

Diploma Thesis

# **Tamping process in Railway Engineering**

## **State of the art**

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## **Gleisstopfverfahren im Eisenbahnwesen**

### **Stand der Technik**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Robin Bayerhofer, BSc**

Matr.Nr.: 01125978

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. **Olja Barbir**

Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13, A-1040 Wien

Wien, Oktober 2018



# Kurzfassung

Das Gleisbett aus Schotter stellt im System Schiene, Schwelle und Befestigungsmittel das „schwächste“ Glied des Bahnoberbaus dar, dessen Hauptaufgabe darin besteht, die hohen Lasten aus dem Zugverkehr möglichst gleichmäßig auf den Unterbau zu verteilen bzw. abzuleiten. Aus diesem Grund ist der Alterung des Schotters, bedingt durch die thermischen Einflüssen aus der Witterung bzw. der mechanischen Beanspruchung aus dem Zugverkehr, besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Daraus resultiert ein kontinuierlicher Verlust der Soll-Lage der Schienen, der eben auf die im Laufe der Zeit immer schlechter werdenden Eigenschaften des Gleisschotters zurückzuführen ist. Beim Versuch die Schwellen durch den Stopfvorgang wieder in ihre Soll-Lage zu bringen, wird die Alterung durch die Zertrümmerung des Schotters zusätzlich beschleunigt. Um diese Lagefehler der Gleise in Höhe und Richtung zu korrigieren, aber auch die Betriebssicherheit und den Fahrkomfort aufrechtzuerhalten, muss die Gleisanlage durch möglichst schonende Stopf- und Stabilisierungsarbeiten in regelmäßigen Zeitintervallen instandgehalten werden. Durch die ständige Weiterentwicklung der Technologie hat sich der Stopfvorgang selbst, im Speziellen die Justierung der Maschinen, zu einem äußerst komplexen Prozess entwickelt. Viele Stopfparameter beeinflussen die Qualität des Vorgangs maßgebend.

Die Stopffrequenz sollte beispielsweise bei etwa 35 Hz liegen, um einen möglichst hohen Verdichtungserfolg zu erzielen. Hierbei entsteht eine Auftriebskraft, die eine bleibende Hebung generiert. Wird die Frequenz höher, beginnt der Schotter zu fließen, was eine Absenkung der Schwelle bzw. eine unkontrollierbare Verdichtung mit sich bringen kann. Bei niederen Frequenzen wird die Schwelle zwar angehoben, erschwert aber das Eindringen der Stopfpickel in den Schotter. Um die Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Instandhaltungsarbeiten weiter zu verbessern sind möglichst realitätsnahe Modellversuche notwendig. Aufwändige numerische Simulationen können ebenfalls zu einem besseren Verständnis der Mechanismen des Gleisschotters unter zyklisch-dynamischer Belastung führen. Künftig sollten praxistauglichere Modelle entwickelt werden, um diese auch in die Planung von Instandhaltungsstrategien integrieren zu können.

Um die durch den Stopfvorgang nur punktuell unter den Schwellen erreichte Verdichtung zu homogenisieren, kommt nach dem Stopfvorgang der dynamische Gleisstabilisator zum Einsatz. Hier wird an den Gleisen eine horizontal gerichtete Schwingung induziert. Bei gleichzeitiger lotrechter Belastung wird der Schotter durch die Vibrationen schonend in eine geordnete, flächendeckende, homogene Lagerung gebracht. Nach dem Stabilisieren weist das Schotterbett höhere Festigkeiten auf. Somit wird eine verbesserte Gleislage über eine längere Dauer erzielt und auch der Querverschiebewiderstand der Schwellen wird maßgeblich erhöht.



# Abstract

Ballast layer, together with rails and sleepers, is the key element of the quasi-elastic track system, transferring the traffic loads to the subsoil. Durability and stability of railway tracks is greatly influenced by the ballast layer, making the compaction and stability of the ballast beneath the sleeper a very important subject.

Over the course of history, the process of track maintenance in railway engineering advanced from manual to mechanical work and the working parameters were optimized based on empirical observations. Railway tracks must be maintained in regular intervals to reverse the positional errors of the track geometry and to maintain the travelling comfort and safety. Track maintenance includes levelling, lifting, lining and tamping of the track, carried out by the tamping unit and followed by the dynamic track stabilizer. Tamping frequency is one of the fundamental parameters in achieving the desired result during ballast compaction. When working with a higher frequency, the ballast begins to float uncontrollably, hindering the desired heave of the ballast bed and causing possible settlements beneath the sleeper. Should the tamping be performed with a lower frequency, the compaction can be performed, but a higher energy input is required for both ballast penetration and compaction.

A dynamic track stabilizer is used succeeding the tamping process to raise the track's resistance to lateral displacement and consolidate the ballast bed. Horizontally orientated vibrations acting crosswise to the track are induced and transferred to the ballast bed achieving a virtually force-free re-arrangement of the ballast stones thus producing a stable and consolidated ballast structure. The stabilization process generates the anticipated initial track settlements intentionally and in a controlled way, resulting in a more durable track geometry.

Considering the complexity of the maintenance process, a possibility for further development in this sector becomes apparent.



# Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die dazu beigetragen haben, dass diese Diplomarbeit zu dem geworden ist, wie sie jetzt ist. Der Dank gilt nicht nur denen, die mich in fachlicher Hinsicht dabei unterstützt haben, sondern besonders auch denjenigen, die mir im Laufe meines Studiums und im Speziellen beim Verfassen meiner Abschlussarbeit in seelischer Hinsicht Kraft und Motivation geschenkt haben.

Mein Dank geht an Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, der meine Diplomarbeit betreut und begutachtet hat. Für Anregungen und konstruktive Kritik möchte ich mich bedanken.

Ein Besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Olja Barbir, die keine Mühen gescheut, mir auch in ihrer Freizeit bei dringenden Angelegenheiten stets geholfen und die nötige Geduld für mich aufgebracht hat.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern Alice und Robert bedanken, die mir mein Studium erst ermöglicht und mir das nötige Rüstzeug mit auf meinen Weg gegeben haben. Schlussendlich gilt mein größter Dank meiner Verlobten und langjährigen Freundin Karina, die mich durch mein gesamtes Studium begleitet hat, mir, ganz speziell in schlechteren Zeiten, Kraft, Mut und Motivation gegeben hat und zudem viel Geduld für mich und meine Taten aufbrachte. Danke Karina.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung .....	1
1.2 Motivation, Zielsetzung und Gliederung der Arbeit.....	2
<b>2. Schotterbett</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemeines .....	3
2.2 Mineralien und Gesteinsarten .....	3
2.2.1 Allgemeines .....	3
2.2.2 Gängige Gesteinsarten für den Oberbauschotter .....	4
2.2.2.1 Granit.....	4
2.2.2.2 Granitporphyr .....	4
2.2.2.3 Granulit.....	5
2.2.2.4 Dunit.....	5
2.2.2.5 Basalt.....	5
2.2.2.6 Diabas.....	6
2.2.2.7 Kalkstein und Dolomit.....	7
2.3 Einblick in die Normen .....	7
2.3.1 ÖNORM EN 13450:2014: Gesteinskörnungen für Gleisschotter.....	7
2.3.2 ÖNORM EN 1097-X: Prüfverfahren .....	8
2.4 Gleisschotter – Eigenschaften und Anforderungen .....	8
2.4.1 Stoffliche Eigenschaften .....	10
2.4.1.1 Verwitterungsbeständigkeit .....	10
2.4.1.2 Zähigkeit und Härte .....	10
2.4.2 Granulometrische Eigenschaften .....	11
2.4.2.1 Lieferbedingungen in Österreich (ÖBB).....	13
2.5 Untersuchungsmethoden .....	14
2.5.1 Los-Angeles-Prüfverfahren nach EN 1097-2.....	14
2.5.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung: .....	14
2.5.2 Schlagfestigkeit/Schlagzertrümmerung nach EN 1097-2.....	15
2.5.3 Micro-Deval Versuch (Widerstand gegen Verschleiß) nach EN 1097-1.....	16
2.6 Alterung von Gleisschotter und dessen Einfluss auf die Verdichtbarkeit.....	17
2.6.1 Verschmutzung des Gleisschotters .....	17
2.6.2 Auswirkung von Stopfarbeiten auf die Verschlechterung des Gleisschotters .....	19
2.6.3 Verschmutzungsgrad als Werkzeug für die Instandhaltungsstrategie .....	21
2.6.4 Korrelation zwischen LA-Koeffizient und anderen Labortests .....	24

2.6.5	Untersuchungen in-situ zur Feststellung des Verschmutzungsgrades .....	26
2.7	Lastverteilungs- und Lastabtragungsverhalten des Gleisschotters.....	28
2.7.1	Schotterbettstärke.....	28
2.7.2	Innerer Reibungswinkel des Gleisschotters.....	29
2.7.3	Scherfestigkeit des Schotters.....	30
2.7.3.1	Statisches Scherverhalten .....	30
2.7.3.2	Dynamisches Scherverhalten .....	31
2.7.4	Querverschiebewiderstand .....	33
2.7.5	Theorie der Hertz'schen Pressung.....	33
2.7.6	Lastausbreitung und Lastverteilung .....	35
2.7.7	Sohlpressungen, Schotter- und Bodendruckspannungen .....	37
2.7.8	Bettungsmodul .....	37
2.8	Verfahren zur Modellierung des Gleisschotters .....	40
2.8.1	Verifizierung der Modellierung mittels Feld- und Laborversuchen .....	40
2.8.2	Modellierung von Gleisschotter mittels Bildanalyse.....	43
2.8.3	Numerische Modellierung des Stopfprozesses .....	47
2.9	Schotterfließen .....	51
2.9.1	Allgemeines .....	51
2.9.2	Begriffsabgrenzung.....	52
2.9.3	Feldversuch und Analyse .....	52
2.9.4	Auswertung und Ergebnisse.....	53
<b>3.</b>	<b>Gleisstandhaltung - Stopfen</b> .....	<b>55</b>
3.1	Notwendigkeit des Stopfens.....	55
3.2	Aufbau und Funktionsweise eines konventionellen Stopfaggregats .....	58
3.2.1	Exzenterwelle .....	58
3.2.2	Beistellzylinder .....	58
3.2.3	Stopfpickel.....	58
3.2.4	Allgemeine Funktionsweise eines Stopfaggregats .....	58
3.3	Maschinelle Stopf-Richtarbeiten.....	59
3.3.1	Stopfaggregat .....	59
3.3.2	Hebe- und Richtaggregat .....	59
3.3.3	Mess- und Kontrollmesssysteme.....	60
3.4	Forschung als Basis für den Fortschritt .....	60
3.4.1	Optimale Frequenz.....	61
3.4.2	Beistellweg in Abhängigkeit zur Amplitude .....	62
3.4.3	Beurteilung der Güte der Stopfwirkung .....	63
3.4.4	Beistellgeschwindigkeit .....	64
3.5	Berichtigung der Gleislage.....	65
3.5.1	Nivellieren .....	66
3.5.1.1	Messung der Längshöhe .....	66
3.5.1.2	Messung der Quershöhe .....	66
3.5.2	Berichtigung der Gleislage durch Hebe- und Richtaggregate .....	66

3.5.2.1	Optimale Hebung – „Design Stopfen“ .....	68
3.5.3	Stopftiefe .....	70
3.6	Zusatzeinrichtungen für Stopfmaschinen .....	71
3.6.1	Digitale Aufzeichnungssysteme .....	71
3.7	Gegenüberstellung gängiger Stopftechnologien .....	74
3.7.1	Technologie der Firma Plasser & Theurer – Asynchrone Gleichdruckstopfung ....	74
3.7.1.1	Stopfparameter – Amplitude, Frequenz, Beistellzeit und Stopfdruck ....	75
3.7.1.2	Integrierte Drehzahlregelung – Frequenzmodulation .....	76
3.7.1.3	Stopfpickel .....	77
3.7.2	Stopfaggregate der Firma MATISA – Hochfrequenz-Elliptik-Stopfverfahren .....	77
3.7.3	Technologie der Firma System 7 – Vollhydraulisches Stopfaggregat .....	78
3.7.4	Steinblasverfahren – Stoneblowing .....	82
<b>4.</b>	<b>Dynamische Gleisstabilisation</b> .....	<b>85</b>
4.1	Aufbau und Funktionsweise .....	85
4.1.1	Allgemeines .....	85
4.1.2	Prinzip der dynamischen Gleisstabilisation .....	85
4.1.3	Arbeitsweise .....	86
4.2	Räumliche Wirkung der Verdichtung .....	86
4.2.1	Einflüsse auf die Wirkung der dynamischen Gleisstabilisation .....	87
4.2.1.1	Einfluss der Frequenz .....	88
4.2.1.2	Einfluss der aufzubringenden Vertikallast .....	88
4.2.1.3	Dynamische Schlagkraft des dynamischen Gleisstabilisators .....	88
4.2.1.4	Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit .....	89
4.3	Erhöhung des Querverschiebewiderstands und Messungen in-situ .....	89
4.3.1	Sohlreibung .....	89
4.3.2	Schwellenflankenwiderstand .....	89
4.3.3	Vorkopfwiderstand .....	89
4.3.4	Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den Zwischenfachverdichter ....	90
4.3.5	Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den Vorkopfverdichter .....	90
4.3.6	Versuchsdurchführung zur Messung des Querverschiebewiderstands .....	91
4.3.6.1	Messaufbau .....	91
4.3.6.2	Versuchsdurchführung .....	92
4.3.6.3	Versuchsergebnisse .....	92
4.3.7	Instandhaltungsarbeiten und ihr Einfluss auf den Querverschiebewiderstand .....	93
4.3.7.1	Konkrete Einflüsse von Instandhaltungsarbeiten auf den Querverschiebewiderstand .....	93
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>95</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>97</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>101</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>103</b>



# 1. Einleitung

## 1.1 Einführung

Grundsätzlich besteht ein gewöhnlicher Gleisoberbau aus Schienen, deren Befestigungen, aus querverlegten Schwellen und dem Schotterbett. Als Übersicht für eine Vorbemessung des Oberbaus können folgende Standardwerte angenommen werden: [15]

- Schwellenlänge ca. 260 cm
- Schwellenbreite ca. 28 bis 30 cm
- Schwellenabstand ca. 60 cm
- Bettungsdicke mind. 30 cm (40 cm bei Hochleistungsstrecken)
- Schottervorkopf ca. 45 bis 50 cm
- Neigung der Bettungsflanke ca. 1:1,25 bis 1:1,5

Die Genauigkeit der Lage der Schienen ist eine der essenziellsten Grundlagen für einen reibungslosen Zugverkehr. Der Betriebsverkehr und die dadurch einwirkenden horizontalen und vertikalen Belastungen haben großen Einfluss auf die Lagegenauigkeit und Beständigkeit der Gleislage. Die Schotterbettung hat dabei wichtige Aufgaben zu erfüllen. Zum einen sollen die hohen statischen und dynamischen Lasten möglichst gleichmäßig und verformungsarm in den Untergrund abgetragen werden. Zum anderen muss eine ausreichende Drainage gewährleistet werden und möglichst beständige Schottermaterialien Verwendung finden, um Instandhaltungskosten möglichst gering zu halten.

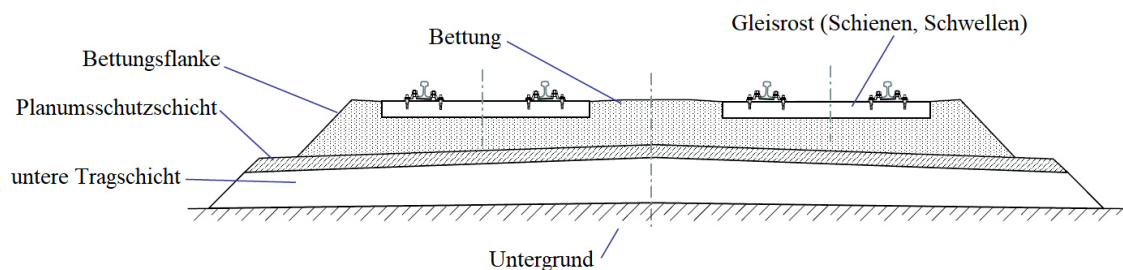


Abbildung 1.1: Typischer Querschnitt durch einen zweigleisig Bahntrasse, adaptiert nach [22]

Setzungen in der Schotterbettung unter den Schwellen führen zu Gleislagefehlern, die ab gewissen Schwellwerten einen normalen Betrieb des Verkehrs nicht mehr zulassen. Maßnahmen, wie Langsamfahrstellen, sind notwendig, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten.

Um dies zu vermeiden, sind in regelmäßigen Abständen Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten am Oberbau durchzuführen. Zum einen werden die Gleise durch die Instandhaltungsarbeiten wieder in ihre Soll-Lage gebracht. Zum anderen soll dafür gesorgt werden, dass durch das Unterstopfen der Schwellen möglichst gleichmäßige Auflagerbedingungen geschaffen werden, um Hohllagen der Schwellen zu minimieren.

Durch die Stopfarbeiten wird jedoch in die bestehende Schottermatrix eingegriffen. Dadurch wird der Querverschiebewiderstand der Schwellen stark herabgesetzt. Ebenso können durch das Gleisstopfen nur begrenzte Bereiche im Schotterbett verdichtet werden. Um die geforderte Qualität und Homogenität der Verdichtung zu erreichen, wird die Bettung im Anschluss an die Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten durch eine dynamische Gleisstabilisation gleichmäßiger verdichtet. Dabei wird das Gleis mit horizontal gerichteten Schwingungen angeregt, wodurch die Schotterkörner in eine dichtere Lagerung wechseln. Durch die Stabilisierung der Schottertragschicht werden zudem auftretende Anfangssetzungen vorweggenommen. Dadurch kann das Gleis ohne etwaige anfängliche Geschwindigkeitsbeschränkungen sofort im Anschluss für den Betriebsverkehr freigegeben werden.

## **1.2 Motivation, Zielsetzung und Gliederung der Arbeit**

Ziel dieser Arbeit ist es, diverse wissenschaftliche Aussagen und Erkenntnisse aus dem Bereich des Bahnoberbaus, im Speziellen in Bezug auf Materialeigenschaften und Mechanismen bei der Verbesserung und Instandhaltung der Gleisanlagen zusammenzutragen und ein gesammeltes Dokument zu erstellen. Dabei finden die wesentlichsten Informationen aus dem Stand der Technik und aus der derzeitigen Normenlage Einfluss. Zudem werden unter anderem Inhalte vergangener wissenschaftlicher Arbeiten rund um die angesprochenen Themengebiete Einklang finden. Ebenso werden aktuelle und neue Forschungen und Studien vorgestellt und diskutiert. Die vorliegende Diplomarbeit ist in drei Hauptkapitel gegliedert:

- Schotterbett
- Gleisinstandhaltung durch das Stopfen
- Dynamische Gleisstabilisierung

Im Einklang mit wirtschaftlichen Aspekten und Anforderungen an die Geometrie der Gleise und Materialeigenschaften sind Instandhaltungskonzepte durch die Betreiber der Bahninfrastruktur für alle Streckenabschnitte auszuarbeiten. Das Erstellen der vorliegenden Diplomarbeit ist durch die Notwendigkeit der Weiterentwicklung von zustandsabhängigen Stopf- und Stabilisierungsarbeiten, aufgrund des Strebens nach ständig steigenden Zuggeschwindigkeiten und Verkehrslasten, motiviert. Altbewährte Instandhaltungsstrategien der Netzbetreiber müssen nun aufgrund der immer weiter steigenden Anforderungen neu überdacht werden. Dabei kann ein besseres Verständnis über „Alterungsphänomene“ bei Gleisschotter und die damit in engem Zusammenhang stehenden mechanischen Vorgängen helfen, die bestehenden Strategien zu adaptieren.

## 2. Schotterbett

### 2.1 Allgemeines

Ein sauberes, homogenes und elastisches Schotterbett bildet die zentrale Voraussetzung für eine nachhaltig hohe Qualität einer Gleisanlage. Die genannten Eigenschaften erhöhen ebenso das Intervall zwischen den notwendigen Instandhaltungsarbeiten. Im Allgemeinen kann der Schotteroberbau als „schwimmende“ Konstruktion und im Falle einer korrekten Bemessung von Schienen, Schwellen und Befestigungsmitteln als „schwächstes“ Glied des Bahnoberbaus angesehen werden. Die Nachgiebigkeit der Konstruktion hat allerdings den Nachteil, dass die Soll-Lage des Gleises durch die ständigen Beanspruchungen kontinuierlich verschlechtert wird. Allerdings kann das Schotterbett mittels Stopfmaschinen nachhaltig instandgehalten werden. Dazu müssen einige wesentliche Anforderungen an das Bettungsmaterial gestellt werden, um die Dauer und vor allem die Kosten der Instandhaltungsarbeiten auf ein Minimum reduzieren zu können.

Die ständigen statischen und dynamischen Belastungen müssen möglichst gleichmäßig von der Schiene selbst, den Befestigungsmitteln und den Schwellen über den Gleisschotter in den anstehenden Untergrund abgetragen werden. [12]

### 2.2 Mineralien und Gesteinsarten

#### 2.2.1 Allgemeines

Diverse Inhomogenitäten des natürlichen Rohstoffs machen statische Berechnungen etwas komplexer als die Berechnungen der Lastabtragung durch die Schiene und der Schwellen, die durch ihre „homogenen“ Materialien Beton und Stahl äußerst präzise berechnet werden können. Deshalb muss das Schottermaterial eine Vielzahl an Anforderungen erfüllen, um die Dauerhaftigkeit des Materials und somit eine kontrollierte Lastabtragung zu gewährleisten. Die strengen Qualitätskontrollen beginnen bereits beim Abbau und bei der Gewinnung des Gesteins. Hierbei muss so schonend wie möglich vorgegangen werden, um Mikrorisse und andere Fehlstellen im Material zu minimieren und um eine möglichst hohe Qualität hinsichtlich der Beständigkeit des Schotters erreichen zu können. Grundsätzlich sollte der Rohstoff folgende Merkmale aufweisen:

- witterungsbeständig
- hohe Zähigkeit und hohe Druckfestigkeit
- geringer Feinkornanteil

- diverse geometrische Bedingungen

Die oben genannten Bedingungen lassen vorwiegend Hartgesteine, wie Granit und Basalt, zum Einsatz kommen, aber auch weichere Gesteinsarten, wie Kalk- oder Sedimentgesteine, kommen trotz ihrer geringeren Druckfestigkeit des Öfteren auf Nebenstrecken zum Einsatz. [12]

## 2.2.2 Gängige Gesteinsarten für den Oberbauschotter

### 2.2.2.1 Granit

Granite sind den magmatischen Tiefengesteinen zuzuordnen. Zum größten Teil bestehen diese Gesteine aus Quarzen, Glimmern und Feldspäten, die miteinander eine äußerst homogene Struktur bilden. Gemeinsam wird dadurch eine hohe Druckfestigkeit erreicht. Die einzelnen Anteile sind grundsätzlich mit freiem Auge zu erkennen. Die Größe der Kristalle kann zwischen rund 1 mm und mehreren cm schwanken.



Abbildung 2.1: Granitschotter [51]

Durch oberflächliche Verwitterung kommt es meist zu rötlich-gelblichen Verfärbungen durch Eisenhydroxidverbindungen. Bei dieser Verwitterungsart kommt es zu einer Umwandlung der Feldspäte in Tonminerale, die deutlich geringere Festigkeitseigenschaften mit sich bringen. Diese verwitterten Anteile des Granits sind aus technischer Sicht für den Oberbauschotter größtenteils ungeeignet. [12]

### 2.2.2.2 Granitporphyr

Der Granitporphyr stellt eine Art des Granits dar, mit dem Unterschied, dass in der feinkörnigen, dichten Grundmasse größere Feldspäte oder Biotit-Tafeln eingelagert sind, welche mit bloßem Auge gut zu erkennen sind. In Österreich kommt der Granitporphyr vorwiegend in Ober- und Niederösterreich im Übergangsbereich zwischen Böhmischer Masse und Molassezone vor.



Aufgrund der kantigen Form der Mineralien sind diese optimal miteinander verzahnt und daher äußerst verwitterungs- und frostbeständig. Der Granitporphyr weist zudem eine hohe Dichte auf.

### 2.2.2.3 Granulit

Die Granulite sind hochmetamorphe Gesteine, die unter mittlerem Druck und durch hohe Temperatur ihre mineralogische Struktur durch Neu- oder Umbildung entstehen lassen, wobei das Gestein während der Metamorphose im festen Zustand verbleibt. Der Granulit wird vorwiegend durch Feldspäte und Quarze bestimmt.



Abbildung 2.2: Granulit [50]

Durch die gleichmäßige, feinkörnige Struktur, die für den Granulit auch namensgebend ist (lat. Granulum = Körnchen) und aufgrund der hohen Druckfestigkeit und den sehr guten Verschleißigenschaften, ist der Granulit für die Nutzung als Bettungsschotter gut geeignet. Bei zu hohem Gehalt an Feldspat ist das Gestein jedoch als Oberbauschotter nicht mehr geeignet.

### 2.2.2.4 Dunit

Dunite sind ultramafische Gesteine (über 90% dunkler Mineralien der magmatischen Gesteine). Er besteht zu mindestens 90% aus Olivin. Für eine mögliche technische Verwendung als Gleisschotter ist der Serpentinierungsgrad ein entscheidender Faktor. Bei mittleren Temperaturen von bis zu 500°C und erhöhtem Druck können die Olivinminerale umgewandelt werden und dadurch die ansonsten guten Festigkeits- und Zähigkeitseigenschaften des Dunits herabsetzen.

### 2.2.2.5 Basalt

Gängige Bestandteile des Basalts sind vorwiegend Mischungen aus Eisen- und Magnesiumsilikaten in Kombination mit kalziumreichen Feldspäten und zum Teil in Verbindung mit Olivin. Basalt ist den vulkanischen Ergussgesteinen zuzuordnen, d.h. er entsteht, wenn dünnflüssige Lava an der Erdkruste austritt und dadurch schnell abkühlt und erhärtet. Für gewöhnlich ist Basalt dunkelgrau bis schwarz.

Aufgrund der raschen Abkühlung bei der Entstehung besteht der Basalt in erster Linie aus einer feinkörnigen Grundmasse, in der auch selten mit freiem Auge nicht zu erkennende grobkörnige Einschlüsse entstehen können. Die feinkörnige Grundmasse bzw. das langsame Aushärten gibt dem Basalt eine hohe Druckfestigkeit, ist aber dadurch spröder und auch schwerer zu bearbeiten. Deshalb wird der Basalt als Baustoff vorwiegend für den Unterbau von Straßen und Bahngleisen verwendet. [12]



Abbildung 2.3: a) „gesunder“ Basalt b) Sonnenbrandbasalt mit hohem gelbem Anteil an Olivin [47]

Ganz andere Eigenschaften hat wiederum der sogenannte „Sonnenbrandbasalt“, der in Abbildung 2.3 rechts abgebildet ist. Durch den hohen Gehalt an Olivin ist diese Art von Basalt äußerst anfällig gegenüber Verwitterung und ist für einen technischen Einsatz, mit dem Ziel der Beständigkeit, nicht geeignet. Sollte der Verdacht eines Sonnenbrands bestehen, müssen bei einer Lieferung petrografische Untersuchungen durchgeführt werden. [12]

#### 2.2.2.6 Diabas

Der Diabas kann zu den sogenannten Vulkangesteinen bzw. zu den Magmatiten gezählt werden. Die in der Erdkruste aufsteigende basaltische Lava erstarrt langsam, wodurch der Diabas entsteht.

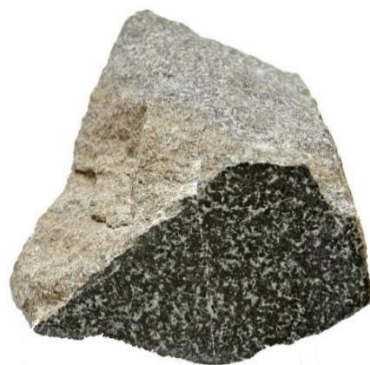


Abbildung 2.4: Diabas [48]

Generell haben Magmatite ein dichtes fein- bis mittelkörniges Gefüge. Die Druckfestigkeit ist ein wenig unter dem des Basalts. Diabase weisen allerdings eine sehr hohe Dichte von bis zu  $3000 \text{ kg/m}^3$  auf und gelten daher als besonders beständig gegenüber Witterungseinflüssen. [12]

### 2.2.2.7 Kalkstein und Dolomit

Der Kalkstein kann als biogenes Sediment oder als Absatzgestein bezeichnet werden. Der Hauptbestandteil eines Kalksteins ist Calciumcarbonat  $[\text{CaCO}_3]$ , oft in Kombination mit sandig, tonigen Anteilen und mit Dolomit  $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$ . Überwiegt dieser Dolomitanteil, so spricht man nicht mehr von Kalkstein, sondern von Dolomit. [12]



Abbildung 2.5: kantige Kalksteine und Dolomite [49]

Kalksteine bzw. Dolomite haben eine weitaus geringere Druck- und Abriebsfestigkeit als die oben genannten Hartgesteine und sind aufgrund des hohen Kalkgehalts äußerst anfällig gegen Verwitterung. Deshalb finden diese weichen Gesteine lediglich auf untergeordneten Streckenabschnitten ihre Anwendung.

## 2.3 Einblick in die Normen

### 2.3.1 ÖNORM EN 13450:2014: Gesteinskörnungen für Gleisschotter

Die ÖNORM EN 13450 [38] regelt in erster Linie geometrische aber auch physikalische Anforderungen an den Gleisschotter. Im Speziellen werden Korngröße und dessen Verteilung, maximal zulässigen Fein- und Feinstkornanteil und die Kornform behandelt. Regelungen zu physikalischen Anforderungen an den Gleisschotter werden in Form von maximal zulässigen Widerständen (Zertrümmerung, Schlagzertrümmerung und Verschleiß) tabellarisch angeführt.

Zusätzlich werden in diesem Dokument die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit bezüglich Frost-Tau-Beständigkeit, die maximal zulässige Wasseraufnahme und der Umgang mit verwitterungsanfälligen Gesteinsstrukturen – Sonnenbrandbasalt – behandelt.

In den normativen Anhängen ist unter anderem die Durchführung von Probenahme, dessen Auswertung und die Durchführung zur Bestimmung der oben genannten Widerstände geregelt.

Weiterführend kommen die Reihe der ÖNORM EN 933-X [42],[43],[44] und die ÖNORM B 3133: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13450 [42],[43] zur Anwendung.

### 2.3.2 ÖNORM EN 1097-X: Prüfverfahren

Die Reihe der ÖNORM EN 1097-X [40],[41] regelt die Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen. Darin werden die jeweiligen Prüfverfahren beschrieben. Unter anderem wird intensiv auf die Prüfeinrichtungen und Gerätschaften eingegangen, die bei diesen Laborversuchen verwendet werden müssen. Unter anderem werden Abmessungen und Messtoleranzen im Zuge der Überprüfungen angeführt. Ebenso kann den Normen eine Anleitung für die Vorbereitung von Einzelproben und für die exakt festgelegte Durchführung der Versuche entnommen werden. Wie die Auswertung und die Aufbereitung der Messergebnisse gegliedert sein soll, ist ebenfalls dieser Normenreihe zu entnehmen. Die Normenreihe besteht insgesamt aus elf teils unabhängigen Dokumenten, wohingegen nur die Teile 1, 2, 5 und 6 für die Prüfung des Gleisschotters relevant sind. Im Folgenden sind alle Teile der Reihe ÖNORM EN 1097 tabellarisch angeführt:

Tabelle 2.1.: Unterteilung der Normenreihe ÖNORM EN 1097-X

Name der Norm	Bezeichnung
EN 1097-1	Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval)
EN 1097-2	Verfahren zur Bestimmung des Widerstands gegen Zertrümmerung
EN 1097-3	Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt
EN 1097-4	Bestimmung des Hohlraumgehaltes an trocken verdichtetem Füller
EN 1097-5	Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung
EN 1097-6	Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
EN 1097-7	Bestimmung der Rohdichte von Füller – Pyknometerverfahren
EN 1097-8	Bestimmung des Polierwertes
EN 1097-9	Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß durch Spikereifen
EN 1097-10	Bestimmung der Wassersaughöhe
EN 1097-11	Bestimmung der Verdichtbarkeit und Druckfestigkeit bei behinderter Querdehnung

## 2.4 Gleisschotter – Eigenschaften und Anforderungen

Die Qualität und Langlebigkeit der Gleisanlage hängt im Allgemeinen von einer Vielzahl von Faktoren ab. Ein wesentlicher Bestandteil des Bahnoberbaus ist das Schotterbett, dem einige sehr wichtige Aufgaben zugeteilt werden können. Dem Stand der Technik zufolge ist das Schotterbett das schwächste Element im Gleisbau. Der Gleisschotter kann als „schwimmende“ Konstruktion betrachtet werden. Durch diese „Bewegungsfreiheit“ des Schotters führen die aus dem Bahnbetrieb auf den Aufbau einwirkenden Kräfte zu immer wieder auftretenden Setzungen des Oberbaus und somit zu einer kontinuierlichen Verschlechterung der idealen Gleislage. Allerdings kann das Schotterbett mittels Stopfmaschinen rasch und mit vertretbaren Kosten instandgehalten werden. Aber auch bei gegebener Betriebssicherheit sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit darauf geachtet werden, die Gleisqualität konstant hoch zu halten, bevor ein nicht mehr umkehrbarer Verfall des Gleises bzw. der Schotterbettung entsteht.

Wird dieses Niveau jedoch erreicht, so muss ein aufwendiger Austausch des Schotters bzw. eine Reinigung der Bettung in Betracht gezogen werden. Die Reinigung bzw. der Austausch des Schotters werden in der vorliegenden Diplomarbeit nicht behandelt.

Die primäre Aufgabe des Gleisschotters ist es, die hohen statischen und dynamischen Lasten aus dem Zugverkehr möglichst gleichmäßig in den Untergrund abzuleiten. Gleichzeitig muss gewährleistet werden, dass die einzelnen Gleiselemente ausreichend elastisch ausgeführt werden, um die Spannungen aus den dynamischen Einwirkungen etwas zu dämpfen. Aber auch ein ausreichender Widerstand gegen Längs- und Querverschiebung der Schwellen, eine richtige Drainage des Untergrunds und eine ausreichende Belüftung sind essenzielle Funktionen, die das Schotterbett zu erfüllen hat. Der Scherfestigkeit des verwendeten Schotters kommt im Hinblick auf die Tragfähigkeit eine besondere Bedeutung zu.

Diese Vielzahl an Anforderungen kann durch einfache Planungsgrundsätze entsprechend berücksichtigt werden. So können durch die richtige Wahl der Bettungshöhe und des Bettungsquerschnitts die Spannungen am Untergrundplanum entsprechend reduziert werden. Sind die Spannungen zu hoch bzw. überschneiden sich die Lastpfade unter benachbarten Schwellen nicht, besteht die Gefahr, dass Feinteile aus dem Planum nach oben gedrückt werden und so die Schotterkonstruktion verschmutzen. Diese Art der Verunreinigung ist zumeist durch zu schwach dimensionierte Bettungshöhen oder durch das Fehlen einer Planumsschutzschicht zu erklären. Durch die Wahl einer hohen Schotterqualität und die spätere Güte der Verdichtung des Schotters kann eine hohe Lebensdauer der Gleiskomponenten erreicht werden. Dahinter stecken natürlich auch wirtschaftliche Überlegungen, die im Speziellen bei Nebenstrecken die technisch höchstmögliche Qualität nicht zulassen.

Durch die aus dem modernen Zugverkehr immer größer werdenden einwirkenden Achslasten bzw. Fahrgeschwindigkeiten, im Speziellen auf den Hauptverkehrswegen, muss darauf geachtet werden, dass die Widerstandsfähigkeit aller Gleiskomponenten den erhöhten Anforderungen gerecht wird. Bei der Zugüberfahrt hebt die Schwelle beim Abrollvorgang ab und schlägt zurück. Dies führt in weiterer Folge zu Absplitterungen, Kornumlagerungen und erhöhtem Abrieb am Gleisschotter.

Die Erhöhung des Widerstands der lastabtragenden Komponenten erfolgt zumeist durch eine Verbesserung der Materialgüte, aber auch der ständige technologische Fortschritt bei der Herstellung dieser Materialien kommt der Widerstandsfähigkeit der Schienen, der Befestigungsmittel und den häufig zur Anwendung kommenden Betonschwellen zugute.

Beim Oberbauschotter hingegen ist man in erster Linie auf gewachsene Strukturen angewiesen, die ein gewisses Maß an natürlicher Heterogenität aufweisen. Um diese Unregelmäßigkeiten der natürlichen Ressourcen zu minimieren, muss der Schotter die folgenden stofflichen aber auch granulometrischen Eigenschaften aufweisen:

- Verwitterungsbeständigkeit, geringe Rissbildung (Frost-Tau-Versuch)
- Zähigkeit (Trommelmühle), Härte und geringe Spaltbarkeit
- gutes Bruchverhalten, scharfkantige und unregelmäßige Form der Schotterkörner
- möglichst keine Beimengungen von Feinanteilen

## 2.4.1 Stoffliche Eigenschaften

### 2.4.1.1 Verwitterungsbeständigkeit

Durch den Abbau des Gesteins, vor allem durch den Abschlag des Festgesteins durch Sprengladungen, entstehen Fehlstellen in unterschiedlichster Ausprägung und Größe. Diese Mikrorisse sind meist mit freiem Auge nicht sichtbar, haben aber einen wesentlichen Einfluss auf die Beständigkeit des Gleisschotters. Die Risse bieten den Umwelteinflüssen eine signifikant größere spezifische Oberfläche, welche die Verwitterung des Materials noch rascher vorantreiben. Die Verwitterungsbeständigkeit muss durch entsprechende Gutachten nachgewiesen werden. [14]

Maßgebend hierbei ist es, potentielle Fehlstellen zu lokalisieren und unbrauchbares Material auszusortieren. Eine möglichst geringe Wasseraufnahmefähigkeit ist anzustreben, um strukturelle Schäden aus Frost-Tau Zyklen und anderen Umwelteinflüssen gering zu halten. *Klotzinger* [12] und *Lichtberger* [15] geben einen maximal zulässigen Wert der Wasseraufnahme von 0,50 Gew.-% an. Liegt der Wert darüber, muss die Verwitterungsbeständigkeit des Oberbauschotters mittels Kristallisationsversuch ermittelt werden, bei dem die Probe in einer Salzlösung gekocht wird. Eine Bestimmung des Widerstands gegen Frost-Tau-Wechsel muss ebenfalls durchgeführt werden, um die hohen Anforderungen der Bahnbetriebe erreichen zu können.

### 2.4.1.2 Zähigkeit und Härte

Die Zähigkeit stellt den Widerstand gegen Rissausbreitung bzw. gegen Brechen des Materials dar. Durch Spannungs-Dehnungs-Diagramme kann die Zähigkeit des Werkstoffs zum Ausdruck gebracht werden. Zur Quantifizierung der Zähigkeit werden Kenngrößen wie Bruchnormalspannung, Rissstoppvermögen und Bruchverformung herangezogen.

Die Härte eines Gesteins ist das Maß für den Widerstand gegen mechanisches Eindringen. Ausschlaggebend hierbei sind die Härte des Minerals selbst, die Kornbindung und die Bindemittelhärte, mit dem die Mineralien untereinander verkittet sind. Eine mögliche Einstufung in Härtegrade stellt die Härteskala nach Mohs (vgl. Tabelle 2.2) dar.

Tabelle 2.2.: Härteskala nach Mohs; adaptiert nach [36]

Härte	Anmerkung, Beispiel	Härte	Anmerkung, Beispiel
1	mit Fingernagel schabbar, z.B. Talk	6	mit Stahlfeile ritzbar, z.B. Orthoklas
2	mit Fingernagel ritzbar, z.B. Gips	7	ritzt Fensterglas, z.B. Quarz
3	mit Kupfermünze ritzbar, z.B. Calcit	8	ritzt Quarz, z.B. Topas
4	mit Messer leicht ritzbar, z.B. Fluorit	9	ritzt Topas, z.B. Korund
5	mit Messer noch ritzbar, z.B. Apatit	10	ritzt Korund, z.B. Diamant

Zusätzlich zu den genannten Gesteinseigenschaften ist die Spaltbarkeit eine ebenso nicht außer Acht zu lassende Beschaffenheit. Sie gibt die Tendenz an, mit der gewisse parallele Ebenen im Kristallgitter gebrochen werden können. Zwei- und dreiaxial spaltbare Mineralien beeinflussen die Festigkeit des Gesteins maßgebend negativ.

### 2.4.2 Granulometrische Eigenschaften

Um die Funktionen des Schotterbetts bezüglich Lastausbreitung, -abtragung und Drainage erfüllen zu können, müssen eine Vielzahl an granulometrischen Anforderungen an den Gleisschotter gestellt werden. Eine wesentliche Eigenschaft ist die Kornform selbst. Zum Einsatz kommen ausschließlich kantige, unregelmäßige Formen, die sich ineinander verzahnen und so die Scherfestigkeit des Schotterbetts erhöhen.

Durch einen ausreichenden wasser- und luftdurchlässigen Porenraum kann anfallendes Oberflächenwasser schnell abfließen und die Restfeuchte im Schotterbett kann verdunsten. Dadurch kann gewährleistet werden, dass die Tragfähigkeit des anstehenden Untergrunds aufrechterhalten bleibt. Sehr enggestufter Schotter kann aber auch zu einer Abnahme der Scherparameter führen. Die Verzahnung durch die kantige Kornform gleicht die ungünstigen Eigenschaften aus, sodass die Stabilität trotz enggestufter Sieblinie erhalten bleibt.

Direkt nach dem Einbau von reinem, neuen Schotter besteht die Gleisbettung fast ausschließlich aus dem Skelettkorn. Durch die geringe Anzahl an Kontaktflächen verändert sich die Kornform und -größe durch Absplitterungen und Abrieb solange, bis die Anzahl der Flächen so zahlreich sind, sodass die Lasten aus dem Bahnbetrieb in den Untergrund ohne weitere Zerstörung des Gesteins abgetragen werden können.

Um diese Kornumlagerungen und die damit verbundenen Setzungen vorwegzunehmen, wird eine dichtere Lagerung und somit eine Erhöhung der Kontaktflächen nach jedem Stopfvorgang durch die dynamische Gleisstabilisation (DGS) hergestellt. Das Gleis wird auch nach dem Einbau des Schotters zuerst gestopft, dann stabilisiert. Durch die Abflachung der Spannungsspitzen ist eine optimale Lastabtragung durch den Schotter möglich. Auf die DGS wird in Kapitel 3.7.4 näher eingegangen.

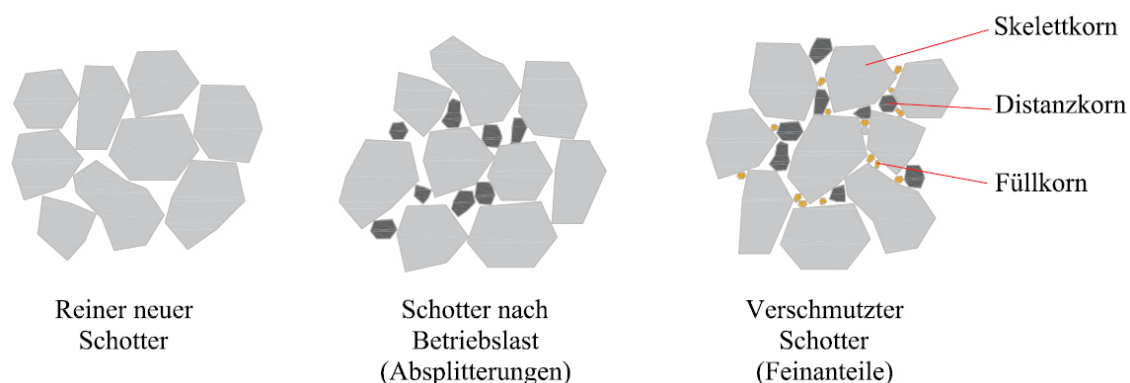


Abbildung 2.6: Unterschiedliche Stufen der Kornformen des Gleisschotters; adaptiert nach [15]

Durch das etwas kleinere Distanzkorn, welches sich durch die Absplitterungen bildet, verbessert sich die Scherfestigkeit. Ideal wäre ein Distanzkornanteil von 15 % bei einer Größe zwischen 15 und 30 mm [15]. Allerdings nimmt auch der Abrieb kontinuierlich zu. Ebenso kann es passieren, dass feinkörnige Anteile aus dem Untergrund durch eine falsche Dimensionierung der Gleiskomponenten nach oben gedrückt werden. Es bildet sich feines Material, das Füllkorn.

Die Feinanteile legen sich mit der Zeit um die Skelett- und Distanzkörner und verursachen somit eine Senkung des inneren Reibungswinkels. Das Abfallen des Scherparameters und die damit verbundene Tragfähigkeit des Schotterbetts kann bis zum Versagen (Grundbruch) der Bettung führen.

