

Schotterzustandssensor – Grundlagenforschung bis zur Implementierung

Olja Barbir, Christian Koczwara, Samir Omerovic, Bernhard Antony und Florian Auer

Um die richtige Instandhaltungsmaßnahme zum richtigen Zeitpunkt setzen zu können, sollten alle Fakten und möglichen Entwicklungspfade des Zustands bekannt bzw. vorherzusagen sein. Für die Schotterbewirtschaftung im Gleisbau ist das derzeit nicht der Fall. Die eingesetzten Methoden zur Bestimmung des Schotterzustands sind darauf beschränkt, Informationen nur stichprobenartig – also punktuell – zu erheben oder erfordern eine eigene Messfahrt. Bei allen bekannten Methoden sind eine eigene Gleissperre sowie eine umfangreiche Nachbearbeitung notwendig. Wesentlich bessere Ergebnisse wären zu erzielen, ließe sich der Zustand des Schotterbettes in situ bestimmen, das heißt direkt während des Stopfens des Gleises durch die Stopfmaschine selbst. Dadurch wäre auch die weitere Automatisierung des Stopfprozesses möglich. Ziel ist es, die Stopfparameter an den jeweiligen Zustand des Schotterbettes anzupassen und somit die Instandhaltung zu optimieren. Die notwendigen Schritte zur Entwicklung eines auf der Stopfmaschine implementierten Schotterzustandssensors werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

1 Schotterverdichtung aus bodenmechanischer Sicht

Nichtbindige grobkörnige Böden verdichten sich aufgrund ihrer Eigenschaften primär infolge der Überwindung der Korn-zu-Korn-Reibung. In der Praxis verläuft diese in der Regel durch kurzzeitige dynamische Einwirkungen wie bei Walzen- bzw. Rüttelverdichtung, dem Gleisstopfen oder der dynamischen Gleisstabilisation. Das Ergebnis einer erfolgreichen Verdichtung zeigt sich in der Erhöhung der Lagerungsdichte und Homogenisierung der Eigenschaften im betrachteten Gebiet. Die Ermittlung der Lagerungsdichte von nichtbindigen Böden lässt sich präzise nur anhand von Versuchen im Labor bestimmen. Für den Gleisschotter kann in stark

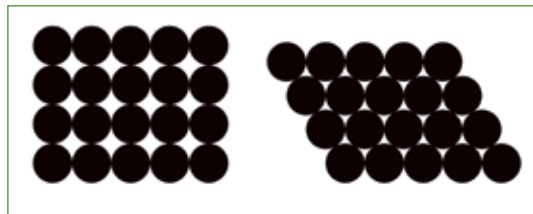


Abb. 1: Kugelmodell zur Bestimmung der Lagerungsdichte (lockerste und dichteste Lagerung, idealisiert) [1]

vereinfachter Weise das Kugelmodell [1] verwendet werden, um die Lagerungsdichte darzustellen. Einzelne Schotterkörner werden dabei durch Kugeln mit gleich großem Durchmesser idealisiert (Abb. 1). Abhängig von der Ausgangslagerungsdichte kommt es durch die eingebrachte Verdichtungsenergie (z.B. Gleisstopfen) zur Umlagerung der einzelnen Körner, wodurch ein Zustand höherer Lagerungsdichte erreicht wird. Zu beachten ist, dass das Kugelmodell lediglich zur Darstellung des Übergangs zwischen der lockersten und dichtesten Lagerung dient. Bei der Schotterverdichtung geht es nicht darum, die dichteste Lagerung zu erreichen, sondern die vom Schotterzustand abhängige optimale Verdichtung bzw. Lagerungsdichte. Ziel des Prozesses ist es, die Setzungen größtmöglich und verschleißfrei vorwegzunehmen.

2 Bodenmechanische Eigenschaften von Gleisschotter

Der Gleisoberbau besteht aus Schienen, Befestigungsmitteln und Schwellen, die alle in einer verdichteten Schotterschicht eingebettet sind. Diese Oberbauform wird weltweit am häufigsten verwendet. Verkehrsbelastung und damit verbundene Lastwechsel führen zu einer Verschlechterung der Gleisgeometrie. Die Setzungen werden durch Absplitterungen der Schotterkörner infolge von Zugbetrieb, Kornabrieb sowie aus dem Untergrund aufsteigendes Material und äußere Umwelteinflüsse verursacht. In regelmäßigen Abständen bzw. bei zu großen Abweichungen von der Soll-Geometrie muss diese wieder in die ursprüngliche Lage zurückgebracht werden – in der Regel mit Stopfmaschinen. Alle oben genannten Veränderungen des Schotters beeinflussen dessen bodenmechanische Eigenschaften und können mit dem Fachbegriff Schotterverschmutzung bzw. Schotterabnutzung beschrieben werden. Veränderungen der bodenmechanischen Eigenschaften beeinflussen nicht nur das Ausmaß unregelmäßiger Setzungen und damit in Folge die Änderungen der Gleisgeometrie, sondern auch die Verdichtbarkeit bzw. die Verdichtungsfähigkeit des Gleisschotters.

