

Druckausbreitung von belasteten Eisenbahnschwellen im Gleisschotter

Eine dauerhaft gute Gleislagequalität des Schottergleises hängt wesentlich von der Tragfähigkeit des Untergrunds und den darauf einwirkenden Belastungen ab. Eine der Hauptaufgaben des Oberbauschotters liegt – neben anderen wesentlichen Funktionen – in der Ableitung und Ausbreitung von einwirkenden Verkehrslasten. Damit hat er bedeutenden Einfluss auf die Belastungscharakteristik des Untergrunds.

➔ Für die lastverteilende Wirkung des Gleisschotters ist neben der Schotterbettstärke [1, 2] auch der Lastausbreitungswinkel bzw. Lastverteilungswinkel verantwortlich. Dieser Lastausbreitungswinkel ist abhängig von Randbedingungen wie Korngrößenverteilung, Kornform, Gleichmäßigkeit der Verdichtung, Art der Beanspruchung (statisch, dynamisch), Kornumlagerung, Gesteinseigenschaften und Kornverschleiß, Nachgiebigkeit des Untergrundes usw. In der Literatur finden sich Annahmen zum Lastausbreitungswinkel der Schotterbettung von 45° bis zu Angaben von 15° [3, 4] und 7° [5] erkennbar an Abdrücken auf Unterschottermatten. Die vorliegende Arbeit untersucht Einflüsse von Gesteinsart und Besohlung (SLB 3007 G) auf den Lastausbreitungswinkel durch Laborversuche im Schotterkasten. Für die Belastungsversuche wurden folgende Gesteinsarten der ÖBB-Lieferkörung K1 (31,5/63) ausgewählt [6]:

- ➔ Basalt der Firma APPEL, Steirische Basalt- und Hartsteinwerke ($LA_{RB} = 11$; $SZ_{RB} = 14,8$; $M_{DE, RB} = 7$)
- ➔ Granulit der Firma ASAMER, Steinbruch Wanko ($LA_{RB} = 17$; $SZ_{RB} = 22,0$; $M_{DE, RB} = 12$)

Die angegebenen mechanischen Kennwerte stellen eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung dar und wurden gemäß ÖNORM EN 13450 ermittelt [7, 8]. Die Druckausbreitung wurde mit Druckplatten am Boden des Schotterkastens auf Planumsniveau bei unterschiedlichen Schotterstärken gemessen. Belastet wurde eine halbe Betonschwelle vom Typ B70 im Schotterkasten mit einer Hydropulsanlage. Die Schwellen waren unbesohlt oder mit einer Sohle SLB3007 G der Firma Getzner versehen. Der Gleisschotter wurde manuell auf einer Stahlplatte eingebaut und mittels Rüttelplatte dynamisch verdichtet. Anschließend wurde die Schwelle verlegt und durch Handstop-



Dipl.-Ing. Dr. techn. Ekkehard Steiner
Assistenzprofessor am Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme/Eisenbahnwesen
ekkehard.steiner@uibk.ac.at



Dipl.-Ing. Christoph Kuttelwascher
Fachexperte für Oberbau bei der ÖBB-Infrastruktur AG und Systemspezialist für Oberbauschotter
christoph.kuttelwascher@oebb.at



Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günter Prager
Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme/Eisenbahnwesen
gunter.prager@uibk.ac.at

fung mit Stopfspitzhacke ausgerichtet. Die Schotterbettstärke betrug entweder 45 cm oder 55 cm. Dies entspricht bei der Schwell-

BILD 1: Lage der Druckplatten im Bereich der halben Schwelle auf dem Planumsniveau unter dem Gleisschotter in den Größen von 0,04 m², 0,02 m² und 0,013 m²
(Quelle aller Bilder: Autoren)

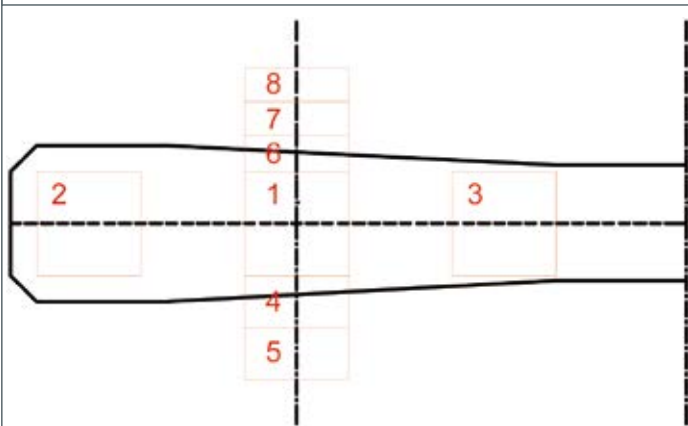


BILD 2: Hydropulsanlage der Technischen Versuchs- und Forschungsanstalt der Universität Innsbruck (TVFA)



