

# Smart Rock trifft Smart Tamper

## Teil 2: Stopfen aus Sicht des Aggregats



**Abb. 1:** Gleisstopfmaschine GRM 3000 (links) und das Stopfaggregat mit der genauen Position der für die Datenerfassung verwendeten Sensoren – Drucksensoren am Beistellzylinder (blau), Drucksensoren am Hebe- und Senkzylinder (rot) und Winkelsensoren (grün) (rechts) *Quelle: B. Antony*

**OLJA BARBIR | CHRISTIAN KOCZWARA |  
BERNHARD ANTONY | FABIAN HANSMANN**

**Ein gründliches Verständnis der Wechselwirkung zwischen Stopfpickel und Schotter während der Gleisstopfung ist für eine erfolgreiche und effektive Gleisstandhaltung unerlässlich. Dieses Wissen erlaubt es, den Stopfprozess zu optimieren und somit eine stabile und dauerhafte Gleisgeometrie zu erreichen. Gleichzeitig wird das Risiko ungleichmäßiger Gleissetzungen minimiert und die Langlebigkeit der Gleisinfrastruktur erhöht, was letztlich zur Sicherheit und Effizienz des Zugbetriebs beiträgt.**

Im ersten Teil dieses Beitrags (EI 11/23 [1]) wurde der Prozess des Gleisstopfens aus der „Sicht des Schotters“ betrachtet. Die Verwendung von Smart Rocks (Schottersteine mit eingebauten Sensoren) erlaubte die detaillierte Analyse der Bewegungen sowie die auf den Schotter wirkenden Kräfte. Diese Messungen erlauben in weiterer Folge Rückschlüsse auf den Einfluss verschiedener Stopfparameter auf das Schotterverhalten. Um den Stopfprozess vollständig erfassen zu können, wurden

zusätzlich zu den Smart Rocks Sensoren am Stopfaggregat (Smart Tamper) angebracht. In diesem Beitrag wird nun der Stopfprozess aus „Sicht des Stopfaggregats“ beleuchtet. Zusätzlich erlaubt ein Vergleich von Stopfmaschinendaten und Smart-Rock-Daten detaillierte Einblicke in den Stopfprozess.

### **GRM3000 als „Smart Tamper“**

Um die Interaktion des Gleisschotters mit dem Stopfaggregat detailliert erfassen zu können, wurde das verwendete Stopfaggregat der Stopfmaschine GRM 3000 (Abb. 1) mit mehreren Sensoren ausgestattet. Die genaue Position der verwendeten Sensoren ist in Abb. 1 (rechts) dargestellt. Zur Ermittlung der Beistellkräfte wurden Drucksensoren sowohl kolbenseitig als auch ringseitig am Beistellzylinder angebracht (Abb. 1, blau). Zusätzlich wurden die Beistell- und Vibrationsbewegungen mit speziell dafür entwickelten Winkelsensoren aufgezeichnet (Abb. 1, grün). Dadurch ist es möglich, verschiedene Kenngrößen des Stopfprozesses zu ermitteln. Darüber hinaus wurden die Drücke der Hebe- und der Senkzylinder am Aggregat aufgezeichnet (Abb. 1, rot). In Kombination mit den gemessenen Aggregatpositionen

können daraus die auf das Aggregat wirkenden Schotterkräfte berechnet werden. Die Maschinenposition und Geschwindigkeit werden zusätzlich über ein GPS-Modul aufgezeichnet. Für eine einfache Synchronisation der Messsysteme wurde ein GPS-basierter NTP-Server verwendet. Dies ist besonders für die nachfolgende Datenverarbeitung maßgeblich, denn ohne exakte Synchronisierung ist eine Analyse der dynamischen Prozesse nicht mit der erforderlichen Genauigkeit durchführbar. Die Messdaten wurden mit einer Abtastrate von bis zu 1 kHz aufgezeichnet, was die Erfassung von Einzelheiten der dynamischen Bewegung und der Wechselwirkung zwischen Stopfpickel und Schotter ermöglichte. Bei einer Frequenz von 35 Hz hat jeder Schwingungs- bzw. Vibrationszyklus eine Dauer von etwa 28 Millisekunden und kann in Form eines Arbeitsdiagramms oder Kraft-Weg-Diagramms dargestellt werden (Abb. 2). Die Ergebnisse, die aus den von der Stopfmaschine aufgezeichneten Daten abgeleitet werden, werden auf Vibrationszyklusebene analysiert und mit den aus den Smart Rocks extrahierten Daten verglichen. Diese Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln präsentiert.

