Moderne Stopfmaschinen können mehr

Moderne Stopfmaschinen entwickeln sich zu intelligenten, datengestützten Systemen, die Präzision, Prozesssicherheit und Effizienz in der Gleisinstandhaltung steigern.

MARIO PISSLINGER | ALEXANDER BRENNSTEINER | MARC DEMML

Der Kontakt zwischen Rad und Schiene ist essenziell für einen sicheren und komfortablen Bahnbetrieb. Dieser Kontakt unterliegt ständigen horizontalen und vertikalen Verkehrsbelastungen, die zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der Gleislage und somit zu Gleislagefehlern führen können. Um diese Fehler zu beheben, sind regelmäßige Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. Dabei werden Gleislagefehler, wie unregelmäßige Setzungen der Längshöhe oder Abweichungen in der Richtung und Querhöhe, durch Stopfarbeiten korrigiert. Bei diesem Prozess wird der Gleisrost gehoben, gerichtet und der Schotter unter den Schwellen mittels Vibration und Beistellung verdichtet, um ein stabiles Auflager zu schaffen und den Gleisrost in der gewünschten Lage zu fixieren.

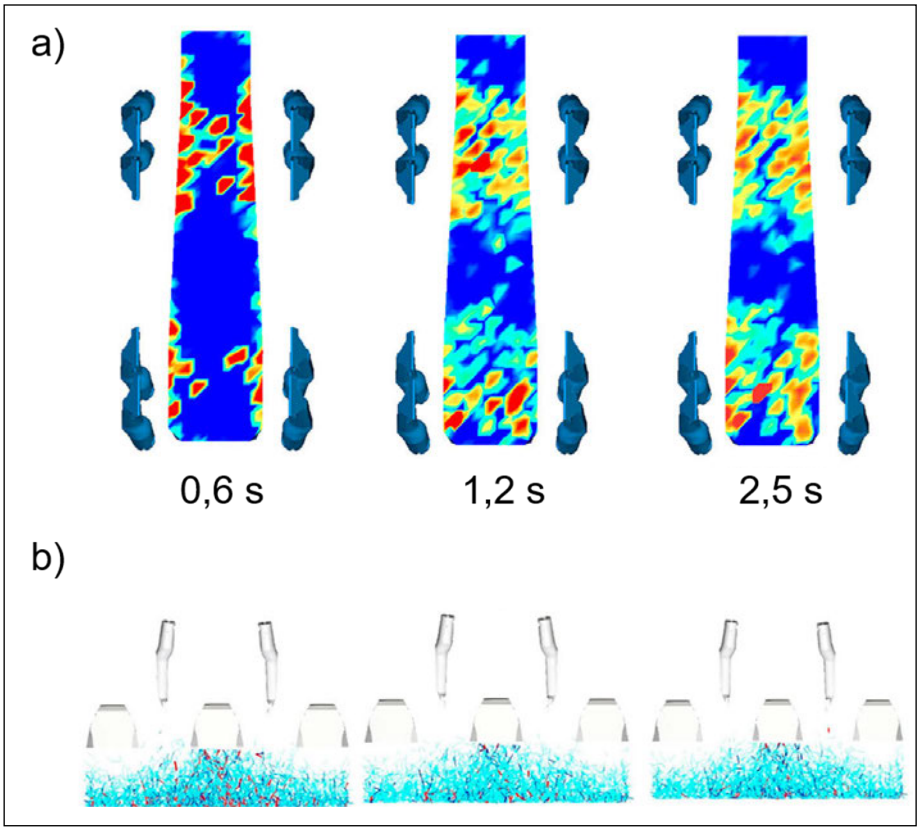

Abb. 1: a) Belastungsverteilung unter der Schwelle (Rot=Maximallast): Zu kurze Beistellzeit (0,6 s) verringert die Auflagefläche deutlich. Verkehrseinwirkungen steigern die Kornbelastung und begünstigen Kornbruch. b) Lastabtragung in der Schottermatrix: Rote Linien zeigen stark belastete Zonen durch Verkehr – dort besteht erhöhte Kornbruchgefahr. *Quelle: [7]*