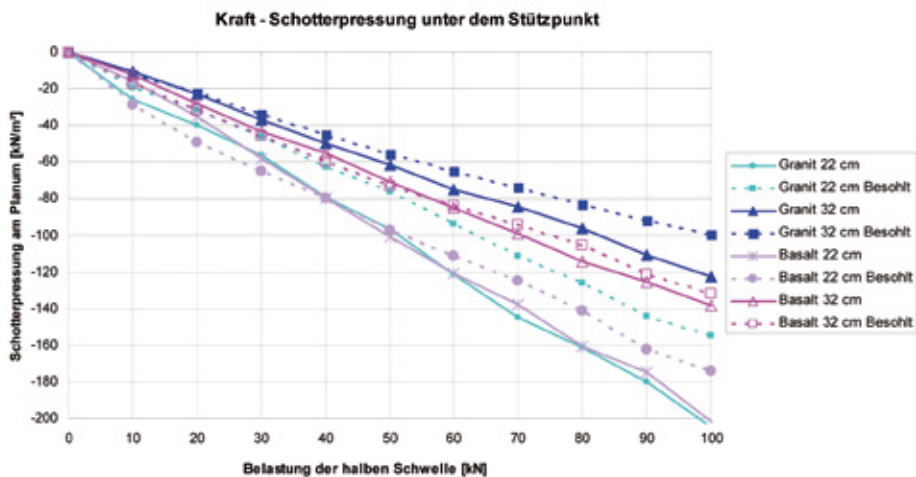


BILD 3: Schotterpressung unter dem Stützpunkt auf Planumsniveau (gemittelte Pressung einer 0,04 m² großen Druckplatte) bei quasi statischer Belastung (Schotterstärke: Schwellenunterkante – Planum)

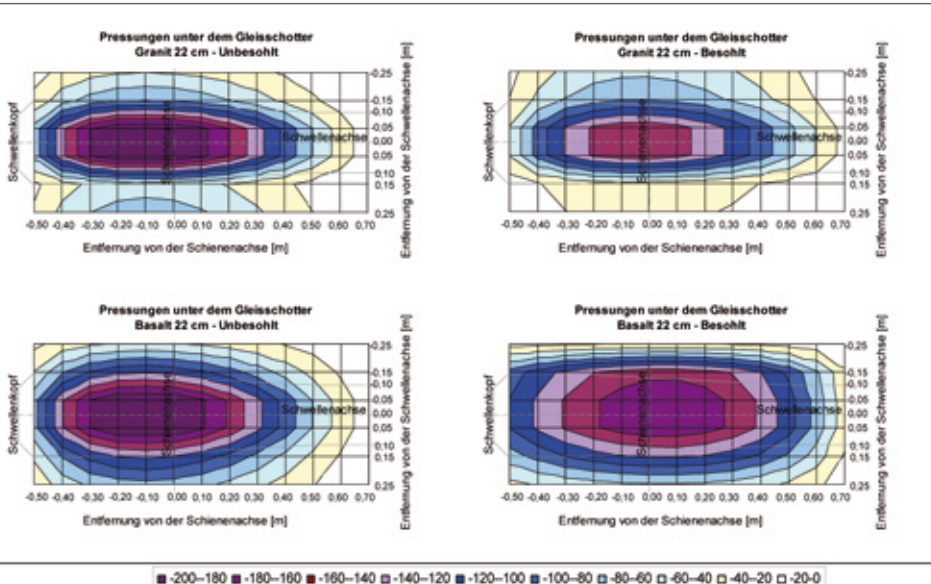


BILD 4: Schotterpressung in kN/m² auf der Tragschicht bei 100 kN Belastung der halben Schwelle und einer Schotterstärke von 22 cm (Schwellenunterkante – Planum)

le vom Typ B70 einer Schotterstärke von Schwellenunterkante bis Planum von 22 cm oder 32 cm. Die Druckplatten sind einfach gelagerte, kalibrierte Stahlplatten, mit applizierten Dehnungsmessstreifen (DMS), die als Vollbrücken geschaltet sind. Die Plattengrößen wurden der Lieferkörnung so angepasst, dass möglichst mehrere Körner auf einer Messplatte zu liegen kommen.

