Spannbetonschwellen K1 eingerichtet. Die Schotterbettstärke betrug 45 cm, was einer Schotterstärke von 23 cm unter Schwellenunterkante entspricht. Zur Simulation des Untergrunds kamen Unterschottermatten unterschiedlicher Steifigkeit ($C_{stat}$ = 0,045 N/mm³ und 0,28 N/mm³) zum Einsatz. Die Schotterbettverdichtung erfolgte mittels Rüttelplatte und Handstopfgerät. Der Versuchsaufbau ist in Abb. 13 ersichtlich.

### 6.4.1 Einsenkung, Steifigkeit, Bettungsmodul

Die Einsenkungen unter statischer und dynamischer Belastung wurden mit Induktivwegaufnehmern gemessen. Nach ei-

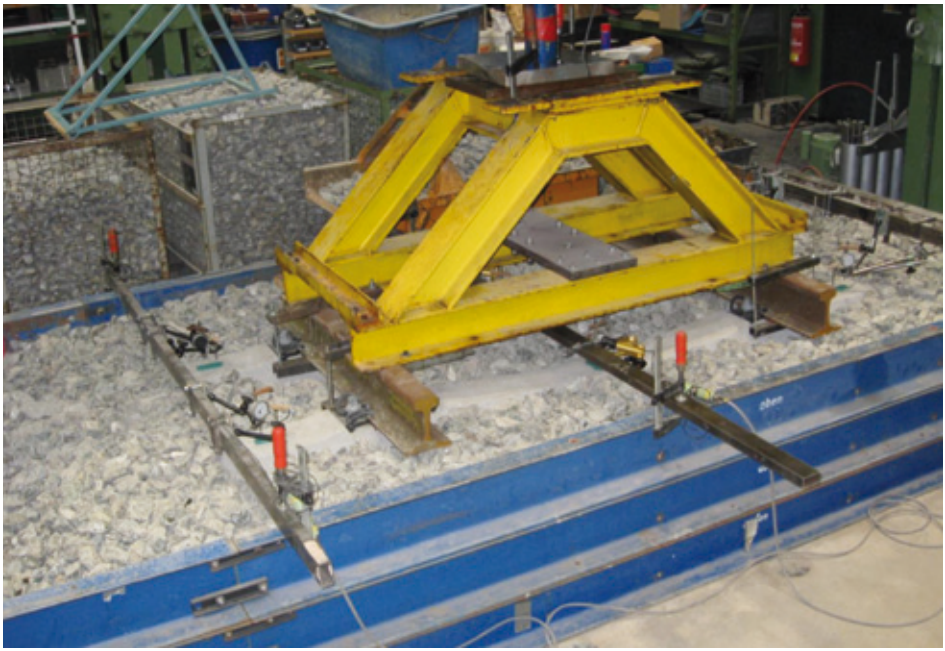

**Abb. 13:** Versuchsstand während des Dauerschwellversuchs

Quelle: ÖBB

1

ner Simulation von 3 Mio. Lastwechseln mit einer Oberlast von 225 kN wurden die statischen und dynamischen Bettungsmodule, das Setzungsverhalten und der Querverschiebewiderstand der einzelnen Schwellen ermittelt.

Nach dem Erreichen des Konsolidierungszustandes bei etwa 250 000 Lastwechseln sinkt die Schwingweite (Rückgang der elastischen Verformungen) während die plastischen Verformungen weiter zunehmen.

Bei gleicher Korngrößenverteilung zeigte der Dunit während des Dauerschwellversuchs im Vergleich zum Granit eine geringere statische und dynamische Steifigkeit, verbunden mit größeren plastischen Verformungen. Nach 3 Mio. Lastwechsel betrug die plastische Verformung des Granitschotters bei steifem Untergrund ($C_{stat}$ = 0,28 N/mm³) etwa 6 mm, während die des Dunits bei etwa 9 mm lag. Der statische Bettungsmodul lag nach einer Belastung von 3 Mio. Lastwechseln im Mittel bei etwa 0,155 N/mm³, der dynamische bei etwa 0,195 N/mm³.

Die Vorkopfschüttung beim Versuch betrug horizontal 0,50 m, die anschließende Böschungsneigung 1:1,5. Zur Messung der Querverschiebewiderstände wurden nach dem gesamten Belastungszyklus die Schienen von den Schwellen entkoppelt. Anschließend wurden die Schwellen quer zur Gleisachse, ohne vertikale Auflast einzeln verschoben. Die horizontale Lasteinleitung erfolgte in der neutralen Achse der Schwelle, als maßgebende Widerstandskraft wurde jene bei 2 mm Verformungsweg (Übergang Haftreibung – Gleitreibung) herangezogen. Die Berechnung erfolgte durch den Bezug auf den Schwellenabstand von 600 mm in der Einheit N/mm.

