

Smart Rock trifft Smart Tamper

Teil 1: Stopfen aus Sicht des Schotterers

OLJA BARBIR | CHRISTIAN KOCZWARA |
BERNHARD ANTONY | FABIAN HANSMANN

Die Gleislage hat einen erheblichen Einfluss auf den sicheren Betrieb der Eisenbahn. Im Laufe der Zeit verschlechtert sich die Gleislage kontinuierlich, wodurch regelmäßige Instandhaltungsarbeiten erforderlich werden. Die Strategien für diese Instandhaltung variieren weltweit, insbesondere zwischen Schwerlastbahnen und dem konventionellen europäischen Eisenbahnsystem [1]. In den USA liegt der Schwerpunkt auf der Stopfleistung, während in Europa die Qualität im Vordergrund steht. Auch die Instandhaltungsstrategien unterscheiden sich hinsichtlich des Austauschs von Komponenten und des Einsatzes von Maschinen. In den USA setzen viele Schwerlastbahnen auf Holz- oder Kunststoffschwellen aufgrund hoher Achslasten. Diese globalen Unterschiede wirken sich auch auf den Gleisstopfprozess aus, der von Plasser & Theurer, Plasser American und der Pennsylvania State University in einem gemeinsamen Forschungsprojekt untersucht wurde. Dabei wurden verschiedene Faktoren wie Schotterart, Schotterzustand, Verkehrsbelastung und Arbeitsmethoden berücksichtigt. Die Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

Fragestellung, Versuchsaufbau und Durchführung

Stopfen ist ein entscheidender Gleisinstandhaltungsprozess, der die Gleisgeometrie korrigiert und einen sicheren Zugbetrieb gewährleistet. Dafür werden Stopfpickel in den Schotter eingeführt, durch die Kombination aus Beistellbewegung und Vibration wird der Hohlraum unter der Schwelle aufgefüllt und der Schotter verdichtet. Eine optimal durchgeführte Wartungsarbeit führt zu minimalen Gleissetzungen aufgrund der nachfolgenden Verkehrsbelastung. Dies trägt dazu bei, den Bedarf an häufigen Wartungsarbeiten zu verringern und die Effizienz der erbrachten Leistungen zu erhöhen. Die Einstellung der Stopfparameter beeinflusst signifikant das erzielbare Stopfergebnis. Neben dem Beistelldruck werden auch die Beistellzeit und die Anzahl der Beistellvorgänge für jede Schwelle eingestellt, Hebewerte und Eindringtiefe der Stopfpickel werden angepasst. Die Auswahl dieser Parameter wird von mehreren Faktoren beeinflusst wie dem Zustand des Schotterers und der Einhaltung von Standards und Vor-

schriften, beruht aber auch auf der Erfahrung des Bedienerers. In mehreren Forschungsprojekten wurde bereits der Einfluss der verschiedenen Stopfparameter auf die Lebensdauer der Gleislage durch Feld- und Labortests sowie numerische und mechanische Modelle untersucht [2-6]. Die eindeutige Ableitung von Schlussfolgerungen bleibt nach wie vor die Hauptherausforderung angesichts der komplexen Wechselwirkungen zwischen Gleis, Schwelle und Schotter sowie der variierenden Anwendbarkeit der ausgewählten Modelle. Um das Stopfen weiter zu optimieren, werden modernste Messmethoden verwendet. Besonders die Messung der Interaktion zwischen dem Stopfaggregat und dem Schotter sowie die Stabilität und Langlebigkeit des Gleises nach dem durchgeführten Stopfen spielen dabei eine wesentliche Rolle.