QUASI STATISCHE BELASTUNG AM SCHIENENSTÜTZPUNKT DER SCHWELLE

Die halbe Betonschwelle wurde am Schienenstützpunkt in 10 kN Schritten bis 100 kN belastet. Bei steifen Auflagerverhältnissen

am Planum (Stahlplatte und Druckplatten) und unterschiedlich steifen Verhältnissen an der Schwellenunterkante stellt sich immer direkt unter dem Stützpunkt die größte Planumspressung ein. Ein linearer Verlauf ist erkennbar. Deutlich ist der günstige Einfluss der Besohlung SLB3007 G (eine relativ steife Besohlung, $C_{stat} 0,30 \text{ N/mm}^3$) erkennbar. Die Pressungen reduzieren sich durch die Besohlung um 5 % (Basalt bei 32 cm Schotterstärke) bis 24 % (Granit bei 22 cm Schotterstärke) bei 100 kN Belastung. Weiters werden die maximalen Pressungen unter dem Stützpunkt durch die Schotterstärke beeinflusst. Eine Erhöhung der Schotterstärke vom Planum bis zur Schwellenunterkante von 22 cm auf 32 cm bringt eine Reduktion der Pressung von 24 % (Basalt mit

Besohlung) und von 40 % (Granit unbesohlt). Die Gesteinsart der Lieferkörnung zeigt bei der größten Planumspressung einmal keine Abhängigkeit (22 cm ohne Sohle) und einmal eine bis zu 24 % höhere Pressung beim Basalt gegenüber dem Granit (32 cm besohlt). Im realen Gleis wird die lastverteilende Wirkung der Schiene in Abhängigkeit unterschiedlicher Bettungsziffern (vertikale Steifigkeit) aktiviert. Damit werden auch Nachbarschwellen durch die einwirkenden Radlasten mitbelastet. Bei diesem Belastungsversuch ergaben sich die verschiedenen Pressungen durch die Biegung der halben Schwelle in Längsrichtung bei unterschiedlichen Steifigkeiten. Diese waren bedingt durch Schotterart, Schotterstärke und der Besohlung der Schwelle. Die Pressungsverteilung in Schwellenlängsrichtung ist im realen Gleis durch die Lagerbedingungen der belasteten Schwelle und der dadurch resultierenden Biegelinie noch zusätzlich mitbeeinflusst.

Die Pressungsverteilung wurde wegen der begrenzten Anzahl der Druckmessplatten interpoliert und durch gemittelte Pressungen bezogen auf Druckplattenflächen von 0,04 m², 0,02 m² und 0,013 m² dargestellt. Es können auch größere Kornspitzendrücke auftreten, die bis zu Abplatzungen am Korn und an der Schwelle führen. Die Bilder 4 und 5 zeigen die Pressungen auf Planumsniveau infolge einer 100 kN Belastung auf der halben Schwelle ohne die zusätzlichen Pressungen aus dem Eigengewicht des Oberbaues. Randplatten können größere Pressungen aufweisen als näher zur Schwellenachse situierte Platten. Ursache dafür ist eine diskontinuierliche Lastabtragung. Es bilden sich einzelne Kräftepfade entlang von zufällig entstandenen Korn-zu-Korn Berührungspunkten aus, die auch außerhalb des theoretischen Lastausbreitungswinkels am Planum auftreten können [vgl. 9]. An der Darstellung der Pressungen unter Basalt (32 cm, Unbesohlt) ist das Ergebnis einer ungleichmäßigen Stopfung erkennbar.

UNTERSUCHUNG DES LASTAUSBREITUNGSWINKELS

Die Angabe eines Lastausbreitungswinkels des Gleisschotter ist auch bei einer quasi – statischen Belastung nicht trivial. Um eine genauere Erfassung der Pressungsverteilung zu bekommen wurden die Druckplatten in Schienenlängsrichtung im erwarteten Lastausbreitungswinkel mit kleineren Breiten angeordnet. Ein Einfluss von Nachbarschwellen lag bei den Messungen im Labor nicht vor. Der Lastausbreitungswinkel wurde im Zuge der vorliegenden Arbeit mit Hilfe des 90 % Quantils der gemessenen Reaktionspressung in Schienenlängsrichtung definiert. Er ergibt sich aus der Neigung der Verbindungslinie von Schwellenunterkante zum 90 % Quan-

