



Quelle: <https://www.zevrail.de/artikel/immer-reichlich-schotter-unter-der-schwelle-vollstaendige-verfuellung-als-basis-fuer-das>

---

2023 (Jahrgang 147) / Ausgabe 01/02 / Sprache: Deutsch

# Immer reichlich Schotter unter der Schwelle – vollständige Verfüllung als Basis für das perfekte Auflager

Autoren: Dipl.-Ing. Dr. mont. Christian Koczwar, Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Daxberger, Dipl.-Ing. Dr. techn. Samir Omerović

---

## Zusammenfassung

Während des Stopfens entsteht beim Heben und Richten ein Hohlraum unter der Schwelle. Dieser muss vollständig verfüllt werden, um ein stabiles Auflager zu schaffen. Durch die Überwachung des Vorganges ist es nun möglich, die vollständige Verfüllung Schwelle für Schwelle nachzuweisen sowie Langlebigkeit und Qualität der Gleislage zu optimieren.

---

## 1 Einleitung

Das System Bahn, das ein zunehmendes Personen- und Güteraufkommen immer schneller bewegt, stellt stetig steigende Ansprüche an die Sicherheit und Verfügbarkeit des Streckennetzes. Für den wirtschaftlichen Erfolg des Infrastrukturbetreibers ist eine langlebige, präzise Gleislage notwendig. Erreicht wird das durch die mechanische Durcharbeitung mittels Gleisstopfmaschine. Dies erhöht die Kapazität, senkt die Kosten und sorgt für ein positives Ergebnis. Plasser & Theurer trägt seit Jahrzehnten entscheidend zum Funktionieren dieses Systems bei. Viele Aktivitäten in Forschung und Entwicklung sind darauf ausgerichtet, den Stopfprozess noch effizienter zu gestalten sowie die Stopfqualität kontinuierlich zu verbessern, zu überwachen und zu dokumentieren.

In diesem Beitrag werden die einzelnen Phasen der mechanischen Durcharbeitung mittels Stopfmaschine und deren Relevanz für eine nachhaltige präzise Gleislage näher betrachtet. Davon ausgehend, werden aktuelle und laufende Entwicklungen vorgestellt, um die Haltbarkeit der Gleisgeometrie weiter zu verbessern. Schließlich wird ein Ausblick auf zukünftige Entwicklungen gegeben.

---

## 2 Die Stopfphasen

Die mechanische Durcharbeitung des Schotterbetts wird eingesetzt, um die gewünschte Gleislage (Längshöhe, Pfeilhöhe und Überhöhung, Mindestanforderungen sind z.B. in der EN 13848-5 festgelegt) herzustellen (bei Neulagen) bzw. wiederherzustellen (bei Erhaltungsmaßnahmen). Dazu wird der betreffende Gleisabschnitt, der je nach Aggregat ein bis vier Schwellen umfasst, vom Hebe- und Richtaggregat entsprechend der geforderten Gleislage angehoben und positioniert. Für die geänderte Schwellenposition muss nun ein stabiles Auflager geschaffen werden. Dazu wird zunächst der durch die Hebung und gegebenenfalls auch durch die Änderung der Überhöhung entstandene Hohlraum verfüllt. In dieser Phase des Stopfprozesses tauchen die Pickel ein und befördern durch die Beistellbewegung den Schotter von den Schwellenzwischenfächern unter die Schwelle.

Ist der Hohlraum unter der Schwelle gefüllt, wird durch die Vibrationsbewegung (35 Hz) der Gleisschotter in diesem Bereich verdichtet. Da der Schotter nicht mehr ausweichen kann, baut sich unter der Schwelle durch die Beistellbewegung eine hydrostatische Spannung (Druck von allen Seiten) auf. Bild 1 zeigt die verschiedenen Phasen des Stopfvorganges.

Während des Verdichtens sorgen die Schläge der Pickel auf den Schotter für eine zunehmende Verdichtung des Schottergefüges, während der Kontaktverlust bei der Rückbewegung des Pickels genug Platz lässt, damit sich die Schotterkörner zu einer noch dichteren Konfiguration umordnen können [1, 2].