Kontakt Stopfpickel mit Schotter

Um in weiterer Folge die Bedeutung der korrekten Positionierung der Stopfaggregate nachvollziehen zu können, richtet sich der Fokus zunächst auf die grundlegende Funktionsweise des Stopfpickels im Kontakt mit dem Gleisschotter. Das entscheidende Element für die direkte Kraft- und Impulsübertragung auf den Gleisschotter ist der Stopfpickel. Beim Stopfprozess wird der Schotter unter der Einwirkung von Vibrationen und durch die Beistellbewegung der Stopfpickel unter den Schwellen verfüllt und verdichtet. Plasser & Theurer setzt dabei auf das bewährte Asynchron-Gleichdruck-Stopfprinzip [3]. Die ideale Stopffrequenz liegt typischerweise bei 35 Hz mit einer Pickelamplitude von 4 bis 5 mm [3, 9]. Eine längere Beistellzeit hat sich zudem als positiv für die Langzeitstabilität der Gleislage erwiesen, da sie eine homogenere Verdichtung ermöglicht [6]. Abb. 1 veranschaulicht, wie sich unterschiedliche Beistellzeiten auf die Belastungsverteilung unter der Schwelle sowie auf die Lastabtragung in der Schottermatrix auswirken.

Ein wesentlicher Mechanismus ist der periodische Kontaktverlust und -gewinn zwischen dem Stopfpickel und der Schottermatrix bei jedem Vibrationszyklus, was den einzelnen Schotterkörnern den nötigen Freiraum für Umlagerung und effektive Verdichtung schafft [6]. Abb. 2 veranschaulicht diesen Vorgang, indem sie die wiederkehrende Beistellbewegung des Stopfpickels im Schotterbett während eines typischen Vibrationszyklus darstellt.

Ein zentrales Ziel beim Stopfen ist die vollständige Verfüllung des Hohlraums, der beim Anheben des Gleises unter der Schwelle entsteht [2]. Die Plasser TampingControl überwacht diesen kritischen Prozess präzise [5, 8]. Zu Beginn der Verfüllphase, wenn der Hohlraum unter der Schwelle noch nicht gefüllt ist, bewegen sich die Schotterkörner weitgehend ungehindert, und der Widerstand ist gering. Dies führt zu einer vergleichsweise hohen Beistellgeschwindigkeit der Stopfpickel. Sobald der Hohlraum vollständig gefüllt ist und die Verdichtung beginnt, steigt der Widerstand im Schotter signifikant an, was die Beistellgeschwindigkeit deutlich reduziert [2]. Dieses Phänomen wurde in umfangreichen Feldtests bestätigt und ist ein Indikator für erfolgreiche Verfüllung [6, 7]. Bleibt die Beistellgeschwindigkeit bis zum Ende des Vorgangs hoch, verweist dies auf unzureichende Verfüllung [5].

Die Plasser TampingControl entlastet das Bedienpersonal erheblich, indem sie die Beistellgeschwindigkeit jedes Pickelarms separat überwacht und auswertet [7]. Bei unzureichender Verfüllung erfolgt eine Warnung, danach kann eine zusätzliche Stopfung veranlasst werden, um die Verfüllung sicherzustellen und die Bildung von Hohllagen zu verhindern [6]. Das asynchrone Gleichdruck-Stopfprinzip passt die Beistellbewegung automatisch an die Gegebenheiten an, wodurch ein schotterschonender und kraftbegrenzter Beistellvorgang erreicht wird [7].