Das in diesem Beitrag präsentierte Forschungsprojekt konzentriert sich darauf, den Einfluss des Stopfens auf Partikelebene mithilfe von „Smart Rock“-Sensoren zu untersuchen. Das Hauptziel ist die Identifizierung der optimalen Kombination von Stopfparametern, um die Lebensdauer der Gleislage nach dem Stopfen zu verbessern. Es wurde hier erstmals die Interaktion zwischen Schotter und Stopfaggregat aus zwei verschiedenen Blickwinkeln analysiert und dafür die passende Technologie entwickelt:

1. Smart Rocks, die im Schotterbett vergraben wurden, um das Verhalten des Schotterers während des gesamten Stopfvorgangs sowie in der Phase vor und nach dem Stopfen zu überwachen. Das Funktionsprinzip, das installierte Messsystem sowie die Ergebnisse der von den Smart Rocks aufgezeichneten Messdaten werden in diesem Beitrag vorgestellt. Die Messdaten wurden von der Pennsylvania State University unabhängig ausgewertet [3].

2. Smart Tamper, ausgestattet mit einem Messsystem zur Aufzeichnung der Interaktion zwischen dem Stopfpickel und dem Schotter. Einzelheiten über die Smart-Tamper-Technologie und die vom Messsystem aufgezeichneten Daten sowie die Gegenüberstellung von Stopfmaschinendaten und Smart-Rock-Daten werden im zweiten Teil dieses Beitrags vorgestellt, der in der nächsten Ausgabe des EI – DER EISENBÄHN-INGENIEUR (12/23) veröffentlicht wird.

Smart Rocks

Die Verwendung von Smart Rocks in der Forschung zur Verbesserung von Gleisinstandhaltungsmethoden, insbesondere des Gleisstopfens, kann der Bahnindustrie signifikante Vorteile bieten. Bei Smart Rocks handelt es sich um mit Sensorsystemen ausgestattete „Schottersteine“, die direkt in den Gleisschotter eingebracht werden. Diese liefern wertvolle Daten und Erkenntnisse, um die Effizienz des Gleisstopfprozesses zu verbessern. Sie bieten eine Echtzeitüberwachung, die schnelle Reaktionen auf Gleisveränderungen ermöglicht, während prädiktive Wartungsmodelle Maschineneinsätze auf Basis von historischen Datentrends optimieren. Dieser gezielte Ansatz steigert die Kosteneffizienz, indem Ressourcen dort eingesetzt werden, wo sie benötigt werden. Die datenbasierten Erkenntnisse erleichtern informierte Entscheidungen und fördern Forschung für innovative Wartungstechniken, was zur Nachhaltigkeit und zur Einhaltung von Industriestandards beiträgt.

Mit den am Stopfaggregat angebrachten Sensoren kann bereits der Stopfprozess aus „Sicht des Aggregats“ gut abgebildet werden. Dies wurde bereits in mehreren Studien gezeigt [2, 7]. Um nun den Stopfprozess aus „Sicht des Gleisschotterers“ abbilden zu können, wurden in diesem Projekt Smart Rocks verwendet. Abb. 1

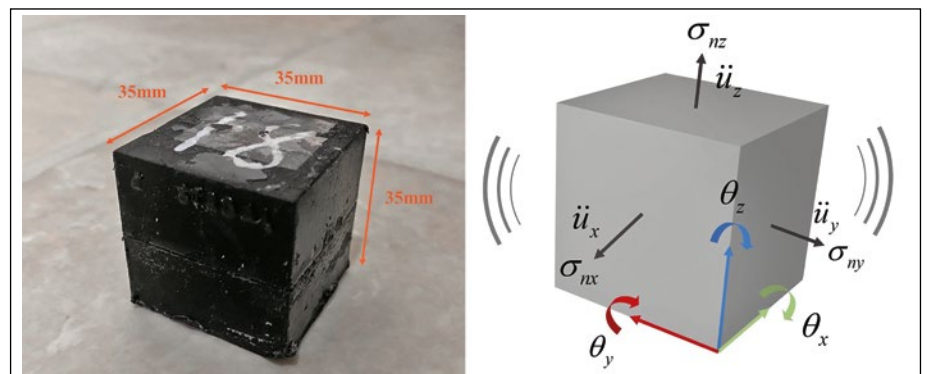


Abb. 1: Smart Rock mit eingebauten Sensoren (σ : Spannung, θ : Rotationswinkel, \ddot{u} : Beschleunigung)