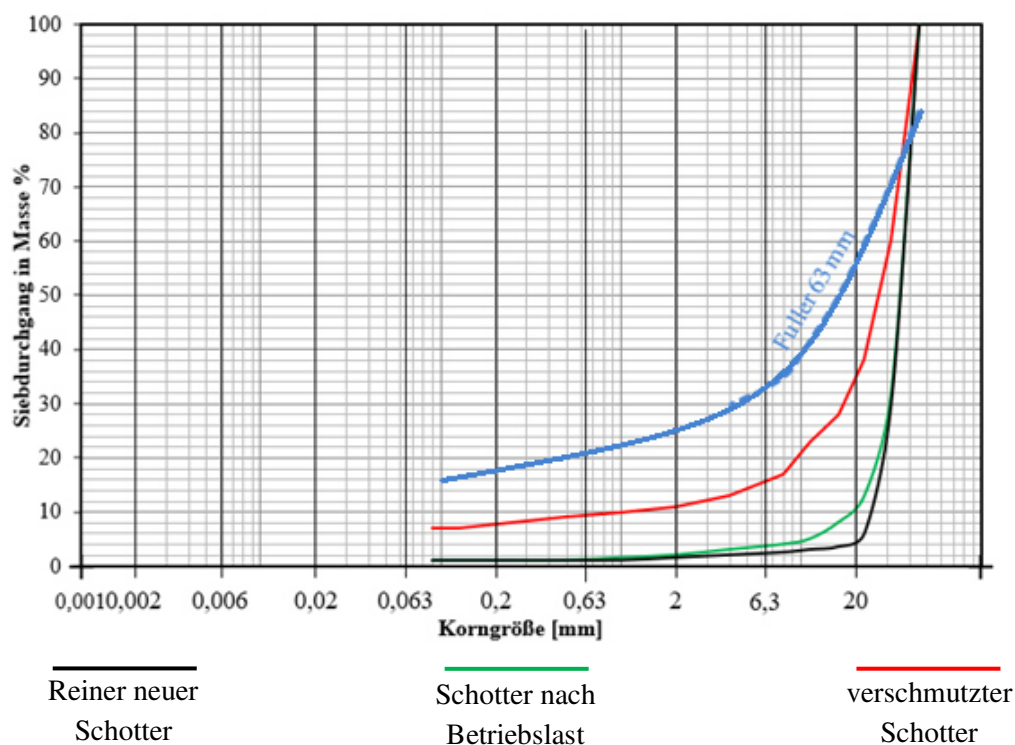


Abbildung 2.7: Charakteristische Sieblinien und Fullercurve des Größtkorns 63 mm; adaptiert nach [12]

Die Abbildung 2.7 zeigt, dass sich die Sieblinie des Gleisschotters bei fortlaufender Verschmutzung immer mehr der Fullercurve annähert. Die Fullercurve, auch Fullerparabel oder Idealsieblinie genannt, entspricht der Körnungslinie einer Bodenprobe mit einer maximalen Packungsdichte bei gleichzeitig minimalem Porenanteil. Die Idealsieblinie lässt sich mit folgender Gleichung beschreiben, wobei hier von einer Kugel als Kornform ausgegangen wurde [8]:

$$A = 100 \cdot \left( \frac{d}{D} \right)^n \quad (2.1)$$

A ist der Siebdurchgang in M.-%, der durch das Sieb mit der Nennweite d hindurchgeht. Die Nennweite d hingegen ist der Korndurchmesser zwischen 0 und D, für den der relative Anteil im Korngemisch ermittelt werden soll. D gibt das Größtkorn der zu berechnenden Sieblinie an. Der Exponent n berücksichtigt die Kornform. Beispielsweise ist bei idealisierter Kugelform  $n = 0,5$ . Durch den immer größer werdenden Feinkornanteil und der steigenden Packungsdichte sinkt der Porenraum kontinuierlich. Durch die dadurch resultierende schlechte Drainagewirkung wirken zudem Porenwasserdrücke, die die effektiven Spannungen zwischen den einzelnen Körnern reduzieren und in weiterer Folge die Scherparameter herabsetzen. [12]



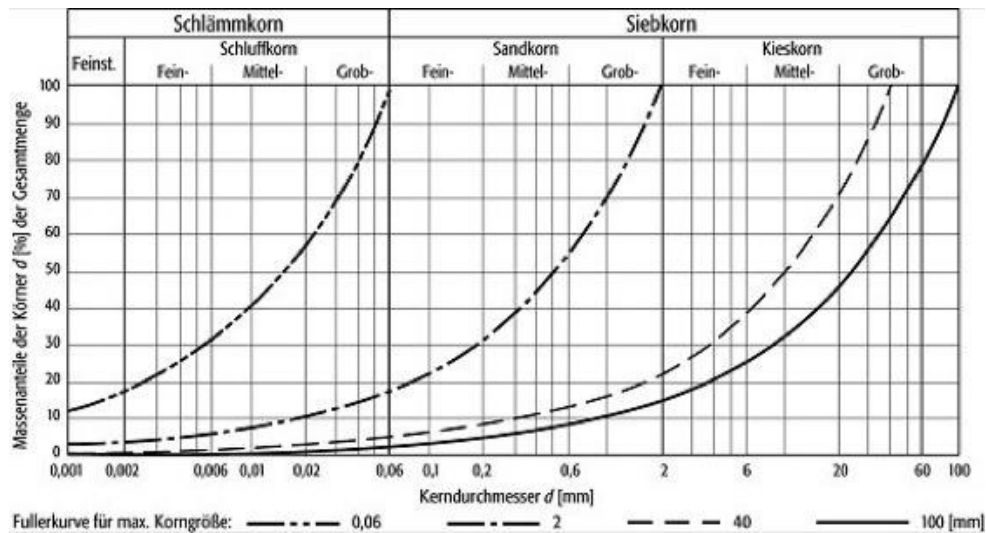


Abbildung 2.8: Idealierte Fullerkurven für unterschiedliche maximale Korngrößen [56]

Außerdem ist bei zu hohem Feinkornanteil die Frostsicherheit des Aufbaus nicht mehr gegeben und auch die Stopfarbeiten werden durch erschwertes Eindringen der Stopfwerkzeuge in die Bettung und während der Verdichtung behindert. [12]

#### 2.4.2.1 Lieferbedingungen in Österreich (ÖBB)

In Österreich gibt es strenge Regelwerke bezüglich granulometrischer Eigenschaften von Gleisschotter. Die Eignung als Gleisschottermaterial ergeben sich aus den technischen Lieferbedingungen der ÖBB BH 700 auf Basis der ÖNORM EN 13450 [38]. Grundsätzlich existieren zwei Hauptlieferkörnungen der Österreichischen Bundesbahnen.

- Lieferkörnung K1 (31,5/63) für Hauptstrecken
- Lieferkörnung K2 (16/31,5) für Nebenstrecken, Abstell- und Verschiebegleise

Der Anteil von „Feinkorn“ ( $< 0,5$  mm) bzw. von „Feinstkorn“ ( $< 0,063$  mm) ist aufgrund der oben genannten (vgl. Kapitel 2.5) Verringerung der Scherparameter und der Drainagewirkung bei Trockensiebung auf 1,0 M-% begrenzt.

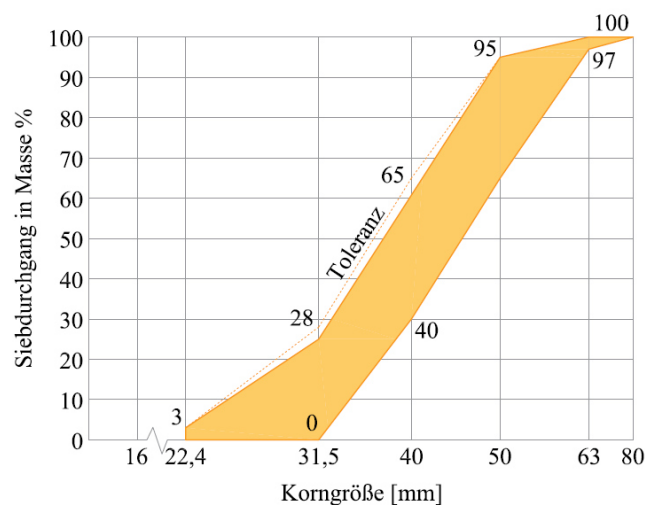


Abbildung 2.9: Sieblinie der Lieferkörnung 31,5/63; adaptiert nach [12]

Um eine Kornzerkleinerung und ein Entmischen beim Verladen, Transport und Entladen zu verringern, wird der Gleisschotter direkt vor der Verladung nachgesiebt und gewaschen. Zusätzlich wurden Grenzwerte für den „Unterkornanteil“ ( $< 22,4$  mm) eingeführt. Ab Werk darf der Anteil von 3 M-% nicht überschritten werden. Auf der Baustelle ist ein Höchstwert von 5 M-% einzuhalten. Die Bestimmung der Kornform erfolgt nach ÖNORM EN 933-4 [44] über die Kornformkennzahl. Der Anteil der Körner mit dem Verhältnis  $l:d > 3:1$  muss zwischen 5 und 30 % liegen. Die Prüfung erfolgt an zwei separaten Korngruppen 31,5/50 und 16/31,5. Körner der Gruppe 31,5/63 mit Längen von über 100 mm dürfen maximal 6,0 M-% betragen. [12]

## 2.5 Untersuchungsmethoden

### 2.5.1 Los-Angeles-Prüfverfahren nach EN 1097-2

Um den Widerstand der Zertrümmerung einer Gesteinsprobe verifizieren zu können, kommt das sogenannte Los-Angeles-Prüfverfahren gemäß ÖNORM EN 1097-2 [41] zum Einsatz. Der LA-Koeffizient gibt den relativen Anteil der Masse einer Gesteinsprobe an, die nach der Durchführung des Versuchs durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 1,60 mm hindurchgeht.

Je geringer der Wert, desto höher ist der Widerstand gegen Zertrümmerung der Gesteinsprobe. In Österreich darf der LA-Koeffizient maximal 22 % betragen. [14]

#### 2.5.1.1 Versuchsaufbau und Durchführung:

Die Gesteinsprobe muss nach Waschung und Trocknung bis zur Massekonstanz 10 kg betragen. Sie setzt sich aus 5 kg der Körnung 31,5/40 und 5 kg der Körnung 40/50 zusammen.

Die vorbereitete Probe wird gemeinsam mit 12 Stahlkugeln (ca.  $5210 \text{ g} \pm 90 \text{ g}$ ) in eine genormte Stahltrommel gegeben (vgl. Abbildung 2.10). Die Trommel wird mit 31 bis 33 Umdrehungen pro Minute 1000-mal um ihre Rotationsachse gedreht.

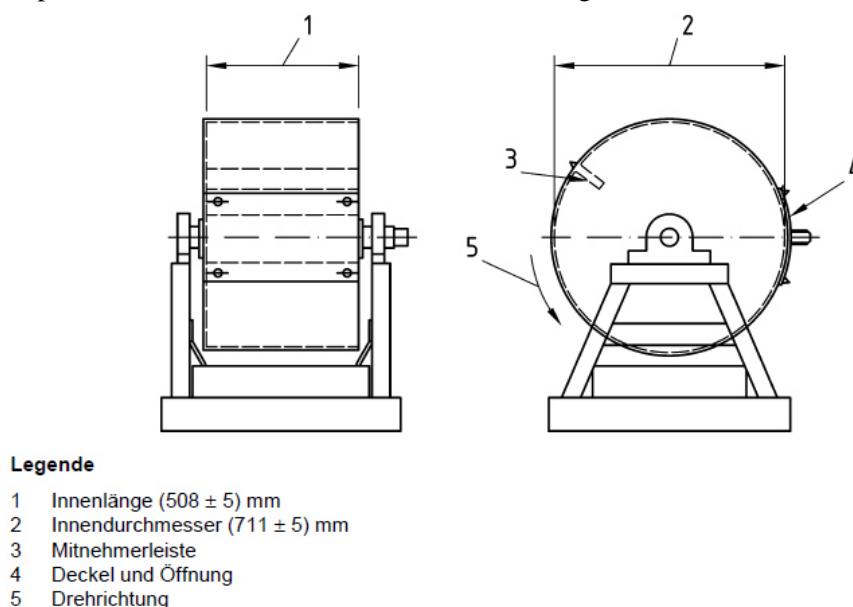


Abbildung 2.10: typische Los-Angeles Prüfmaschine [41]

Im Anschluss wird die gesamte Probe durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 1,60 mm gesiebt und der Probenrückstand  $m$  wird ermittelt. Daraus lässt sich der LA-Koeffizient folgendermaßen berechnen: [14]

$$LA_{RB} = \frac{10000 - m}{100} \quad (2.2)$$

Tabelle 2.3.: Typische LA-Koeffizienten einiger gängiger Gesteinsarten; adaptiert nach [12]

Gesteinsart	LA-Koeffizient
Granit	12 – 15
Basalt	8,7 – 9,5
Diabas	9,5 – 10,5
Kalkstein	13,7 - 23



Abbildung 2.11: Gesteinsprobe vor und nach einem Los-Angeles-Versuch [14]

### 2.5.2 Schlagfestigkeit/Schlagzertrümmerung nach EN 1097-2

Zur Bestimmung des Schlagzertrümmerungswertes gemäß ÖNORM EN 13450 [38] und ÖNORM EN 1097-2 [41] wird durch einen fallenden Hammer von 50 kg eine Probe der Körnung 31,5/40 beansprucht. Die Probe hat eine Masse von ca. 2,8 kg.

Bevor die Probemenge in einen Mörser gefüllt wird, wird sie gewaschen und bis zur Massekonstanz bei 105°C getrocknet. Das Gestein wird durch einen Fallhammer 20-mal aus einer Höhe von 42 cm beansprucht.



Abbildung 2.12: Gesteinsprobe vor und nach einem Schlagzertrümmerungsversuch [14]

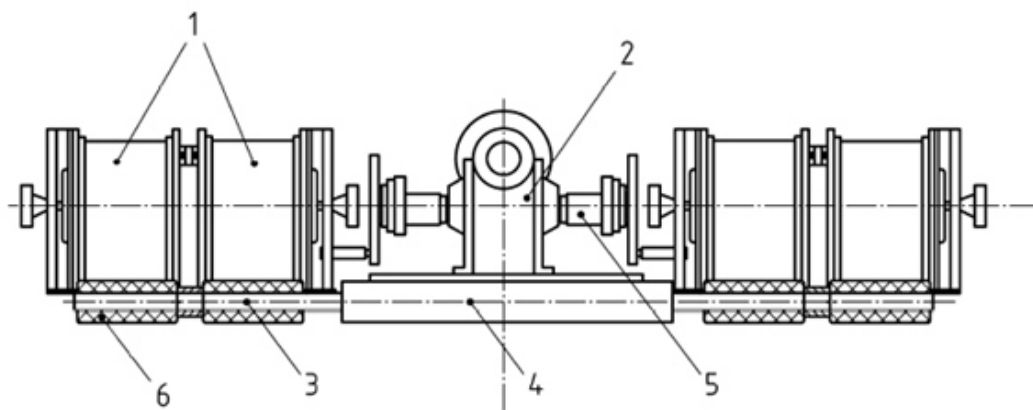
Im Anschluss wird das zertrümmerte Gestein durch ein 8,0 mm Sieb gesiebt. Dieser Vorgang muss dreimal wiederholt werden. Der Schlagzertrümmerungswert ergibt sich schlussendlich aus dem Mittelwert der drei Ergebnisse und durch folgende Formel: [14]

$$SZ_{RB} = \frac{m}{M} \quad (2.3)$$

Darin ist  $m$  der Siebdurchgang durch das 8 mm Sieb und  $M$  die Masse der Probe vor der Prüfung. In Österreich kommen grundsätzlich nur Gesteinsproben mit einem Schlagzertrümmerungswert von kleiner 22 % zum Einsatz.

### 2.5.3 Micro-Deval Versuch (Widerstand gegen Verschleiß) nach EN 1097-1

Der Micro-Deval Versuchsaufbau ähnelt sehr der Prüfung des Widerstands gegen Zertrümmerung (LA-Versuch). Die Gesteinsprobe wird aber hierbei lediglich durch Reibung beansprucht.



#### Legende

- 1 Trommeln
- 2 Elektrischer Motor und Untersetzungsgetriebe
- 3 Feste Welle
- 4 Rahmen
- 5 Bewegliche Kupplung
- 6 Treibband

Abbildung 2.13: Schematische Darstellung einer üblichen Prüfmaschine [40]

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wird eine Masse von 10 kg der Kornfraktion 31,5/50 gewaschen und bis zur Massekonstanz bei 105°C getrocknet. Die vorbereitete Probe kommt gemeinsam mit 2 l Wasser in eine Trommel mit Durchmesser 20 cm. Bei einer Geschwindigkeit von 100 Umdrehungen pro Minute wird die Probe durch den Abrieb an der Trommelinnenwand beansprucht. Nach 14000 Umdrehungen ist der Versuch abgeschlossen. Die Gesteinsprobe wird wie beim Los-Angeles-Versuch durch ein 1,60 mm Sieb gesiebt. Der Micro-Deval Koeffizient errechnet sich schließlich wie folgt: [14]

$$M_{DE}RB = \frac{10000 - m}{100} \quad (2.4)$$

Darin ist  $m$  wiederum der Siebrückstand auf dem 1,60 mm Sieb.

Der Widerstand gegen Verschleiß ist umso höher, je kleiner der Micro-Deval Koeffizient ist. In Österreich kommen grundsätzlich nur Gesteinsproben mit einem Micro-Deval Koeffizient von kleiner 16 % zum Einsatz.



Abbildung 2.14: Gesteinsprobe vor und nach einem Micro-Deval-Versuch [14]

## 2.6 Alterung von Gleisschotter und dessen Einfluss auf die Verdichtbarkeit

### 2.6.1 Verschmutzung des Gleisschotters

Der Gleisschotter ist während seiner Lebensdauer extremen Einwirkungen aus Bahnverkehr, Witterung und Instandhaltung ausgesetzt. Um keine hohen Kosten durch vorzeitiges Wiederaufbereiten oder durch Austausch des Materials zu erzeugen, sind die Anforderungen an den Oberbauschotter äußerst hoch (vgl. Kapitel 2.4). Durch die ständigen, dynamischen Einwirkungen wird der Schotter kontinuierlich zerkleinert und mindert somit die Festigkeitseigenschaften der lastabtragenden Tragschicht.

Ein typischer Oberbauquerschnitt besteht für gewöhnlich aus einer oberflächlich anstehenden, sauberen Schotterschicht. Darunter steht zumeist eine Übergangsschicht aus leicht verschmutztem Schotter an, die in eine verschmutzte bis stark verschmutzte Bettungsschicht übergeht, ehe der Unterbau beginnt.

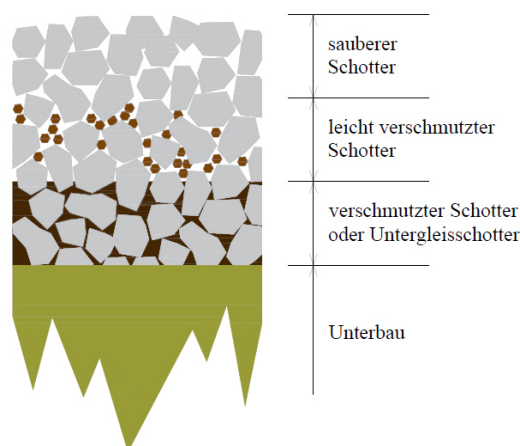


Abbildung 2.15: Typischer, intakter Querschnitt einer Gleisanlage; adaptiert nach [23]

Durch die Wahl von beständigen Gesteinsarten kann das Material den oben genannten Anforderungen gerecht werden und somit eine möglichst hohe Nutzungsdauer erzielt werden. Ziel ist es, möglichst niedrige Lebenszykluskosten zu erreichen, indem der Unterbau länger hält als der Schotter und die Bettung erst dann erneuert werden muss, wenn die Schwellen ihre Lebensdauer erreicht haben. Durch die ständige Adaptierung der Schienen und Schwellen in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten, ist die Schotterbettung als schwächstes Glied im Oberbau anzusehen. Deshalb sind die hohen Anforderungen an den Schotter von besonderer Bedeutung, um die Nutzungsdauer hoch und somit die Lebenszykluskosten möglichst niedrig zu halten.

Dazu kommt, dass die Schotterbettung auch durch äußere Einflüsse verschmutzt wird. So spielt beispielsweise die Verschmutzung durch den Abrieb zwischen Rad und Schiene, Ladungsverluste durch den Güterverkehr, aber auch durch unerwünschten Bewuchs im Schotter zu einer Verringerung der Tragfähigkeit der Bettung. Bei falscher Dimensionierung des Oberbaus kann es zudem auch passieren, dass Feinteile aus dem anstehenden Untergrund nach oben in das Korngerüst gedrückt werden.

Wie bereits in den vorigen Kapiteln erwähnt, nähert sich die Sieblinie mit zunehmender Verschmutzung bzw. mit fortschreitender Alterung des Schotters immer weiter der Fullerkurve an. Der sogenannte Verschmutzungsgrad des Schotters wird als relativer Anteil der Masse des Schotters mit einer Korngröße von kleiner 22,4 mm definiert. Die kritischsten Stellen für die Alterung des Schotters treten in den Bereichen auf, wo die Stopfpickel bei Instandhaltungsarbeiten in den Oberbauschotter eindringen bzw. wo die einzelnen Körner durch die mechanische Beanspruchung des Stopfvorgangs zusammengedrückt werden [15].

Durch die Stopfpickel werden die einzelnen Schotterkörner während des Stopfvorgangs immer wieder zerkleinert, wobei Korngrößenverteilungen von Proben aus den Stopfbereich verifizieren, dass sich die Sieblinie immer mehr der Fullerkurve annähert (vgl. Abbildung 2.8). Dies hat zur Folge, dass die Schotterbettung in diesen lokal begrenzten Bereichen durch die eingebrachte Verdichtungsarbeit stark verhärtet und die dadurch auftretenden Störzonen nur mehr sehr schwer zu korrigieren sind.

Paradoxerweise ist der Stopfbereich, und nicht der am stärksten durch den Betriebsverkehr belastete Bereich unter den Schwellen, die anfälligste Stelle für das Voranschreiten der Schotteralterung in der Bettung. Somit ist die zerstörerische Einwirkung auf den Schotter durch die Stopfarbeiten größer als die Wirkung der Verkehrslast. Dies ist auch durch die vergleichsweise geringe Anpressfläche der Stopfpickel auf den Schotter zu erklären, wohingegen die Kräfte aus dem Zugverkehr über die gesamte Schwellenfläche größtenteils gleichmäßig verteilt und so die Gesamtspannungen auf den Schotter reduziert werden können.

Ein weiterer lokal kritischer Bereich hinsichtlich der Alterung des Schotters stellt der Isolierstoß dar. Durch die geschwächte Tragwirkung der Schiene im Stoßbereich kommt es durch den Zugverkehr zu ausgeprägten, schlagenden Stößen auf die Bettung, was den Abrieb des Schotters durch gegenseitige Reibung der Körner in verstärktem Ausmaß vorantreibt.

Unter den Schwellen selbst verbleibt der Schotter, im Vergleich zum Stopfbereich, in relativ gutem Zustand. Hierbei treten lediglich Druckstellen mit entsprechendem Abrieb an den Schotterkörnern auf, die auf die schlagartige Übertragung der Kräfte während einer Zugüberfahrt auf den Schotter zu erklären sind.

Speziell bei mittelharten Gesteinsarten mit Anteilen von Mineralien, wie Calcit oder Dolomit, kann dies in stark beanspruchten Bereichen in der Bettung zu Problemen führen. Durch den Abrieb dieser Karbonatmineralien kann es zu betonähnlichen Verkittungen der Gesteinskörner kommen, was in diesen Bereichen ebenfalls zu teils beträchtlichen Verhärtungen führen kann.

Verhärtungen dieser Art verhindern eine optimale Umlagerung des Schotters durch die vibrierenden Stopfwerkzeuge bei Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten. Im Extremfall wird dadurch sogar ein Eintauchen der Stopfpickel in den Bettungsschotter unmöglich.

Wenn somit ein zielführendes Stopfen aus den oben genannten Gründen nicht mehr möglich ist, muss das Gleis über eine Bettungsreinigung oder über einen Austausch des alten, verschmutzten Schotters saniert werden. Vor allem, wenn die übrigen Oberbaukomponenten ihre Lebensdauer zum Zeitpunkt dieser notwendigen und intensiven Instandhaltungsmaßnahmen noch nicht erreicht haben, ist ein solcher Eingriff in hohem Maße unwirtschaftlich.

Die äußerst komplexen mechanischen Vorgänge bei der Alterung von Gleisschotter können durch die derzeitigen Prüfungen und Laboruntersuchungen nur schwer im Ganzen abgebildet werden. Die zukünftige Forschung und Entwicklung wird sich demnach intensiv mit der Findung einer geeigneten, praxistauglichen und messbaren Größe für die Alterung des Schotters bemühen müssen.

Durch die immer dichter werdende Lagerung der Bettung, verursacht durch die oben genannten Arten der Verschmutzung, aber auch durch die ständigen dynamischen Einwirkungen aus dem Zugverkehr, nähert sich die Sieblinie des Bahnschotters immer näher der Fullerkurve (vgl. Kapitel 2.4.2) an. Die grundsätzlich in anderen Bereichen des Bauwesens anzustrebende dichte Lagerung von granularem Material ist für den Gleisbau nicht unbedingt von Vorteil. Zwar kann dadurch kurzfristig eine bessere Lastabtragung erreicht werden, jedoch gehen viele andere essentielle Eigenschaften, wie beispielsweise ein elastisches Schotterbett oder eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit, verloren.

Ein weiterer banaler Aspekt, weshalb eine möglichst hohe Lagerungs- bzw. Packungsdichte vermieden werden soll, ist die Tatsache, dass dicht gelagerte Materialien nur mehr mit energetisch hohem Aufwand weiter verdichtet werden können. Durch die Füllung des Porenraums mit Feinteilen sind zu wenig Hohlräume vorhanden, um eine ausreichende Kornumlagerung herbeizuführen. Beim Stopfen des Gleises kann durch die schwere Verformbarkeit der Bettung keine entsprechende Hebung des Gleises und somit keine optimale Korrektur der Gleislagefehler erreicht werden, ohne neuen Schotter unter den Schwellen zuführen zu müssen. [28]

## **2.6.2 Auswirkung von Stopfarbeiten auf die Verschlechterung des Gleisschotters**

Um die Auswirkungen der Alterung des Schotters lediglich aus den Einwirkungen durch die Stopfmaschinen abbilden zu können, wurde von *Röthlisberger et al.* [29] intensive Untersuchungen durchgeführt, die im Folgenden zusammenfassend angeführt sind.

Die Versuche wurden an Proben durchgeführt, die lediglich durch die Wirkung von Stopfmaschinen beansprucht wurden. Ein- und Auswirkungen aus Frost-Tau Wechsel und aus dem Bahnverkehr wurden dadurch nicht abgebildet.

Untersucht wurden zwei Sektoren mit gleichem Querprofil, jedoch mit unterschiedlichen Gesteinsarten (Kalk- und Sandstein). Die Herstellung der Gleisanlage wurde mit drei Stopfvorgängen durchgeführt, um das Gleis in die geometrisch richtige Lage zu bringen. Somit wurde der Streckenabschnitt für die Versuchsreihe freigegeben.

Die beiden vorbereiteten Sektoren wurden wiederum in fünf Bereiche zu je 13 m unterteilt. Die Teilabschnitte wurden für eine unterschiedliche Anzahl an Stopfvorgängen (0, 7, 14, 21 und 28) vorbereitet.

Nach den abgeschlossenen Stopfarbeiten wurden aus verschiedenen Tiefenstufen und Positionen Proben mit dem Stahlrahmen nach EN 13450 entnommen. Der erste Probensatz wurde aus den Schwellenfächern genommen, der zweite aus dem Wirkungsbereich der Stopfmaschine. Da der Stahlrahmen größer war, als der lokal begrenzte Stopfbereich, wurden mit einer Schaufel zusätzliche Proben aus dem unmittelbaren Wirkungsbereich entnommen. Aus allen entnommenen Proben wurde die Kornverteilung bestimmt.

Ergebnisse der Untersuchungen ergaben Kornzertrümmerungen im und unter dem Stopfbereich. Die Zerkleinerung des Schotters unterhalb des unmittelbaren Wirkungsbereichs der Stopfmaschine wurden vermutlich durch die Vibrationen und das Eindringen der Stopfpickel und durch das nach unten Drücken und Schütteln der Körner hervorgerufen.

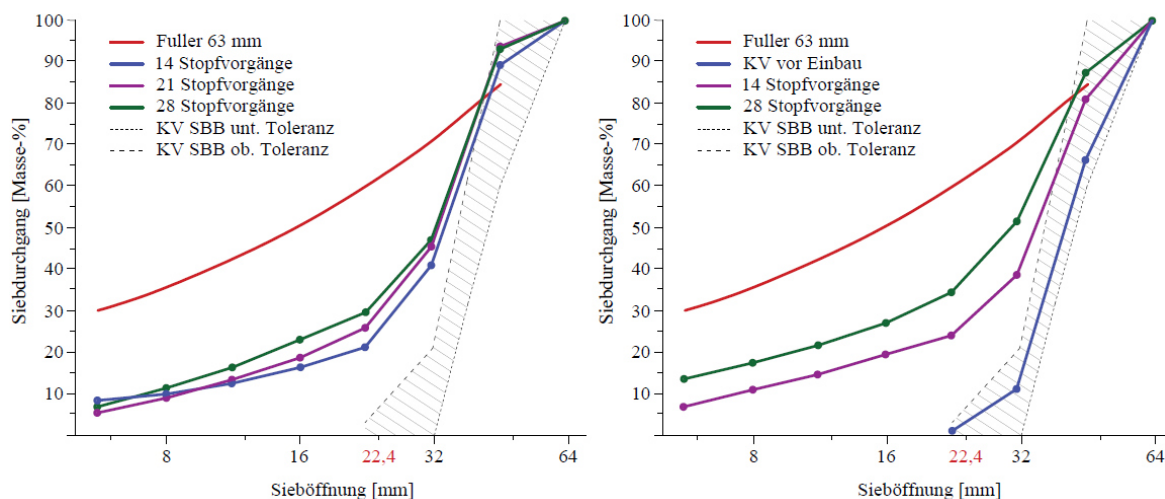


Abbildung 2.16: Ergebnisse in Form von Kornverteilungslinien aus den Untersuchungen, Alpiner Sandstein (links), Kieselkalk (rechts); adaptiert nach [29]

Der Verschmutzungsgrad des Gleisschotters, definiert als  $< 22,4$  mm M-% der Gesamtprobe, im unmittelbaren Stopfbereich nimmt mit zunehmender Anzahl an durchgeführten Stopfvorgängen annähernd linear, zumindest bis zur durchgeführten 28. Stopfung, zu (vgl. Abbildung 2.17 rechts).



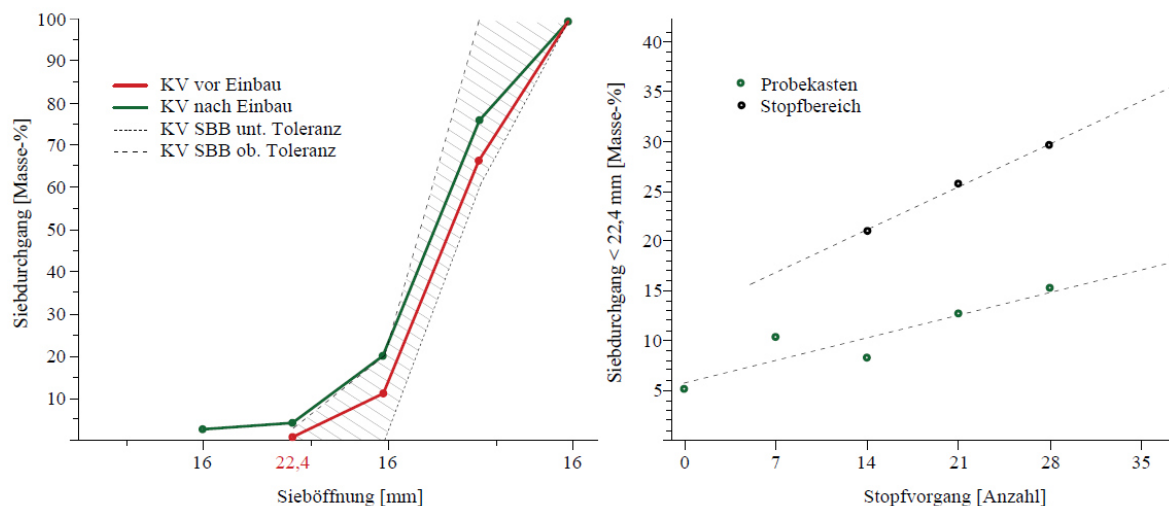


Abbildung 2.17: Korngrößenverteilung vor und nach dem Einbau (links); Lineare Korrelation zwischen Siebdurchgang < 22,4 mm und der Anzahl an Stopfvorgängen (rechts); adaptiert nach [29]

Jedoch konnte bereits durch die bei der Herstellung der Gleise notwendigen Stopfungen eine gewisse Zerstörung der Schotterkörner bzw. ein Verschmutzungsgrad von ca. 5-8 M-% beobachtet werden.

Außerdem wurde festgestellt, dass der Feinkornanteil < 22,4 mm nach den durchgeführten 28 Stopfvorgängen, in etwa dem Anteil nach einer durchgeführten Zertrümmerungsprüfung im Zuge einer Bestimmung der Druckfestigkeit am Haufwerk entspricht. Demnach scheint der Druckstempel bei der Zertrümmerungsprüfung eine ähnliche mechanische Wirkung wie das Schließen der Stopfpickel, auf den Schotter zu haben.

Kornzertrümmerungen an der Schotteroberfläche – aus den Schwellenfächern entnommenen Proben – konnten mit dieser Versuchsreihe infolge der Stopfarbeiten nicht nachgewiesen werden. Der von der Zertrümmerung durch das Stopfen betroffene Bereich in der Schotterbettung beschränkt sich demnach nur auf den eigentlichen Bereich der Verdichtung unmittelbar unter den Schwellen. [29]

### 2.6.3 Verschmutzungsgrad als Werkzeug für die Instandhaltungsstrategie

Eine Unter- aber auch eine Überschätzung des Verschmutzungsgrades kann zu äußerst hohen Instandhaltungskosten führen. Eine Unterschätzung kann zu einem beschleunigten Verfall des Gleises, bis hin zu komplettem Versagen führen, wohingegen eine Überschätzung des Verschmutzungsgrades zu unnötig kurzen Schotterreinigungszyklen und somit zu höchst unwirtschaftlichen Instandhaltungskosten beitragen würde. Dabei spielt die Elastizität der Bettung aber auch der Grad der Wasserdurchlässigkeit eine wesentliche Rolle.

Das Porenvolumen einer neuen, sauberen Schotterbettung beläuft sich in der Regel auf ca. 45 %. Durch eine fortschreitende Verschmutzung des Schotters wird der Porenraum zwischen den Schotterkörnern signifikant verringert, was einen Abfall der elastischen Eigenschaften des Oberbaus zur Folge hat.

*Kolisoja* [13] zeigte bereits in ihrer Arbeit, dass die elastischen Eigenschaften der Schotterbettung in einem linearen Zusammenhang mit dem äquivalenten Durchmesser  $D_{ekv}$  einer Schotterprobe stehe. Dabei entspricht  $D_{XX}$  jener Korngröße, welche die Kornverteilungslinie bei XX Masseprozent aufweist: [13]

$$D_{ekv} = \frac{D_{10} + D_{50} + D_{90}}{3} \quad (2.5)$$

Diverse Forschungen haben bei der Durchführung und Auswertung von Triaxialversuchen gezeigt, dass sich bei einer Verringerung des  $D_{50}$ -Werts um lediglich 10 mm die elastischen Eigenschaften um bis zu 50% verringern können.

Ebenso wird durch eine Verschmutzung des Schotterbetts die Drainageleistung stark herabgesetzt. Kann bei sauberen Kiesen eine Wasserdurchlässigkeit von  $k_f = 10^{-3}$  m/s bis  $10^{-4}$  m/s angesetzt werden, so verringert sich der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  bei sehr stark verunreinigtem Schotterbett auf bis zu  $1,22 \cdot 10^{-5}$  m/s bis  $8,09 \cdot 10^{-6}$  m/s [9]. Durch eine schlechte Drainagewirkung wirken zudem auch Porenwasserdrücke, die die effektiven Spannungen zwischen den einzelnen Körnern reduzieren und in weiterer Folge die Scherparameter herabsetzen.

*Ionescu* beschreibt in ihrer Arbeit [9] ein Konzept zur Abschätzung des Verschmutzungsgrades in Hinblick auf die Erstellung wirtschaftlicher Konzepte für die Instandhaltungsstrategien für den Oberbauschotter auf Basis einer Vielzahl an Auswertungen entnommener Proben und der Vergleich ihrer Kornverteilungslinien.

In der Literatur stößt man immer wieder auf Ansätze für die Beschreibung des Verschmutzungsgrades. So existiert in Nordamerika beispielsweise ein Ansatz von *Selig und Waters* [34] der wie folgt formuliert wurde:

$$Fl_p = P_{0,075} + P_{13,2} \quad (2.6)$$

Dabei entspricht  $P_{X,XX}$  jenem Wert in Masseprozent, welche die Kornverteilungslinie bei der Korngröße X,XX mm aufweist.

Die Gleichung (2.6) dient laut *Ionescu* zwar als ein zuverlässiges Mittel für eine grobe Abschätzung des Verschmutzungsgrades und der Verringerung der Durchlässigkeit einer Schotterprobe, damit kann jedoch nicht auf die verbliebenen elastischen Eigenschaften der Bettung geschlossen werden.

Bei Verwendung eines zusätzlichen Verschmutzungsindex auf Basis des Verhältnisses zwischen neuem und verschmutztem Schotter, würde man ein Werkzeug bereitstellen, mit welchem man relativ auf die Verschlechterung der elastischen Eigenschaften des Schotters schließen könnte. [9]

$$\frac{D_{50,n}}{D_{50,v}} ; \frac{D_{ekv,n}}{D_{ekv,v}} \quad (2.7)$$

Der Index „n“ steht für Neuschotter und der Index „v“ für verschmutzter Schotter.

Solche Schlussfolgerungen wären aber nur möglich, wenn die Korngrößenverteilung des sauberen, eingebauten Schotters bekannt wäre, weswegen eine solche Vorgehensweise für die Praxis mit Sicherheit kaum geeignet wäre.

Mit den Untersuchungen von *Ionescu* [9] geht hervor, dass sich die  $D_{90}$ -Werte im Vergleich zwischen Neuschotter und verschmutztem Schotter kaum änderten, wohingegen große Abweichungen bei den  $D_{10}$ -Werten zu beobachten waren.

*Ionescu* erachtete es daher als überaus sinnvoll, den Verschmutzungsgrad mit dem Verhältnis von  $D_{90}$  zu  $D_{10}$  zu interpretieren, da hierbei keinerlei Informationen über den Zustand des Neuschotters von Nöten sind. [9]

$$Fl_D = \frac{D_{90}}{D_{10}} \quad (2.8)$$

Ein hoher  $Fl_D$ -Wert weist laut *Ionescu* auf eine fehlerhafte Drainagewirkung und eine schlechte Elastizität der Bettung und somit auf einen verunreinigten Schotteroberbau hin.

Um eine Unter- oder Überschätzung des Verschmutzungsgrades zu vermeiden, wurden zwei zusätzliche Grenzwerte ( $P_{0,075}$  und  $P_{13,2}$ ) für stark verschmutzten Schotter mit in die Beurteilung einbezogen. Der Grenzwert  $P_{13,2}$  sorgt dafür, dass der Gleisschotter auch bei  $P_{0,075} < 5\%$  ausreichend freies Porenvolumen aufweist, um die erforderliche Elastizität der Bettung zu gewährleisten.

Aus der Kombination der beiden Gleichungen (2.6) und (2.8) erhält man ein gutes Werkzeug für die Abschätzung des Verschmutzungsgrades. Speziell die Gleichung (2.8) kann somit laut [9] verwendet werden, um wirtschaftliche Strategien für die Schotterbettreinigung erstellen zu können.

Tabelle 2.4.: Klassifikationskriterien für verschmutzten Gleisschotter; adaptiert nach [9]

Verschmutzungsindex		Selig und Waters (1997)	Klassifikation
$Fl_p = P_{0,075} + P_{13,2}$	$Fl_D = \frac{D_{90}}{D_{10}}$	$Fl_p = P_{0,075} + P_{4,75}$	
< 2	< 2,1 und $P_{13,2} < 1,5\%$	< 1	sauber
2 – 10	2,1 – 4	1 – 10	mäßig sauber
10 – 20	4 – 9,5	10 – 20	mäßig verschmutzt
20 – 40	9,5 – 40	20 – 40	verschmutzt
> 45	> 40, $P_{13,2} > 40\%$ , $P_{0,075} > 5\%$	> 40	stark verschmutzt

Die Tabelle 2.4 gibt die oben genannten Ansätze für die Klassifikation von verschmutztem Gleisschotter im Vergleich zueinander an.

Aus den durch diese Klassifikation ausgewerteten Daten ergeben sich verschiedene Verschmutzungsklassen, die in Abbildung 2.18 aus der Auswertung von [9] dargestellt sind. *Ionescu* weist jedoch darauf hin, dass für die Abschätzung der Reinigungszyklen die entsprechenden Streckenabschnitte zusätzlich vor Ort begutachtet und überwacht werden sollten, um Fehleinschätzungen durch das Klassifikationskriterium zu vermeiden. [9]

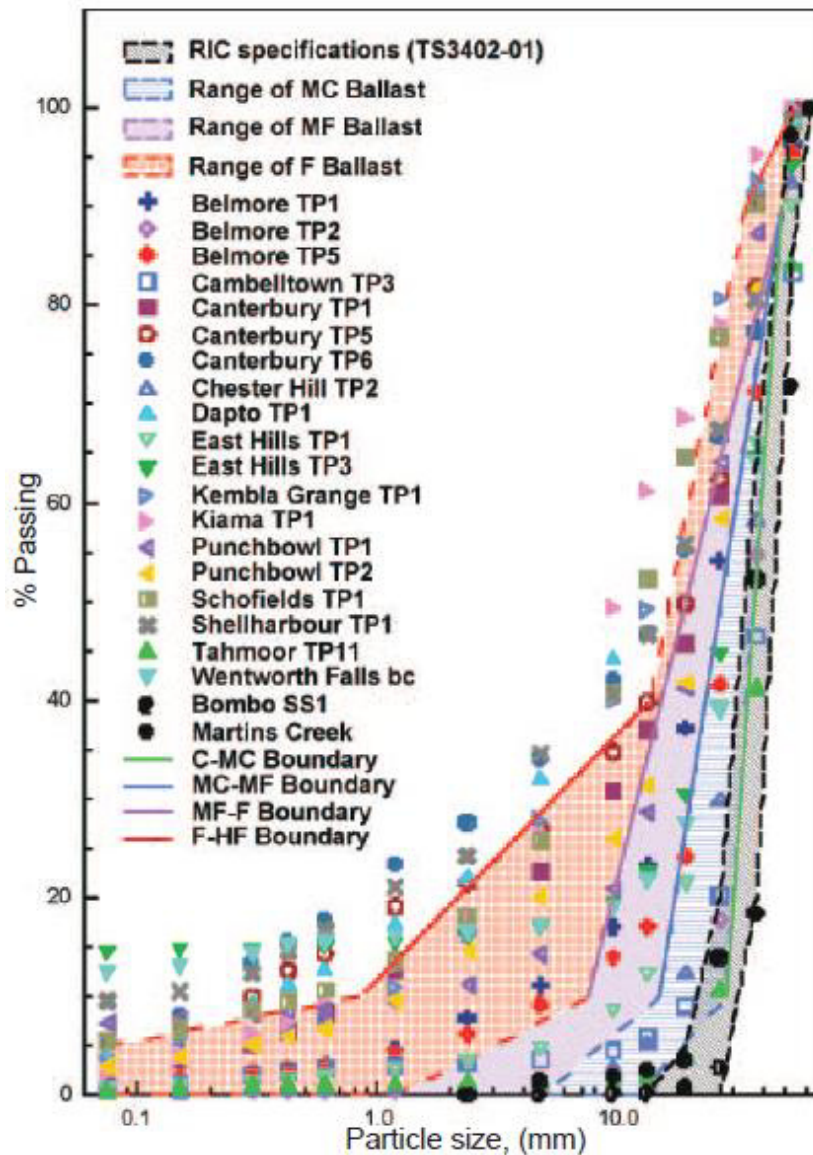


Abbildung 2.18: Kategorien von verschmutztem Schotter und deren Schwankungsbereich [9]

#### 2.6.4 Korrelation zwischen LA-Koeffizient und anderen Labortests

Speziell auf dem nordamerikanischen Kontinent ist es eine große Herausforderung, aufgrund des weitläufigen Bahnstreckennetzes, entsprechende Konzepte zur Instandhaltung zu entwickeln. Deshalb existiert eine Vielzahl an Forschungen zur Zerkleinerung des Gleisschotters während des Stopfvorgangs, die eine Lösung zu diesem Problem beitragen können. Eine davon stammt von *Caleb* [5], die im Folgenden zusammenfassend erläutert wird.