Neben der Verfüllkontrolle ermöglicht die Plasser TampingControl auch die Ermittlung des Schotterzustands während des Eindringprozesses. Durch die Analyse von Messgrößen wie auftretenden Kräften und Senkgeschwindigkeit der Aggregatsegmente kann der Schotter in vier Zustandsklassen (von Neuschotter bis

© DVV Media Group GmbH

zum stark degradierten Schotter) eingeteilt werden [5].
Diese Daten sind für spätere Analysen von großer Bedeutung und bilden auch die Grundlage für die automatische Anpassung des benötigten Beistelldrucks an die jeweiligen Gegebenheiten [6]. Dies minimiert die Notwendigkeit manueller Eingriffe durch das Bedienpersonal und sorgt für optimale Stopfqualität [5].

Stopfpickel und Stopfaggregat: Positionierung und Beweglichkeit

Erweitert man den Blick vom Stopfpickel auf dessen Befestigung bzw. die Krafteinleitung, rückt das gesamte Stopfaggregat als Kern der Stopfmaschine in das Blickfeld. Während des Stopfvorgangs wird es abgesenkt, wobei die Stopfpickel, wie in Abb. 3 dargestellt, bis unter die Schwellenunterkante in den Schotter eindringen, um die Bettung durch horizontal gerichtete Schwingungen und Beistellkraft zu verdichten. Moderne Stopfmaschinen kombinieren mehrere Arbeitsaggregate, sodass eine präzise und schnelle Bearbeitung des Gleises möglich ist [3].
Vor dem eigentlichen Stopfvorgang kommt das Hebe- und Richtaggregat als zugehörige Einrichtung zum Stopfaggregat zum Einsatz. Es greift die Schiene mittels Rollzangen oder Hebehaken und hebt den gesamten Gleisrost hydraulisch an und verrückt ihn ggf. seitlich, um die Soll-Gleislage wiederherzustellen. Durch die Hebung entsteht unter den Schwellen ein Hohlraum, in den der Schotter anschließend gestopft wird. Das Arbeitsmesssystem überwacht dabei die tatsächliche Hebung und den seitlichen Versatz [3]. Moderne Maschinen können auch sogenannte „Design-Overlifts" durchführen, bei denen das Gleis an bekannten, wiederkehrenden Fehlerstellen gezielt überhoben wird, um eine Gleislagereserve für erwartete größere Setzungen zu schaffen und die Längshöhenstabilität langfristig zu verbessern [6].
Die präzise Positionierung der Arbeitsaggregate ist entscheidend für die Stopfqualität und die Vermeidung von Schäden an der Infrastruktur. Der Plasser TampingAssistant ist ein KI-basiertes Assistenzsystem, das die Positionierung der Arbeitsaggregate automatisiert und somit das Bedienpersonal entlastet. Genutzt werden dabei fortschrittliche Sensortechnologien wie Rotationslaserscanner und Linienschnittsensoren, um den Arbeitsbereich aus der Draufsicht (Vogelperspektive) zu erfassen. Die gesammelten Daten werden verwendet, um ein Tiefenbild zu erstellen, das mithilfe Künstlicher Intelligenz (KI) analysiert wird. Die KI ist in der Lage, Oberbaukomponenten wie Schienen, Schwellen und Weichenteile sowie Hindernisse wie Kabel und Weichenantriebe zu erkennen und zu klassifizieren. Aktuell unterstützt der Plasser TampingAssistant mehr als 60 verschiedene Objektklassen. Auf Basis dieser Analyse generiert das System Handlungsempfehlungen für das Hebe- und Richtaggregat sowie die Positionen der Stopfpickel.