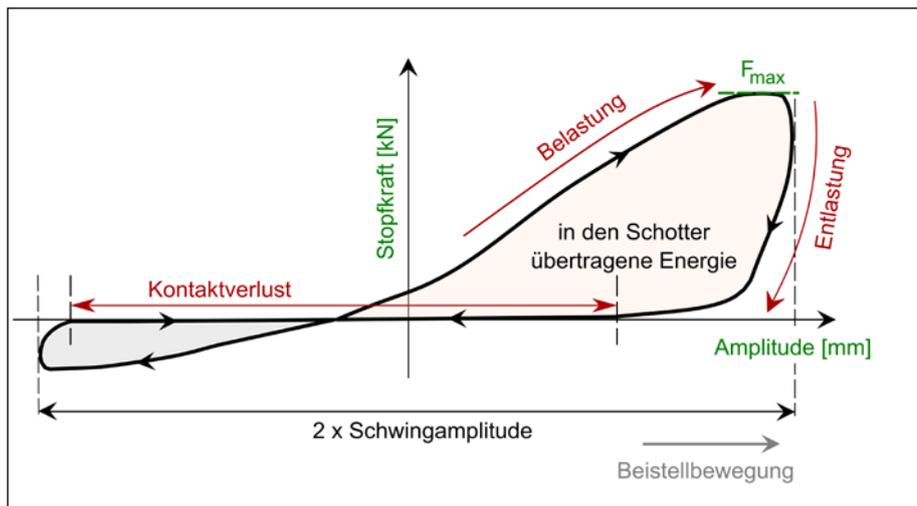


Abb. 2: Vereinfachte Darstellung eines Arbeitsdiagramms mit Stopfkenngrößen

Quelle: [2]

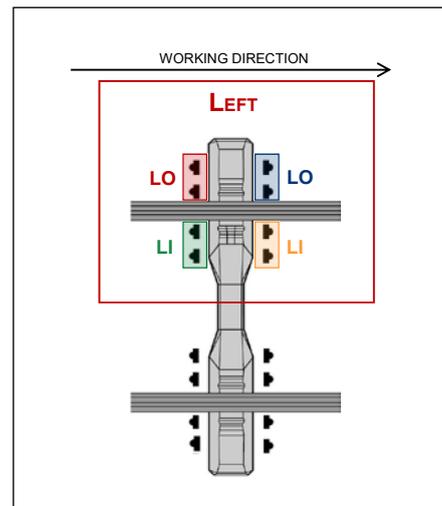


Abb. 3: Anordnung der Stopfpickel der Stopfmaschine GRM 3000

Quelle: Plasser & Theurer

### Versuchsaufbau, Durchführung und Datenanalyse

Auf der Norfolk Southern Railway, einer amerikanischen Schwerlastbahn, wurde eine Versuchsreihe mit unterschiedlichen Stopfparametern durchgeführt. Der Schotter im untersuchten Gleisabschnitt zeigte bereits einen signifikanten Feinanteil und kann deshalb als verunreinigt bezeichnet werden. Der Schwerpunkt der Versuche lag darauf, den Einfluss unterschiedlicher Beistellzeiten sowie einer unterschiedlichen Anzahl an Beistellvorgängen zu analysieren. Die Frequenz (35 Hz), die Hebewerte (25 mm) und der Beistelldruck wurden während der Versuche konstant gehalten (Tab. 1). Ziel der Versuchsreihe war es, den Einfluss der Stopfparameter auf den Verdichtprozess zu evaluieren.