Beprobte wurde Gleisschotter aus allen 13 in Nordamerika existierenden Schotterlieferanten. Der Stopfvorgang selbst wurde in einem Versuchsaufbau simuliert. Dabei kamen, wie in Nordamerika noch häufig verwendet, Holzschwellen zum Einsatz (Abbildung 2.19). Bei der Versuchsdurchführung wurden die Einzelproben mit bis zu 100 Stopfzyklen beansprucht und auf ihre Kornverteilung untersucht.



Abbildung 2.19: Versuchsaufbau zur Simulation von Stopfarbeiten [5]

Die ausgewerteten, durchschnittlichen Ergebnisse der Untersuchung der Korngrößenverteilung sind zusammengefasst in der folgenden Tabelle 2.5 dargestellt.

Tabelle 2.5.: Durchschnittlicher Siebdurchgang für unterschiedliche Kornfraktionen in Abhängigkeit der Anzahl der Stopfzyklen; adaptiert nach [5]

Anzahl der Stopfzyklen	Siebgröße					
	1 Inch (25 mm)		0,75 Inch (19 mm)		0,5 Inch (13 mm)	
	Änderung [%]	Änderung je Stopfung	Änderung [%]	Änderung je Stopfung	Änderung [%]	Änderung je Stopfung
12	5%	0,42%	4%	0,37%	3%	0,28%
25	9%	0,36%	8%	0,32%	6%	0,24%
62	14%	0,22%	14%	0,22%	11%	0,17%
100	17%	0,17%	17%	0,17%	14%	0,14%

Die relativen Werte in Tabelle 2.5 beziehen sich auf den Zustand des Schotters vor den Untersuchungen. Hierbei kann gezeigt werden, dass die Alterungsrate des Schotters mit jedem weiteren Stopfvorgang abnimmt.

Die derzeitige Normenlage beschreibt immer wieder Korrelationen zwischen dem LA-Koeffizienten (vgl. Kapitel 2.5.1) und der Alterung des Schotters bzw. der Zertrümmerung unter dynamisch-zyklischer Last. Die ausgewertete Versuchsreihe von *Caleb* [5] zeigt jedoch, dass aufgrund seiner simulierten Beanspruchung keinerlei statistische Korrelation zwischen den LA-Werten und den Ergebnissen aus den Kornverteilungen festgestellt werden können. Die Abbildung 2.20 zeigt ein Diagramm aus *Calebs* Untersuchungen. Hierbei ist der fehlende Zusammenhang zwischen Werten aus den LA-Versuchen und den Verschlechterungsraten des Gleisschotters gut zu erkennen.

So ist die Rate der Verschlechterung bei einem LA-Wert von ca. 9 bei ca. 3%, bei einem LA-Koeffizienten von in etwa 10 liegt die Rate bei ca. 9%. Im Bereich um den LA-Wert von ca. 14 fällt die Rate jedoch wieder auf ca. 4%, bezogen auf die Werte der Korngröße mit 0,5 Inch.

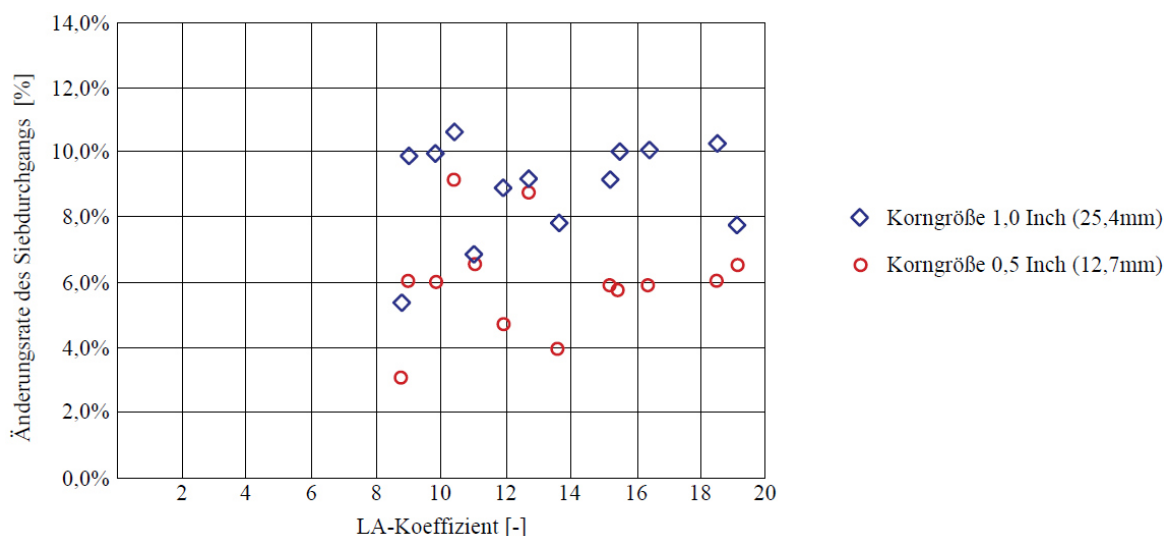


Abbildung 2.20: Änderungsrate des Siebdurchgangs in Prozent in Relation zu den zugehörigen LA-Koeffizienten basierend auf 25 durchgeführte Stopfzyklen; adaptiert nach [5]

Den derzeitigen Normen [41][38] zufolge wird jedoch von näherungsweise Proportionalität des LA-Koeffizienten zur Verschlechterungsrate ausgegangen, die zumindest die Untersuchungsergebnisse von *Caleb* nicht verifizieren kann.

Des Weiteren wurde aus den beiden am besten abgeschnittenen Proben, betreffend der geringsten Verschmutzung nach Versuchsdurchführung, zusätzliche mikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die abgebrochenen Feinteile eine teils kantig, gerundete Form aufweisen, weshalb die Stabilität durch die verbesserte Verzahnung unter den Körnern erhöht wird.

Die Studie bestätigt abermals die Schwierigkeit der Vorhersage von Schotterverhalten in eingebautem Zustand mit Laborversuchen und die Wichtigkeit von hartem, dichtem, verwitterungsbeständigem Schotter und dessen Abbau, Transport, Einbau und Wartung.

### 2.6.5 Untersuchungen in-situ zur Feststellung des Verschmutzungsgrades

Die Studie von *Perales et al.* [23] befasst sich in erster Linie mit dem Einfluss von Stopfvorgängen auf die Geometrie von Neuschotter und deren Veränderung durch dynamisch-zyklische Stopfbeanspruchung.

Für die Untersuchungen wurde ein stark verschmutzter Streckenabschnitt in Nordfrankreich herangezogen. Zur Vorbereitung der Teststrecke wurden die obersten 20 cm des verschmutzten Schotters entfernt. Für die Versuchsdurchführung wurden insgesamt 45 t an Neuschotter verwendet. Dieser „saubere“ Schotter wurde in nummerierte „Big-Bags“ gefüllt, die wiederum, als Auflager, unter den Schwellen positioniert wurden (vgl. Abbildung 2.21).



Abbildung 2.21: Positionierung der mit sauberem Neuschotter befüllten „Big-Bags“ unter dem Gleisrost [23]

Insgesamt wurde die Teststrecke in 13 Sektoren unterteilt, die je mit einer unterschiedlichen Anzahl an Stopfzyklen (zwischen null und 45-mal) belastet wurden. An vier weiteren Stellen wurde zudem auch die Beistellgeschwindigkeit variiert, um auch die Auswirkung dieses Parameters auf die Schotterzerkleinerung einschätzen zu können.

Nach Abschluss der Stopfarbeiten wurden die insgesamt 34 „Big-Bags“ wieder ausgebaut und im Labor einer Siebanalyse unterzogen. Dabei wurden aus jedem „Big-Bag“ je drei Proben entnommen und untersucht.

Bei der Auswertung der Proben mit 45 Stopfzyklen fiel auf, dass bei einer Korngröße von  $D = 50 \text{ mm}$  ein signifikanter Einfluss von bis zu 6,4 % auf die Korngrößenverteilung zu erkennen war.

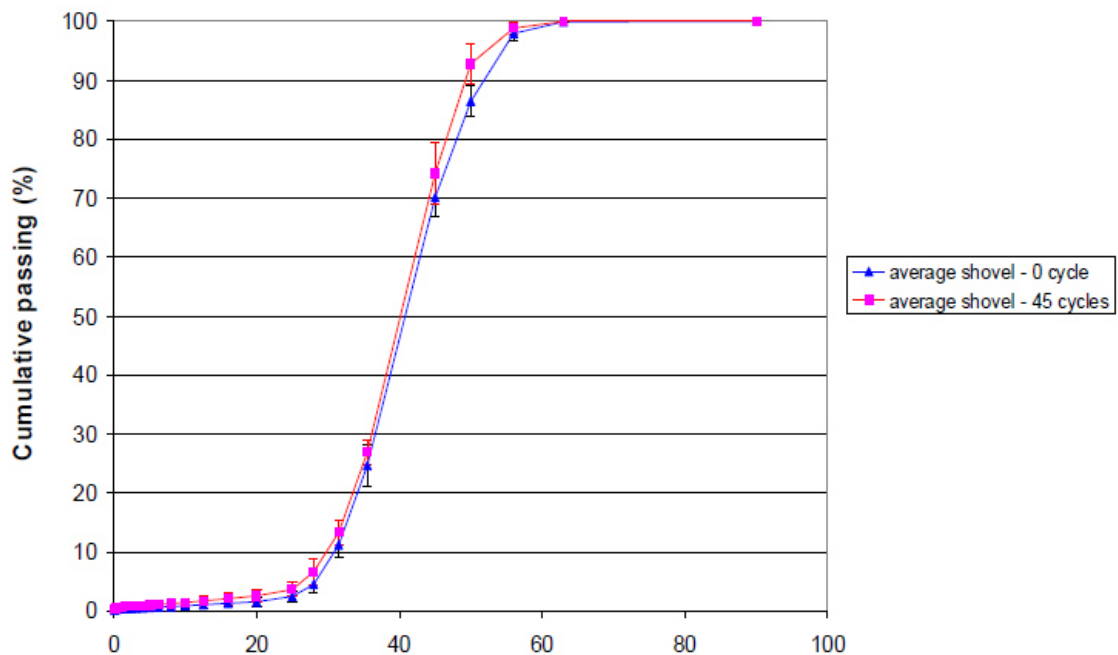


Abbildung 2.22: Effekte aus 45 Stopfzyklen im Vergleich mit sauberem Neuschotter [23]

In Abbildung 2.23 werden die durchschnittlichen Anteile jeder Kornfraktion zwischen abgenütztem und neuem Referenzschotter verglichen. Dabei fällt auf, dass die Schotterkörner, die größer als 50 mm sind, am stärksten von der Zerkleinerung betroffen sind, da diese Kornfraktion das Hauptgerüst in der Gleisschotterbettung sind, die üblicherweise die größten Kraftanteile übertragen. Durch die Zerkleinerung der großen Körner wird bei weiterer Lastdauer die Menge an kleineren Kornfraktionen erhöht, da diese bei Fehlen der oberen Kornfraktion die volle Last abzutragen haben.

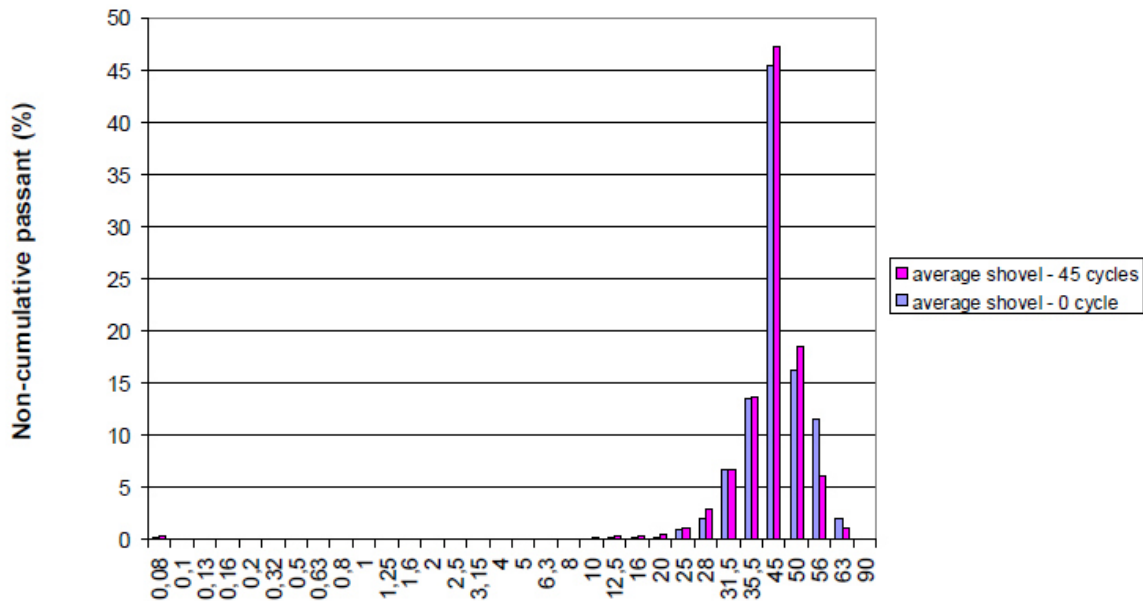


Abbildung 2.23: Effekte aus 45 Stopfzyklen, sortiert nach Kornfraktionen [23]

Die eingangs erwähnte Variation der Beistellgeschwindigkeit hat nur wenig Auswirkung auf die Zerstörung des Schotters, wobei ein minimaler Anstieg der Feinteile bei normaler und erhöhter Geschwindigkeit, im Vergleich zur geringsten Geschwindigkeitsstufe, zu beobachten war.

Die Stopfarbeiten haben aber auch in Hinblick auf die Abnutzung bzw. Abrundung der Schotterkörner, vermutlich durch die doch sehr kurze Einwirkdauer der Stopfwerkzeuge auf den Schotter, kaum einen Einfluss auf die geometrische Form des granularen Mediums.

## 2.7 Lastverteilungs- und Lastabtragungsverhalten des Gleisschotters

### 2.7.1 Schotterbettstärke

Um Lasten aus dem Bahnbetrieb gezielt und gesichert in den Untergrund einzuleiten, ist es notwendig, eine möglichst große Schotterbetthöhe anzustreben. Durch eine Überschneidung der Druckverteilungslinien am Planum wird ein Hochpumpen von Feinteilen aus dem Untergrund weitestgehend vermieden. Durch die aufsteigende Verschmutzung würde zum einen der Schotter relativ rasch verschmutzen, was einen Abfall der Schereigenschaften zur Folge hätte, zum anderen würde die Zerstörung des Untergrundplanums schneller vorangetrieben werden.



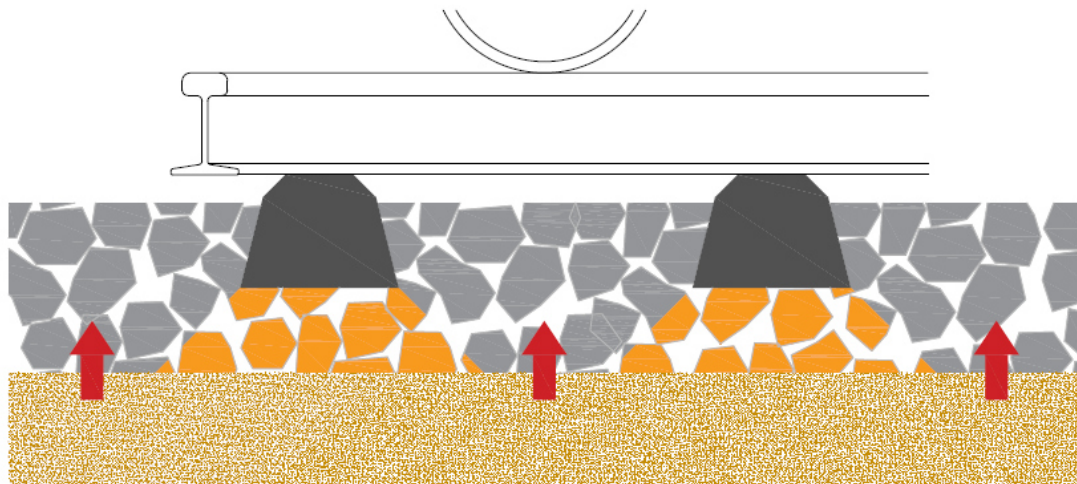


Abbildung 2.24: Zerstörung des Planums durch unzureichende Lastverteilung infolge zu geringer Bettungshöhe; adaptiert nach [15]

Bei der Dimensionierung des Bettungsquerschnitts sind somit die Wahl des Schwellenabstands, der Schwellenbreite und des Reibungswinkels bzw. des Druckausbreitungswinkels des Schotters von größter Bedeutung.

Bei den in Europa heutzutage üblichen Achslasten von 220 kN wird ein Schwellenabstand von ca. 60 cm, bei einer Breite der Schwellen von ca. 26 – 28 cm angestrebt, um auf eine Bettungshöhe (UK Schwelle bis Planum) von mind. 30 cm zu kommen. Bei Hochleistungsstrecken soll die Höhe des Schotterbetts mind. 40 cm betragen. [15]

### 2.7.2 Innerer Reibungswinkel des Gleisschotters

Ein wichtiger Parameter für die Lastabtragung ist der Reibungswinkel des Gleisschotters. Je höher der innere Reibungswinkel, desto widerstandsfähiger gegenüber Setzungen wird das Schotterbett. Große Mengen an Schotter können aktiviert und zur Lastabtragung herangezogen werden, was wiederum eine Reduktion der Sohlpressungen mit sich bringt.

Der Reibungswinkel kann im Wesentlichen durch die Korngrößenverteilung (Ungleichförmigkeit, Dichte, Kornform, Oberflächenrauheit, Scharfkantigkeit und Kantenstabilität) beeinflusst werden. Manche dieser Eigenschaften lassen sich aber aufgrund der natürlichen Struktur bzw. der gegebenen Mineralogie nur schwer steuern.

Feinanteile im Schotter wirken wie ein „Schmierstoff“ und setzen die Scherfestigkeit herab, die wiederum unerwünschte Spannungsspitzen in der Bettung bewirken. Durch die kapillare Wirkung der Feinanteile wird Wasser gebunden, was ebenfalls zu einer Tragfähigkeitsminderung und in weiterer Folge zu langfristigen Setzungen führen kann.

Diese äußerst wichtige Erkenntnis über die Verteilung der Lasten bei einer Zugüberfahrt bildet die Grundlage der Berechnung der Sohlruckspannungen unter den Schwellen, die im nächsten Kapitel (vgl. Kapitel 2.7.7) behandelt werden. [15]

### 2.7.3 Scherfestigkeit des Schotters

Primär wird die Tragfähigkeit des Schotters durch die Scherfestigkeit bestimmt. Die Scherfestigkeit ist jene Kraft, die überschritten werden muss, um eine Querverschiebung bzw. ein Abscheren des Materials zu erreichen.

Da der Gleisrost, bestehend aus Schwellen und Schienen, relativ geringe Steifigkeiten aufweist, fällt ein großer Anteil der Aufgabe der Lastabtragung auf den Gleisschotter. Aus diesem Grund ist die Kenntnis über statisches und dynamisches Lastverhalten des Gleisschotters essenziell für eine ausreichende Dimensionierung der Gleisanlage. [15]

#### 2.7.3.1 Statisches Scherverhalten

Das statische Scherverhalten setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: der Reibung zwischen den Schotterkörnern und dem zwischen ihnen wirkenden Verzahnungswiderstand. Der Verzahnungswiderstand (Verzahnungskohäsion  $c$ ) ist im betrachteten Bereich stets unabhängig von der einwirkenden Normalspannung (vgl. Abbildung 2.25). Er ist im Wesentlichen von der Ungleichförmigkeit, der Korngröße, der Kornform, der Rauigkeit sowie der Dichte des Schotters abhängig. [15]

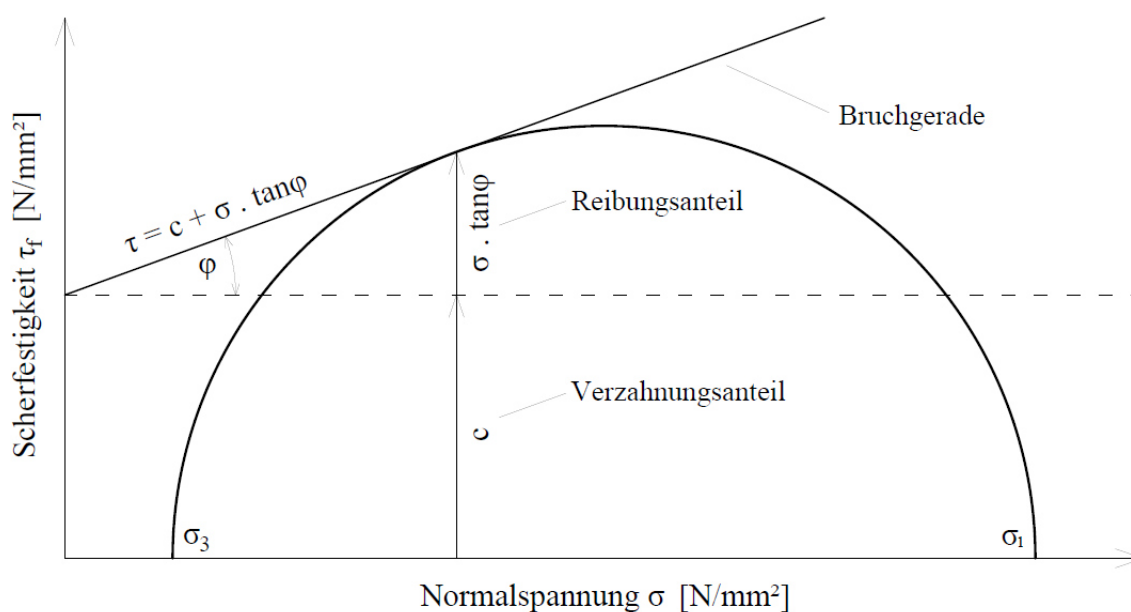


Abbildung 2.25: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit, Normalspannung, Verzahnungs- und Reibungsanteil beim Scherversuch; adaptiert nach [15]

Zur Bestimmung des inneren Reibungswinkels  $\phi$  werden Großscherversuche durchgeführt. Hierbei wird eine Schotterprobe bei konstanter Normalspannung durch langsam steigende Horizontalkraft bis zum Bruch beansprucht. Der Versuch wird mehrmals mit unterschiedlichen Normalspannungen durchgeführt. Als Ergebnis erhält man die zugehörige maximale Scherfestigkeit und in weiterer Folge die Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade.

Den Winkel der inneren Reibung erhält man aus dem Quotient der Widerstandskraft  $F_W$  in der Scherfuge und der Scherfläche  $A_0$  und durch die Division der aufgetragenen Vertikalspannung.

$$\tan \varphi = \frac{F_W}{A_0 \cdot \sigma_0} = \frac{\Delta \tau}{\Delta \sigma} \quad (2.9)$$

Die Bruchgerade wird folgendermaßen definiert:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.10)$$

Liegt die Scherbeanspruchung über der in Abbildung 2.25 gezeigten Bruchgerade, dann versagt der Aufbau; Der Schotter verliert die Haftreibung untereinander und beginnt zu Gleiten. Die maximale Schubbeanspruchung tritt in einer Tiefe von zirka der halben Schwellenbreite auf (vgl. Abbildung 2.26).

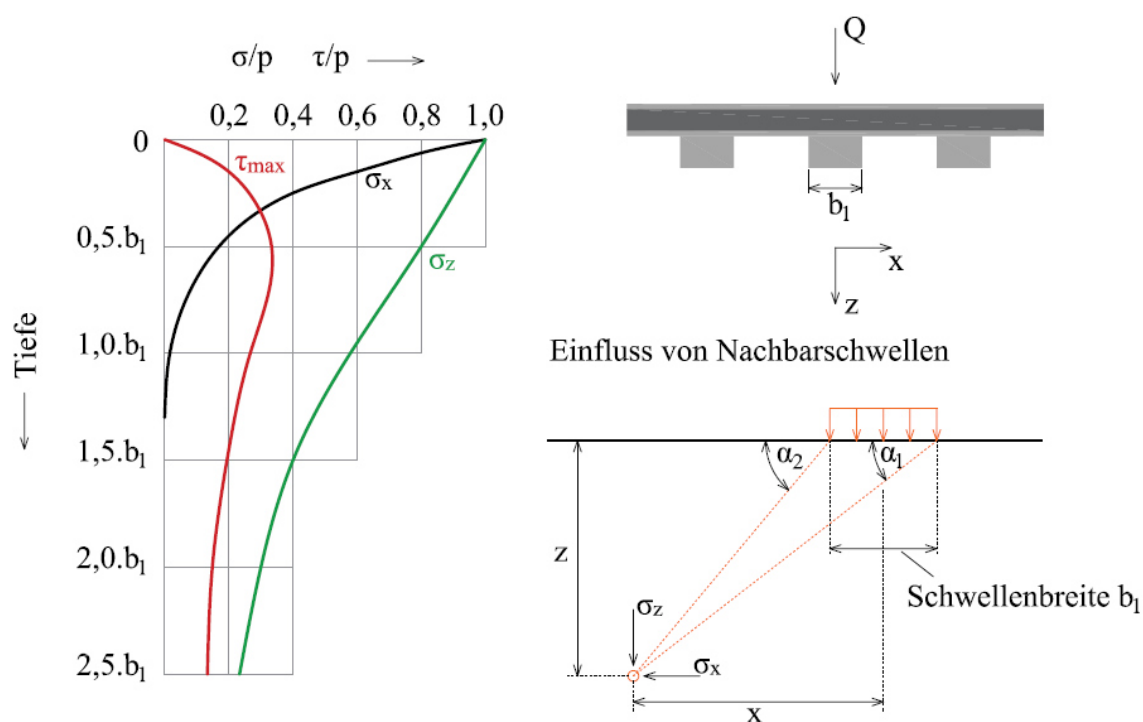


Abbildung 2.26: Verlauf der Hauptspannungen  $\sigma_z$  und  $\sigma_x$  sowie Haupt Schubspannungen in der Lastachse; adaptiert nach [12]

### 2.7.3.2 Dynamisches Scherverhalten

Um das tatsächliche Scherverhalten des Schotters bei aufgenommenem Bahnbetrieb zu simulieren, wurden im Zuge der Dissertation von Profanter an der TU Graz (Untersuchungen an grobkörnigen Tragschichten, 1971) Versuche mit einem dynamischen Scherapparat durchgeführt [15]. Eine horizontale Stoßbelastung wird hierbei mit einem Fallhammer bei gleichzeitiger Druckbeanspruchung über vertikale Hydraulikzylinder erzeugt. Laut [15] wurden bei den dynamischen Scherversuchen folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Aus großen Vertikalspannungen resultieren bei kleinen plastischen Verformungen auch kleine innere Winkel.
- Der innere Reibungswinkel konvergiert mit einer horizontalen Tangente und steht somit nicht in einem linearen Zusammenhang mit der Stoßbelastung. Die Folge ist eine ausschließliche Zunahme des Scherwegs bei weiterer Erhöhung des Stoßimpulses.
- Welchen Wert die horizontale Tangente des Reibungswinkels annimmt, hängt primär von der aufgebrauchten Vertikalspannung ab.
- Die Scherwege bei einer solchen dynamischen Belastung sind in etwa zwei bis dreimal so groß wie die Scherwege bei reiner statischer Belastung.

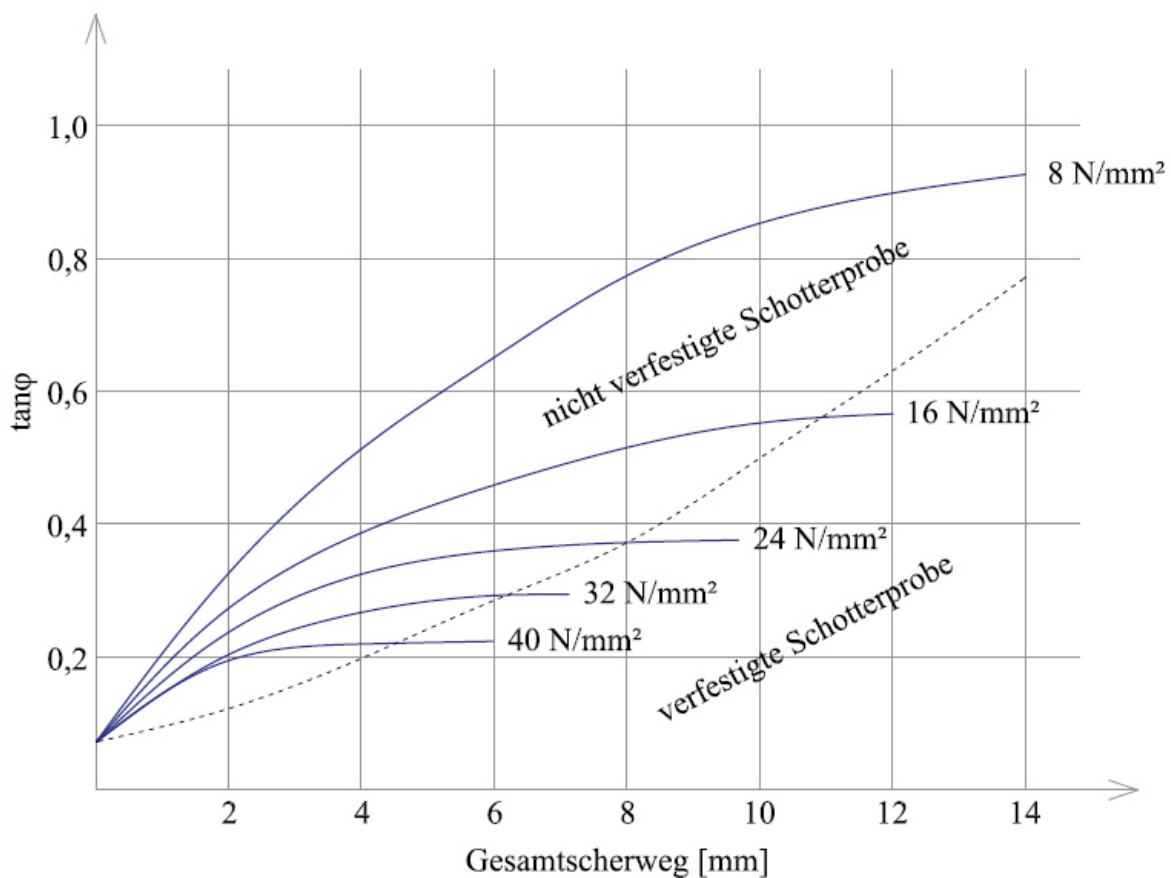


Abbildung 2.27: Maximal mögliche Werte des inneren Reibungswinkels bei stoßender Belastung für verschiedene vertikale Spannungen; strichliert die Grenze zwischen verfestigter und nicht verfestigter Schotterprobe; adaptiert nach [15]

Mangelnde Wartung bzw. Instandhaltung von Fahrwerk und Strecke, in erster Linie Flachstellen am Rad und unzureichende Schienenübergänge bzw. Schweißnähte, führen mitunter zu hohen, dynamischen Belastungen, wie auch beim dynamischen Scherversuch durch den Stoßimpuls simuliert wird. Dadurch muss mit großen plastischen Deformationen im Schotterbett gerechnet werden. [15]

### 2.7.4 Querverschiebewiderstand

Um einen gesicherten Bahnbetrieb aufrechtzuerhalten, muss die horizontale Soll-Lage der Schiene gegeben sein. Der Widerstand gegen ein Querverschieben der Schwellen ist hierbei ein entscheidender Faktor zur Minimierung von horizontalen Verschiebungen. Der Querverschiebewiderstand hängt in erster Linie von der Verdichtung des Schotters, aber auch von der Schottermenge zwischen und vor den Schwellen, von der Kornzusammensetzung und von der Geometrie und der Oberflächenbeschaffenheit der Schwellen selbst ab. Zur Dimensionierung des Schottervorkopfs bzw. um einen ausreichenden Querverschiebewiderstand zu erreichen, ist ein Maß von 45 – 50 cm anzustreben. Details zur Messung und zur Erhöhung des Querverschiebewiderstands sind dem Kapitel 4.3 zu entnehmen.

### 2.7.5 Theorie der Hertz'schen Pressung

Berühren sich zwei Körper punkt- oder linienförmig, wie auch zwischen Rad und Schiene, ergeben sich Kontaktspannungen und Verformungen, die nach der Theorie von Hertz berechnet werden können. Die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene beträgt in Abhängigkeit von den Radlasten, der Radposition auf der Schiene und der Abnutzung der beiden Komponenten nur in etwa 1 – 3 cm<sup>2</sup>. [15]

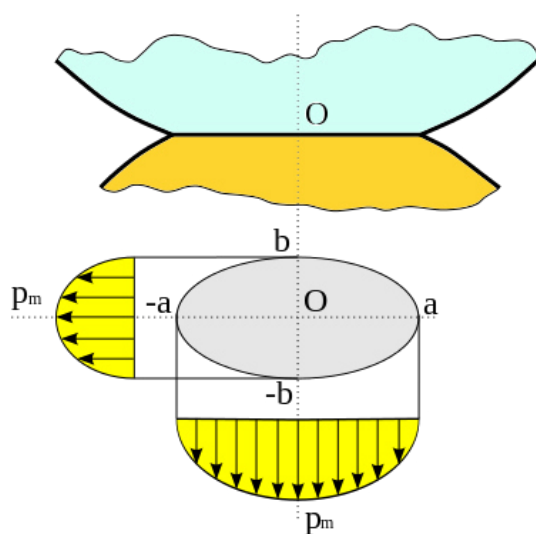


Abbildung 2.28: Kontaktflächen und Kontaktspannung  $p_m$  zweier sich berührender elastischer Körper [52]

Durch die von Heinrich Hertz entwickelte Theorie wird die Berechnung der Spannungen und deren Verformungen an den Berührflächen zwischen zwei elastischen Körpern ermöglicht. Unter Annahme einer Walzenberührung kann, die an den Berührflächen auftretende Schubspannung ermittelt werden. Die Länge der Kontaktfläche  $2a$  ergibt sich zu:

$$2a = 3,04 \sqrt{\frac{F \cdot r}{2b \cdot E}} \quad (2.11)$$

$F$  ist die wirksame Radlast,  $r$  der Radradius,  $b$  die halbe Breite der Kontaktfläche,  $p_m$  die Kontaktspannung und  $E$  der Elastizitätsmodul der Schiene.

Unter der vereinfachten Annahme, dass  $r \geq 300$  mm ist, gilt:

$$p_m = \frac{F}{2a \cdot 2b} = \frac{F \sqrt{2b \cdot E}}{3,04 \sqrt{F \cdot r \cdot 2b}} \quad (2.12)$$

Nimmt man den Elastizitätsmodul des Stahls mit  $2,1 \cdot 10^5$  N/mm<sup>2</sup> und die Fahrspiegelbreite  $2b$  mit 12 mm an, ergibt sich für die Kontaktspannung

$$p_m = 43,5 \sqrt{\frac{F}{r}} \quad (2.13)$$

Die nach der Halbraumtheorie berechnete maximale Schubspannung wird wie folgt ermittelt:

$$\tau_{max} = c \cdot p_m \quad (2.14)$$

wobei  $c$  ein Faktor zur Berücksichtigung der Form der Berührfläche ist. Näherungsweise ergibt sich die maximale Schubspannung zu:

$$\tau_{max} = 0,3 \cdot p_m = 13,05 \sqrt{\frac{F}{r}} \quad (2.15)$$

Durch die, wie bereits erwähnten, äußerst kleinen Berührflächen zwischen Rad und Schiene entstehen am Schienenkopf statische Spannungen von bis zu 42000 N/cm<sup>2</sup> [15] (vgl. Abbildung 2.29).

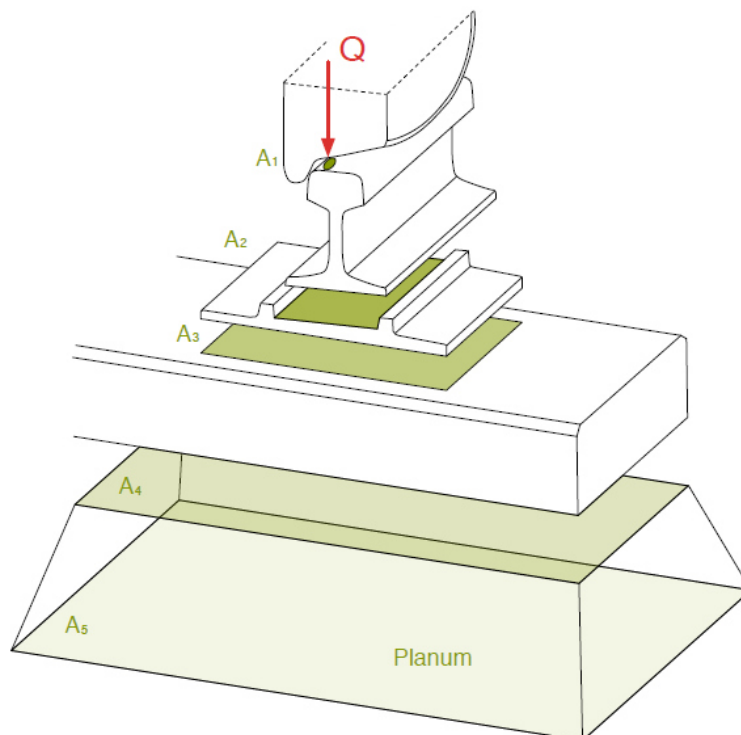


Abbildung 2.29: Druckverteilung einer Radlast über die Systemkomponenten des Gleises [22]

Die resultierenden Spannungen werden unter dynamischer Belastung unter Umständen so groß, dass diese die Materialwiderstände sogar kurzfristig überschreiten können.

Um diese hohen Spannungen ohne Materialversagen ableiten zu können, werden die Kontaktflächen der einzelnen Gleiskomponenten nach unten hin immer größer, die Spannungen somit geringer (vgl. Tabelle 2.6). Somit werden die sehr hohen Pressungen sukzessive über die einzelnen Gleiskomponenten in den Untergrund abgetragen.

Tabelle 2.6.: Kontaktflächengröße und -spannungen zwischen den einzelnen Gleiskomponenten; adaptiert nach [15]

Art der Kontaktfläche	Größe der Kontaktfläche	mittlere Spannung
Rad – Schiene	~3 cm <sup>2</sup>	42000 N/cm <sup>2</sup>
Schiene – Zwischenlage	~200 cm <sup>2</sup>	420 N/cm <sup>2</sup>
Zwischenlage – Schwelle	~510 cm <sup>2</sup>	170 N/cm <sup>2</sup>
Schwelle – Gleisschotter	~2380 cm <sup>2</sup>	37 N/cm <sup>2</sup>
Gleisschotter - Unterbauplanum	~10100 cm <sup>2</sup>	10 N/cm <sup>2</sup>

Bei einer theoretischen Auflagerfläche einer Schwelle von 2400 cm<sup>2</sup> würden sich Spannungen an der Unterseite der Schwelle von bis zu ca. 4000 N/cm<sup>2</sup> ergeben. Gewöhnliche Werte für die zulässigen Sohlpressungen von Schotter bewegen sich in etwa um 3000 N/cm<sup>2</sup>. Damit diese hohen Spannungen gesichert in den Untergrund abgetragen werden können, ist bei der Dimensionierung und Herstellung der Bettung größte Sorgfalt geboten.

### 2.7.6 Lastausbreitung und Lastverteilung

Durch die Elastizität der Schienen bzw. des gesamten Oberbaus wirkt der gesamte Aufbau lastverteilend auf mehrere benachbarten Schwellen, somit können die oben genannten hohen Spannungen reduziert werden.

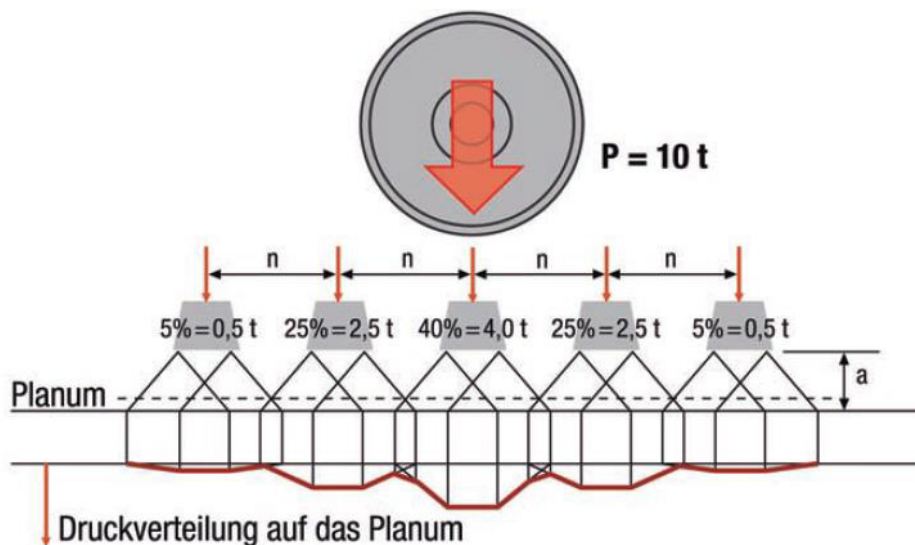


Abbildung 2.30: Druckverteilung unter einer Einzellast von 10 t [12]

Hierbei ist zu beachten, dass die Wirkung der Lastverteilung eine Anfangseinsenkung benötigt, die durch das elastische Zusammenspiel zwischen den einzelnen Oberbaukomponenten ermöglicht werden soll. Je steifer die Schienen und je weniger steif die Bettung ist, desto mehr Schwellen werden für die Lastabtragung herangezogen.

In den meisten gängigen Berechnungsmodellen werden 5 Schwellen betrachtet. Dabei beträgt der Lastanteil für die Schwelle direkt unter dem Rad ca. 40%. Den beiden benachbarten Schwellen kann ein gemeinsamer Anteil von ca. 50 % zugeschrieben werden. Die beiden äußeren Schwellen tragen hingegen die restlichen 10 % der Verkehrslast. [12]

Je steifer das System bzw. je geringer die Schotterbetthöhe ausgeführt wird, desto größer wird der Lastanteil der mittleren Schwelle. Zusammengefasst hängt die Lastverteilung vom Schwellenabstand, von der Biegesteifigkeit der Schiene und von der Bettungszahl des Schotters ab.

Durch die druckverteilende Wirkung des Schotters wird der Druck auf das Unterbauplanum reduziert und somit eine Zerstörung des anstehenden Bodens verhindert. Dabei spielt der Lastausbreitungswinkel des Oberbauschootters eine bedeutende Rolle. Angestrebt wird eine gleichmäßige Spannungsverteilung bzw. in weiterer Folge eine Überschneidung der Druckkegel auf dem Planum. Durch die Annahme des Lastausbreitungswinkels und der Wahl des Schwellenabstands kann die mindestens erforderliche Stärke der Schotterbettung geometrisch ermittelt werden.

$$h = \frac{a}{2 \cdot \tan \alpha} \quad (2.16)$$

Dann ist  $a$  der Schwellenabstand und  $\alpha$  der Lastausbreitungswinkel im Schotter. In der Literatur findet man Werte für den Lastausbreitungswinkel für unterschiedliche Zustände des Schotters [15] gemäß der folgenden Tabelle 2.7:

Tabelle 2.7.: Werte für Lastausbreitungswinkel für unterschiedliche Bettungsverhältnisse; adaptiert nach [15]

neuer, kantiger Schotter	42°
gebrauchter Schotter	39°
verschmutzter Schotter	30°

Neueste Untersuchungen an der TU Graz haben jedoch zum Teil Lastausbreitungswinkel in verschmutzten Schottern von nur 20° ergeben! [15]

Ein besonders wichtiges Glied in der Lastabtragungskette ist demnach die Schotterbettung. Nur bei homogenen Auflagerbedingungen der Schwelle auf der Bettung werden die Lasten aus dem Bahnbetrieb gleichmäßig in den Untergrund abgeleitet.

Die Abtragung der Kräfte passiert über die Kontaktflächen des Schottermaterials primär über Druck- und sekundär über Schubkräfte.

Anders als bei isotropen, homogenen Materialien erfolgt die Lastabtragung im Schotter durch willkürlich angeordnete Lastpfade, wodurch der Lastausbreitungswinkel oft unterschritten, gelegentlich aber auch überschritten wird. [15]

Abrupte Änderung der Steifigkeit des Oberbaus (Brückenübergänge auf feste Fahrbahn) oder lokale Unterschiede der Verdichtungsqualität wirkt sich maßgebend auf die Lastabtragung aus (Streuung 10 % bis zu 30 % je nach Zustand des Oberbaus).