Quelle: [3]

	Versuch	Beistellvorgänge (Insertions)	Beistellzeit [s]	Hebewerte [mm]	Beistelldruck / Freq.
sauberer Schotter	#1	1	0,6	25	Konstant / 35 Hz
	#2	2	0,6	25	Konstant / 35 Hz
	#3	1	1,0	25	Konstant / 35 Hz
	#4	2	1,0	25	Konstant / 35 Hz
verunreinigter Schotter	#1	1	0,6	25	Konstant / 35 Hz
	#2	1	0,8	25	Konstant / 35 Hz
	#3	1	1,2	25	Konstant / 35 Hz
	#4	2	0,8	25	Konstant / 35 Hz
	#5	1	0,6	25	Konstant / 35 Hz
	#6	1	0,8	25	Konstant / 35 Hz
	#7	1	1,2	25	Konstant / 35 Hz
	#8	2	0,8	25	Konstant / 35 Hz

Tab. 1: Gewählte Stopfparameter

zeigt einen Smart Rock, der für den Einbau vorbereitet wurde. Jeder Smart Rock ist mit mehreren Sensoren ausgestattet: einem 3D-Beschleunigungssensor, einem dreiachsigen Gyroskop sowie einer Spannungsmessung in drei Raumrichtungen. Seine kubische Form (Abb. 1) erleichtert die Messung der triaxialen Partikelbewegung, von Spannungen und die Übertragung von Daten vom lokalen in ein globales Koordinatensystem [3, 8]. Jeder Smart Rock ist für den autarken Betrieb mit einem Akku ausgestattet. Die Datenübertragung zwischen den Schottersteinen und der Basisstation erfolgt drahtlos mithilfe von Bluetooth über ein ferngesteuertes Datenerfassungssystem (DAQ) [3]. Dadurch sind auch die Bewegungen und besonders die Rotation nicht durch Kabel gestört, was zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen würde.

Aus den gemessenen Beschleunigungen lassen sich die Linearbewegungen der Schottersteine ermitteln. In Kombination mit der Drehbewegung ist es möglich, die Umlagerungsprozesse auszuwerten und somit während des Stopfprozesses die Verdichtungsprozesse detailliert zu betrachten. Die Umlagerungen im Verkehrsbetrieb hingegen geben Aufschluss über die Nachverdichtung. Daraus kann auf die später auftretenden Setzungen im Regelbetrieb geschlossen werden. Die auftretenden Spannungen geben Auskunft über die beim Stopfprozess auftretenden Belastungen auf die Schottersteine. Diese Informationen können beispielsweise verwendet werden, um den Eintauchprozess zu optimieren. Die im Regelbetrieb auftretenden Belastungen weisen auf die Kraftabtragung vom Schotter in den Unterbau hin. Daraus lässt sich auch

auf die Verdichtungsqualität schließen. Bei ordnungsgemäßer Verdichtung gibt es mehr Kontaktpunkte zwischen den Schottersteinen und daher auch geringere Belastungen für die einzelnen Schottersteine. Bei einer kleineren Anzahl an Kontaktpunkten wird die Belastung der einzelnen Schottersteine höher, woraus eine höhere Bruchwahrscheinlichkeit folgt. Dies führt in weiterer Folge zu einem höheren Schotterverschleiß und einer kürzeren Gleislanglebensdauer.

