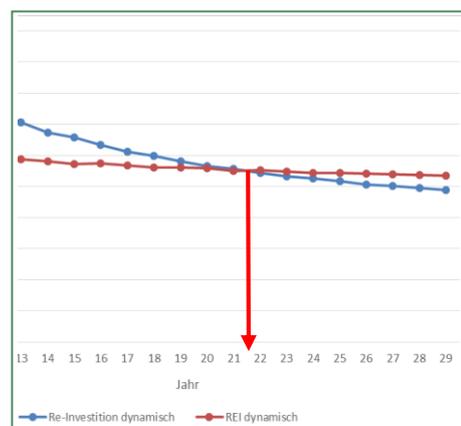
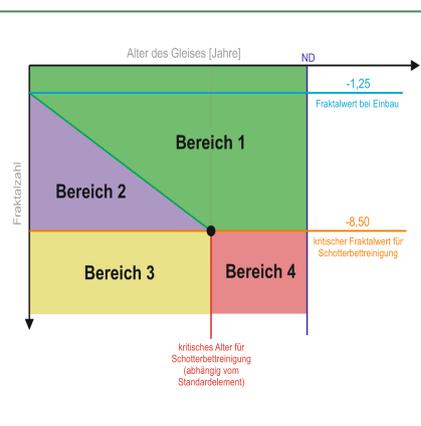


# MASTERARBEIT



## SCHOTTERBETTREINIGUNG ALS INSTANDHALTUNGSMAßNAHME? – WIRTSCHAFTLICHE AUSWERTUNG AUF BASIS DER FRAKTALANALYSE

Dipl.-Ing. Johannes Neuhold, BSc

Vorgelegt am  
Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft  
Projektentwicklung und Projektmanagement

Betreuer  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck

Graz am 30. Oktober 2015

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 30. 10. 2015



.....

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 30. 10. 2015



.....

### Anmerkung

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

## Danksagung

Für die Betreuung dieser Arbeit bedanke ich mich herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heck. Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit sowie dem gesamten Team des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz, das mir während meiner Masterarbeit mit viel Rat und Tat sowie zahlreichen wertvollen Informationen zur Seite stand.

Ganz besonderer Dank gilt meiner gesamten Familie, die mich in allen Belangen des Lebens immer ausgezeichnet unterstützt und mir mein Studium überhaupt erst ermöglicht hat.

Nicht zuletzt bedanke ich mich ganz herzlich bei all meinen Freunden, die mir während meiner Studienzeit in allen universitären und ganz besonders auch außeruniversitären Belangen stets mit großer Unterstützung zur Seite gestanden sind.

Graz, am 30. 10. 2015



## Kurzfassung

Bei der Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme handelt es sich um eine äußerst kostenintensive Tätigkeit. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, auf Basis der Lebenszykluskosten zu untersuchen, ob eine Reinigung des Schotterbettes wirtschaftlich sinnvoll ist. In der Arbeit wurde berechnet, dass eine Schotterbettreinigung bis zwei Drittel (statische Betrachtung) bzw. bis drei Viertel (dynamische Betrachtung) des Lebenszyklus einer Gleisanlage wirtschaftlich sinnvoll ist, wenn man davon ausgeht, dass die strategische Nutzungsdauer erreicht wird. Diese Untersuchung wurde mit verschiedenen Kombinationen von Parametern des Gleises – sogenannten Standardelementen – durchgeführt. Des Weiteren wurde eine Methode entwickelt, die es erlaubt, aufgrund des Anlagenalters und des aktuellen Schotterzustandes, Gleisabschnitte einer bestimmten Strategie zuzuweisen, die den sinnvollsten Umgang mit der Schotterbettung vorgibt. Der Zustand des Schotters wird dabei mit Hilfe der Fraktalanalyse beschrieben. Damit wird es möglich den aktuellen und zukünftigen Bedarf an Schotterbettreinigungen bzw. Re-Investitionen aufgrund von schlechtem Schotterzustand sowie an erhöhter Instandhaltung netzweit abzuschätzen.

## Abstract

Ballast cleaning as a maintenance action, is a very expensive activity. Therefore, it is very important to investigate the economic reasonability of ballast cleaning, based on the life-cycle-costs of the track. The examination showed, that ballast cleaning is reasonable in an economic way until two thirds (static calculation), respectively until three quarters of the life cycle, when the strategic service life will be reached. This investigation has been done for different combinations of parameters of the track – so called standard elements. Furthermore, based on the age of a track section and the current status of the ballast, a method has been developed that allows to find the right strategy how to deal with the ballast. Thereby, the status of the ballast is defined by means of the fractal analysis. With this method it is possible to estimate the need of ballast cleaning and re-investment because of poor ballast quality now and in the future as well as higher maintenance requirements network-wide.

## Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Das Schottergleis</b>	<b>3</b>
1.1	Aufbau .....	3
1.2	Schotterbettung .....	4
<b>2</b>	<b>Gleislage</b>	<b>5</b>
2.1	Gleislagequalität .....	5
2.2	TUG-Datenbank .....	7
<b>3</b>	<b>Instandhaltungsmaßnahmen am Schotterbett</b>	<b>8</b>
3.1	Stopfen .....	8
3.1.1	Allgemeines .....	8
3.1.2	Einsatzgebiete .....	9
3.1.3	Funktionsweise .....	9
3.1.4	Mechanisierter Durcharbeitungszug (MDZ) .....	10
3.2	Schotterbettreinigung .....	12
3.2.1	Allgemeines .....	12
3.2.2	Historische Entwicklung .....	12
3.2.3	Funktionsweise .....	13
3.2.4	Baustelle .....	18
3.2.5	Maschinen .....	21
3.3	Planumsverbesserung .....	24
<b>4</b>	<b>Standardelemente</b>	<b>26</b>
4.1	Einführung .....	26
4.1.1	Einsatzbereiche .....	27
4.1.2	Beispiel .....	27
4.1.3	Zusammensetzung der Lebenszykluskosten .....	29
4.1.4	Betrieberschwerniskosten .....	30
4.2	Auswahl der Standardelemente .....	33
4.2.1	Beton .....	34
4.2.2	Beton bescholt .....	35
4.2.3	Holz .....	36
<b>5</b>	<b>Wirtschaftlichkeit der Schotterbettreinigung</b>	<b>37</b>
5.1	Methodik – Wirtschaftlichkeitsrechnung .....	37
5.1.1	Berechnungsverfahren .....	37
5.1.2	Statische Berechnung .....	38
5.1.3	Dynamische Berechnung .....	39
5.2	Beispiel .....	40
5.3	Ergebnisse .....	44
<b>6</b>	<b>Auswertung auf Basis der Fraktalanalyse</b>	<b>53</b>
6.1	Methodik – Fraktalanalyse .....	53
6.1.1	Allgemeines .....	53
6.1.2	Funktionsweise .....	54
6.1.3	Anwendungsmöglichkeiten .....	57
6.2	Grundlagen für die Auswertung .....	58
6.2.1	Fraktalzahl bei Gleisneulage .....	59
6.2.2	Fraktalzahl bei Notwendigkeit einer Schotterbettreinigung .....	60

6.2.3	Zusammenfassung .....	63
6.2.4	Zuordnung .....	64
6.3	Beispiel.....	66
6.4	Ergebnisse .....	70
6.4.1	Ergebnisse nach Schwellentypen .....	74
6.4.2	Ergebnisse nach Belastungsklassen.....	75
6.4.3	Ergebnisse nach Radienklassen.....	77
6.4.4	Gesamtergebnis .....	79
<b>7</b>	<b>Weiterführende Analysemöglichkeiten</b>	<b>81</b>
7.1	Verlängerung der Nutzungsdauer .....	81
7.2	Zeitpunkt der Schotterbettreinigung .....	83
7.3	Zukünftiger Re-Investitionsbedarf .....	84
7.3.1	Zuordnung .....	85
7.3.2	Auswertungsbeispiel.....	86
7.4	Intensivierter Instandhaltungsbedarf .....	88
7.4.1	Zuordnung .....	88
7.4.2	Auswertungsbeispiel.....	89
7.5	Anpassung der Instandhaltung .....	91
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>98</b>
	<b>Linkverzeichnis</b>	<b>102</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Schottergleises (Querschnitt) .....	3
Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Schottergleises (Längsschnitt) .....	3
Abbildung 3: Verschlechterungsverhalten des Gleises .....	6
Abbildung 4: Messwagen der ÖBB mit dem die Daten für die Beschreibung der Gleislagequalität gewonnen werden .....	7
Abbildung 5: Stopfexpress 09-4X Dynamic .....	10
Abbildung 6: MDZ: Stopfmaschine, Schotterverteiler- und Planiermaschine, dynamischer Gleisstabilisator.....	11
Abbildung 7: MDZ 3000: Dynamic 09-4X und BDS 2000 .....	11
Abbildung 8: Prinzipskizze einer Räumereinrichtung.....	14
Abbildung 9: Räumereinrichtung im Baustelleneinsatz.....	14
Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Siebanlage mit 3 Siebdecks .....	15
Abbildung 11: Doppelsiebanlage einer RU 800 S .....	16
Abbildung 12: Neuschottereinbringung .....	17
Abbildung 13: Mehrere aneinander gekoppelte Materialförder- und Siloeinheiten .....	19
Abbildung 14: Schotterbettreinigungsmaschine RM 80 UHR .....	21
Abbildung 15 und Abbildung 16: Kombinierte Gleisumbau- und Schotterbettreinigungsmaschine RU 800 S .....	22
Abbildung 17: Längsschnitt RU 800 S .....	23
Abbildung 18: AHM 800 R im Baustelleneinsatz .....	25
Abbildung 19: PM 1000 URM .....	25
Abbildung 20: Beispiel für den Arbeitszyklus eines Standardelements .....	28
Abbildung 21: Zusammensetzung der normalisierten Jahreskosten, Oberbau - Gleise.....	29
Abbildung 22: Ursachen von Betriebserschwerungskosten.....	31
Abbildung 23: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit Betonschwellen im TUG- Netz (Einbau ab 1990) .....	34
Abbildung 24: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit besohlenen Betonschwellen im TUG-Netz .....	35
Abbildung 25: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit Holzschwellen im TUG- Netz (ab 2000) .....	36
Abbildung 26: Verfahren der Investitionsrechnung.....	37
Abbildung 27: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung; statisch.....	42
Abbildung 28: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung (statisch) .....	43
Abbildung 29: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung (dynamisch) .....	43

Abbildung 30: Gesamtergebnis für Gleise mit Betonschwellen .....	51
Abbildung 31: Gesamtergebnis für Gleise mit besohnten Betonschwellen.....	52
Abbildung 32: Gesamtergebnis für Gleise mit Holzschwellen .....	52
Abbildung 33: Beispielhafte Interpolation eines Messsignals nach der Unterteilung in 5 gleich lange Abschnitte der Länge $\lambda$ .....	54
Abbildung 34: Charakteristischer Verlauf der Polygonlänge in Abhängigkeit der Unterteilungslänge .....	56
Abbildung 35: Auswirkungen unterschiedlicher Wellenlängen auf die Ergebnisse der Fraktalanalyse .....	57
Abbildung 36: Ausprägung der mittelwelligen Dimension bei verschiedenen Schwellentypen nach einer Gleisneulage .....	59
Abbildung 37: Verteilung der Slope3-Werte bei jährlichem Stopfintervall.....	61
Abbildung 38: Vergleich der Verteilungen der Slope3-Werte bei unterschiedlichen Randbedingungen.....	62
Abbildung 39: Maßnahmenableitung aufgrund des Schotterzustandes .....	63
Abbildung 40: Bereicheinteilung aufgrund der abgeleiteten Maßnahmen .....	64
Abbildung 41: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch .....	67
Abbildung 42: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch .....	68
Abbildung 43: Ergebnis der Spezialauswertungen für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch.....	70
Abbildung 44: Ergebnis der Spezialauswertungen für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch.....	70
Abbildung 45: Ergebnis nach Schwellentyp; statisch .....	74
Abbildung 46: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit Betonschwellen; statisch.....	75
Abbildung 47: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit besohnten Betonschwellen; statisch.....	76
Abbildung 48: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit Holzschwellen; statisch.....	76
Abbildung 49: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit Betonschwellen; statisch ..	77
Abbildung 50: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit besohnten Betonschwellen; statisch.....	77
Abbildung 51: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit Holzschwellen; statisch ...	78
Abbildung 52: Ergebnis gesamt; statisch .....	79
Abbildung 53: Ergebnis gesamt, hochgerechnet auf das TUG-Netz; statisch .....	80
Abbildung 54: Adaptierte Bereicheinteilung aufgrund der abgeleiteten Maßnahmen .	84

Abbildung 55: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf; statisch.....86

Abbildung 56: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf; dynamisch.....86

Abbildung 57: Adaptierte Bereichseinteilung inkl. Bereich mit erhöhtem Instandhaltungsaufwand .....88

Abbildung 58: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf und Bedarf an erhöhter Instandhaltung; statisch .....89

Abbildung 59: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf und Bedarf an erhöhter Instandhaltung; dynamisch .....90

Abbildung 60: Beispiele möglicher Verläufe der Fraktalzah über die Zeit.....91

Abbildung 61: Erweiterung der Zuordnung von Gleisabschnitten zum entsprechenden Bereich bzw. der zugehörigen Strategie .....95

