

# Von der Spitzhacke zur emissionsfreien Gleisstopfmaschine

Wissenschaftlich fundierte Stopftechnologie – ein Innovationstreiber für das System Bahn



Abb. 1: Manuelle Unterstopfung

Quelle: Plasser & Theurer

MARC DEMML | CHRISTIAN KOZWARA |  
SAMIR OMEROVIĆ

**Die Methodik der Gleisstandhaltung ist einen weiten Weg gegangen von der manuellen Bearbeitung mit Laschen verbundener Schienen bis hin zur mechanisierten Instandhaltung von lückenlos verschweißten Gleisen. Bedingt durch die stetig wachsende Erfahrung mit den Einzelelementen des Gleises und deren Wechselwirkungen sowie Anpassungen an die örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten, hat jede Komponente des Bahnkörpers grundlegende Veränderungen erfahren. Dieser Prozess ist nach wie vor nicht abgeschlossen; nicht zuletzt durch die Ausreizung und Optimierung der Bestandteile ist eine wissenschaftliche Betrachtung des Themengebietes unumgänglich.**

## Technologische Entwicklung des Stopfprozesses

Zu Beginn der Eisenbahn waren die Anforderungen an das Gleis aufgrund niedriger Geschwindigkeiten und geringerer Massen noch vergleichsweise einfach zu erfüllen. Mit zunehmender Geschwindigkeit und höheren Belastungen stiegen jedoch die Anforderungen an die Qualität des Gleises, um einen sicheren und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten. Die Anforderungen an die Gleiserhaltung wurden dadurch immer anspruchsvoller und komplexer. Die Instandhaltung wird heutzutage in einer wesentlich kürzeren Zeitspanne mit außerordentlicher Genauigkeit durchgeführt, noch dazu unter den Aspekten einer teilweisen Automatisierung, einer wesentlich wirtschaftlicheren Ausführung und zunehmend unter strikten Auflagen betreffend Klimaneutralität. Die vielfach erhöhten Anforderungen können nur durch umfangreiche Forschungs-

tätigkeiten in Kombination mit modernen Simulationsmethoden erfüllt werden. Das Forschungsbereich umfasst eine breite Palette von Forschungsbereichen, die sich mit den neuesten Entwicklungen in Sensorik, Datenverarbeitung und Materialwissenschaften befassen. Die Herstellung der geforderten Gleislage war bis Mitte der 1940er Jahre geprägt von schwerster körperlicher Arbeit. Um die Gleishöhe anzupassen, wurde zunächst eine Hebewinde oder eine Hebemaschine unter die Schiene gelegt und das Gleis in die endgültige Position gebracht. Anschließend wurde der Schotter mit Brechstange oder Spitzhacke – so gut es ging – unter die Schwelle befördert (Abb. 1). Für die Anpassung der Gleisrichtung setzte man sogenannte Riehtrammen ein (Abb. 2). Offensichtlich war eine derartige händische Durcharbeitung mit enormem Zeitaufwand verbunden, in Kombination mit signifikanten Schwankungen in der Qualität



Abb. 2: Richttrammen zur Herstellung der Gleisrichtung

Quelle: Robel

der endgültigen Gleislage. Zwar gibt es auch heute noch Arbeiten, die vorwiegend manuell durchgeführt werden (z. B. das Wechseln einzelner Schwellen oder der Zwischenplatten unter der Schiene), die Herstellung der Gleislage und -richtung wird allerdings hauptsächlich von Gleisstopfmaschinen übernommen. Nur so können die gestiegenen Qualitätsanforderungen an die Gleislage – infolge der hohen Geschwindigkeiten und gestiegenen Achslasten – erfüllt werden.