Versuchsdurchführung

Tests mit unterschiedlichen Stopfparametern wurden mit einer Stopfmaschine GRM 3000 auf einer Strecke der Norfolk Southern Railway, einer amerikanischen Schwerlastbahn, durchgeführt. Vergrabene Smart Rocks sammelten Daten zum Schotterverhalten vor, während

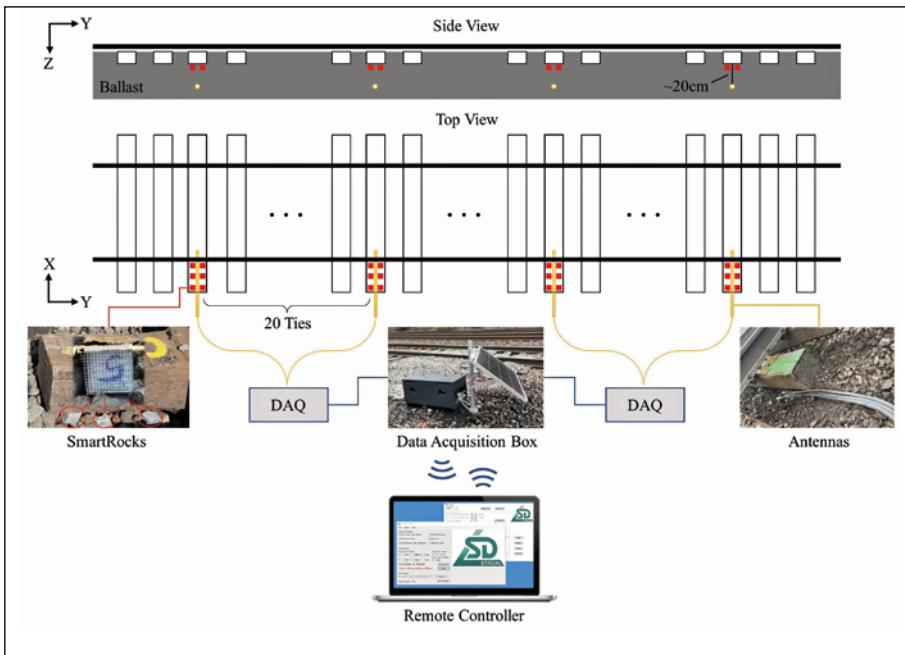


Abb. 2: Aufbau des Datenerfassungssystems im Feld

Quelle: [8]

und nach dem Stopfen, um die Bewegung des Schotters und Veränderungen in der Lastverteilung zu analysieren.

Ziel der Versuchsreihe war es, den Einfluss der Stopfparameter auf den Verdichtprozess zu evaluieren, wobei ein besonderer Fokus auf dem Einfluss der Beistellzeit lag. Es wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, eine unter sauberen und eine unter verunreinigten Schotterbedingungen. Abb. 3 zeigt beide Testabschnitte und die Smart Rocks vor dem Einbau. Die Vorbereitungen erfolgten mehrere Wochen vor den Versuchen, sodass bereits vor der Stopfung Messdaten im Regelbetrieb gesammelt werden konnten. In jedem Abschnitt wurden im Schotter unter einer Schwelle im Abstand von 20 Schwellen mehrere Smart Rocks positioniert (Abb. 2).

Bei den Tests wurden verschiedene Kombinationen von Stopfparametern für die Beistellzeit und die Anzahl der Beistellvorgänge (Insertions) gewählt (Details in Tab. 1), um das Schotterverhalten zu untersuchen, wobei in allen Abschnitten ein konstanter Hebewert von etwa 25 mm (1 Inch) galt. In jedem Testabschnitt wurde die Stopfmaschine mit denselben Arbeitsparametern betrieben und stopfte mehrere Schwellen, darunter auch die mit den Smart-Rock-Sensoren ausgestatteten. Nach der Stopfung wurden alle Sensoren und Messgeräte für einen längeren Zeitraum im Schotter belassen, um auch die Bewegung der Schotterpartikel und die Kontaktkraft während der Rückverfestigung aufgrund der Verkehrsbelastung zu erfassen. Die Ergebnisse dieser beiden Tests werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Analyse der Smart-Rock-Daten