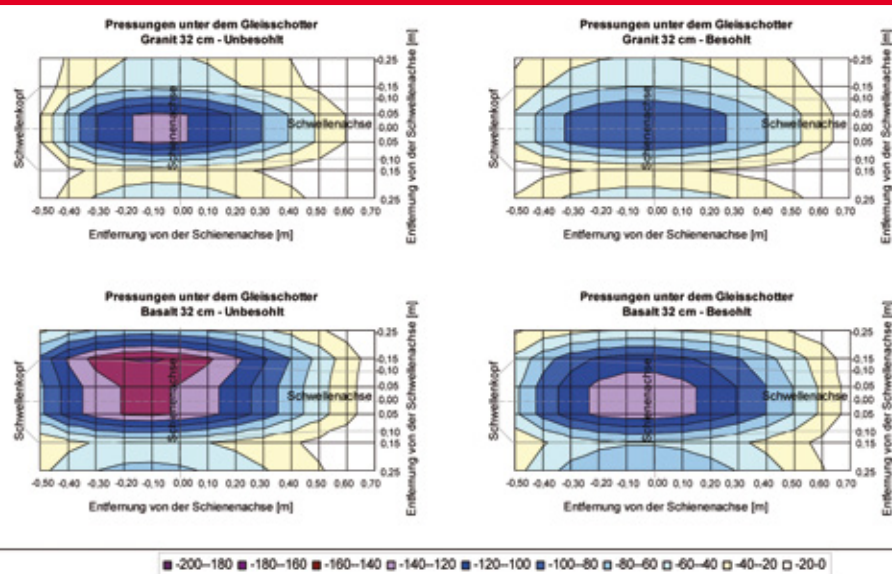


BILD 5: Schotterpressung in kN/m² auf der Tragschicht bei 100 kN Belastung der halben Schwelle und einer Schotterstärke von 32 cm (Schwellenunterkante – Planum)

til der Pressung zur Vertikalen. Der so definierte Lastausbreitungswinkel umschließt somit 90 % der resultierenden Last auf der Planumsfläche (Bild 6).

Die Veränderung des Lastausbreitungswinkels wurde in Bild 7 in Abhängigkeit von der anteilmäßigen Reaktionskraft am Planum in Schienenlängsrichtung dargestellt. Eine Variation des Anteiles (Quantils) der induzierten Pressung am Planumsniveau macht deutlich:

- 50 % der Last wird zentral unter der Schwellenauflegerfläche in das Planum geleitet. Dabei zeigt sich ein nach innen gerichteter „Lastausbreitungswinkel“ von -15° bis -10°.
- Bei einem 65 % Quantil ergibt sich ein Lastausbreitungswinkel von 0°. Das heißt 65 % der Last wird direkt unter der Schwelle abgetragen.
- Der Lastausbreitungswinkel nimmt mit steigender Anteilsbetrachtung (d.h. größerem Quantil) stetig zu.

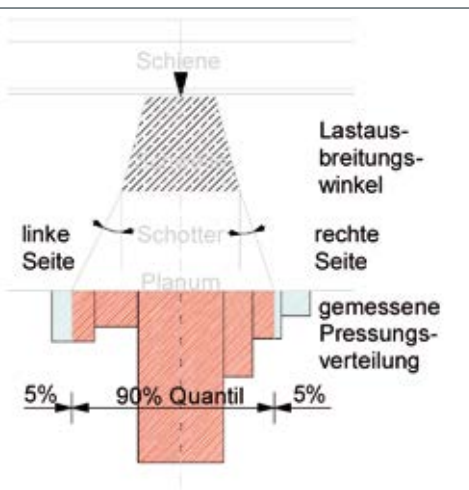


BILD 6: Festlegung des Lastausbreitungswinkels auf Grund der gemessenen Pressungsverteilung am Planum