### Meilensteine der Mechanisierung

Der Aufstieg der Bahnindustrie ist direkt an die Entwicklung fortschrittlicher Gleisbaumaschinen gekoppelt. Erst diese ermöglichten es, zunächst einzelne Arbeitsschritte und all-

mählich sogar den kompletten Prozess zu mechanisieren und automatisieren. Bereits in den 1940er und 1950er Jahren revolutionierte die Erfindung der ersten mechanischen Stopfmaschine und deren Weiterentwicklung zur hydraulischen Stopfmaschine (Abb. 3) den Gleisbau. Dadurch konnten Stopfarbeiten erstmals maschinenunterstützt durchgeführt werden, was zu einer enormen Arbeitserleichterung und Effizienzsteigerung in der Gleisinstandhaltung führte. Die zugehörigen Hebe- und Richtarbeiten wurden in den Anfangsjahren noch manuell ausgeführt, konnten aber bereits 1960 durch die Integration von Hebe- und Richtaggregaten in Stopfmaschinen ebenfalls automatisiert werden. Ein weiterer Meilenstein war die Ausrüstung der Stopfmaschinen mit

Leitrechnern. Dadurch „kennt“ die Stopfmaschine die gewünschte Gleisgeometrie und kann diese mithilfe des Hebe- und Richtaggregates automatisiert herstellen. Über die nächsten Jahrzehnte entwickelten sich die Arbeitsaggregate kontinuierlich weiter, um selbst die diesbezüglich komplizierteren Weichen vollständig maschinell unterstopfen zu können. Zur weiteren Steigerung der Energieeffizienz und Arbeitsleistung wurde die kontinuierliche Arbeitsweise entwickelt. Dabei werden die Arbeitsaggregate auf einem eigenen Maschinenteil montiert (dem sogenannten Satelliten), der sich unabhängig von der Hauptmaschine bewegen kann. Im Gegensatz zur zyklischen Arbeitsweise, bei der die gesamte Maschine abwechselnd über der Arbeitsstelle stehen bleibt und wieder anfährt, ist bei der kontinuierlichen Arbeitsweise die Maschine ständig in Bewegung: Während die Stopfmaschine als Ganzes kontinuierlich fährt, wird der Satellit so beschleunigt und gebremst, dass das Arbeitsaggregat während des Stopfens über der Arbeitsposition stehen bleibt. Neben den offensichtlichen Effizienzsteigerungen ergeben sich hier deutliche Komfortsteigerungen für die Maschinenbesatzung. Ein weiterer Entwicklungsschritt erfolgte durch die Integration des Dynamischen Gleisstabilisators (DGS) [1]. Der DGS kann dabei als eigene angetriebene Maschine oder aber im Verbund mit der Stopfmaschine (die sogenannte Dynamic-Reihe) betrieben werden. Er wird unmittelbar nach dem Stopfprozess eingesetzt und beaufschlagt den Gleisrost mit einer konstanten vertikalen Last sowie einer Vibration quer zur Fahrtrichtung. Durch diese zusätzliche Bearbeitung wird das Gleisbett hinsichtlich der Verdichtung vollständig homogenisiert, und ein großer Teil der für eine dauerhafte Gleislagequalität wichtigen Anfangssetzungen kann so vorweggenommen werden. Zusätzlich werden die Festigkeitseigenschaften des Gleisbettes verbessert, und das Gleis kann unmittelbar nach der Instandhaltung ohne Einschränkungen befahren werden. Verbesserte Durcharbeitungstechnologien können die Instandhaltungszyklen signifikant verlängern und somit auch den ökologischen Fußabdruck verringern.

### Dekarbonisierung auch in der Gleisinstandhaltung

Neben der Weiterentwicklung der Arbeitsaggregate steht seit einigen Jahren auch die Reduktion des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Gleisinstandhaltung besonders im Fokus. Dafür wurde bereits 2015 die weltweit erste elektrisch angetriebene Stopfmaschine (09-4X Dynamic E<sup>3</sup>) von Plasser & Theurer (P & T) vorgestellt. Der nächste logische Schritt ist die Integration weiterer elektrischer Antriebe (z. B. Stopfaggregatantrieb, Hydraulikdruckerzeugung), hin zu einem System: „Alles, was sich dreht, wird elektrisch betrieben.“ Es folgten sukzessive die Entwicklung weiterer elektrisch