Die von den Smart-Rock-Sensoren aufgezeichneten Daten liefern Informationen über die Bewegung und das Verhalten der einzelnen Schotterpartikel (Smart Rocks) vor, während und nach dem Stopfen. Das installierte Gyroskop gibt Auskunft über die Orientierung des Smart Rocks und wird verwendet, um Einblicke in die Rotation des einzelnen Schotterpartikels zu erhalten, vor allem während und unmittelbar nach dem Stopfvorgang. Wenn nach dem Stopfen eine stabile Umlagerung der Schotterpartikel (erfolgreiche Verdichtung) erreicht wird, ist aufgrund der hohen Lagerungsdichte keine signifikante Rotation einzelner Schotterpartikel mehr zu erwarten. Die von den Smart Rocks ermittelten Daten aus dem Vorversuch in sauberem Schotter zeigen, dass mit 1,0 Sekunden Beistellzeit gestopfte Schotterpartikel stabil waren und sich nach dem Herausziehen der Stopfpickel nicht weiterdrehten. Mit 0,6 Sekunden gestopfte Schotterpartikel erreichten nach dem Stopfprozess noch keine stabile Lage (Abb. 4).

Die in den Smart Rocks eingebauten Spannungsmesszellen dienen zur Messung der Kontaktspannung zwischen einzelnen Schotterkörnern, die sich während des Stopfens verändert, weil das ursprüngliche strukturelle Gleichgewicht verändert wird. Die sich daraus ergebende Änderung des triaxialen Spannungszustands (bulk stress) wird als Summe der Spannungsänderungen in x-, y- und z-Richtung berechnet, wobei ein positiver Wert die Zunahme der Spannung bedeutet. Da die Smart Rocks auch die Kontaktspannung vor und nach dem Stopfen gemessen haben, spiegeln diese aufgezeichneten Werte die regelmäßigen Belastungen durch den Zugverkehr wider. Nachdem sich die vom Smart Rock während des Stopfens und während des Zugbetriebs gemessenen Spannungen erheblich unterscheiden, wurde die Normalisierung der Änderung des



Abb. 3: Teststrecke mit sauberem (links) und verunreinigten Schotter (Mitte) und Smart Rocks vor dem Einbau (rechts)

Quelle: [9]