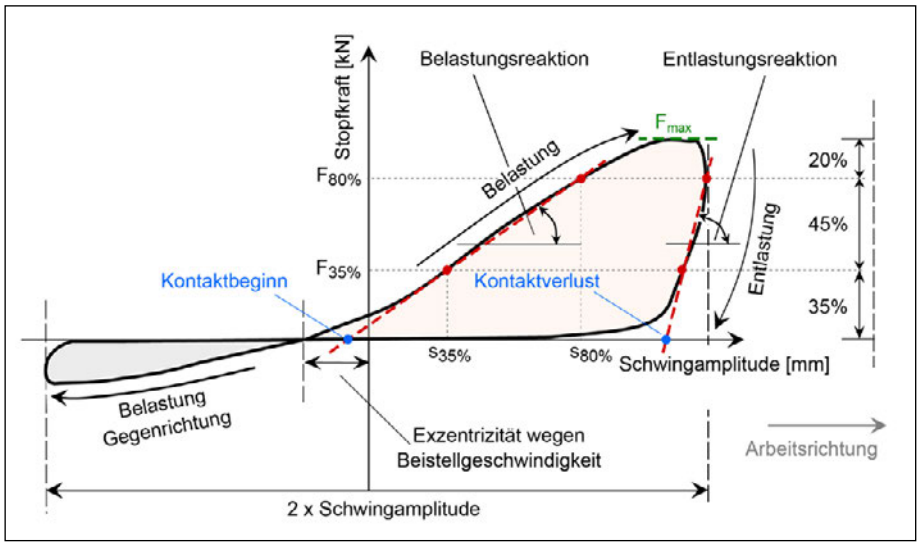

Abb. 2: Darstellung eines Vibrationszyklus *Quelle: [10]*

Der Plasser TampingAssistant kann auch die Steuerung weiterer Arbeitswerkzeuge automatisieren wie den Dynamischen Gleisstabilisator (DGS), Vorkopfverdichter, Kehrbürsten oder Frontpflüge. Für das Anlernen der KI-Modelle wird der Prozess Machine Learning Operations (MLOps) angewendet, der konsistente und nachvollziehbare Ergebnisse durch überwachtes Training und selektive Zuführung qualitativ hochwertiger Daten sicherstellt. Ein hinterlegter Stopfplan ermöglicht es dem System, Weichen optimal nach kundenspezifischen Vorgaben zu stopfen. Das System berücksichtigt zudem physikalische Limitierungen der Maschinen- und Aggregattypen sowie Einschränkungen durch die Gleisinfrastruktur. Zusätzlich können z. B. vorhandene Hindernis-Datenbanken als Datenquelle genutzt werden. Es reduziert das Risiko von Beschädigungen und trägt zur konstanten Qualität der Arbeiten bei [5]. Dadurch werden zeitaufwendige Reparaturarbeiten und unvorhergesehene Gleissperren vermieden.

Stopfen senkt den Querverschiebewiderstand – Stabilisieren notwendig

Der Stopfvorgang, obwohl essenziell für die Wiederherstellung der Gleislage, wirkt sich auch nachteilig aus: Er reduziert den Querverschiebewiderstand (QVW) des Gleises signifikant [3]. Dies liegt daran, dass das Stopfen den Schotter auflockert und die horizontalen Spannungen unter der Schwelle reduziert [4]. Ein zu geringer QVW kann die Verwerfungssicherheit des Gleises beeinträchtigen, insbesondere in Bögen, bei schweren Zügen und bei hohen Geschwindigkeiten, wenn große Horizontalkräfte auf das Gleis wirken [4]. Um diese Risiken zu minimieren und Langsamfahrstellen zu vermeiden, die ansonsten nach einem Stopfvorgang aus Sicherheitsgründen unvermeidbar wären, ist anschließend die Verdichtung des Schotters unerlässlich [1].
Damit kommt der DGS ins Spiel. Das System wird seit den 1970er Jahren von Plasser & Theurer ent-