Soll die präzise Gleislage möglichst lange erhalten bleiben, muss in der Verdichtungsphase eine möglichst hohe Verdichtung erreicht werden. Die folgende Verkehrsbelastung führt unweigerlich zu einer weiteren Verdichtung des Auflagers. Je mehr dieser Verdichtung schon durch das Stopfen vorweggenommen wird, umso weniger Nachverdichtung findet durch die Verkehrsbelastung statt und umso besser bleibt die Gleislage erhalten. Wird im Vergleich dazu auf einen Zielwert verdichtet, kommt es durch die Verkehrsbelastung zu einer stärkeren Nachverdichtung [3], verbunden mit einer größeren ungerichteten Setzung, und die Gleislagequalität nimmt schnell ab.

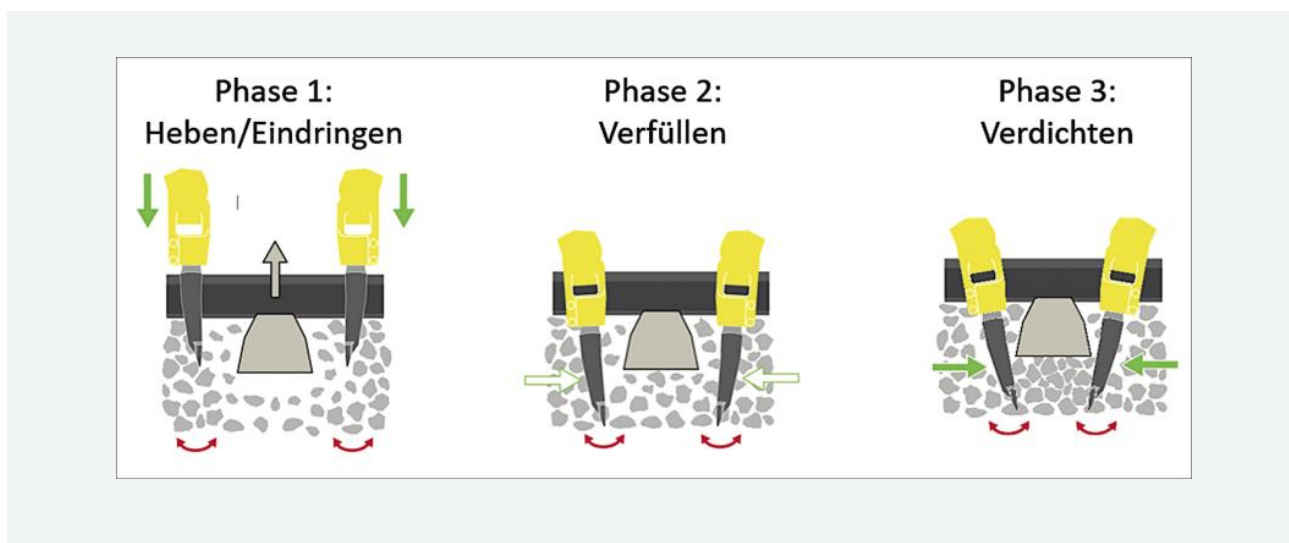


Bild 1: Die Schwelle wird gehoben, darunter entsteht ein Hohlraum (Phase 1), die Beistellbewegung sorgt für die Verfüllung (Phase 2), anschließend erfolgt die Verdichtung durch die Vibrationsbewegung (Phase 3).