Durch den Verschleiß entwickelt sich der Gleisschotter mit der Zeit von einem gleichmäßig gestuften, kantig gebrochenen, staub- und anhaftungsfreien Hartgestein zu einer Schottermatrix mit weit gestuften, abgerundeten Steinen mit hohem Feinanteil.

Da die Tragfähigkeit des Schotterbettes sowie die Möglichkeit, erhebliche Druckspannungen aufzunehmen, hauptsächlich das Ergebnis der Reibung zwischen

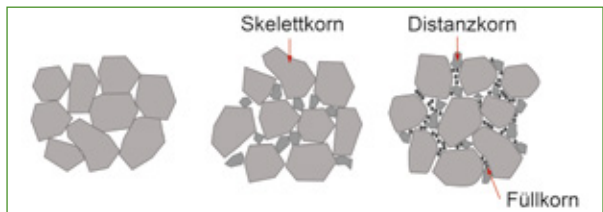


Abb. 2: Das 3-Phasen-System der Schotterverschmutzung [2]

den Körnern ist, kann der Reibungswinkel als zuverlässiger Indikator für den Zustand des Schotterbettes verwendet werden. Im Allgemeinen kann der Prozess der Schotterverschmutzung durch das 3-Phasen-System erläutert werden (Abb. 2). Da sich die Partikelform ändert und die Kantigkeit aufgrund von Absplitterungen infolge Druckspitzen abnimmt, werden die Hohlräume der Schottermatrix mit kleineren Partikeln gefüllt. Dies führt zur Reduktion des Reibungswinkels und zur Erhöhung der Porenzahl (Abb. 3).

Nichtbindige, kohäsionslose Böden wie Gleisschotter, mit anfänglich kleiner Porenzahl bzw. hoher Lagerungsdichte, weisen hohe Scherfestigkeit

und Stabilität auf. Die geforderte Form der Schotterkörner stellt eine gute Verzahnung zwischen den Körnern sicher. Die daraus resultierende hohe Scherfestigkeit des Schotters und das entsprechende Lastaufnahmeverhalten beeinflussen die Leistungseigenschaften des Schotterbettes maßgeblich. Die Scherfestigkeit von Schotter wird üblicherweise im Labor mit großen Schergeräten untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sie bei verschmutztem Schotter im Vergleich zu neuem Schotter deutlich geringer ist [4]. Zu beachten ist, dass feine Partikel in großen Mengen im nassen Schotter den Reibungswinkel des Schotters verringern (Tab. 1) und die Scherfestigkeit senken. Abhängig von den bodenmechanischen Eigenschaften wird der Gleisschotter anders auf Verdichtung reagieren.

2.1 Beurteilung des Schotterzustands

Zur Festlegung der optimalen Schotterverdichtung ist es erforderlich, den Schotterzustand im Feld bestimmen zu können. Die Verunreinigung bzw. Verschmutzung des Schotters kann in der Praxis anhand mehrerer Kennwerte beurteilt werden [5]:

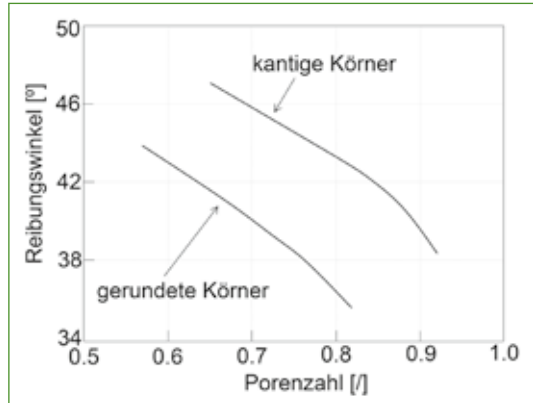


Abb. 3: Einfluss der Kornform auf den Reibungswinkel und Porenzahl des Schotters [3]

Schotterzustand	Reibungswinkel [°]
verarbeitet, gebrochen	65,2
neu	63,4
abgenutzt	57,7

Tab. 1: Reibungswinkel bei verschiedenen Schotterzuständen [4]

- Kornzertrümmerungsindex
- Verschmutzungsindex
- Prozentsatz der Verschmutzung
- Prozentsatz des verfüllten Porenraums
- Grad der Hohlraum-Kontaminierung
- relatives Verschmutzungsverhältnis.