Um diese natürlichen Inhomogenitäten so gering wie möglich zu halten, muss auf eine sorgfältige und möglichst gleichmäßige Verdichtung geachtet werden. Ebenso sollten Steifigkeitsschwankungen durch Hohllagen unter den Schwellen möglichst vermieden werden, um lokal konzentrierte Belastungen und somit eine Steigerung der Sohlspannungen zu vermeiden.

### 2.7.7 Sohlpressungen, Schotter- und Bodendruckspannungen

Die Beanspruchung des Schotters wird durch die Schotterpressung dargestellt. Sie ergibt sich im konkreten Fall des Bahnoberbaus aus der Last einer Schwelle bezogen auf die effektiven Kontaktflächen zwischen der Schwellensole und dem Schotter. Einer Untersuchung an der TU München zufolge ist die effektive Kontaktfläche nur in etwa 1–2 % der gesamten Schwellenunterseite! [15]

Die statischen Radlasten sind im Allgemeinen bekannt (z.B. bei Lokomotiven bis zu 125 kN). Die weitaus problematischeren Einwirkungen in Bezug auf die Überbeanspruchung des Gleisschotters sind vertikale quasistatische bzw. dynamische Lasten. Durch Unregelmäßigkeiten im Fahrbahnoberbau, wie Weichen und Stoßstellen und durch den allgemeinen Erhaltungszustand des Fahrwerks selbst (Flachstellen am Rad, Dämpfung) wird der Schotter durch hohe punktuelle Kraftspitzen in Form von abrupten Schlägen überbeansprucht. Durch die zum Teil schräg zur Kontaktfläche wirkenden Druckkräfte kommt es an den Schotterkörnern zu Absplitterungen. Auch plattige Steine, auf Biegung beansprucht, werden durch die impulsiven Schläge gebrochen. Die größte Zerstörung der Schotterkörner findet circa in einer Tiefe der halben Schwellenbreite statt.

Durch die Durchbiegung der Schiene unter der Radlast „e“ kommt es an bestimmten Stellen des Gleises während der Zugüberfahrt auch zu Hebungen „a“ der Schiene (vgl. Abbildung 2.31). Diese negativ gerichteten vertikalen Verformungen werden aber fast ausschließlich von der Schienenbefestigung getragen und haben nur geringe Auswirkungen auf die Schotterbeanspruchung.

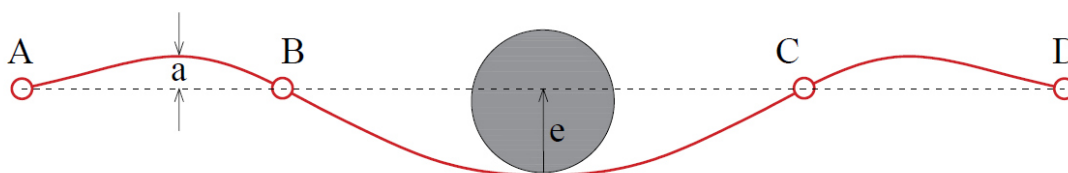


Abbildung 2.31: Idealisierte Durchbiegung der Schiene unter einer Radlast; adaptiert nach [12]

Um den Anteil der hohen dynamischen Einwirkungen zu dämpfen, muss auf eine ausreichend „weiche“ bzw. „elastische“ Bettung geachtet werden. Ziel der Bemessung ist es, keine unzulässigen elastischen und plastischen Verformungen zuzulassen.

### 2.7.8 Bettungsmodul

Ein Modell zur Beanspruchungsbeurteilung der Oberbaukomponenten wurde von Zimmermann entwickelt, welches auch in den Richtlinien der ÖBB Eintrag findet. Dabei wird die Schiene als unendlich langer Durchlaufträger betrachtet. Die Elastizität des Schotters wird durch den Bettungsmodul  $C$  ausgedrückt.

Der Bettungsmodul gibt das Verhältnis von Flächenpressung  $p$  und Einsenkung  $y$  des Auflagerpunktes wieder und berücksichtigt somit die elastischen Eigenschaften der Bettung und die des Untergrunds. Er beschreibt in gewisser Weise das Verformungsverhalten des Gleises:

$$C = \frac{p}{y} [N/mm^3] \quad (2.17)$$

Die Schienenverformung hängt in erster Linie von den Radlasten, von den Steifigkeiten der Oberbaukomponenten und vom Schwellenabstand ab.

Tabelle 2.8.: Richtgrößen und Erfahrungswerte für den Bettungsmodul; adaptiert nach [12]

Art des Untergrunds	Beispiele	Bettungsmodul C [N/mm <sup>3</sup> ]
Sehr schlechter Untergrund	Moorböden, enggestufte Sande	0,02
Schlechter Untergrund	Bindige Böden, nicht dauerhafte Gleislage	0,05
Guter Untergrund	Kies	0,10
Sehr guter Untergrund	dicht gelagerter Kies	0,15
Betonsohle	Brücken, Tunnel	≥ 0,30

Die in der Tabelle 2.8 angegebenen Richtwerte sind Erfahrungswerte. Um genauere Werte für die Bettung zu erhalten, wird in der Praxis über Einsenkungsmessungen und Messungen der Schienenfußspannung und somit auf die Biegelinie der Schiene zurückgegriffen.

Nach der Berechnungsmethode von Zimmermann werden die Auflager der Querswellen in flächengleiche Langswellen umgewandelt. Die Bedeutung der einzelnen Variablen sind in Abbildung 2.32 angeführt. Zuerst wird die Fläche der Schwelle ermittelt:

$$F = (L_s - m) \cdot b_1 [cm^2] \quad (2.18)$$

Über die errechnete Fläche  $F$  (vgl. Abbildung 2.32) wird über den Schwellenabstand in weiterer Folge eine äquivalente Schwellenbreite ermittelt. Die Größe der Fläche bleibt dadurch gleich:

$$b = \frac{F}{2a} \quad (2.19)$$

Die Abbildung 2.32 soll die Berechnung der äquivalenten Umformung der Schwellen in einen Langswellenoberbau verdeutlichen.

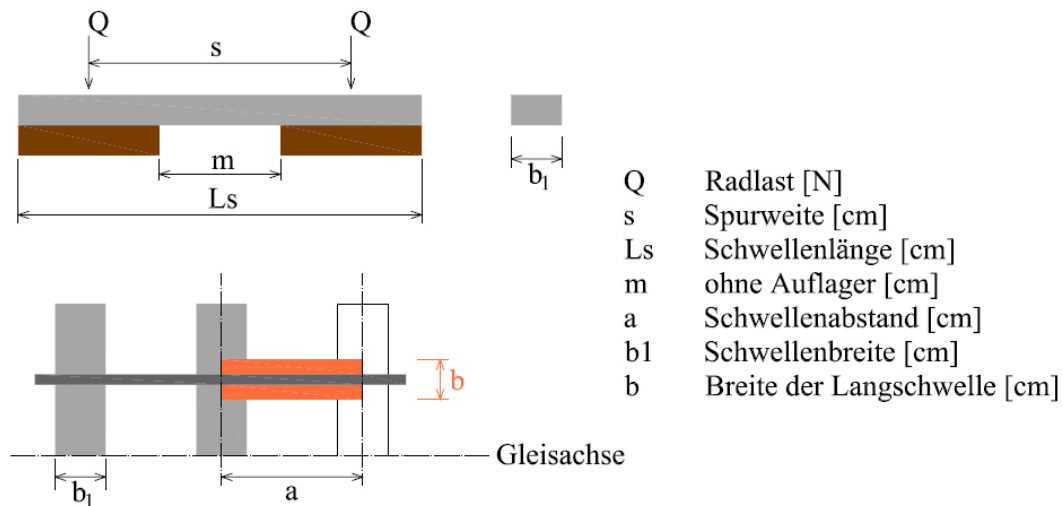


Abbildung 2.32: Umwandlung des Querschwellenoberbaus in einen Langschwellenoberbau; adaptiert nach [12]

Somit ergeben sich für die Schotterpressung direkt unter der Schwelle folgende Formeln:

- für die elastische Einsenkung

$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \sum \eta \quad (2.20)$$

- für die Schotterpressung unter der Schwelle

$$p = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot L} \sum \eta = C \cdot y \quad (2.21)$$

- für die Stützpunktkraft

$$S = b \cdot C \cdot a \cdot y \quad (2.22)$$

$C$  ist die Bettungszahl,  $y$  die elastische Einsenkung,  $b$  die Breite der fiktiven Langschwelle,  $L$  die Schwellenlänge,  $p$  die rechnerische Schotterpressung und  $Q$  die Radlast.

Unter Berücksichtigung mehrerer Achsen eines Fahrzeugs wird der Einflussfaktor  $\eta$  nach Zimmermann herangezogen, (2.20) und (2.21), der in gängigen, facheinschlägigen Tabellenwerken zu finden ist und in [12] tabellarisch angeführt wird.

Aus den oben angeführten Formeln ist gut zu erkennen, dass bei weichem Untergrund hohe Verformungen auftreten, wohingegen bei sehr steifen Untergrundverhältnissen hohe Auflagerpressungen wirken, die Kornzertrümmerungen zur Folge haben können. Mit einfachen Maßnahmen, wie einer Schwellenbesohlung, einer elastischen Lage zwischen Schwelle und Schiene oder einer Unterschottermatte kann den hohen dynamischen Einwirkungen etwas entgegengewirkt werden.

## 2.8 Verfahren zur Modellierung des Gleisschotters

In jüngster Vergangenheit wurde immer wieder nach einer Möglichkeit gesucht, den Gleisschotter und sein Verhalten während des Stopfvorgangs sowohl mathematisch als auch physikalisch so zu beschreiben, dass Berechnungen mittels numerischer Methoden so präzise wie möglich, natürlich auch unter Berücksichtigung auf die scheinbar willkürliche Anordnung der einzelnen Schotterkörner, durchgeführt werden können.

Untersuchungen können in-situ durchgeführt werden, die jedoch oft äußerst aufwendig und kostspielig sind. Zusätzliche Laborversuche (vgl. Kapitel 2.5) geben zwar Aufschluss über Korngröße und Materialeigenschaften, nicht aber über das eigentliche Verhalten des Gleisschotters in eingebautem Zustand. Diese Untersuchungen sind aber äußerst hilfreich, um entwickelte Rechenmodelle verifizieren zu können.

Ein besseres Verständnis der Mechanismen des Schotters bei der Lastabtragung aber auch während des Stopfvorgangs würden die Instandhaltungskosten auf längere Sicht reduzieren.

Oft wird der Gleisschotter als kontinuierliches, homogenes Medium mit lediglich den grundlegendsten Eigenschaften, wie Dichte und Steifigkeit, modelliert. Bei globaler Betrachtung des gesamten Gleisapparats wäre dies mit Sicherheit zielführend.

Bei makroskopischer Betrachtung hingegen gehen durch diese Finite-Elemente-Modellierung einige wichtige Eigenschaften des tatsächlichen Schotterverhaltens bei der Lastabtragung verloren.

Im Gegenzug zu der Finite-Elemente-Methode steht die Modellierung mit der Diskreten-Elemente-Methode, die, speziell beim Gleisschotter, die granulare Struktur des Mediums berücksichtigt, das tatsächliche Verhalten des Schotters gut annähert und somit für die Anwendung im Eisenbahnwesen geeignet ist. [6]

Bei der Diskreten-Elemente-Methode wird die Schotterbettung Korn für Korn aufgebaut. Bewegungen der einzelnen Elemente und auch die dadurch variierenden Kontaktkräfte können durch die für sich alleine stehenden Schotterkörner berücksichtigt werden. Im Vergleich zu den Finiten-Elementen können dadurch die eben so wichtigen Kornkontaktkräfte und deren Spannungsverteilung besser modelliert und analysiert werden als in einem kontinuierlich aufgebauten Medium. [6]

### 2.8.1 Verifizierung der Modellierung mittels Feld- und Laborversuchen

Diverse Untersuchungen, welche auch in diversen Kapiteln dieser Arbeit vorgestellt wurden und werden, haben gezeigt, dass die Alterung des Schotters und die damit verbundenen bleibenden Setzungen in der Schotterbettung von Faktoren, wie Frequenz, Amplitude, Anzahl der Lastzyklen, Korngrößenverteilung, Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Schotterkörner und von der Bruchfestigkeit des Materials beeinflusst wird.

Dazu führten *Nimbalkar* und *Indraratna* [21] in ihrer Studie eine Reihe von groß angelegten, eigens dafür konstruierte Triaxialversuche durch. Um die zyklischen Beanspruchungen aus dem Zugverkehr zu simulieren, wurden die Proben mit Lastfrequenzen zwischen 10 und 40 Hz dynamisch beansprucht. Dieser Frequenzbereich soll tatsächliche Zuggeschwindigkeiten von ca. 70 bis 290 km/h simulieren.

Vor Versuchsdurchführung wurde der Schotter gereinigt, getrocknet und gesiebt. Für den Schotter wurde Latit verwendet, ein vulkanisches Ergussgestein. Die Schotterproben wurden auf einer Höhe von 600 mm zwischen zwei 5 mm dicken Gummimembranen in vier Schichten angeordnet, die je auf  $1530 \text{ kg/m}^3$  verdichtet wurden. Die Proben wurden bis zu einem Grenzdruck von 60 kPa konsolidiert.

Um das Versagensverhalten des Schotters während des Versuchs zu simulieren, wurde ein numerisches Modell mittels Diskreter-Elemente-Methode (DEM), entsprechend den Parametern der Labortests, erstellt. Zuvor wurden ausgewählte Schotterkörner fotografiert und mittels CAD Programm in das Modell eingefügt, um in weiterer Folge Vergleiche zwischen den Triaxialversuchen und dem DEM-Modell anstellen zu können.

Der Abbildung 2.33 ist ein Auszug aus den Ergebnissen der Versuchsreihen von *Nimbalkar* und *Indraratna* [21] zu entnehmen. Das Diagramm links zeigt die Variation der axialen Dehnung  $\varepsilon_a$  infolge zyklischer Belastung in Bezug zur Anzahl der angewandten Lastzyklen und der Frequenz. Die Ergebnisse aus der numerischen Simulation sind ebenfalls in diesem Diagramm dargestellt.

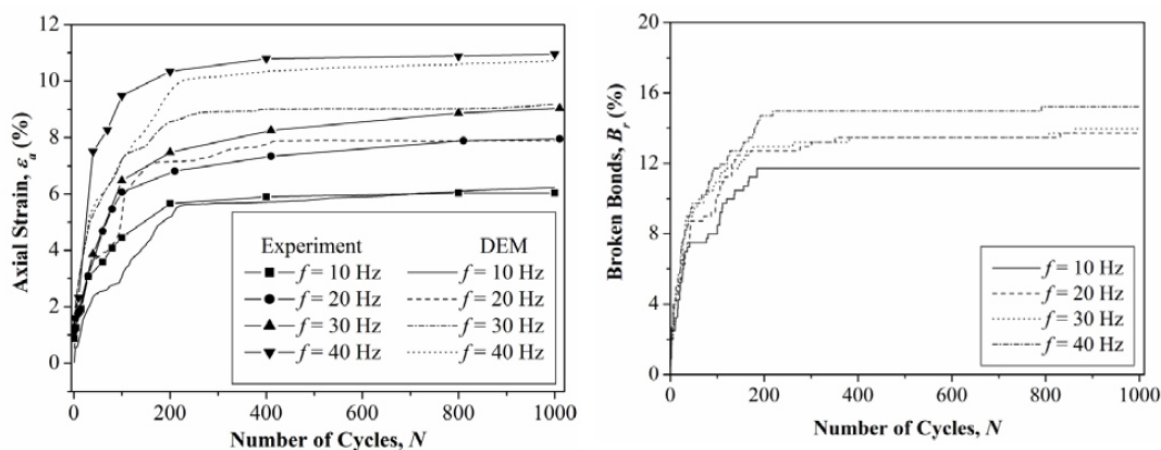


Abbildung 2.33: Vergleich axialer Spannungen mit Ergebnissen aus Laborversuchen (links), das Lösen von Kornbindungen in Abhängigkeit der Anzahl der Lastzyklen (rechts) [21]

Gut zu erkennen ist ein signifikanter Anstieg von  $\varepsilon_a$  bei gleichzeitiger Erhöhung der zyklischen Erregerfrequenz  $f$ . Während der Anfangszyklen steigt die Dehnung relativ rasch an, bis diese bei einer höheren Anzahl an Lastzyklen kaum mehr eine Veränderung erfährt. Dieser Anfangsphase mit stark ansteigenden Dehnungen kann den anfänglichen Kornumlagerungen und dem kantigen „Abbrechen“ von Schotterkörnern durch punktuelle Lastspitzen zugeschrieben werden. Außerdem war gut zu beobachten, dass mit einem Anstieg der Frequenz eine höhere Anzahl an Lastzyklen erforderlich war, um den Dehnungswert  $\varepsilon_a$  zu stabilisieren. Der Einfluss der Frequenz und die Anzahl der Lastzyklen auf die Schotterzerkleinerung lässt sich anhand des in Abbildung 2.33 rechts dargestellten Bindungsbruchs analysieren.

Der Bindungsbruch  $B$  ist hierbei als Prozentsatz der gelösten Kornbindungen im Vergleich zur Gesamtzahl der anfänglichen Gesamtbindungen dargestellt. Gut zu erkennen ist, dass  $B$  mit dem Anstieg von Frequenz und der Anzahl der Lastzyklen ebenfalls zunimmt, wobei die meisten gelösten Kornbindungen durch die anfänglichen Belastungszyklen resultieren.

Nach Abklingen der anfänglichen Schotterzerkleinerung gab es einen lediglich geringen Anstieg der axialen Dehnungen  $\varepsilon_a$ . Dies zeigt deutlich, dass die Zerkleinerung des Schotters durch zyklische Belastungen eine der Hauptursachen für bleibende Verformungen in der Schotterbettung ist. In weiterer Folge wurden zusätzliche konsolidierte, drainierte Triaxialversuche durchgeführt und mit einem elasto-plastischen Finite-Elemente-Modell (FE) verglichen, um die Zerstörung des Schotters während der Be- und Entlastungsphase besser abbilden zu können. Die Schwellen wurden dabei als rein elastisches Element modelliert. Grund dieser Analyse war die Vermutung, dass während der Entlastungsphase lediglich elastische Verformungen auftreten.

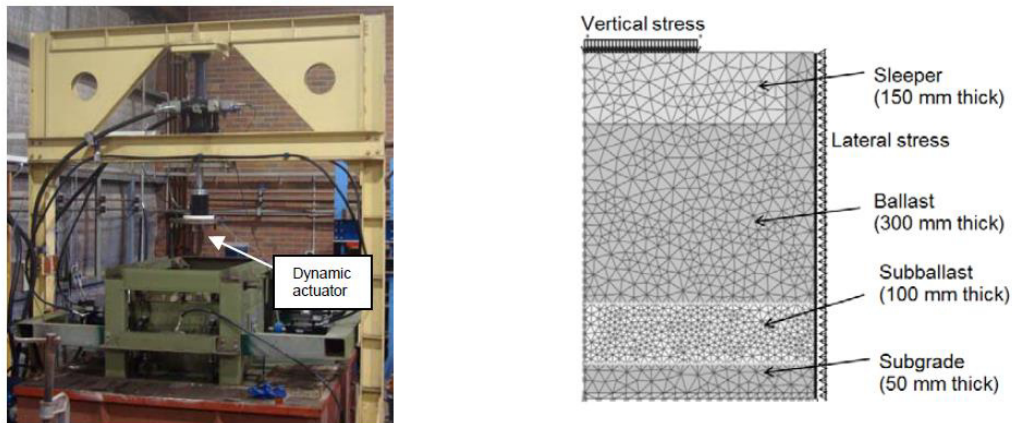


Abbildung 2.34: Versuchsaufbau für einen konsolidierten, drainierten Triaxialversuch (links), Finite-Elemente-Modell eines Gleisquerschnitts (rechts) [21]

Auf die detaillierte Modellierung wird im Folgenden nicht eingegangen. Dazu wird auf die Studie von *Nimbalkar* und *Indraratna* [21] verwiesen. Zusätzlich wurden an einer 60 m langen Teststrecke Feldversuche zur Messung von vertikalen und lateralen Gleisverformungen durchgeführt. In Abbildung 2.35 ist gut zu erkennen, dass das erstellte 2D-FE-Modell niedrigere Werte der vertikalen und lateralen Verformungen entlang der Tiefe prognostiziert, als es die tatsächlichen Messergebnisse preisgeben. [21]

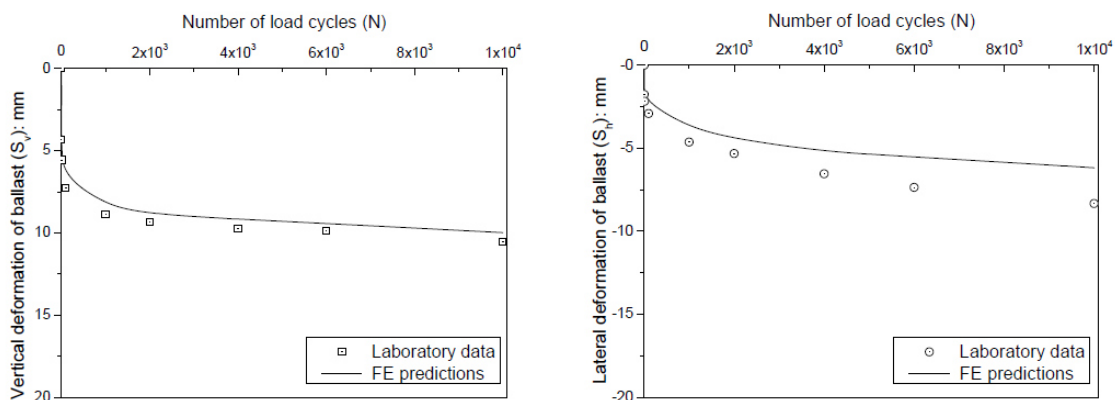


Abbildung 2.35: Ergebnisse vertikaler und lateraler Verformungen aus Labortests und im Vergleich mit Finite-Elemente-Berechnungen [21]

Ein möglicher Grund dafür könnte die Vernachlässigung möglicher Längslagefehler des Gleises sowie Imperfektionen aus Schienen- sowie Radoberfläche bei der Modellierung sein. Ebenso könnte das Vernachlässigen des Schwellenabstands und der damit verbundenen differierenden Lastabtragung zwischen Modell und Realität ein möglicher Grund für die Abweichung der Ergebnisse sein. Unter Berücksichtigung der korrekten Annahmen der Elastizitätsgrenzen ist ein solches 2D-FE-Modell grundsätzlich für grobe Entwurfszwecke in der Praxis noch akzeptabel.

Zusammenfassend konnte mit dem DEM-Modell das Verhalten der einzelnen Schotterkörner während einer zyklischen Belastung gut erfasst werden, was die Modellierung mit diskreten Elementen grundsätzlich zu einem geeigneten Instrument für solch eine Aufgabenstellung macht. Mittels FEM-Modellierung konnten ganzheitliche Spannungen und Dehnungen in Ober- und Unterbau verifiziert werden, wobei hier explizit darauf hingewiesen wird, dass vernachlässigte dreidimensionale Effekte, wie Lastverteilung auf mehrere Schwellen und in weiterer Folge triaxiale Spannungs- und Dehnungszustände zu einer Unterschätzung der Ergebnisse führen können.

Mit der Studie von *Nimbalkar* und *Indraratna* [21] konnte also gezeigt werden, dass die Kombination zwischen Diskrete-Elemente-Methode (DEM), Finite-Elemente-Methode (FEM) und Untersuchungen in-situ brauchbare Ergebnisse für eine näherungsweise Vorhersage des Spannungs- und Dehnungsverhaltens von Bahnschotter liefern kann.

## 2.8.2 Modellierung von Gleisschotter mittels Bildanalyse

Um besser zu verstehen, was während der Schotterzerkleinerung durch äußere Einwirkungen, wie Verkehrslasten oder während des Stopfvorgangs passiert, führten Moaveni et al. [19] umfangreiche Untersuchungen, unter anderem mittels neuartiger Bildanalyse, durch. Untersucht wurde in erster Linie die Charakterisierung unterschiedlicher Stadien während der Alterung bzw. Zerkleinerung der Schotterkörner unter Anwendung des LA-Prüfverfahrens (vgl. Kapitel 2.5.1).

Grundsätzlich spielen eine Vielzahl an Faktoren bei der Verschmutzung und Verschlechterung der Gleisschotterbettung eine wesentliche Rolle, welche die Stabilität und die Beständigkeit der Gleislage über die Zeit stark herabsetzt. Die Materialeigenschaften sowie die Form der Schotterkörner und die Größe der Krafteinleitungsflächen zwischen Schwelle und Schotter sind dabei maßgebend für die Art und Größe der Kornzerkleinerung verantwortlich. Um das Maß der Verschmutzung quantifizieren zu können, wird vor allem in den USA der sogenannte „Fouling-Index“ (FI) herangezogen, welcher in Kapitel 2.6.3 bereits vorgestellt wurde.

Die derzeit gängigsten Labortests zur Verifizierung der Abriebs- und Zertrümmerungsfestigkeit sind der LA-Test und der Micro-Deval Versuch. Zur Korrelation zwischen den Labortests und in-situ Versuchen gibt es bereits eine Vielzahl an Studien, die sich jedoch im Punkt der Eignung solcher Laborversuche zur Verifizierung des tatsächlichen Verhaltens teilweise signifikant voneinander unterscheiden.

Für die Studie von Moaveni et al. [19] wurde ein gleichmäßig gestufter Kalksteinbruch verwendet, welcher den nordamerikanischen Anforderungen (AREMA No.24) der Infrastrukturbetreiber entspricht.

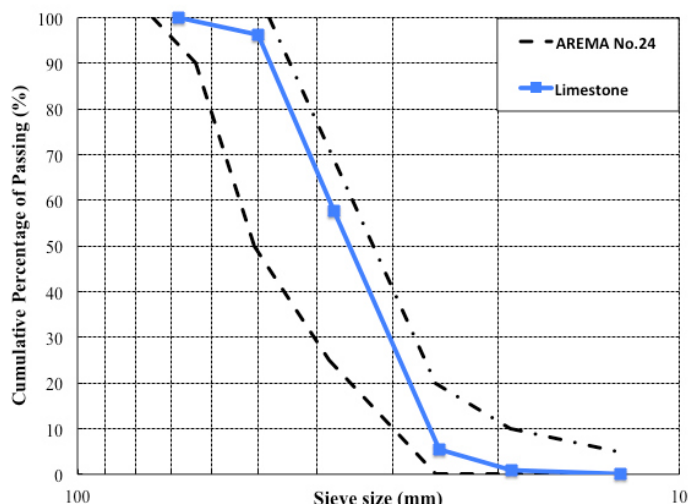


Abbildung 2.36: Kornverteilung des verwendeten Kalksteins vor den Untersuchungen [19]

Insgesamt wurden für die Untersuchungsreihe 10 kg dieses Kalksteins herangezogen und mehreren LA-Tests unterzogen. Die Testtrommel wurde mit dem Material und zwölf Stahlkugeln gefüllt und im Durchschnitt 50-mal pro Minute gedreht. Nach 125 Umdrehungen wurde der erste Versuch beendet. Das Testmaterial wurde aus der LA-Trommel entfernt, sorgfältig gesiebt und ihrer Korngröße nach sortiert, fotografiert und in Abbildung 2.37 dargestellt. In weiterer Folge wurden mit demselben Material weitere LA-Versuche, nach der gleichen Prozedur, wie bereits oben beschrieben, durchgeführt, bis die Gesamtprobe einen Fouling-Index von größer 40 erreichte (vgl. Tabelle 2.4, Spalte 3), welcher den Werten eines stark verschmutzten Schotters entspricht. Bei einem Fouling-Index dieser Größenordnung ist ein normaler Bahnbetrieb, zumindest ohne Langsamfahrstellen, kaum mehr möglich.

Opening size # of turns	50 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.60 mm	0.30 mm	0.15 mm	0.075 mm	Pan
0														
# of particles	7	37	64	19	8									
250														
# of particles	3	29	65	44	65	51								
500														
# of particles	2	28	58	48	94	70								
750														
# of particles	2	28	58	46	102	66								
1000														
# of particles	2	28	51	50	94	72								
1250														
# of particles	2	27	49	49	90	69								
1500														
# of particles	2	27	43	52	82	70								
1750														
# of particles	2	27	37	52	77	57								
2000														
# of particles	2	26	35	53	65	58								
2125														
# of particles	2	25	37	49	55	67								

Abbildung 2.37: Fotografien des Kalksteins in den verschiedenen Phasen des LA-Tests [19]



Abbildung 2.37 zeigt die Veränderung der Korngrößenverteilung während der LA-Untersuchungen in Abhängigkeit von der Anzahl der Umdrehungen, die hier in einer Abstufung von 250 Umdrehungen dargestellt sind. Zusätzlich wurden die einzelnen Körner des jeweiligen Siebrückstands bis zu einer Maschenweite von 9,5 mm gezählt.

Die einzelnen Schotterkörner wurden zudem mit mehreren hochauflösenden Kameras aus unterschiedlichen Richtungen fotografiert. Mittels spezieller Bildanalysesoftware wurden im Anschluss Korngröße, Oberflächentextur und Kantigkeit analysiert und ausgewertet. Für eine detaillierte Beschreibung dieser Software und der Bilderstellung wird an dieser Stelle auf die Studie von Moaveni et al. [19] verwiesen.

Die Ergebnisse der Korngrößenverteilung zeigen deutlich, wie sich die Probe von einem gleichmäßig zu einem gut gestuften Kies verändert hat. Die Sieblinien der einzelnen Versuchsphasen sind in der folgenden Abbildung 2.38 dargestellt.

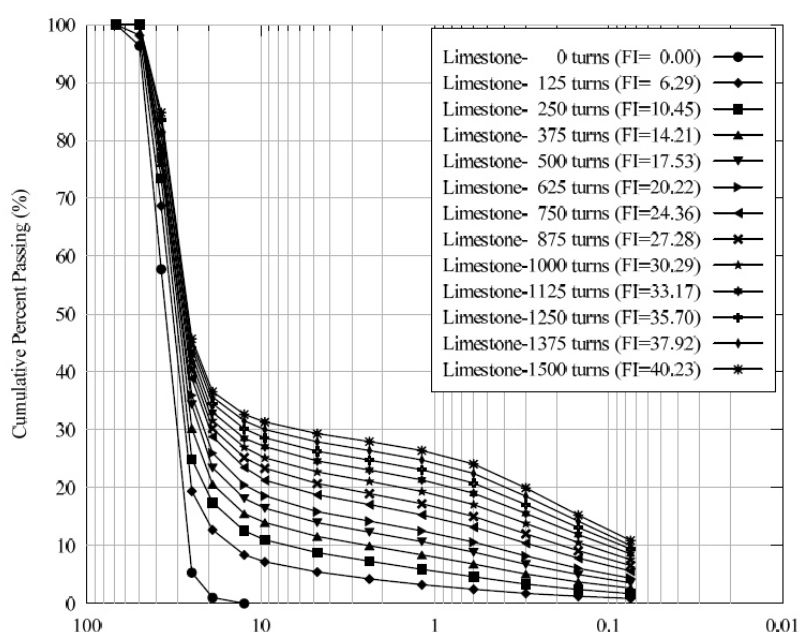


Abbildung 2.38: Korngrößenverteilung unterschiedlicher Phasen des LA-Tests [19]

Zusätzlich wurde der Fouling-Index nach *Selig und Waters* [34] (vgl. Tabelle 2.4, Spalte 3) herangezogen und für jeden einzelnen Versuchsdurchgang ermittelt. Dieser ist im obenstehenden Diagramm in der Legende eingeklammert dargestellt. Der Fouling-Index steigt logischerweise mit der Zeit an. Durch das anfängliche Abbrechen und Abschleifen von Kanten und Flächen der größeren Körner ist die Zunahme der Verschmutzung zu Beginn am größten, wie an den ersten beiden Sieblinien und an den ersten Werten des Verwitterungsindex gut zu erkennen ist.

Mit zunehmendem Fortschreiten der Abnutzung werden die Körner, welche nicht zerbrechen, allmählich abgerundet. Aufgrund dessen werden die Oberflächen und Kanten dieser Körner immer glattere Texturen erhalten, was in weiterer Folge die Verzahnung untereinander und somit die Scherfestigkeit des Schotters verringert. Dies wird durch die Abbildung 2.37 noch verdeutlicht. So sinkt beispielsweise der Rückstand der Körner auf dem 37,5 mm Sieb nur langsam. Die übriggebliebenen Körner dieser Korngröße werden mit dem Fortschreiten des Versuchs immer gerundeter und glatter.

Der LA-Test beeinflusst also nicht nur die Korngrößenverteilung, sondern auch die Form der einzelnen Körner und deren Oberflächentextur.

Mittels Bildanalysesoftware UIAIA (Aggregate Image Analysis der Universität Illinois) [37] wurde die Kantigkeit und die Oberflächenbeschaffenheit einzelner Körner analysiert und über den sogenannten „Angularity-Index“ (AI) und den „Surface-Texture-Index“ (STI) ausgewertet und in Diagrammen dargestellt, die in Abbildung 2.39 dargestellt sind.

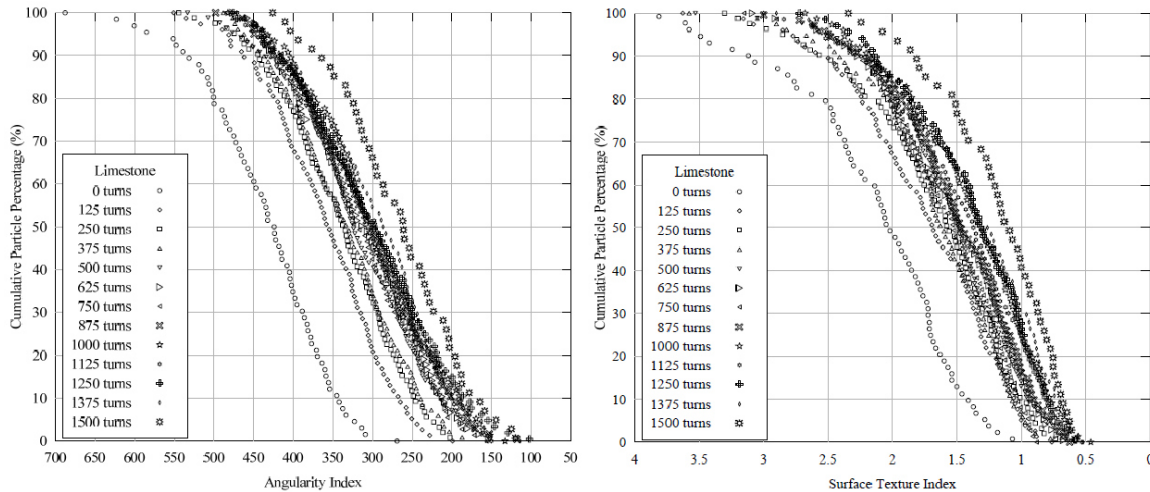


Abbildung 2.39: Auswertung für unterschiedliche Korngrößen: der Angularity-Index AI (links) und der Surface-Texture-Index STI (rechts) [19]

Einzelne Schotterkörner wurden hierbei untersucht und mittels mehrerer hochauflösender Kameras fotografiert und analysiert. Jeder einzelne Punkt in den Diagrammen steht für die Auswertung eines einzigen Schotterkorns. Hierbei ist gut zu sehen, dass die Werte des AI und des STI bei fortschreitender Dauer des Versuchs kontinuierlich abnehmen. Der Abstand zwischen zwei Kurven gibt an, wie stark sich die Indizes zwischen zwei Versuchsdurchgängen verändert haben. Daraus geht abermals hervor, dass die größten Veränderungen bezüglich Kantigkeit und Oberflächenglattheit in der Anfangsphase stattfinden.

Zusätzlich wurde der sogenannte „Flat an Elongated“ (F&E) Wert eingeführt. Dieser beschreibt die Kornform bezogen auf ihre Flachheit und Länglichkeit. Dabei wurde gezeigt, dass sich die Körner mit fortschreitender Dauer immer mehr einer einheitlichen, kubischen Form, durch Elimination der flachen und langen Schotterkörner, annähern.

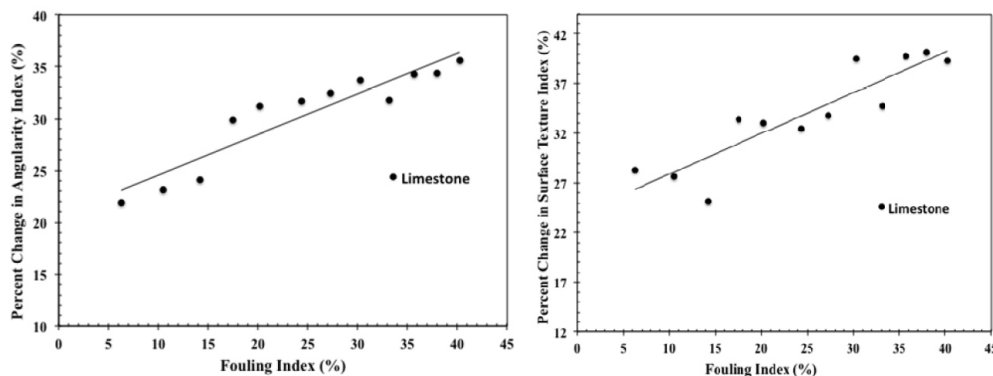


Abbildung 2.40: Korrelation zwischen Verwitterungsgrad und AI (links) bzw. STI (rechts) [19]

In weiterer Folge wurde gezeigt, dass die Werte aus der Bildanalyse (AI und STI) gut mit dem Grad der Verwitterung korrelieren. Abbildung 2.40 zeigt für beide Indizes einen annähernd linearen Zusammenhang zwischen der Schotterbettverschmutzung und der verringerten Kantigkeit und der glatten Oberflächentextur, wie sie auch in stark verschmutzten Schotterbettungen zu finden sind. Im letzten Abschnitt der Studie wurden Feldversuche zur Verifizierung der Labortests durchgeführt. Dafür wurde ein Abschnitt einer Eisenbahnstrecke in Mississippi herangezogen. Von der Teststrecke wurden aus verschiedenen Tiefenstufen des Schotterbetts (0, 20 und 40 cm) Proben entnommen. Diese wurden, wie bei den Laborversuchen, fotografiert und mittels Bildanalyse auf die Werte AI, STI und F&E untersucht. Die Ergebnisse aus den Messungen von Korngröße, Form und Textur aus den Proben der Teststrecke stimmen ziemlich genau mit den Ergebnissen aus den Labortests überein. Darüber hinaus konnte mit beiden Methoden die allmähliche Abnahme der Korngröße mit der Schotterbetttiefe nachgewiesen werden.

Die Beziehung zwischen sich im Betrieb befindlichen Bahnstrecken und deren Verschmutzungsgrad und der Laborversuche kann also mittels Fotografieren der Schotterbettung in-situ hergestellt werden. Eine Optimierung dieser Techniken würde dazu beitragen, den Trend des Verschmutzungsgrads im Feld noch besser zu verstehen und somit die Betriebsfähigkeit und die Lebensdauer der Gleisanlage zu verbessern.

### 2.8.3 Numerische Modellierung des Stopfprozesses

Die steigenden Instandhaltungskosten zur Wiederherstellung der idealen Lage des Gleises, im Speziellen an Hochgeschwindigkeitsstrecken, machen es notwendig, detaillierte Untersuchungen durchzuführen, welche das Verständnis der Mechanismen während des Stopfvorgangs näherbringen sollen. Dadurch können geeignete und vor allem wirtschaftlichere Instandhaltungsstrategien für den Bahnbau erstellt werden.

*Perales et al.* [24] und *Saussine et al.* [31] haben im Zuge ihrer Forschung die einzelnen Phasen während eines Stopfvorgangs mittels numerischer Modelle untersucht und analysiert. Primäres Ziel dieser Studie war es, die Mechanismen des Gleisschotters während der Verdichtung und in weiterer Konsequenz die dadurch hervorgerufenen Setzungen durch den Zugverkehr unter den Schwellen besser zu verstehen. Speziell wurden drei Phasen mittels 3D-DEM-Modell untersucht:

- das Eindringen der Stopfpickel in den Schotter
- der Verdichtungsprozess selbst
- das Anheben und Herausziehen der Stopfwerkzeuge aus der Bettung

Bereits in der Vergangenheit wurden unzählige Studien zur Ermittlung der optimalen Stopfparameter durchgeführt, unter anderem die Dissertation von *Fischer* [7], welche in Kapitel 3.4 ausführlich vorgestellt wird. Für die Analyse von *Perales et al.* [24] wurden zwei verschiedene Modelle erstellt, um den Einfluss und die Variation gängiger Stopfparameter, wie Frequenz, Amplitude, Beistelldruck und Beistellzeit, auf das räumliche Verhalten des Gleisschotters während des Stopfvorgangs zu untersuchen. Das eine Modell besteht lediglich aus einer modellierten Schwelle, das andere aus einem Streckenabschnitt mit insgesamt sechs Schwellen.

Der Schotter selbst wurde in beiden Fällen mittels einzelner starrer Polyeder modelliert. Das kleine Modell wurde mit 20000 Schotterkörnern, das große mit über 93000 einzelnen Polyedern erstellt. Die modellierte Schotterbettung wurde mit einer Korngrößenverteilung im Bereich von 25/50 mm mit einer Reindichte von  $2700 \text{ kg/m}^3$  implementiert. Jedes dieser Modelle erhielt insgesamt acht modellierte Stopfpickel, wie in Abbildung 2.41 gezeigt.

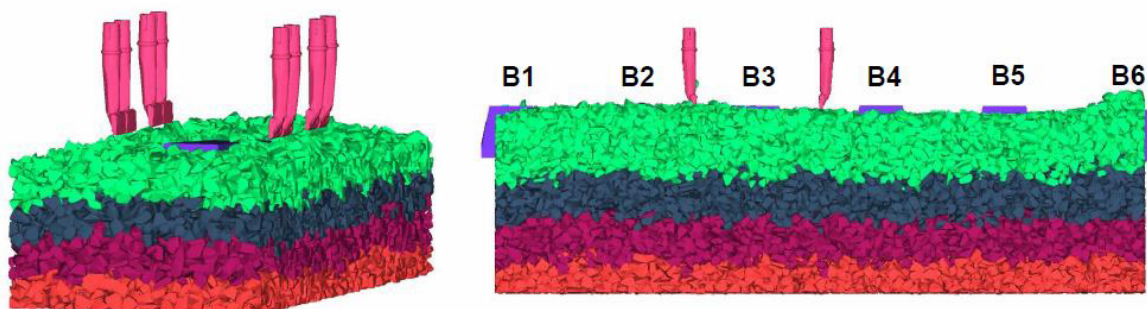


Abbildung 2.41: Generiertes Schottermodell mit einer Schwelle (links) und ein modellierter Streckenabschnitt mit sechs Schwellen [24]

Der statische Reibungskoeffizient zwischen den Körnern wurde auf 1,0 gesetzt. Zwischen der Schwellensohle und dem Schotter wurde ein Wert von 0,5 gewählt und die Reibung zwischen den Seitenflächen und der Bettung wurde vernachlässigt.

Vor der numerischen Simulation wurde das Modell mit einer vertikalen Belastung beansprucht, welche zuvor durch in-situ Messungen während einer Zugüberfahrt ermittelt wurden. Das Hauptaugenmerk wurde während der Simulation auf eine der mittleren Schwellen B3 gelegt (vgl. Abbildung 2.41).

Bei der ersten Phase, dem Eindringen der Stopfpickel in die Bettung, wurden die modellierten Stopfwerkzeuge beschleunigt und wieder gestoppt, sobald der Abstand zwischen der Spitze der Stopfpickel und der Schwellenunterkante 2 cm betrug. Durch die Variation der oben genannten Stopfparameter konnte mit über 1900 Berechnungsdurchgängen pro Modell die Zunahme der Verdichtung unter den Schwellen optimiert werden.

Dabei führten höhere Frequenzen zu größeren durchschnittlichen Verdichtungswerten. Die Variation der Eindringtiefe hat dabei keinen Einfluss gezeigt, wohingegen die Erhöhung der Eindringgeschwindigkeit jedoch zu größerer Kornzerstörung führte. Bei der Eindringphase bewirkt eine hohe Frequenz lediglich eine untergeordnete Steigerung der Verdichtung unter den Schwellen. Sobald sich der Stopfpickel beim Eindringen aber unterhalb der der Schwellensohle befindet, steigt der Einfluss der gewählten Frequenz an. Daher kann in dieser Phase, bei ca. 0,1 Sekunden der Eindringphase, der Verdichtungsanteil durch Erhöhen der Vibrationsfrequenz verbessert werden [31].