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Parameterausprägungen zur Bildung von Standardelementen .....	33
Tabelle 2: Vergleich der Szenarien Re-Investition und REI für ein Standardelement (statisch und dynamisch) .....	41
Tabelle 3: Vergleich der Szenarien Re-Investition und REI für ein Standardelement (statisch und dynamisch) .....	44
Tabelle 4: Ergebnisse Betonschwellengleise (statische Betrachtung) .....	45
Tabelle 5: Ergebnisse Betonschwellengleise (dynamische Betrachtung) .....	46
Tabelle 6: Ergebnisse Gleise mit besohlenen Betonschwellen (statische Betrachtung) .....	47
Tabelle 7: Ergebnisse Gleise mit besohlenen Betonschwellen (dynamische Betrachtung) .....	48
Tabelle 8: Ergebnisse Holzschwellengleise (statische Betrachtung) .....	49
Tabelle 9: Ergebnisse Holzschwellengleise (dynamische Betrachtung) .....	50
Tabelle 10: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch .....	67
Tabelle 11: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch .....	69
Tabelle 12: Übersicht über die ausgewerteten Querschnitte .....	71
Tabelle 13: Ergebnisse für Gleise mit Betonschwellen; statisch .....	71
Tabelle 14: Ergebnisse für Gleise mit besohlenen Betonschwellen; statisch .....	72
Tabelle 15: Ergebnisse für Gleise mit Holzschwellen; statisch .....	73
Tabelle 16: Kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung bei Verlängerung der Nutzungsdauer .....	82
Tabelle 17: Ergebnisse, bis wann eine Schotterbettreinigung im Lebenszyklus sinnvoll ist – bezogen auf die strategische Nutzungsdauer .....	93
Tabelle 18: Erweiterung der Zuordnung von Gleisabschnitten zum entsprechenden Bereich bzw. der zugehörigen Strategie .....	95

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BEK</b>	Betriebserscherniskosten
<b>DGS</b>	dynamischer Gleisstabilisator
<b>EVU</b>	Eisenbahnverkehrsunternehmen
<b>LA</b>	Langsamfahrstelle
<b>MFS</b>	Materialförder- und Siloeinheit
<b>MDZ</b>	mechanisierter Durcharbeitungszug
<b>ND</b>	Nutzungsdauer
<b>ÖBB</b>	Österreichische Bundesbahnen
<b>QS</b>	Querschnitt
<b>REI</b>	Schotterbettreinigung
<b>TUG</b>	Technische Universität Graz

## 0 Einleitung

Bei einer maschinellen Schotterbettreinigung wird das Schottermaterial einer Gleisanlage ausgebaut, gesiebt bzw. gereinigt und das wiederverwendbare Bettungsmaterial eingebaut. Jenes Material, das nicht mehr verwendet werden kann, wird abtransportiert und durch Neuschotter ersetzt. Schotterbettreinigungen werden insbesondere dann durchgeführt, wenn der Gleisrost erneuert wird. Ist die Schotterbettung allerdings während der Nutzungsdauer der Gleiskonstruktion so verschmutzt, dass durch standardmäßig durchgeführte Instandhaltungstätigkeiten keine ausreichende Gleislagequalität mehr erreicht werden kann, muss das Schotterbett bereits vor der Gleisneulage gereinigt werden. Dabei handelt es sich dann allerdings um eine äußerst teure Instandhaltungstätigkeit, die ein Vielfaches der Kosten einer standardmäßigen Instandhaltungsmaßnahme, wie dem Stopfen, verursacht. Aus diesem Grund ist es von besonderer Wichtigkeit zu untersuchen, ob die Durchführung einer Schotterbettreinigung während der Nutzungsdauer der Anlage wirtschaftlich sinnvoll ist oder nicht.

Dabei ist es essenziell nicht die Kosten der Schotterbettreinigung alleine zu betrachten, sondern die Entwicklung des Lebenszyklus und der damit verbundenen Gesamtkosten der Gleisanlage zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass bei der Maßnahmenplanung die Optimierung der gesamten Lebenszykluskosten im Vordergrund stehen muss.

In der gegenständlichen Arbeit soll in einem ersten Schritt untersucht werden, bis zu welchem Jahr des Lebenszyklus einer Gleisanlage die Schotterbettreinigung eine wirtschaftlich sinnvolle Instandhaltungstätigkeit darstellt. Dies soll durch den wirtschaftlichen Vergleich der beiden Szenarien *Erneuerung der Gleisanlage* und *Durchführung der Schotterbettreinigung* geschehen. Dabei wird davon ausgegangen, dass es durch die Schotterbettreinigung ermöglicht wird, die strategische Nutzungsdauer der Anlage zu erreichen. Die Analyse soll dabei mit Hilfe des Monitorings der durchschnittlichen Jahreskosten bzw. der Annuitäten für die beiden Varianten durchgeführt werden. Aufgrund der Tatsache, dass sich Gleise aufgrund einiger Parameter – wie den eingebauten Oberbaustoffen, der Belastung oder dem Radius – oft deutlich voneinander unterscheiden, soll die Untersuchung für verschiedene Parameterkombinationen – sogenannte Standardelemente – erfolgen.

Ob eine Schotterbettreinigung technisch notwendig ist, hängt vom Verschmutzungsgrad der Schotterbettung ab. Aufgrund der Gleislagedatenanalyse ist es möglich, Abschnitte mit unterdurchschnittlicher Gleislagequalität zu detektieren. Die Fraktalanalyse bietet zusätzlich die Möglichkeit, auf die Ursache von Gleislagefehlern und somit auf ein verschmutztes Schotterbett zu schließen.

Im nächsten Schritt soll die wirtschaftliche Betrachtung, bis wann eine Schotterbettreinigung sinnvoll ist, mit der technischen Überlegung, ab welchem Zustand eine Reinigung des Schotterbettes notwendig ist, kombiniert werden. Das endgültige Ziel der Arbeit besteht darin, eine Methodik zu entwickeln, die es erlaubt, Gleisabschnitte aufgrund ihres Anlagenalters und ihres aktuellen Schotterzustandes einer wirtschaftlich optimalen Strategie bezüglich des Umgangs mit der Schotterbettung zuzuordnen. Die Grundstrategien beinhalten dabei die Maßnahmen Schotterbettreinigung (jetzt oder zukünftig) durchführen, Schotterbettreinigung aus technischen bzw. wirtschaftlichen Gründen nicht durchführen und Re-Investition durchführen.

Mit Hilfe der entwickelten Methodik soll anschließend eine netzweite Auswertung des Streckennetzes der ÖBB erfolgen, die die verschiedenen Gleisabschnitte einer Strategie zuordnet und somit den aktuellen sowie zukünftigen Bedarf an Schotterbettreinigungen im österreichischen Schienennetz abschätzbar macht.

# 1 Das Schottergleis

## 1.1 Aufbau

Eine Schottergleiskonstruktion besteht aus mehreren Elementen, die die verschiedenen auftretenden statischen und dynamischen Kräfte aufnehmen, verteilen und ableiten. Dabei stellt die Schiene die direkte Kontaktebene zum Fahrzeug dar. Die Schiene ist mittels der Schienenbefestigung auf der Schwelle fixiert und lagert auf einer Zwischenlage, die zwischen Schiene und Schwelle als elastisches Element situiert ist. Die Schwellen liegen im Schotterbett, worunter sich der Unterbau, der durch eine Tragschicht verstärkt sein kann, und der anstehende Untergrund befinden. All diese Elemente beeinflussen sich gegenseitig und weisen zahlreiche Wechselwirkungen untereinander auf. Daher müssen sich alle Bestandteile in einem einwandfreien Zustand befinden, damit die Gesamtkonstruktion des Gleises optimal funktioniert.<sup>1</sup>

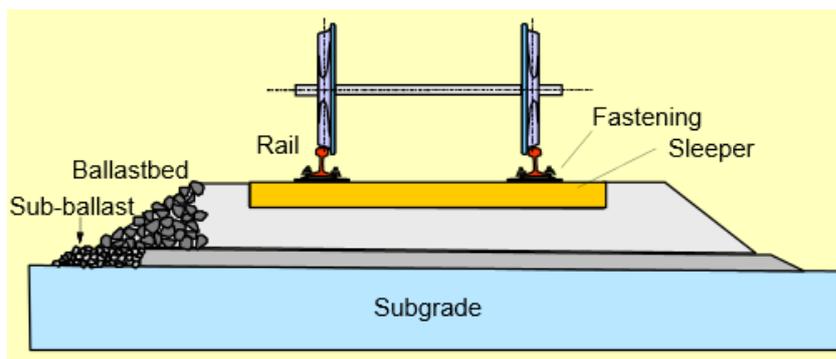


Abbildung 1: Prinzipieller Aufbau eines Schottergleises (Querschnitt)<sup>2</sup>

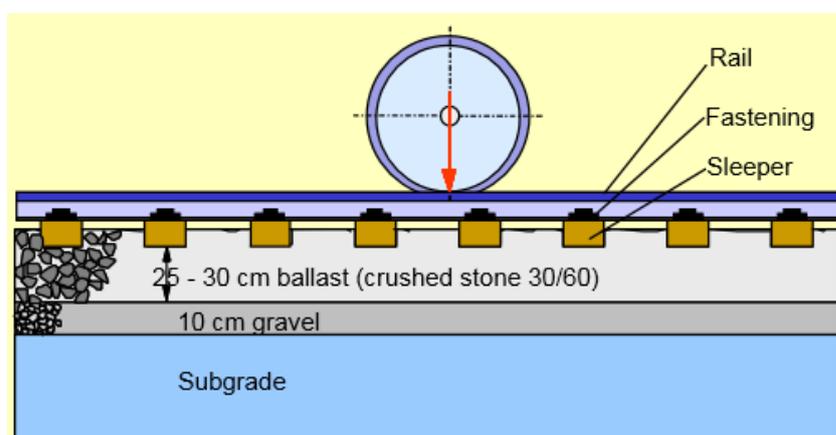


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Schottergleises (Längsschnitt)<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 24ff.

<sup>2</sup> ESVALD, C.: Modern Railway Track. [http://www.esveld.com/MRT\\_Selection.pdf](http://www.esveld.com/MRT_Selection.pdf). Datum des Zugriffs: 16.03.2015.

<sup>3</sup> Ebenda.

## 1.2 Schotterbettung

Das Schotterbett stellt sowohl in technischer, wie auch in wirtschaftlicher Hinsicht ein wesentliches und äußerst sensibles Element der Gleiskonstruktion dar. Die wesentlichen Aufgaben, die das Schotterbett wahrnimmt, sind:<sup>4</sup>

- Ableitung und Verteilung der unterschiedlichen in der Gleiskonstruktion auftretenden Kräfte über die Schwellen in den Untergrund:
  - vertikale Ableitung der Kräfte über genügend große Auflagerflächen in den Unterbau
  - Aufnahme der Führungskräfte im Bogen
  - Aufnahme der horizontalen Kräfte, die durch Schlingerbewegungen der Fahrzeuge entstehen
  - Aufnahme der Längskräfte wie Anfahr- und Bremskräfte
  - Aufnahme der Knickkräfte, welche durch thermische Ausdehnung bzw. Verkürzung der Schiene im endlos verschweißten Gleis verursacht werden
- Bereitstellung eines hohen Widerstandes gegen Längs- und Querverschiebungen der Schwellen
- Gewährleistung von Korrekturmaßnahmen und leichte Wiederherstellbarkeit der Soll-Gleislage nach Veränderungen (Richt-, Stopfarbeiten)
- Gewährleistung der Gleiselastizität zur Minimierung der dynamischen Kräfte
- Trockenhaltung der Gleiskonstruktion durch rasche und ungehinderte Ableitung von Wasser

Wie gut diese Aufgaben jeweils erfüllt werden können, hängt dabei im Wesentlichen von der Bettungshöhe, dem Bettungsquerschnitt, der Schotterqualität und der Güte der Verdichtung des Schotters ab.<sup>5</sup>

Negativ beeinflusst werden die Eigenschaften des Schotterbettes vor allem durch die Betriebsbelastung (Absplitterungen, Kornumlagerungen, Abriebvorgänge), Instandhaltungsarbeiten (Abrieb beim Stopfen), aufsteigendes Material aus dem Untergrund und durch Verunreinigungen zufolge Ladegutverluste, Vegetationsrückstände oder sonstige Umwelteinflüsse.<sup>6</sup>

---

<sup>4</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. S. 171 bzw. 477.

<sup>5</sup> Vgl. Ebenda. S. 171.

<sup>6</sup> Vgl. Ebenda.

## 2 Gleislage

Ein Eisenbahngleis wird durch diverse statische und dynamische Kräfte aus dem Eisenbahnbetrieb, aber auch durch Witterung und externe Einflüsse (chemische Beanspruchung, Vegetation) beansprucht, wodurch sich die geometrische Lage des Gleises im Laufe der Zeit verschlechtert.<sup>7</sup>

### 2.1 Gleislagequalität

Zur Beschreibung der Gleislagequalität sind in Österreich zwei Qualitätssignale gebräuchlich. Beide Kennziffern werden aus Messdaten, die bei standardmäßig durchgeführten Messfahrten im Netz der ÖBB gewonnen werden, ermittelt. Die Berechnung erfolgt gemittelt über eine Einflusslänge von 100 m und die Ergebnisse werden in gleitenden Abständen von fünf Metern ausgegeben:<sup>8</sup>

- **SigH:** Hierbei handelt es sich um die Standardabweichung der Längshöhe des Gleises zur Soll-Lage, welche europaweit zur Qualitätsbewertung herangezogen wird. Die Wellenlänge der periodischen Gleislagefehler und die Streckenhöchstgeschwindigkeit fließen nicht in die Berechnung ein.
- **MDZ-a:** Das Berechnungsverfahren für die MDZ-a-Ziffer beruht auf gemittelten Beschleunigungsdifferenzen am Wagenschwerpunkt. Die auftretenden Beschleunigungen können direkt aus den Gleislagemessdaten mittlere Höhenlage, mittlere Seitenlage und gegenseitige Höhenlage ermittelt werden. Die jeweilige Streckenhöchstgeschwindigkeit fließt ebenfalls in das Berechnungsverfahren mit ein.