### 3 Der Verfüllprozess

Die Verfüllung der beim Heben/Richten entstandenen Hohlräume ist die Grundlage für die Herstellung einer präzisen und langlebigen Gleislage [4]. Nur wenn der im Regelverkehr belastete Bereich unter der Schwelle entsprechend gefüllt und auch verdichtet wird, kann die gewünschte Gleisgeometrie dauerhaft erhalten werden. Der logische nächste Schritt ist daher die Entwicklung und Implementierung eines technischen Monitoring-Systems, das genau diesen Verfüllprozess überwacht, um die Qualität der Stopfarbeit noch weiter zu verbessern. Das von Plasser & Theurer entwickelte Monitoring-System basiert auf der Widerstandsänderung, wenn der durch die Hebung der Schwelle erzeugte Hohlraum wieder verfüllt wird. Während des Vorganges ist die hydrostatische Spannung des Schotters sehr gering, da er sich in Richtung des Hohlraums weitgehend ungehindert bewegen kann. Dadurch ist auch der Widerstand gering, den die Schotterkörner beim Verfüllen erfahren, und die Beistellbewegung erfolgt, je nach eingestellter Beistellkraft, mit vergleichsweise hoher Geschwindigkeit. Steigt der Widerstand im Schotter aufgrund der ausreichenden Verfüllung an, wirkt sich das je nach der verwendeten Regelgröße beim Stopfprozess unterschiedlich aus. Wird beispielsweise die Geschwindigkeit oder der zu erreichende Beistellweg (Differenz der Pickelposition zwischen Anfang und Ende der Beistellbewegung) als Regelgröße verwendet, muss die Kraft erhöht werden. In Kombination mit den zusätzlich für die Verdichtung notwendigen dynamischen Kräften kann dies den Kornbruch erhöhen. Beim asynchronen Gleichdruckstopfen ist die quasistatische Beistellkraft die vorgegebene Regelgröße. Dadurch steigt bei reduziertem Widerstand die Beistellgeschwindigkeit an und nimmt bei steigendem Widerstand ab.

Durch die gleichbleibende quasistatische Beistellkraft wird nicht nur ein schotterschonender

Beistellvorgang erreicht, sondern auch eine automatische Anpassung an die Gleis- und Arbeitsbedingungen. Als Beispiel soll hier ein Stopfprozess mit hohen Hebewerten dienen. Durch die hohe Hebung (bis zu 100 mm) entsteht unter der Schwelle ein großer Hohlraum, der verfüllt werden muss, um ein stabiles Auflager zu schaffen. Dadurch ist zu Beginn des Beistellprozesses der Widerstand gering, was zu einer schnellen Beistellbewegung führt. Ab dem Zeitpunkt der vollständigen Verfüllung nimmt der Widerstand zu, wodurch die weitere Pickelarmbewegung deutlich langsamer ausfällt (Bild 2 a)). Die Beistellbewegung kompensiert nun das durch die Verdichtung kleiner werdende Volumen. Diese automatische Anpassung hat einen enormen Vorteil: Immer dann, wenn viel Schotter unter die Schwelle bewegt werden muss (z.B. bei hohen Hebewerten), sorgt die erhöhte Beistellgeschwindigkeit für bessere Verfüllung. Bild 2 b) und Bild 2 c) zeigen die gemessene Beistellbewegung (Pickelposition) für den Fall der unvollständigen und der vollständigen Verfüllung. Dabei ist deutlich erkennbar, dass bei Erreichen der Verfüllung die Beistellgeschwindigkeit einbricht (geringere Steigung). Bei unvollständiger Verfüllung ist dieser Einbruch nicht zu bemerken, die Kurve verläuft während des gesamten Beistellprozesses annähernd linear.