Nach Abschluss des Tests wurden die aufgezeichneten Daten in drei Schritten analysiert und interpretiert:

- Analyse der Smart-Rock-Daten (sowohl in sauberem als auch in verunreinigtem Schotter, veröffentlicht in Heft 11/23) [1, 3]
- Analyse der von der Stopfmaschine aufgezeichneten Daten (in verunreinigtem Schotter)
- Gegenüberstellung von Stopfmaschinendaten und Smart-Rock-Daten.

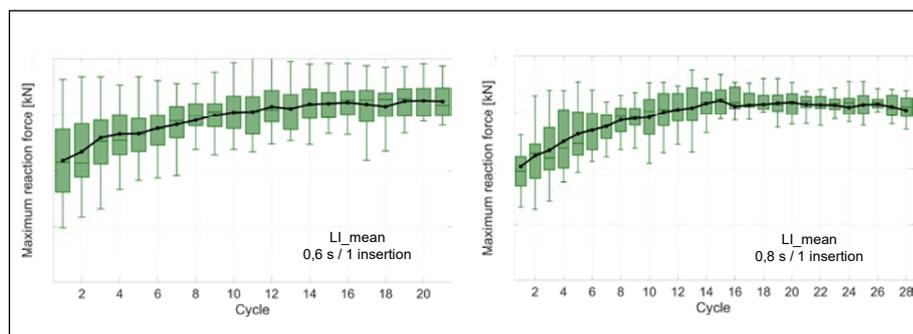


Abb. 4: Ergebnisse der Analyse der mit dem Smart Tamper aufgezeichneten Daten. Die maximale Reaktionskraft für Versuchsabschnitte mit einer Beistellzeit von 0,6 Sekunden und 0,8 Sekunden ist dargestellt.

Quelle: Plasser & Theurer

Die letzten beide Schritte sind das Thema dieses Beitrags und werden in den folgenden Kapiteln erörtert.

### Analyse der von der Stopfmaschine aufgezeichneten Daten

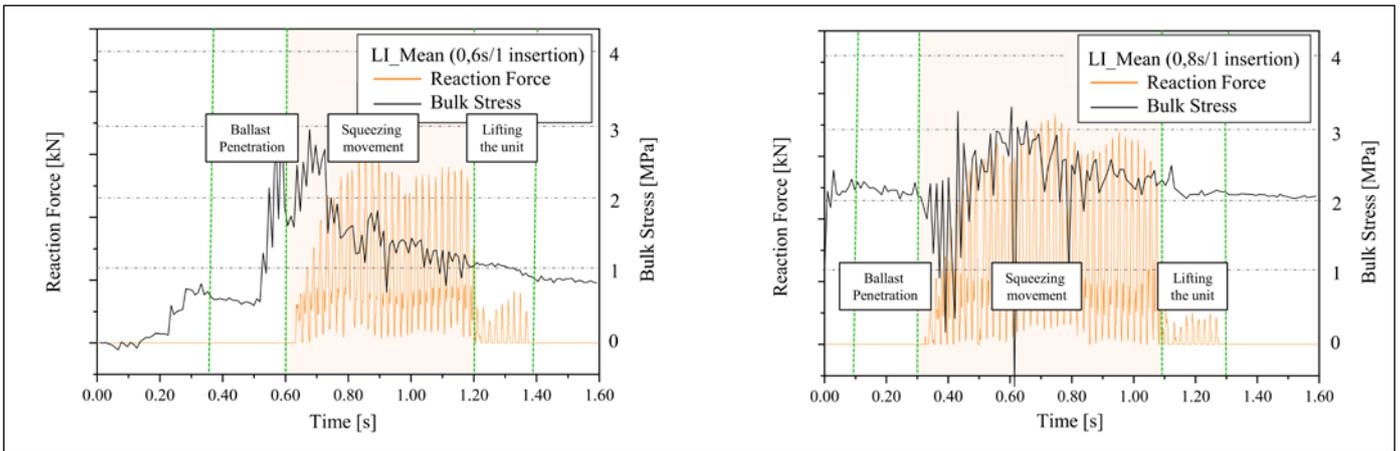
Wie in Tab. 1 dargestellt, wurden insgesamt vier Parameterkombinationen in acht Testabschnitten ausgewählt. Jeder Testabschnitt bestand aus 20 Schwellen, wobei jeweils eine Schwelle zusätzlich mit Smart Rocks ausgestattet war. Jeder einzelne Stopfprozess wurde mit