Die zeitliche Entwicklung der Gleislagequalität kann durch eine Regressionsfunktion der vorhandenen Messpunkte beschrieben werden. Die Regression erfolgt dabei zwischen zwei Maschineneinsätzen, meist Gleisdurcharbeitungen, da es nach Instandhaltungstätigkeiten in der Regel zu einer sprunghaften Verbesserung der Gleislagequalität kommt. Dazu wird eine e-Funktion als Regressionskurve verwendet, welche die Gleislagequalität in Abhängigkeit der Zeit wie folgt abbildet:<sup>9</sup>

$$Q(t) = Q_0 * e^{b*t}$$

Dabei steht  $Q(t)$  für das Qualitätsniveau zum Zeitpunkt  $t$ ,  $Q_0$  für die Ausgangsqualität nach der durchgeführten Gleisarbeit,  $b_n$  für die zugeordnete Verschlechterungsrate und  $t$  für die verstrichene Zeit.

<sup>7</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 402.

<sup>8</sup> Vgl. HUMMITZSCH, R.: Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen - Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells. Dissertation. S. 8.

<sup>9</sup> Vgl. RIEßBERGER, K.: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit - oder - wie gut muß ein Gleis sein?. In: ÖVG Spezial, Band 41/1998. S. 87.

Wird ein bestimmtes Qualitätsniveau erreicht bzw. unterschritten, so muss eine entsprechende Instandhaltungsmaßnahme gesetzt werden, damit der Eisenbahnbetrieb sicher und mit ausreichendem Komfort abgewickelt werden kann. Um nun möglichst lange ein hohes Qualitätsniveau zu halten und somit die Instandhaltungszyklen zu verlängern, muss gemäß obiger Formel einerseits versucht werden eine möglichst hohe Anfangsqualität zu erreichen und andererseits die Verschlechterungsrate möglichst gering zu halten. Dadurch kann die Nutzungsdauer des Gleises verlängert und die Lebenszykluskosten der Anlage verringert werden.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Verschlechterungsverhalten des Gleises an einem Querschnitt über die Zeit. Die Punkte stellen dabei aus den Messsignalen errechnete MDZ-a-Werte dar. Die vertikalen Linien bilden Maschineneinsätze bzw. Instandhaltungsmaßnahmen ab. Die Kurve zwischen zwei Maschineneinsätzen wird aufgrund der jeweiligen Qualitätswerte und mit Hilfe der oben beschriebenen e-Funktion errechnet. Eine Verschlechterungsfunktion zwischen zwei Maschinenereinsätzen wird dabei als Verschlechterungsast bezeichnet.

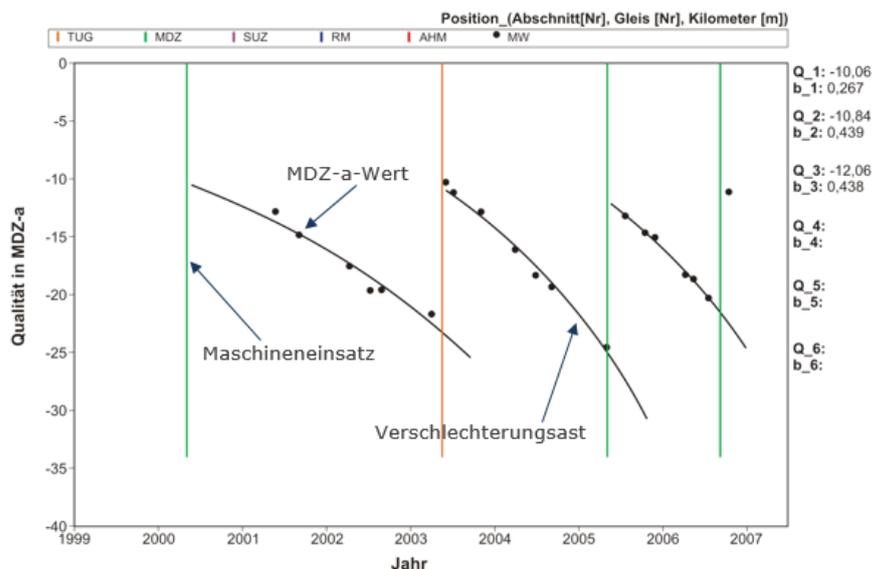


Abbildung 3: Verschlechterungsverhalten des Gleises<sup>10</sup>

Mit Hilfe der Qualitätssignale und -werte kann die Gleislagequalität und deren Entwicklung über die Zeit beschrieben werden. Die Zuordnung eines bestimmten Qualitätsverhaltens zu einer Ursache (z.B. Schotterzerstörung) ist dadurch allerdings nicht möglich.

<sup>10</sup> Vgl. ENZI, M.; LANDGRAF, M.: Data-based research - time series are the key. Präsentation in: LCM conference. S. 8.

## 2.2 TUG-Datenbank

Das Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz forscht seit einigen Jahren zum Thema Gleislagequalität und deren zeitlichen Entwicklung. Hierzu existiert eine umfangreiche Datenbank (TUG-Datenbank), die Informationen zu Messwagenfahrten (Messdaten), Oberbaukomponenten, Einbauten, Streckenparametern und durchgeführten Instandhaltungsarbeiten enthält.<sup>11</sup> Die Zuordnung der Informationen zu einem bestimmten Punkt im Netz erfolgt dabei nicht kontinuierlich, sondern diskret alle fünf Meter über sogenannte Streckenquerschnitte (in weiterer Folge als Querschnitte bezeichnet).<sup>12</sup> Die TUG-Datenbank umfasst aktuell etwas mehr als 4.000 km Gleis des österreichischen Schienennetzes und somit über 800.000 Querschnitte, die für die diversen Auswertungen der vorliegenden Arbeit genutzt werden konnten. Damit gelingt es einen wesentlichen Teil des Hauptnetzes der ÖBB abzubilden.



Abbildung 4: Messwagen der ÖBB mit dem die Daten für die Beschreibung der Gleislagequalität gewonnen werden<sup>13</sup>

<sup>11</sup> Vgl. HOLZFEIND, J.; ROBERT, H.: Qualitätsverhalten von Gleisen. In: ZEVrail, 06-07/2008. S. 213f.

<sup>12</sup> Vgl. HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 145.

<sup>13</sup> <http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/messarbeiten-em250.html>. Datum des Zugriffs: 12.08.2015.

### 3 Instandhaltungsmaßnahmen am Schotterbett

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, kommt es durch diverse Beanspruchungen im Laufe der Zeit zu einer Verschlechterung der Gleislage. Werden gewisse Grenzwerte – sogenannte Eingriffsschwellen – überschritten, muss das Gleis instand gehalten werden. Dies ist notwendig, um den Eisenbahnbetrieb sicher und mit ausreichendem Komfort abwickeln zu können.<sup>14</sup> Zudem muss bei der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten in Bezug auf den Zeitpunkt und die Qualität darauf geachtet werden, dass sich die Gesamtkosten der Anlage über den Lebenszyklus möglichst gering gestalten.

Instandhaltungsarbeiten, die die Gleislage wieder verbessern, werden direkt an der Schotterbettung durchgeführt. Die wesentlichsten Tätigkeiten sind dabei das Stopfen und die Schotterbettreinigung. Ebenso kommt es bei einer Planumsverbesserung zu einer Manipulation am Schotterbett, wobei diese meist nur im Zuge einer Gleisneulage durchgeführt wird.

Da der Fokus der gegenständlichen Arbeit auf der Schotterbettreinigung liegt, wird diese nachfolgend etwas ausführlicher beschrieben. Zur Abgrenzung der Schotterbettreinigung von anderen Tätigkeiten und zur Verdeutlichung der Unterschiede, sollen allerdings auch diese kurz beschrieben werden.

#### 3.1 Stopfen

##### 3.1.1 Allgemeines

Das Stopfen bzw. die Durcharbeitung ist die bedeutendste Instandhaltungsmaßnahme am Schottergleis, die im Österreichischen Hauptnetz ca. alle 2 bis 6 Jahre durchgeführt wird. Im Zuge dessen wird der Gleisrost angehoben, in Lage und Höhe exakt eingerichtet und die Schwellen werden so mit Schotter unterstopft, dass sie genau in der gewünschten Position zu liegen kommen.<sup>15</sup>

Dabei erfüllen Stopfarbeiten die folgenden Hauptaufgaben:<sup>16,17</sup>

- Beseitigung von Gleislagefehlern in Höhe und Richtung, um die Betriebssicherheit und einen ausreichenden Fahrkomfort zu gewährleisten.

<sup>14</sup> Vgl. HUMMITZSCH, R.: Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen - Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells. Dissertation. S. 1.

<sup>15</sup> Vgl. Ebenda.

<sup>16</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Moderne Vier-Schwellen-Stopftechnologie. In: Eisenbahningenieurkalender 2011. S. 32.

<sup>17</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. S. 395.

- Beseitigung von Schwellenhohllagen und die Herstellung von gleichmäßig verdichteten, tragfähigen Schwellenauflagern zur verbesserten Lastverteilung auf mehrere Schwellen
- Herstellung einer langwährenden Lagestabilität, um einen raschen und nicht umkehrbaren Qualitätsverfall der Gleisgeometrie und der Gleiskomponenten zu verhindern

### 3.1.2 Einsatzgebiete

Der Einsatz von Gleisstopfmaschinen erfolgt dann, wenn ein Gleis in die geometrisch korrekte Soll-Lage gebracht werden muss. Dies kann sowohl am freien Streckengleis (in Abschnitten mit schlechter Gleislagequalität bzw. bei Einzelfehlern oder bei einer Gleisneulage) als auch in Weichen notwendig werden.

### 3.1.3 Funktionsweise

Nach der Durchführung von Vor- und Messarbeiten, auf die nicht detailliert eingegangen werden soll, kann mit der Hauptarbeit begonnen werden.

Bei den heute großteils eingesetzten Maschinen handelt es sich um kombinierte Nivellier-Stopf- und Richtmaschinen, mit denen bis zu vier Schwellen gleichzeitig gestopft werden können. Diese verfügen über Nivellier- und Hebeeinrichtungen, mit denen das Gleis vor dem Stopfen exakt in die gewünschte Position gebracht wird.<sup>18</sup>

Der eigentliche Stopfvorgang erfolgt mit dem heute gängigen Verfahren der Asynchron-Gleichdruck-Stopfung. Dabei wird unter Einwirkung von Vibration und druckgesteuerter Beistellkraft der Schotter unter den Schwellen verdichtet. Bei der asynchronen Stopfung sind die wirksamen Stopfkraft und nicht die zurückgelegten Wege der Stopfwerkzeuge gleich groß. Das bedeutet, dass jeder Stopfarm mit seinen Stopfpickeln unabhängig von den anderen so lange beigestellt wird, bis der zuvor eingestellte Stopfdruck und somit auch der entsprechende Verdichtungsgrad erreicht ist. Das ist wesentlich, da die Hohlräume unter den Schwellen verschieden groß sind und damit auch die notwendigen Beistellwege zur Verdichtung variieren, damit ein gleichmäßig verdichtetes Schotterbett hergestellt werden kann.<sup>19,20</sup>

---

<sup>18</sup> Vgl. VEIT, P.; WALTER, S.; FRISEE, A.: Eisenbahnwesen GL. Vorlesungsskriptum. S. 237.

<sup>19</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 459.

<sup>20</sup> Vgl. VEIT, P.; WALTER, S.; FRISEE, A.: Eisenbahnwesen GL. Vorlesungsskriptum. S. 236.

Moderne Stopfmaschinen sind neben den Hauptaggregaten zusätzlich mit einem Vorkopfverdichter ausgestattet. Dieser verdichtet den Raum, der unmittelbar an die Schwellen angrenzt. Dadurch wird die Schwelle im gestopften Bereich in der korrigierten Lage fixiert und der Querverschiebewiderstand erhöht.<sup>21,22</sup>

Derzeit stellen kontinuierliche Stopfmaschinen den aktuellen Stand der Technik dar. Im Gegensatz zu zyklisch arbeitenden Maschinen erfolgt hierbei eine Trennung in einen kontinuierlich fahrenden Hauptrahmen und einen zyklisch eingesetzten Aggregatrahmen.<sup>23</sup>

Unmittelbar nach Ausführung der Stopfarbeiten wird die erreichte Gleislage überprüft. Dabei werden Richtung, Verwindung, gegenseitige Höhenlage, Längshöhe, Hebewerte und Beistellzeit mittels Mehrkanalschreiber aufgezeichnet und in einem Messschrieb dokumentiert. Weiters werden die Überhöhung und der Abstand bzw. die Höhe zum Vermarkungspunkt erfasst.<sup>24</sup>



Abbildung 5: Stopfexpress 09-4X Dynamic<sup>25</sup>

### 3.1.4 Mechanisierter Durcharbeitungszug (MDZ)

Die Gleisdurcharbeitung erfolgt in Österreich seit 1967 mit sogenannten mechanisierten Durcharbeitungszügen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die wesentlichen Tätigkeiten der Durcharbeitung in einem Arbeitsgang und somit in einer Sperrpause erledigt werden können.<sup>26</sup>

<sup>21</sup> Vgl. [http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/hebe\\_und\\_richtaggregate.htm](http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/hebe_und_richtaggregate.htm). Datum des Zugriffs: 10.03.2015.

<sup>22</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 504.

<sup>23</sup> Vgl. PLASSER & THEURER: 30 Jahre kontinuierliche Stopftechnologie. [http://www.plassertheurer.com/pdf/aktuell/aktuell43126de\\_07.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/aktuell/aktuell43126de_07.pdf). Datum des Zugriffs: 09.03.2015.

<sup>24</sup> Vgl. MARX, L.; MOßMANN, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. S. 635.

<sup>25</sup> <http://www.cckaempfe.de/bahn/companies/bahnbau/swietelsky.html>. Datum des Zugriffs: 17.03.2015.

<sup>26</sup> Vgl. <http://www.plassertheurer.com/de/unternehmen/geschichte.html>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.