Alle angeführten Kennwerte zur Beurteilung des Schotterzustands erfordern eine Probenentnahme im Feld, wobei die charakteristischen Eigenschaften für den Schotter und den in der Probe enthaltenen Feinkornanteil bei einer späteren Analyse im Labor bestimmt werden. Für die Probenentnahme im Gleis ist in der Regel eine Gleissperre erforderlich. Das wiederum verringert die Gleisverfügbarkeit. Vorhandene In-situ-Methoden zur Bewertung des Schotterzustands sind der dynamische Lastplattenversuch, die Drucksondierung und das Falling-Weight-Deflectometer (FWD). Auch wenn die Ergebnisse dieser Methoden brauchbare und detaillierte Informationen über die Schottermatrix liefern, so geben sie doch nur einen punktuellen Überblick über den Zustand des Schotterbettes.

Eine weitere Methode zur Schotteranalyse ist das Georadar. Es wird zunehmend zur Überwachung des Gleiszustands eingesetzt, da es sich um eine zerstörungsfreie Methode handelt, um den Oberbau bei vergleichsweise hoher Geschwindigkeit zu vermessen. Der Unterschied zwischen den verschiedenen Schotterzuständen ist in erster Linie auf in verschmutzten Abschnitten eingeschlossene Feuchtigkeit zurückzuführen [5]. Einer der größten Vorteile des Georadars ist, dass es kontinuierlich anstatt punktuell Informationen über den Zustand des Schotterbettes liefert. Nachträglich sind allerdings ein hoher Aufwand und viel Erfahrung zur richtigen Interpretation der Daten notwendig.

3 Optimierung der Gleisschotterverdichtung mittels Stopfmaschinen

3.1 Grundlagenforschung (Proof-of-Concept)

Die In-situ-Bestimmung (Messung inklusive Auswertung) des Schotterzustands ist mit derzeit verfügbaren Methoden nicht möglich. Damit können auch die Arbeitsparameter der Stopfmaschine nicht auf den vorherrschenden Zustand des Schotters angepasst werden, um den Verdichtungserfolg zu erhöhen.

Seit 2016 wird am Institut für Geotechnik der TU Wien an einer alternativen Methode zur Bestimmung des Schotterzustands im Feld geforscht. Dabei wird das Stopfaggregat vom reinen Arbeitswerkzeug hin zum Sensor weiterentwickelt, um den Schotterzustand bereits während des Stopfvorgangs objektiv beurteilen zu können. Künftig soll es möglich sein, die Arbeitsparameter automatisch an den Schotterzustand anzupassen, um eine optimale, langlebige Gleislage herzustellen.

3.2 Messungen im Feld

Für die Grundlagenforschung wurde ein Stopfaggregat des Dynamic Stopfpress 09-4X E³ mit einer Reihe strategisch positionierter Sensoren ausgestattet (Abb. 4). Dehnmessstreifen wurden direkt auf ausgewählte Stopfpickel appliziert, um Normalkräfte (z-Richtung) und Querkräfte (x-Richtung) zu messen. Beschleunigungsaufnehmer wurden auf dem oberen Teil des Stopfarmes angebracht, um die Vibrationsamplitude berechnen zu können. Zusätzlich wurden Druck- und Wegaufzeichnungen der hydraulischen Zylinder messtechnisch erfasst, um den Stopfvorgang in die jeweiligen Betriebsphasen – Eindringen der Pickel in den Gleisschotter, Beistellen und Anheben des Stopfaggregats – aufteilen zu können.

Die gesammelten Messdaten wurden in Form eines Arbeitsdiagramms dargestellt, das den Verlauf der Beistellkraft und den Schwingweg des Stopfpickels während eines Stopfzyklus zeigt (Abb. 5). Dies ermöglicht die Ableitung von charakteristischen Stopfparametern, die in weiterer Folge für eine systematische Auswertung herangezogen wurden:

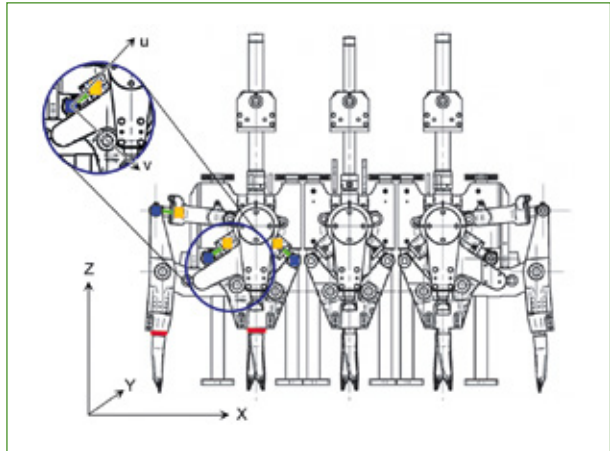


Abb. 4: Messtechnische Instrumentierung des Stopfaggregats für die Grundlagenforschung: Dehnmessstreifen (rot), Beschleunigungsaufnehmer (blau), Wegaufzeichnungen der hydraulischen Zylinder (Laserentfernungsmessung) (grün), Druckaufzeichnungen der hydraulischen Zylinder (gelb) [6]

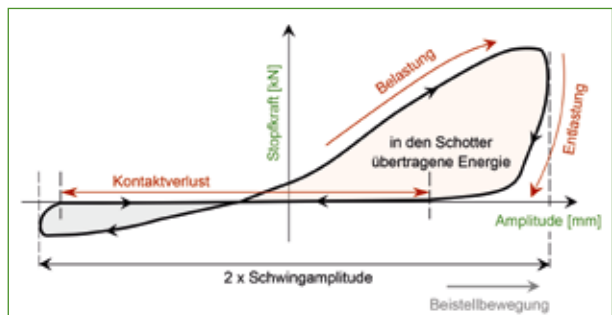


Abb. 5: Vereinfachte Darstellung eines Arbeitsdiagramms

Das Diagramm zeigt den Verlauf der Beistellkraft und den Schwingweg des Stopfpickels während eines Stopfzyklus. Dies ermöglicht die Ableitung von charakteristischen Stopfparametern, die in weiterer Folge für eine systematische Auswertung herangezogen wurden:

1. Schwingungsamplitude
2. maximale Beistellkraft
3. Belastungs- und Entlastungsreaktion
4. in den Gleisschotter eingebrachte Energie
5. Kontaktpunkte zwischen Pickel und Schotter.

Dabei konnte messtechnisch nachgewiesen werden, dass es zu einem periodischen Kontaktverlust mit anschließendem Kontaktgewinn zwischen dem Verdichtungsgerät (Stopfpickel) und dem zu verdichtenden Medium (Korngerüst des Gleisschotters) kommt [7]. Im Gegensatz zur statischen Umlagerung ermöglichen der periodische Kontaktverlust und Kontaktgewinn dem Schotterkorn mehr Freiheiten. Dadurch wird bei geringer wirkenden Stopfkräften eine dichtere Lagerung erreicht.

Auf Basis der Auswertung ausgewählter Messdaten können erste Kenngrößen für die drei Fälle des Schotterzustands definiert werden:

- neuer Schotter → gemessen direkt beim Gleisumbau
- geringfügig verschlissener Schotter → gemessen bei Qualitätsstopfung sechs Wochen nach Gleisumbau
- abgenutzter Schotter mit hohem Feinanteil → gemessen bei Gleisinstandhaltung.

Die größten Unterschiede zwischen den genannten Schotterzuständen ergeben sich für die folgenden vier Parameter:

1. Maximalkraft
2. Energie je Beistellen
3. Belastungs- und Entlastungsreaktion des Schotters¹
4. Form des Arbeitsdiagramms (Abb. 5).

Erkennbar sind die wesentlich höhere Stopfkraft in abgenutztem Schotter und die unterschiedliche Entlastungsreaktion. Eine Erklärung für diese Unterschiede ist der höhere Anteil an Feinteilen in abgenutztem Schotter, der den Widerstand gegen weitere Verdichtung erhöht.

3.3 Mechanisches Modell

In Ergänzung zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein semianalytisches mechanisches Modell der Interaktion zwischen Stopfpickel und Gleisschotter entwickelt. Das Stopfaggregat wurde als einfaches Stabmodell mit zwei Auflagern und einer dynamischen Anregung modelliert. Die dynamische Unwuchtanregung wird im Modell durch eine veränderliche Stablänge ersetzt. Diese wird durch die quasi-statische Bewegung eines Hydraulikzylinders überlagert, die ebenfalls durch eine veränderliche Länge des Stabes l_4 modelliert wird (Abb. 6).

¹ Steigung der Arbeitslinie während der Belastungs- bzw. Entlastungsphase

Die Reaktion des Schottermatrixmodells auf die Stopfpickelbewegung wird durch ein Kelvin-Voigt-Modell dargestellt. Dieses wird anhand einer rein elastischen Feder und eines parallel geschalteten rein viskosen Dämpfers simuliert. Erweitert um eine „plastische“ Feder, die in der Entlastungsphase gesperrt bleibt, wird die plastische Verformung bzw. die Verdichtung der Schottermatrix unter der Schwelle nachgebildet (Abb. 7). Das Modell kann auch das Kriech- und Spannungsverhalten des viskoelastischen Materials nachahmen. Ebenfalls nachgebildet wird der Kontaktverlust, indem ein Spalt zwischen dem Stopfpickel und dem Schottermatrixmodell entsteht.