Beim Stopfvorgang selbst konnte ein linearer Anstieg der Verdichtungsrate beobachtet werden, wobei bei einer Beistellzeit von ca. 0,6 Sekunden der lineare Verlauf abrupt abflacht, vermutlich, weil das Füllen der Hohlräume unter den Schwellen bzw. das widerstandslose Stopfen zu diesem Zeitpunkt abgeschlossen war. Der zeitliche Verlauf der Verdichtung ist in Abbildung 2.42 dargestellt.

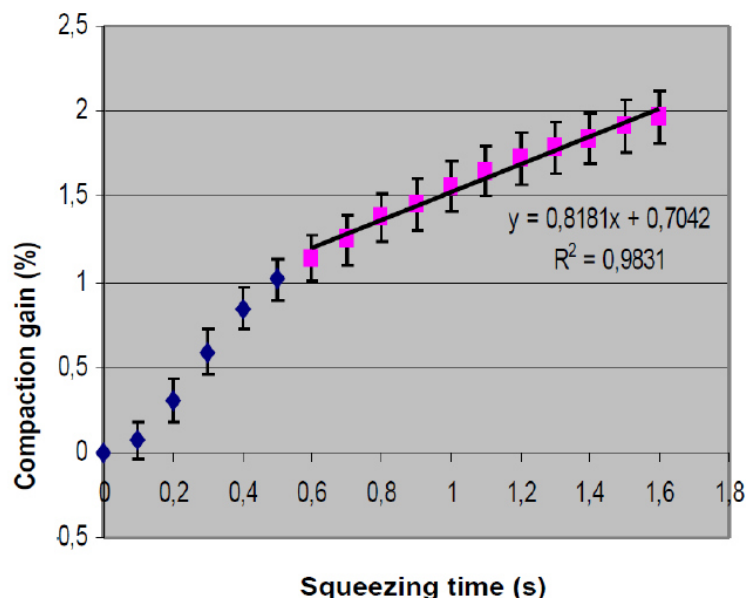


Abbildung 2.42: Durchschnittliche Entwicklung der Verdichtung während der Stopfphase [24]

Aus den Untersuchungen des mehrschwelligen Modells ging hervor, dass die Eindringphase der Stopfpickel mit ca. 50% zur gesamten Verdichtung des gesamten Stopfzyklus führte.

Hohe Frequenzen von 40 bis 50 Hz führten beim Eindringen wider Erwarten zu keiner Auflockerung des Schotters unter der Schwelle. Hiervon sind lediglich lokal begrenzte Stellen rund um die Stopfpickel betroffen. Die Stopfphase selbst ist durch eine horizontal gerichtete Kraft gekennzeichnet, die von einer Rotationsbewegung der Stopfpickel überlagert wird, um die reale Bewegung beim Stopfen möglichst exakt zu modellieren. In Abbildung 2.43 sind die Kornverschiebungen zu Beginn (0,01 Sekunden) und am Ende der Stopfphase (1,2 Sekunden) dargestellt.

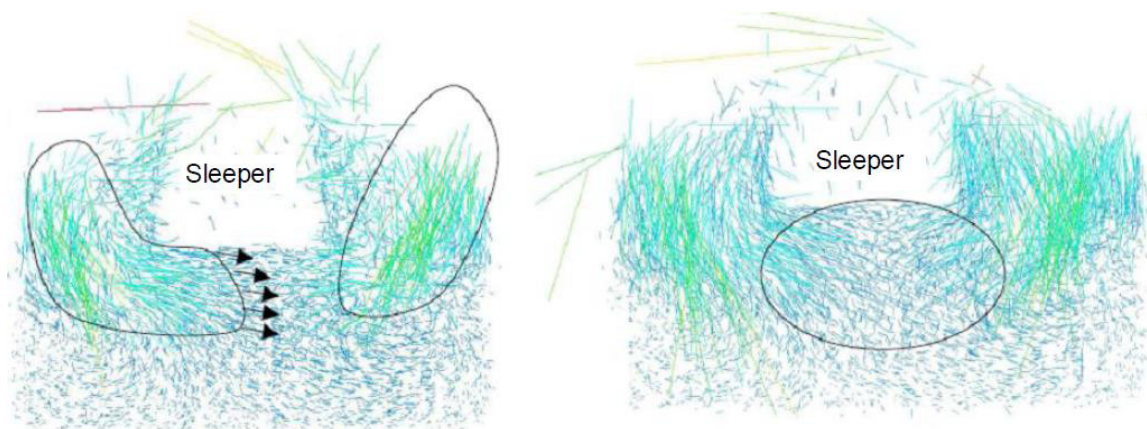


Abbildung 2.43: Teilchenbewegung zu Beginn (links) und am Ende der Stopfphase (rechts) [24]

Die zu Beginn deutlich erkennbare Asymmetrie der Verschiebungsvektoren erklärt sich durch das Stopfen und Verdichten der vorherigen, linken Schwelle, die aber bis zum Ende der Beistellzeit bei 1,2 Sekunden weitestgehend wieder ausgeglichen wird.

Ab ca. 0,08 Sekunden der Verdichtungsphase wurden die Schotterkörner unter die Schwelle geschoben, was zu einer von diesem Zeitpunkt an beginnenden Erhöhung der Lagerungsdichte der Schotterbettung führt (vgl. Abbildung 2.44). Die Ordinate der Abbildung 2.44 beschreibt den Feststoffgehalt bzw. die erzielte Verdichtung der Schotterprobe zu einem bestimmten Zeitpunkt während des Stopfvorgangs.

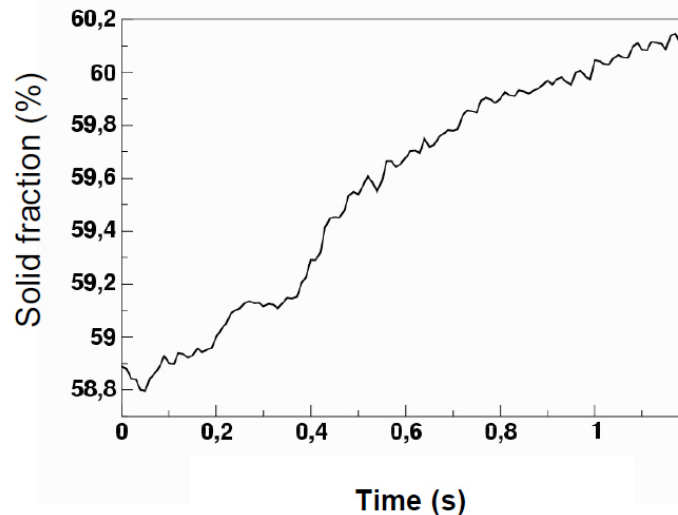


Abbildung 2.44: Durchschnittliche Entwicklung der Verdichtung, dargestellt über den Feststoffgehalt der Probe während der Stopfphase des Mehrschwellenmodells [24]

Die letzte Phase der Simulation besteht aus dem Anheben der Stopfpickel. Hierbei folgen die Körner in unmittelbarer Nähe der Stopfpickel der nach oben gerichteten Bewegung des Werkzeugs. Dabei wird das Korngerüst wieder etwas aufgelockert. In der folgenden Abbildung 2.45 ist die zeitliche Entwicklung der Verdichtung für die Schwellen B2 bis B5 in ihren einzelnen Phasen dargestellt.

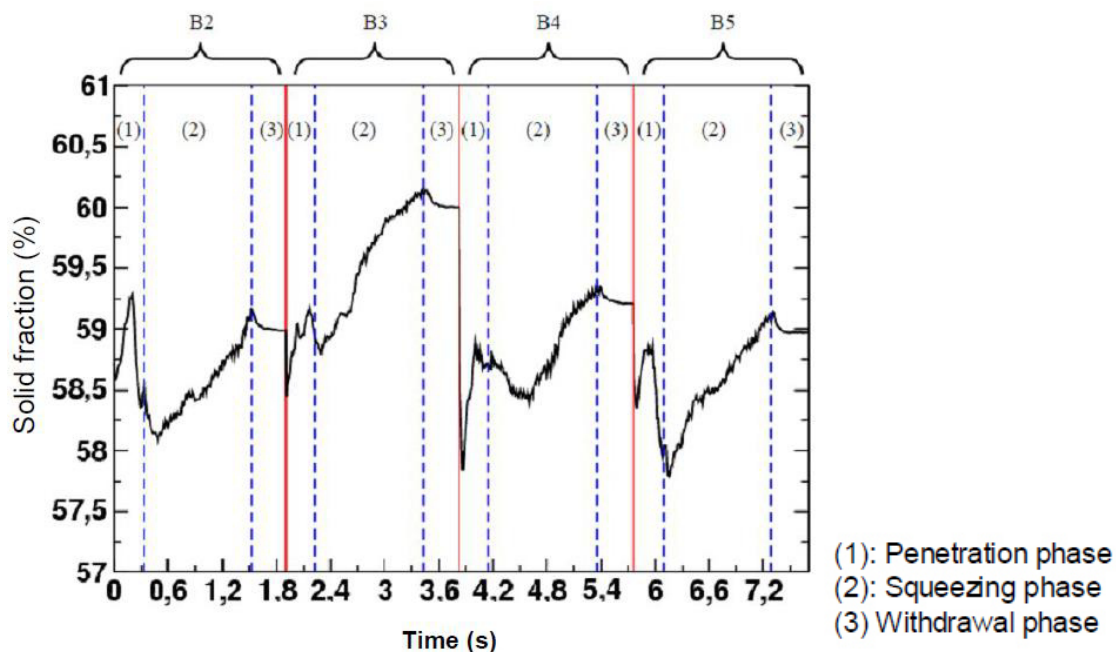


Abbildung 2.45: Entwicklung der Verdichtung unter den Schwellen B2 bis B5, wieder in Abhängigkeit vom Feststoffgehalt der Probe [24]

Bei den Untersuchungen konnte weiters eine erhöhte Empfindlichkeit des Verdichtungswerts auf das Setzungsverhalten festgestellt werden. So bewirkte beispielsweise eine Änderung des Feststoffgehalts von 0,7% bereits eine Variation in den Setzungen von bis zu 35% der Gesamtsetzungen während der Stopfzyklen. Zusammenfassend konnten aus den Simulationen von Perales et al. [24] und Saussine et al. [31] mittels 3D-DEM-Modellierung folgende Erkenntnisse gezogen werden:

- Durch das Stopfen vorangegangener benachbarter Schwellen verhalten sich die Bewegungen der Schotterkörner zu Beginn der Stopfzyklen deutlich asymmetrisch.
- Bereits das Eindringen der Stopfpickel bewirkt ein beträchtliches Maß der Gesamtverdichtung.
- Je höher der Verdichtungsgrad, desto geringer sind die in weiterer Folge durch den Zugverkehr entstehenden Setzungen. Jeder einzelne Stopfzyklus trägt also dazu bei, die Setzungsamplitude zu verringern, selbst bei sehr geringem Verdichtungserfolg.
- Die Verdichtung wird unter den Schwellen verbessert, wenn die Vibrationsfrequenz während der Eindring- und Hebephase der Stopfpickel erhöht wird. Der Einfluss der Frequenz auf die Verdichtung kommt erst dann zu tragen, wenn die Stopfpickel nach circa 0,1 Sekunden der Eindringphase unter die Schwellensohle gelangen.
- Die Verdichtungswirkung wird während der Stopfphase maßgebend erhöht, wenn die Frequenz kontinuierlich reduziert wird. Dieser Effekt könnte eine Folge von langsam zur Ruhe kommenden Schotterkörnern sein, da der Schotter bei ständigen, hohen Frequenzen wieder aufgelockert und somit nicht optimal verdichtet werden kann.
- Der Stopfvorgang mindert die Festigkeit des Schotterbetts unter den Schwellen, da bereits bestehende Kontaktflächen gelöst und wiederaufgebaut werden

## 2.9 Schotterfließen

### 2.9.1 Allgemeines

Instandhaltungsarbeiten, im Besonderen Arbeiten zur Berichtigung der planmäßigen Lage des Gleises, sind für die heutzutage üblichen hohen Anforderungen an Gleisanlagen unumgänglich. Regelmäßige Stopfarbeiten und die anschließenden Maßnahmen zur räumlichen Verdichtung des Schotters mittels dynamischer Gleisstabilisation sind derzeit Stand der Technik. Durch die zum Einsatz kommenden Maschinen werden Schwingungen im Frequenzbereich zwischen 25 und 50 Hz auf den Bahnoberbau übertragen, um so die notwendige Verdichtungsarbeit leisten zu können.

Bei den oben genannten Arbeiten kommt es immer wieder zum sogenannten „Schotterfließen“. Ab einem gewissen Frequenzbereich (ca. 35 bis 40 Hz) beginnen die einzelnen Schotterkörner unkontrolliert zu vibrieren und „herumzuspringen“, was ein gezieltes Verdichten des Gleisschotters kaum mehr möglich macht und dadurch der Verdichtungserfolg möglicherweise negativ beeinflusst wird bzw. dieser nicht mehr erzielt werden kann.

Durch die eingebrachten Schwingungen aus den Stopf- und Stabilisierungsarbeiten werden Kornbindungen gelöst, was zu einer Reduktion der Scherfestigkeit führen kann. Der Schotter wird dadurch in eine weniger dichte Lagerung versetzt und kann nur mehr geringe Schubspannungen aufnehmen. *Fischer* [7] erkannte diesen mechanischen Vorgang bereits in den 80er Jahren im Zuge seiner Dissertation und nannte es „Bodenverflüssigung“ (vgl. Kapitel 3.4.1). Literatur zur konkreten Beschreibung dieser Mechanismen gibt es bis dato noch nicht.

### 2.9.2 Begriffsabgrenzung

Oft wird der Begriff des Bodenfließens oder der Bodenverflüssigung als große Verformung unter zyklisch bzw. dynamischen Einwirkungen definiert. Nicht zu verwechseln ist aber das Schotterfließen mit dem Begriff der Bodenverflüssigung, bei der wassergesättigte, kohäsionslose Böden, wie enggestufte Schwemmsande, z.B. im Falle eines Erdbebens durch plötzliche Erhöhung des Porenwasserdrucks, den Kontakt untereinander vollständig verlieren. Dadurch, dass der Boden in dieser Phase seine Scherfestigkeit nahezu zur Gänze einbüßt, verhält sich dieser wie eine Flüssigkeit. Man spricht hier von Bodenverflüssigung.

Die Mechanismen des Schotterfließens treten hingegen nur unter dynamischer oder zyklischer Beanspruchung und bei drainagierten, granularen Medien auf. Die einzelnen Körner beginnen zu „tanzen“ und verlieren aufgrund der auftretenden Schwingungen den Kontakt zueinander, wodurch die einzelnen Körner aus ihrer dichten Lagerung weichen und dadurch keine Schubspannungen mehr übertragen werden können. [35]

### 2.9.3 Feldversuch und Analyse

Um den Einfluss des Schotterfließens auf die Verdichtungsarbeiten im Bahnbau zu verifizieren, wurde von *Stefan* im Zuge ihrer Bachelorarbeit [35] Feldversuche und eine anschließende Analyse mittels Particle Image Velocimetry (PIV) durchgeführt. Die PIV ist eine Methode zur Ermittlung von oberflächlichen Geschwindigkeitsfeldern von granularen oder flüssigen Medien. Dabei werden von einem fixen Standpunkt hochauflösende Bilder hintereinander aufgenommen und über Softwareunterstützung miteinander verglichen, um so die Ortsänderung einzelner Partikel nachverfolgen zu können. Der zeitliche Abstand der aufgenommenen Abbildungen muss dabei bekannt sein. Ebenso wird eine bekannte Referenzdistanz zur Ermittlung der Partikelgeschwindigkeiten benötigt. Die genaue Funktionsweise dieses Verfahrens wird im Folgenden nicht erläutert.

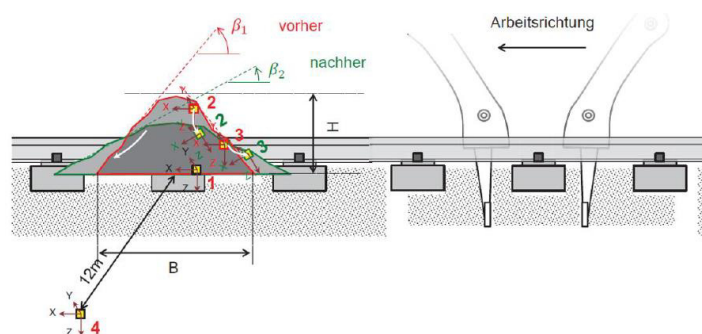


Abbildung 2.46: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Schotterfließens [35]



Zur Verifizierung und zur Beschreibung von Schotterfließen wurde im Zuge der Feldversuche von [35] neben einer bestehenden Bahnstrecke ein Gleisschotterhaufen mit dem gleichen Material wie das Schotterbett hergestellt. Der Aufbau des Versuchs ist in Abbildung 2.46 schematisch dargestellt. Im Anschluss an den Versuchsaufbau wurden an der angrenzenden Gleisanlage Stopp- und Stabilisierungsarbeiten durchgeführt. Die dadurch induzierten Schwingungen breiteten sich im Gleisbett aus und erreichten im Anschluss den Schotterhaufen. Die in weiterer Folge durch die PIV ermittelten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ließen Rückschlüsse auf die Schwingungsintensität und dessen Folgen für den Gleisschotter zu. Zusätzlich wurden im Schotterhaufen mehrere Beschleunigungssensoren installiert. Für die Analyse der Bilder wurden als Referenzdistanz mehrere Messlatten und Maßbänder im Bereich des Haufens platziert (vgl. Abbildung 2.48).

### 2.9.4 Auswertung und Ergebnisse

Es erfolgte eine getrennte, über die Zeit gemittelte, Auswertung des Stopfvorgangs und der Stabilisierungsarbeiten. Abbildung 2.47 zeigt die Geschwindigkeitsfelder des „Durchschnitts-Vektorfeldes“.

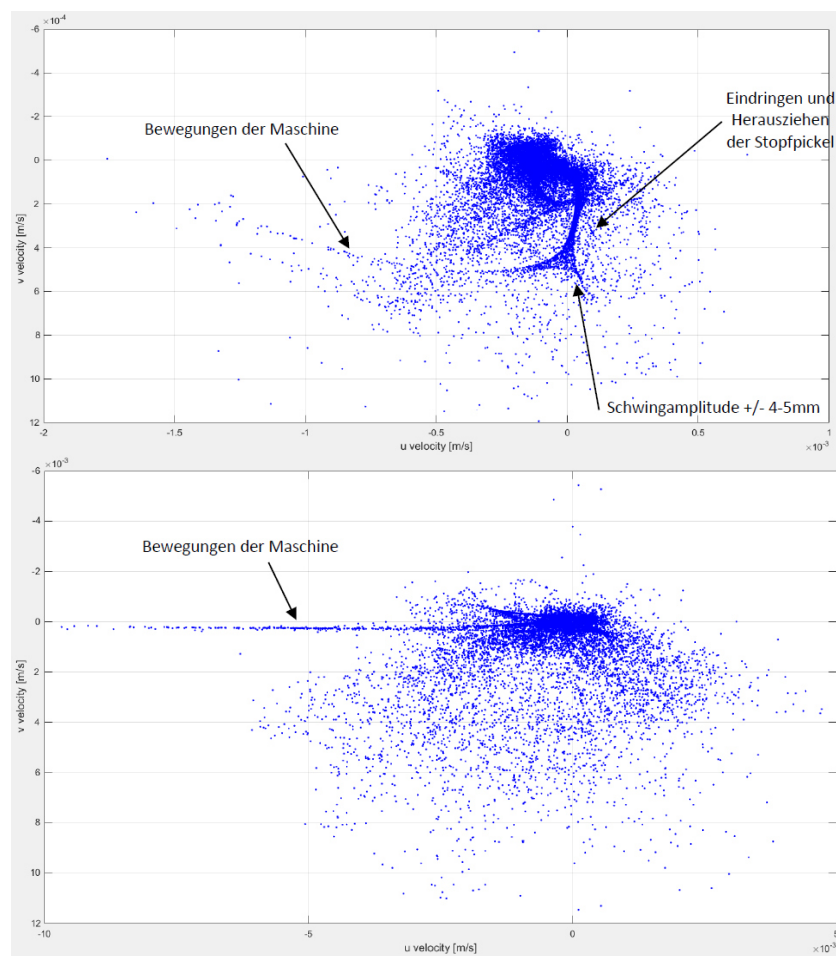


Abbildung 2.47: Geschwindigkeitsfelder des „Durchschnitts-Vektorbildes“ beim Stopfvorgang (oben) und beim Stabilisieren (unten) [35]

Im Falle der Auswertung für die Gleisstopfarbeiten bewegten sich die meisten Bildpunkte mit sehr kleinen Geschwindigkeiten. Dies zeigt die dichte Punktwolke um den Koordinatennullpunkt in Abbildung 2.47 (oben).

Die größeren vertikalen Geschwindigkeiten resultierten aus den herabfallenden Schotterkörnern aufgrund der Vibrationen der vorbeifahrenden Stopfmaschine. Sehr gut ist die Bewegung der Stopfmaschine und auch das Eindringen der Stopfpickel und deren Schwingungsamplitude in Abbildung 2.47 (unten) zu erkennen.

Die Geschwindigkeitskomponenten im Falle der dynamischen Gleisstabilisierung sind im Gegenzug zur Stopfung im Durchschnitt etwas größer. Auch die Punktwolke ist um die vertikale Achse etwas symmetrischer. Die Arbeitsbewegung der Maschine ist auch hier durch einen horizontalen Punkteast klar erkennbar.

Die größten Bewegungen einzelner Schotterkörner aus dem Haufen treten mit Geschwindigkeiten von bis zu ca. 12 mm/s auf.

Bei beiden Arbeitsvorgängen wird die Basisfläche des Schotterhaufens aufgrund der herabfallenden Schotterkörner rasch größer. Der Haufen verliert dadurch an Höhe (vgl. Abbildung 2.46). Die Geometrie des Versuchshaufens stimmen mit den Analysen aus dem PIV auch gut überein.

Im Zuge eines laufenden Forschungsprojekts zur Optimierung von Stopfarbeiten an der Technischen Universität Wien [4] fand man heraus, dass die Steifigkeit der Schotterbettung unter den Schwellen beim Stopfvorgang ab einer gewissen Beistellzeit signifikant reduziert wird. Es wird vermutet, dass dies im Zusammenhang mit dem Schotterfließen stehen könnte. Konkrete Kenntnisse über die Mechanismen hinter diesen Steifigkeitsänderungen könnten die Qualität und die Nachhaltigkeit von Stopf- und Stabilisierungsarbeiten positiv beeinflussen und zu wirtschaftlicheren Instandhaltungszyklen führen. Ebenso wird auf Basis der in-situ Steifigkeitsmessungen an einer Verdichtungskontrolle für Gleisstopfmaschinen gearbeitet [4]. Man darf künftig auf weiterführende Forschungen auf diesem Gebiet gespannt sein.



Abbildung 2.48: Versuchsaufbauten und Messsysteme am Schotterhaufen [35]

# 3. Gleisstandhaltung - Stopfen

## 3.1 Notwendigkeit des Stopfens

Durch die immer größer werdenden statischen und dynamischen Lasten aus dem Bahnbetrieb, aber auch durch unterschiedliche Radlasten und Laufeigenschaften der Fahrzeuge und durch die Tatsache, dass sich der Oberbau (Schotter, Schwellen und Schiene) nicht zur Gänze elastisch verhält, entstehen zwangsläufig bleibende Setzungen in der Bettung, die die Lage des Gleises in Höhe und Richtung negativ beeinflussen. Insbesondere sehr kurzweilige, stark wechselnde Lagefehler sind besonders zu beachten, da hierbei eine erhöhte Gefährdung der Betriebssicherheit herrscht. Auf der Homepage der Firma Plasser & Theurer wird treffend beschrieben, dass:

*„Die sichere und komfortable Fahrt in einem Zug nur auf Gleisen möglich ist, die sich in der geometrisch richtigen Lage befinden.“ [46]*

Ziel einer regelmäßigen Instandhaltung der Gleisanlagen durch Stopfen ist zum einen die Schaffung von gleichmäßigen Auflagerbedingungen für die Schwellen und zum anderen die Wiederherstellung der geometrisch richtigen Lage des Gleises. Typische Durcharbeitszyklen sind in der Tabelle 3.1 angeführt. Hohllagen bzw. nur teilweise aufliegende Schwellen verursachen hohe Sohlpressungen, die die Alterung des Schotters schneller vorantreiben und damit auch die Setzungen durch die Senkung der Scherparameter schneller vergrößert. Fehlerhafte Schwellen oder unzureichende Einschotterung führen zu einer noch schnelleren Verschlechterung der Bettung.

Tabelle 3.1.: Durcharbeitszyklen bzw. Lebensdauer bestimmter Gleiskomponenten; adaptiert nach [15]

<b>Art des Eingriffs</b>	<b>Betriebsbelastung [Mio. t]</b>	<b>Lebensdauer [Jahre]</b>
Stopfen	40 – 70	4 – 5
Reinigung	150 – 300	12 – 15
Schienenenerneuerung	300 – 1000	10 – 15
Betonschwellenerneuerung	350 – 700	30 – 40
Schotterenerneuerung	200 – 500	20 – 30
Untergrundsanieuerung	> 500	> 40

Durch eine bessere Lastverteilung der einwirkenden Kräfte auf mehrere Schwellen (Siehe Kapitel 2.7.6) kann der Problematik ein wenig entgegengewirkt werden.

Um die Betriebssicherheit und den Fahrkomfort jedoch für längere Zeit aufrechtzuerhalten, sind in regelmäßigen Zeitabständen Instandhaltungsarbeiten durchzuführen, die die entstandenen Gleislagefehler wieder berichtigen. Aber auch bei gegebener Betriebssicherheit sollte aus Gründen der Wirtschaftlichkeit darauf geachtet werden, dass die Gleisqualität konstant hoch gehalten wird, bevor eine nicht mehr umkehrbare Verschlechterung des Gleises entsteht. Die „Verschlechterungsrate“ der Gleisanlagen ist maßgebend von folgenden Faktoren beeinflussbar:

- Ein hohes Trägheitsmoment der Schienen verzögert den Verfall.
- Ein kleinerer Schwellenabstand wirkt günstig.
- Enge Kurvenradien wirken nachteilig.
- Homogen verdichteter Untergrund und Bettung erhöhen die Dauerhaftigkeit der Gleise.
- Schwankung der vertikalen Elastizität wirkt sich negativ auf die Verschlechterung der Gleise aus.

Maßgebend für den Zeitpunkt des Eingriffs durch Stopfarbeiten ist der gewünschte Fahrkomfort. Ist dieser nicht mehr gegeben bzw. wird dieser festgelegte Schwellenwert erreicht bzw. überschritten, muss das Gleis gestopft werden. In Abbildung 3.1 ist gut zu erkennen, dass nach dem Stopfen aufgrund von Kornumlagerungen und anfängliches Abbrechen von Kornspitzen ein relativ rascher Anstieg des Gleisfehlers folgt. Dieser ist nach etwa 0,50 bis 2,0 Mio. t Betriebsbelastung abgeschlossen, ehe die Verschlechterung in einen linearen Bereich der Verschlechterungsrate übergeht. [11]

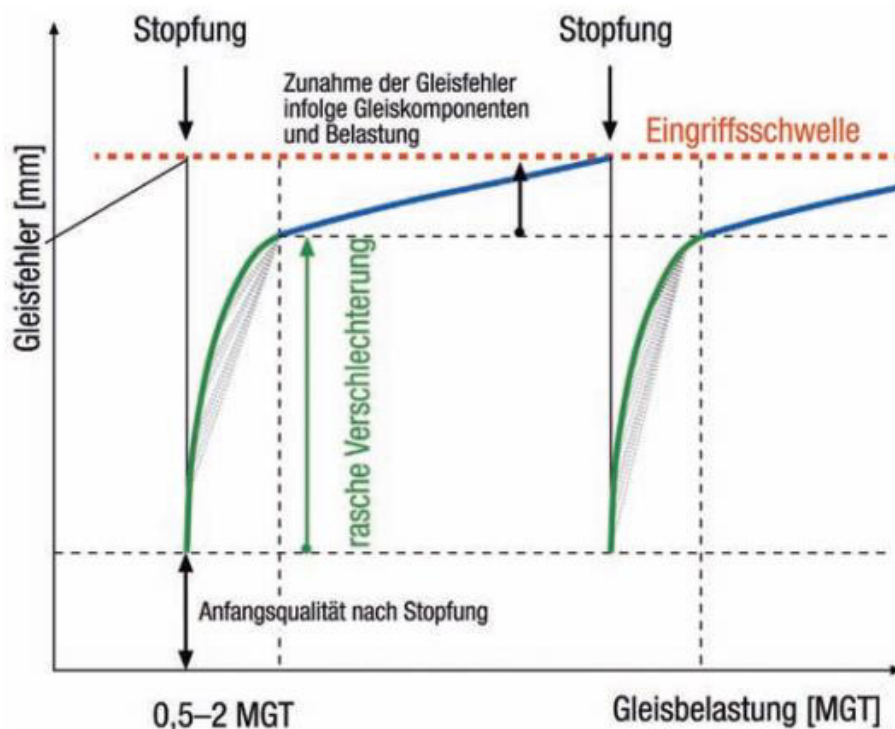


Abbildung 3.1: Schematischer Gleisqualitätsverlauf [11]

Nach deutlicher Überschreitung der Eingriffsschwelle (vgl. Abbildung 3.1) würde die Verschlechterungsrate in einen exponentiell ansteigenden Bereich übergehen, was auf unzureichende Bettungsreinigung bzw. auf mögliche Untergrundprobleme zurückzuführen ist. Durch mögliches Aufsteigen von Feinteilen sinkt der innere Reibungswinkel und verschlechtert somit die lastabtragende Wirkung des Schotters (vgl. Kapitel 2.6.1 und Kapitel 2.7.2).

Die dadurch entstehenden erhöhten Bodenpressungen zwischen Schotter und Untergrundplanum verursachen einen noch schnelleren Verfall der Gleisanlage. Ebenso kann bei zu hohem Verschmutzungsgrad nicht mehr die gewünschte Anfangsqualität durch das Stopfen erreicht werden (vgl. Kapitel 2.6).

Die notwendigen Zeitabstände zwischen den erforderlichen Stopfungen werden nach und nach, eben durch Verunreinigung der Bettung, immer kürzer. Aus wirtschaftlichen Gründen muss daher ab einer gewissen Betriebsbelastung überlegt werden, statt der Stopfarbeiten andere Maßnahmen zur Instandhaltung der Gleisanlagen (Schotterbetteinigung, Planumsverbesserungsmaßnahmen etc.) anzuwenden.

Die Gleislagefehler werden durch vertikales „Heben“ und horizontales „Richten“ der Schienenlage sowie durch das Stopfen des Schotters mittels Vibration unter die Schwelle ausgeglichen und wieder an die Soll-Lage der Gleise angepasst.

Eine dynamische Gleisstabilisation (DGS) wird in der Regel nach dem Stopfvorgang durchgeführt. Diese bewirkt durch eine lateral gerichtete Schwingung eine Homogenisierung der Verdichtung, erhöht zugleich den Querverschiebewiderstand und nimmt die in Abbildung 3.1 in grün gezeigten Anfangssetzungen zum größten Teil vorweg (Siehe Kapitel 3.7.4 und Kapitel 2.7.4).

Um einen gesicherten Bahnbetrieb aufrechtzuerhalten, muss die horizontale Soll-Lage der Schiene gegeben sein. Der Widerstand gegen ein Querverschieben der Schwellen ist hierbei ein entscheidender Faktor zur Minimierung von horizontalen Verwerfungen. Der Querverschiebewiderstand hängt in erster Linie von der Verdichtung des Schotters, aber auch von der Schottermenge zwischen und vor den Schwellen, von der Kornzusammensetzung und von der Geometrie und der Oberflächenbeschaffenheit der Schwellen selbst ab. Zur Dimensionierung des Schottervorkopfs bzw. um einen ausreichenden Querverschiebewiderstand zu erreichen, ist ein Maß für die Breite der seitlichen Einschotterung von 45 – 50 cm anzustreben. Details zur Messung und zur Erhöhung des Querverschiebewiderstands sind dem Kapitel 4.3 zu entnehmen. Für ein optimales Ergebnis und einer nachhaltigen Gleisqualität ist eine Kombination von Heben, Richten, Stopfen und dynamischer Gleisstabilisation unerlässlich. [16][3][25]

## 3.2 Aufbau und Funktionsweise eines konventionellen Stopfaggregats

Der generelle Aufbau von zurzeit auf dem Markt üblichen Stopfaggregaten bestehen grundsätzlich aus drei wesentlichen Hauptbestandteilen, welche im Folgenden kurz erläutert werden.

### 3.2.1 Exzenterwelle

Die mechanisch angetriebene Exzenterwelle dient in erster Linie der Erzeugung einer zur Schwelle gerichteten Vibration mit konstanter Amplitude, die über die Pickelarme und die Stopfpickel in den Schotter übertragen wird.

### 3.2.2 Beistellzylinder

Die hydraulischen Beistellzylinder sind auf Höhe der Exzenterwelle angebracht und erzeugen auf beiden Seiten des Aggregats eine nach außen gerichtete Kraft. Durch die an den Pickelarmen angebrachten festen Drehpunkte wird am unteren Ende der Stopfpickel eine Kraft in Richtung der Schotterbettung erzeugt, die sogenannte Beistell- oder Stopfreaktionskraft. Durch die Überlagerung der durch die Exzenterwelle erzeugten harmonischen Schwingung und der translatorischen Beistellkraft erfolgt die Verdichtung des Schotters. Die detaillierte Wirkung dieser Kräfte wird im Kapitel 3.4.4 ausführlich behandelt.

### 3.2.3 Stopfpickel

Die Stopfpickel beschreiben den untersten Teil des Stopfaggregats. Sie sind zumeist aus gehärtetem Stahl und sind für die direkte Kraft- bzw. Impulsübertragung auf den Gleisschotter verantwortlich.



Abbildung 3.2: Typische Stopfpickel [26]

### 3.2.4 Allgemeine Funktionsweise eines Stopfaggregats

Das gesamte Stopfaggregat wird während des Stopfvorgangs abgesenkt. Die Stopfpickel tauchen dabei bis knapp unter die Schwelle in den Schotter ein und verdichten die Bettung durch die gerichtete Schwingung in Kombination mit der Beistellkraft. In der Abbildung 3.3 wird beispielhaft ein Stopfaggregat der Firma Plasser & Theurer gezeigt.

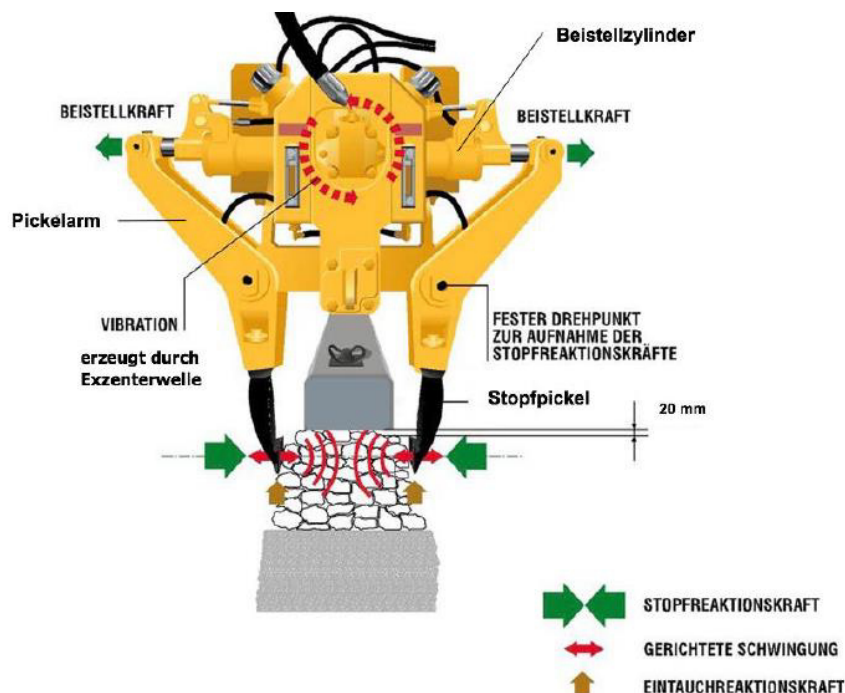


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung anhand eines Stopfaggregats der Firma Plasser & Theurer [20]

Entscheidend für eine qualitativ hochwertige Verdichtung ist die Abstimmung der einzelnen Stopfparameter, wie Frequenz und Amplitude. Auf die einzelnen Parameter wird im Folgenden (vgl. u.a. Kapitel 3.4) genauer eingegangen.

### 3.3 Maschinelle Stopf-Richtarbeiten

Grundsätzlich bestehen die meisten heute gängigen Stopfmaschinen aus den folgenden Hauptbestandteilen:

#### 3.3.1 Stopfaggregat

Heutzutage existieren eine Vielzahl an unterschiedlichsten Stopfaggregaten, die sich sowohl in ihrer Arbeitsweise als auch in den zur Anwendung kommenden Stopfparametern, wie Frequenzen und Amplitude, teilweise maßgebend unterscheiden. Die gängigsten Aggregate werden in Kapitel 3.7 angeführt und die einzelnen Spezifikationen im Detail aufgezeigt.

#### 3.3.2 Hebe- und Richtaggregat

Durch ein integriertes Hebe-Richtaggregat wird die Schiene vor dem eigentlichen Stopfvorgang durch mehrere Rollenpaare gegriffen und hydraulisch gehoben bzw. seitlich verrückt, um die Soll-Lage der Schiene wiederherzustellen und um ein Stopfen in die so geschaffenen Hohlräume mit möglichst geringem energetischen Aufwand zu ermöglichen. Durch integrierte Messsensoren wird die tatsächliche Hebung und der seitliche Versatz verifiziert. Mehr dazu in Kapitel 3.5.2.

### 3.3.3 Mess- und Kontrollmesssysteme

Durch ein integriertes Messsystem wird die Hebe- und Richteinheit gesteuert, um das Gleis in Höhe und Richtung den geometrischen Sollwerten wieder anzupassen. Nach Abschluss der Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten wird im hinteren Bereich der Maschine die berichtigte Gleisgeometrie gemessen und dokumentiert. Der Datensatz beinhaltet zumindest Informationen über Längshöhe, Richtung bzw. Krümmung und Verwindung. Darüber hinaus werden sowohl die Beistellzeiten als auch die Hebewerte beider Schienen mitdokumentiert, um sofort auf etwaige Lagefehler reagieren zu können. Das Kontrollsystem bietet den großen Vorteil, dass das Gleis direkt nach Abschluss der Arbeiten, sofern die „neue“ Lage der Schienen mit der Sollage übereinstimmt, wieder für den Zugverkehr freigegeben werden kann. Weitere Informationen zum digitalen Aufzeichnungssystem für Gleisbaumaschinen und weitere Zusatzeinrichtungen sind dem Kapitel 3.6 zu entnehmen.

## 3.4 Forschung als Basis für den Fortschritt

Bereits in den 1980er Jahren wurden von *Fischer* [7] im Zuge seiner Dissertation an der TU Graz umfangreiche Untersuchungen zum Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter durchgeführt. Die damals gewonnenen Erkenntnisse finden auch heute immer noch Berücksichtigung auf die Arbeitsmechanismen von Stopfmaschinen. In der Abbildung 3.4 ist der Versuchsstand dargestellt, den *Fischer* entwickelte, um zahlreiche Untersuchungen bezüglich Modifikation von Stopfparametern, wie Frequenz und Amplitude, durchzuführen. Primäres Ziel war es, durch Variation und Kombination unterschiedlicher Parameter die optimalen Einstellungen für einen größtmöglichen Verdichtungserfolg bei vertretbarem energetischen und finanziellen Aufwand durch das Stopfen des Gleises herauszufinden.

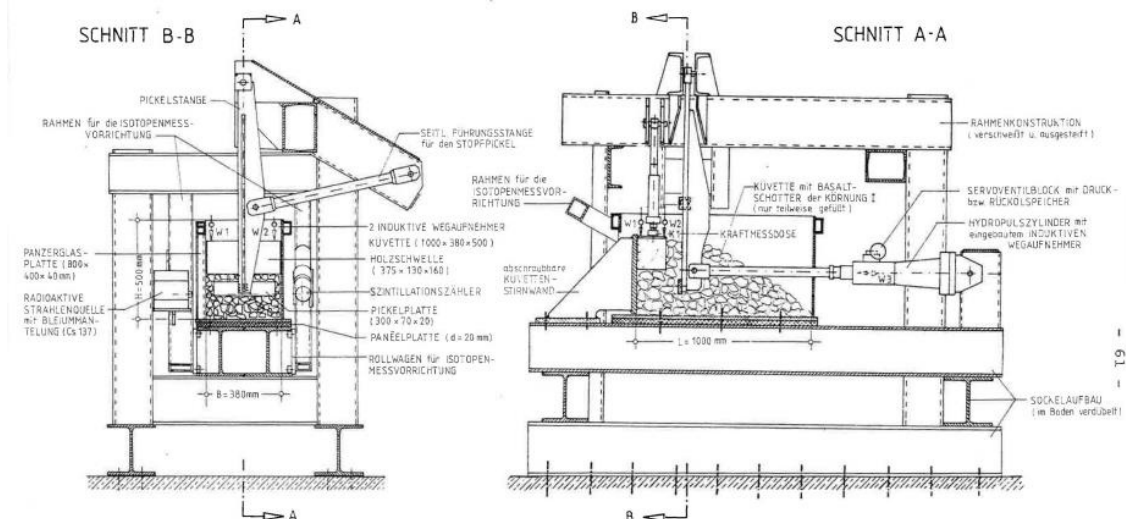


Abbildung 3.4: Skizzen des Versuchsstandes von *Fischer* [7]

*Fischer* führte seine Untersuchungen in Kombination mit einer radiometrischen Dichtemessung für 25, 35, 50 und 80 Hz durch. Ebenso wurde eine Amplitude von  $\pm 5,0$  mm der Stopfpickel beim Verdichtungsvorgang angestrebt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Dissertation von *Fischer* werden im Folgenden auszugsweise beschrieben.



### 3.4.1 Optimale Frequenz

Abbildung 3.5 lässt erkennen, dass der Beistellweg bei den ersten beiden Stopfdurchgängen ab einer Frequenz von 25 Hz deutlich zunimmt. Die weiteren Stopfungen zeigen, dass sich die Erhöhung des Wegs mit zunehmender Verdichtung erst ab einem Frequenzwert von 35 Hz einstellt. *Fischer* erkannte zudem, dass die Bereiche im Schotter unter den Schwellen außerhalb des Einwirkungsbereichs der Stopfpickel erst ab 35 Hz durch die von der Stopfmaschine induzierte Schwingungsenergie beeinflusst werden. Wird die Frequenz weiter erhöht, verliert der Gleisschotter seine Haftreibung (Verzahnungsanteil der Scherfestigkeit), was ein Einsinken der Schwelle zur Folge hat (vgl. Abbildung 3.7).

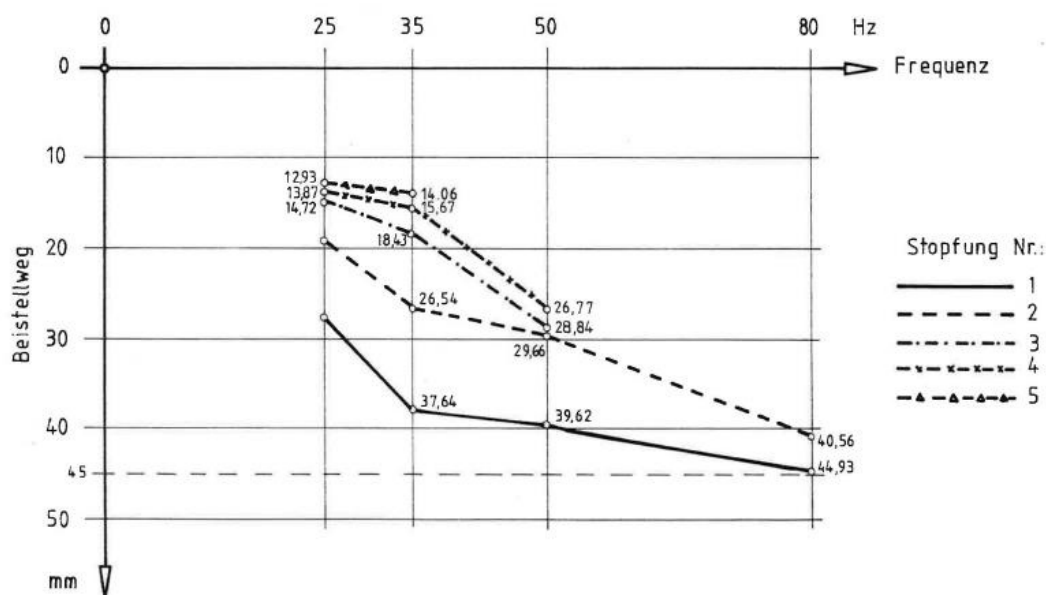


Abbildung 3.5: Korrelation zwischen Beistellweg und Frequenz [7]

In Abbildung 3.6 wird deutlich, dass sich der Hohlraumanteil bei einer Frequenz von 35 Hz, zwar erst nach mehrmaligem Stopfen, signifikant verringert. Hierbei wurde ein ähnlicher Hohlraumanteil gemessen, der bei sorgfältiger Schlichtung des Schotters in den Versuchsaufbau erreicht wurde.