Mechanisierte Durcharbeitszüge enthalten neben einer voraus fahrenden Stopfmaschine eine nachfolgende Schotterverteiler- und Planiermaschine und einen dynamischen Gleisstabilisator, der den Abschluss des MDZ bildet.<sup>27</sup>



Abbildung 6: MDZ: Stopfmaschine, Schotterverteiler- und Planiermaschine, dynamischer Gleisstabilisator<sup>28</sup>

Damit das Schotterbett die ihm zugeordneten Aufgaben (siehe Kapitel 1.2) erfüllen kann, ein sicherer Eisenbahnbetrieb möglich ist und um eine unwirtschaftliche Verbreiterung des Schotterbetts zu vermeiden, muss darauf geachtet werden, dass das Schotterbett ordnungsgemäß verfüllt und profiliert ist. Zur Herstellung des optimalen Bettungsquerschnittes wird im Zuge einer Neueinschotterung bzw. einer Durcharbeitung eine Schotterverteiler- und Planiermaschine eingesetzt.<sup>29</sup>

Der Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators führt dazu, dass die Anfangssetzungen gezielt, kontrolliert und gleichmäßig vorweggenommen werden. Es werden sowohl der Querverschiebe- als auch der Längsverschiebewiderstand erhöht und es kommt in vertikaler Richtung zu einer Homogenisierung des Schotterbetts sowie zu einer Verminderung von Schwellenhohllagen.<sup>30</sup>

Ist die dynamische Gleisstabilisation bereits in die Stopfmaschine integriert, entfällt der separate dynamische Gleisstabilisator und der MDZ besteht lediglich aus zwei Maschinen. Die modernste derzeit in Österreich eingesetzte Maschinenkombination ist dabei der MDZ 3000. Dieser enthält die kontinuierlich arbeitende 4-Schwellen-Stopfmaschine Dynamic 09-4X mit integriertem Gleisstabilisator, der das Schotterbewirtschaftungssystem BDS 2000 folgt.<sup>31</sup>



Abbildung 7: MDZ 3000: Dynamic 09-4X und BDS 2000<sup>32</sup>

<sup>27</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. S. 186.

<sup>28</sup> WENTY, R.: Drei Jahrzehnte kontinuierlich arbeitende Stopfmaschinen - Der Weg zu höheren Stopfleistungen. Präsentation in: Kontinuierliche Gleisdurcharbeitungstechnologie im internationalen Vergleich (Fachseminar im Rahmen der InnoTrans 2014). S. 16.

<sup>29</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 556ff.

<sup>30</sup> Vgl. Ebenda 497ff.

<sup>31</sup> Vgl. FLATSCHER, P.-J.: Wirtschaftliche Fahrweginstandhaltung für hohe Verfügbarkeit des Fahrweges. [http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei\\_0904\\_1.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei_0904_1.pdf). Datum des Zugriffs: 12.03.2015.

<sup>32</sup> WENTY, R.: Drei Jahrzehnte kontinuierlich arbeitende Stopfmaschinen - Der Weg zu höheren Stopfleistungen. Präsentation in: Kontinuierliche Gleisdurcharbeitungstechnologie im internationalen Vergleich (Fachseminar im Rahmen der InnoTrans 2014). S. 16.

## 3.2 Schotterbettreinigung

### 3.2.1 Allgemeines

Die Aufgaben der Schotterbettung wurden bereits in Kapitel 1.2 beschrieben. Diese Aufgaben kann das Schotterbett nur dann wahrnehmen, wenn der Anteil an Feinkorn nicht zu groß ist – das bedeutet das Schotterbett nicht zu stark verschmutzt ist.

Feinteile gelangen durch Absplitterungen und Abrieb aufgrund der Betriebsbelastung, durch aufsteigendes Material aus dem Untergrund bei mangelnder Filterwirkung sowie durch herabfallendes Ladegut und Wildkrautbewuchs in die Gleiskonstruktion bzw. das Schotterbett.<sup>33</sup>

Ist das Schotterbett verschmutzt, wird die Reibung zwischen den einzelnen Schotterkörnern stark herabgesetzt und die Gleiskonstruktion setzt sich ungleichmäßig. Weiters wird aufgrund des Eintrags von Feinteilen die Elastizität vermindert und die Bettung kann ihre Funktion als dämpfendes Element nicht mehr wahrnehmen.<sup>34</sup> Dies wirkt sich auch auf anderen Oberbaustoffe (vor allem Schiene und Schwelle) aus, da diese durch die fehlende dynamische Lastverteilung übermäßig stark beansprucht werden und vorzeitig verschleifen.<sup>35</sup>

Zudem kann durch eine verschmutzte Schotterbettung Oberflächenwasser nicht ungehindert abfließen, was die Tragfähigkeit weiter reduziert.<sup>36</sup>

All dies führt in weiterer Folge zu einem erhöhten Instandhaltungs- bzw. Stopfaufwand, dessen Wirkung sowohl qualitativ als auch zeitlich stark begrenzt ist, bis ein Stopfeinsatz schließlich keine Wirkung mehr zeigt. Ist dies der Fall, muss der Schotter ausgetauscht bzw. gereinigt werden.

### 3.2.2 Historische Entwicklung

Die weltweit ersten Schotterbettreinigungsmaschinen wurden im Jahr 1946 von der Schweizer Firma Matisa auf den Markt gebracht. Nachdem Plasser & Theurer im Jahr 1959 zunächst eine gleislose Bettungsreinigungsmaschine entwickelte, folgte 1962 die erste vollhydraulisch arbeitende, gleisgebundene Schotterbettreinigungsmaschine. Anfang der 1970er-Jahre wurden erste leistungsfähige Maschinen vom Typ RM 63 produziert und eingesetzt. Diese waren mit einer Siebanlage ausgestattet, verfügten über sechs Achsen, eine

<sup>33</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 527.

<sup>34</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 50.

<sup>35</sup> Vgl. WENTY, R.: Neuste Entwicklungen bei der Gleissanierung und -instandsetzung. In: Eisenbahningenieur, 11/2006. S. 8.

<sup>36</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 527.

Antriebsleistung von 520 kW, einer nominellen Leistung von 650 m<sup>3</sup>/h und wogen 120 t. In den 1980er-Jahren gelangte dieser Maschinentyp jedoch an die Grenzen der Leistungsfähigkeit. Da aufgrund der Begrenzung des Lichtraumprofils die Vergrößerung des Siebes nicht möglich war, wurde bei der Entwicklung neuer Maschinen der Fokus auf den Einbau einer Doppelsiebanlage gelegt. Dadurch mussten auch alle anderen Einzelkomponenten – insbesondere die Aushubkette – entsprechend dimensioniert werden. Auch die Motorenleistung musste den veränderten Rahmenbedingungen angepasst werden und liegt heute bereits um die 1500 kW. Maschinen dieser Größenordnung verlangten zudem eine mehrgliedrige Bauweise. Dabei werden grundsätzlich Aushubmaschine und Siebwagen getrennt, wobei meist auch eine separate Antriebseinheit eingesetzt wird. Schotterbettreinigungsmaschinen der neuesten Bauart haben ein Gesamtgewicht von 220 bis 280 t und verfügen über 10 bis 17 Achsen.<sup>37</sup>

### 3.2.3 Funktionsweise

Nachfolgend werden die wichtigsten Bestandteile einer Schotterbettreinigungsmaschine und deren Funktionsprinzipien erklärt.

#### Aushubeinrichtung

Der Aushub des Bettungsmaterials erfolgt mit Hilfe einer Aushubkette, die in einem Räum balken unterhalb des Gleises geführt wird. Die Ketten bestehen dabei aus Kratzerschaukeln mit zwei bis fünf Fingern, die das Material lösen sowie aus Zwischengliedern und Bolzen. Die Räum breite kann durch den Ein- und Ausbau von entsprechenden Zwischenstücken variiert werden.<sup>38</sup>

Wesentlich ist, eine ausreichende Räum breite einzuhalten, damit verschmutztes Material nicht im Querschnitt verbleibt und somit das Abfließen des Oberflächenwassers behindert. Dies ist auch bei der Wahl der Räum tiefe zu berücksichtigen. Daher wird im Optimalfall der Räum balken genau an der Grenzschicht zum Planum geführt. Damit der Schnitt eben und exakt hergestellt werden kann, ohne die Planumsschicht zu zerstören, ist der Räum balken an der Unterseite eben und glatt ausgeführt.<sup>39</sup>

<sup>37</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 47f.

<sup>38</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 606.

<sup>39</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 544f.

Die Kettengeschwindigkeit liegt bei maximal 3,5 m/s, wobei der Verschleiß und die Lärmbelastigung mit hohen Kettengeschwindigkeiten überproportional ansteigen. Die Förderleistung von üblichen Räumketten liegt zwischen 600 und 1000 m<sup>3</sup>/h.<sup>40</sup>

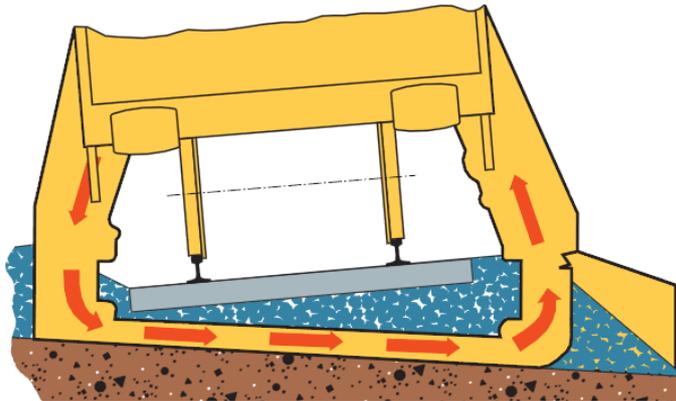


Abbildung 8: Prinzipskizze einer Räumeinrichtung<sup>41</sup>



Abbildung 9: Räumeinrichtung im Baustelleneinsatz<sup>42</sup>

## Siebanlage

Das ausgehobene Bettungsmaterial wird der Siebanlage zugeführt, wo das noch brauchbare Material vom Abraum getrennt wird. Die Qualität der durchgeführten Arbeiten, sowie die Leistung der Anlage hängen im Wesentlichen von der Siebfläche, der Siebgröße, der Sieblochung, der Siebschwingung, der Schwingungsrichtung und der Siebneigung ab. Die

<sup>40</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 49.

<sup>41</sup> KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 606.

<sup>42</sup> <http://mec01.info/akt2013.htm>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

meisten Maschinen sind mit einer Vibrationssiebanlage ausgestattet, die über drei Siebebenen verfügt, welche folgende Aufgaben haben:<sup>43</sup>

1. Deck: Ausscheidung des Überkorns
2. Deck: Gewinnung des Mittelkorns
3. Deck: Gewinnung des Kleinkorns und Ausscheidung der Feinteile

Um die Reinigungsqualität zu erhöhen, kommen auf der untersten Siebebene zunehmend Fingersiebe zum Einsatz. Klassische Bettungsreinigungsmaschinen sind mit einem Sieb ausgestattet und ermöglichen Reinigungsleistungen von bis zu 600 m<sup>3</sup>/h. Großreinigungsmaschinen verfügen über zwei oder mehr Siebe und weisen dementsprechend höhere Siebleistungen auf. Die gebräuchlichen Maschenweiten der einzelnen Siebebenen sind 80/50/30 mm. Wesentlich ist die Neigung der Siebanlage, die meist zwischen 10° und 20° liegt. Eine große Neigung der Siebe erhöht zwar die Leistungsfähigkeit, vermindert aber gleichzeitig die Reinigungsqualität. Die Schwingung wird entweder über einen Linearschwinger oder einen Exzentrerschwinger eingebracht.<sup>44</sup>

Bei der Optimierung des Siebergebnisses muss einerseits darauf geachtet werden, dass eine ausreichende Qualität des wiedereinzubauenden Materials gegeben ist, da ansonsten der Reinigungseinsatz nicht den gewünschten Effekt erzielt und auch zukünftig zahlreiche Instandsetzungstätigkeiten notwendig werden. Andererseits darf nicht eine zu hohe Qualität angestrebt werden, da es ansonsten zu verminderten Leistungen und zur Ausscheidung noch nutzbaren Korns kommt, was zu unwirtschaftlichen Bettungsreinigungseinsätzen führt.<sup>45</sup>



Abbildung 10: Schematische Darstellung einer Siebanlage mit 3 Siebdecks<sup>46</sup>

<sup>43</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 606f.

<sup>44</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 50.

<sup>45</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 533ff.

<sup>46</sup> MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 50.



Abbildung 11: Doppelsiebanlage einer RU 800 S<sup>47</sup>

### Transporteinrichtungen

Auf einer Schotterbettreinigungsmaschine sind zahlreiche Fördersysteme notwendig, da das ausgebaute Material dem Sieb zuzuführen ist und der Neuschotter antransportiert bzw. der Abraum abtransportiert werden muss.

Bei den ersten Schotterbettreinigungsmaschinen wurde das Sieb direkt von der Aushubkette beschickt. Bei neueren Maschinen wird der Schotter von der Aushubkette über Förderbänder zur Siebanlage transportiert. Dabei kann noch ein Speichersilo zwischengeschaltet sein, um das Sieb mit der optimalen Schottermenge zu beschicken. Die Förderbänder sind äußerst robust gebaut, als Kettenbänder ausgeführt und werden kraftschlüssig über Kettenantriebe angetrieben.<sup>48</sup>

Die Abraumverladung erfolgt über ein stirnseitig angeordnetes Förderband, welches für Überstellfahrten eingeklappt oder eingezogen werden kann und drehbar gelagert ist. Der Abraum wird entweder neben dem Gleis gelagert oder auf einen am Nachbargleis befindlichen Waggon bzw. auf vor der Maschine befindliche Wägen (Material-Förder- und Siloeinheiten), verladen. Wichtig ist, dass der Abraum immer nach vorne gefördert wird, damit – sollten Teile davon aufs Gleis fallen – das gereinigte Schotterbett nicht neuerlich verschmutzt wird.<sup>49</sup>

Der gereinigte Schotter wird über hydraulisch verstellbare Leitbleche schwenkbaren Verteilförderbändern zugeführt oder direkt im Gleis abgeladen. Dies kann gleichmäßig verteilt oder speziell in gewünschten

<sup>47</sup> WENTY, R.: Neuste Entwicklungen bei der Gleissanierung und -instandsetzung. In: Eisenbahningenieur, 11/2006. S. 10.