Ein Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Ergebnissen (Abb. 8) zeigt eine gute Übereinstimmung und bestätigt die Eignung des mechanischen Modells für die Simulation des Gleisstopfens. Verschiedene Grade der Schotterverschmutzung können mit ein und demselben Modell nachgebildet werden, wobei die Abnutzung des Schotters durch eine Reduktion der Schotterelastizität berücksichtigt wird.

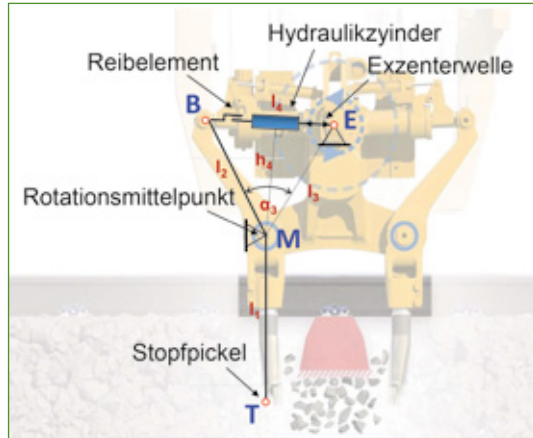


Abb. 6: Mechanisches Modell des Stopfaggregats [6]

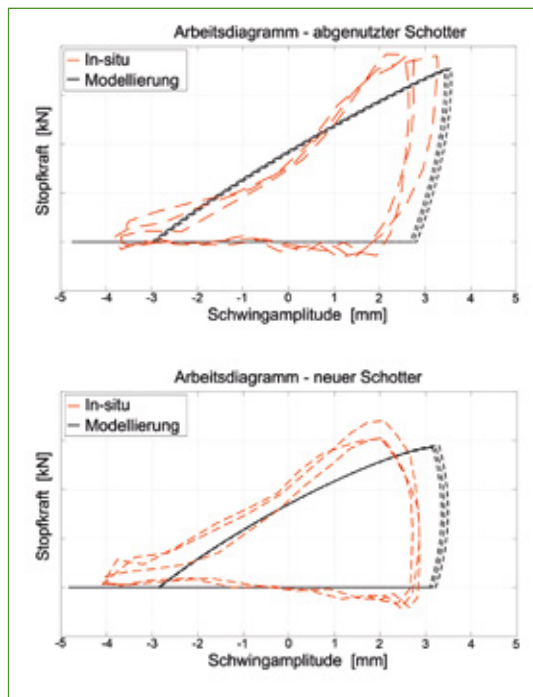


Abb. 7: Vergleiche der charakteristischen Arbeitsdiagramme für verschiedene Schotterzustände (rot – Messungen, schwarz – Modellierung) [6]

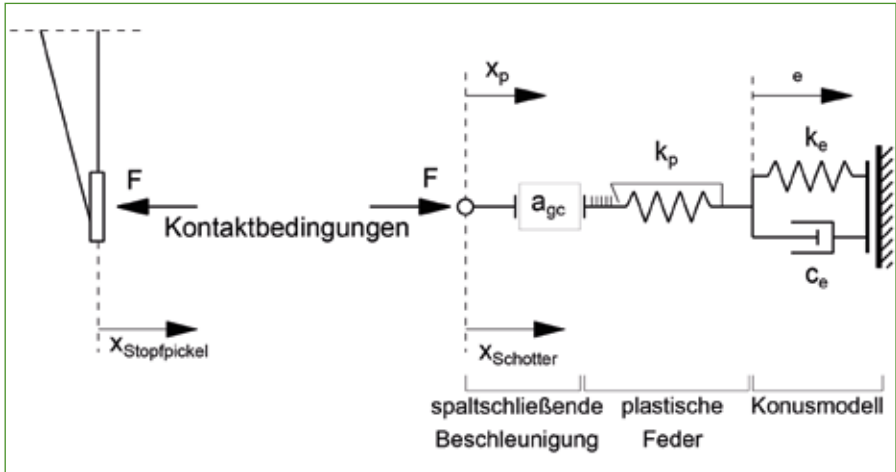


Abb. 8: Boden-/ Gleisschottermodell mit seinen drei wesentlichen Komponenten [6]

Aus Abb. 8 ist zu entnehmen, dass das entwickelte semianalytische Modell die Modellierung verschiedener Stadien der Schotterverschmutzung ermöglicht. Damit wird die Grundlage zur Bildung eines Systems der optimalen Stopfparameterkombination für jeden Schotterzustand geschaffen.