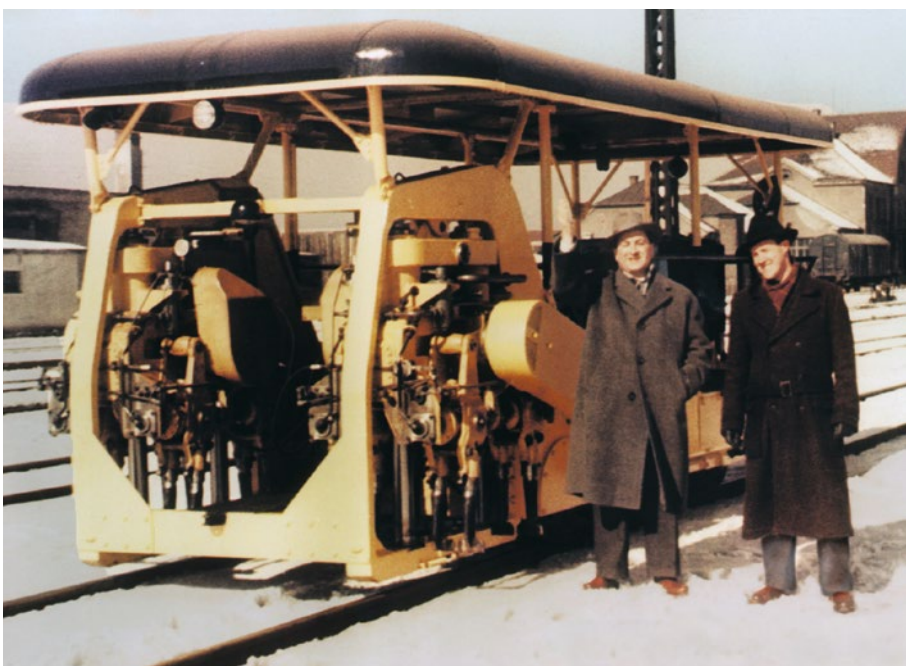
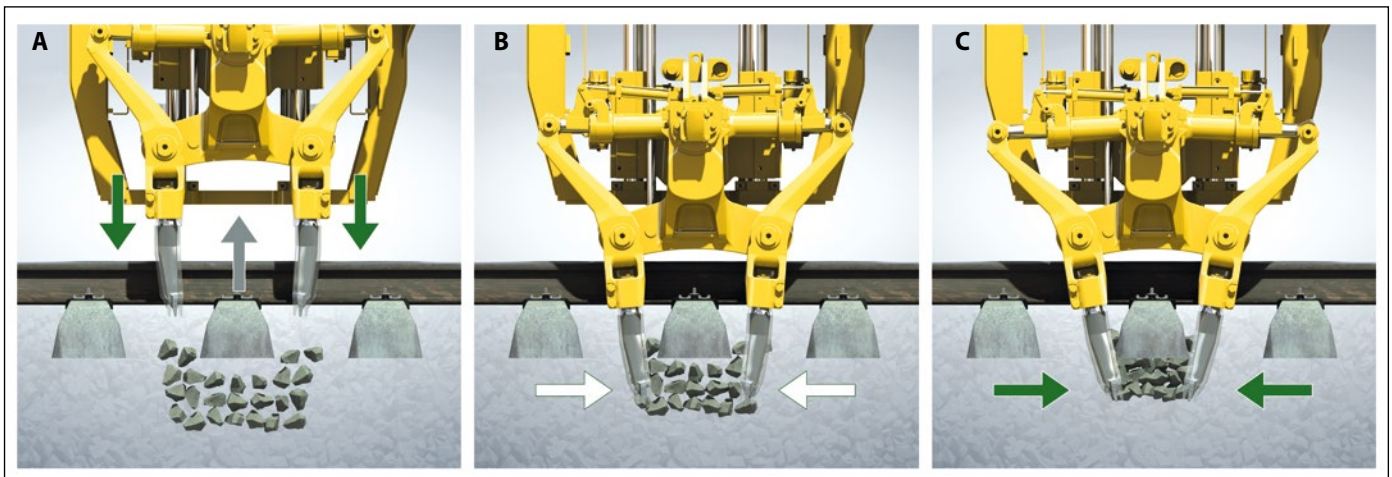