© DVV Media Group GmbH

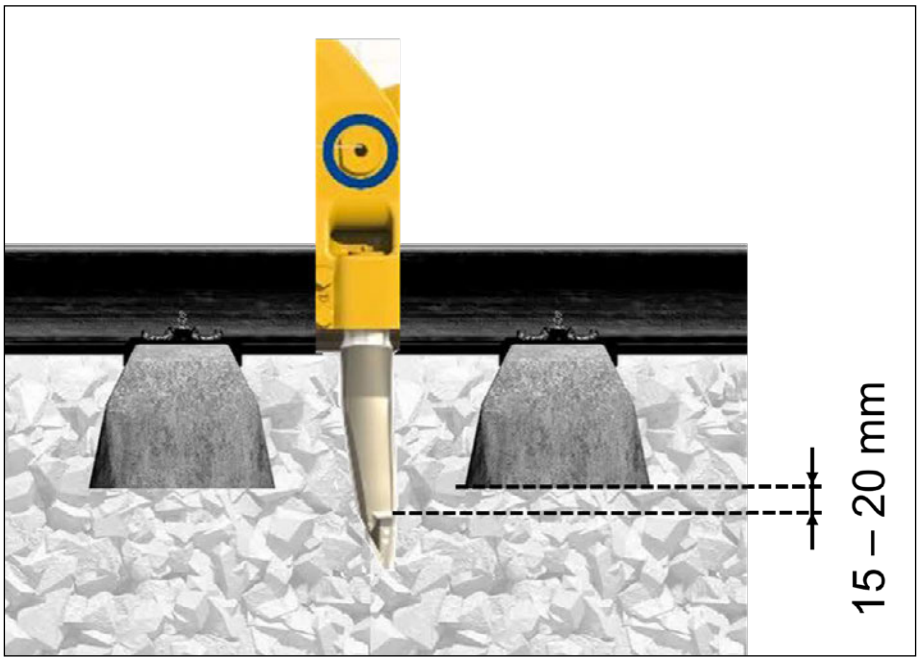

Abb. 3: Stopftiefe *Quelle: [6]*

wickelt und in Gleisbaumaschinen zum Einsatz gebracht [4]. Der DGS bringt nach dem Stopfen der Schwellen horizontale Schwingungen unter einer vertikalen Belastung in das Gleisbett ein [3]. Zwei gegensinnig rotierende Unwuchten erzeugen dynamische Kräfte, die sich in Vertikalrichtung aufheben, aber in Horizontalrichtung addieren. Gleichzeitig wird eine vertikale statische Auflast über Hydraulikzylinder aufgebracht [4]. Dieser Prozess führt zu einer gezielten Umlagerung der Schotterkörner und damit kontrollierten Vorwegnahme der Anfangssetzungen [3].
Die Vorteile des DGS-Einsatzes sind vielfältig:

Erhöhung des QVW

Der DGS erhöht den QVW um 30 bis 40 %. Wenn das Stopfen den QVW auf 50 bis 60 % senkt, kann der DGS-Einsatz den QVW wieder auf 80 bis 100 % des Ausgangswertes bringen und somit die Verwerfungssicherheit des Gleises wiederherstellen [9].

Vermeidung von Langsamfahrstellen

Durch die Erhöhung des QVW und die Vorwegnahme von Setzungen können Gleise direkt nach der Instandhaltung mit voller Streckengeschwindigkeit befahren werden. Die Verdichtung durch den DGS entspricht mindestens 100 000 t Betriebsbelastung durch Züge [9].

Homogenisierung des Schotterbetts

Der DGS erzeugt ein homogen verdichtetes Schotterbett, was zu einer besseren Lastverteilung führt und die allgemeine Gleislage verbessert [3]. Die Umlagerung der Schotterkörner erfolgt kraftfrei, wodurch die Scharfkantigkeit des Schotters erhalten bleibt und die Lebensdauer der Bettung verlängert wird [9].

Integration

Der DGS kann als eigenständige Maschine eingesetzt werden oder ist in modernen Stopfmaschinen integriert [3]. Diese Integration spart Personal, optimiert die Nutzung von Sperrpausen und reduziert Umweltauswirkungen durch den Wegfall eines zweiten Antriebs [9].