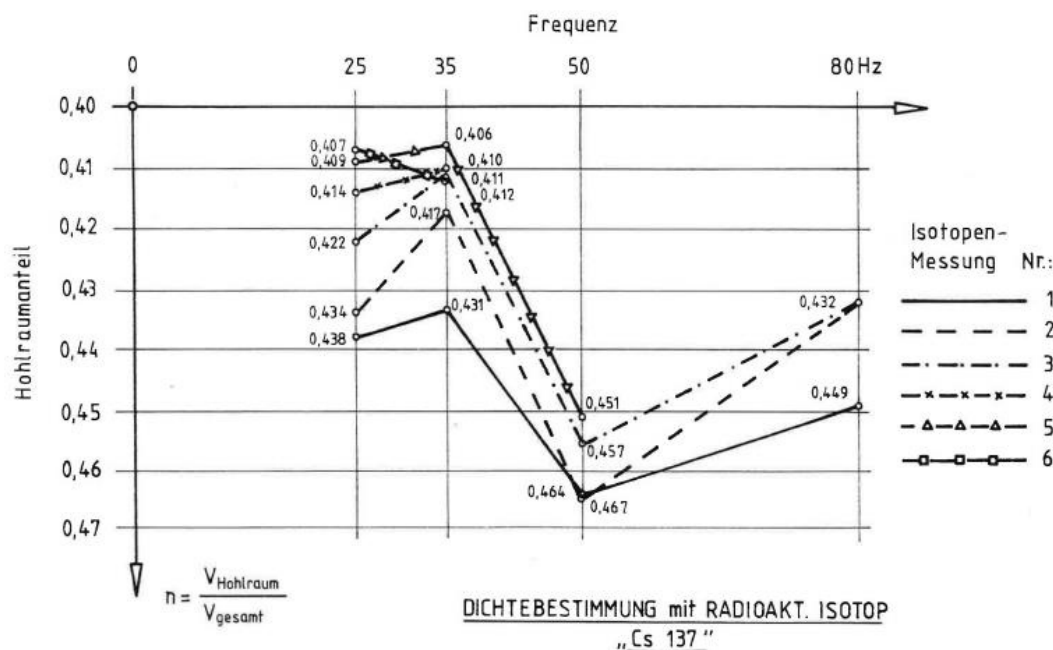


Abbildung 3.6: Einfluss der Frequenz auf den Hohlraumanteil [7]

Um also eine höchstmögliche Verdichtung der Bettung mit energetisch vertretbarem Aufwand und einer geringen Zerstörung am Schotter zu erreichen, sollen die Stopfwerkzeuge mit einer optimalen Frequenz von 35 Hz angeregt werden. [7]

Ist die Frequenz zu niedrig, lassen sich die Stopfpickel nur schwer in den Schotter einbringen. Ist diese zu hoch, besteht die Gefahr einer „Bodenverflüssigung“, wie sie *Fischer* nannte und dadurch eine weniger dichte Lagerung durch unkontrolliertes und äußerst inhomogenes Einbringen des Gleisschotters unter den Schwellen. [7] [25]

### 3.4.2 Beistellweg in Abhängigkeit zur Amplitude

Für die Auswertung des Einflusses des Beistellwegs wurde von *Fischer* [7] das untersuchte Amplitudenspektrum in drei Gruppen eingeteilt:

- $\pm 0,50 \text{ mm} \leq a \leq \pm 0,95 \text{ mm}$       kleine Amplituden
- $\pm 2,13 \text{ mm} \leq a \leq \pm 2,95 \text{ mm}$       mittlere Amplituden
- $\pm 4,25 \text{ mm} \leq a \leq \pm 4,98 \text{ mm}$       große Amplituden

Bei den kleinen Amplituden fiel der erreichte Beistellweg klein aus und war über den gesamten Frequenzbereich annähernd konstant. Der mittlere Amplitudenbereich war charakterisiert durch eine stetige Zunahme des Beistellwegs, bei gleichzeitiger Erhöhung der Frequenz. Im Bereich der größten Amplituden fiel auf, dass der Widerstand, der dem Schotter dem Stopfpickel entgegenwirkte, zunehmend geringer wird und schlussendlich ab ca. 35 Hz eine unkontrollierte Verdichtung stattfand.

Zusätzlich zu den oben bereits genannten Untersuchungen zwischen Frequenz und Hebung differenzierte *Fischer* auch die Größe der Amplitude, was nochmals verdeutlichte, dass bei großen Amplituden ab einer Frequenz von 35 Hz die Verzahnung verloren ging und dies zu unerwünschten Setzungen führte (vgl. Abbildung 3.7).

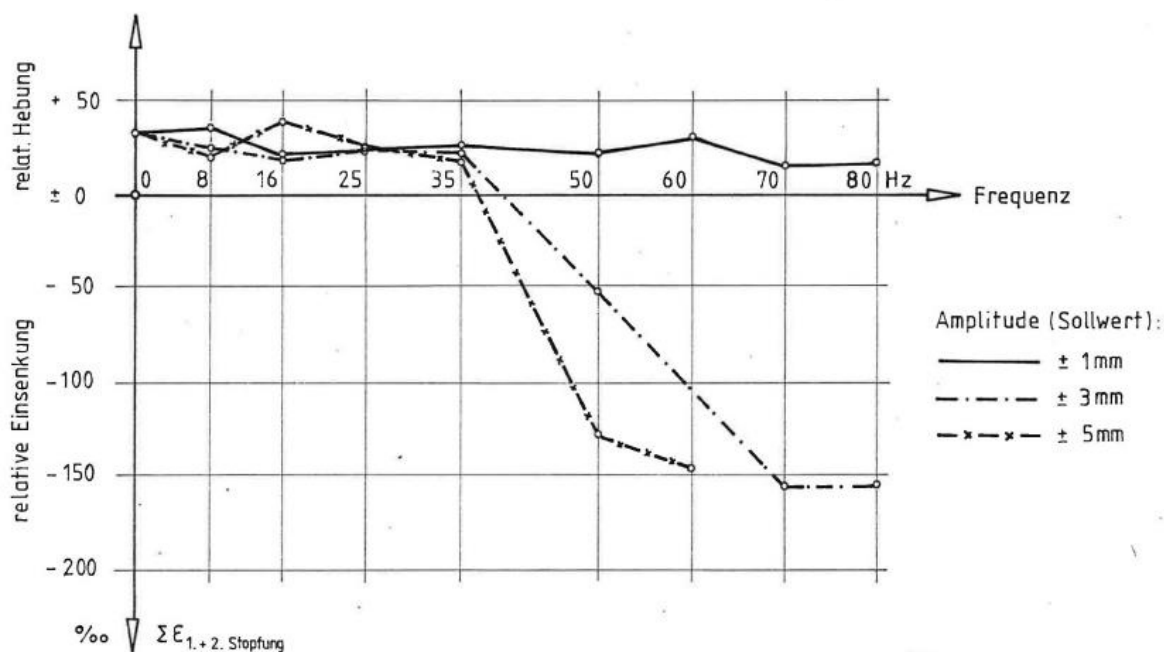


Abbildung 3.7: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Hebung des Gleises [7]

Es muss aber auch ausreichend Energie zur Kornumlagerung vorhanden sein, um gute Ergebnisse bei der Verdichtungsarbeit erzielen zu können. *Fischer* [7] fand heraus, dass, um die beste Qualität der Verdichtung erreichen zu können, speziell die Frequenz und die Schwingungsamplitude aufeinander abgestimmt werden müssen. Den größten Energieeintrag erhält man bei einer Frequenz von in etwa 35 Hz in Kombination mit einer Amplitude der Stopfpickel von ca. 4 bis 5 mm. Dieses optimale Zusammenspiel bewirkt in weiterer Folge unter Betriebslast deutlich geringere Setzungen in der Gleisbettung. [7] [3]

### 3.4.3 Beurteilung der Güte der Stopfwirkung

Für die Beurteilung des Verdichtungserfolgs bei Betrachtung von Frequenz und Amplitude nannte *Fischer* das dynamische Drucksetzungsdiagramm (vgl. Abbildung 3.8), in Kombination mit seinen Erkenntnissen aus der Korrelation zwischen Schwellenhebung, Amplitude und Frequenz (vgl. Abbildung 3.9). Durch die Variation der genannten Stopfparameter kann das Gleis, je nach Anforderungen, angehoben, abgesenkt oder in seiner Höhenlage belassen werden. [7]

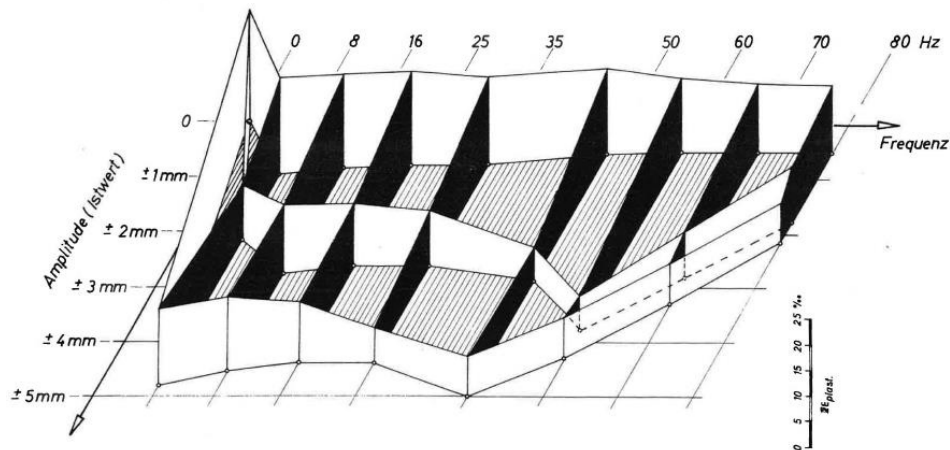


Abbildung 3.8: Dynamisches Drucksetzungsdiagramm in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude [7]

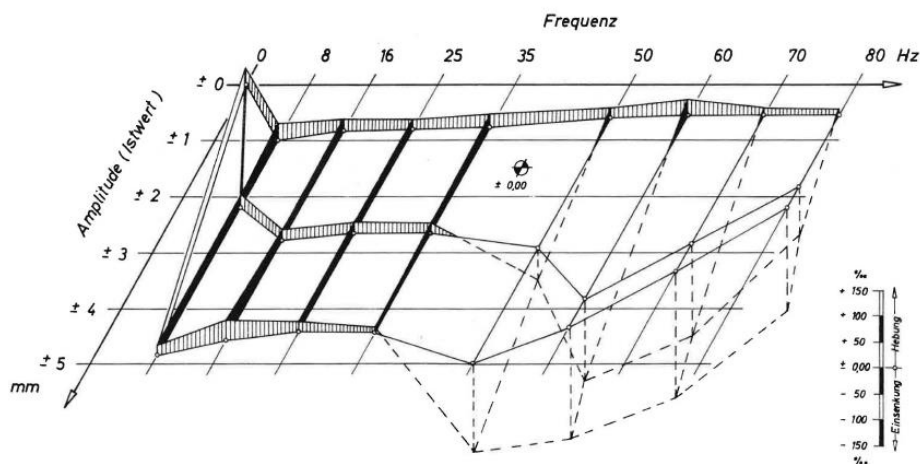


Abbildung 3.9: Hebung der Schwelle in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude nach drei Stopfungen [7]

#### 3.4.4 Beistellgeschwindigkeit

In *Fischers* [7] Untersuchungen gab es unter anderem einen Stopfparameter, der stets konstant gehalten wurde – die Beistellgeschwindigkeit. Neben der Beistellkraft selbst ist auch eine gewisse Zeitdauer erforderlich, um die Energie der Einwirkung auch dazu zu bewegen, eine Umlagerung des Korngerüsts bzw. eine Verdichtung des Schotters zu erzeugen. Die Qualität der Verdichtung wird, wie im vorangegangenen Kapitel bereits beschrieben, maßgebend vom Zusammenspiel von Frequenz und Amplitude bestimmt. Die eigentliche Verdichtungsenergie wird aber durch einen kurzen Kraftstoß bei der Überlagerung der sinusförmigen, harmonischen Schwingung aus der Exzenterwelle mit der Beistellbewegung der Pickel durch die Hydraulikzylinder auf das Schottergerüst übertragen (vgl. Abbildung 3.10). [25]

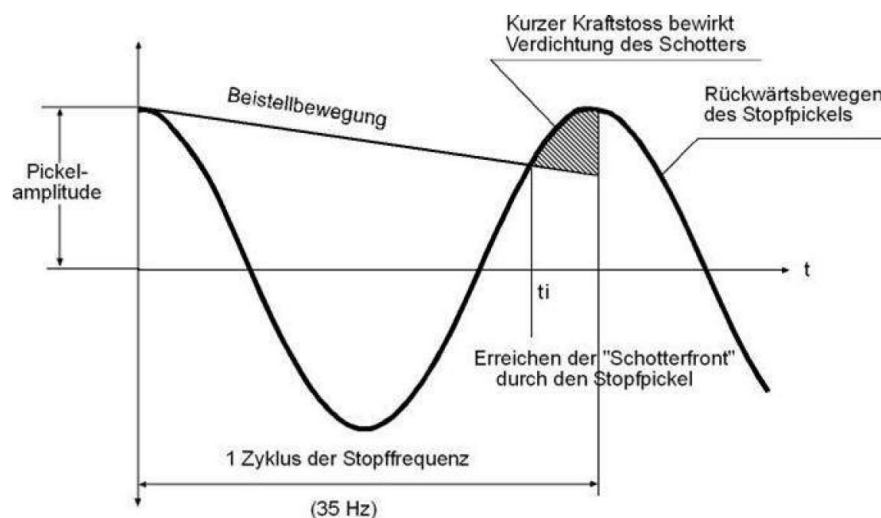


Abbildung 3.10: Verdichtungseinwirkung beim Stopfen (Eigentliche Verdichtung durch kurzen Kraftstoß) [25]

Dies kann dazu führen, dass bei hohen Frequenzen die tatsächliche Impulsdauer so gering ist, dass bei gleicher Beistellkraft kein ausreichender kinetischer Energieeintrag mehr stattfindet, um das Schotterbett ausreichend zu verdichten. Für eine vollständige Energieübertragung der Vibration auf das Schottergerüst ist also zu berücksichtigen, dass eine Mindestdauer für die Einwirkung von nöten ist, die durch die Beistellgeschwindigkeit der Stopfpickel geregelt wird.

Durch diese Erkenntnisse erklärt *Fischer*, wieso bei niedrigen Amplituden auch in hochfrequenten Bereichen eine Schwellenhebung stattfindet, der Verdichtungserfolg jedoch ausbleibt. Es fehlt die Zeit, um die erzeugte Energie auf den Schotter zu übertragen.

Durch eine Erhöhung der Amplitude, in Kombination mit denselben Frequenzen, vergrößert zwar die erzeugte kinetische Energie, diese kann aber durch die kurze Wirkungsdauer des Impulses nicht mehr umgesetzt werden.

Im Gegenzug darf aber der Kraftstoß nicht zu groß sein, da sonst eine unnötige Zerstörung des Gleisschotters hervorgerufen wird. [25]

### 3.5 Berichtigung der Gleislage

Um eine gute Qualität der Verdichtung durch den Stopfvorgang zu erzielen, müssen eine Vielzahl an Stopfparametern berücksichtigt und aufeinander abgestimmt werden. Die intensiven Untersuchungen im Zuge der in Kapitel 3.4 bereits erwähnten Dissertation von *Fischer* [7] führten in den letzten Jahren zu einer raschen Weiterentwicklung und Optimierung von Gleisstopfmaschinen und deren Aggregaten. Neben Frequenz und Amplitude gibt es noch mehrere grundlegende Parameter bei der Wiederherstellung der optimalen Gleislage, auf die im Folgenden näher eingegangen wird. Die Anfangsqualität wird aber maßgebend durch die exakte Herstellung der geometrischen Gleislage bestimmt.

### **3.5.1 Nivellieren**

Um beim Stopfen, Heben und Richten die Soll-Lage des Gleises wieder herstellen zu können, muss zuerst die tatsächliche Gleisgeometrie bekannt sein. Bei den meisten gängigen Stopfmaschinen sind Messsysteme integriert, die die Gleisgeometrie noch vor Beginn der eigentlichen Arbeiten abtastet. Die Soll-Lage ist für gewöhnlich bekannt und mathematisch exakt beschrieben. Durch den Vergleich von Soll- und Ist-Geometrie können in weiterer Folge Hebe- und Richtwerte für die Maschine errechnet werden. Grundsätzlich gibt es zwei verschiedene Arbeitsweisen der Messsysteme. Das Präzisions- und das Ausgleichsverfahren. Beim Präzisionsverfahren wurden die Korrekturwerte für das Heben und Richten vorab ermittelt und abgearbeitet. Die Gleislage ist also bekannt. Beim Ausgleichsverfahren dient als Referenzbasis lediglich eine Stahlsehne mit lokalen Fixpunkten während der Stopfarbeiten, wobei hier die absolute Lage des Gleises nicht bekannt ist. Die Messungen beim Nivellieren werden im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Für detaillierte Informationen wird auf [15] und [26] verwiesen.

#### **3.5.1.1 Messung der Längshöhe**

Pro Schienenstrang wird das Gleis durch Messräder an drei Punkten abgetastet. Dabei wird zwischen hinterem und vorderem Bezugspunkt eine Stahlsehne gespannt, die als Referenzlinie für die Längshöhenmessung dient. Der mittlere Bezugspunkt befindet sich im Bereich des Stopfaggregats. Es wird davon ausgegangen, dass der hintere Bezugspunkt auf dem zuvor berichtigen, fehlerfreien Gleis liegt. Dadurch kann, bei bekannter Soll-Lage und bei bekanntem hinteren Bezugspunkt ein Hebekorrekturwert ermittelt werden. Dabei wird der vordere Bezugspunkt soweit verstellt, bis dieser sich in der Soll-Lage befindet. Während der Hebearbeiten wird das Gleis solange gehoben, bis sich der Nivellierabnehmer wieder in Nullposition befindet. Die Nivellieranlage bleibt während der Stopf- und Hebearbeiten immer eingeschaltet, damit eine durchgehende Kontrolle der Gleislage erfolgen kann. [26]

#### **3.5.1.2 Messung der Querhöhe**

Die Steuerung der Querhöhe wird ebenfalls durch Stahlsehnern, die bei der Ermittlung der Längshöhe verwendet werden, gesteuert. Durch ein am vorderen Bezugspunkt angebrachtes elektronisches Präzisionspendel wird die Querhöhe automatisch durch die Höhendifferenz der beiden Stahlsehnern berechnet und geregelt. [26]

### **3.5.2 Berichtigung der Gleislage durch Hebe- und Richtaggregate**

Um zum einen eine entsprechende, größtenteils homogene Auflagerfläche durch das Stopfen zu erhalten und zum anderen einen gleichmäßigen Verdichtungserfolg zu erzielen, muss vor dem eigentlichen Verdichtungsvorgang eine Hebung der Schwellen stattfinden.



Abbildung 3.11: Heberichtaggregat der Firma Plasser & Theurer [26]

Dabei wird mittels Hebeaggregat, meistens kombiniert mit einem Richtaggregat (vgl. Abbildung 3.11), über eine Heberollzange ein Anheben der Schiene mitsamt Schwellen erreicht und so werden für den Stopfvorgang entsprechende Freiräume geschaffen, in denen der Schotter im Anschluss an die Hebung „hineingestopft“ werden kann. Die Hebe- und Richtaggregate sind stets vor den Stopfaggregaten angeordnet.

Wie in Abbildung 3.11 zu sehen ist, sind pro Schienenstrang immer zwei hydraulisch gesteuerte Rollhebezangenpaare angeordnet, die ein zentrisches Heben und somit keine zusätzlichen Belastungen der Schiene und dessen Befestigung durch etwaige Kippmomente, ermöglichen.

Beim Richtvorgang wird das Gleis je Schienenstrang durch ein eigenes Aggregat mittels zwei Doppelflanschrollen und durch querstehende Hydraulikzylinder in seiner seitlichen Richtung korrigiert.

Die Hebe- und Richtzangen bleiben während der gesamten Stopfarbeiten abgesenkt. Die Werkzeuge bleiben auch beim Vorfahren mit der Schiene in Kontakt, üben aber keinen Druck auf diese aus, sondern rollen nur ab. Da die Bewegungsfreiheit der Rollen in alle Richtungen gegeben ist, passen sie sich auch bei der Vorfahrt im Bogenbereich der Gleiskrümmung an, ohne dabei Kräfte an die Schienen zu übertragen. [20]

Durch die so entstandenen Hohlräume zwischen Schwelle und Bettung kann sich das Schottergefüge neu ausrichten und lässt sich leichter zu einer gleichmäßig Struktur verdichten. Ohne die vorhergehende Hebung würden die Schwellenaufleger nur äußerst ungleichförmig und nicht wirkungsvoll verdichtet werden. Ebenso besteht eine größere Gefahr durch Schwellenreiten. Die Hebung des Gleises ist also eine eigentliche Voraussetzung für einen gewünschten Verdichtungserfolg. Allerdings darf die Hebung auch nicht zu groß sein, da sonst durch den räumlich begrenzten Wirkungsbereich der Stopfpickel keine ausreichend homogene Verdichtung stattfinden kann und auch die Schwellenaufleger so nur sehr unregelmäßig gestaltet werden können. [3]

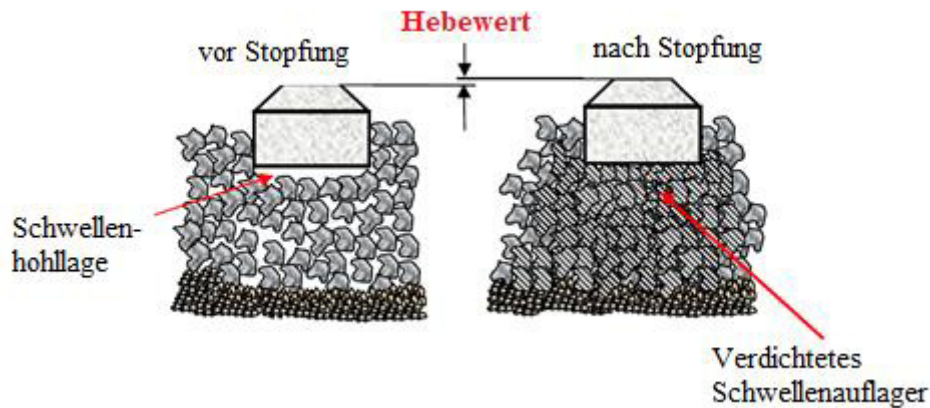


Abbildung 3.12: Schwellenaufleger vor und nach dem Stopfvorgang, adaptiert nach [25]

### 3.5.2.1 Optimale Hebung – „Design Stopfen“

Im Allgemeinen sollte die Hebung des Gleises zwischen 15 und 40 mm aus den in den vorangegangenen Kapiteln genannten Gründen betragen. Bei Fällen, bei denen eine größere Hebung aufgrund großer Gleislagefehler notwendig ist, werden mehrere Hebe- und Stopfvorgänge sowie Nachschotterungen erforderlich, um wieder auf die geforderten Bettungsstärken und auf die Soll-Lage des Gleises zu kommen [25]. Unterhalb eines Hebewerts von 15 mm resultieren hingegen kaum verbleibende Korrekturen am Gleis.

Nach einer Durcharbeitung eines Streckenabschnitts unter Betriebsbelastung durch Anfangssetzungen kann beobachtet werden, dass punktuelle Lagefehler immer wieder an denselben Stellen auftreten. Die Schotterbettung bzw. das Gleis macht den Anschein, als besitze es ein „Gedächtnis“, welches das Gleis dazu bewegt, wieder in die ursprüngliche Fehlerform zurückzukehren. Der Grund dafür ist die nach den Stopfarbeiten anfängliche Stabilisierungsphase, in der eine Kornumlagerung stattfindet, solange bis die einwirkenden Kräfte ohne weitere Setzungen in den Untergrund abgetragen werden können.

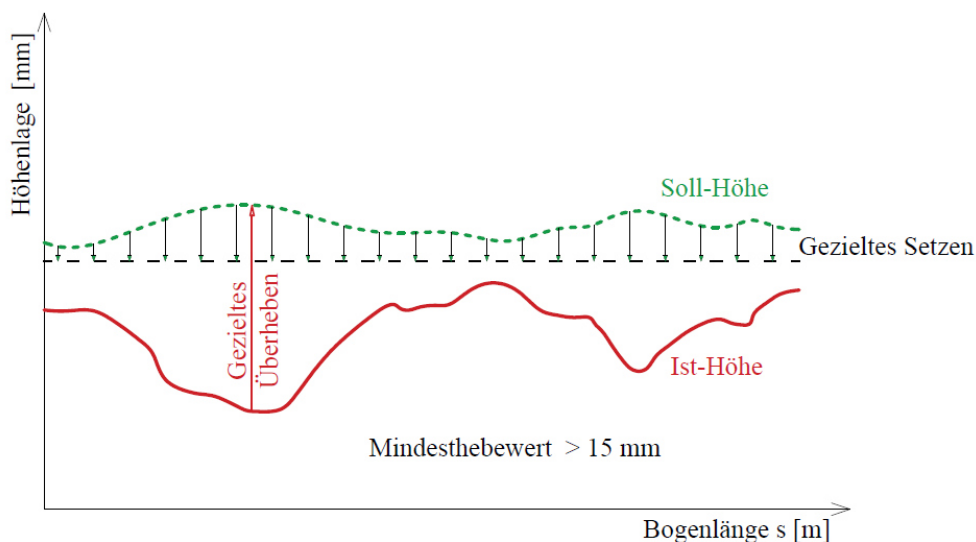


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung des gezielten Überhebens – „Design Stopfen“; adaptiert nach [15]



Um diesen immer wiederkehrenden Lagefehlern vorzubeugen, wird das Verfahren des „Design Stopfens“ angewandt. Hierbei wird das Gleis im Bereich von Einzelfehlern bzw. in Bereichen, wo größere Setzungen zu erwarten sind, gezielt über die Soll-Lage hinaus überhoben (vgl. Abbildung 3.13). Durch die folgenden Betriebsbelastungen von ca. 0,5 – 2,0 Mio. t werden im Laufe der Zeit gezielte Setzungen hervorgerufen, die nach Beendigung dieser hohen Anfangssetzungen in einer idealen Gleishöhenlage resultieren. Somit kann eine stark erhöhte und haltbare Längshöhenstabilität erreicht werden.

Eine weitere Verbesserung findet durch den anschließenden Einsatz einer dynamischen Gleisstabilisation statt. Hierbei werden die Anfangssetzungen vorweggenommen, damit der normale Fahrbetrieb ohne etwaige Langsamfahrstellen während der ersten Betriebsbelastungen sofort im Anschluss nach den Arbeiten aufgenommen werden kann. Bereits im Jahr 2004 wurden von den ÖBB detaillierte Versuche zum „Design Stopfen“ durchgeführt, deren Ergebnisse eine positive Wirkung der Überhebung auf eine nachhaltige Gleislage bestätigten.

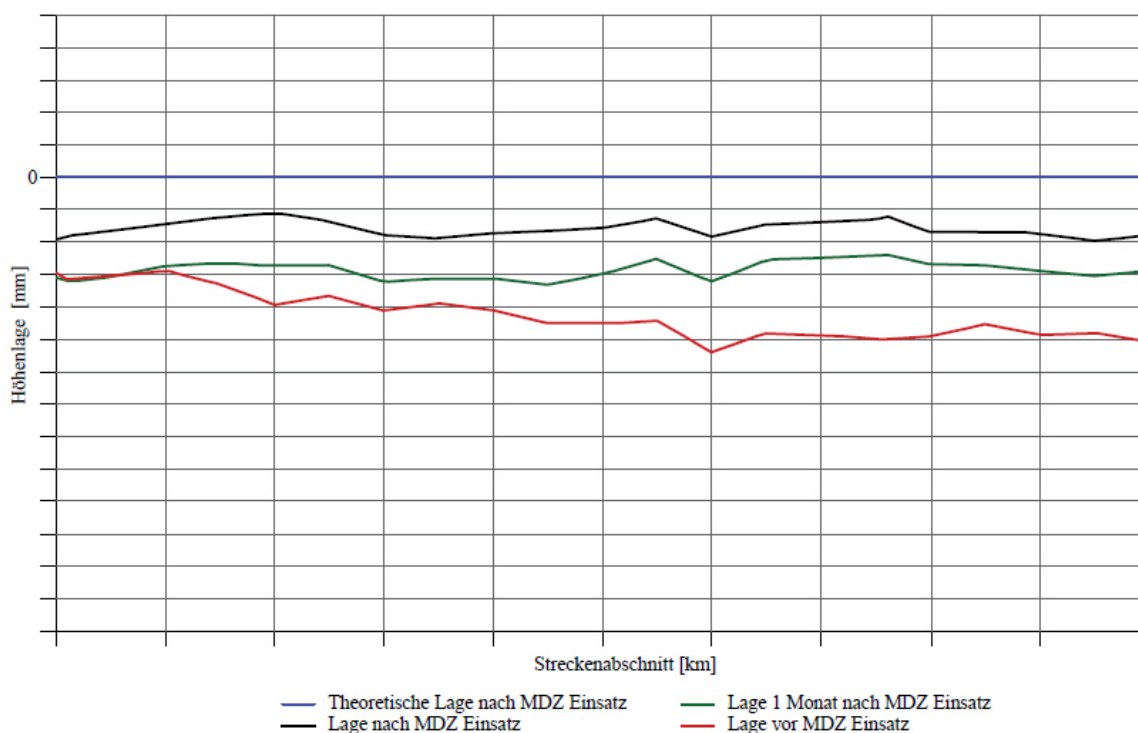


Abbildung 3.14: Schematische Gleislagebilder ohne Überhebung; adaptiert nach [2]

Abbildung 3.14 zeigt Gleislagebilder an einem Streckenabschnitt, wo mittels mechanisiertem Durcharbeitungszug (MDZ) ohne „Design Heben“ gestopft wurde. Gut zu erkennen ist, dass der Lagefehler in der Mitte des Bildes nach einem Monat wieder sehr ausgeprägt zu erkennen war [2].

Im Zuge weiterer Untersuchungen wurden am angrenzenden Streckenabschnitt Stopfarbeiten mittels Design Heben durchgeführt. Es konnten durchwegs Verbesserungen des Gleises bezüglich seiner verlängerten Lagebeständigkeit erzielt werden, wie in der Abbildung 3.15 anhand von zwei markanten Einzelfehlern schön zu sehen ist.

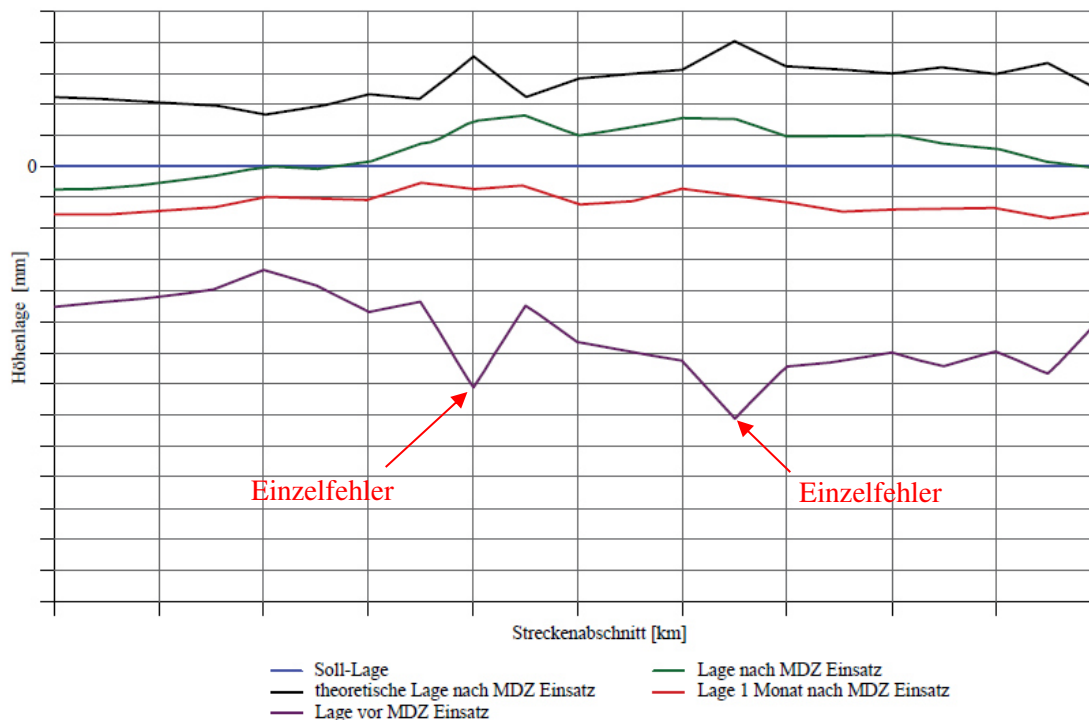


Abbildung 3.15: Schematische Gleislagebilder mit Überhebung, adaptiert nach [2]

### 3.5.3 Stopftiefe

Die Einstellung der richtigen Stopftiefe darf ebenso nicht außer Acht gelassen werden und hat eine große praktische Bedeutung. Bei zu geringer Stopftiefe wird der Schotter hauptsächlich gegen die Schwellen gedrückt, was vielmehr eine Beschädigung der Schwellen und eine Zerstörung der Bettung als eine ausreichende Verdichtung unter den Schwellen mit sich bringen würde.

Zu große Tiefen führen zu ungleichmäßiger Verdichtung und vor allem zu einer unvollständigen Verdichtung im Schwellenauflagerbereich.

Die ideale Stopftiefe hängt primär von der Korngröße ab, sollte aber im Bereich von 15 bis 20 mm zwischen Pickeloberkante und Schwellenunterkante zu liegen kommen. [20]

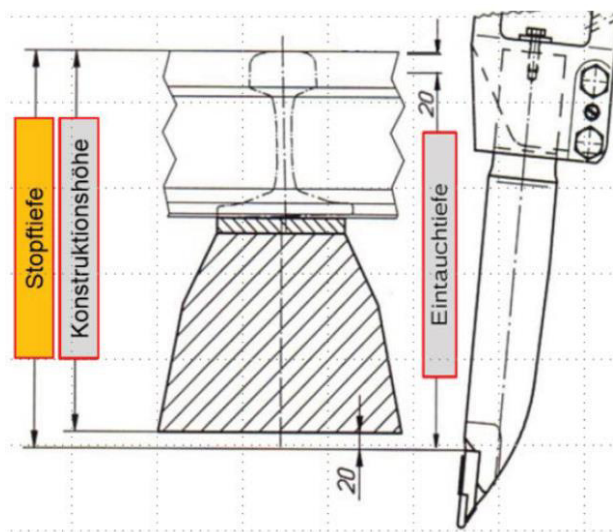


Abbildung 3.16: Darstellung der Messbereiche für Stopf- und Eintauchtiefe [20]

## 3.6 Zusatzeinrichtungen für Stopfmaschinen

### 3.6.1 Digitale Aufzeichnungssysteme

Direkt im Anschluss an die Instandhaltungsarbeiten wird die Wiederherstellung der richtigen Gleislage durch moderne Mess- und Aufzeichnungssysteme nochmals kontrolliert. So hatte man bis vor kurzem die Möglichkeit, die gemessenen Werte und Parameter lediglich über einen Mehrkanalschreiber auf Papier aufzuzeichnen. Mittlerweile sind moderne, digitale Aufzeichnungssysteme der Stand der Technik.

Das Prinzip der modernen Aufzeichnungssysteme hat sich im Vergleich zu analogen Verfahren kaum geändert. Für die Pfeilhöhenmessung wird, wie bereits in Kapitel 3.5.1 erwähnt, eine Stahlsehne verwendet, die zwischen zwei Spannwagen vorne und hinten in der Gleismitte gespannt ist und als Messreferenz dient. Die Pfeil- und Längshöhe wird dabei durch einen Messwagen mittels Wandersehnverfahren abgetastet. Wie in Abbildung 3.17 ersichtlich, kann mithilfe dieser Messung der Radius bzw. die Krümmung der Gleislage berechnet werden.

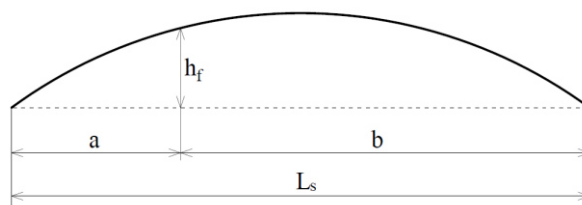


Abbildung 3.17: Berechnung der Pfeilhöhe an einem beliebigen Punkt des Bogens

Bei der Pfeilhöhenmessung an einem beliebigen Punkt des Kreisbogens gilt die folgende mathematische Beziehung. Die einzelnen Faktoren der folgenden Gleichung sind in Abbildung 3.17 schematisch dargestellt:

$$h_f = \frac{a \cdot b}{2r} \quad (3.1)$$

Die Sehne wird je nach Bedarf an einen der beiden Schienenstränge angepresst. Über ein Pendel oder ein Inklinometer wird nun die gegenseitige Höhenlage der Schienenstränge gemessen und dadurch die Verwindung des Gleises ermittelt.

Darüber hinaus kann auch die tatsächliche Spurweite über eine Teleskopachse gemessen werden. Über diese kann in weiterer Folge auf die Pfeilhöhe und über die gemessene Überhöhung auf die Längshöhe des zweiten Schienenstrangs geschlossen werden. Zusätzlich können zur Gleisgeometrie auch noch folgende Arbeits- und Stopfparameter aufgezeichnet werden:

- Arbeitsgeschwindigkeit
- Hebung des Gleises
- Beistellzeit
- Stopffrequenz
- Stopftiefe
- gemessener Querverschiebewiderstand nach der Instandhaltung

Über die in der Maschine eingebaute Software werden alle gemessenen Parameter synchronisiert und auf einem Monitor in der Bedienerkabine übersichtlich dargestellt (vgl. Abbildung 3.19). Ebenso können über die Software zulässige Grenzwerte für diverse Parameter eingegeben werden, sodass bei einer Überschreitung der Schwellwerte sofort reagiert werden kann. Liegen die Werte alle unterhalb der Grenzwerte, kann das Gleis direkt im Anschluss wieder freigegeben werden.

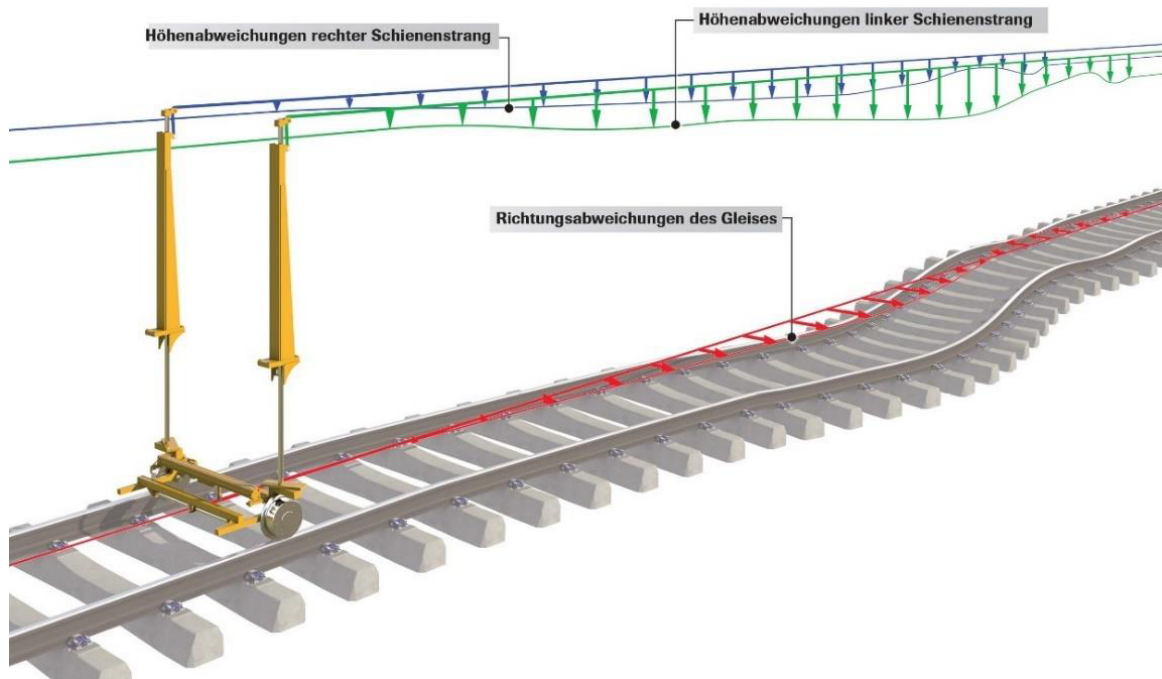


Abbildung 3.18: Prinzip der Gleisvermessung, dargestellt sind Längshöhen beider Schienen und die gemessene Richtungsabweichung (Pfeilhöhendifferenz) [53]

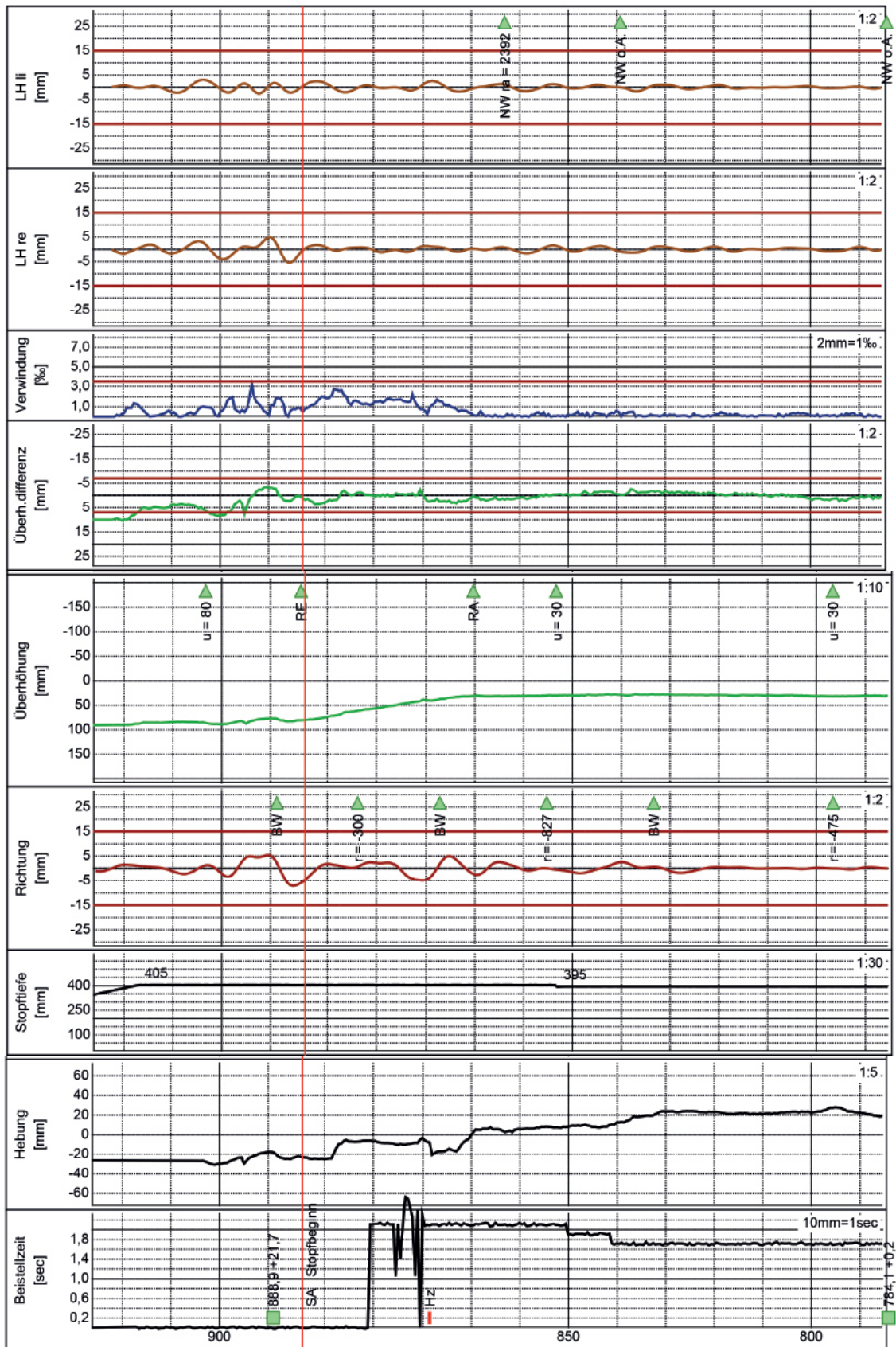


Abbildung 3.19: Auszug aus einer Messaufzeichnung (LH li ist die gemessene Längshöhe an der linken Schiene, LH re die Längshöhe der rechten Schiene) [10]

### 3.7 Gegenüberstellung gängiger Stopftechnologien

#### 3.7.1 Technologie der Firma Plasser & Theurer – Asynchrone Gleichdruckstopfung

Die Stopftechnologie der Firma Plasser & Theurer wird asynchrone Gleichdruckstopfung genannt. Auf der Homepage der Firma Plasser & Theurer wird die Technologie folgendermaßen erklärt:

*„Der Schotter wird unter Einwirkung von Vibration und druckgesteuerter Kraft unter den Schwellen verdichtet, wobei nicht die Wege der Stopfwerkzeuge, sondern deren wirksame Kräfte zwangsläufig gleich groß sind. D.h., dass jeder einzelne Stopfarm mit seinen zugeordneten Stopfpickeln unabhängig von den anderen so lange beigestellt wird, bis der eingestellte Stopfdruck, und damit auch der entsprechende Verdichtungsgrad, erreicht ist“ [25]*

Das asynchrone Gleichdruckstopfen erzeugt eine kontinuierliche und homogene Schotterpackung und somit gleichmäßige Auflager für die Schwellen. Dabei dringen die Stopfpickel in den Schotter ein und beschreiben eine gerichtete, geradlinige Schwingung mit konstanter Amplitude, das sogenannte Beistellen. Der Schotter wird, wie bei allen anderen Verfahren, durch Vibrieren und durch eine druckgesteuerte Beistellkraft unter den Schwellen verdichtet.