<sup>48</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 51.

<sup>49</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahn-technische Rundschau, 10/2001. S. 607.

Zonen erfolgen. Hinter der Abwurfvorrichtung befindet sich eine Planiereinrichtung, die ein gleichmäßiges Schwellenaufleger herstellt.<sup>50</sup>



Abbildung 12: Neuschottereinbringung<sup>51</sup>

### Mess- und Steuereinrichtungen

Schotterbettreinigungsmaschinen sind mit zahlreichen elektronischen Mess- und Steuerinstrumenten ausgestattet, mit denen die benötigten Daten ermittelt und die gewünschten Einstellungen vorgenommen werden können. Dazu zählen ein Seil- und Winkelgeber, ein elektronisches Pendel und eine Lasermesseinrichtung zur Räumtiefensteuerung.<sup>52</sup> Zur Qualitätskontrolle der durchgeführten Arbeiten werden elektronische Mess-Schreibeinrichtungen eingesetzt, die bis zu sechs Parameter wie beispielsweise Räumtiefe, Planumsneigung oder Gleisabsenkung aufzeichnen.<sup>53</sup>

### Zusatzrüstung

Zusätzlich können Schotterbettreinigungsmaschinen mit einer Waschanlage, die das feine bindige Material vom Schotter abwäscht, oder einem eigenen Brechwerk zur Wiederaufbereitung des bereits abgerundeten Schotters ausgestattet sein.<sup>54</sup> Auch Sternsiebe Hochdruckreinigungs- oder Wasser-Recyclinganlagen können

<sup>50</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 607.

<sup>51</sup> <http://www.plassertheurer.com/pics/maschinen-systeme/740/rm95800w-7.jpg>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<sup>52</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 606.

<sup>53</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 52.

<sup>54</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 538ff.

Bestandteil einer modernen Schotterbetteinigungsmaschine sein. Die Integration dieser Bestandteile in die Maschine ist durch die Konstruktion in Modularbauweise möglich und wäre mit dem Prinzip der Kompaktbauweise, wie sie bei den ersten Maschinen angewendet wurde, nicht mehr umsetzbar. Die mehrgliedrigen Maschinen bestehen dabei aus einem Aushubteil, einem Siebwagen, einer Antriebseinheit und eventuell aus den zuvor beschriebenen Zusatzeinrichtungen, die sich auf eigenen Fahrzeugkomponenten befinden und zwischengekuppelt werden können.<sup>55</sup>

### 3.2.4 Baustelle

Bei Gleisbaustellen im Allgemeinen und somit auch bei Schotterbetteinigungen, handelt es sich um Linienbaustellen in sehr ausgeprägter Form. Materialfluss und Logistik werden dabei aus bauablauftechnischen Gründen sowie der oft schwierigen Zugänglichkeit der Baustelle von außerhalb des Gleises, fast ausschließlich schienenengebunden über das Baugleis durchgeführt. Der detaillierten Planung von Materialfluss und Logistik kommt dabei äußerst große Bedeutung zu, um die Sperre des Gleises möglichst kurz zu halten.<sup>56</sup>

Schotterbetteinigungen werden grundsätzlich im Rahmen eines Austauschs des Gleisrostes durchgeführt. Dabei erfolgt die Bettungsreinigung vor der Auswechslung der Gleiskonstruktion, damit das neue Gleisgestänge keine unzulässigen Verbiegungen erfährt.<sup>57</sup>

Bettungsreinigungen können allerdings auch schon vor einer Re-Investition des gesamten Oberbaus notwendig werden, wenn der Schotter stark verschmutzt ist und eine ausreichende Gleislagequalität durch Stopfen nicht mehr erreicht werden kann bzw. diese rasch verfällt. Da sich die vorliegende Arbeit mit der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit einer Bettungsreinigung vor dem Ende der strategischen Nutzungsdauer beschäftigt ohne die restlichen Komponenten auszutauschen, wird in weiterer Folge der Fokus auf dieses Szenario gelegt und nicht detailliert auf den Gleisumbau und dessen Bauablauf eingegangen.

Der erste Arbeitsschritt der Schotterbetteinigungsmaschine ist der Ausbau des Bettungsmaterials. Anschließend wird der Schotter gesiebt bzw. gereinigt und das wiederverwertbare Material vom Abraum getrennt (siehe Kapitel 3.2.3). Der Abtransport des Abraumes erfolgt in der Regel mit Materialförder- und Siloeinheiten (MFS). Diese verfügen über einen über die ganze Wagenbreite gehenden Fördergurt und an der Stirnseite über ein Abgabeförderband. Je nach Art und Umfang der Baustelle

<sup>55</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 51.

<sup>56</sup> Vgl. LERCHER, T.: Einfluss von Materialfluss und Logistik auf die Dauer von Gleissperren. Masterarbeit. S. 95.

<sup>57</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 608.

können beliebig viele MFS-Einheiten hintereinander gekoppelt werden. Das Aushubmaterial fällt auf den Bodengurt des ersten Wagens, wird zum Abgabeförderband gebracht, von wo aus es der nächsten Einheit übergeben wird, bis das Material schließlich in der vordersten Einheit landet. Kommt das so genannte Pendelsystem zum Einsatz, werden nach der Befüllung einer bestimmten Anzahl von MFS diese abgekuppelt und zur Entladung zu einer geeigneten Stelle (Deponie, Waggons, Lkws) gebracht. Das bringt den Vorteil, dass in der Zwischenzeit – ohne Unterbrechung des Arbeitsfortschritts – die bei der Baustelle verbleibenden MFS befüllt werden können. Sind die entleerten MFS zurück und bilden wieder den äußersten Teil des Zuges, werden sie wieder über die Förderbänder mit dem in der Zwischenzeit angefallenem Abraum gefüllt und bei Erreichen des Fassungsvermögens erneut abtransportiert. Werden hingegen alle MFS gefüllt und gleichzeitig abtransportiert, muss in der Zwischenzeit der Arbeitsfortschritt der Bettungsreinigungsmaschine unterbrochen werden, da der Abraum nicht abgeladen werden kann.<sup>58</sup>



**Abbildung 13: Mehrere aneinander gekoppelte Materialförder- und Siloeinheiten<sup>59</sup>**

Wesentlichen Einfluss auf die Baustellenplanung (vor allem auf die Anzahl der notwendigen MFS) und die Arbeitsgeschwindigkeit hat dabei die Entfernung der Baustelle zur Zwischendeponie für den Abraum. Umso weiter diese entfernt liegt, umso mehr MFS sind notwendig bzw. umso länger sind die Stillstandszeiten der Baustelle.<sup>60</sup>

<sup>58</sup> Vgl. MARX, L.; MOßMANN, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. S. 496ff.

<sup>59</sup> <http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/schotterbearbeitung.htm>. Datum des Zugriffs: 12.08.2015.

<sup>60</sup> Vgl. LERCHER, T.: Einfluss von Materialfluss und Logistik auf die Dauer von Gleissperren. Masterarbeit. S. 95ff.

Jener Schotter, der wiederverwendet werden kann, wird von der Maschine im Gleis abgeladen. Da es in der Regel nicht möglich ist das gesamte ausgebaute Bettungsmaterial wieder einzubauen, muss dieses mit Neuschotter ergänzt werden. Wird ein Totalaushub durchgeführt, wird der gesamte Schotter gegen Neuschotter ausgetauscht. Wie viel des Bettungsmaterials wiederverwendet werden kann, ist vom Verschmutzungsgrad und von den Witterungsverhältnissen abhängig. Kommt es zu Verklumpungen durch bindiges Material in Kombination mit Nässe, kann nur sehr wenig bis gar kein Schotter wiederverwendet werden.<sup>61</sup>

Der Neuschotter wird entweder mit dem Schotterwagen an den gewünschten Stellen abgeladen, oder – wenn die Reinigungsmaschine über eine Neuschotterzufuhr verfügt – in der Maschine mit dem gereinigten Schotter vermischt und gemeinsam mit diesem eingebaut. Ist die Schotterbettreinigungsmaschine mit einer Neuschotterzufuhr ausgestattet, kann der Antransport des Schotters ebenfalls mit MFS-Einheiten erfolgen. Auch diese Arbeiten können kontinuierlich und ohne Unterbrechung des Arbeitsfortschrittes durchgeführt werden. Spezielle MFS-Einheiten ermöglichen auch das direkte Einbringen des Neuschotters in das Gleis.<sup>62</sup> Der Neuschotter kann dabei entweder direkt vom Schotterwerk mit Hilfe von Schotterwägen oder ganzen Schotterzügen zur Baustelle transportiert werden. Andere Möglichkeiten stellen die Errichtung einer Zwischendeponie in Baustellennähe und der Antransport von dieser Deponie mit Schotterwägen sowie die Anlieferung per LKW dar.<sup>63</sup>

Nachdem das Schotterbett gereinigt und der Neuschotter eingebracht wurde, muss das Gleis ein- bzw. mehrere Male gestopft werden, damit es wieder voll funktionstüchtig ist. Hierzu kommt ein MDZ-Zug (siehe Kapitel 3.1) zum Einsatz.<sup>64</sup>

Neben dem freien Streckengleis kommt es bei einer entsprechenden Verschmutzung in Weichen ebenso zur Notwendigkeit einer Schotterbettreinigung. Dazu kann bei einigen Reinigungsmaschinen die Räumbreite durch den Ein- und Ausbau von Zwischenstücken entsprechend variiert werden. Verfügt die Maschine über diese Eigenschaft nicht, muss für die Schotterbettreinigung die Weiche ausgebaut werden.<sup>65</sup> Die neueste Entwicklung in diesem Bereich ist eine

<sup>61</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 538f.

<sup>62</sup> Vgl. MISAR, H.: Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004. S. 52.

<sup>63</sup> Vgl. LERCHER, T.: Einfluss von Materialfluss und Logistik auf die Dauer von Gleissperren. Masterarbeit. S. 100.

<sup>64</sup> Vgl. KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001. S. 608.

<sup>65</sup> Vgl. WENTY, R.: Neuste Entwicklungen bei der Gleissanierung und -instandsetzung. In: Eisenbahningenieur, 11/2006. S. 9.

Maschine, die über ein schwenkbare Schwert als Aushubeinrichtung verfügt. Damit kann die Räumbreite stufenlos bei kontinuierlicher Arbeitsweise verstellt werden, womit sich die Maschine besonders für die Bettungsreinigung in Weichen eignet.<sup>66</sup>

### 3.2.5 Maschinen

Nachfolgend werden kurz die beiden in Österreich vornehmlich eingesetzten Schotterbettreinigungsmaschinen erklärt.

#### RM 80 UHR

Bei der RM 80 UHR handelt es sich um eine reine Schotterbettreinigungsmaschine. Das bedeutet, dass sie sowohl beim Gleisumbau eingesetzt werden kann, als auch dann, wenn ausschließlich eine Bettungsreinigung durchgeführt werden soll. Die Maschine verfügt über alle in Kapitel 3.2.3 beschriebenen wesentlichen Bestandteile (verstellbare Räumbalken, eine dreistufige Siebanlage, elektronische Mess-, Steuer- und Kontrolleinrichtungen) einer modernen Schotterbettreinigungsmaschine und kann sowohl mit als auch ohne Neuschotterzufuhr ausgestattet sein.<sup>67</sup> Die Maschine weist eine Gesamtlänge über Puffer von 31,8 m auf und hat ein Gewicht von knapp 100 t.<sup>68</sup>



Abbildung 14: Schotterbettreinigungsmaschine RM 80 UHR<sup>69</sup>

<sup>66</sup> Vgl. <http://www.plassertheurer.com/iaf2013/de/urm700.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<sup>67</sup> Vgl. <http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/bettungsreinigung-rm-80-uhr.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<sup>68</sup> Vgl. <http://www.plasserindia.com/en/machines/rm-80-uhr.htm>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<sup>69</sup> [http://www.beretta-modelle.ch/gleisbaumaschinen/html/fp\\_rm\\_80\\_uhr.html](http://www.beretta-modelle.ch/gleisbaumaschinen/html/fp_rm_80_uhr.html). Datum des Zugriffs: 08.09.2015.

## RU 800 S

Die RU 800 S ist eine kombinierte Schotterbettreinigungs- und Gleisumbaumaschine, und kommt dann zum Einsatz, wenn der ganze Oberbau der Anlage ausgewechselt werden soll. Dabei sind Schichtleistungen bis 2.000 m für den Gleisumbau möglich. Erstmals wurde die RU 800 S im Jahr 2006 unter Realbedingungen eingesetzt. Die Maschine verfügt über alle wesentlichen Komponenten für den Gleisumbau. Die wichtigsten Elemente für die Schotterbettreinigung sind die Räumkette, die den Schotter bis 700 mm unter der Schwellenoberkante ausbauen kann und eine Doppelsiebanlage mit zwei Exzentrersieben (Gesamtsiebfläche 46 m<sup>2</sup>). Weiters ist in der Maschine ein Schotterspeicherwagen für gereinigten und neuen Schotter integriert, der als Puffer dient. Der An- und Abtransport des Schotters erfolgt mittels MFS.<sup>70</sup> Die eigentliche Maschine hat eine Länge von 177 m und wiegt rund 650 t.<sup>71</sup> Die Vorteile der kombinierten Umbau- und Reinigungsmaschine bestehen in der Verkürzung der Bauzeit und somit in der Einsparung von Baustellengemein- und Bauüberwachungskosten sowie in der optimalen Nutzung von Sperrpausen, da zwei Hauptarbeitsgänge zu einem Arbeitsgang zusammengeführt werden. Weitere Vorteile ergeben sich durch die Vermeidung verlorener Stopfgänge zwischen den Arbeitsgängen, im Wegfall zusätzlicher Vermessungen und im Entfall von bei herkömmlichen Reinigungsmaschinen notwendigen Umbauten an Engstellen.<sup>72</sup>



Abbildung 15<sup>73</sup> und Abbildung 16<sup>74</sup>: Kombinierte Gleisumbau- und Schotterbettreinigungsmaschine RU 800 S

<sup>70</sup> Vgl. WENTY, R.: Neuste Entwicklungen bei der Gleissanierung und -instandsetzung. In: Eisenbahningenieur, 11/2006. S. 10ff.