3.4 Angewandte Forschung

Neben großskaligen Laborexperimenten und Feldversuchen sind numerische Simulationen eine weitere Möglichkeit, um Einblicke in das mechanische Verhalten von Gleisschotter zu gewinnen. Die Diskrete-Elemente-Methode (DEM) ist dabei ein gängiges Werkzeug für Partikelsimulationen aller Art. Abb. 9 zeigt Beispiele für DEM-Simulationen eines Stopfprozesses.

DEM-Simulationen sind sehr rechenintensiv, besonders für die Analyse hochdynamischer Prozesse. Erst die Weiterentwicklungen von Hardware und Software in den letzten

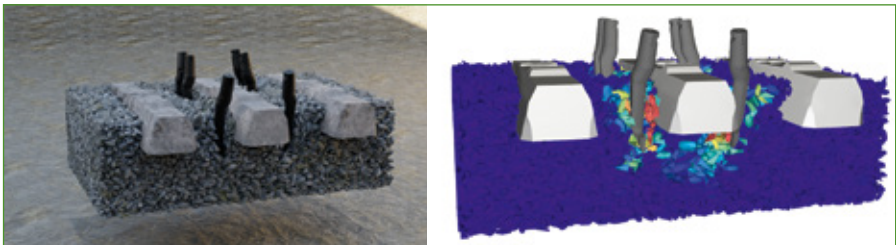


Abb. 9: DEM-Simulation eines Gleisstopfvorgangs

Jahren ermöglichen die Abbildung gesamter Stopfprozesse in ausreichender Genauigkeit [8]. Die Simulationen erlauben einen vollständigen Blick auf alle makro- und mikromechanischen Größen, von den homogenisierten Spannungen bis hin zu den Kontaktkräften und Trajektorien jedes einzelnen Schotterkornes, siehe auch Abb. 10.

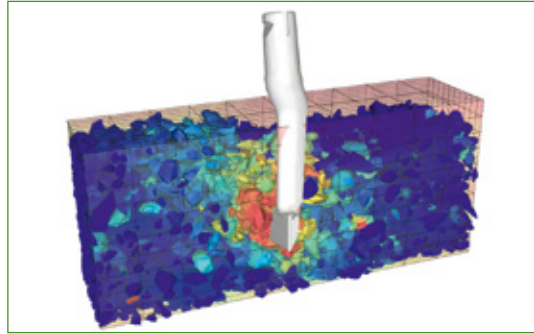


Abb. 10: DEM-Simulation Stopfen (absolute Translationsgeschwindigkeit der Partikel farblich markiert)

Im Hinblick auf die Verdichtung von Gleisschotter sind vor allem Untersuchungen über den

Einfluss von Betriebsparametern wie Stopffrequenz sowie Vibrationsamplitude beim Stopfen von Interesse. Erste Ergebnisse zeigen, dass zusätzlich zur Vibrationsfrequenz auch die Vibrationsamplitude signifikanten Einfluss auf das Verdichtergebnis hat [8].

Laborexperimente und Feldversuche sind für eine Kalibrierung der Material- und Modellparameter zwingend erforderlich. Unerlässlich ist Sachkenntnis der Methode, um die Ergebnisse richtig zu interpretieren und daraus die richtigen Schlüsse zu ziehen.

Abgesehen davon bieten numerische Simulationen einen neuartigen und intuitiven Zugang zum komplexen Verformungsverhalten granularer Materie und werden in naher Zukunft für effiziente Produktentwicklungsprozesse im Gleisbau unverzichtbar sein. Beispielsweise können die Effizienz unterschiedlicher Aggregate, unterschiedlicher Stopfpickelformen sowie Variationen von Beistellkinematiken verglichen und systematisch weiterentwickelt werden.

4 Next Steps

Die sehr vielversprechenden Ergebnisse der Proof-of-Concept-Versuche haben gezeigt, dass das Verhalten des Gleisschotters noch zahlreiche Forschungsfragen bereithält. Um diese offenen Fragen beantworten zu können und das Wissen zu vertiefen, sind weitere Messungen notwendig. Dabei werden zwei Strategien verfolgt:

- Erweiterung und Verbesserung der Messtechnik
- Ausweitung des Versuchsgebiets.