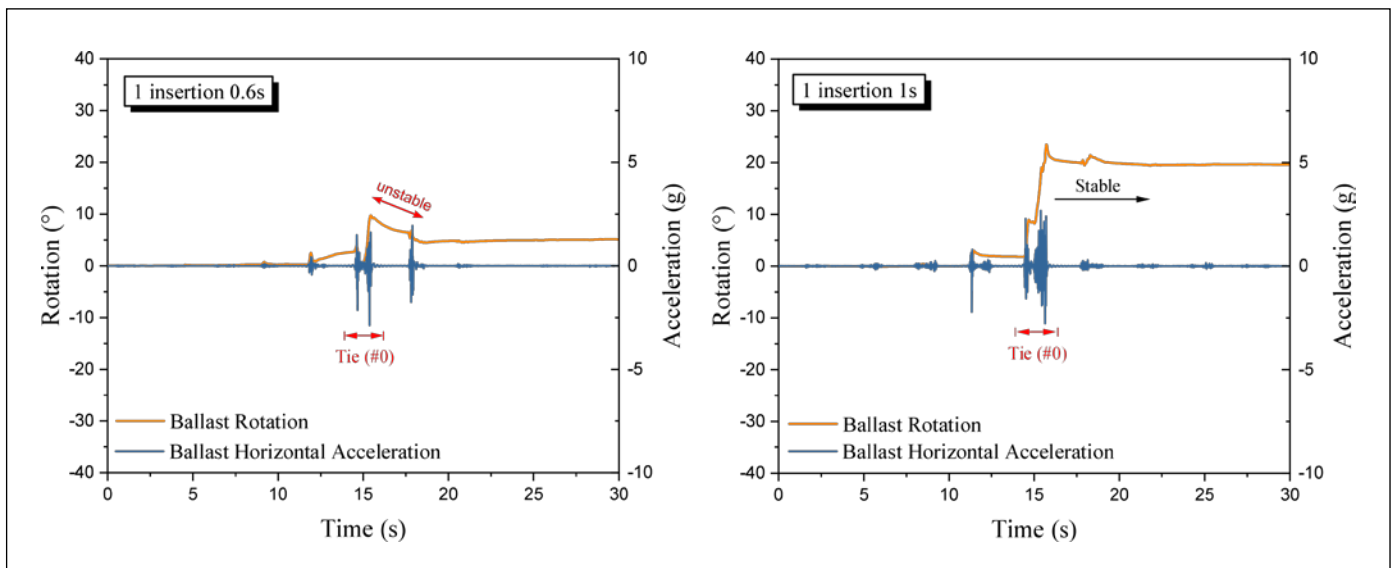


Abb. 4: Rotation und Beschleunigung des Smart Rocks vor, während und nach dem Stopfen 1 Insertion, 0,6 Sekunden Beistellzeit (links); 1 Insertion, 1,0 Sekunden Beistellzeit (rechts)

Quelle: [3]

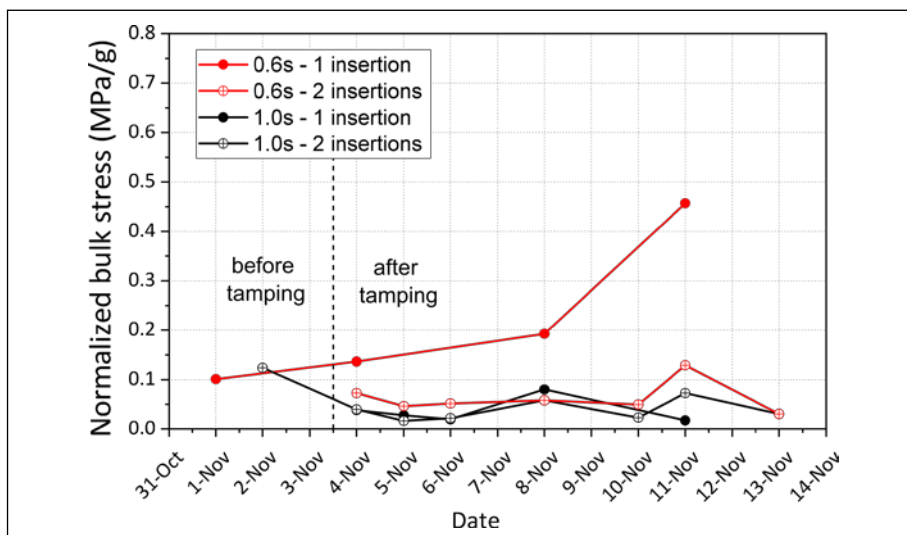


Abb. 5: Normalisierung der Änderung des triaxialen Spannungszustands

Quelle: [9]

triaxialen Spannungszustands unter Berücksichtigung der Spannungsamplitude und der gemessenen Beschleunigung durchgeführt [3]. Die normalisierte Änderung des triaxialen Spannungszustands (normalized bulk stress) vor und nach dem Stopfen ist in Abb. 5 dargestellt, gemessen in sauberem Schotterzustand.

Wie in Abb. 5 zu sehen ist, hat die Beistellzeit direkten Einfluss auf die Kontaktspannung zwischen den Schotterkörnern. Aufgrund der instabilen Lage zeigt eine kürzere Beistellzeit von 0,6 Sekunden eine signifikante Veränderung des Spannungszustands im Lauf der Zeit beziehungsweise als Folge des Zugbetriebs. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass nach dem Stopfen keine stabile Schotterstruktur aufgebaut werden konnte [9]. Die Verwendung einer längeren Beistellzeit oder von zwei Beistellvorgängen (Insertions) zeigt

