

2024 (Jahrgang 148) / Ausgabe 01/02 / Sprache: Deutsch

Stopfmaschinenbasierte Schotterzustandserfassung

Autoren: Robert Reschke, Dipl.-Ing. Stefan Offenbacher, Dipl.-Ing. Klaus Hellwagner, Stefan Marschnig, Christian Koczwara

Zusammenfassung

Auf Grund der zahlreichen Aufgaben des Schotterbetts ist dessen Zustand, insbesondere die Korngrößenverteilung, ein maßgebendes Kriterium für ein funktionierendes Gleis. Unter anderem ist die Bettung entscheidend für die Gleislage und definiert somit die Notwendigkeit von Stopfeinsätzen. Umfangreiche Sensorik an den Stopfaggregaten einer Versuchs-Stopfmaschine erlaubten detaillierte Analysen von tausenden messtechnisch erfassten Stopfprozessen. Anhand dieser Analysen wurde ein Kennwert (Schotterkoeffizient β_{Ballast}) entwickelt, der die Beschreibung des Schotterzustands auf Basis der Stopfmaschinen-Messdaten ermöglicht. Zum Abgleich des Kennwerts mit dem tatsächlich vorherrschenden Schotterzustand wurden labortechnische Untersuchungen von Schotterproben durchgeführt, die als Referenz dienen. Korrelationsanalysen belegen einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Schotterkoeffizienten und dem tatsächlichen Zustand bzw. der Korngrößenverteilung der entnommenen Proben.

1 Einleitung

Als Bestandteil des konventionellen Eisenbahnoberbaus erfüllt das Schotterbett mehrere essenzielle Aufgaben. Dazu gehören die Fixierung des Gleisrosts in seiner vertikalen und horizontalen Lage, die Verteilung und Ableitung der auftretenden Lasten auf das Planum sowie die Entwässerung und Belüftung des Gleiskörpers. Um dies zu gewährleisten, muss Gleisschotter verschiedene Kriterien hinsichtlich Korngrößenverteilung, Kornform, Kantigkeit und Festigkeit erfüllen. Über die Nutzungsdauer verändert, d.h. verschlechtert sich der Schotterzustand auf Grund von Verschleiß und Verschmutzung, wodurch das Schotterbett seine Aufgaben nicht mehr optimal erfüllen kann [1 bis 3]. Zudem beeinflusst der

Schotterzustand das Stopfen des Gleises, da Stopfparameter für eine optimale Stopfqualität an den aktuellen Zustand angepasst werden müssen [4, 5].

Zur Erfassung des Schotterzustands sind heute verschiedene Methoden verfügbar. Dazu gehören visuelle Begutachtungen im Zuge von Streckenbegehungen, Fraktalanalysen, Georadarauswertungen und labortechnische Untersuchungen von Schotterproben [6]. Die ÖBB Infrastruktur AG (ÖBB) und die SBB AG (SBB) nutzen auf strategischer Ebene Fraktalanalysen und Georadarauswertungen, um Informationen zum strecken- oder netzweiten Zustand des Schotterbetts zu erhalten. Für detaillierte Analysen werden labortechnische Untersuchungen von Schotterproben durchgeführt. Dazu wird der Schotter aus dem Schwellenzwischenfach entnommen und anschließend im Labor analysiert (SBB: intern; ÖBB: extern bei akkreditierten Prüfstellen). Anhand der Schotterprobe kann eine Vielzahl von relevanten Kennwerten wie beispielsweise mineralogische Zusammensetzung, Korngrößenverteilung, Kornform, Widerstand gegen Verschleiß und Zertrümmerung, Gesteinskennzahl (GKZ) oder Feuchtigkeitsgrad, bestimmt werden. Gleichzeitig kann im entnommenen Schwellenfach die Schotterstärke gemessen und die Tragfähigkeit des Planums bestimmt werden (Messung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd}) [7, 8].

Bei den ÖBB erfolgt die Entnahme von Schotterproben im Schwellenfach zwischen den Schienen. Je Entnahmestelle werden zwei separate Proben extrahiert: Der obere Bereich des Schotterbetts von der Schwellenoberkante bis zur Schwellenunterkante und der untere Bereich von der Schwellenunterkante bis zum Planum (Bild 1). Zur Beurteilung und Planung von künftigen Maßnahmen (Stopfen, Schotterbettreinigung, Totalaushub) wird insbesondere der Verschmutzungsgrad herangezogen. Unter Verschmutzungsgrad wird international geläufig der Masseanteil der Kornfraktion mit einer Korngröße $< 2,4$ mm verstanden. Dieser ist für den aktuellen Schotterzustand (Gebrauchstauglichkeit) der wesentliche Parameter [9]. Ab einem kritischen Wert von 25 bis 30 % im unteren Schotterbett wird Stopfen als mittelfristige Instandhaltungsmaßnahme nicht mehr als sinnvoll erachtet und eine größere Maßnahme – Schotterbettreinigung oder Totalaushub (abhängig vom Verschmutzungsgrad im oberen Schotterbett) – ist erforderlich [10].