<sup>71</sup> Vgl. <http://www.welt.de/wirtschaft/article139261656/Dieses-Monstrum-revolutioniert-den-Gleisbau.html>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<sup>72</sup> Vgl. BEILHACK, F.: RU 800 S - ein Einsatzvergleich nach drei Jahren. In: Eisenbahningenieur, 09/2009. S. 11ff.

<sup>73</sup> <http://www.sinekvilaga.hu/vissznyeremenyi-anyagok-beepitese-nagygepes-technologiaval>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<sup>74</sup> <http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/gleisumbau-gleisneubau-ru-800-s.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

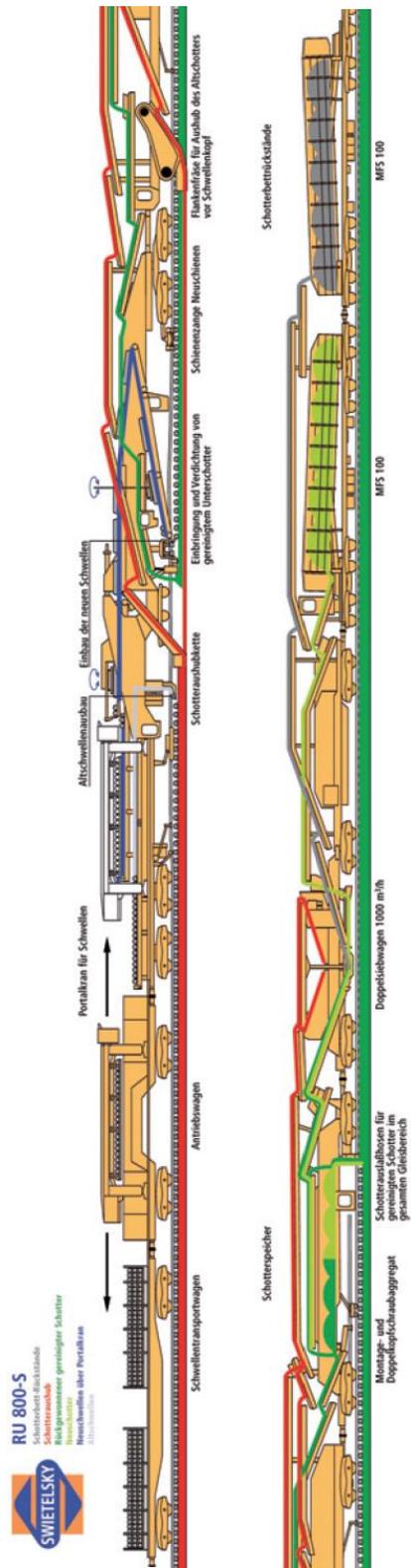


Abbildung 17: Längsschnitt RU 800 S<sup>75</sup>

<sup>75</sup> BEILHACK, F.: RU 800 S - ein Einsatzvergleich nach drei Jahren. In: Eisenbahningenieur, 09/2009. S. 12f.

### 3.3 Planumsverbesserung

Nicht immer ist eine schlechte Gleislagequalität ausschließlich auf übermäßig verschlissenen oder verschmutzten Schotter zurückzuführen. Auch das Erdplanum bzw. der Unterbau haben wesentlichen Einfluss auf eine ausreichende und dauerhafte Gleislagequalität. Diese Aspekte wurden lange Zeit vernachlässigt, treten aber durch die immer höher werdenden Betriebslasten, denen der Unterbau oft nicht mehr standhält, immer stärker in den Vordergrund.<sup>76</sup>

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf Instandhaltungs- und Verbesserungstätigkeiten am Unterbau gelegt werden soll, wird in der Folge lediglich kurz der Vollständigkeit wegen auf Planumsverbesserungsmaßnahmen eingegangen.

Zur Inspektion des Untergrundes und zur Detektion von Bereichen mit Unterbauproblemen, werden grundsätzlich Georadarsysteme sowie Probebohrungen und Probeschürfe eingesetzt.<sup>77</sup>

Muss aufgrund von zu geringen Tragfähigkeiten des Unterbaus bzw. des anstehenden Untergrundes eine Planumsverbesserung durchgeführt werden, so geschieht dies heute meist mit vollautomatischen, gleisgebundenen Maschinensystemen. Diese ermöglichen die Sanierung des Unterbaus, ohne den Gleisrost ausbauen oder austauschen zu müssen.<sup>78</sup>

Zentraler Bestandteil einer Planumsverbesserung ist der Einbau einer Planumsschutzschicht, die aus einem Sand-Kies-Gemisch besteht und deren Dicke von der Tragfähigkeit des anstehenden Bodens abhängt. Ergänzend werden bei einer Planumsverbesserung oft Geotextile oder Hartschaumplatten eingebaut sowie entsprechende Drainageeinrichtungen zur Herstellung einer funktionsfähigen Entwässerung installiert.<sup>79</sup>

Moderne, gleisgebundene Großmaschinen für die Planumsverbesserung verfügen über Systeme, die ein Recycling des Schotters ermöglichen. Die AHM 800 R baut den Schotter über die erste von zwei Räumketten aus, zerkleinert das Bettungsmaterial und baut es als Bestandteil der Planumsschutzschicht wieder ein. Planumsverbesserungsmaschinen wie die RPMW 2002-2 oder die PM 200-2 ermöglichen neben dem Einbau der Planumsschutzschicht auch die Wiederverwendung des Gleisschotters als solchen. Dafür stehen Vibrations- bzw. Sieb-, sowie Brech- und Waschanlagen auf der Maschine zur Verfügung. Alle oben

<sup>76</sup> Vgl. MARX, L.; MOßMANN, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. S. 505.

<sup>77</sup> Vgl. Ebenda.

<sup>78</sup> Vgl. LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. S. 565.

<sup>79</sup> Vgl. Ebenda S. 564f.

genannten Großmaschinen verfügen zudem über Einrichtungen, mit denen Geotextile kontinuierlich eingebaut werden können.<sup>80</sup>



Abbildung 18: AHM 800 R im Baustelleneinsatz<sup>81</sup>

Die neueste Entwicklung in der Untergrundsanie rung stellt die Maschine PM 1000 URM dar, welche über drei Räumketten verfügt und den Einbau von bis zu fünf verschiedenen Schichten ermöglicht. Im Fokus steht dabei die erheblich optimierte Wiederverwendung des ausgebauten Materials.<sup>82</sup> Die Maschine weist dabei eine Gesamtlänge von 270 m auf.<sup>83</sup>



Abbildung 19: PM 1000 URM<sup>84</sup>

<sup>80</sup> Vgl. BECKER, R.; VIERLINGER, P.: Nachhaltiges Wirtschaften durch gleisgebundenes Schotterrecycling. In: Eisenbahningenieur, 06/2004. S. 21.

<sup>81</sup> [http://www.geotest.pl/aktualnosci/nadzor\\_nad\\_budowa\\_szybkiej\\_kolei](http://www.geotest.pl/aktualnosci/nadzor_nad_budowa_szybkiej_kolei). Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<sup>82</sup> Vgl. MARX, L.; MOßMANN, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. S. 506f.

<sup>83</sup> Vgl. <http://www.eurailpool.com/resources/downloads/PM-1000-URM-Gesamt.pdf>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<sup>84</sup> <http://www.eurailpool.com/resources/downloads/PM-1000-URM-Gesamt.pdf>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

## 4 Standardelemente

Gleisanlagen weisen über das Gesamtnetz verteilt stark unterschiedliche Eigenschaften auf, was sich in ebenso verschiedenen Nutzungsdauern und Instandhaltungsintervallen niederschlägt. Dieser Umstand führt zu stark unterschiedlichen Lebenszyklen sowie Lebenszykluskosten der verschiedenen Gleisabschnitte. Aus diesem Grund, werden die folgenden Untersuchungen spezifisch für einzelne Kombinationen unterschiedlicher Randbedingungen – sogenannte Standardelemente – durchgeführt.

### 4.1 Einführung

Infrastrukturanlagen zeichnen sich im Allgemeinen durch hohe Anfangsinvestitionen und lange Nutzungsdauern aus, in denen zusätzlich ein nicht zu vernachlässigender Anteil an Instandhaltungskosten anfällt. Soll es zu einer wirtschaftlichen Analyse solcher Anlagen kommen, ist dies nur unter Berücksichtigung aller auftretenden Effekte sinnvoll, womit Lebenszyklusbetrachtungen notwendig werden. Diese Effekte prägen sich allerdings – abhängig von den jeweiligen Randbedingungen des betrachteten Gleisabschnitts – unterschiedlich aus.<sup>85</sup>

Die wesentlichen, kostentreibenden Randbedingungen die den Lebenszyklus des Gleises bestimmen sind dabei:<sup>86</sup>

- Oberbaukonfiguration (Schwellentyp, Schienentyp, Schienengüte)
- Verkehrsbelastung
- Radienverhältnisse
- Unterbausituation
- Gleisanzahl

Eine spezifische Ausprägung der oben genannten Parameter wird dabei als Standardelement bezeichnet.<sup>87</sup>

Für jede Parameterkombination – also jedes Standardelement – wurden vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz in Kooperation mit den ÖBB sogenannte Arbeitszyklen entwickelt. Diese listen alle planbaren Instandhaltungsmaßnahmen während der gesamten Liegedauer des Gleises auf, einschließlich der Angabe wann diese Arbeiten durchzuführen sind. Aus den Arbeitszyklen lässt sich so auch die Nutzungsdauer der Gleisanlage unter den spezifischen Randbedingungen ermitteln. Da es hierfür keine Datengrundlage gab, geschah die

<sup>85</sup> Vgl. VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Standardlemente. Folder. S. 2.

<sup>86</sup> Vgl. VEIT, P.: Das Projekt "Strategie Fahrweg" der ÖBB. In: ZEVrail, 09/2004. S. 5.

<sup>87</sup> Vgl. VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Standardlemente. Folder. S. 2.

Entwicklung in enger Kooperation mit Spezialisten aus verschiedenen Hierarchieebenen der jeweiligen Fachrichtung. Begleitend zur Entwicklung wurden und werden die Standardelemente mit ihren Arbeitszyklen laufend verifiziert und aufgrund neuer Erkenntnisse aktualisiert. Neben Standardelementen für Gleise, welche in der gegenständlichen Untersuchung verwendet werden, existieren Standardelemente auch noch für weitere Anlagen wie beispielsweise Weichen, Brücken, Oberleitungen, Lärmschutzwände oder Bahnsteige.<sup>88</sup>

Nachdem bekannt ist, welche Arbeiten zu welchem Zeitpunkt im Lebenszyklus der Anlage notwendig sind, müssen noch die Kosten für diese Tätigkeiten ermittelt werden. Die Kosten für (Re-)Investition und Instandhaltungsarbeiten können dabei genau kalkuliert werden. Die Kosten für die Mängelbehebung (ungeplante Instandhaltung) sind aus Statistiken erhebbar. Somit sind die gesamten Lebenszykluskosten, sowie der Zeitpunkt, wann diese anfallen, randbedingungsspezifisch für alle Standardelemente bekannt und stehen für diverse Auswertungen zur Verfügung.<sup>89</sup>

#### 4.1.1 Einsatzbereiche

Standardlemente können in den folgenden Anwendungsfällen eingesetzt werden:<sup>90</sup>

- Basis für die Entwicklung von Fahrwegstrategien
- Begleitende Wirtschaftlichkeitsuntersuchung innovativer Oberbaukomponenten bzw. Instandhaltungsmaßnahmen
- Berechnung der netzweiten, mittleren Nutzungsdauer, durchschnittlicher Instandhaltungsmengen und notwendiger Budgets
- Netzweite Beurteilung der Anlagensubstanz

#### 4.1.2 Beispiel

Abbildung 20 zeigt den Arbeitszyklus eines Standardelements. Mit Hilfe der bekannten Kosten der einzelnen Maßnahmen (jeweils auf einen Kilometer Gleis bezogen), können schließlich die gesamten Lebenszykluskosten der Gleisanlage berechnet werden. Weiters können in Abhängigkeit der Nutzungsdauer die durchschnittlichen Jahreskosten bzw. die Annuitäten ermittelt werden.

<sup>88</sup> Vgl. VEIT, P.: Das Projekt "Strategie Fahrweg" der ÖBB. In: ZEVrail, 09/2004. S. 6.

<sup>89</sup> Vgl. Ebenda.

<sup>90</sup> VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Standardlemente. Folder. S. 3.