4.1 Messtechnik

In den ersten Versuchen konnte sehr deutlich gezeigt werden, wie viel Information aus der Analyse von nur zwei Größen (Beschleunigung des Pickelarms und Kraft an der

Pickelspitze) eines einzelnen Pickels gewonnen werden kann. Der nächste logische Schritt war die vollständige Ausrüstung einer Stopfmaschine mit Sensorik, um noch detailliertere Informationen über die Wechselwirkung zwischen Schotter und Stopfpickel zu erhalten. Kernstück des am Stopfaggregat angebrachten Sensorsystems bildet neben den mit Dehnmessstreifen ausgestatteten Stopfpickeln ein von P&T entwickelter Sensor zur Bestimmung der Pickelarmposition (Drehwinkelsensor, Abb. 11). Die Kombination dieser beiden Sensoren ermöglicht die Aufzeichnung der zuvor beschriebenen Arbeitsdiagramme. Zusätzlich zur Messung der Pickelspitzenamplitude ist es mit dem neu entwickelten Positionssensor möglich, die quasistatische Beistellbewegung zu messen. Ergänzend dazu werden alle für den Stopfprozess relevanten Drücke aufgezeichnet. Durch die Einbindung des Messsystems in die Maschinensteuerung können zusätzlich die weiteren relevanten Arbeitsparameter (Hebewerte, Überhöhung etc.) protokolliert werden.

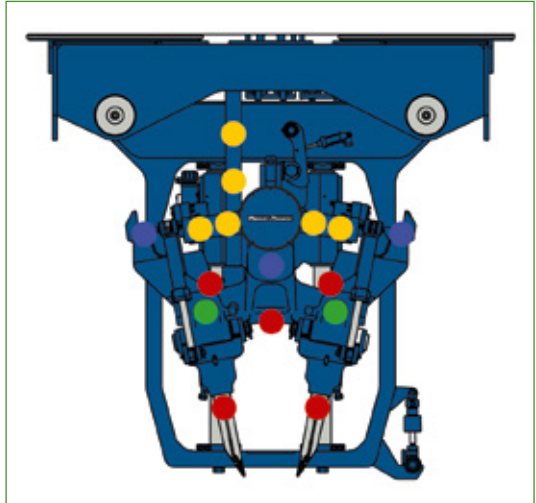


Abb. 11: Messtechnische Instrumentierung des Stopfaggregats für die angewandte Forschung: Dehnmessstreifen (rot), Beschleunigungsaufnehmer (blau), Wegaufzeichnungen der hydraulischen Zylinder (Drehwinkelsensor) (grün), Druckaufzeichnungen

Diese Sensorvorausstattung wurde erstmals im Sommer 2020 auf einer 09-4x4E³ aufgebaut. Diese 1-Schwellen-Universalstopfmaschine ist die ideale Plattform für die nächsten Messkampagnen. Der elektrische Antrieb der Maschine und auch die elektrischen Stopfaggregate bieten die Möglichkeit, die benötigte elektrische Leistung sehr genau und hochfrequent zu messen. So können neben der Analyse der Schotter-Maschinen-Wechselwirkung mögliche effizienzsteigernde Maßnahmen identifiziert und umgesetzt werden.

4.2 Versuchsgebiet

Die Proof-of-Concept-Versuche wurden nur in Österreich durchgeführt. Dies war zu Beginn notwendig, um die Variation der unterschiedlichen Arbeitsweisen, Vorschriften und Schotterarten möglichst gering zu halten. Im nächsten Schritt werden die Versuche sukzessive auf zusätzliche Regionen ausgeweitet. Erste in Deutschland

durchgeführte Tests zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse. Zur Optimierung der Auswerte-Algorithmen und Steigerung der Verlässlichkeit des Systems werden die gemessenen Daten der Maschine mit den vorhandenen Infrastrukturdaten verglichen. Dafür wurde ein entsprechendes Kooperationsprojekt zwischen ÖBB, SBB, TU Graz und P&T aufgesetzt. Diese Kooperation wird die In-situ-Analyse des Schotterzustands in den nächsten Jahren deutlich vorantreiben.