Abb. 3: Eine der ersten Plasser & Theurer-Stopfmaschinen

Quelle: Plasser & Theurer





**Abb. 4:** a) Die Schwelle wird gehoben, unter der Schwelle entsteht ein Hohlraum. b) Durch die Beistellbewegung wird der entstandene Hohlraum verfüllt. c) Verdichtung durch die überlagerte Vibrationsbewegung

Quelle: Plasser & Theurer

angetriebener Maschinentypen [2]. Bahnbaumaschinen müssen flexibel einsetzbar sein, auch in Bereichen ohne Oberleitung (nicht vorhanden oder für den Baustellenbetrieb deaktiviert). Zu diesem Zweck sind elektrisch angetriebene Stopfmaschinen häufig mit zusätzlichem konventionellem Antrieb mittels Verbrennungsmotor ausgestattet. Um künftig völlig auf konventionelle Antriebskonzepte verzichten zu können, rückt der Einsatz elektrochemischer Energiespeichersysteme (Akku, Brennstoffzelle) in den Fokus. Dadurch können Arbeiten und Überstellungsfahrten in Bereichen ohne verfügbare Oberleitung abgedeckt werden.

#### Identifikation und Analyse wichtiger Parameter

Neben der Reduktion der lokal auftretenden Emissionen durch fortschreitende Elektrifizierung im Bahnbau spielt auch das Instandhaltungsintervall eine entscheidende Rolle. Durch eine längere Gleislebensdauer können die Instandhaltungskosten reduziert werden, wodurch das System Bahn weiter an Attraktivität gewinnt. Um eine langlebige Gleislage gewährleisten zu können, ist es essenziell, ein qualitativ hochwertiges Schwellenauf-

lager herzustellen, ohne den Schotter mehr als nötig zu beanspruchen. Das asynchrone Gleichdruckstopfprinzip ist eine bewährte Technologie, die allerhöchste Stopfqualität ermöglicht. Dabei wird über den Hydraulikzylinder eine konstante Kraft auf den Pickelarm ausgeübt. Die Stopfpickel schieben durch die Stopfkraft den Schotter unter die Schwelle und wirken in Kombination mit der überlagerten Vibration als Verfüll- und Verdichtwerkzeug. Vibrationsfrequenz, Vibrationsamplitude, der verwendete Beistelldruck und die entsprechende Beistellzeit (siehe weiter unten) sind wesentliche Parameter, die das Stopfergebnis maßgeblich beeinflussen. Diese Parameter wurden über Jahrzehnte empirisch ermittelt [3] und sind meist in den Richtlinien der Bahninfrastrukturunternehmen festgelegt. Die technologischen Fortschritte im Bereich der Messtechnik und Simulationen erlauben heute eine noch detailliertere Analyse des Stopfprozesses.

#### Phasen des Stopfprozesses

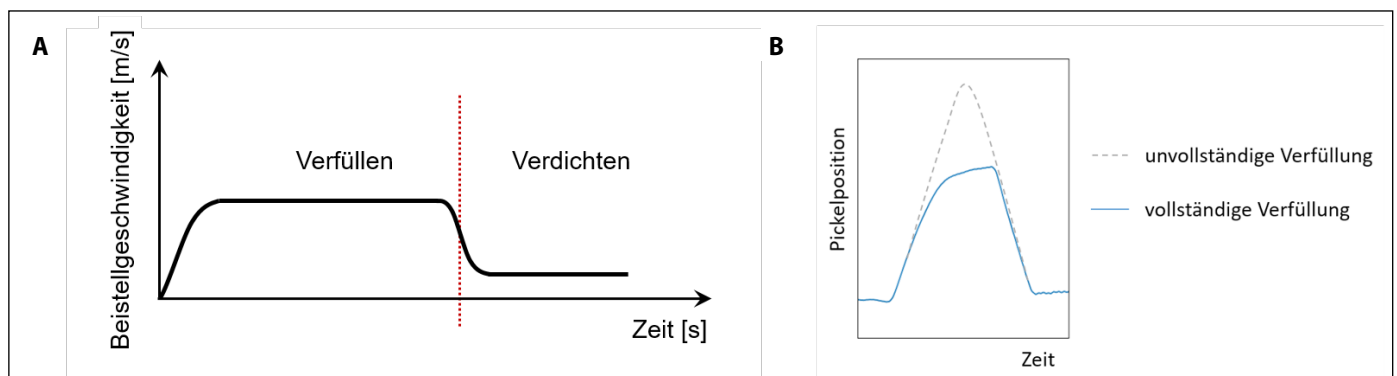
Für die genauere Betrachtung ist es sinnvoll, den Stopfvorgang in mehrere Phasen zu unterteilen, abhängig von der Aggregat-Schotter-Wechselwirkung (Abb. 4):