Bei den SBB erfolgt die Probenentnahme ebenfalls im Schwellenfach zwischen den Schienen. Zusätzlich zum Schotter wird auch eine Probe des Unterbaus entnommen, bis zu einer Tiefe von mindestens 40 cm unter dem Planum. Die Schotterprobe selbst wird anschließend bezüglich der Reinigbarkeit klassifiziert, wobei Verschmutzung, Festigkeit (LA-Wert), Kornform und Kantigkeit berücksichtigt werden. Nach [11] gibt es folgende Klassen:

- S1 (geringer Betriebsschmutz und Schotterabrieb, gut stopf- und reinigbar),
- S1-2 (geringer bis mittelmäßiger Betriebsschmutz und Schotterabrieb, gut stopf- und reinigbar),
- S2 (mittelmäßiger Betriebsschmutz und Schotterabrieb, stopf- und reinigbar),
- S3 (stark verunreinigt; nicht mehr wirksam stopf- und reinigbar) und
- S4 (verlehmt; nicht mehr wirksam stopf- und reinigbar).

Geotechnische Untersuchungen von Schotterproben sind die detaillierteste Methode zur Bestimmung des Schotterzustands und bieten den höchsten Informationsgewinn, sind aber gleichzeitig ressourcenintensiv (Zeitaufwand, Personalaufwand, Kostenaufwand). Dementsprechend müssen sie möglichst zielgerichtet eingesetzt werden. Die in diesem Artikel vorgestellte Methodik der Schotterzustandserfassung während des Stopfens ist hierfür ein geeignetes Werkzeug. Der in der Stopfzone – Schwellenoberkante bis ca. 10 cm unter Schwellenunterkante (vgl. Bild 1) – erfasste Schotterzustand soll als Screening des bearbeiteten Abschnitts dienen und somit die Planung von künftigen Maßnahmen unterstützen. Im Folgenden bezieht sich der Begriff „Schotterzustand“ auf die Korngrößenverteilung, da diese von den Bahnen als maßgebendes Kriterium zur Zustandsbewertung angesehen wird.

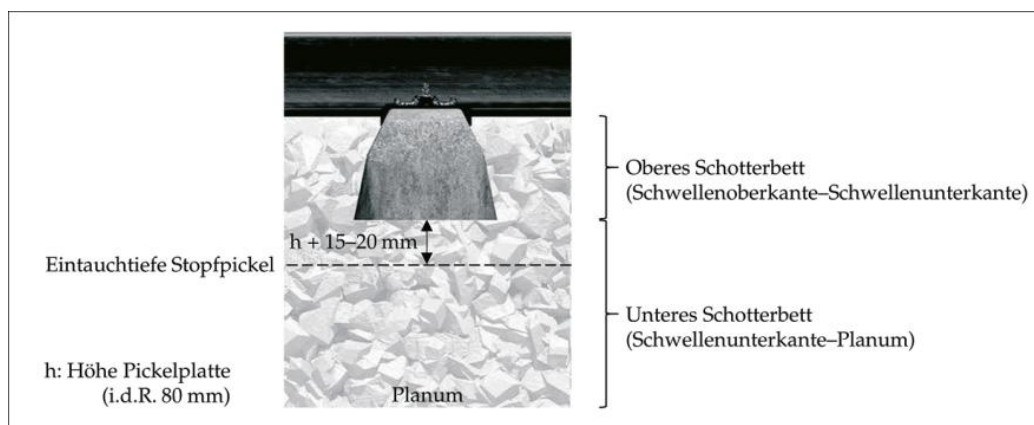


Bild 1: Gleis-Längsschnitt mit Darstellung der Schotterzonen und dem von Stopfpickeln erfassten Bereich

2 Messequipment und Rohdaten

2.1 Sensorik

Zu Forschungszwecken stattete Plasser & Theurer die Stopfaggregate der Universalstopfmaschine Unimat 09-4x4/4S E³ mit strategisch positionierten Sensoren mit dem Ziel aus, den Stopfprozess hochaufgelöst messtechnisch zu erfassen und die Interaktion Stopfpickel-Schotterbett zu analysieren. Dadurch sollen während des Stopfprozesses unter anderem Informationen über den aktuellen Schotterzustand gewonnen werden. Bild 2 zeigt die installierten Sensoren anhand eines der vier Stopfaggregate.

Für die Erfassung des Schotterzustands nach der in diesem Artikel vorgestellten Methodik sind die Dehnmessstreifen, die Drucksensoren und die Senktiefengeber (in Bild 2 nicht eingezeichnet, da

Standardequipment auf allen Maschinen) relevant. Direkt in den Stopfpickeln verbaute Dehnmessstreifen erlauben – durch entsprechende Kalibrierung der gemessenen Dehnungen – die Ermittlung von vertikalen und lateralen Kräften in den Stopfpickeln. Drucksensoren im hydraulischen System erfassen hydraulische Drücke in den Zuleitungen zu den Stopfaggregaten. Ähnlich zu den Dehnmessstreifen können damit vertikale und horizontale Kräfte während des Stopfprozesses bestimmt werden.

Zusätzlich werden auch die Korrekturwerte – Hebung linke und rechte Schiene, laterale Verschiebung des Gleisrosts – und eingestellte Stopfparameter aufgezeichnet. Zu diesen Stopfparametern zählen die Anzahl der Tauchungen je Schwelle, Senkgeschwindigkeit der Aggregate, Beistellzeit und Beistelldruck. Durch Berücksichtigung der gewählten Parameter kann verhindert werden, dass Parameteränderungen die Auswertungen verzerren und zu Fehlinterpretationen führen.

Die beschriebene Sensorik dient der Grundlagenforschung und ist dementsprechend aufwendig ausgeführt. Im Zuge der Datenanalysen konnten Möglichkeiten aufgezeigt werden, relevante Parameter zur Beschreibung der Zielgrößen (hier des Schotterzustands) mit reduzierter Sensorik zu erfassen, ohne relevante Verluste in der Genauigkeit hinnehmen zu müssen. Mittlerweile sind Stopfmaschinen mit dieser auf die wesentlichen Bestandteile reduzierten Stopfsensorik in mehreren Ländern im Einsatz, wodurch die Datensamples kontinuierlich erweitert und die Analysen verfeinert werden können.