Abb. 14 zeigt einen typischen Kraft-Verformungsverlauf einer Querverschiebewiderstandsmessung mit Sicherungskappen.

Tab. 2 zeigt bei Dunitschotter auf weichem Untergrund einen um 27 % erhöh-

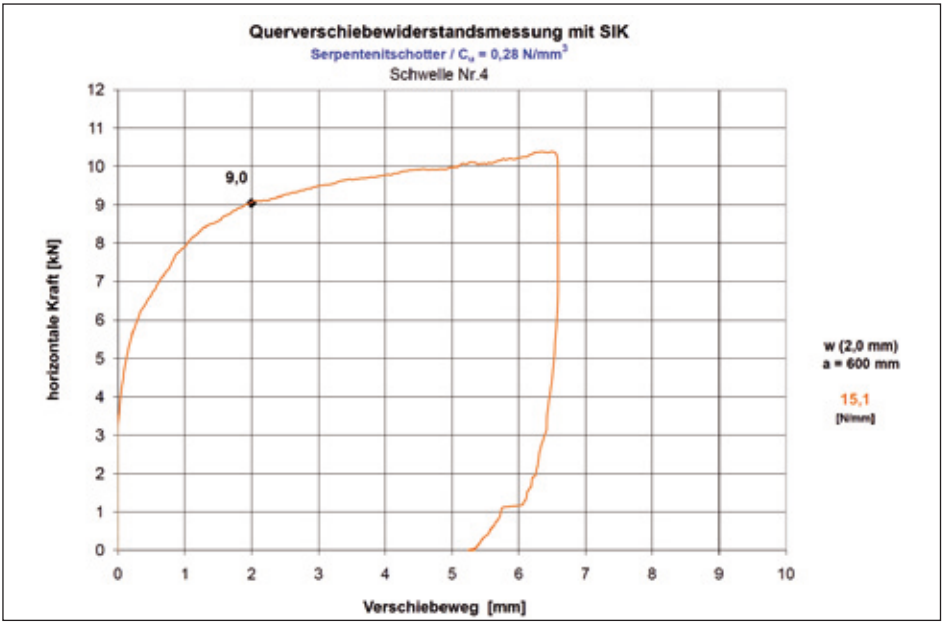


**Abb. 14:** Querverschiebewiderstandsdiagramm einer Einzelschwellenmessung mit Sicherungskappe

Quelle: ÖBB

| | Querverschiebewiederstand [N/mm] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Oberlast = 225 kN, Unterlast = 8 kN, Frequenz = 3 Hz | | | |
| | Dunit weicher Untergrund $C_u$ = 0,045 N/mm³ | Granit harter Untergrund $C_u$ = 0,028 N/mm³ | Dunit harter Untergrund $C_u$ = 0,028 N/mm³ | Dunit mit SIK harter Untergrund $C_u$ = 0,028 N/mm³ |
| Messung 1 | 13,4 | 11,8 | 10,7 | 14,4 |
| Messung 2 | 13,6 | 11,8 | 10,6 | 15,1 |
| Mittelwert | 13,5 | 11,8 | 10,7 | 14,8 |

**Tab. 2:** Querverschiebewiderstände der Einzelschwellen nach dem Dauerschwellversuch mit 3,0 Mio. Lastwechsel

Quelle: ÖBB

ten Querwiderstand (gegenüber hartem Untergrund), was auf eine höhere Dichte durch größere Schwingweite und größere plastische Verformung aufgrund von Umlagerungsprozessen zurückzuführen ist. Auf hartem Untergrund ist der Querverschiebewiderstand gegenüber Granitschotter aufgrund geringerer Kantenstabilität leicht reduziert. Besonders in sehr engen Bögen wirken aufgrund von Temperaturdehnungen hohe Kräfte zur Bogenaußenseite, die ohne Zusatzmaßnahmen Gleisverwerfungen verursachen würden. Hier werden Sicherungskappen (SIK) als Mittel zur Erhöhung des Querverschiebewiderstandes eingesetzt. Eine Überprüfung ihrer Wirksamkeit im Zuge der Untersuchungen zeigte eine mittlere Erhöhung des Querverschiebewiderstandes von etwa 30 %. Bei Schotterbettstärken über 45 cm ist von einer weiteren Erhöhung aufgrund des zusätzlich aktivierten Druckkegels auszugehen.