- Heben/Richten und Eindringen (Abb. 4a)
- Verfüllung (Abb. 4b)
- Verdichtung (Abb. 4c).

Bei der Positionierung des Gleisrostes (Heben und Richten) entsteht direkt unter den zu stopfenden Schwellen ein Hohlraum, der beim anschließenden Stopfvorgang mit Schotter aufgefüllt und verdichtet werden muss. Die Verfüllung erfolgt dabei über die Beistellbewegung der einzelnen Stopfpickel, indem der Schotter aus dem Schwellenzwischenfach unter die Schwelle befördert wird. Die überlagerte 35 Hz-Schwingung der Stopfpickel sorgt für die notwendige Verdichtung unter der Schwelle. Dabei ist besonders die hydrostatische Spannung (Kraft von allen Seiten) nach abgeschlossenem Verfüllvorgang vorteilhaft, um eine möglichst hohe Verdichtung zu erreichen.

#### Verfüllen: Basis für das perfekte Auflager

Die ordnungsgemäße Verfüllung des durch den Hebe- und Richtprozess entstandenen Hohlräume ist die Basis für eine langlebige Gleislage. Wird eine unzureichende Verfüllung nicht erkannt, kann keine optimale Verdichtung erreicht werden (besonders im Bereich direkt unter der Schwelle, der im Zuge des Re-



**Abb. 5:** a) Verlauf der Beistellgeschwindigkeit beim Verfüllen und Verdichten. b) Gemessene Beistellbewegung für vollständige und unvollständige Verfüllung

Quelle: Plasser & Theurer

gelbetriebs am stärksten belastet wird). Resultat ist die Entstehung von Einzelfehlern.

Unzureichende Verfüllung kann besonders bei hohen Hebewerten, zu kurzen Beistellzeiten, unzureichender Schottermenge im Schwellenzwischenfach oder an Stellen mit bereits vorhandenen Hohllagen auftreten. Normen und Richtlinien der Bahninfrastrukturunternehmen, die Mindestwerte für die einzustellende Beistellzeit oder Mehrfachstopfungen ab bestimmten Hebewerten regeln, reduzieren die Gefahr, dass Einzelfehler durch unzureichende Verfüllung auftreten. Sie können diese allerdings nicht vollständig verhindern.

Das asynchrone Gleichdruckstopfprinzip bietet dabei einen besonderen Vorteil: Durch die vordefinierte Beistellkraft passt sich die Bewegung des Pickelarms vollautomatisch an die Gegebenheiten an. Dies lässt sich wie folgt erklären: Solange der Hohlraum noch nicht vollständig mit Schotter aufgefüllt wurde, ist der Widerstand gering. Bei einer vordefinierten konstanten Kraft führt das zu einer höheren Beistellgeschwindigkeit. Ist der Hohlraum aufgefüllt, nimmt der Widerstand zu und die Beistellbewegung wird verlangsamt (Abb. 5a). Dadurch passt sich der Beistellweg immer automatisch dem entstandenen Hohlraum an. Außerdem wird durch dieses Prinzip ein schotterschonender Beistellvorgang (gleichbleibende quasistatische Beistellkraft) erreicht. Mehrere Forschungsarbeiten belegen die Langlebigkeit der mit dieser Technologie erreichten Gleislage [4, 5].

Um die schon hohe Stopfqualität noch weiter zu optimieren und Einzelfehler zu vermeiden, entwickelte P&T in Zusammenarbeit mit Universitäten und Infrastrukturbetreibern auf der ganzen Welt ein System, das den Beistellprozess jedes Pickelarms separat überwacht und auswertet: die Plasser TampingControl. Auf Basis dieser Analysen kann ein Kennwert für die Verfüllung abgeleitet werden.