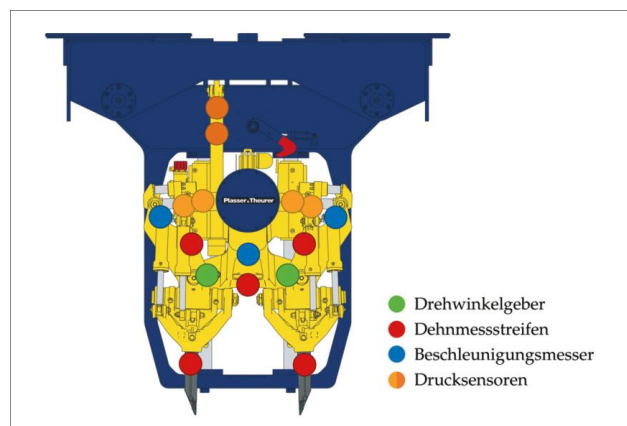


Bild 2: Messequipment an den Stopfaggregaten der Universalstopfmaschine Unimat 09-4x4/4S E3

2.2 Aufgezeichnete Messdaten

Ein Großteil der gemessenen Parameter wird mit einer Auflösung von 1 000 Hz aufgezeichnet. Mit dieser hohen Abtastrate ist sichergestellt, dass nicht nur die niederfrequenten Bewegungen (Senkung und

Hochziehen der Stopfaggregate, Beistellbewegung der Stopfarme), sondern auch die einzelnen Schwingungen bei 35 Hz (optional 45 Hz beim Eintauchvorgang) detailliert erfasst werden. Bei knapp 240 Messkanälen ergeben sich somit rund 600 000 gemessene Werte je bearbeitetem Schwellenfach (Annahme: einfacher Beistellprozess inklusive Senk- und Hebevorgang). Bild 3 stellt Beispiele der Rohdaten anhand der Parameter Vertikalkraft und Senktiefe dar. Diese werden für die Berechnung des Schotterkoeffizienten (Kapitel 3) herangezogen.

Bild 3 (a) zeigt den Verlauf der Vertikalkraft in einem Stopfpickel. Dabei ist ein rapider Anstieg der Kraft bei Sekunde 1 erkennbar, welcher das Eindringen des Pickels in den Schotter im Zuge des Senkvorgangs wiedergibt. Bei Erreichen der definierten Stopftiefe und Beginn des eigentlichen Verfüll- und Verdichtprozesses reduziert sich die Vertikalkraft wieder annähernd auf null. In Bild 3 (b) ist die Senktiefe eines Stopfaggregats visualisiert. Vor Beginn des Stopfprozesses befindet sich das Aggregat in einer definierten Höhe über der Schienenoberkante und wird mit Beginn des Stopfprozesses auf die vorgegebene Tiefe abgesenkt. Nach dem Verfüll- und Verdichtprozess wird das Aggregat wieder in die Ausgangshöhe gehoben. Aus diesem Weg-Zeit-Diagramm lässt sich die Eindringgeschwindigkeit des Stopfaggregats berechnen. Die beiden illustrierten Parameter – Vertikalkraft und Eindringgeschwindigkeit (Ableitung der Senktiefe) – werden in weiterer Folge herangezogen, um einen geeigneten Kennwert zur Beurteilung des Schotterzustands zu definieren.

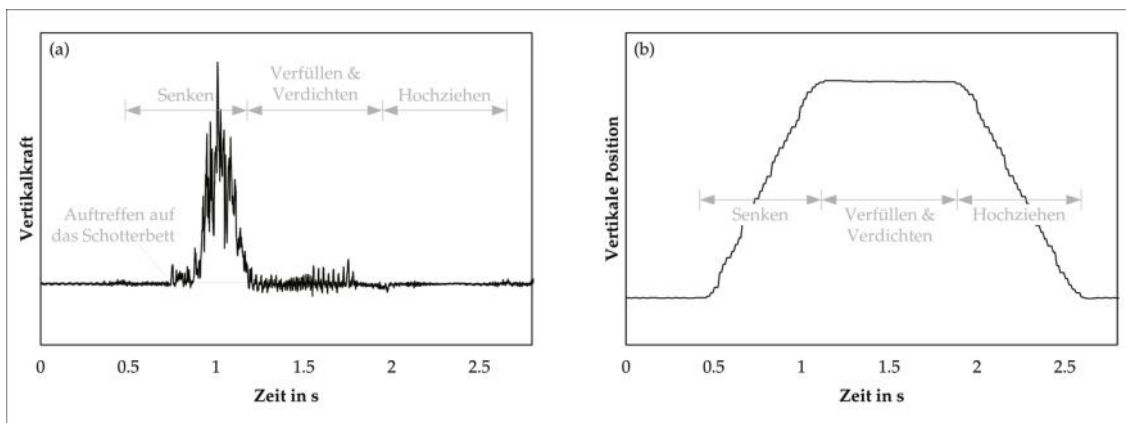


Bild 3: Visualisierung beispielhafter Rohdaten, (a) anhand des Verlaufs der Vertikalkraft in einem Stopfpickel, (b) der vertikalen Position eines Stopfarmes während eines Stopfprozesses