Nicht der Weg der einzelnen Stopfpickel stellt das Abbruchkriterium dar, sondern die Größe der Widerstandskraft, die der Schotter dem Stopfpickel entgegenwirkt. Die dynamische Verdichtungskraft stellt sich daher über den Schotterwiderstand automatisch ein, da die Amplitude vorgegeben ist. [16][3][25]

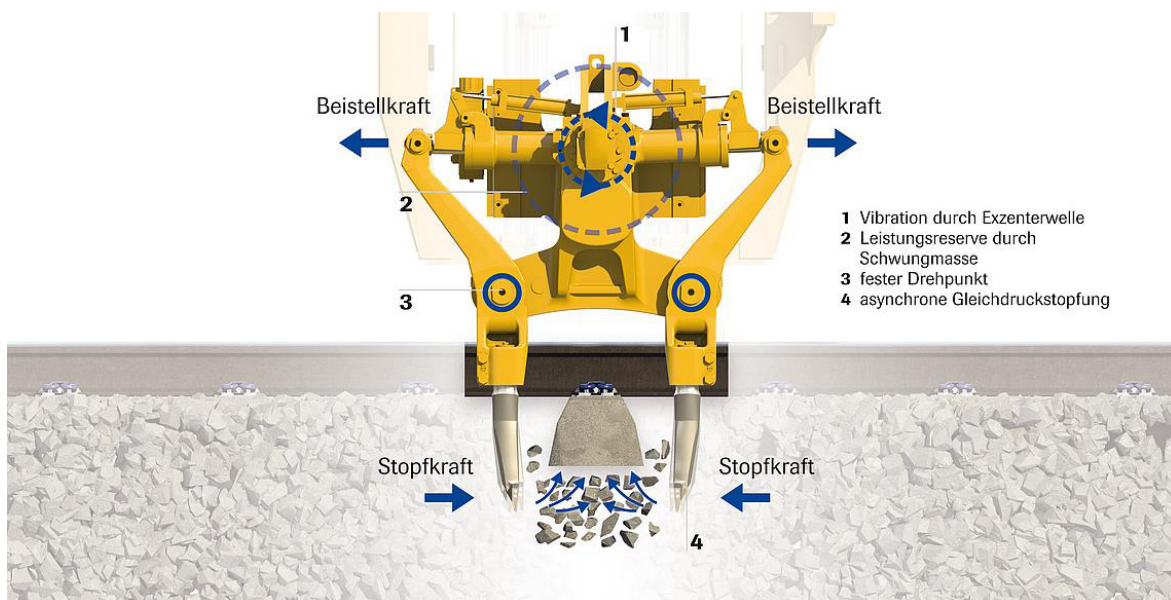


Abbildung 3.20: Stopfaggregat der Firma Plasser & Theurer mit der Technologie der asynchronen Gleichdruckstopfung [3]

Das grundlegende Patent von Plasser & Theurer ist eine quasi-starre Vibration mit hydraulisch aufgebrachtener Beistellkraft [3]. Die Kräfte werden über einen festen Drehpunkt (3) auf die Stopfpickel übertragen. Eine Vibrationsbewegung mit konstanter Amplitude wird über die Exzenterwelle (1) erzeugt. Die asynchrone Beistellung (4) und die Vibration werden miteinander überlagert.

Das Beistellen, also die Schließbewegung der Stopfpickel, erfolgt bei den Aggregaten von Plasser & Theurer stets linear. Eine integrierte Schwungmasse (2) fungiert als Energiespeicher und stabilisiert die Drehzahl. Dadurch ist die Vibrationsamplitude unabhängig vom Verdichtungsgrad bzw. vom Widerstand, den der Schotter den Stopfpickeln entgegenwirkt, da durch das Speichern der rotatorischen Energie kurzzeitig große Leistungsspitzen abgegeben werden können. Ohne diese Schwungmassen würden die heutigen Stopfaggregate weit schwerer und größer gestaltet werden.

### 3.7.1.1 Stopfparameter – Amplitude, Frequenz, Beistellzeit und Stopfdruck

Eine Beistellzeit zwischen 0,8 und 1,2 Sekunden, je nach Bettungsverhältnissen, gewährleistet eine optimale Entfaltung des Stopfdrucks auf das Bettungsmaterial. Die optimale Geschwindigkeit ergibt sich aus der Beistellkraft und dem Widerstand, den der Schotter dem Stopfwerkzeug entgegenwirkt.

Eine ideale Stopfkraft von 10 bis 12 kN pro Pickelpaar hat sich bewährt und führt auf unterschiedliche Schotterarten dauerhaft zum gewünschten Erfolg.

Bei Neuanlagen kann eine Beistellzeit von 0,8 Sekunden gewählt werden, sollte aber niemals darunter zu liegen kommen, da sonst äußerst inhomogene Qualitätsverhältnisse durch den nicht vollständig abgeschlossenen Verdichtungsprozess entstehen würden.

Bei der asynchronen Gleichdruckstopfung der Firma Plasser & Theurer wird der Stopfvorgang erst dann beendet, wenn der eingestellte optimale Stopfdruck, auch Beistelldruck genannt, erreicht wird. Plasser und Theurer verwendet Stopfdrücke von 115-125 bar (bei Neuanlagen 95-110 bar). Zur Vermeidung von übermäßigem Schotterverschleiß dient ein integrierter Überlastungsschutz. Grundlage für die Wahl der entscheidenden Stopfparameter bei Plasser & Theurer ist die Dissertation von *Fischer* [7] mit dem Titel „Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschothter“, die im Jahr 1983 an der TU Graz publiziert wurde. Die Ergebnisse der Dissertation basieren auf experimentellen und theoretischen Erkenntnissen (vgl. Kapitel 3.4). Um den bestmöglichen Wirkungsgrad beim Verdichtungsprozess zu erreichen, arbeiten die Aggregate von Plasser & Theurer mit einer gerichteten, geradlinigen Schwingung mit einer Stopffrequenz von 35 Hz bei einer Pickelamplitude von 4 bis 5 mm. Um die Stopfwirkung vollständig auf den Schotter zu übertragen, sollte die Beistellzeit zwischen 0,8 und 1,2 Sekunden zu liegen kommen. Die Parameter Amplitude, Beistellkraft und Beistellzeit müssen vor jedem Arbeitsgang den jeweiligen Schotterverhältnissen angepasst werden [7][3]. Hierbei wird gewährleistet, dass nur die obere Schotterlage verdichtet wird. Die untere Lage hingegen bleibt in ihrer tragfähigen Form und wird kaum beeinflusst. Dadurch wird ein homogener Verdichtungsgrad auch bei unterschiedlich großen Hohllagen unter den Schwellen und unabhängig von der benötigten Hebung des Gleises erreicht. [16][25]

### 3.7.1.2 Integrierte Drehzahlregelung – Frequenzmodulation

Lange Zeit war der Vibrationsantrieb der Exzenterwelle so eingestellt, dass dieser ausschließlich die optimale Frequenz beim Stopfvorgang von 35 Hz über die gesamte Dauer der Arbeiten erzeugte. Dabei ist es jedoch sinnvoll, die Drehzahl bzw. die Arbeitsfrequenz an die unterschiedlichen Arbeitsschritte des Aggregats anzupassen. In Abbildung 3.21 ist die Arbeitsweise der Aggregate bzw. die Modulation der Frequenzen zu unterschiedlichen Phasen aufgezeigt.

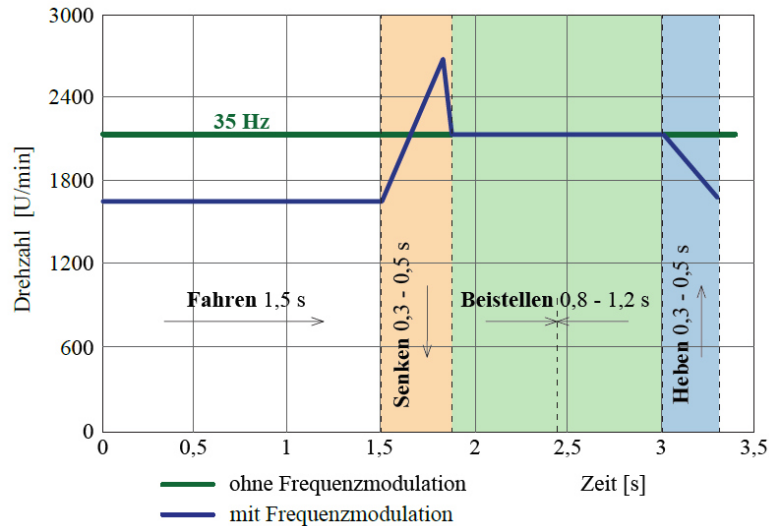


Abbildung 3.21: Verlauf der Vibrationsdrehzahl mit Frequenzmodulation, adaptiert nach [3]

Wenn die Stopfpickel in den Schotter eindringen, wirken grundsätzlich andere mechanische Vorgänge, als beim Stopfvorgang selbst. Durch eine Erhöhung der Frequenz vor und beim Eintauchen kann das Eindringen der Stopfwerkzeuge erleichtert werden. Beim Heben des Aggregats bzw. wenn die Stopfpickel in der Luft sind, wird im Prinzip keine Vibration benötigt. Das Aggregat schaltet in den Leerlauf und verweilt bis zum nächsten Absenkvorgang in Warteposition. Die einzelnen Phasen sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen:

Tabelle 3.2.: Betriebsmodi inkl. dazugehöriger Arbeitsfrequenz [3]

Modus	Frequenz [Hz]
Eindringhilfe	45
Normalmodus	35
Leerlauf	28

Zusätzlich zur Energieeinsparung kann durch die Leerlauffunktion eine Lärmreduktion um bis zu 4 dBA in einem Abstand von 7,5 m festgestellt werden. Ebenso kann der Verschleiß sowohl beim Leerlauf als auch beim Absenken durch die Reduzierung der Durchschnittsdrehzahl auf ein Minimum gebracht werden. [3]



### 3.7.1.3 Stopfpickel

Die Anordnung der Stopfpickel erfolgt immer paarweise je Schienenstrang an der Außen- und Innenseite der Schiene. Die einander zugehörigen Pickelpaare werden stets gleichzeitig in den Schotter eingetaucht. Durch einfache Schraubenverbindungen zwischen Pickelarm und dem Pickel selbst, können die Werkzeuge ohne Mühen rasch ausgetauscht werden. An den stark beanspruchten Stellen (Pickelunterkante und die Vorderseite der Pickelplatte) sind die Stopfwerkzeuge durch Hartmetallplättchen gepanzert. Die nach unten hin zusammenlaufende Form kann ein leichteres Eindringen in den Schotter ermöglichen.

### 3.7.2 Stopfaggregate der Firma MATISA – Hochfrequenz-Elliptik-Stopfverfahren

Die Firma Matisa aus der Schweiz verbaut ebenfalls Stopfaggregate mit Exzenterwelle in Kombination mit Hydraulikzylindern. Auf der Homepage der Firma Matisa wird deren Stopfverfahren folgendermaßen beschrieben:

*„Die MATISA Strecken-Stopfmaschinen, ausgestattet mit voneinander unabhängigen Stopfeinheiten, profitieren vom Hochfrequenz-Elliptik-Stopfverfahren. Dieses von MATISA entwickelte Verfahren garantiert eine unerreichte Qualität der Schotterverdichtung und folglich äusserst geringe und regelmässige Gleissenkungen nach dem Stopfen“ [45]*

Es gibt allerdings zwei signifikante Unterschiede zu den Aggregaten von Plasser & Theurer:

Die Positionierung der Exzenterwelle erfolgt nicht wie bei Plasser & Theurer im oberen Bereich direkt an den hydraulischen Beistellzylindern, sondern unter den Hydraulikzylindern am Pickelarm. Durch die veränderte Position der Exzenterwelle entsteht aufgrund der Vibrationen am Stopfpickel keine lineare Bewegung. Die Schließbewegung der Stopfpickel beschreibt hingegen eine in der vertikalen Ebene liegende Ellipse.

Dabei entsteht nicht wie bei konventionellen Aggregaten eine gerichtete Stopfamplitude, sondern eine Bewegung, die sich aus einer horizontalen und einer vertikalen Amplitude zusammensetzt. Der horizontale Anteil beläuft sich dabei auf ca. 8,0 mm, der kleinere vertikale Anteil hingegen auf ca. 2,4 mm.

Durch diese zusätzliche vertikale Amplitude wird beim Stopfvorgang unter der Schwelle ein vergrößerter Bereich verdichtet. Außerdem wird dadurch der „Memory-Effekt“ des Gleises reduziert. Ausgebesserte Fehler treten dadurch im Schotter weniger oft wieder ein.

Der zweite maßgebende Unterschied zur Arbeitsweise von konventionellen Aggregaten ist die Stopffrequenz. Diese beträgt bei den Maschinen der Firma Matisa 42 Hz anstelle der konventionellen 35 Hz.

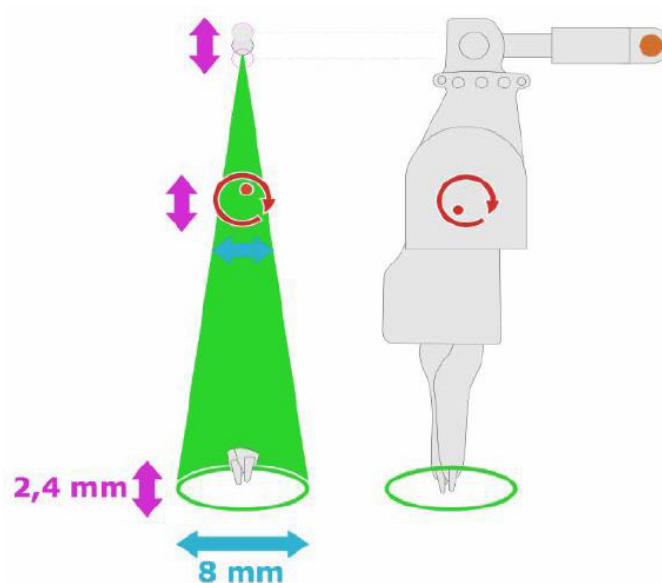


Abbildung 3.22: Schematische Darstellung des Elliptik-Hochfrequenz-Stopfverfahrens der Firma MATISA [20]

Die höhere Vibrationsfrequenz soll lt. Matisa den Schotter in einen halbviskosen Zustand bringen, durch den der Eindringwiderstand der Stopfpickel in den Schotter maßgebend reduziert werden kann. Ebenso wird dadurch eine bessere Verzahnung, eine homogene Verdichtung und somit eine verbesserte Beständigkeit der Gleislage erreicht.

Zusammenfassend bewirkt die höhere Arbeitsfrequenz, die größere horizontale Amplitude und die zusätzliche vertikale Bewegung der Stopfwerkzeuge ein kompakteres, nachhaltigeres Schwellenauflager bei gleichzeitiger Verringerung des Eindringwiderstands der Stopfpickel, was eine einfachere Bearbeitung von sehr harten Bettungsverhältnissen ermöglicht und gleichzeitig den Verschleiß der Stopfwerkzeuge maßgebend reduziert. [20]

### 3.7.3 Technologie der Firma System 7 – Vollhydraulisches Stopfaggregat

Die Firma System 7 railsupport GmbH entwickelte und brachte in den letzten Jahren ein neuartiges Stopfaggregat mit teils großen Unterschieden zu den gängigen Systemen von Plasser & Theurer und Matisa auf den Markt. Es handelt sich dabei um ein vollhydraulisches Aggregat, welches die Vibrationen ausschließlich durch zwei Regelventile, welche an den hydraulischen Beistellzylindern angebracht sind, erzeugt. Dadurch entfallen teils wartungsintensive rotierende Maschinenteile, wie die Exzenterwelle und die Schwungmasse und deren Antriebsmotoren.

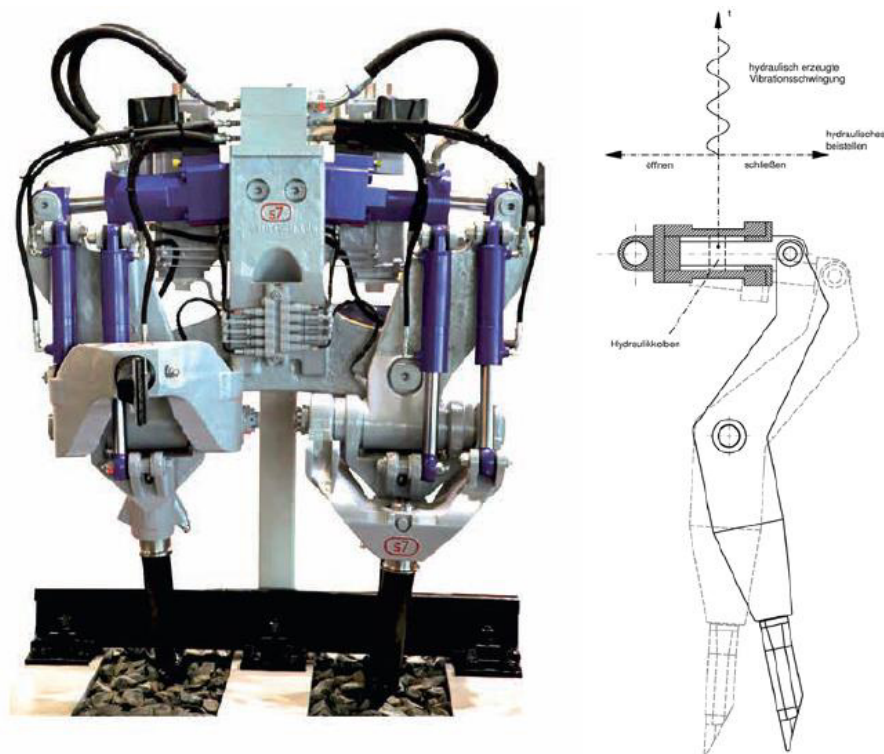


Abbildung 3.23: Vollhydraulisches Stopfaggregat der Firma System 7 [17]

Die Verdichtung selbst wird bei diesem neuartigen Aggregat nicht über die Beistellzeit, sondern über den vorgegebenen Stopfdruck reguliert. Berührungslose Wegsensoren und integrierte Drucksensoren an den Hydraulikzylindern zeichnen stopfrelevante Parameter, wie Pickelamplitude und Stopfdruck bzw. den Widerstand des Schotters gegen die Verdichtungskraft, auf.

Mit diesen aufgezeichneten Daten kann der Beistellweg und der ideale Stopfdruck sofort an die lokalen Bettungsverhältnisse angepasst und die Parameter „Pickelamplitude“ und „Vibrationsfrequenz“ variabel gesteuert werden. Dadurch kann beispielsweise ein leichteres Eindringen der Stopfpickel in den Schotter ermöglicht werden.

Aus Betriebseinsätzen gewonnene Erkenntnisse durch die Firma System 7 geht eine ideale Frequenz für das Eintauchen der Stopfpickel mit 25 Hz hervor. Ebenso wurde gezeigt, dass im Speziellen bei einer neuen, weichen Bettung für ein optimales Verdichtungsergebnis eine niedrigere Verdichtungskraft bei gleichzeitig geringeren Beistellwegen erzielt werden kann.

Ein weiterer Vorteil der elektronisch steuerbaren Hydraulikzylinder ist die verminderte Lärmemission durch einen „Ruhemodus“, der die Vibrationen nach dem Beistellvorgang abstellt und erst beim neuerlichen Senken wieder einschaltet. Dadurch kann laut System 7 eine erhebliche Reduktion der Lärmemissionen bei Einschwellen-Weichenstopfmaschinen eines mittleren Schallpegels von ca. 80 dBA um mehr als 7 dBA auf in etwa 73 dBA erreicht werden. Auch die Dauerbelastung und somit der Verschleiß der Maschine kann durch die Drosselung im „Ruhemodus“ um ein beträchtliches Maß reduziert werden.

Das vollhydraulische System 7 Aggregat kann die Stopfpickel aufgrund des Wegfalls von Exzenterwelle und Schwungmasse um ca. 10 cm höher schwenken als konventionelle Aggregate.

Dadurch kann auch die Öffnungsweite der Pickel frei eingestellt werden, was das Stopfen z.B. in komplizierten Weichenkonstruktionen, ohne Demontage von Weichenantrieben o.ä., ermöglicht und somit Zeit und Kosten spart. Ein Nachrüsten des vollhydraulischen Stopfantriebs soll bei bestehenden Stopfmaschinen problemlos möglich sein. Dabei wird nicht das gesamte Aggregat ausgetauscht, sondern lediglich die nicht mehr benötigten rotierenden Teile ausgebaut und die neuen Hydraulikzylinder, an denen sich die Regelventile befinden, angeschlossen. Zum Abschluss werden die zur Steuerung notwendigen Sensoren inklusive der Bedienersoftware installiert.

Die im S7-Aggregat verbauten Sensoren zeichnen unter anderem die Beistellkraft und den Weg der Beistellung kontinuierlich auf. Durch diese gesammelten Datensätze kann noch vor Ort auf die Härte des Schotterbetts geschlossen werden.

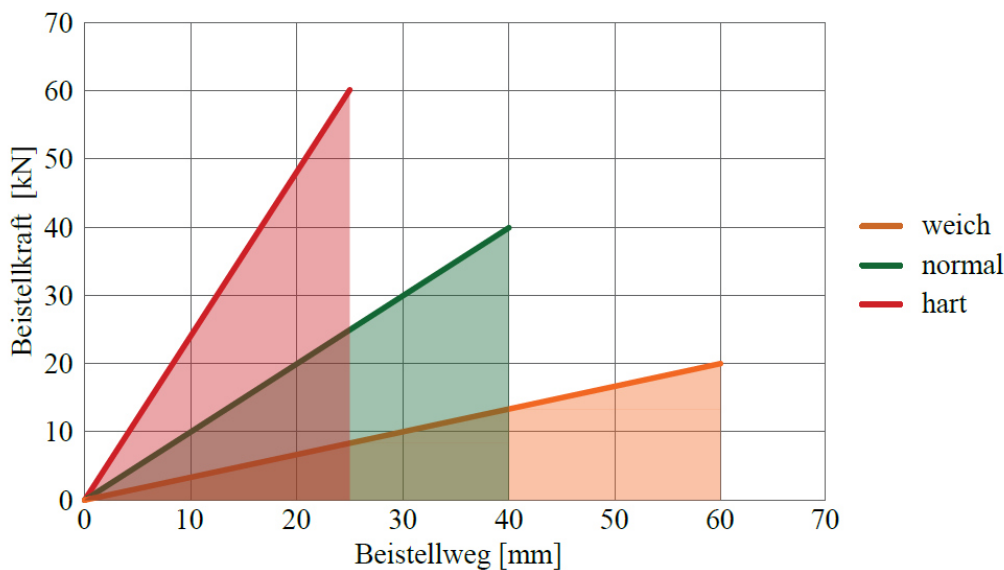


Abbildung 3.24: Beistellkraft in Abhängigkeit von der Schotterbetthärte und dem Beistellweg, adaptiert nach [17]

Abbildung 3.24 zeigt die Beistellkraft in Abhängigkeit des gemessenen Beistellwegs für drei unterschiedlich „harte“ Bettungsverhältnisse. Bei höher werdenden Schotterbettsteifigkeiten steigt die Beistellkraft, bei gleichzeitiger Senkung des Beistellwegs, kontinuierlich an.

Das Produkt dieser beiden Parameter bzw. die schattierte Fläche unter den Graphen ist als physikalische Arbeit mit der Einheit Kraft pro Weg definiert. Man kann also durch das Integral über einen bestimmten Beistellweg (im Bild 20mm) auf die zugeführte Verdichtungsenergie schließen: [17]

$$W_n = \int_0^s F(s) ds = k \int_0^s s ds = k \cdot \frac{s^2}{2} \quad (3.2)$$

Mit der in (3.2) über die Steigung des Beistellkraftverlaufs  $k$  [N/m] und des Beistellwegs  $s$  [mm] berechneten normierten Verdichtungsenergie  $W_n$  [Nm] wird im Anschluss ein Qualitätsziffer von 1 bis 10 festgelegt (vgl. Abbildung 3.25):

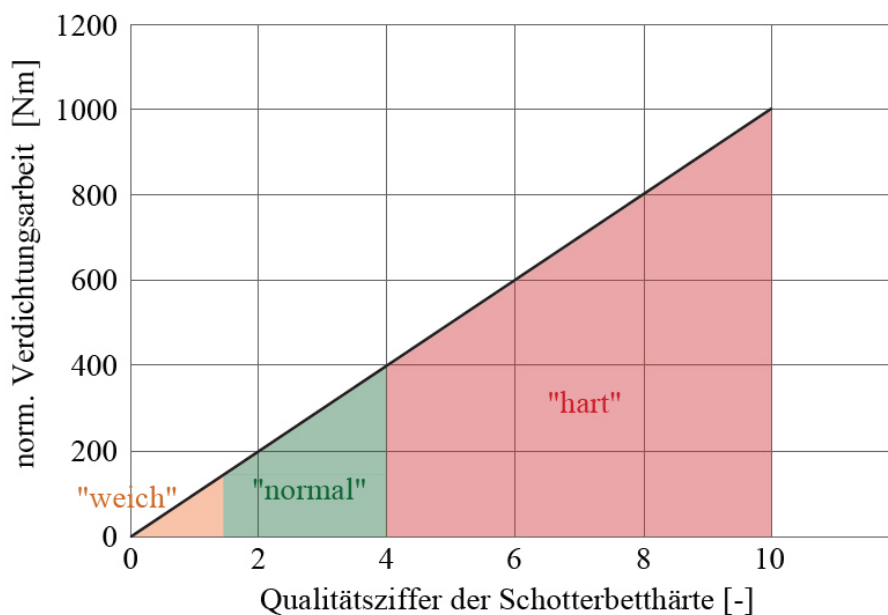


Abbildung 3.25: Normierte Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit der Schotterbetthärte, adaptiert nach [17]

Es kann also mit den Daten aus den Sensormessungen an Ort und Stelle auf die lokalen Schotterbettverhältnisse geschlossen werden. Entsprechend der angetroffenen Bettungsverhältnisse kann somit im sogenannten „Automatikmodus“ über eine elektronische Regelung der Kraft und des Pickelwegs die ideale Verdichtung für die vorliegenden Schotterbedingungen erreicht werden. Tabelle 3.3 zeigt die bisher aus Betriebseinsätzen gewonnenen Erkenntnisse und Zusammenhänge in Bezug auf die in-situ Messung der Bettungssteifigkeit.

Zusammengefasst bringt die neuartige Technologie von System 7 eine Reihe an wesentlichen Vorteilen gegenüber konventionell arbeitenden Stopfaggregaten. Zum einen werden aufgrund der verbauten Sensoren die optimalen Stopfparameter automatisch an die örtlichen Verhältnisse angepasst, zum anderen wird aber auch eine wesentliche Verringerung der Wartungskosten durch den Wegfall von verschleißanfälligen Bauteilen erzielt. Ebenso wird durch das zwischenzeitliche Abschalten des Aggregats die Dauerleistung erhöht und die Lärmemissionen gesenkt. Zudem bietet das Stopfsystem erstmals die Möglichkeit, die Qualität der Verdichtung direkt während des Stopfvorgangs nachzuweisen. [17][20]

Tabelle 3.3.: Übersicht über die Zusammenhänge verschiedener Stopfparameter; adaptiert nach [17]

Bettungshärte	Beistellweg [mm]	Beistellgeschwindigkeit [mm/s]	Stopfkraft [kN]	Kraftanstiegsrate [kN/mm]
„hart“	20 – 30	35 – 40	50 – 60	1,70 – 3,00
„mittel“	30 – 60	45 – 50	20 – 50	0,35 – 1,70
„weich“	60 – 70	50 – 60	10 - 20	0,14 – 0,35

### 3.7.4 Steinblasverfahren – Stoneblowing

Beim Prinzip des Unterblasens wird der Schotter nach Anheben des Gleises unter die Schwellen geblasen. Die großen Steinblasmaschinen arbeiten in gewisser Weise ähnlich wie Stopfmaschinen. Über ein Aggregat werden nach dem Heben des Gleises zur Schwelle hin offene Metalldüsen bis unter die Schwelle abgesenkt. Dadurch wird der, in ihrer Korngröße, zum Vergleich von Normalschotter, kleinere Schotter bzw. Feinkies mit Druckluft von beiden Seiten unter die Schwellen geblasen. Der Schotter wird dadurch größtenteils unkontrolliert unter die Schwellen eingebracht. Die Auswahl und die Mengenermittlung des zu verwendenden Schotters gestalten sich aufgrund der Willkür bei der Einbringung äußerst schwierig. Außerdem wird der Querverschiebewiderstand durch das Anheben der Schwelle und der Auflockerung, ohne spätere Verdichtung, stark herabgesetzt (vgl. Tabelle 4.2). Der eingebrachte Kleinschotter wirkt zudem unter den Schwellen wie ein Kugellager, was eine erhöhte Gefahr einer Gleisverwerfung mit sich bringen kann.

In Abbildung 3.26 ist der Instandhaltungszyklus des Steinblasverfahrens dem des Stopfverfahrens bei schlechten Oberbauverhältnissen gegenübergestellt [15]. Selbst bei sehr schlecht liegenden Gleisen mit einer angenommenen Verschlechterungsrate von  $0,04 \text{ mm}/10^6 \text{ t}$  bewirkt das Steinblasverfahren lediglich eine Erhöhung des Instandhaltungszyklus von ca. 50 % im Vergleich zur Gleisstopfung.

Abbildung 3.26 zeigt außerdem, dass die Anfangsqualität der hierzulande hohen Qualitätsansprüche auf Hochgeschwindigkeitsstrecken nicht erfüllt werden kann. Die maximal erreichbare Anfangsqualität durch das Steinblasen liegt noch immer oberhalb der Eingriffsschwelle und ist somit für solche Streckenabschnitte in keinem Fall einsetzbar. [15]

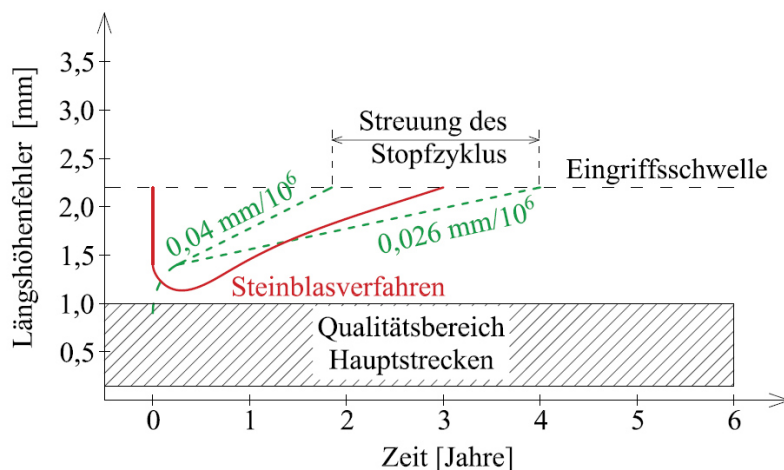


Abbildung 3.26: Gleisqualitätsentwicklung nach der Stopfung oder nach der Anwendung des Steinblasverfahrens bei schlechten Oberbauverhältnissen; adaptiert nach [15]

In der Fachliteratur wird, entgegen der Aussagen der Hersteller und Publikationen von Befürwortern des Steinblasverfahrens, von diesem grundsätzlich abgeraten. Nur für stark verschmutzte Nebenstrecken mit sehr niedrigen Anforderungen an die Gleisstabilisierung kann der Einsatz des Steinblasverfahrens angedacht werden, da hier eine leichte Erhöhung des Eingriffszyklus erreicht werden kann (vgl. Abbildung 3.26).

Aufgrund der sehr geringen Arbeitsleistung von  $< 350$  m/h gestaltet sich das Verfahren zudem als höchst unwirtschaftlich. Konventionelle Stopfmaschinen arbeiten heutzutage mit einer Leistung von über 2000 m/h, also mit der sechsfachen Geschwindigkeit im Vergleich zum Steinblasverfahren. [15]





# 4. Dynamische Gleisstabilisation

## 4.1 Aufbau und Funktionsweise

### 4.1.1 Allgemeines

Um eine Gleisanlage möglichst nachhaltig instandzuhalten, ist heutzutage der Einsatz einer dynamischen Gleisstabilisation nach den Stopfarbeiten unumgänglich.

### 4.1.2 Prinzip der dynamischen Gleisstabilisation

Durch die Stopfarbeiten wird der Schotter hauptsächlich unterhalb der Schwellen verdichtet, um ein optimales Auflager für die Lastabtragung zu schaffen. Jedoch bleibt speziell in den Bereichen, wo die Stopfpickel in den Schotter eintauchen bzw. wieder gezogen werden, ein nicht ausreichend verdichteter Bereich zurück. Ebenso wird durch die horizontalen Richtbewegungen ein kleiner Spalt am Schwellenkopf erzeugt, der durch die räumlich begrenzte Stopfwirkung nicht berichtigt wird. Das Schotterbett ist also nach den Stopfarbeiten äußerst inhomogen verdichtet. [1][15]

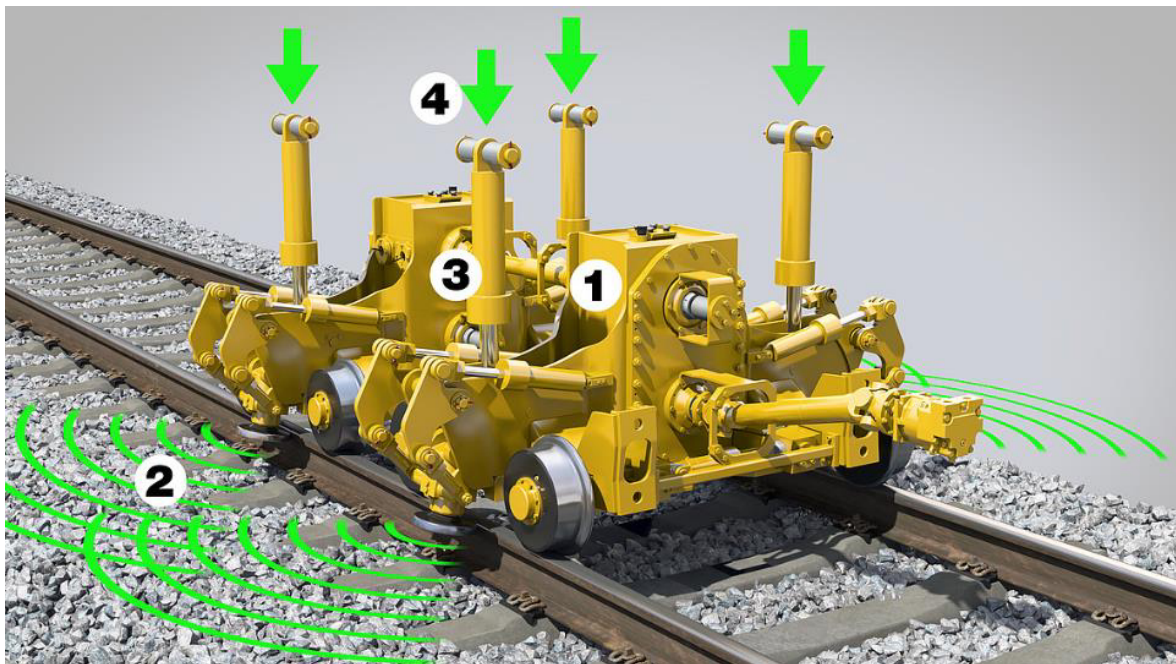


Abbildung 4.1: Prinzip des dynamischen Gleisstabilisators: eine variable Unwucht (1) erzeugt horizontale Vibrationen (2), Hydraulikzylinder (3) generieren die vertikale Auflast (4) [54]

Direkt im Anschluss an die Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten bewegt sich der dynamische Gleisstabilisator mit konstanter Geschwindigkeit über das Gleis und versetzt dieses, bei gleichzeitiger vertikaler Belastung, in eine lateral gerichtete Schwingung (vgl. Abbildung 4.1). Durch diese erzeugten Vibrationen können sich die einzelnen Schotterkörner ohne übermäßige Schlageinwirkung in einem dichteren Gefüge neu anordnen. Dadurch entsteht ein weitgehend homogen verdichtetes Gleisbett. Über die vertikale Belastung kann auch, zusätzlich zur Effizienzsteigerung der Verdichtung, die Höhenlage bei Bedarf noch einmal korrigiert werden.

Das Ergebnis der DGS ist eine höhere Festigkeit bzw. eine höhere Setzungsunempfindlichkeit, durch die Vorwegnahme der hohen Anfangssetzungen durch ungewollte Kornumlagerungen bei Betriebsbelastungen. Die gesamte Gleisanlage ist somit beständiger und muss dadurch in größeren Zeitabständen gestopft werden. Des Weiteren wird auch der Querverschiebewiderstand durch die Verdichtung des Schotters wieder erhöht, nachdem dieser durch die vorangegangenen Richtarbeiten verringert wurde.

Das Gleis kann direkt im Anschluss an die Arbeiten und die Kontrolle der intakten Schienenwege sofort wieder für den Verkehr freigegeben werden. [1][15]

### 4.1.3 Arbeitsweise

Nach Beendigung der Hebe-, Richt- und Stopfarbeiten bzw. simultan bei kontinuierlich arbeitenden Stopfmaschinen wird das Schwingaggregat des dynamischen Gleisstabilisators auf das Gleis abgesenkt. Dabei wird das Aggregat mittels Rollen, ähnlich wie bei den Hebe- und Richtarbeiten, an den beiden Schienensträngen fixiert. Im Anschluss daran wird die Maschine auf die erforderliche Durcharbeitungsgeschwindigkeit beschleunigt. Erst bei Erreichen der Arbeitsgeschwindigkeit wird die vertikale Last langsam und kontinuierlich gesteigert und die Schwingfrequenz auf den erforderlichen Wert gesteigert.

Im hinteren Bereich der Maschine kontrolliert eine Nivelliereinrichtung die Längshöhe bzw. die Absenkung des Gleises durch die Stabilisierungsarbeiten über den Vergleich des vorangegangenen Nivellements.

Bei Beendigung der Arbeiten verlaufen die Vorgänge in umgekehrter Reihenfolge: Die Frequenz wird während der Fahrt gedrosselt und erst danach die vertikale Auflast verringert. Zweck dahinter ist das ruhige Arbeiten der Maschine. Würde die Maschine bei Stillstand und ohne Aufbringen der Auflast ihre horizontalen Schwingungen induzieren, bestünde die Gefahr von Beschädigungen an den Schwellen und Schienen. Aber auch Schotterzertrümmerung durch impulsive Schläge auf das Korngerüst wären die Folge einer falschen Anwendung der Maschine. [1]

## 4.2 Räumliche Wirkung der Verdichtung

Die dauerhafte, beständige Lage des Gleises hängt in erster Linie von der Stabilität der Schotterbettung ab. Die durch das Gleisstopfverfahren lediglich erreichte lokal begrenzte Verdichtung reicht in der Regel nicht aus, um die gewünschte flächendeckende Stabilität zu erreichen.

Beim Stopfvorgang selbst wird der Schotter zwar durch die zangenartige Schließbewegung der Stopfpickel gut verdichtet, dadurch werden aber gleichzeitig die Körner der obersten Lage der Schotterbettung zu einer Aufwärtsbewegung gezwungen. Eine räumliche und homogene Verdichtung lässt sich daher nicht alleine durch die Mechanismen beim konventionellen Gleisstopfen erzwingen.

Der seit Anfang der 90er Jahre vor allem in Zentraleuropa zum Einsatz kommende dynamische Gleisstabilisator schafft hingegen eine homogene Verdichtung im Gleisbett durch die räumliche Wirkung dieses Verfahrens.

Nach anfänglichen Studien und Versuchsreihen im Hinblick auf die Wirkung der dynamischen Gleisstabilisation, sowohl im Labor als auch in-situ, kam man zur theoretischen Erkenntnis, dass bei einer horizontalen Schwingfrequenz von 50 Hz und einer vertikalen Auflast von 10 N/cm<sup>2</sup> bereits nach einer Einwirkung von fünf Sekunden eine sehr gute Absenkung der Gleislage und somit eine gute räumliche Verdichtung erzielt werden kann. Kürzere Einwirkzeiten würden dabei nicht zum gewünschten Verdichtungserfolg führen, wohingegen bei längerer Anwendung keine signifikante Verbesserung des Verdichtungsgrades eintritt. Meist wird jedoch eine Arbeitsfrequenz im Bereich zwischen 28 und 35 Hz gewählt, damit die Maschine während des Arbeitens ruhig läuft. Durch eine Variation der vertikalen Auflast kann zusätzlich die bereits durch die Nivellierstopfmaschine hergestellte Höhenlage berücksichtigt werden, indem die Auflast z.B. an Hochpunkten erhöht und an Tiefpunkten reduziert wird. Ein neuerliches laterales Richten ist im Zuge der Gleisstabilisation nicht mehr notwendig, da durch das Verfahren keine Veränderung der Richtung des Oberbaus erfolgt.

Vor der Entwicklung des dynamischen Gleisstabilisators kamen lediglich der Vorkopf- und der Zwischenfachverdichter (vgl. Kapitel 4.3) zur Anwendung. Diese erzeugten zwar ein gut verdichtetes Gleisbett, entsprachen aber noch immer nicht den Erwartungen und Anforderungen der Bahnbetreiber an die Verdichtungsqualität an Hauptstrecken, da die bereits durch das Stopfen relativ gute Verdichtung des Schotters mit diesen Methoden kaum mehr erhöht werden konnte.

Durch die Entwicklung der dynamischen Gleisstabilisation, an der die Firma Plasser und Theurer maßgebend beteiligt war, ist es nun durch die Einbringung horizontal gerichteter Schwingungen möglich, bei gleichzeitigem Absenken des Gleises das Schotterbett homogen zu verdichten, um unkontrollierte Anfangssetzungen aus dem Betriebsverkehr kontrolliert und gleichmäßig vorwegzunehmen.

#### **4.2.1 Einflüsse auf die Wirkung der dynamischen Gleisstabilisation**

Einer der maßgebenden Arbeitsparameter auf den Einfluss der Wirkungsweise des dynamischen Gleisstabilisators ist die Frequenz. Aber auch andere steuerbare Parameter, wie die vertikale Auflast und die Arbeitsgeschwindigkeit, haben großen Einfluss auf die Wirkung der räumlichen Verdichtung und die Vorwegnahme von Anfangssetzungen und können vom Maschinenführer beliebig gesteuert werden. Die aufgebrauchte dynamische Schlagkraft resultiert aus der Größe der Schwingamplitude, welche durch die rotierenden Exzentermassen des Aggregats erzeugt werden. Die dynamische Schlagkraft kann daher nur indirekt bei der Bedienung der Maschine durch die Variation der Frequenz gesteuert werden. [1]

#### 4.2.1.1 Einfluss der Frequenz

Durch den Einfluss der Frequenz auf die Schotterverdichtung macht man sich die elasto-plastischen Eigenschaften von granularen Medien zu nutzen. Bei höherfrequenten Einwirkungen, ab circa 35 bis 40 Hz, beginnt der Schotter zu „fließen“ (vgl. Kapitel 2.9). Dadurch können Kornbindungen gelöst, die Reibung zwischen den Schotterkörnern verringert und somit eine dichtere Lagerung durch eine Neuordnung der Körner erzielt werden.