Abb. 5b zeigt beispielhaft die Beistellbewegung einer Stopfung mit vollständiger bzw. unvollständiger Verfüllung. Wird während einer Stopfung eine unvollständige Verfüllung erkannt, so wird der Maschinenbediener darauf aufmerksam gemacht und kann mit einer zusätzlichen Stopfung die Entstehung von Schwellenhohllagen verhindern und die Stopfqualität noch weiter verbessern.

### Verdichten: Grundvoraussetzung für eine stabile Gleislage

Um das Ziel einer möglichst langanhaltend präzisen Gleislage zu erreichen, muss während der Verdichtphase eine hohe (vollständige) Verdichtung erzielt werden. Dies wird durch die der Beistellbewegung überlagerte 35-Hz-Schwingung mit einer Amplitude von 4–5 mm erreicht. In mehreren Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass diese Einstellungen zu einem periodischen Kontaktverlust von Stopfpickel und umgebendem Schotter (der sog. Schottermatrix) führen [6, 7]. Dadurch können

sich die einzelnen Schotterkörner kurzzeitig bewegen. Das wiederum ermöglicht eine Umlagerung und somit eine effektive Verdichtung.

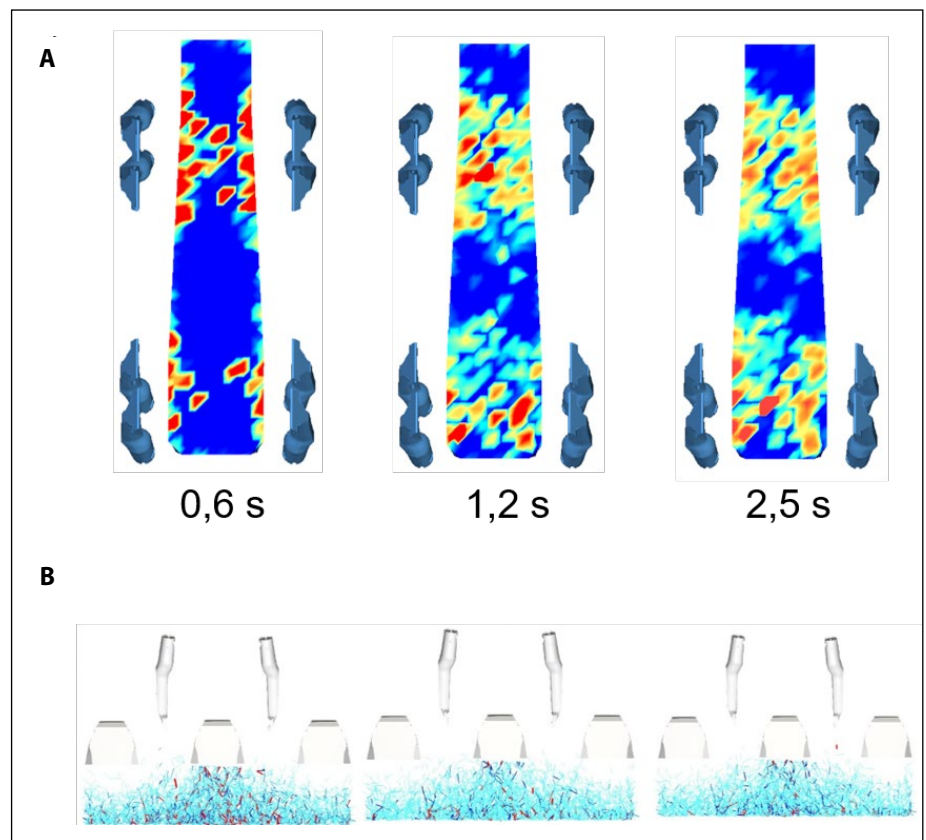
Die maximal erreichbare Verdichtung an jeder Schwelle ist immer der Verdichtung auf einen vorgegebenen Zielwert vorzuziehen. Das beruht auf der Tatsache, dass die folgende Regelbelastung durch den Zugverkehr immer zu einer Nachverdichtung des Schotters führt. Wird diese Verdichtung möglichst vollständig durch das Stopfen (und die Verwendung des DGS) vorweggenommen, reduziert sich auch die Setzung durch die Verkehrsbelastung, und die Gleislage bleibt lange erhalten. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Verdichtung auf einen Zielwert hin zu einer stärkeren Nachverdichtung durch den Zugverkehr, was auch zu einer größeren Setzung im Betrieb führt.