Systeme zur Vor- und Nachmessung, Qualitätssicherung und Zustandsbewertung

Um die Qualität der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen sicherzustellen, ist eine umfassende Dokumentation und Nachmessung unerlässlich [5]. Direkt im Anschluss an die Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten sowie Stabilisierungsmaßnahmen wird die wiederhergestellte Gleisgeometrie kontrolliert und dokumentiert [3].
Für die Vormessung, die Nachmessung und die umfassende Zustandsbewertung der Infrastruktur werden verschiedene moderne Systeme eingesetzt:

Plasser InfraScan

Dieses System ermittelt Über- oder Fehlmengen an Schotter basierend auf Punktwolkendaten eines LiDAR-Scanners, der auf einer Stopfmaschine oder einem Schotterpflug montiert ist. Mithilfe des Systems werden Umgebungsdaten wie Schotterprofil und Lichtraumprofil sowie die Positionen von Oberleitung, Nachbargleis und Bahnsteigkante erfasst und ausgewertet [5].

Plasser InertialTrackGeometry

Für die Vormessung, die zur Erfassung der Ist-Geometrie des Gleises dient, ermöglicht das Messsystem eine Messung vom Stillstand bis zur Höchstgeschwindigkeit der Arbeitsmaschine, unabhängig von der Messrichtung oder Maschinenorientierung [5].

Plasser ReferencedTrackGeometry

Dieses System wird für das Präzisionsverfahren verwendet und kombiniert die Vormessdaten mit einer Soll-Geometrie sowie Soll-Offsets, um die erforderlichen Hebe- und Verschiebewerte zu berechnen. Es generiert eine Referenz zur Ursprungslage mithilfe äußerer Bezugspunkte, was Vermessungen ohne Gleissperren im Regelbetrieb ermöglicht [5].

Dokumentation und Austausch der Infrastruktur- und Maschinendaten

Die gesammelten Daten aus allen Arbeitsphasen und Messsystemen werden in einem umfassenden digitalen Protokoll, dem Plasser TampingReport, zusammengeführt. Er ist eine moderne Entwicklung in der digitalen Dokumentation und Analyse von Gleisstopfarbeiten und sammelt Daten aus verschiedenen Systemen der Stopfmaschine, die er in einem transparenten Bericht zusammenfasst. Dieser bietet einen detaillierten Einblick in den Zustand der Strecke bis hin zu jeder einzelnen Schwelle, wodurch eine bisher unerreichte Transparenz in der Qualitätssicherung ermöglicht wird [5].
Der Plasser TampingReport bietet eine kombinierte Ansicht aller auf der Maschine verfügbaren Daten. So können beispielsweise Positionierungsdaten aus der KI-basierten Evaluierung des Plasser TampingAssistant mit bekannten Gleisgeometrieparametern aus dem Data Recording Processor (DRP) integriert werden. Das Protokoll der Plasser TampingControl ermöglicht eine schwellenbezogene Visualisierung der Verfüll- und Verdichtungsdaten. Diese umfassende Integration geht über den geforderten Informationsgehalt gängiger Normen wie EN 13848-1 hinaus. Die aufgezeichneten Daten ermöglichen es Infrastrukturbetreibern, Veränderungen zwischen einzelnen Stopfzyklen und -durchgängen zu analysieren und dienen als Grundlage für Vergleiche zwischen Stopfeinsätzen sowie zur Verfolgung von Veränderungen im Gleisbett über die Zeit [5].
Für den effizienten Datentransfer zwischen Maschine und Backoffice kommt die Plasser Datamatic zum Einsatz. Dieses System gewährleistet die sichere Übertragung von Maschinen- und Infrastrukturdaten. Nach Abschluss der Synchronisierung stehen die Daten der einzelnen Systeme in dem Plasser TampingReport zur Verfügung [5].
Die erfassten Informationen sind sowohl ein Nachweis über korrekt durchgeführte Arbeiten als auch eine wertvolle Grundlage für die Anpassung und Optimierung der Planung zukünftiger Instandhaltungsmaßnahmen und zur Unterstützung strategischer Entscheidungen, beispielsweise bei Ausschreibungen [5]. Durch die Bereitstellung detaillierter Berichte und ein hohes Maß an