3 Schotterkoeffizient β_{Ballast}

Erkenntnisse aus vorangegangenen Forschungsprojekten [4, 12 und 13] sowie detaillierte Analysen von Messdaten des Unimat 09-4x4/4S E³ (Kapitel 2.1) stellen die Grundlage für die Entwicklung eines auf Stopfmaschinen-Messdaten basierenden Kennwerts zur Beschreibung des Schotterzustands dar. Die Rohdaten des Unimat 09-4x4/4S E³ umfassen Stopfungen von ca. 80 000 Schwellen, die im Jahr 2021 im Netz der ÖBB und SBB aufgezeichnet wurden. Zielsetzung war die Erfassung Schotterzustands bereits während des Eindringprozesses der Stopfpickel in den Schotter und somit noch vor Beginn der eigentlichen Beistellbewegung. Neben dem Informationsgewinn des Schotterzustands wird damit die Grundlage geschaffen, künftig automatisiert zustandsangepasste Parameter für den Prozess der Verfüllung und Verdichtung anzuwenden.

Während der Untersuchungen wurden zahlreiche direkt gemessene (z.B. Eindringkraft) und aus den Rohdaten abgeleitete Parameter (z.B. Eindringenergie) analysiert und mit Informationen wie Anlagendaten (Gleisalter, Belastung, Schwellentyp), Georadarauswertungen, Streckenbegehungen und Notizen der Maschinenbesatzung (z.B. Anmerkungen zu verschmutztem Schotter) abgeglichen. Besonderer Fokus in diesen Analysen war die Beseitigung von Einflüssen auf die Messdaten, die aus variablen, vom Bedienpersonal im Rahmen der Regularien wählbaren Maschinenparametern, stammen. Beispielsweise ist die Senkgeschwindigkeit der Aggregate vom Bediener veränderbar, um bei stärker verschmutztem Schotter durch eine höhere vertikale Geschwindigkeit die vorgegebene Stopftiefe in angemessener Zeit zu erreichen. Naturgemäß erhöht sich durch die höhere Geschwindigkeit auch die gemessene Vertikalkraft. Folglich setzt sich der erstellte Kennwert, der Schotterkoeffizient β_{Ballast} , aus der Vertikalkraft und der gemessenen Eindringgeschwindigkeit zusammen und wird nach Gleichung (1) berechnet.

$$\beta_{\text{Ballast}} = \frac{F_{\text{max}}}{v_{\text{max}}} \quad | \quad 1$$

wobei β_{Ballast} in kNs/m der Schotterkoeffizient, F_{max} in kN die maximale Vertikalkraft während des Eindringvorgangs und v_{max} in m/s die maximale gemessene Eindringgeschwindigkeit sind.

Der Schotterkoeffizient entspricht somit einer Dämpfungskonstanten. Stärker verschmutzter Schotter erschwert erfahrungsgemäß den Eindringprozess der Pickel. Dieser Effekt wird durch den Schotterkoeffizient quantifizierbar: Beim Eintauchen in stärker verschmutzten Schotter wird die Senkbewegung der Aggregate stärker gedämpft, was sich in höheren β_{Ballast} -Werten widerspiegelt (höhere Vertikalkraft und/oder geringere Eindringgeschwindigkeit).

Zwei Faktoren, die den Schotterkoeffizienten zu einem nicht vernachlässigbaren Grad beeinflussen, sind Hebung und Stopftiefe. Die Hebung wird durch die Vormessung festgelegt und die Stopftiefe ist durch die Höhe des Gleisrosts gegeben (vgl. Bild 1). Zwischen Hebung und β_{Ballast} besteht eine negative, zwischen Stopftiefe und β_{Ballast} eine positive Korrelation. Beide Effekte müssen zwangsläufig auftreten: Höhere Hebungen erzeugen einen größeren Hohlraum unter der Schwelle und erleichtern das „Ausweichen“ der

Schotterkörner beim Eindringen der Pickel, was zu tendenziell niedrigeren β_{Ballast} -Werten führt. Umgekehrt gehen größere Stopftiefen mit erhöhten β_{Ballast} -Werten einher, da bei zunehmender Eindringtiefe die Reibung entlang der Pickel und der Spannungszustand im Schotterbett steigen (unabhängig vom Schotterzustand). Der Einfluss der Hebung wurde mit statistischen Analysen quantifiziert und lässt sich mit einer daraus abgeleiteten Korrekturfunktion weitestgehend eliminieren. Zur Berücksichtigung der Stopftiefe werden die β_{Ballast} -Werte, bezogen auf einen Basiswert, proportional zur Eintauchtiefe erhöht (bei geringeren Stopftiefen) oder abgemindert (bei größeren Stopftiefen). Beide Ansätze sorgen nicht für eine radikale Änderung der Messwerte, sondern für eine Auf- oder Abminderung um wenige Prozent. Im Nachfolgenden ist β_{Ballast} stets der um Hebung und Stopftiefe korrigierte Parameter.

Um den Schotterkoeffizienten in eine möglichst einfach zu interpretierende nutzbare Form zu übersetzen, werden die Werte in Zustandsklassen zusammengefasst. Vorerst wurde eine Anzahl von vier Gruppen gewählt, wobei Klasse I einem sehr guten und Klasse IV einem sehr schlechten Schotterzustand entspricht. Durch die Einteilung in vier Gruppen ist eine direkte Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen von Georadarbefahrungen gegeben, da bei diesen Erkundungen ebenfalls vier Verschmutzungsklassen für den Schotter erstellt werden. Zusätzlich ähnelt die Unterteilung der seitens der SBB angewendeten Zustandsklassen. Die Auswahl der Gruppengrenzen erfolgt anhand der Häufigkeitsverteilung der analysierten Werte, wobei der Median in etwa die Grenze zwischen Gruppe II und IV darstellt und somit die bessere von der schlechteren Hälfte trennt. In Tabelle 1 sind die Zustandsklassen mit den entsprechenden Wertebereichen des Schotterkoeffizienten angeführt.