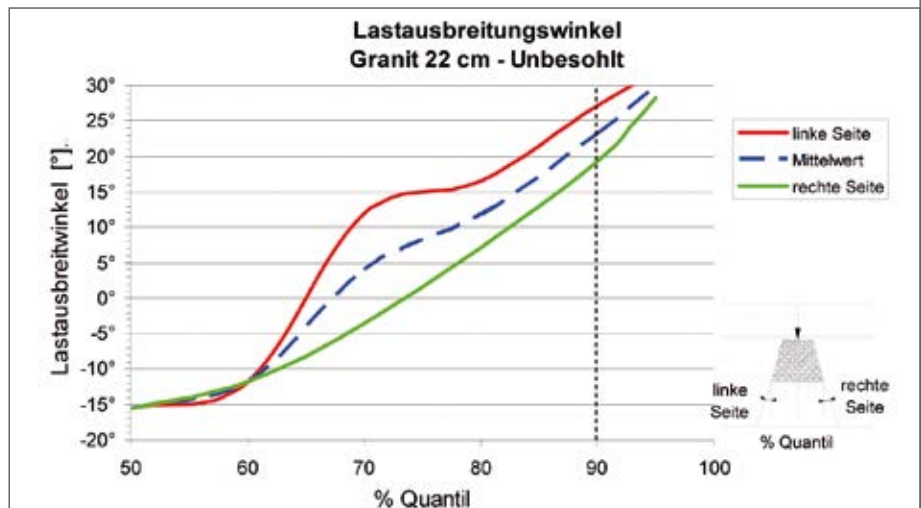


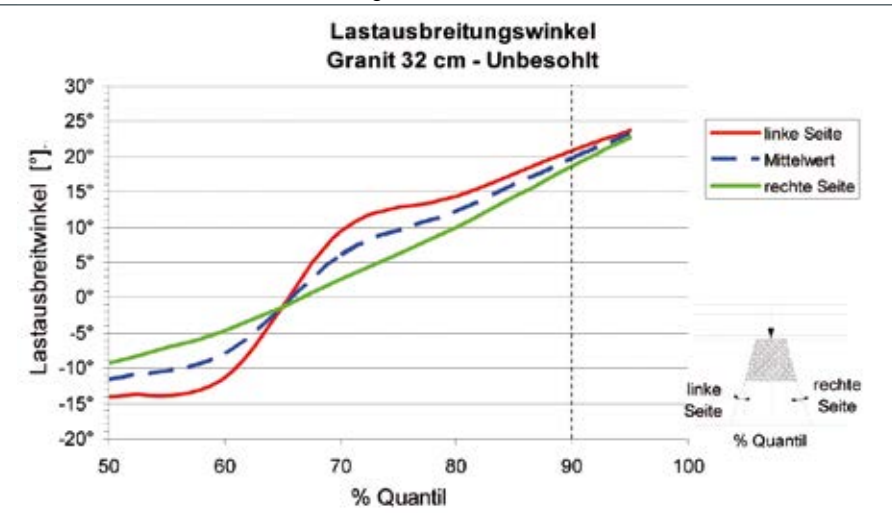
BILD 7: Beispiel des prozentualen Anteils der Last auf Planumsniveau, welcher durch den Lastausbreitungswinkel eingeschlossen ist, bei einer Schotterstärke von 22 cm und 100 kN Belastung

BILD 8: Beispiel des prozentualen Anteils der Last auf Planumsniveau, welcher durch den Lastausbreitungswinkel eingeschlossen ist, bei einer Schotterstärke von 32 cm und 100 kN Belastung

→ Für eine vergleichende Betrachtung sollten immer Lastausbreitungswinkel mit gleichem Quantil angegeben werden.

LASTAUSBREITUNGSWINKEL BEI QUASI STATISCHER BELASTUNG

Die Bilder 9 und 10 zeigen bei geringen Schotterbettstärken relativ große Unterschiede der gemessenen Lastausbreitungswinkel zwischen rechter oder linker Schwellenseite. Mit zunehmender Bettungsstärke verringern sich diese Unterschiede und die Entwicklung des Lastausbreitungswinkels bei steigender Belastung vergleichmäßigiert sich. Häufiger finden sich in den Versuchen beim Basalt geringfügig kleinere Lastausbreitungswinkel als beim Granulit.