### Simulationsmethoden zur Optimierung des Stopfprozesses

P&T arbeitet stetig an einer Optimierung des Stopfprozesses und verwendet dafür modernste Simulationsmethoden. Mittels DEM (Diskrete-Elemente-Methode) wurde beispielsweise der Einfluss der Vibrationsamplitude und Vibrationsfrequenz auf die erzielbare Verdichtung untersucht. Hierfür wurde

ein bekannter Versuch [3] aus den 1980er Jahren virtuell nachgebildet. Die damals erzielten Ergebnisse konnten mittels DEM-Simulation reproduziert werden [8]. Die besonderen Vorteile solcher virtuellen Experimente liegen in der Möglichkeit, weite Parameterbereiche vergleichsweise einfach zu prüfen. Dabei kann immer wieder auf die exakt reproduzierte Ausgangssituation zurückgegriffen werden. Vielversprechende Parameter können so ausgewählt und in späteren Feldversuchen auch praktisch überprüft werden.

Ein weiterer Vorteil der DEM ist die Möglichkeit, virtuell ins Innere des Schotters zu blicken. Abb. 6 zeigt die Kraftverteilung bei Verkehrsbelastung an der Schwellenunterseite bzw. die Kraftpfade im Inneren der Schottermatrix in Abhängigkeit von der verwendeten Beistellzeit. Hier ist eindeutig erkennbar, dass bei sehr kurzer Beistellzeit (0,6 Sekunden) die Schwelle eher punktuell belastet wird (Abb. 6a, rot eingefärbte Bereiche). Bei einer Beistellzeit von 1,2 Sekunden zeigt sich eine homogenere Lastverteilung mit auch deutlich geringeren Spannungsspitzen. Eine weitere Verlängerung der Beistellzeit hat nur noch geringen Einfluss. Ein ähnliches Verhalten kann auch bei der Kraftverteilung im Inneren der Schottermatrix festgestellt werden. Bei kürzeren Beistell-



**Abb. 6:** a) Belastungsverteilung an der Unterseite der Schwelle (rot: Maximallast). Hier ist deutlich erkennbar, dass eine zu geringe Beistellzeit (0,6 Sekunden) zu einer deutlich verminderten Auflagefläche der Schwelle führt. Mit der Verkehrseinwirkung erhöhen sich die Kornbelastungen und führen in weiterer Folge zu verstärktem Kornbruch. b) Lastabtragungspfade in der Schottermatrix. Rote Linien zeigen Bereiche mit starker Belastung infolge von Verkehr: Kornbruchgefahr.

Quelle: Plasser & Theurer

zeiten ist eine deutliche Häufung hoher Kontaktkräfte in der Schottermatrix (Abb. 6b, rote Linien) sichtbar. Eine erhöhte Beistellzeit von 1,2 Sekunden zeigt eine signifikant geringere Belastung der einzelnen Schottersteine. Daraus lässt sich ableiten, dass eine zu kurze Beistellzeit zu höherer Schotterbelastung im Regelbetrieb führt. Das Resultat ist eine beschleunigte Alterung des Schotters aufgrund höherer Kornbruchwahrscheinlichkeit durch die Verkehrseinwirkung sowie eine reduzierte Lebensdauer der Gleislage, da die Kraftspitzen auch zu einer höheren Setzung führen können [9]. Die Informationen, die aus solchen Computereperimenten gewonnen werden können, sind oftmals bei herkömmlichen Feldversuchen nicht zu erhalten oder nur unter sehr hohem Aufwand messbar.