Schotterzustandsklasse	β_{Ballast} in kNs/m
Klasse I (<i>bester Zustand</i>)	$\beta_{\text{Ballast}} \leq 35$
Klasse II	$35 < \beta_{\text{Ballast}} \leq 45$
Klasse III	$45 < \beta_{\text{Ballast}} \leq 60$
Klasse IV (<i>schlechtester Zustand</i>)	$\beta_{\text{Ballast}} > 60$

Tabelle 1: Schotterzustandsklassen basierend auf dem Schotterkoeffizienten β_{Ballast}

4 Validierung durch Schotterproben

4.1 Vergleich Expertenbewertung – Schotterzustandsklasse

Zur Validierung der Messdaten und der in Kapitel 3 vorgestellten Methodik wurden seitens der ÖBB auf mehreren vom Unimat 09-4x4/4S E³ gestopften Abschnitten Schotterbeprobungen durchgeführt. Dadurch wird eine Gegenüberstellung zwischen dem Schotterkoeffizienten und dem tatsächlichen Schotterzustand möglich. Der Zustand des Schotters wurde von Fachexperten der ÖBB nach einem Schulnotensystem (1 bis 5) bewertet und diese Noten wurden den β_{Ballast} -Zustandsklassen gegenübergestellt. Zur Berechnung der Zustandsklasse wurde der Median der β_{Ballast} -Werte von zehn aufeinanderfolgenden Schwellen herangezogen, wobei die Probeentnahmestelle in der Mitte zwischen Schwelle fünf und sechs liegt. Bild 4 gibt einen Überblick über die Schotterproben inklusive Zustandsnoten der Expertenbewertung und Zustandsklassen laut Schotterkoeffizient. Die Bewertungen sowie die dargestellten Sieblinien beziehen sich auf den unteren Bereich des Schotterbetts (unter Schwellenunterkante).

Die Gegenüberstellung in Bild 4 zeigt, dass ein starker Zusammenhang zwischen den Bewertungen der Fachexperten und der messdatenbasierten Klassifizierung besteht. Die tendenziell etwas besseren Noten der β_{Ballast} -Zustandsklassen ist eine logische Konsequenz aus der geringeren Klassenanzahl (Schotterzustandsklassen: vier vs. Schulnotensystem: fünf). Einzig bei Probe 7 gibt es in diesem Vergleich eine gewisse Unstimmigkeit, da die Zustandsklasse einen höheren Wert als die Expertenbewertung aufweist. Nach Analyse aller Bilder, die während der Probenentnahme vom ausgehobenen Schotterbett gemacht wurden, ist zu hinterfragen, ob die Sieblinie zu 100 % korrekt ist und es nicht einen höheren Anteil kleinerer Korngrößen geben müsste. Bei Probenahmen aus dem Gleis können verfahrensbedingt Schwankungen auftreten. Möglicherweise hat eine derartige Schwankung bei Probe 7 zu einer vom augenscheinlich vorliegenden Zustand abweichenden Sieblinie geführt.








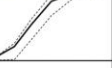
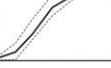


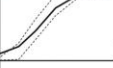
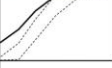
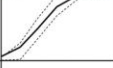
	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Probe 7
Daten	BJ 2002 Beton 15-30*10 ³ to/Tag	BJ 2000 Beton besohlt 15-30*10 ³ to/Tag	BJ 2021 Beton besohlt <8*10 ³ to/Tag	BJ 2021 Beton besohlt <8*10 ³ to/Tag	BJ 2001 Beton 15-30*10 ³ to/Tag	BJ 1983 Holz 30-45*10 ³ to/Tag	BJ 1981 Beton 30-45*10 ³ to/Tag
Foto Schwellenfach							
Sieblinie							
ÖBB	2	1	2	3	2	5	2
$\beta_{Ballast}$	II	I	II	II	I	IV	III

Bild 4: Überblick der analysierten Schotterproben und Vergleich der Bewertung laut Fachexperten der ÖBB und den Zustandsklassen des Schotterkoeffizienten

4.2 Korrelation Sieblinie – Schotterzustandsklasse

Um eine objektive Vergleichbarkeit zwischen $\beta_{Ballast}$ und dem Schotterzustand zu ermöglichen, wird ein Kennwert benötigt, der den Schotterzustand quantifiziert und aus den Prüfberichten der Schotterproben bestimmt werden kann. Zu den normativ und in der Literatur beschriebenen Kennziffern zählen die Ungleichförmigkeitszahl C_U [14], die Krümmungszahl C_C [14], der Index of Particle Breakage B_g [15], die Fouling Indices FI , FI_D und $FI_{Volumetric}$ [16 bis 18], Percentage Void Contamination PVC [19], der Void Contaminant Index VCI [20], Relative Ballast Fouling Ratio R_{b-f} [21] und der Ballast Breakage Index BBI [22]. Diese Kennziffern können aus unterschiedlichen Gründen nicht verwendet werden, da es sich (i) um relative Vergleiche einer Probe vor und nach einem Belastungstest handelt (B_g , BBI), (ii) die Kennziffer für andere als in [23] definierte Sieböffnungsweiten entwickelt wurde (FI), (iii) Volumen oder Dichte anstatt der Massen der Kornfraktionen erforderlich sind ($FI_{Volumetric}$, PVC, VCI, R_{b-f}), oder die Korngröße D_{10} bekannt sein muss (C_U , C_C , FI_D). Die Korngröße D_{10} ist aus der im Bereich 22,4 bis 80 mm bestimmten Sieblinie einer Schotterprobe nicht bestimmbar, wenn der Siebdurchgang der kleinsten Siebgröße 22,4 mm über 10 % liegt.