## 7 Reduktion der mechanischen Gleisschotterbelastungen

Gleichmäßige Verdichtung und Homogenität der Schotterbettung sind wesentliche Voraussetzungen zur Reduktion der Belastungen des Schottergerüsts. Unmittelbar nach maschineller Schotterbettreinigung und Stopfung ist der Schotter nur lokal begrenzt im Einflussbereich der Stopfpickel verdichtet.

Eine Homogenisierung über den gesamten Querschnitt wird durch den Einsatz dynamischer Gleisstabilisierung angestrebt. Ungleichmäßige Setzungen durch Betriebsbelastungen werden verringert und in gleichmäßiger Form vorweggenommen, Längs- und Querverschiebewiderstände werden erhöht und Hohllagen unter den Schwellen werden verringert. Mittels dynamischem Gleisstabilisator wird das Gleis unter Auflast in horizontale Schwingungen von 30 – 37 Hz versetzt. Aufgrund der geringen Schotterpressung von ca. 8 N/cm² spricht man auch von „kräftefreier räumlicher Verdichtung“ [32].

Eine weitere Maßnahme zur Verlängerung der Lebensdauer der Schotterbettung ist der gezielte Einsatz elastischer Elemente wie Schwellenbesohlungen und Unterschottermatten (vgl. [33]). Die daraus resultierenden geringeren mechanischen Belastungen der Schotterkörner ergeben sich durch gleichförmigere Auflagerbedingungen einerseits und durch eine Dämpfung der dynamischen Impulse aus den Betriebsbelastungen andererseits. Durch den Einsatz von Besohlung können zudem die Kontaktflächen zwischen Schwelle und Schotter vervielfacht werden.

Eine Erhöhung der Kontaktflächen ergibt sich ebenso durch geänderte Schwellendi-

mensionierung wie beispielsweise Rahmenschwellen (Abb. 15) oder HD-Schwellen.

## 8 Entwicklung und Ausblick

Die Qualität des im Streckennetz der ÖBB eingesetzten Oberbauschotters wird durch ein Prüfsystem über die „Herstellung und Lieferung von Oberbauschotter" und durch die technischen Lieferbedingungen für Oberbauschotter (BH 700) geregelt. Als Grundlage für die Anforderungen dient die europäische Norm EN 13450.
Alle Lieferwerke für Eisenbahnschotter müssen CE-Konformitätsbescheinigungen nachweisen und verfügen über eine zertifizierte, regelmäßige, werkseigene Produktionskontrolle. Die Sicherstellung der Qualität erfolgt typischerweise durch Erstprüfung, Konformitäts- und Identitätsprüfungen.

In vergangenen Ausgaben der EN 13450 wurde das Los-Angeles-Prüfverfahren als europäisches Referenzverfahren zur Bestimmung des Widerstandes von Oberbauschotter gegen Zertrümmerung angeführt. Grundlage dafür waren Versuche des European Rail Research Institute (ERRI) in den Jahren 1991 und 1992. Die Praxis zeigt, dass eine alleinige Referenzierung auf den Los-Angeles-Koeffizient (LA-Wert) die Erfahrungen im österreichischen Streckennetz nicht vollständig widerspiegeln. Daher werden bei der ÖBB als weitere Qualitätskriterien auch der Schlagzertrümmerungswert und der Micro-Deval-Koeffizient angewendet. Zusätzlich wurden in den vergangenen Jahren auch alternative Prüfverfahren zur Qualitätsprüfung von Gleisschotter untersucht, weiterentwickelt und zum Teil veröffentlicht [vgl. 19]. Ein Teil dieser Prüfverfahren kann sich zum

**Abb. 15:** Sichtbare Schotterkorn-Kontaktflächen einer besohlten Rahmenschwelle im Raum St. Pölten

Quelle: ÖBB

routinemäßigen Einsatz eignen und lässt weitere Entwicklungen auf diesem Gebiet erwarten.

Um das Verhalten des österreichischen Oberbauschotters im Netz der ÖBB richtig beurteilen und Rückschlüsse auf Qualitätskennwerte ziehen zu können, wurde im Zuge eines Projekts zur umfassenden Betrachtung des Themas Oberbauschotter in den Jahren 2010 bis 2012 eine Vielzahl an Untersuchungen im Streckennetz der ÖBB durchgeführt. Unter Berücksichtigung von Rahmenbedingungen wie Oberbaukomponenten, Entwässerung, Untergrundsteifigkeiten etc. wurden Schotterproben entnommen und Materialuntersuchungen von akkreditierten Prüfanstalten und Universitäten durchgeführt.