dem Smart Tamper aufgezeichnet. Im ersten Schritt werden anhand der aufgezeichneten Daten klare Grenzen zwischen den drei Phasen des Stopfvorgangs – Eindringen (Stopfpickel), Beistellen und Hochziehen (Stopfaggregat) – definiert. Im nächsten Schritt kann, wie bereits anhand von Abb. 2 dargestellt, die maximale Reaktionskraft zwischen dem Stopfpickel und dem Schotter für jeden Schwingungszyklus berechnet werden. Die Anordnung der Stopfpickel der Stopfmaschine GRM 3000 ist in Abb. 3 zu sehen. Es wird nur die linke Seite der Schwelle analysiert und ein Mittelwert der Reaktionskraft für die vier innen liegenden Pickel (LI) (Abb. 3) berechnet. Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Versuchsabschnitte mit einer Beistellzeit von 0,6 Sekunden und 0,8 Sekunden. Die Boxplots (Abb. 4) zeigen auf der y-Achse die an 20 Schwellen gemessene maximale Reaktionskraft (während des Beistellens) und auf der x-Achse die Zyklusnummer. Die Anzahl der Zyklen ist von der Frequenz und der Beistellzeit abhängig. Bei einer Stopffrequenz von 35 Hz ergeben sich bei einer Beistellzeit von 0,6 Sekunden 21 Zyklen, bei einer Beistellzeit von 0,8 Sekunden 28 Zyklen. Ein signifikanter Anstieg der maximalen Reaktionskraft ist während der ersten zehn bzw. zwölf Schwing-

	Versuch	Beistellvorgänge (Insertions)	Beistellzeit [s]	Hebewerte [mm]	Beistell- druck / Freq.
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 für die Versuche in verunreinigtem Schotter

Quelle: [1]



**Abb. 5:** Gegenüberstellung von Stopfmaschinen-daten (maximale Reaktionskraft) und Smart-Rock-Daten (triaxialer Spannungszustand) für 0,6 Sekunden (links) und 0,8 Sekunden (rechts) Beistellzeit Quelle: [4]

zyklen zu beobachten. Dieses Verhalten ist unabhängig von der Beistellzeit. In den weiteren Zyklen zeigt die Kraft einen nahezu konstanten Verlauf, was darauf hindeutet, dass unter der Annahme einer gleichbleibenden Amplitude in jedem folgenden Zyklus die gleiche Verdichtungsenergie übertragen wird wie im vorangegangenen. Im nächsten Schritt werden diese Ergebnisse mit denen der Smart Rocks verglichen, um ein besseres Verständnis für das Verhalten des Schotter während des Stopfens zu erhalten.

**Gegenüberstellung von Stopfmaschinen- und Smart-Rock-Daten**

Für eine noch detailliertere Analyse des Stopfprozesses können nun die Messdaten der Stopfmaschine mit jenen aus den Smart Rocks [1] verschritten werden. Diese gemeinsame Datenanalyse wird hier am Beispiel der Reaktionskraft (reaction force) an den Stopfpickeln und der Änderung des triaxialen Spannungszustands (bulk stress) [4] gezeigt (Abb. 5). Die in den Smart Rocks verbauten Spannungsmesszellen ermöglichen die Messung der Kontaktspannung zwischen den einzelnen

Schotterkörnern sowie die daraus abgeleitete Änderung des triaxialen Spannungszustands. Diese Änderung wird als Summe der Spannungsänderungen in x-, y- und z-Richtung berechnet, wobei ein positiver Wert eine Zunahme der Spannung bedeutet.