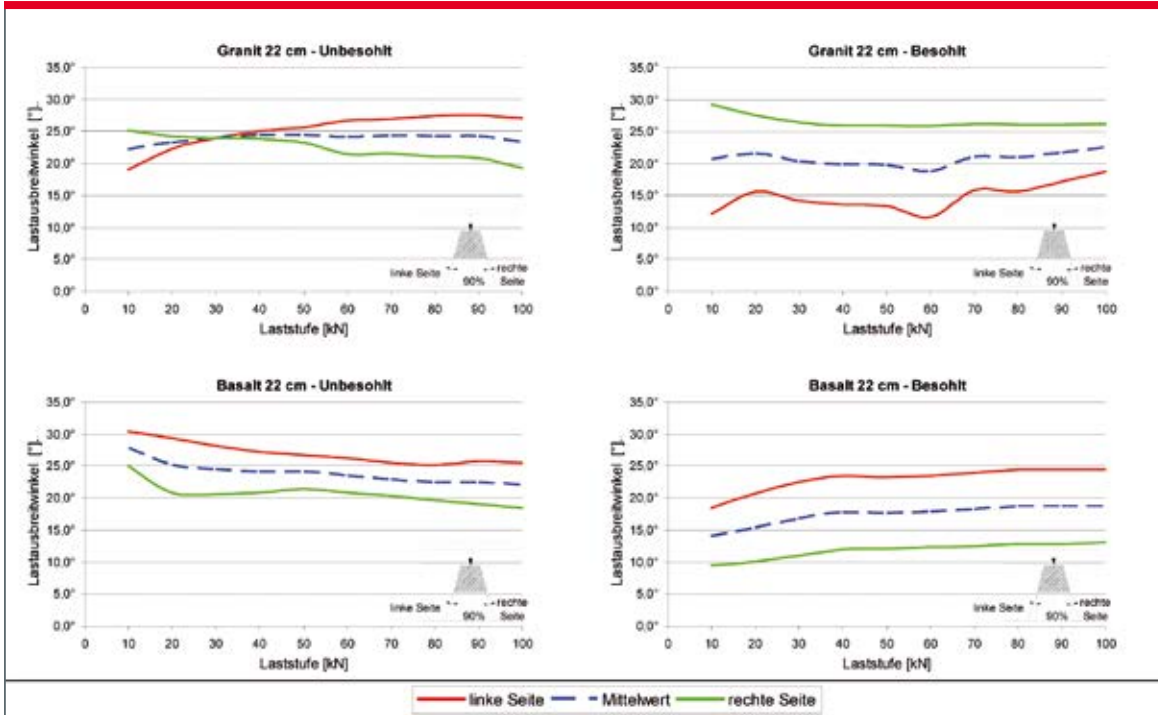


BILD 9: Lastausbreitungswinkel (90% Quantil) des Schotter in Schienenlängsrichtung bei einer Steigerung der Belastung auf der halben Schwelle im Schienenstützpunkt (Schotterstärke 22 cm)

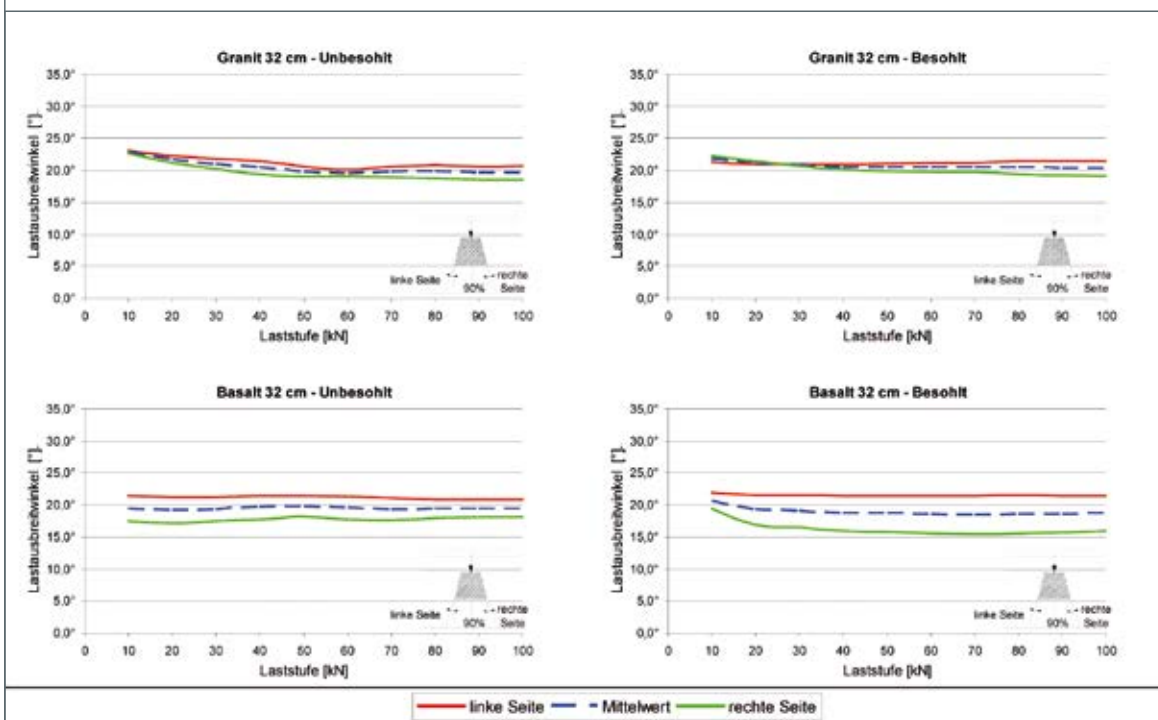


BILD 10: Lastausbreitungswinkel (90% Quantil) des Schotter in Schienenlängsrichtung bei einer Steigerung der Belastung auf der halben Schwelle im Schienenstützpunkt (Schotterstärke 32 cm)

DYNAMISCHE LASTAUSBREITUNG

Im Zuge der vorliegenden Untersuchungen wurden die dargelegten Versuchskonfigurationen auch einer dynamischen Belastung unterworfen.

Gewählt wurde eine 15 kN Vorbelastung und die daraus resultierende Einsenkung als Bezug für eine Schwellbelastung mit 1 Hz Schwinggeschwindigkeit.