Da die erwähnten Kennziffern nicht ohne Adaption angewendet werden können, wird ein anderer Zugang gewählt, um eine direkte Korrelation zwischen dem Schotterkoeffizienten und dem im Labor mittels Sieblinie bestimmten Schotterzustand zu ermöglichen. Die vorgeschlagene Methodik entspricht einer gewichteten Summe der Siebdurchgänge (in Masse-Prozent) der kleinsten drei Siebweiten 22,4, 31,5 und

40 mm (für die Körnung 31,5/63 mm). Durch diese Summierung können die Massendurchgänge durch mehrere Siebe gemeinsam interpretiert werden. Die Siebdurchgänge bei kleineren Siebgrößen sind am stärksten gewichtet, da sie bei den jeweils größeren Sieben ebenso enthalten sind. Am stärksten berücksichtigt wird dabei die Verschmutzung durch die kleinste erfasste Korngröße von 22,4 mm. Um das Prinzip zu veranschaulichen, sind in Bild 5 die Sieblinien der Proben 2 und 6 (Zustandsklasse I und IV nach Bild 4) dargestellt und die gewichteten Summen, die entsprechend der beschriebenen Methodik berechnet wurden. Die eingetragenen Grenzen (Ober- und Untergrenze) gelten für Gleisschotter K1 lt. ÖBB-Regelwerk 07.09.17 [24] (angelehnt an Kategorie G_{CRB} B lt. Euronorm [23]). Für Probe 2 ergibt sich ein Summenwert von 53 % und für Probe 6 ein Summenwert von 143 %. Die Abstraktion der Sieblinie geht mit Informationsverlust einher, da die genauen Siebdurchgänge verloren gehen. Zudem bezieht sich der neue Referenzwert nur noch mit einer gewissen (hohen) Wahrscheinlichkeit auf den bezüglich der Gebrauchstauglichkeit relevanten Teil der Schotterverschmutzung. Bei stark ungleich verteilten Fraktionen ergibt sich eine fehlerhafte Beurteilung. Trotzdem zeigen die beiden Beispiele auf Grund der stark unterschiedlichen Summenwerte, dass die vorgestellte Methodik geeignet ist, den Schotterzustand unter Annahme einer üblichen Korngrößenverteilung quantitativ zu beschreiben.

Mit der beschriebenen Methodik werden nun aus den Sieblinien der in Bild 4 vorgestellten Schotterproben sowohl für das untere als auch das obere Schotterbett die gewichteten Siebdurchgänge berechnet. Folglich wird auch der Schotterkoeffizient separat für den oberen und unteren Bereich bestimmt (Median über zehn Schwellen, beprobtes Schwellenfach in der Mitte). Der untere Bereich des Schotterbetts wird von den Stopfpickeln zu etwa einem Drittel erfasst (siehe Bild 1). Bild 6 visualisiert den Zusammenhang zwischen dem gewichteten Summenwert der Sieblinie (22,4 bis 40 mm) und dem Schotterkoeffizienten $\beta_{Ballast}$. Die in Bild 6 geplotteten Werte zeigen eine eindeutige Korrelation zwischen dem tatsächlichen und dem mit der Stopfmaschine während des Eindringprozesses der Stopfpickel erfassten Schotterzustand. Für das untere Schotterbett und somit im für die Lastabtragung relevanten Bereich ergibt sich ein Pearson'scher Korrelationskoeffizient r von 0,89 (Grad des linearen Zusammenhangs) bei einem p -Wert von 0,007 (Signifikanz des Zusammenhangs), was eine statistisch signifikante Beziehung der beiden Variablen belegt. Bei Inklusion des oberen Schotterbetts in die Analyse, was wegen mangelnder Unabhängigkeit der Stichprobe mathematisch diskussionswürdig wäre, ergäbe sich ein identer Korrelationswert bei einer höheren Signifikanz (p -Wert= $1,75 \times 10^{-5}$). Die in Kapitel 4.1 erwähnte Probe 7 ist auch hier leicht auffällig (bei Weglassen der Probe steigt der Korrelationskoeffizient).

Die in diesem Kapitel dargestellten und beschriebenen Validierungsergebnisse zeigen, dass der Schotterkoeffizient $\beta_{Ballast}$ ein geeignetes Werkzeug ist, den Zustand des Schotterbetts innerhalb der Stopfzone (Bild 1) so weit zu erfassen, dass ein nachweisbarer Zusammenhang mit dem realen Zustand des gesamten Schotterbetts gegeben ist.