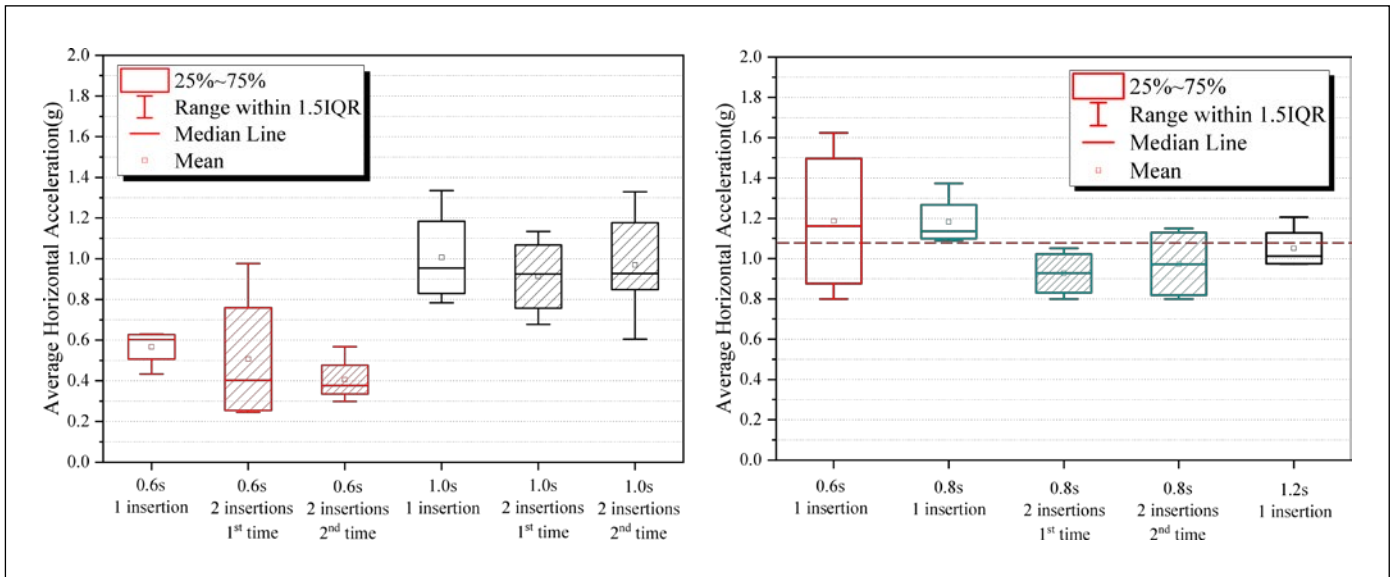


Abb. 6: Boxplot der durchschnittlichen Horizontalbeschleunigung, gemessen während der Beistellbewegung beim Vorversuch im sauberen (links) und beim Hauptversuch im verunreinigten Schotterzustand (rechts) Quelle: [9]

stabile Ergebnisse, was darauf hindeutet, dass während des Stopfens eine stabile Schotterstruktur erzeugt wurde, die durch die folgenden Verkehrsbelastungen nicht gestört wird. Neben der Rotation und den Kontaktspannungen wurde auch die Beschleunigung aufgezeichnet und analysiert. Anhand der gemessenen Beschleunigung wurde festgestellt, dass Stopfen hauptsächlich die Schotterbewegung im Bereich der drei benachbarten Schwellen beeinflusst [3]. Abb. 6 zeigt die durchschnittliche horizontale Beschleunigung, die sowohl bei sauberem (links) als auch bei verunreinigtem (rechts) Schotter gemessen wurde. Es wird nur die horizontale Komponente dargestellt, da diese bei der Beistellbewegung der Stopfpickel dominiert. Während der Beistellbewegung bewirken periodische Stopfpickelbewegungen (Vibration) im Schotter eine vorübergehende (Visko-)Fluidisierung der Kornstruktur, indem sie die Reibung zwischen den Partikeln verringern und die Schotterkörner dazu anregen, neue Positionen zu suchen, um eine dichtere Lagerung zu bilden. Die temporäre Fluidisierung führt zu einer lokalen Verringerung der Scherfestigkeit, die die Bewegung einzelner Schotterkörner in der Schottermatrix ermöglicht. In sauberem Schotter ist eine deutliche Erhöhung der gemessenen Beschleunigungen mit zunehmender Beistellzeit erkennbar (Abb. 6). Dieser Trend lässt sich im verunreinigten Schotter nicht erkennen. Zusätzliche Untersuchungen sind notwendig,

um den Einfluss der Verunreinigungen auf die gemessenen Beschleunigungen zu evaluieren.