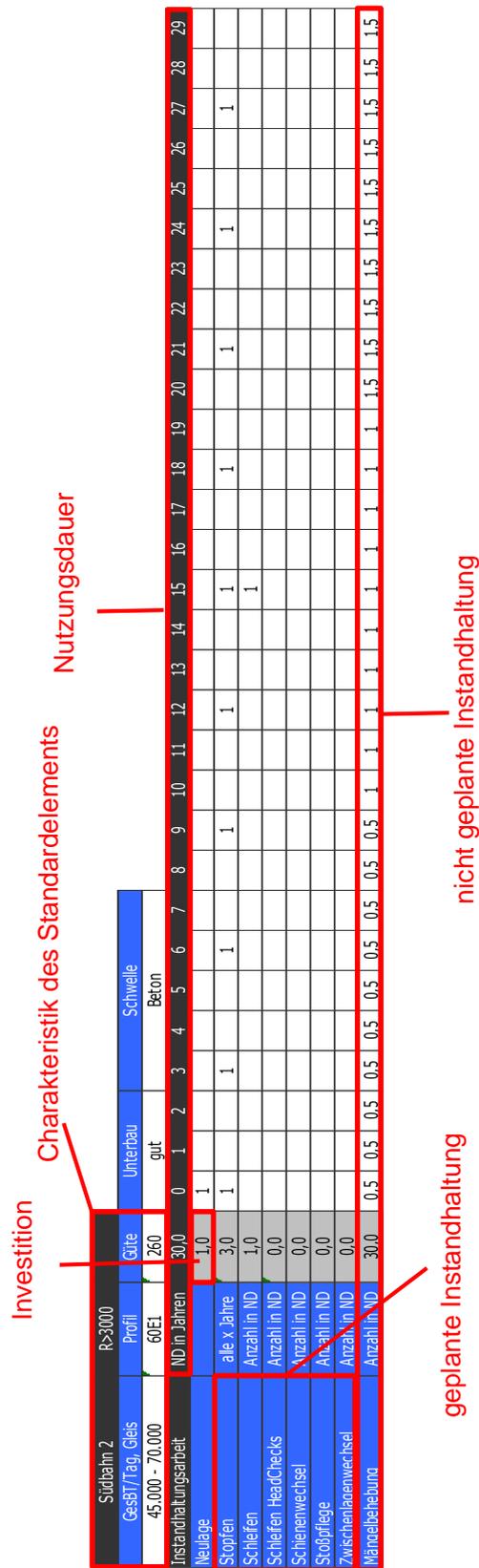


Abbildung 20: Beispiel für den Arbeitszyklus eines Standardelements<sup>91</sup>

<sup>91</sup> Vgl. VEIT, P.: Life Cycle Costing. Vorlesungsunterlagen. S. 56.

### 4.1.3 Zusammensetzung der Lebenszykluskosten

Abbildung 21 zeigt die Zusammensetzung der normalisierten Jahreskosten des Gleises in Abhängigkeit der Zugzahlen. Diese setzen sich dabei aus den Abschreibungskosten, welche den größten Anteil an den Gesamtkosten darstellen, den Instandhaltungskosten und den Betriebserscherniskosten zusammen. Bemerkenswert ist, dass letztere bereits ab einer Belastung von 100 Zügen pro Tag und Gleis die Instandhaltungskosten übersteigen. Bei einer Belastung von 150 Zügen pro Tag und Gleis verursachen die Betriebserscherniskosten bereits ein Drittel der gesamten Jahreskosten des Gleises und übersteigen somit die Kosten für Instandhaltung (17 %) deutlich.<sup>92</sup>

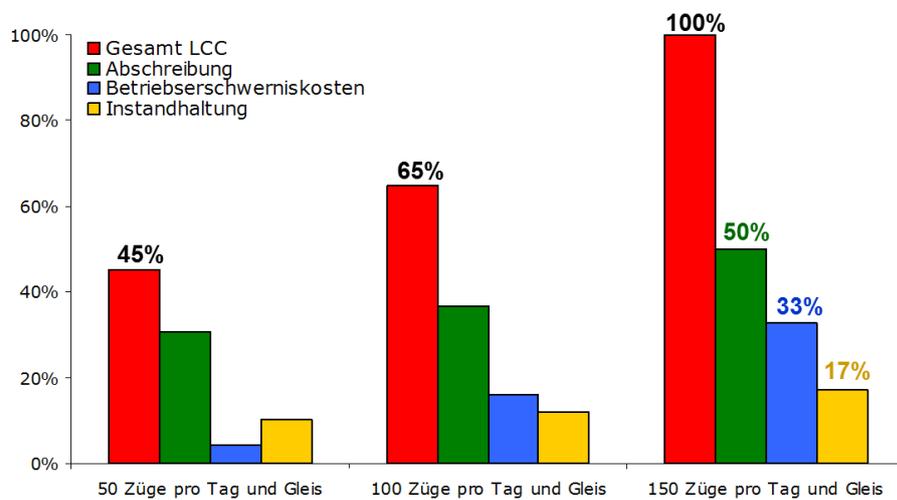


Abbildung 21: Zusammensetzung der normalisierten Jahreskosten, Oberbau - Gleise<sup>93</sup>

Grundsätzlich sind die Kosten für eine während der Nutzungsdauer durchgeführte Schotterbetteinigung den Instandhaltungskosten zuzurechnen. Die Ausführung der Maßnahme beeinflusst allerdings die anderen Kostenblöcke ebenfalls maßgeblich. So können die Abschreibungskosten der Anlage verringert werden, indem durch die Instandhaltungstätigkeit die Liegedauer des Gleises verlängert wird. Die Betriebserscherniskosten werden durch eine Schotterbetteinigung erhöht, da für die Durchführung der Maßnahme eine Gleissperre notwendig ist. Andererseits können Betriebserscherniskosten auch eingespart werden, wenn es durch eine Schotterbetteinigung gelingt, andere Instandhaltungstätigkeiten in größerem Umfang oder eine Langsamfahrstelle (LA) zu verhindern.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Betriebserscherniskosten, soll im Folgenden näher darauf eingegangen werden.

<sup>92</sup> Vgl. VEIT, P.: Infrastructure maintenance strategies. In: Rail International, 06/2002. S. 4.

<sup>93</sup> VEIT, P.: Life Cycle Costing. Vorlesungsunterlagen. S. 108.

#### 4.1.4 Betriebserschwerniskosten

##### Definition

Unter Betriebserschwerniskosten (BEK) kann die Gesamtheit von Zusatzkosten, Kostensteigerungen und Erlösrückgängen verstanden werden, die durch Behinderungen oder Störungen des Systems Eisenbahn im Vergleich zum ungestörten System entstehen. Da diese im Rahmen der Leistungserstellung anfallen, handelt es sich um echte Kosten bzw. Erlösrückgänge.<sup>94</sup>

Das generelle Problem der BEK liegt allerdings darin, dass diese oft

- nicht mit unmittelbarem Ortsbezug
- nicht in unmittelbarem Zeitbezug
- und nicht (ausschließlich) bei der sie verursachenden Organisationseinheit

auftreten.<sup>95</sup>

##### Ursachen

Wie aus Abbildung 22 ersichtlich wird, können die Ursachen für Betriebserschwerniskosten im Bereich der Infrastruktur bzw. in der Sphäre des Betriebs (EVU) liegen. Des Weiteren können diese durch Dritte verursacht werden.

Zudem kann eine Unterteilung in planbare und nicht planbare Ereignisse erfolgen.

---

<sup>94</sup> Vgl. VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerniskosten. Projektbericht. S. 3.

<sup>95</sup> Vgl. MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerniskosten - Definition, Berechnung, Anwendung. Präsentation in: Unterbau Experten Treffen. S. 10.

Infrastruktur	unzureichende Qualität des Fahrwegs → Dauerlangsamfahrstellen	geplant
	Bau- oder Instandhaltungsmaßnahmen	
Betrieb	Unvorhergesehenes (Oberleitungsbruch, Schienenbruch, Signalfehler)	ungeplant
	Verlängerung des Aufenthalts in Stationen	
	verspätete Übernahme von Zügen	
	langsam fahrende Fahrzeuge	
Dritte	Liegenbleiber	ungeplant
	Unfälle	

Abbildung 22: Ursachen von Betriebserschwerniskosten<sup>96</sup>

### Auswirkungen

Kommt es zu Betriebserschwernissen bzw. Störungen im Gesamtsystem Eisenbahn, ziehen diese zu einer Verspätungen und zum anderen Kapazitätsengpässe nach sich. Diese beiden Folgewirkungen beeinflussen sich gegenseitig, können sich hochschaukeln und in der Folge weitere betriebliche Konsequenzen verursachen:<sup>97,98</sup>

- Zugausfälle
- Ersatzverkehre
- Anschlussprobleme
- Zugbildungsprobleme
- Umleiten von Zügen

All diese betrieblichen Konsequenzen führen schließlich und endlich zu denselben monetären Konsequenzen:<sup>99</sup>

<sup>96</sup> VEIT, P.; PETRI, K.: Akutelle Kalkulation der Betriebserschwerniskosten. Präsentation in: Fahrwegoptimierung des Rad/Schiene-Systems - Neue europäische Randbedingungen. S. 3.

<sup>97</sup> Vgl. VEIT, P.; KLAUS, P.: Betriebserschwerniskosten - ein Baustein zur Systemoptimierung. In: ZEVrail, 05/2008. S. 168ff.

<sup>98</sup> Vgl. MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerniskosten - Definition, Berechnung, Anwendung. Präsentation in: Unterbau Experten Treffen. S. 5.

<sup>99</sup> Vgl. Ebenda. S. 6.

- betriebliche Mehraufwände
- negative Marktreaktionen (Erlösrückgänge)
- Pönalzahlungen

Diese Konsequenzen können berechnet und in Geldbeträgen angegeben werden. Aus der Summe dieser Beträge ergeben sich schlussendlich die gesamten Betriebserschwerniskosten.

Daneben entsteht durch Betriebserschwernisse ein erhöhter Organisationsaufwand (z.B. für zusätzliche Schulungen, Disposition).<sup>100</sup>

Wichtig ist festzuhalten, dass die Auswirkungen von Betriebserschwernissen und somit die Betriebserschwerniskosten stark von folgenden Faktoren abhängig sind:<sup>101,102</sup>

- Art und Dauer der Betriebsbehinderung
- Strecke (Belastung; eingleisig – mehrgleisig; Überleitstellenabstand)
- betroffene Zuggattungen
- Beeinflussbarkeit durch die Zugdisposition

### Anwendung<sup>103</sup>

Vorrangiges Ziel bei der Ermittlung von Betriebserschwerniskosten ist die Optimierung des gesamten Systems Eisenbahn, das sowohl die Infrastruktur als auch den Betrieb beinhaltet. Dabei ist es wesentlich zu wissen, wie hoch die BEK sind und von wem diese verursacht wurden.

Diesbezüglich können folgende bedeutende Anwendungsfälle genannt werden, in denen die Kenntnis und Berücksichtigung von BEK zu einer Gesamtsystemoptimierung beiträgt:

- Baubetriebsplanung und Sperrpausenoptimierung
- Definition des optimalen Überleitstellenabstandes
- Fahrwegstrategien
- Bewertung der Verfügbarkeit von Infrastruktur
- Qualitätsabhängige Preisbildung von Fahrplantrassen

<sup>100</sup> Vgl. VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerniskosten. Projektbericht. S. 4.

<sup>101</sup> Vgl. MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerniskosten - Definition, Berechnung, Anwendung. Präsentation in: Unterbau Experten Treffen. S. 5.

<sup>102</sup> Vgl. VEIT, P.; KLAUS, P.: Betriebserschwerniskosten - ein Baustein zur Systemoptimierung. In: ZEVrail, 05/2008. S. 168ff.

<sup>103</sup> Vgl. Ebenda.

## 4.2 Auswahl der Standardelemente

Theoretisch könnten alle existierenden Parameter miteinander kombiniert werden, was eine Vielzahl an unterschiedlichen Standardelementen hervorbringen würde. In Tabelle 1 sind alle Parameter aufgelistet, die theoretisch zur Bildung von Standardelementen herangezogen werden können. Würden all diese Parameter miteinander kombiniert werden, ergäbe dies 18.144 mögliche Standardelemente.<sup>104</sup>

Tabelle 1: Parameterausprägungen zur Bildung von Standardelementen<sup>105</sup>

Verkehrsbelastung [GBT/Tag, Gleis]	Gleisanzahl	Schienenprofil	Schienenstahlgüte	Schwelle	Radius [m]	Schienen	Unterbauqualität
> 80,000	1	60E1	R350HT	Beton besohlt	> 3000 m	verschweißt	gut
50,000 - 80,000	2	54E2	R260	Beton	1500 m - 3000 m	gestoßen	U3
30,000 - 50,000	2 + 2	49E1	R200	Holz	600 m - 1500 m		U4
15,000 - 30,000					400 m - 600 m		U5
8,000 - 15,000					250 m - 400 m		
2,000 - 8,000					< 250 m		
< 2,000							

Da es aber nicht sinnvoll ist alle theoretisch möglichen Kombinationen zu erstellen, weil dies zu nicht realistischen Zusammenstellungen führt, ergeben sich rund 300 Standardelemente, die für die Praxis relevant sind.<sup>106</sup>

Allerdings befinden sich auch unter diesen 300 Ausprägungssets zahlreiche Kombinationen, die bezogen auf die Menge der ihnen zugeordneten Gleiskilometer eine untergeordnete Rolle spielen. Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Auswahl getroffen, für welche Standardelemente eine Auswertung bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Schotterbetteinigungen durchgeführt werden soll.

Da die Schwellenart einen wesentlichen Einfluss auf den Verschleiß des Schotters hat, erfolgt die Auswahl getrennt nach den drei vorwiegend eingebauten Schwellentypen:

- Beton
- Beton besohlt
- Holz

In einem ersten Schritt wurden die Standardelemente neben der Schwellenart auch aufgrund der folgenden Parameter unterschieden:

- Belastungsklasse
- Radienklasse
- Schienenprofil/Schienenengüte
- Gleisanzahl

<sup>104</sup> Vgl. VEIT, P.: Life Cycle Costing. Vorlesungsunterlagen. S. 53.

<sup>105</sup> Ebenda.

<sup>106</sup> Vgl. Ebenda. S. 54.

### 4.2.1 Beton

Aufgrund der sehr steifen Materialeigenschaften, sind Gleise mit unbesohlenen Betonschwellen bezüglich des Schotterverschleißes besonders relevant. Dies gilt insbesondere für stark belastete Strecken. Da bei Gleisen mit Betonschwellen der Schotter sehr oft das kritische Element des Oberbaus darstellt, ist die Frage ob, eine Schotterbettreinigung während des Lebenszyklus sinnvoll ist, oder eine Re-Investition die wirtschaftlichere Variante darstellt, von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund soll in den nachfolgenden Auswertungen der Fokus auf Gleise mit unbesohlenen Betonschwellen gerichtet werden.

Bei der Auswahl der Standardelemente, welche ausgewertet werden sollen, wurde eine Liste mit allen Standardelementen erstellt, welche seit dem Jahr 1990 eingebaut worden sind. Das Jahr 1990 wurde gewählt, da für Gleise, die danach eingebaut worden sind, eine durchgehende Schotterbettreinigung eine sinnvolle Instandhaltungsmaßnahme darstellen könnte.