Durch die weggesteuerte dynamische Kräfteinleitung ist im Bild 11 von der kraftgesteuerten Vorbelastung bis nach einigen Sekunden das Einschwingen der Hydropulsanlage

erkennbar. Danach zeigt sich eine Abnahme der Pressungen durch Kornumlagerungen. Bei den Entlastungsamplituden wird im Randbereich der Schwelle die Nulllinie erreicht und zum Teil überschritten. Durch die wechselnde Belastung kam es zu einer Umlagerung des Eigengewichtes des Gleisschotter mit der Schwelle.

Bild 12 zeigt den Verlauf des Lastausbreitungswinkels einer Schwingung am Ende der Testreihe. Durch eine gänzliche Entlastung der Randbereiche (Randplatten) im Zuge einer dynamischen Belastung kann ein Lastausbreitungswinkel nicht mehr dargestellt wer-

den. Bei einer dynamischen Belastung von 1 Hz stellt sich der gleiche Lastausbreitungswinkel wie bei einer quasistatischen Last ein. Im Bild 12 entspricht die Maximalamplitude einer Last von 26 kN.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wird der Lastausbreitungswinkel des Gleisschotter als 90 % Quantil der gesamten Pressung auf dem Planumsniveau definiert. Die Messungen zeigen eine diskontinuierliche Last-

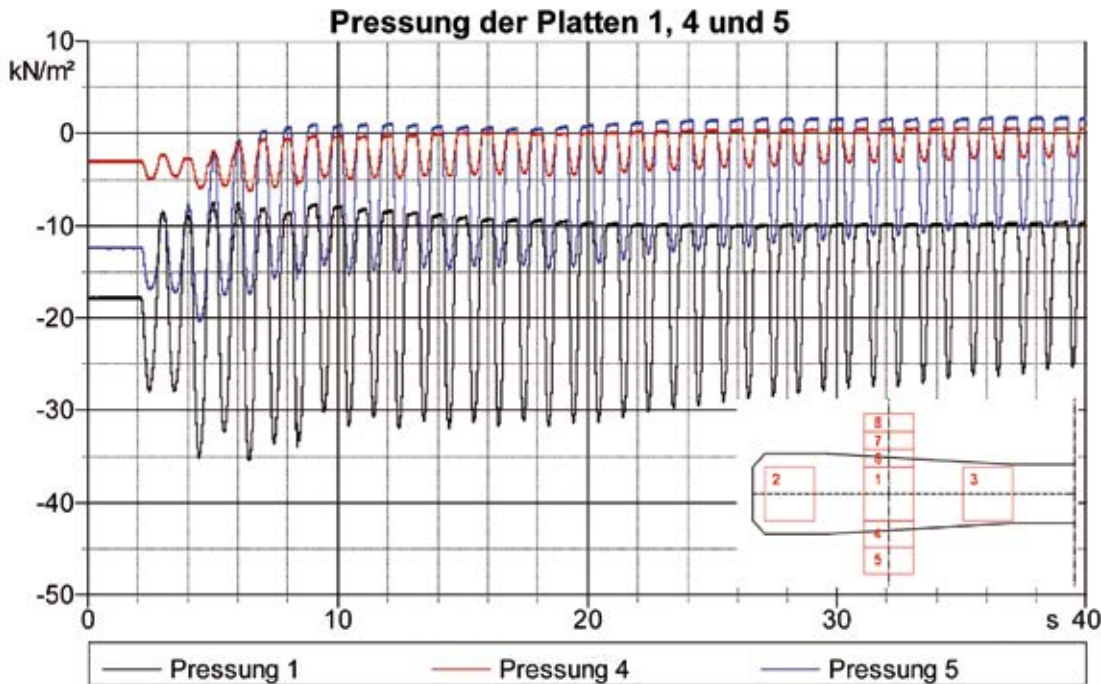


BILD 11: Beispiel der Pressungen bei einer Schwellbelastung (15 kN Vorlast, Schwingweg $\pm 1,2$ mm, 1 Hz) bei Granit mit 32 cm ohne Besohlung

abtragung im Schotter durch stochastische Berührungspunktverteilung der Schotterkörner auf. Bei quasistatischer Belastung nimmt die Streuung der gemessenen Lastausbreitungswinkel mit zunehmender Schotterstärke ab und liegt bei durchschnittlich 20° gemessen von der Schwellenkante zur Vertikalen. Der Einfluss der gewählten Schotterarten Granulit und Basalt ist gering.

Die Messung des Lastausbreitungswinkels bei einer dynamischen Last mit 1 Hz zeigt keinen Unterschied zur quasistatischen Belastung. Durch höhere Belastungsfrequenzen könnten sich allerdings verstärkt dynamische Effekte und andere Lastausbreitungswinkel einstellen.