### Conclusio

Der Klimawandel sorgt dafür, dass das System Bahn – wie kein anderes Verkehrsmittel ein Vorbild für umweltfreundlichen Transport von Personen und Gütern – seit Jahren vermehrt im Fokus von Politik und Gesellschaft steht. Künftige zusätzliche Investitionen werden zwangsläufig auch zum Anstieg von Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen führen. Dabei spielen diese Instandhaltungsmaßnahmen

in der öffentlichen Wahrnehmung eine eher untergeordnete Rolle. Wie bereits beschrieben, gab es im Bereich der Gleisinstandhaltung mehrere Entwicklungsphasen. Dies ging von einem größtenteils manuellen Zeitalter und dann in mehreren Abschnitten unter der Prämisse der Wirtschaftlichkeit und Effizienz bis zur zunehmenden Mechanisierung und Automatisierung. Das nächste Zeitalter ist bereits angebrochen, und einer der neuen Schwerpunkte ist eine drastische Reduktion der schädlichen Emissionen. P&T setzt dabei auf ein immer umfangreicheres Angebot an elektrisch betriebenen Maschinen. Diese bringen neben dem emissionsfreien Einsatz auch noch den Vorteil einer deutlich geringeren Lärmbelastung, was besonders im urbanen Bereich vorteilhaft ist. Gleichzeitig ist auch eine Reduktion der anfallenden Arbeiten (und Kosten) und eine damit einhergehende Verlängerung der Instandhaltungsintervalle ein wichtiges Ziel. Besonders die stark belastete Infrastruktur sowie die kürzeren Sperrpausen fordern eine weitere Optimierung der Instandhaltungsmaßnahmen. Um den Stoppprozess stetig weiterzuentwickeln, setzt P&T daher seit Jahren auf intensive Kooperation mit Universitäten und Infrastrukturbetreibern. Die aus diesen Projekten gewonnenen wissenschaftli-

chen Erkenntnisse werden in Fachzeitschriften publiziert und fließen in die Produktentwicklung mit ein. Ziel ist die Entwicklung immer effizienterer Maschinen, um sowohl den ökologischen Fußabdruck der Gleisinstandhaltung gering zu halten als auch die Kosten für den Betreiber zu senken. ■

### QUELLEN

- [1] Feurig, S.; Stahl, W.; Freudenstein, S.; Antony, B.; Auer, F.: Der dynamische Gleisstabilisator (DGS) auf dem Prüfstand, Eisenbahntechnische Rundschau, 5/2020
- [2] Hauke, R.; Steinwenker, H.; Rebek, J.: E<sup>3</sup> – elektrisierende Technologie für Gleisbaumaschinen, DER EISENBAHNINGENIEUR, 12/2017
- [3] Fischer, J.: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter, Dissertation, 1983
- [4] Fellinger, M.: Validierung der Instandsetzungsmengen der Standardelemente Gleis der ÖBB (Master Thesis), Graz, 2016
- [5] Auer, F.; Schilder, R.; Zuzic, M.; Breymann, H.: 13 years of experience with rail-mounted formation rehabilitation on the Austrian network, rtr 1/2008
- [6] Barbir, O.: Development of Condition-Based Tamping Process in Railway Engineering (Dissertation), Wien, 2022
- [7] Barbir, O.; Adam, D.; Kopf, F.; Pistor, J.; Auer, F.; Antony, B.: Development of condition-based tamping process in railway engineering, Repair and Maintenance Strategies of Geotechnical Structures, 2/2018
- [8] Omerović, S.; Koczwara, C.; Daxberger, H.; Antony, B.; Auer, F.: Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau, DER EISENBAHNINGENIEUR, 7/2021
- [9] Barbir, O.; Omerović, S.; Koczwara, C.; Antony, B.: Von der Idee zum Produkt: Digitale Produktentwicklung im Bahnbau, Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2023



#### Ing. Marc Demml

Produktmanager Stopfmaschinen, Schotterpflüge und Stabilisatoren  
Plasser & Theurer, AT-Linz/Wien  
marc.demml@plassertheurer.com



#### Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwara

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



#### Dipl.-Ing. Dr. techn. Samir Omerović

Simulationsingenieur  
Abt. Research und Simulation  
Plasser & Theurer, AT-Linz  
samir.omerovic@plassertheurer.com