Dabei zeigt sich deutlich, dass auf technischer Basis alle Gleiskomponenten bestmöglich aufeinander abgestimmt sein müssen. Der verwendete Oberbauschotter spielt dabei als Teil des Systems eine wesentliche Rolle. Bei unzureichender Entwässerung, schlechtem Untergrund oder schlagender dynamischer Belastung durch Unstetigkeiten am Fahrweg kann allerdings auch der hochwertigste Oberbauschotter die Mängel im Gesamtsystem nicht ausgleichen.

Ein wesentlicher wirtschaftlicher Unterschied von Oberbauschotter zu anderen Oberbaukomponenten ist der hohe Anteil der Transportkosten an den Gesamtkosten für Schotterlieferungen an die Baustelle. Änderungen technischer Anforderungen haben automatisch Auswirkungen auf Lieferantenstruktur, Transportkosten und Baustellenlogistik. Die Forderung von maximaler Oberbauschotterqualität zu günstigem Preis, bei bestmöglicher Versorgungssicherheit und minimalen Transportwegen zeigt die Notwendigkeit einer Betrachtung des Themas Oberbauschotter mit Systemansatz.

## Quellen


[1] Klotzinger, E.: Der Oberbauschotter. Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 01+02/2008

[2] Klotzinger, E.: Der Oberbauschotter. Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 03/2008

[3] Issler, L.; Ruoß, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen, Springer-Lehrbuch, 2003

[4] Dietrich, H.: Mechanische Werkstoffprüfung: Grundlagen, Pruefmethoden, Anwendungen, expert Verlag, Renningen, 1994

[5] Anthes, G. (2006): Studie Grundlagenerhebung zu Vorkommen von Granitgesteinen in Österreich

[6] http://www.volcanodiscovery.com/de/vulkane/lexikon/basalt.html

[7] http://www.wikipedia.org

[8] Technische Lieferbedingungen für Oberbauschotter BH 700, ÖBB-Infrastruktur AG, 16. März 2011

[9] ÖNORM EN 13450 Gesteinskörnungen für Gleisschotter; Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[10] ÖBB-Infrastruktur AG (März 2011): Prüfsystem gemäß Artikel 53 RL 2004/17/EG idgF über die „Herstellung und Lieferung von Oberbauschotter der Körnung I und II“

[11] ÖNORM EN 933-4 Prüfverfahren für geom. Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl, Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[12] ÖNORM EN 1097-2 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung, Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[13] ÖNORM EN 1097-1 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval), Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[14] ÖNORM EN 1097-6 Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen, Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme, Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[15] EN 1367-1 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen, Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel, Österreichisches Normungsinstitut, idgF

[16] ÖNORM EN 1367-2 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen, Teil 2: Magnesiumsulfat-Verfahren, Österreichisches Normungsinstitut, idgF.

[17] ÖNORM EN 1367-3 Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen. Teil 3: Kochversuch für Sonnenbrand-Basalt, Österreichisches Normungsinstitut, idgF
[18] ORE (1991): Einheitliche Beurteilungskriterien der Schotterqualität und Bewertungsmethoden des Schotterzustandes im Gleis, Question D 128. Report No. 2
[19] Bach, H.; Kuttelwascher, C.; Latal, C.: Alternative Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Gleisschotter, ZEVrail, 3/2012
[20] Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (Februar 2008): SN 670 830b Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Verfahren zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Gleisschotter am Haufwerk
[21] Breymann, H.: Mechanische Kriterien für den Gleisschotter – Punktlastversuch, Zertrümmerung, Bericht an die ÖBB, 2011 (unveröffentlicht).
[22] B 50-Teil 3 (März 2012): Oberbauberechnung, ÖBB-Infrastruktur AG
[23] Lichtberger, B.: Handbuch Gleis, Tetzlaff Verlag, 2003
[24] Iliev, D.: Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlten Schwellen, TUM Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau, Schriftenreihe Heft 86, 2012
[25] Fröhlich, O. K.: Druckverteilung im Baugrunde, Springer, 1934
[26] Kruse, H.: Modellgestützte Untersuchungen der Gleisdynamik und des Verhaltens von Eisenbahnschotter. Dissertation eingereicht an der Universität Hannover, 2002
[27] Holtzendorff, K.: Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen, Dissertation eingereicht an der Technischen Universität Berlin, 2003
[28] Winkler, E.: Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit, 1867
[29] Zimmermann, H.: Berechnung des Eisenbahnoberbaus, 1941
[30] Eisenmann, J.: Feste Fahrbahn als Alternative zum Schotteroberbau, in: Schienen der Welt, November 1995
[31] Auer, F.; Schilder, R.: Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB, ZEVrail. April 2009
[32] Lichtberger, B.: Der Querverschiebewiderstand der Gleise, EIK 2007
[33] Matthä, A.: ÖBB´s approach to sustainable maintenance of infrastructure, european railway review, 4/2012