Zur Verifizierung der im Labor gewonnenen Erkenntnisse sind Messungen im Gleis vorgesehen. Dabei bietet sich die Möglichkeit,

die lastverteilende Wirkung der Schiene und den Einfluss der Nachbarschwellen zu berücksichtigen. Weiters können bei hohen Fahrgeschwindigkeiten die entstehenden hochdynamischen Einflüsse auf die Planumspressungen und damit auf den Lastausbreitungswinkel ermittelt werden. Ein möglicher Einfluss unterschiedlicher Schotterarten wird ebenfalls Berücksichtigung finden. ←

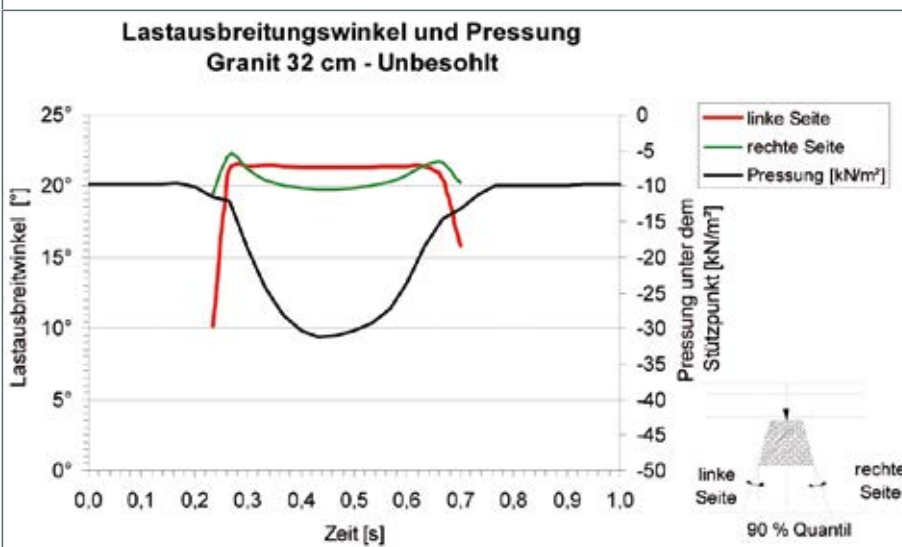
Literatur

- [1] Prager, Günter; Kopp, Erich: „Untersuchungen verschiedener Oberbauarten bei Hochgeschwindigkeitsversuchsfahrten mit Lok bis zu 250 km/h auf der Westbahn der ÖBB, Standardschotteroberbau, Oberbauarten mit Asphalt und besohlenen Schwellen, Feste Fahrbahnen“ Bericht: 2001 – Im Auftrag der ÖBB und der HL-AG (unveröffentlicht)
- [2] Prager, Günter; Kopp, Erich: „Untersuchung verschiedener Oberbauarten mit Asphalttragschicht und besohlenen Betonschwellen auf der Westbahnstrecke der ÖBB zwischen

Aschbach und Krenstetten“ Bericht: 2004 – Im Auftrag der HL-AG (unveröffentlicht)

- [3] Müller-Borutta, Frank; Rosenthal, Volker; Breitsamter, Norbert: „So trägt der Schotter die Lasten ab – Messungen in situ am Oberbau“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau, 11/2001
- [4] Holtzendorff, Kira: „Untersuchungen des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen“, Dissertation, TU Berlin, 05/2003
- [5] Auer, Florian; Schilder, Rudolf: „Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB“, ZEVrail 05/2009 S180-193
- [6] Technische Lieferbedingungen für Oberbauschocter BH 700; ÖBB Infrastruktur AG, 16. März 2011.
- [7] ÖNORM EN 13450 Gesteinskörnungen für Gleisschotter; Österreichisches Normungsinstitut, idgF.
- [8] Bach, Holger; Kuttelwascher, Christoph; Latal, Christine: Alternative Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Gleisschotter, ZEVrail 136, 1/2012
- [9] Kruse, H. (2002): Modellgestützte Untersuchungen der Gleisdynamik und des Verhaltens von Eisenbahnschotter. Dissertation eingereicht an der Universität Hannover.

BILD 12: Beispiel des Lastausbreitungswinkels einer Schwingbelastung und Pressungsverlauf unter der Lasteinleitung auf Planumsniveau



SUMMARY

Dissipation of the pressure acting on loaded railway sleepers in ballast

Maintaining good geometry of ballasted railway tracks over a long period of time depends essentially on the load-bearing properties of the ground beneath them and the loads acting on it. One of the principal functions of the track ballast (amongst its many others) is to dissipate and spread the loads caused by railway traffic. It thus has a key influence on the load-bearing characteristics of the subsoil.