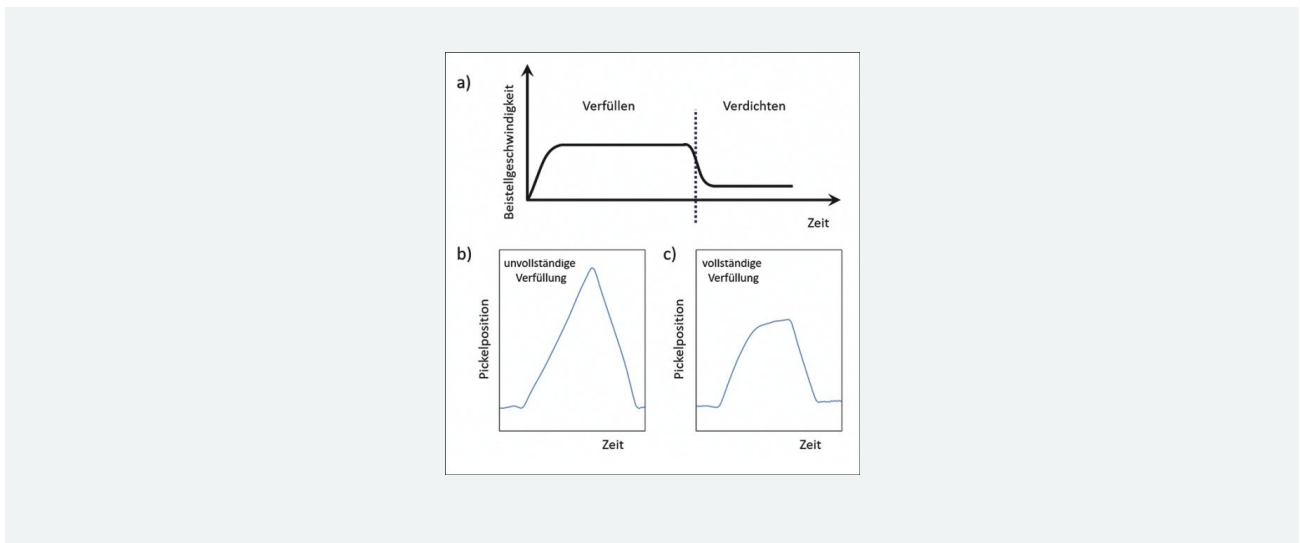


Bild 2: Schematische Darstellung der Beistellgeschwindigkeit beim Verfüll- und Verdichtprozess. a) Gemessene Beistellbewegung bei unvollständiger b) und vollständiger c) Verfüllung. Beide Kurven wurden mit gleichen Arbeitsparametern (Stopfdruck, Beistellzeit, Eindringtiefe, Hebung und Schwellentyp) aufgezeichnet.

## 4 Monitoring des Verfüllprozesses

Der Bediener kann diesen Verfüllprozess derzeit technisch nicht kontrollieren oder überwachen. Einziger indirekter Indikator ist eine große Geometrieabweichung direkt nach der Stopfung (das Gleis bleibt nicht in der gewünschten Position). Um eine ausreichende Verfüllung unter der Schwelle zu gewährleisten, gibt es zahlreiche Richtlinien und Arbeitsempfehlungen wie z.B. Mindestbeistellzeit und Anzahl der

durchgeführten Stopfeingriffe in Abhängigkeit von der benötigten Hebung – alle sind länderspezifisch und basieren weitgehend auf Erfahrungswerten. Obwohl damit gute Ergebnisse erzielt werden konnten, ist auch bei Einhaltung der Empfehlungen eine optimale Verfüllung nicht garantiert. Besonders immer höhere Streckenverfügbarkeiten in Kombination mit längeren Wartungsintervallen und höheren Belastungen erfordern es, auch diesen Prozess überwachen zu können. Aus diesem Grund ist der Maschinenbediener auf unzureichende Verfüllung direkt nach der Stopfung hinzuweisen.

Plasser & Theurer hat für diese Problemlage ein System entwickelt, das die Beistellgeschwindigkeit jedes einzelnen Pickelarmes individuell überwacht. Am Ende eines Stopfvorganges wird dem Bediener die End-Beistellgeschwindigkeit in  $\frac{mm}{s}$  und der Schotterwiderstand, charakterisiert durch den Schotterwiderstandsbeiwert  $\gamma_{ballast}$ , am Ende des Beistellvorganges in  $\frac{N}{mm/s}$  angezeigt. Letzterer ist wie folgt definiert:

$$\gamma_{ballast} = \frac{F_{Ende}}{v_{Ende}} \quad | \quad 1$$

mit

$$v_{Ende} = \frac{\Delta x_{Ende}}{\Delta t_{Ende}} = \frac{x_{t_{Ende}} - x_{t_0}}{t_{Ende} - t_0}, \quad | \quad 2$$

wobei  $\Delta t_{Ende} = t_{Ende} - t_0$  hier mit 0.1 s definiert ist. Dabei beschreibt  $F_{Ende}$  die über die Drücke im Beistellzylinder berechnete Kraft an der Pickelspitze.  $\Delta x_{Ende}$  ist in Bild 3 a) dargestellt.

Auf Basis dieser Information kann der Bediener bei unzureichender Verfüllung einen zusätzlichen Stopfeingriff einleiten. Die Praxis zeigt, dass lediglich eine Erhöhung der Beistellzeit nicht immer ausreichend ist. Bei der Verfüllung sehr großer Hohlräume oder wenn wenig Schotter im Schwellenzwischenfach vorhanden ist, kann auch bei vollständiger Ausnutzung des technisch möglichen Beistellwegs keine ausreichende Verfüllung erzielt werden. Die Beistellgeschwindigkeit wird auch bei sehr langer Beistellzeit nicht merkbar abnehmen. In solchen Fällen ist ein zusätzlicher Stopfeingriff die bessere Lösung.