Gängige Gleisstabilisatoren arbeiten im Frequenzbereich zwischen 0 und 45 Hz, wobei übliche Arbeitsfrequenzen zwischen 28 und 35 Hz ein sauberes und ruhiges Laufen der Maschine bei gleichzeitig effektiver Verdichtungsarbeit garantiert. Zu hohe Frequenzen können zu Resonanzen mit Teilen der Maschine und des Aggregats kommen, wodurch auch die Gleisanlage beschädigt werden könnte. [1]

#### 4.2.1.2 Einfluss der aufzubringenden Vertikallast

Im Zuge von Untersuchungen mittels dynamischen Scherversuchen an der TU Graz [15] konnte verifiziert werden, dass es durch die horizontalen Stöße durch den dynamischen Gleisstabilisator bei steigender vertikaler Belastung auf den Schotter zu größeren lateralen Verschiebungen kommt und somit eine größere Schotterbewegung möglich ist (vgl. Kapitel 2.7.3.2). Dies ermöglicht eine leichtere Umordnung der einzelnen Körner und somit zu einem besseren Verdichtungsergebnis durch die Erhöhung der Lagerungsdichte.

Die Vertikallasten können durch den Stabilisator mittels Hydraulikzylinder einzeln und stufenlos mit bis zu ca. 240 kN generiert werden. Im gängigen Arbeitsbetrieb wird aufgrund der Sicherstellung der kraftschlüssigen Verbindung zwischen Gleisanlage und Aggregat eine Mindestauflast von 70 kN vorgegeben.

#### 4.2.1.3 Dynamische Schlagkraft des dynamischen Gleisstabilisators

Die dynamische Schlagkraft des dynamischen Gleisstabilisators ist in erster Linie von der Bauart der Instandhaltungsmaschine abhängig. Grundsätzlich sind an jedem Aggregat vier Schwungmassen angebracht, wobei zwei dieser Exzenter immer gegengleich angeordnet sind, um die vertikalen Kräfte bei gleichzeitiger Verstärkung der Schlagkraft in horizontaler Richtung auszugleichen. Die dynamische Schlagkraft kann daher nur indirekt über die Variation der Frequenz reguliert werden. Grundsätzlich gilt bei der Berechnung der dynamischen Schlagkraft unter vereinfachten Annahmen folgender dynamischer Ansatz:

$$F_{dyn} = m \cdot r \cdot \omega^2 = m \cdot r \cdot (2\pi \cdot f)^2 \quad (4.1)$$

Wobei hier  $m$  die exzentrische Masse in Kilogramm,  $r$  die Exzentrizität der Masse in Meter,  $f$  die Arbeitsfrequenz in Hertz und  $\omega$  die Kreisfrequenz in  $s^{-1}$  ist. Gewöhnliche Stabilisierungsaggregate können dadurch dynamische Schlagkräfte von bis zu  $\pm 200$  kN erzeugen. Neueste Entwicklungen von dynamischen Gleisstabilisatoren lassen seit kurzem eine stufenlose Variation der Unwucht von 0 bis 100% zu. [1]

Damit kann künftig der Einfluss auf die Vorwegnahme der Anfangssetzungen besser gesteuert werden und somit kann die dynamische Schlagkraft ohne zusätzliche Erhöhung der vertikalen Auflast und ohne Einbußen beim Verdichtungserfolg verstärkt werden.

#### **4.2.1.4 Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit**

Einen signifikanten Einfluss der Arbeitsgeschwindigkeit auf die Wirksamkeit der Verdichtung kann hingegen nicht beobachtet werden. So ist aus [15] zu entnehmen, dass bereits nach den ersten anfänglichen circa 70 Schwingzyklen ein Großteil der Gleisabsenkung und somit der räumlichen Verdichtung abgeschlossen sind. Das bedeutet, dass bei einer Einwirkdauer von 2 Sekunden bei 35 Hz, bereits ein beträchtlicher Teil der Anfangssetzungen vorweggenommen werden können. [15][27][1]

### **4.3 Erhöhung des Querverschiebewiderstands und Messungen in-situ**

Der Querverschiebewiderstand setzt sich aus mehreren Teilwiderständen zusammen, die im Folgenden genauer erläutert werden. [15].

#### **4.3.1 Sohlreibung**

Die Sohlreibung stellt die Reibung zwischen Schwellenunterkante und Bettung dar. Sie ist abhängig vom Reibungskoeffizienten der beiden Materialien und von der Auflast. Die Sohlreibung macht circa 40 – 50 % des Querverschiebewiderstands aus. Durch die Abhebewelle der Schiene bei einer Zugüberfahrt kann sich der Wert um bis zu 20 – 40 % verringern.

#### **4.3.2 Schwellenflankenwiderstand**

Der Schwellenflankenwiderstand kann als aktiver Erddruck aus der klassischen Erddrucktheorie angesehen werden. Er ist abhängig von der Schütthöhe, der Dichte des Bettungsmaterials und vom Reibungskoeffizienten. Der Anteil des Schwellenflankenwiderstands im Vergleich zum Gesamtquerverschiebewiderstand beläuft sich auf ca. 35 – 40 %.

#### **4.3.3 Vorkopfwiderstand**

Durch das Drücken der Schwelle nach außen (z.B. Fliehkräfte infolge Bogenfahrt) wird der Vorkopfwiderstand als passiver Erddruck aktiviert. Er ist also erst dann wirksam, wenn sich die Schwelle ein relativ großes Maß zum Schotter hinbewegt. Ansonsten ist der Vorkopfwiderstand von den selben Faktoren wie die des Schwellenflankenwiderstands abhängig. Anteilig beläuft sich der Vorkopfwiderstand zwischen 10 und 15 %.

Bevor eine erste Verschiebung der Schwelle auftritt, muss die Reibung rund um die Schwellenoberfläche überwunden werden. Die dazu benötigte Kraft steigt hierbei rasch an und geht dann in einen beinahe konstanten Verlauf über [15].

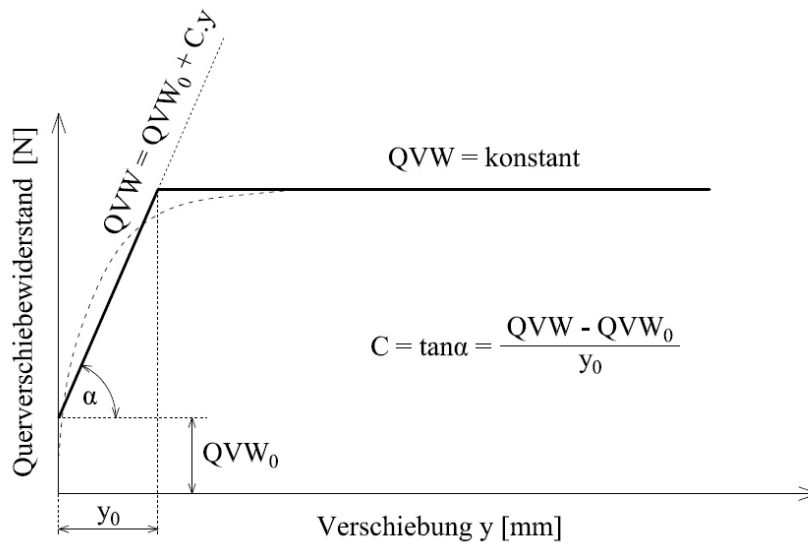


Abbildung 4.2: Qualitativer Verlauf des Querverschiebewiderstands (QVW); C bezeichnet die lineare Steigung des Querverschiebewiderstands im Bereich der Erstverschiebung der Schwelle  $y_0$ ; adaptiert nach [15]

Die oben genannten Anteile des Querverschiebewiderstands variieren je nach angewendeten Messmethoden. Der Teilwiderstand der Schwellensole beläuft sich aber in den meisten Fällen auf ca. 50%. Bei besohnten Schwellen konnte eine Erhöhung auf bis zu 60% festgestellt werden.

#### 4.3.4 Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den Zwischenfachverdichter

Zur Erhöhung des Querverschiebewiderstands kann ein Zwischenfachverdichter angewendet werden. Zweck dieser Art der lokal begrenzten Verdichtung ist es, ein Ausweichen des durch die Stopfmaschine unter den Schwellen verdichteten Schotters in das Schwellenzwischenfach zu verhindern. Zur Anwendung kommt dieses Verfahren heutzutage nurmehr selten, da die räumliche Wirkung des dynamischen Gleisstabilisators nicht nur einen lokal begrenzten Bereich, sondern das gesamte Schotterbett homogen verdichtet.

In den wenigen speziellen Fällen, bei denen der Zwischenfachverdichter seine Anwendung findet, bewirkt dieser aufgrund des Anstiegs des Schwellenflankenwiderstands eine Erhöhung des Querverschiebewiderstands von bis zu 7 %. Zum Vergleich wird der Widerstand der seitlichen Verschiebung durch eine dynamische Gleisstabilisation um 30 – 40 % angehoben. [15]

#### 4.3.5 Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch den Vorkopfverdichter

Durch die vor dem eigentlichen Stopfvorgang ausgeführten Richtarbeiten entsteht ein Spalt am Schwellenvorkopf, der durch den Vorkopfverdichter wieder geschlossen wird. Dies bewirkt eine Erhöhung des Querverschiebewiderstands durch ein Vergrößern der Dichte am Schwellenende von bis zu 4 %. Außerdem wird die horizontale Lage des Gleises stabilisiert, damit die Schwellen während der anschließenden Unterstopfung nicht wieder in ihre alte Lage zurückfedert.

Ein Vorkopfverdichter kann bei Bedarf durch separate seitliche Aggregate an Stopfmaschinen installiert werden. [15]



Abbildung 4.3: Typischer Vorkopfverdichter [26]

#### 4.3.6 Versuchsdurchführung zur Messung des Querverschiebewiderstands

Im Zuge einer Versuchsreihe der ÖBB im Jahr 2010 wurde an der TU München der Einfluss von unterschiedlichen Schotterarten Granit und Dunit der gleichen Korngrößenverteilung in Kombination mit unterschiedlich steifen Unterschottermatten untersucht. [14]

##### 4.3.6.1 Messaufbau

Am Prüfstand wurde ein Gleisrost mit zwei unbesohlenen Spannbetonschwellen eingerichtet. Die Schotterbettstärke wurde mit einer Höhe von 45 cm eingerichtet. Dies entspricht bei den verwendeten Spannbetonschwellen des Typs K1 einer Schotterhöhe von 23 cm unter der Schwellenunterkante. Unterschottermatten wurden lt. [14] mit zwei unterschiedlichen Bettungswerten eingebaut ( $C_{\text{stat}} = 0,045 \text{ N/mm}^3$  und  $0,280 \text{ N/mm}^3$ ) und über ihre Steifigkeit ausgedrückt. Die Schwellenvorkopfschüttung betrug 50 cm, die anschließende Böschung wurde mit einer Neigung von 1:1,5 ausgeführt.

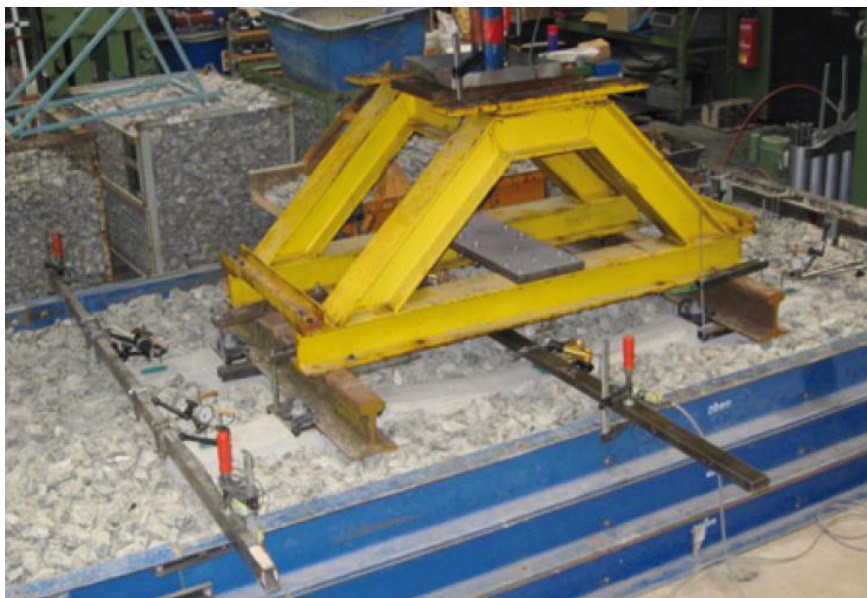


Abbildung 4.4: Versuchsaufbau während der Messungen [14]

Der Schotter wurde vor Versuchsdurchführung mittels Handstopfgeräten und Rüttelplatte verdichtet. Zusätzlich wurden Induktivwegaufnehmer installiert, um die Einsenkung unter statischer und dynamischer Belastung messen zu können.

#### 4.3.6.2 Versuchsdurchführung

Simuliert wurden insgesamt 3 Mio. Lastwechsel mit einer vertikalen Belastung von 225 kN. Nach Abschluss der Versuchsdurchführung wurden die statischen und dynamischen Bettungsmoduln das Setzungsverhalten und der Querverschiebewiderstand in den unterschiedlichen Kombinationen aus Gesteinsart und verschieden steifer Unterschottermatten ermittelt.

#### 4.3.6.3 Versuchsergebnisse

Nach etwa 250 000 Lastwechseln wurde eine Reduktion der Schwingweite festgestellt. Die elastische Verformung ging zurück, wobei die plastischen Deformationen weiterhin zunahm. Beim Dunit war im Vergleich zum Granit eine geringere statische und dynamische Steifigkeit zu erkennen, die mit größeren plastischen Verformungen einhergingen. Nach den abgeschlossenen 3 Mio. Lastwechseln belief sich die plastische Verformung des Granitschotters über der steifen Unterschottermatte auf ca. 6 mm, wobei die Setzungen des Dunits bei gleichen Verhältnissen in etwa 9 mm betragen. Der statische Bettungsmodul lag im Mittel bei etwa  $0,155 \text{ N/mm}^3$ , der dynamische ca. bei  $0,195 \text{ N/mm}^3$ . Zur Messung des Querverschiebewiderstands wurden die Schienen nach Versuchsdurchführung von den Schwellen entfernt, um die Einzelschwellen im Anschluss ohne weitere Auflast quer zur Gleisachse verschieben zu können. Als maßgebender Wert des Querverschiebewiderstands wurde die Widerstandskraft bei einer seitlichen Verschiebung der Einzelschwelle um 2 mm angegeben, um den Übergang zwischen Haft- und Gleitreibung zu überwinden. In Abbildung 4.5 ist der gemessene Kraft-Verschiebungsverlauf der Schwelle auf Dunitschotter mit steifer Unterschottermatte und Sicherungskappe gezeigt:

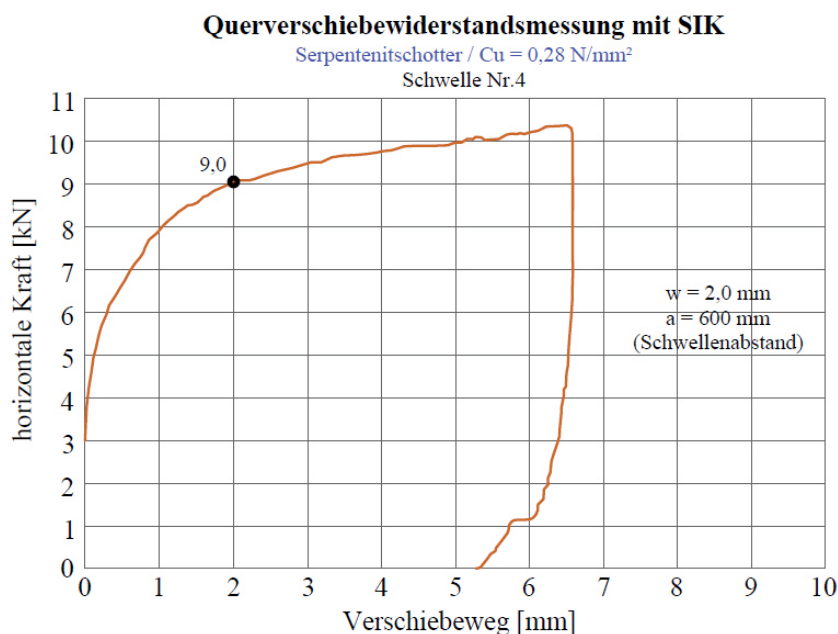


Abbildung 4.5: Querverschiebewiderstandsmessung einer Einzelschwelle, adaptiert nach [14]



Tabelle 4.1 gibt die Ergebnisse aller Messungen wieder. Gut zu erkennen ist, dass der Querverschiebewiderstand bei Dunitschotter auf weichem Untergrund fast um ein Drittel höher ist als bei steifen Untergrundverhältnissen. Dies ist auf eine größere Schwingweite und eine größere plastische Verformung aufgrund von Kornumlagerungen zurückzuführen. Auffällig ist auch, dass der Querverschiebewiderstand bei harten Untergrundbedingungen gegenüber dem Granitschotter aufgrund des geringeren Zertrümmerungswiderstands bzw. auf leichteres Abbrechen von Kanten leicht reduziert ist. Speziell auf Bahnstrecken mit engen Kurvenradien ist die Gefahr von Verwerfungen durch Temperaturunterschiede, aufgrund von unzureichender seitlicher Haltung, groß. Durch Sicherungskapen kann hierbei Abhilfe durch eine Erhöhung des Querverschiebewiderstands von in etwa 30% geschaffen werden.

Tabelle 4.1.: Messungen des Querverschiebewiderstands nach 3 Mio. Lastwechseln [14]

	Querverschiebewiderstand [N/mm]			
	Oberlast = 225 kN, Unterlast = 8 kN, Frequenz = 3 Hz			
	Dunit weich Cu = 0,045 N/mm <sup>3</sup>	Granit hart Cu = 0,280 N/mm <sup>3</sup>	Dunit hart Cu = 0,280 N/mm <sup>3</sup>	Dunit mit SIK hart Cu = 0,280 N/mm <sup>3</sup>
Messung 1	13,4	11,8	10,7	14,4
Messung 2	13,6	11,8	10,6	15,1
Mittelwert	13,5	11,8	10,7	14,8

#### 4.3.7 Instandhaltungsarbeiten und ihr Einfluss auf den Querverschiebewiderstand

Durch nahezu alle Instandhaltungsarbeiten wird in das Schottergefüge eingegriffen. Dies bewirkt eine Änderung der Lagerungsdichte des Materials. Der Querverschiebewiderstand sinkt. Deshalb ist es oft üblich, nach Instandhaltungsarbeiten in diesen Bereichen Langsamfahrstellen einzurichten. Um dies zu verhindern, kommt der Dynamische Gleisstabilisator zum Einsatz.

##### 4.3.7.1 Konkrete Einflüsse von Instandhaltungsarbeiten auf den Querverschiebewiderstand

Der Querverschiebewiderstand erhöht sich im Lauf der Zeit durch die Betriebslasten, da dadurch der Schotter wieder eine dichtere Lagerung einnimmt.

Tabelle 4.2.: Einflüsse von Instandhaltungsmaßnahmen auf den Querverschiebewiderstand; [15]

Art der Instandhaltung	Änderungsrate
Zwischenfachverdichtung	+ 7 %
Vorkopfverdichtung	+ 4 %
Dynamische Gleisstabilisation	+ 30 – 40 %
Stopfen	- 40 %
Schotterreinigung	- 50 %
Steinblasverfahren	- 50 – 65 %

Eine volle Regeneration des Widerstands ist zwischen 0,5 und 2 Mio. t Betriebslast zu erwarten [15]. Durch die dynamische Gleisstabilisation (DGS) kann jedoch der Querverschiebewiderstand auf ein tolerierbares Maß gebracht werden, um diese Langsamfahrstellen zu vermeiden. Die dynamische Gleisstabilisation ist mit einer Vorwegnahme von ca. 100.000 t zu vergleichen. In Tabelle 4.2 sind typische Einflüsse verschiedener Instandhaltungsarbeiten auf den Querverschiebewiderstand dargestellt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Optimierung und Weiterentwicklung des gleisgebundenen Stopfverfahrens und der dynamischen Gleisstabilisation stellt die Eisenbahningenieure der heutigen Zeit vor große Herausforderungen. Zum einen existiert bis dato lediglich eine geringe Anzahl an Forschungsstudien im Vergleich zu anderen großen Bereichen des Ingenieurwesens, auf denen weitere Forschungen und Untersuchungen aufgesetzt werden könnten. Ein Großteil der vorhandenen Forschungsarbeiten behandeln zudem lediglich sehr spezielle Fragen, Problemstellungen und Mechanismen. Zum anderen wird eben kaum auf das „große Ganze“ eingegangen, sondern es werden nur „Symptome behandelt“.

Ein Beispiel für zu wenig Forschung auf diesem Bereich ist die Tatsache, dass Erkenntnisse aus der Dissertation von *Fischer* [7] Anfang der 80er Jahre heute noch in modernen Stopfmaschinen unverändert Anwendung finden. Seither wurden die Schwingfrequenz von 35 Hz und eine Amplitude der Stopfpickel beim Verdichten als ideale Parameter für die Schotterverdichtung angesehen, ohne auf den lokalen Zustand des eingebauten Schotters, wie Steifigkeitsunterschiede, wirkungsvoll einzugehen.

Einer der Hauptaspekte bei nahezu allen Studien, welche in der vorliegenden Diplomarbeit vorgestellt wurden, ist es, Stopfparameter, wie Frequenz, Amplitude, Beistellweg und viele andere Faktoren zu optimieren.

Die Komplexität des Instandhaltungsprozesses macht es notwendig mechanische, geotechnische und bahntechnische Zusammenarbeit zu forcieren. Dadurch wird die Forschungsarbeit um ein Vielfaches erschwert, eröffnet aber gleichzeitig die Möglichkeit einer interessanten interdisziplinären Forschung.

Weitere Forschungen und Untersuchungen sollten in erster Linie ein besseres Verständnis über mechanische Vorgänge in Verbindung mit wesentlichen Parametern und Eigenschaften, wie der Schotterzustand (Korngrößenverteilung), die Schotterart, die Schotterqualität und dessen gegenseitige Beeinflussung liefern. Des Weiteren sollte ein direkter Bezug zwischen den genannten Parametern und dem Stopfprozess hergestellt werden.

Ein Ziel für weitere Forschungsarbeiten stellt derzeit auch die Entwicklung von in-situ Messungen direkt auf der Maschine dar, die den lokalen Zustand des Schotterbetts in Hinblick auf Steifigkeit, Verdichtungsgrad und Schotterverschmutzung erkennt. Dadurch könnten maßgebende Stopfparameter während der Überfahrt der Instandhaltungsmaschine, an die lokalen Schotterverhältnisse für jeden einzelnen Streckenabschnitt, ja sogar während jedes einzelnen Stopfzyklus, automatisch angepasst werden.

Aus der Registrierung und Auswertung von Steifigkeitsänderungen während des Stopfzyklus könnte zudem eine effektive und vor allem zustandsabhängige Verdichtungskontrolle entwickelt werden. Mit anderen Worten: Ziel sollte es sein, ein zustandsbasiertes Gleisinstandhaltungssystem zu entwickeln.

Um diese Entwicklungen voranzutreiben bedarf es jedoch im Vorfeld geeignete mechanische und numerische Modelle, mit denen der Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf variierende Bettungsverhältnisse ausgewertet und im Anschluss in die Software der Maschinen implementiert werden kann.

Im Zuge der technologischen Entwicklung wird zukünftig ein stark erhöhtes Verkehrsaufkommen auf Bahnstrecken und höhere Zuggeschwindigkeiten prognostiziert. Dadurch werden höhere Anforderungen an die Strecke und an den Gleisschotter gestellt. Die Gleise werden häufiger gestopft werden, was wiederum die Instandhaltungskosten erhöht. Eine wirtschaftliche Lösung für dieses Problem wäre ein in den Bahnbetrieb integriertes Überwachungssystem, welches regelmäßig aktuelle Informationen über die Qualität der Gleise und über den Zustand der Schotterbettung liefert, um dadurch den optimalen Zeitpunkt für eine Gleisinstandhaltung zu erhalten. Man darf also künftig auf weiterführende Forschungen auf diesem Gebiet gespannt sein!

# Literaturverzeichnis

- [1] Antony B. (2015): Messung und Beurteilung von Erschütterungen der dynamischen Gleisstabilisation; Universität für Bodenkultur Wien; Wien; 2015
- [2] Auer F. (2014): Versuch Design-Stopfen; ÖBB Interner Kurzbericht
- [3] Auer F., Hauke R., Wenty R. (2015): High-Tech-Stopfaggregate für nachhaltige Gleislageverbesserung: Prozesssicherheit und Zuverlässigkeit im Fokus der Weiterentwicklung (ungekürzte Originalfassung); Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 11/2015; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2015
- [4] Barbir O. et al. (2018): Development of condition-based tamping process in railway engineering; XVI Danube – European Conference on Geotechnical Engineering; Skopje; 2018
- [5] Caleb S. (2013): Ballast Quality and Breakdown during Tamping; AREMA; Omaha; 2013
- [6] Cholet C. et al. (2014): Study of the mechanical behaviour of the ballast using discrete approach; 2014
- [7] Fischer J. (1983): Dissertation: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Stabilisierung von Oberbauschotter; TU Graz; 1983
- [8] Fuller, W.B., Thompson S.E. (1907): The laws of proportioning concrete. Transactions of the American Society of Civil Engineers 33; 1907
- [9] Ionescu D. (2005): Ballast degradation and measurement of ballast fouling; Rail Technology Review, Ausgabe 2/2005; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2005
- [10] Jodlbauer G., Neubert J. (2014): Digitales Aufzeichnungssystem für Gleisbaumaschinen; Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 10/ 2014; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2014
- [11] Klotzinger D. (2007): Der Oberbauschotter – Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen; Eisenbahntechnische Rundschau – Ausgabe März 2008; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Hamburg; 2007
- [12] Klotzinger D. (2008): Der Oberbauschotter – Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung; Eisenbahntechnische Rundschau – Ausgabe Januar+Februar 2008; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Hamburg; 2008
- [13] Kolisoja, P. (1997): Factors affecting deformation properties of coarse grained granular material; International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering; Hamburg; 1997

- [14] Kuttelwascher C., Zuzic M. (2013): Oberbauschotter – Kompendium für Österreich; Eisenbahn Ingenieur Kompendium; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2013
- [15] Lichtberger B. (2010): Handbuch Gleis: Unterbau – Oberbau – Instandhaltung – Wirtschaftlichkeit; DVV Media Group GmbH, Hamburg, 2010
- [16] Lichtberger B. (2011): Moderne Vier-Schwellen-Stopftechnologie; Eisenbahn Ingenieur Kompendium; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2011
- [17] Lichtberger B. (2015): Vollhydraulisch Stopfen – eine neue Technologie für effiziente Instandhaltung; Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 07/2015; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2015
- [18] Misar H. (2008): Präzise Weichen- und Gleisinstandhaltung; Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 04/2008; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2008
- [19] Moaveni M. et al. (2014): Investigation of Ballast Degradation and Fouling Trends using Image Analysis; Civil-Comp Press; 2014
- [20] Neubert M. (2016): Bachelorarbeit: Analyse innovativer Entwicklung bei Gleisstopfmaschinen; Technische Hochschule Nürnberg; Nürnberg; 2016
- [21] Nimbalkar S., Indraratna B. (2015): Implications of ballast degradation under cyclic loading; 12<sup>th</sup> Australia New Zealand Conference on Geomechanics; New Zealand; 2015
- [22] Ostermann N. (2013): Skriptum zur Vorlesung Eisenbahnwesen, WS 2013; Technische Universität Wien; Wien; 2013
- [23] Perales R. (2011): On the damaging effects of the ballast tamping operation; 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research; Lille; 2011
- [24] Perales R. et al. (2011): Numerical investigation of the tamping process; 9<sup>th</sup> World Congress on Railway Research; Lille; 2011
- [25] Plasser & Theurer (2010): Stopftechnologie: Grundsätze des Gleisstopfens – Praktische Hinweise und Vorschriften für Stopfarbeiten; AA-17a; Linz; 2010
- [26] Plasser & Theurer (2015): Technische Beschreibung, Dynamic Stopfexpress 09-4X E<sup>3</sup>; Plasser & Theurer; Wien; 2015
- [27] Rießberger K., Wenty R. (2015): 40 Jahre „dynamische Gleisstabilisation“; Eisenbahn Ingenieur Kompendium; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2015
- [28] Röthlisberger F. et al. (2005): Alterungsphänomene von Gleisschotter – Zusammenhänge mit Prüfverfahren; Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 6/2005; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2005
- [29] Röthlisberger F. et al. (2005): Zertrümmerung von Schotterkörnern durch Gleisstopfungen; Der Eisenbahningenieur, Ausgabe 10/2005; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Frankfurt; 2005
- [30] Saussine G. et al. (2008): Numerical modelling of the tamping operation by Discrete Element Approach; 8<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (WCRR); Seoul; 2008
- [31] Saussine G. et al. (2009): Compaction of railway ballast during tamping process: a parametric study; AIP Conference Proceedings. 1145. 469-472. 10.1063/1.3179964.
- [32] Schmitt L. et al. (2008): New aspects of the dynamical effect on ballast fatigue and track settlement; 8<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (WCRR); Seoul; 2008

- [33] Schubert E. (1988): Die räumliche Wirkung der Verdichtung des Gleisschotters; Eisenbahntechnische Rundschau 37, Heft 1/2; DVV Media Group GmbH | Eurailpress; Hamburg; 1988
- [34] Selig E. and Waters J. (1994): Track geotechnology and substructure management; Thomas Telford Services; London; 1994
- [35] Stefan T. (2018); Bachelorarbeit: Beschreibung des Schotterfließens anhand eines Versuchs; Technische Universität Wien; Wien; 2018
- [36] Tentschert E. (2012): Skriptum zur Vorlesung Geologie, WS 2012; Technische Universität Wien; Wien; 2012
- [37] Tutumluer E. et al. (2000): Video Image Analysis of Aggregates – Final Project Report; University of Illinois; Illinois; 2000
- [38] ÖNORM EN 13450: 2014 02 15: Gesteinskörnung für Gleisschotter (konsolidierte Fassung); Austrian Standards International; Wien; 2014
- [39] ÖNORM B 3133: 2003 11 01: Gleisschotter – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13450; Austrian Standards International; Wien; 2003
- [40] ÖNORM EN 1097-1: 2011 03 01: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Verschleiß (Micro-Deval); Austrian Standards International; Wien; 2011
- [41] ÖNORM EN 1097-2: 2010 06 01: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung; Austrian Standards International; Wien; 2010
- [42] ÖNORM EN 933-1: 2012 03 01: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren; Austrian Standards International; Wien; 2012
- [43] ÖNORM EN 933-3: 2012 06 15: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung der Kornform - Plattigkeitskennzahl; Austrian Standards International; Wien; 2012
- [44] ÖNORM EN 933-4: 2008 10 01: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform - Kornformkennzahl; Austrian Standards International; Wien; 2008
- [45] <http://www.matisa.ch/de/matisa-strecken-stopfmaschinen.php>, aufgerufen am 28.01.2018
- [46] <https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stopfung.html>, aufgerufen am 01.10.2018
- [47] <https://mineralseducationcoalition.org/minerals-database/basalt/>, aufgerufen am 21.04.2018
- [48] [https://en.wikipedia.org/wiki/Diabase#/media/File:Polished\\_Diabase.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Diabase#/media/File:Polished_Diabase.jpg), aufgerufen am 21.04.2018
- [49] <http://www.thelen-kalk-schotterwerk.de/>, aufgerufen am 21.04.2018
- [50] [https://de.wikipedia.org/wiki/Granulit#/media/File:Granulit\\_3.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Granulit#/media/File:Granulit_3.JPG), aufgerufen am 21.04.2018
- [51] [http://alpha-baustoffvertrieb.de/?page\\_id=11](http://alpha-baustoffvertrieb.de/?page_id=11), aufgerufen am 21.04.2018
- [52] [https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsche\\_Pressung#/media/File:Hertz.svg](https://de.wikipedia.org/wiki/Hertzsche_Pressung#/media/File:Hertz.svg), aufgerufen am 22.04.2018

- [53] <https://aktuell.plassertheurer.com/de/aktuell131/ein-welterbe-zeitgem%C3%A4%C3%9F-instand-halten-1-1-1-1>, aufgerufen am 22.04.2018
- [54] <https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stabilisierung-verdichtung.html#&gid=1&pid=2>, aufgerufen am 12.08.2018
- [55] <https://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stopfung-dynamic-stopfexpress-09-4x-e3.html>, aufgerufen am 26.08.2018
- [56] <https://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/fuller-kurven/5319>, aufgerufen am 15.08.2018



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1.: Unterteilung der Normenreihe ÖNORM EN 1097-X.....	8
Tabelle 2.2.: Härteskala nach Mohs; adaptiert nach [36].....	10
Tabelle 2.3.: Typische LA-Koeffizienten einiger gängiger Gesteinsarten; adaptiert nach [12] .....	15
Tabelle 2.4.: Klassifikationskriterien für verschmutzten Gleisschotter; adaptiert nach [9].....	23
Tabelle 2.5.: Durchschnittlicher Siebdurchgang für unterschiedliche Kornfraktionen in Abhängigkeit der Anzahl der Stopfzyklen; adaptiert nach [5] .....	25
Tabelle 2.6.: Kontaktflächengröße und -spannungen zwischen den einzelnen Gleiskomponenten; adaptiert nach [15].....	35
Tabelle 2.7.: Werte für Lastausbreitungswinkel für unterschiedliche Bettungsverhältnisse; adaptiert nach [15].....	36
Tabelle 2.8.: Richtgrößen und Erfahrungswerte für den Bettungsmodul; adaptiert nach [12] .....	38
Tabelle 3.1.: Durcharbeitungszyklen bzw. Lebensdauer bestimmter Gleiskomponenten; adaptiert nach [15].....	55
Tabelle 3.2.: Betriebsmodi inkl. dazugehöriger Arbeitsfrequenz [3] .....	76
Tabelle 3.3.: Übersicht über die Zusammenhänge verschiedener Stopfparameter; adaptiert nach [17].....	81
Tabelle 4.1.: Messungen des Querverschiebewiderstands nach 3 Mio. Lastwechseln [14] .....	93
Tabelle 4.2.: Einflüsse von Instandhaltungsmaßnahmen auf den Querverschiebewiderstand; [15].	93



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Typischer Querschnitt durch einen zweigleisig Bahntrasse, adaptiert nach [22] .....	1
Abbildung 2.1: Granitschotter [51] .....	4
Abbildung 2.2: Granulit [50].....	5
Abbildung 2.3: a) „gesunder“ Basalt b) Sonnenbrandbasalt mit hohem gelbem Anteil an Olivin [47] .....	6
Abbildung 2.4: Diabas [48].....	6
Abbildung 2.5: kantige Kalksteine und Dolomite [49].....	7
Abbildung 2.6: Unterschiedliche Stufen der Kornformen des Gleisschotters; adaptiert nach [15]..	11
Abbildung 2.7: Charakteristische Sieblinien und Fullerkurve des Größtkorns 63 mm; adaptiert nach [12].....	12
Abbildung 2.8: Idealierte Fullerkurven für unterschiedliche maximale Korngrößen [56] .....	13
Abbildung 2.9: Sieblinie der Lieferkörnung 31,5/63; adaptiert nach [12] .....	13
Abbildung 2.10: typische Los-Angeles Prüfmaschine [41] .....	14
Abbildung 2.11: Gesteinsprobe vor und nach einem Los-Angeles-Versuch [14].....	15
Abbildung 2.12: Gesteinsprobe vor und nach einem Schlagzertrümmerungsversuch [14].....	15
Abbildung 2.13: Schematische Darstellung einer üblichen Prüfmaschine [40] .....	16
Abbildung 2.14: Gesteinsprobe vor und nach einem Micro-Deval-Versuch [14].....	17
Abbildung 2.15: Typischer, intakter Querschnitt einer Gleisanlage; adaptiert nach [23] .....	17
Abbildung 2.16: Ergebnisse in Form von Kornverteilungslinien aus den Untersuchungen, Alpiner Sandstein (links), Kieselkalk (rechts); adaptiert nach [29] .....	20
Abbildung 2.17: Korngrößenverteilung vor und nach dem Einbau (links); Lineare Korrelation zwischen Siebdurchgang < 22,4 mm und der Anzahl an Stopfvorgängen (rechts); adaptiert nach [29].....	21
Abbildung 2.18: Kategorien von verschmutztem Schotter und deren Schwankungsbereich [9] .....	24
Abbildung 2.19: Versuchsaufbau zur Simulierung von Stopfarbeiten [5] .....	25
Abbildung 2.20: Änderungsrate des Siebdurchgangs in Prozent in Relation zu den zugehörigen LA- Koeffizienten basierend auf 25 durchgeführte Stopfzyklen; adaptiert nach [5] .....	26
Abbildung 2.21: Positionierung der mit sauberem Neuschotter befüllten „Big-Bags“ unter dem Gleisrost [23].....	27
Abbildung 2.22: Effekte aus 45 Stopfzyklen im Vergleich mit sauberem Neuschotter [23] .....	27
Abbildung 2.23: Effekte aus 45 Stopfzyklen, sortiert nach Kornfraktionen [23].....	28
Abbildung 2.24: Zerstörung des Planums durch unzureichende Lastverteilung infolge zu geringer Bettungshöhe; adaptiert nach [15].....	29

Abbildung 2.25: Zusammenhang zwischen Scherfestigkeit, Normalspannung, Verzahnungs- und Reibungsanteil beim Scherversuch; adaptiert nach [15] .....	30
Abbildung 2.26: Verlauf der Hauptspannungen $\sigma_z$ und $\sigma_x$ sowie Hauptschubspannungen in der Lastachse; adaptiert nach [12] .....	31
Abbildung 2.27: Maximal mögliche Werte des inneren Reibungswinkels bei stoßender Belastung für verschiedene vertikale Spannungen; strichliert die Grenze zwischen verfestigter und nicht verfestigter Schotterprobe; adaptiert nach [15].....	32
Abbildung 2.28: Kontaktflächen und Kontaktpannung $p_m$ zweier sich berührender elastischer Körper [52].....	33
Abbildung 2.29: Druckverteilung einer Radlast über die Systemkomponenten des Gleises [22] ....	34
Abbildung 2.30: Druckverteilung unter einer Einzellast von 10 t [12].....	35
Abbildung 2.31: Idealisierte Durchbiegung der Schiene unter einer Radlast; adaptiert nach [12]...	37
Abbildung 2.32: Umwandlung des Querswellenoberbaus in einen Langschwellenoberbau; adaptiert nach [12].....	39
Abbildung 2.33: Vergleich axialer Spannungen mit Ergebnissen aus Laborversuchen (links), das Lösen von Kornbindungen in Abhängigkeit der Anzahl der Lastzyklen (rechts) [21] .....	41
Abbildung 2.34: Versuchsaufbau für einen konsolidierten, drainierten Triaxialversuch (links), Finite-Elemente-Modell eines Gleisquerschnitts (rechts) [21].....	42
Abbildung 2.35: Ergebnisse vertikaler und lateraler Verformungen aus Labortests und im Vergleich mit Finite-Elemente-Berechnungen [21] .....	42
Abbildung 2.36: Kornverteilung des verwendeten Kalksteins vor den Untersuchungen [19].....	44
Abbildung 2.37: Fotografien des Kalksteins in den verschiedenen Phasen des LA-Tests [19].....	44
Abbildung 2.38: Korngrößenverteilung unterschiedlicher Phasen des LA-Tests [19].....	45
Abbildung 2.39: Auswertung für unterschiedliche Korngrößen: der Angularity-Index AI (links) und der Surface-Texture-Index STI (rechts) [19] .....	46
Abbildung 2.40: Korrelation zwischen Verwitterungsgrad und AI (links) bzw. STI (rechts) [19] ..	46
Abbildung 2.41: Generiertes Schottermodell mit einer Schwelle (links) und ein modellierter Streckenabschnitt mit sechs Schwellen [24].....	48
Abbildung 2.42: Durchschnittliche Entwicklung der Verdichtung während der Stopfphase [24] ...	49
Abbildung 2.43: Teilchenbewegung zu Beginn (links) und am Ende der Stopfphase (rechts) [24].	49
Abbildung 2.44: Durchschnittliche Entwicklung der Verdichtung, dargestellt über den Feststoffgehalt der Probe während der Stopfphase des Mehrschwellenmodells [24].....	50
Abbildung 2.45: Entwicklung der Verdichtung unter den Schwellen B2 bis B5, wieder in Abhängigkeit vom Feststoffgehalt der Probe [24] .....	50
Abbildung 2.46: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Schotterfließens [35] .....	52
Abbildung 2.47: Geschwindigkeitsfelder des „Durchschnitts-Vektorbildes“ beim Stopfvorgang (oben) und beim Stabilisieren (unten) [35].....	53
Abbildung 2.48: Versuchsaufbauten und Messsysteme am Schotterhaufen [35].....	54
Abbildung 3.1: Schematischer Gleisqualitätsverlauf [11] .....	56
Abbildung 3.2: Typische Stopfpickel [26] .....	58
Abbildung 3.3: Schematische Darstellung anhand eines Stopfaggregats der Firma Plasser & Theurer [20] .....	59

Abbildung 3.4: Skizzen des Versuchsstandes von <i>Fischer</i> [7] .....	60
Abbildung 3.5: Korrelation zwischen Beistellweg und Frequenz [7] .....	61
Abbildung 3.6: Einfluss der Frequenz auf den Hohlraumanteil [7] .....	62
Abbildung 3.7: Einfluss von Frequenz und Amplitude auf die Hebung des Gleises [7] .....	63
Abbildung 3.8: Dynamisches Drucksetzungsdiagramm in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude [7] .....	64
Abbildung 3.9: Hebung der Schwelle in Abhängigkeit von Frequenz und Amplitude nach drei Stopfungen [7].....	64
Abbildung 3.10: Verdichtungseinwirkung beim Stopfen (Eigentliche Verdichtung durch kurzen Kraftstoß) [25].....	65
Abbildung 3.11: Heberichtaggregat der Firma Plasser & Theurer [26] .....	67
Abbildung 3.12: Schwellenaufleger vor und nach dem Stopfvorgang, adaptiert nach [25] .....	68
Abbildung 3.13: Schematische Darstellung des gezielten Überhebens – „Design Stopfen“; adaptiert nach [15] .....	68
Abbildung 3.14: Schematische Gleislagebilder ohne Überhebung; adaptiert nach [2] .....	69
Abbildung 3.15: Schematische Gleislagebilder mit Überhebung, adaptiert nach [2].....	70
Abbildung 3.16: Darstellung der Messbereiche für Stopf- und Eintauchtiefe [20].....	70
Abbildung 3.17: Berechnung der Pfeilhöhe an einem beliebigen Punkt des Bogens.....	71
Abbildung 3.18: Prinzip der Gleisvermessung, dargestellt sind Längshöhen beider Schienen und die gemessene Richtungsabweichung (Pfeilhöhendifferenz) [53] .....	72
Abbildung 3.19: Auszug aus einer Messaufzeichnung (LH li ist die gemessene Längshöhe an der linken Schiene, LH re die Längshöhe der rechten Schiene) [10] .....	73
Abbildung 3.20: Stopfaggregat der Firma Plasser & Theurer mit der Technologie der asynchronen Gleichdruckstopfung [3].....	74
Abbildung 3.21: Verlauf der Vibrationsdrehzahl mit Frequenzmodulation, adaptiert nach [3] .....	76
Abbildung 3.22: Schematische Darstellung des Elliptik-Hochfrequenz-Stopfverfahrens der Firma MATISA [20].....	78
Abbildung 3.23: Vollhydraulisches Stopfaggregat der Firma System 7 [17] .....	79
Abbildung 3.24: Beistellkraft in Abhängigkeit von der Schotterbetthärte und dem Beistellweg, adaptiert nach [17].....	80
Abbildung 3.25: Normierte Verdichtungsarbeit in Abhängigkeit der Schotterbetthärte, adaptiert nach [17].....	81
Abbildung 3.26: Gleisqualitätsentwicklung nach der Stopfung oder nach der Anwendung des Steinblasverfahrens bei schlechten Oberbauverhältnissen; adaptiert nach [15] .....	82
Abbildung 4.1: Prinzip des dynamischen Gleisstabilisators: eine variable Unwucht (1) erzeugt horizontale Vibrationen (2), Hydraulikzylinder (3) generieren die vertikale Auflast (4) [54] .	85
Abbildung 4.2: Qualitativer Verlauf des Querverschiebewiderstands (QVW); C bezeichnet die lineare Steigung des Querverschiebewiderstands im Bereich der Erstverschiebung der Schwelle $y_0$ ; adaptiert nach [15] .....	90
Abbildung 4.3: Typischer Vorkopfverdichter [26].....	91
Abbildung 4.4: Versuchsaufbau während der Messungen [14] .....	91
Abbildung 4.5: Querverschiebewiderstandsmessung einer Einzelschwelle, adaptiert nach [14] .....	92