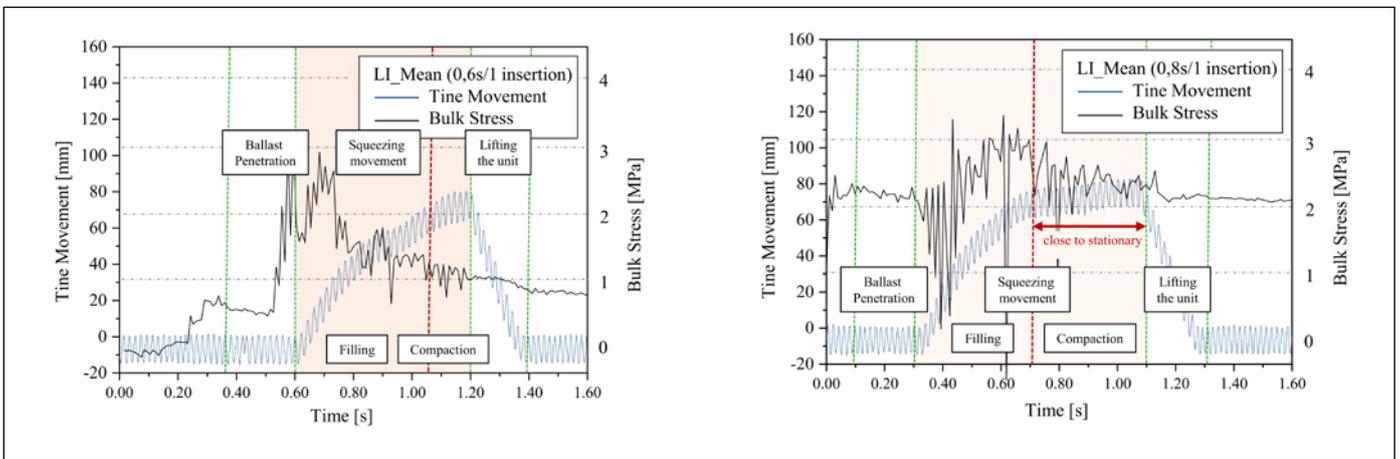
Die Kraft innerhalb der Schottermatrix wird an den Kontaktpunkten der Schotterpartikeln übertragen. Mit fortschreitender Verdichtung der Schottermatrix wird die über die Stopfpickel eingebrachte Kraft über eine größere Anzahl von Partikeln übertragen. Obwohl die maximale Reaktionskraft nach einer gewissen Zeit konstant bleibt, ist eine Abnahme des triaxialen Spannungszustands zu erkennen (Abb. 5 links: ab ca. 0,7 Sekunden; rechts: ab ca. 0,6 Sekunden).

Zusätzlich zur Reaktionskraft wurden die Änderungen des triaxialen Spannungszustands mit den am Stopfaggregat gemessenen Beistellwegen (tine movement) verglichen. Auch hier wurde besonderes Augenmerk auf den Beistellprozess (squeezing movement) gelegt. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei Phasen: dem Füllen des Hohlraums unter der Schwelle, der durch das Anheben des Gleises

entsteht (filling), und der Schotterverdichtung (compaction). Die Grenze zwischen diesen beiden Phasen ist deutlich an der Veränderung der Steigung im Verlauf der Beistellbewegung zu erkennen. Ein Abflachen der Beistellbewegung deutet auf eine erfolgreiche Hohlräumverfüllung hin. Abb. 6 zeigt sowohl den Übergang zwischen Verfüllung und Verdichtung (filling and compaction) als auch den Vorteil einer Verlängerung der Beistellzeit. Bei einer längeren Beistellzeit von 0,8 Sekunden ist eine deutliche Abflachung der Kurve, die die Beistellbewegung abbildet, zu erkennen (Abb. 6, rechts). Der rechts dargestellte Verlauf ist für eine erfolgreiche Verdichtung von Vorteil, da in diesem Teil des Verfahrens die meiste Energie vom Stopfpickel auf den Schotter übertragen wird.