Für die Umsetzung dieses Monitoring-Systems müssen mehrere Messwerte kontinuierlich erfasst und analysiert werden. Deshalb werden zusätzlich zu den standardmäßig verbauten Sensoren noch Drucksensoren zur Beistellkraftmessung sowie ein eigens entwickelter Sensor zur Bestimmung der exakten Pickelposition verwendet. Die Sensordaten werden auf einer selbst entwickelten Microcontroller-Hardware ausgewertet und die Resultate direkt an die Maschinensteuerung übermittelt. Beispielhaft zeigt Bild 3 b) den Verlauf des gemessenen Schotterwiderstandsbeiwertes sowie der entsprechenden Beistellgeschwindigkeit in einem Feldversuch. Dabei wurde eine unvollständige Verfüllung der Hohlräume künstlich herbeigeführt (erzeugt durch eine Reduktion des für die Verfüllung zur Verfügung stehenden

Schotters im Schwellenzwischenfach). Die Arbeitsparameter (Hebung, Beistellzeit, Beistelldruck) wurden hier nicht verändert. Die stark ansteigende Beistellgeschwindigkeit sowie der stark abfallende Schotterwiderstandsbeiwert, in Abhängigkeit von der erreichbaren Verfüllung, sind deutlich sichtbar. Dieses System wurde erstmals bei 2021 ausgelieferten Maschinen vom Typ 09-3X NG Dynamic beim Kunden eingesetzt, wobei dem Bediener zusätzlich zur Beistellgeschwindigkeit auch die Eindringtiefe und die Beistellkraft rechts/links angezeigt werden. Mit diesen Informationen ist es nun möglich, sonst unentdeckt bleibende Hohllagen direkt bei der Durcharbeitung zu erkennen und darauf zu reagieren. Dadurch werden Einzelfehler vermieden und damit die Haltbarkeit der Gleislage weiter verbessert. Zusätzlich werden die aufgezeichneten Daten am digitalen Messschreiber (DRP) erfasst und stehen somit dem Infrastrukturbetreiber zur Verfügung.

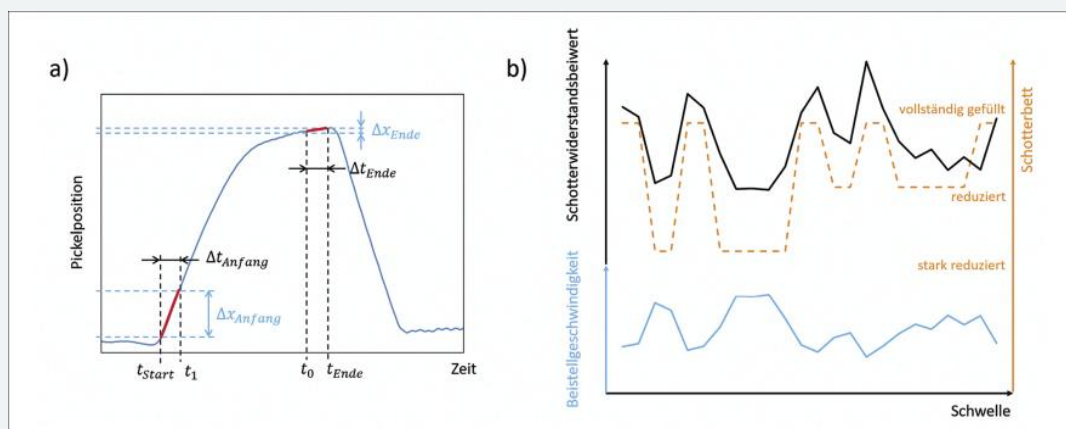


Bild 3: a) Verlauf der Beistellbewegung bei vollständiger Verfüllung. b) Feldversuch, um die Auswirkung unzureichender Verfüllung auf Schotterwiderstandsbeiwert und Beistellgeschwindigkeit darzustellen.