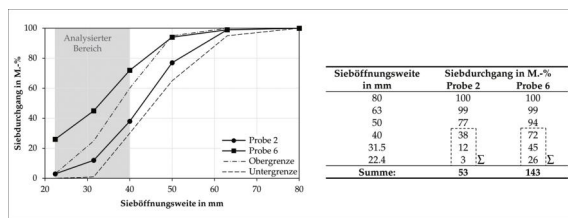


Bild 5: Sieblinien von Schotterproben mit sauberem (Probe 2; Zustandsklasse I) und stark verschmutztem Schotter (Probe 6, Zustandsklasse IV) sowie Tabelle mit den einzelnen und

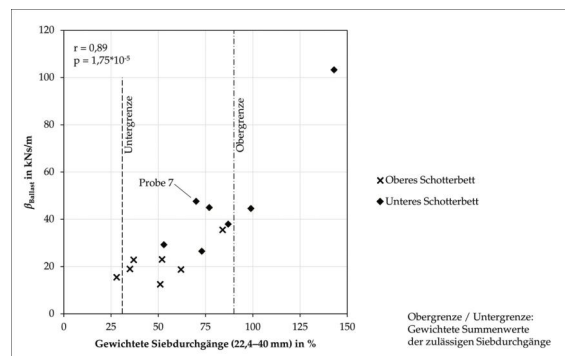


Bild 6: Zusammenhang zwischen tatsächlichem Schotterzustand laut gewichtetem Summenwert der Sieblinie und Schotterkoeffizient $\beta_{Ballast}$

5 Von der Forschung ins Feld

In einem nächsten Schritt wurde die oben beschriebene Schotterzustandsbestimmung weiterentwickelt, um sie direkt in Stopfmaschinen zu integrieren. Dafür wurde auf Basis des in Kapitel 2.1 beschriebenen Messequipments (Bild 2) ein speziell auf die Schotterevaluierung abgestimmtes Sensorsetup entwickelt (Bild 7). Hier lag der Fokus neben einer präzisen Messung besonders auf einer einfachen Integration sowie der langen Lebensdauer der einzelnen Komponenten. Dies konnte in mehreren Langzeittests (mehrere hunderttausend Stopfzyklen) bereits bestätigt werden.

Zusätzlich konnten die im Zuge des Forschungsprojekts entwickelten Analysealgorithmen so optimiert werden, dass auf einer Versuchsmaschine eine Echtzeitauswertung direkt im Arbeitsbetrieb möglich ist. Dabei wird der Schotterzustand beim Eindringprozess ermittelt und dem Bedienpersonal angezeigt. Zusätzlich kann sowohl der gemessene Schotterkoeffizient $\beta_{Ballast}$ als auch die Schotterklassifizierung in der Nachmessdokumentation dargestellt und künftig dem Infrastrukturbetreiber als zusätzliche Information zum Streckenzustand zur Verfügung gestellt werden.

Eine Echtzeitauswertung des Schotterzustands im Arbeitsbetrieb bietet außerdem die Möglichkeit, Stopfparameter auf Basis des ermittelten Zustands automatisiert zu adaptieren. Die Bestimmung des Schotterkoeffizienten beim Eintauchvorgang ermöglicht es, Arbeitsparameter an jeder Schwelle anzupassen, um eine durchgängig hohe Stopfqualität zu erzielen. Beide Systeme – Echtzeiterfassung des Schotterzustands und automatisierte Stopfparameteradaption – befinden sich testweise auf der in Österreich eingesetzten Universalstopfmaschine Unimat 09-8x4/4S BR Dynamic E³ im Feldeinsatz.

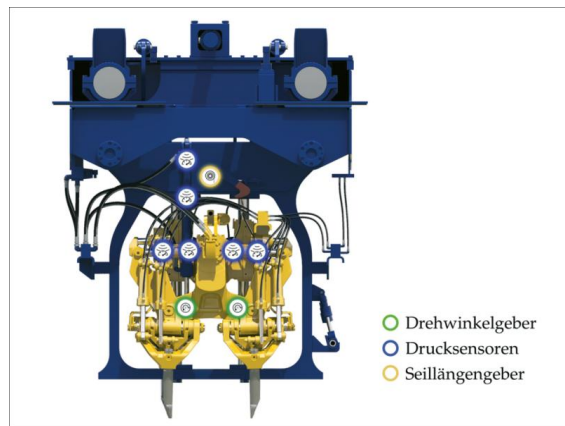


Bild 7: Schematische Darstellung der Sensorpositionen zur automatischen Schotterzustandsevaluierung

6 Fazit

In diesem Artikel wird eine Methodik vorgestellt, den Schotterzustand im Zuge von Stopfarbeiten während des Stopfprozesses zu erfassen. Zu diesem Zweck wurden seitens Plasser & Theurer die Stopfaggregate einer Universalstopfmaschine vom Typ Unimat 09-4x4/4S E³ mit umfangreicher Sensorik ausgestattet. Während regulärer Instandhaltungs- und Erneuerungsstopfungen wurden mit dieser Maschine im Jahr 2021 80 000 Schwellen im Netz der ÖBB und SBB bearbeitet und die Stopfprozesse messtechnisch erfasst. Diese Messdaten wurden umfassend analysiert und mit verfügbaren Informationen zum Anlagenzustand, darunter Anlagendaten (Gleisalter, Belastung, Schwellentyp), Georadarauswertungen, Streckenbegehungen und Notizen im Stopfprotokoll (z.B. Anmerkungen der Stopfbediener bei Auffälligkeiten im Schotterbett), verknüpft. Anhand dieser Auswertungen wurde ein Kennwert (Schotterkoeffizient β_{Ballast}) zur Beschreibung des Schotterzustands abgeleitet. Dieser Kennwert entspricht der auf die Eindringgeschwindigkeit normierten Vertikalkraft, die den Stopfaggregaten während des Eintauchvorgangs der Pickel entgegenwirkt. Mit zunehmender Verschmutzung der Bettung steigt der Eindringwiderstand und entsprechend erhöht sich der Schotterkoeffizient. Somit ist es möglich, den Schotterzustand bereits während des Eindringvorgangs der Stopfpickel in das Schotterbett (vor Beginn des eigentlichen Verfüll- und Verdichtprozesses) zu beschreiben. Schotterproben, die an ausgewählten Punkten entlang der gestopften Abschnitte entnommen und anschließend labortechnisch untersucht wurden, dienen als Validierung zum Abgleich mit den Maschinenmessdaten. Dabei konnte eine statistisch signifikante Korrelation zwischen dem Schotterkoeffizienten β_{Ballast} und dem tatsächlichen Schotterzustand,