**Abgleich mit numerischen Simulationen**

Zusätzlich zu den beschriebenen Auswertungen ergibt sich durch die Kombination aus Smart Rocks und Smart Tamper eine Vielzahl weiterer Analyse-möglichkeiten. So können die auf diese Art gewonnenen Daten direkt mit den Ergebnissen aus numerischen Simulati-



**Abb. 6:** Gegenüberstellung von Beistellbewegung am Stopfpickel (tine movement) und Smart-Rock-Daten (bulk stress) für 0,6 Sekunden (links) und 0,8 Sekunden (rechts) Beistellzeit Quelle: [4]

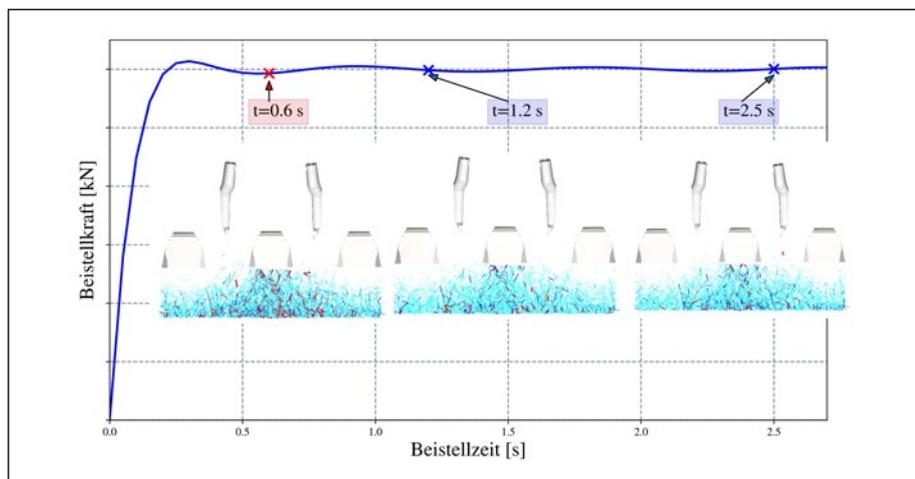


Abb. 7: Lastabtragungspfade (Kraftketten) im Schotter für unterschiedliche Beistellzeiten Quelle: [5]

onsmethoden verglichen werden, was präzise Prognosen bei Variation von Stopparametern und vertiefte Einblicke ins Schotterverhalten ermöglicht.

In einer bereits durchgeführten Studie [5, 6] wurde der Einfluss der Beistellzeit (0,6, 1,2 und 2,5 Sekunden) auf die Spannungsverteilung und Ausbildung von Lastabtragungspfaden innerhalb einer sauberen Schotterstruktur mittels Simulation untersucht. In Abb. 7 sind die Ergebnisse der einzelnen Stopfvorgänge abgebildet, zugehörig zu den jeweiligen Beistellzeiten [5, 6]. Die Stärke der Kraftketten wird durch die Linienstärke und Farbwahl dargestellt, um die übertragene Kraft zu verdeutlichen. Während der Verdichtung wurden bei stark beanspruchten Kornstrukturen zwei Grenzfälle betrachtet. Ein Fall führt zu einer ungleichmäßigen Verdichtung, die durch ungeeignete Parameterwahl entstehen kann. In diesem Szenario ist die Kraftverteilung im Korngefüge unregelmäßig, was zu wenigen, aber stark ausgeprägten Kraftketten führt. Dies zeigt sich in den Simulationen mit kurzen Beistellzeiten (ungefähr 0,6 Sekunden) und verursacht zweifellos vermehrten Kornbruch und erhöhten Verschleiß im Schotterbett. Der andere Fall repräsentiert eine gleichmäßige Verdichtung, bei der die Kräfte im Korngefüge keine starken individuellen Spitzen aufweisen. Dies tritt bei Beistellzeiten von etwa 1,2 Sekunden auf. Bei längeren Beistellzeiten zeigt sich in detaillierten Analysen eine noch geringere Streuung von Kraftspitzen, jedoch ohne signifikanten Unterschied [5, 6]. Die Ergebnisse der numerischen Simulation stehen damit im Einklang mit den Erkenntnissen, die in diesem und dem in Heft 11/23 [1] veröffentlichten Beitrag vorgestellt wurden. Zu geringe Beistellzeiten führen zu deutlich erhöhten Belastungen im Schottergefüge, während längere Beistellzeiten zu einer homogeneren Lastverteilung und folglich auch zu einer geringeren Kornbruchgefahr führen. Dadurch ist eine deutlich längere Beständigkeit der Gleislage zu erwarten.