## 5 Auswirkung unzureichender Verdichtung

Wird eine unzureichende Verfüllung unter einer Schwelle nicht erkannt, führt dies unweigerlich zu einem Einzelfehler. Die ordnungsgemäße Verfüllung unter der Schwelle ist somit die Basis für die Herstellung einer präzisen und langlebigen Gleislage. Nur bei einer ausreichend verfüllten Schwelle kommt es zur optimalen Verdichtung im am höchsten beanspruchten Bereich (direkt unter der Schwelle). Unzureichende Verdichtung trägt nicht nur zur schnellen Verschlechterung der Gleislage, sondern auch zum „Ballast Fouling“ bei. Der Grad der Verdichtung beeinflusst nicht zuletzt auch das Bruchverhalten des Schotters. Geringe Verdichtung führt zu überproportionalem Absplittern der Schotterkornkanten und in weiterer Folge zu hohen Verschlechterungsraten und inhomogener Setzung. Hohe Verdichtung hingegen führt eher

---

zu Brüchen innerhalb der Schotterpartikel. Dies hat nur unwesentliche Auswirkung auf den „Fouling Index“ [5, 6]. Die (gleichmäßige) Verdichtung auf einen Zielwert hin scheint vernünftig, bringt aber bei genauerer Betrachtung einige Probleme mit sich. Aus den genannten Gründen ist daher immer die mit der jeweiligen Technik bestmögliche Verdichtung anzustreben.

## 6 Ausblick

Das System Gleis ist nicht nur hochkomplex (Zusammenspiel Schotter, Schwelle, Gleis etc.) und regional sehr unterschiedlich, es ist auch laufenden Veränderungen unterworfen. Umwelteinflüsse und Belastungen im Regelbetrieb verändern kontinuierlich das gesamte System, nicht nur die Gleisgeometrie. Daher müssen Stopfmaschinen so konstruiert und betrieben werden, dass sie unter allen Einsatzbedingungen optimale Ergebnisse liefern. Das bewährte Asynchron-Gleichdruckstopfprinzip hat sich über Jahrzehnte als äußerst effektiv erwiesen, besonders dank der automatischen Anpassung an den Schotterwiderstand.

Stopfmaschinen von Plasser & Theurer setzen im Kern weiter auf diese erprobte Technologie und kombinieren diese mit modernster Sensorik und Regelungstechnik, um die Maschinenbediener Schritt für Schritt zu entlasten. So können Arbeitsparameter gezielt an den Zustand des Systems Gleis angepasst werden. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, muss der gesamte Arbeitsprozess überwacht und gegebenenfalls auf veränderte Bedingungen reagiert werden (z.B. zusätzlicher Stopfeingriff bei unzureichender Verfüllung). Neben dem bestmöglichen Arbeitsergebnis wird so auch ein schonender Betrieb der Maschine gewährleistet. Gleichzeitig entwickelt sich das Arbeitsaggregat zum integrierten Messsystem, dessen Möglichkeiten weit über die bekannte Nachmessdokumentation hinausgehen. Das Maschinenpersonal wird bei der Herstellung einer langlebigen und präzisen Gleislage unterstützt und der Infrastrukturbetreiber gewinnt wertvolle Daten und Einsichten zum Zustand der Gleisinfrastruktur.

---

## Literatur

- [1] Barbir O, Adam D, Kopf F, Pistol J, Auer F, Antony B.: Development of condition-based tamping process in railway engineering. *ce/papers* 2018; 2 (2-3): 969–74.
- [2] Barbir O, Pistol J, Kopf F, Adam D, Auer F, Antony B.: Gleisstopfen: Modellierung der Stopfpickel-Schotterbett-Interaktion. *geotechnik* 2019; 42 (4): 219–28.
- [3] Auer F., Antony B., Kopf F., Koczwar C.: Präzise Gleislage durch innovative Stopfmaschinen Teil 1: Entwicklung der Bodenverdichtung. *EI – Der Eisenbahningenieur*, Heft 2-2021; S. 32-35.
- [4] Auer F., Zuzic M., Schilder R., Breymann H.: 13 years of experience with rail-mounted formation rehabilitation on the Austrian network. *RTR* 2008, 29–36.
- [5] Lackenby J, Indraratna B, McDowell G, Christie D.: Effect of confining pressure on ballast degradation and deformation under cyclic triaxial loading. *Géotechnique* 2007; 57 (6): 527–36.
- [6] Indraratna B, Lackenby J, Christie D.: Effect of confining pressure on the degradation of ballast under cyclic loading. *Géotechnique* 2005; 55 (4): 325–8.