ausgedrückt durch die Korngrößenverteilung der Schotterprobe, nachgewiesen werden. Die beschriebene Methodik soll künftig als Screening der bearbeiteten Abschnitte dienen. Für detaillierte Untersuchungen werden Schotterproben unverzichtbar bleiben, können aber auf Basis des von der Stopfmaschine erfassten Schotterzustands zielgerichteter eingesetzt werden.

Weitere Forschung soll einer Optimierung des Schotterkoeffizienten dienen und Resteinflüsse, die durch unterschiedliche Maschineneinstellungen und -konfigurationen entstehen können (z.B. Ein-Schwellen-Stopfaggregat vs. Mehr-Schwellen-Stopfaggregat), beseitigen. Auch eine automatisierte Adaption von Stopfparametern auf Basis des beim Eintauchprozess an jeder Schwelle ermittelten Schotterzustands ist Fokus der Forschung.

Literatur

- [1] Klotzinger, E.: Der Oberbauschotter – Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2008) 01+02, S. 34–41.
- [2] Klotzinger, E.: Der Oberbauschotter – Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen. ETR – Eisenbahntechnische Rundschau (2008) 03, S. 120–125.
- [3] Kuttelwascher, C.; Zuzic, M.: Oberbauschotter – Kompendium für Österreich. EIK (2013) 01, S. 100–126.
- [4] Barbir, O.: Development of Condition-Based Tamping Process in Railway Engineering – Operating Phases and Motion Behavior, Ballast Condition Determination, Ballast fluidization. Dissertation, TU Wien (2022).
- [5] Barbir, O.; Pistor, J.; Kopf, F.; Adam, D.; Auer, F.; Antony, B.: Gleisstopfen: Modellierung der Stopfpickel-Schotterbett-Interaktion. Geotechnik 42 (2019), 4, S. 219–228.
- [6] Landgraf, M.: Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn. Dissertation, TU Graz (2016).
- [7] Nievelt Labor GmbH, <https://nievelt.at/de/services/inspecting>, abgerufen am 16.10.2023.
- [8] Mapag Materialprüfung G.m.b.H, <https://www.mapag.at/gestein/>, abgerufen am 16.10.2023.
- [9] Forschungs- und Versuchsamt des Internationalen Eisenbahnwesens (ORE): ORE-Frage D 182: Einheitliche Beurteilungskriterien der Schotterqualität und Bewertungsmethoden des Schotterzustandes im Gleis. 1991.
- [10] ÖBB Infrastruktur AG: Interne Richtlinie zur Entnahme und

Beurteilung von Schotterproben.

[11] SBBAG: Interne Richtlinie zur Entnahme und Klassierung von Proben.

[12] Offenbacher, S.; Antony, B.; Barbir, O.; Auer, F.; Landgraf, M.: Evaluating the applicability of multi-sensor equipped tamping machines for ballast condition monitoring. Measurement 172 (2021).

- [13] Offenbacher, S.; Landgraf, M.; Marschnig, S.; Antony, B.; Koczwar, C.: Ballast condition monitoring with tamping machines. Publication of World Congress on Railway Research, Birmingham (2022), S. 1–6.
- [14] Austrian Standards International, EN ISO 14688-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen. (2019).
- [15] Marsal, R. J.: Large Scale Testing of Rockfill Materials. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division 93 (1967), S. 27–43.
- [16] Selig, E. T.; Waters, J. M.: Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford (1994).
- [17] Ionescu, D.: Ballast Degradation and Measurement of Ballast Fouling. 7th Railway Engineering Proceedings (2004), S. 169–180.
- [18] Ebrahimi, A.; Tinjum, J. M.; Edil, T. B.: Deformational behavior of fouled railway ballast. Canadian Geotechnical Journal 52 (2015) 3, S. 344–355.
- [19] Feldman, F.; Nissen, D.: Alternative testing method for the measurement of ballast fouling: percentage void contamination. Cost Efficient Railways through Engineering, Conference on Railway Engineering (2002).
- [20] Tennakoon, N.; Indraratna, B.; Nimbalkar, S.: Impact of ballast fouling on rail tracks. Proceedings of Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance (2014), S. 1–11.
- [21] Indraratna, B.; Su, L. J.; Rujikiatkamjorn, C.: A new parameter for classification and evaluation of railway ballast fouling. Canadian Geotechnical Journal 48 (2011) 2, S. 322–326.
- [22] Indraratna, B.; Nimbalkar, S.; Christie, D.: The performance of rail track incorporating the effects of ballast breakage, confining pressure and geosynthetic reinforcement. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields (2009).
- [23] Austrian Standards International, EN 13450-1: Gesteinskörnungen für den Gleisschotter – Teil 1: Produktstandard. 2021.
- [24] ÖBB Infrastruktur AG, Regelwerk 07.09.17: Oberbauschotter.