© DVV Media Group GmbH

Transparenz trägt der Plasser TampingReport zur Steigerung der Prozesssicherheit, zur Reduzierung des Verschleißes an Infrastruktur und Maschine und somit zur nachhaltigen Senkung der Betriebskosten bei [8]. Die beschriebenen Systeme wie Plasser TampingAssistant, Plasser TampingControl und Plasser TampingReport sind bereits auf Stopfmaschinen in verschiedenen Ausbaustufen und in mehreren Ländern von Deutschland bis Japan im Einsatz. Die kontinuierliche Weiterentwicklung und Optimierung der KI-Modelle durch MLOps mit Daten aus der ganzen Welt ermöglichen es, lokal die besten Stopfentscheidungen zu treffen [5].

Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich, dass moderne Stopfmaschinen weit über ihre ursprüngliche Funktion hinausgehen. Sie sind zu intelligenten, datengestützten Systemen geworden, die das Maschinenpersonal unterstützen, die Prozesssicherheit und Leistungsfähigkeit erhöhen und umfassende digitale Nachweise über durchgeführte Arbeiten und den Zustand der Infrastruktur liefern, um so den ständig steigenden Anforderungen des Bahnbetriebs gerecht zu werden [8]. ■

QUELLEN

[1] Koczwara, C.; Pfeil, D.; Schöllhammer, D.; Daxberger, H.: Die automatisierte Überprüfung der Gleisbefestigung, Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2024, S. 17 – 33

[2] Koczwara, C.; Daxberger, H.; Omerović, S.: Immer reichlich Schotter unter der Schwelle – vollständige Verfüllung als Basis für das perfekte Auflager, ZEVrail 147, Ausgabe 01-02/2023

[3] Bayerhofer, R.: Gleisstopfverfahren im Eisenbahnwesen Stand der Technik. Diplomarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, Wien, Österreich, 2018

[4] Dafert, M.: Erkenntnisse aus Messungen am dynamischen Gleisstabilisator, Diplomarbeit, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, Wien, 2019

[5] Urstöger, M.; Stuntner, B.; Daxberger, H.: SmartTamping: Digitale Transformation in der Gleisinstandhaltung, Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2025, S. 15 – 36

[6] Koczwara, C.; Omerović, S.: Die Phasen des Stopfprozesses und ihr Einfluss auf die Gleislage, DER EISENBAHNINGENIEUR 9/2024, S. 55 – 59

[7] Demml, M.; Koczwara, C.; Omerović, S.: Von der Spitzhacke zur emissionsfreien Gleisstopfmaschine, DER EISENBAHNINGENIEUR 5/2023, S. 25 – 29

[8] Pisslinger, M.; Brennsteiner, A.: Plasser SmartTamping – digitale Lösungen zur Bewältigung des Fachkräftemangels, Eisenbahntechnische Rundschau, 12/2023, S. 42 – 45

[9] Massafra, Y.: Reduzierung von Langsamfahrstellen durch den optimierten Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators (DGS) bei der DB Netz AG im Regionalbereich Nord, Bachelorarbeit, Fakultät Bauen und Erhalten, HAWK Hildesheim, Hildesheim, 2018

[10] Barbir, O.; Koczwara, C.; Omerovic, S.; Antony, B.; Auer, F.: Schotterzustandssensor – Grundlagenforschung bis zur Implementierung, Eisenbahn Ingenieur Kompendium, 2022, S. 82 – 93

Dipl.-Ing. Mario Pisslinger
Portfoliomanager
Digitale Produkte und Messsysteme
Plasser & Theurer, AT-Linz
mario.pisslinger@plassertheurer.com

Dipl.-Ing. Alexander Brennsteiner, MBA
Produktmanager
Digitale Produkte und Messsysteme
Plasser & Theurer, AT-Linz
alexander.brennsteiner
@plassertheurer.com

Marc Demml
Senior Expert
Strategic Product Development
Plasser & Theurer, AT-Wien
marc.demml@plassertheurer.com

© DVV Media Group GmbH