### Zusammenfassung

Die umfassende Analyse der von den Smart Rocks und dem Smart Tamper aufgezeichneten Daten 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 zur Folge haben. Die Kontaktspannungen zwischen den Schotterkörnern geben zusätzlich Aufschluss über die Veränderungen im Schottergefüge während des Stopfvorgangs. Die Analyse der Reaktionskraftdaten der Stopfmaschine zeigt anfänglich einen Anstieg der maximalen Kraft, gefolgt von einer annähernd konstanten Phase. Aus den gemessenen Beistellbewegungen konnte der Übergang zwischen Verfüllung und Verdichtung während des Beistellens bestimmt werden. Die Veränderung der Steigung in den Beistellbewegungskurven kann genutzt werden, um die Verfüllung während des Stopfprozesses zu überwachen.

Die Gegenüberstellung der Daten verdeutlicht den Mehrwert von Smart-Rock-Messungen für ein umfassenderes Verständnis des Schotterverhaltens während des Stopfprozesses. Die Kombination dieser Datenquellen, idealerweise verknüpft mit numerischen Simulationen, ermöglicht es, die Effekte von Beistellzeit und Kornumlagerung auf die Schotterstruktur genauer zu untersuchen und somit die Gleisstopfung effizienter und wirkungsvoller zu gestalten.

Wissenschaftliche Forschungsprojekte wie das hier präsentierte bilden das Fundament für eine erfolgreiche Produktentwicklung. Durch die Verknüpfung von Daten sowohl von der Stopfmaschine als auch vom Schotter entsteht ein umfassendes Verständnis für das Gleisverhalten. Diese ganzheitliche Herangehensweise ebnet den Weg für fundierte Innovationen in der Stopftechnologie und trägt letztendlich zur Verbesserung der Gleisqualität bei. ■

### QUELLEN

- [1] Barbir, O. et al.: „Smart Rock trifft Smart Tamper – Teil 1: Stopfen aus Sicht des Schotters“, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 11/2023
- [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] Hansmann, F.; Zhou, Y.: „Smart Rock Meets Smart Tamper – Improved Tamping for Track Durability“. Heavy Haul Seminar, WRI 2023, Minneapolis, USA, June 2023
- [5] Demml, M. et al.: „Von der Spitzhacke zur emissionsfreien Gleisstopfmaschine“, EI – DER EISENBAHNINGENIEUR 5/2023
- [6] Barbir, O. et al.: „Von der Idee zum Produkt: Digitale Produktentwicklung im Bahnbau“, EIK 2023



**Dipl.-Ing. Dr. techn. Olja Barbir**  
System Engineer  
Plasser & Theurer, AT-Wien  
olja.barbir@plassertheurer.com



**Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczvara**  
R&D Scientist  
Abt. Research und Simulation  
Plasser & Theurer, AT-Linz  
christian.koczvara@plassertheurer.com



**Dipl.-Ing. Bernhard Antony, B.Sc.**  
Head of  
Technology Centre Purkersdorf  
Plasser & Theurer, AT-Wien  
bernhard.antony@plassertheurer.com



**Dipl.-Ing. Dr. techn. Fabian Hansmann**  
Head of Marketing  
Plasser & Theurer, AT-Wien  
fabian.hansmann@plassertheurer.com