Zusammenfassung

Die Anwendung der Smart-Rock-Technologie bietet erhebliche Vorteile für die Weiterentwicklung der Gleisstopfung. Sie liefert Echtzeitdaten über das Verhalten von einzelnen Schotterkörnern unter der Schwelle vor, während und nach der Stopfung. Dadurch können die Stopfparameter präzise angepasst werden, um eine optimale Stabilität und Langlebigkeit des Gleises zu gewährleisten.

Die umfassende Analyse der aufgezeichneten Daten aus den Smart-Rock-Messungen eröffnet wertvolle Einblicke in das Verhalten des Gleisschotters während des Stopfvorgangs. Die Smart-Rock-Daten verdeutlichen, dass längere Beistellzeiten zu einer stabileren Schotterstruktur führen, während kürzere Zeiten eine geringere Verdichtung verursachen. Die Kontaktspannungen zwischen den Schotterkörnern geben zusätzlich Aufschluss über die Veränderungen im Schottergefüge während des Stopfvorgangs.

Im zweiten Teil dieses Beitrags, der in der nächsten EI-Ausgabe im Dezember 2023 veröffentlicht wird, werden Ergebnisse aus den vom Smart Tamper aufgezeichneten Messdaten vorgestellt. Darüber hinaus wird ein direkter Vergleich der Ergebnisse der beiden innovativen Messmethoden vorgestellt und erörtert. ■

QUELLEN

- [1] Hansmann, F.; Nemetz, W.: Der Gleislage auf der Spur – Grundlagen – Fehlerermittlung – Korrektur – Qualität. Ein vergleichender Überblick über die DACH-Staaten. Trackmedia, 2019, ISBN: 9783962451646
- [2] Barbir, O.: Development of condition-based tamping process in railway engineering. Dissertation, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, (2022)
- [3] Zhou, Y. et al.: Investigation of Tamping Strategies based on SmartRock-measured Ballast Particle Motion and Stress Response. Mechanical systems and signal processing (im Revisionsprozess)
- [4] Omerovic, S.; Philipp, T.; Auer, F.: „Die Anwendung der Diskrete-Elemente Methode im Eisenbahnbau: Inverse Parameterbestimmung“, ETR – Eisenbahntechnische Rundschau 06/2019
- [5] Omerovic, S.; Schöllhamer, D.: „Moderne Simulationen des Schotterbetts“, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 07/2023
- [6] Omerovic, S. et al.: „Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau“, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 07/2021
- [7] Antony, B. et al.: Intelligent tamping – from research to automation. The PWI Journal, 07/2022 Vol. 140 Pt. 3
- [8] Zhou, Y. et al.: What happens during the tamping process? – When “Smart-Tamper” meets “Smart-Rock”. 13th World Congress on Railway Research, Birmingham, UK, June 2022
- [9] Hansmann, F.; Zhou, Y.: Smart Rock meets Smart Tamper – Improved Tamping for Track Durability. Heavy Haul Seminar, WRI 2023, Minneapolis, USA, June 2023



**Dipl.-Ing. Dr. mont.
Christian Koczwarra**

R&D Scientist,
Abt. Research und Simulation
Plasser & Theurer, AT-Linz
christian.koczwarra@plassertheurer.com



**Dipl.-Ing. Dr. techn.
Fabian Hansmann**

Head of Marketing
Plasser & Theurer, AT-Wien
fabian.hansmann@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. techn. Olja Barbir

System Engineer
Plasser & Theurer, AT-Wien
olja.barbir@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Bernhard Antony, B.Sc.

Head of
Technology Centre Purkersdorf
Plasser & Theurer, AT-Wien
bernhard.antony@plassertheurer.com