Zur Berücksichtigung der globalen Unterschiede in der Gleisinstandhaltung und den vorhandenen Oberbaustoffen wurde eine Maschine in Japan mit der Schotterzustandssensorik ausgestattet. Mit dieser Stopfmaschine sollen erste Messdaten in Asien gesammelt werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Grundlagenforschung bildet die Basis für die Entwicklung neuer Produkte. Über viele Jahre wurden Verdichtungsaggregate empirisch optimiert und weiterentwickelt. Diese Methode erreicht allerdings irgendwann ihre Grenzen, ab diesem Zeitpunkt müssen durch wissenschaftliche Untersuchung neue Impulse gesetzt werden. Auch beim Gleisstopfprozess ist man mittlerweile an diesem Punkt angekommen. Aus diesem Grund wurden und werden Stopfmaschinen zunehmend mit Sensorik ausgestattet, um den Stopfprozess genauer messen und verstehen zu können. Die Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen und Experimenten sind das Fundament für die Entwicklung neuer Technologien. Ziel ist es, die Stopfmaschine vom Arbeitswerkzeug hin zum Messinstrument weiterzuentwickeln. Erst durch die Kenntnis des Schotterzustands ist es möglich, die Stopfparameter an den jeweiligen Zustand anzupassen, um das optimale Verdichtungsergebnis zu erreichen. Das hebt die Qualität des Gleisnetzes und reduziert gleichzeitig die Kosten durch die Verlängerung der Instandhaltungszyklen. Eine erste kommerziell verfügbare Auskopplung der Untersuchungen stellt die von P&T entwickelte Verfüllkontrolle dar. Dieses Assistenzsystem ermöglicht es dem Bediener, auf Basis der gemessenen Pickelbewegung unzureichende Verfüllung unter der Schwelle zu erkennen und entsprechend darauf zu reagieren. Das System leistet damit einen Beitrag zur homogenen Verdichtung des Gleisschotters und Langlebigkeit der Gleislage.

Mit den hier beschriebenen Messungen lassen sich durchgeführte Simulationen mit realen Messdaten abgleichen. Diese optimierten Simulationsmodelle können dazu verwendet werden, einen großen Parameterraum virtuell abzutasten. Dadurch kann der experimentelle Aufwand auf besonders vielversprechende Parameter beschränkt und können die Entwicklungskosten reduziert werden. Eine Kombination aus Feld- und Computerexperimenten wird daher auch in Zukunft die Grundlage für die Entwicklung neuer Technologien und Produkte darstellen.

Quellen

- [1] Kolymbas, D.: Geotechnik – Bodenmechanik und Grundbau, Springer, Berlin, 1998
- [2] Huang, H.; Tutumluer, E.; Dombrow, W.: Laboratory characterization of fouled railroad ballast behavior, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2117 (2009), pp. 93–101, DOI: 10.3141/2117-12
- [3] Vallerga, B. A.; Seed, H. B.; Monismith, C. L.; Cooper, R. S.: Effect of shape, size and surface roughness of aggregate particles on the strength of granular materials, ASTM STP 212 (1957), pp. 63–76
- [4] Fischer, J.: Untersuchungen zur Schotterqualität – Seminar über Gleishaltung, Borlänge, Schweden, 1989
- [5] Barbir, O.; Antony, B.: Intelligentes Stopfen – zerstörungsfreie Prüfung des Schotters, ZEVrail, 2020 (Jahrgang 144), Ausgabe 10
- [6] Barbir, O.; Pistor, J.; Kopf, F.; Adam, D.; Auer, F.; Antony, B.: Gleisstopfen: Modellierung der Stopfpickel-Schotterbett-Interaktion, Geotechnik, Zeitschrift für Bodenmechanik, Erd- und Grundbau, Felsmechanik, Ingenieurgeologie, Geokunststoffe, Umwelttechnik, 4 (2019), ISSN 0172-6145; S. 219–227
- [7] Auer, F.; Antony, B.; Kopf, F.; Koczwar, C.: Präzise Gleislage durch innovative Stopfmaschinen, EI – DER EISENBÄHNINGENIEUR (Jg. 72), Heft 2/2021, S. 32–35 www.eurailpress.de/archiv/stopfen
- [8] Omerovic, S.; Koczwar, C.; Daxberger, H.; Antony, B.; Auer, F.: Anwendung der Diskrete-Elemente-Methode im Eisenbahnbau: Numerische Parameterstudien zum dynamischen Verhalten von Gleisschotter, EI – DER EISENBÄHNINGENIEUR, Heft 7/2021
- [9] Zeng, K.; Qiu, T.; Bian, X.; Xiao, M.; Huang, H.: Identification of ballast condition using SmartRock and pattern recognition, Construction and Building Materials 2019, 221, pp. 50–59, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.06.049



Dipl.-Ing. Olja Barbir
System engineer
olja.barbir@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar
Forschungsingenieur
christian.koczwar@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. Samir Omerovic
Simulationsingenieur
samir.omerovic@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Bernhard Antony, B. Sc.
Head of Technology Centre Purkersdorf
bernhard.antony@plassertheurer.com



Dipl.-Ing. Dr. Florian Auer
Leiter Technologie und Innovation
florian.auer@plassertheurer.com

Alle Autoren: Plasser & Theurer, Export von Bahnbaumaschinen, Gesellschaft m.b.H., AT-Wien