Anschließend wurden von den insgesamt 231 vorhandenen Standardelementen mit Betonschwellen jene ausgewählt, von denen seit 1990 zumindest 4 km verbaut wurden, was eine Anzahl von 54 Parameterkombinationen ergab. Von diesen konnten schließlich 49 Standardelemente für die Auswertung herangezogen werden. Die verbliebenen 5 Parameterkombinationen waren aufgrund von unbekanntem oder nicht in den Standardelementen vorkommenden Schientypen bzw. -güten keinem Standardelement zuordenbar.

Seit dem Jahr 1990 wurden insgesamt rund 1.900 km Gleis mit Betonschwellen verbaut. Mit den für die Auswertung ausgewählten Standardelementen werden 1.723 km oder 91 % davon abgedeckt.

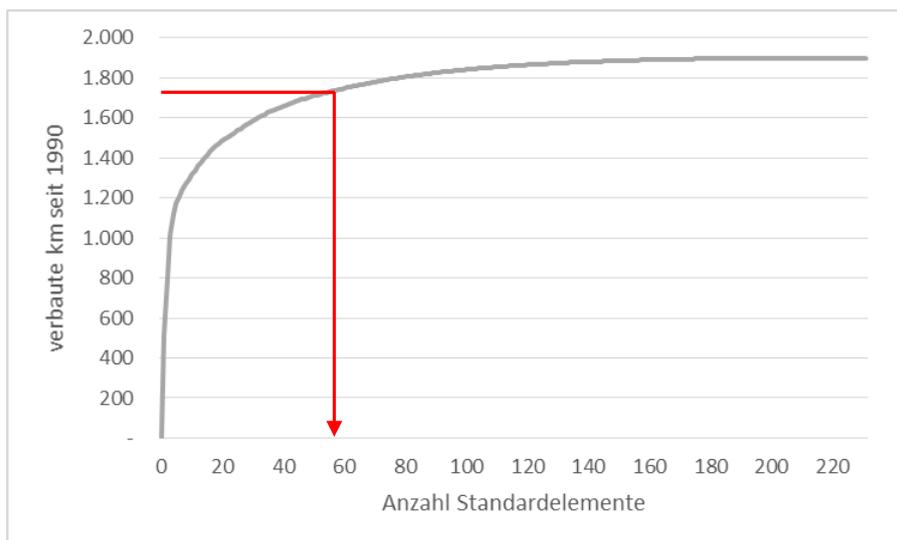
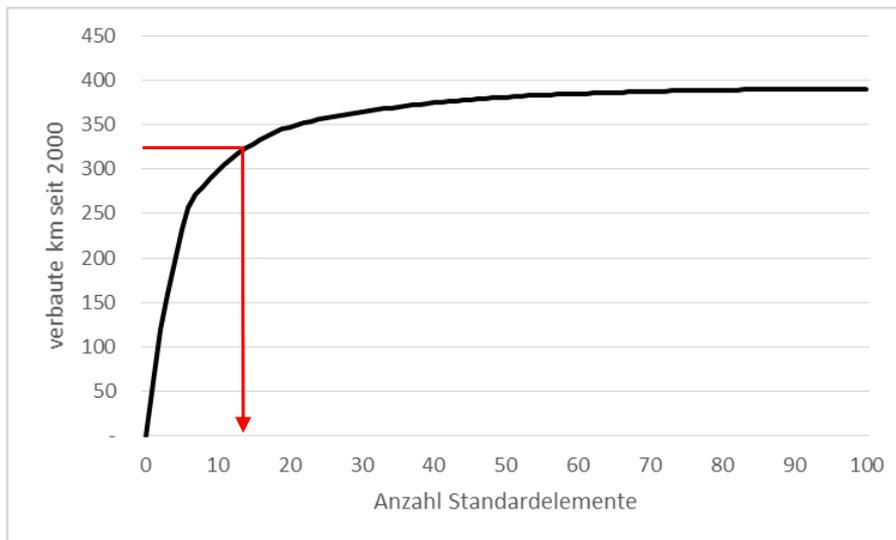


Abbildung 23: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit Betonschwellen im TUG-Netz (Einbau ab 1990)

## 4.2.2 Beton besohlt

Im Gegensatz zu herkömmlichen Betonschwellen weisen besohlte Betonschwellen elastischere Materialeigenschaften auf. Dadurch erhöht sich die lastverteilende Wirkung der Schwellen und der Schotter wird weniger beansprucht. Zusätzlich ergibt sich durch die Besohlung eine größere Anzahl von Kontaktflächen zwischen Schwelle und Schotter und eine Abschwächung der dynamischen Kräfte und Schwingungen im Schotter wird erreicht.<sup>107</sup> Erste besohlte Betonschwellen wurden in Österreich ab 2001 eingebaut. Ein Bestandteil der Investitionsstrategie wurden besohlte Betonschwellen – bei erhöhten Belastungen sowie in engen Radien – ab dem Jahr 2009. Eine erste technisch-wirtschaftliche Untersuchung zeigte, dass sich durch den Einsatz besohlter Betonschwellen sowohl die Instandhaltungszyklen als auch die Nutzungsdauern der gesamten Gleisanlage aufgrund des reduzierten Schotterverschleißes deutlich verlängern lassen.<sup>108</sup> Das bedeutet, dass Gleise mit besohnten Betonschwellen in Zukunft deutlich weniger Bedarf an Schotterbettreinigungen haben sollten.

Um den Vergleich mit herkömmlichen Betonschwellen anstellen zu können, wurden von den insgesamt 100 vorhandenen Standard-elementen mit besohnten Betonschwellen jene ausgewählt, von denen bis jetzt zumindest 5 km eingebaut wurden. Dies führte zur Betrachtung von 14 Parameterkombinationen. Insgesamt wurden bisher 390 km Gleis mit besohnten Betonschwellen eingebaut. Mit der aktuellen Auswahl werden 324 km oder 83 % aller eingebauten Gleise erfasst.



**Abbildung 24: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit besohnten Betonschwellen im TUG-Netz**

<sup>107</sup> Vgl. GETZNER WERKSTOFF GMBH: Schwellensohlen für den Schotteroberbau. Brochure. S. 5.

<sup>108</sup> Vgl. MARSCHNIG, S.; BERGHOLD, A.: Besohlte Schwellen im netzweiten Einsatz. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 05/2011. S. 2ff.

### 4.2.3 Holz

Ebenso wie bei Gleisen mit besohlenen Betonschwellen ist auch bei Anlagen mit Holzschwellen das verschmutzte Schotterbett bzw. die oft notwendige Schotterbettreinigung nicht das zentrale Thema in der Instandhaltung. Dies liegt einerseits in den – im Vergleich zu Betonschwellen – elastischeren Materialeigenschaften und der damit verbundenen verbesserten Lastverteilung begründet. Andererseits ist die erreichbare Nutzungsdauer bei Holzschwellengleisen geringer, da das kritische Element, das eine Re-Investition bzw. teure Instandhaltungsmaßnahmen auslöst, bei dieser Konfiguration oft die Schwelle selbst und nicht der Schotter ist.

Dennoch sollen auch die wichtigsten Standardelemente für Holzschwellengleise in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit sowie den aktuellen und zukünftigen Bedarf von Schotterbettreinigungen ausgewertet werden.

Dabei wurden von den insgesamt 183 vorhandenen Standardelementen mit Holzschwellen jene ausgewählt, von denen seit 2000 zumindest 3 km verbaut wurden, was eine Anzahl von 16 Parameterkombinationen ergab. Das Jahr 2000 wurde ausgewählt, da Holzschwellengleise, die nach 2000 eingebaut wurden, aufgrund der strategischen Nutzungsdauer – welche im Allgemeinen kürzer als bei Betonschwellengleisen ist – für eine wirtschaftlich sinnvolle Schotterbettreinigung in Frage kommen würden.

Seit dem Jahr 2000 wurden insgesamt rund 191 km Gleis mit Holzschwellen verbaut. Mit den für die Auswertung ausgewählten Standardelementen werden 123 km oder 64 % davon abgedeckt.

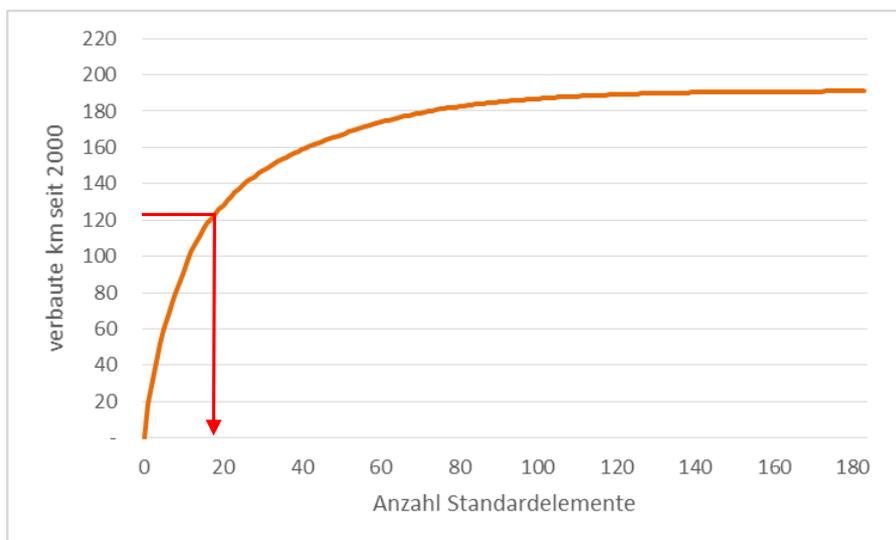


Abbildung 25: Verteilung der Standardelemente für Gleise mit Holzschwellen im TUG-Netz (ab 2000)

## 5 Wirtschaftlichkeit der Schotterbettreinigung

Das Ziel des folgenden Kapitels ist es, für die zuvor ausgewählten Standardelemente das kritische Jahr zu berechnen, bis zu dem eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist bzw. ab dem eine Re-Investition des gesamten Oberbaus die wirtschaftlichere Alternative darstellt, wenn der Schotterzustand entsprechend schlecht ist und eine Bettungsreinigung erfordert.

### 5.1 Methodik – Wirtschaftlichkeitsrechnung

#### 5.1.1 Berechnungsverfahren

Muss eine Entscheidung zwischen verschiedenen (Re-)Investitions-Varianten getroffen, bzw. eine (Re-)Investition mit anderen möglichen Alternativen, wie zum Beispiel der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten, verglichen werden, geschieht dies unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:<sup>109</sup>

- Wirtschaftlichkeit
- Risiko
- Rentabilität
- Liquidität
- Sonstige Kriterien (z.B. soziale bzw. ethische Wertvorstellungen)

Abbildung 26 gibt eine Übersicht über die möglichen Berechnungsmethoden, die zum Vergleich verschiedener Szenarien herangezogen werden können.

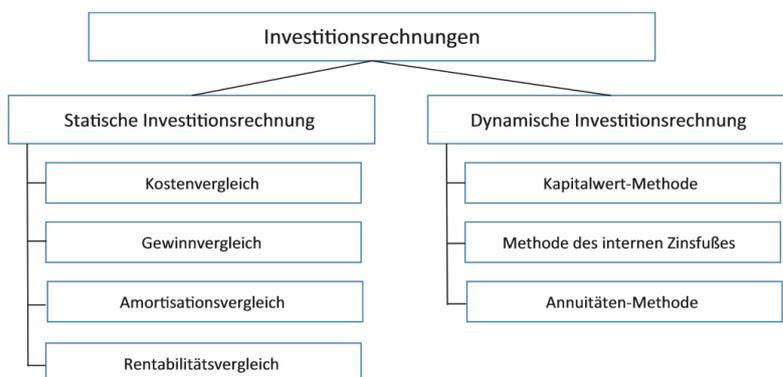


Abbildung 26: Verfahren der Investitionsrechnung<sup>110</sup>

<sup>109</sup> Vgl. HERING, E.: Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. S. 2f.

<sup>110</sup> HERING, E.: Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. S. 3.

In der gegenständlichen Arbeit sollen die Kosten und hierbei die gesamten Lebenszykluskosten eines Standardelements für die folgenden zwei Fälle betrachtet und miteinander verglichen werden:

- Die Gleisanlage wird re-investiert.
- Es wird eine durchgehende Schotterbettreinigung durchgeführt und die Gleisanlage wird erst bei Erreichen der strategischen Nutzungsdauer re-investiert. Dabei wird berücksichtigt, dass sich ein etwaig vor der Schotterbettreinigung verdichtetes Stopfintervall nach Durchführung der Maßnahme wieder verlängert.

Die Kosten werden dabei auf ein Jahr bezogen, was den Vorteil mit sich bringt, dass Standardelemente mit unterschiedlichen Nutzungsdauern verglichen werden können.

Die beiden oben genannten Szenarien werden für jedes Jahr des Lebenszyklus untersucht und miteinander verglichen. Am Beginn des Lebenszyklus wird aufgrund der hohen Abschreibungskosten die Schotterbettreinigung die wirtschaftlichere Variante darstellen. Wird die Anlage länger genutzt, verringern sich die jährlichen Kosten zusehends, da bei der Berechnung der Abschreibung die Investitionskosten auf mehrere Jahre aufgeteilt werden. Aufgrund dessen ergibt sich im Lebenszyklus schließlich ein kritisches Jahr, ab dem es wirtschaftlicher ist, eine Re-Investition durchzuführen, anstatt das Schotterbett zu reinigen.

Die in der durchgeführten Wirtschaftlichkeitsrechnung verwendeten Kostensätze für Gleisneulagen sowie Instandhaltungsmaßnahmen, wurden vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz im Rahmen zahlreicher Projekte in den letzten Jahren ermittelt und immer wieder aktualisiert. Die Berechnung für ein Standardelement wird sowohl statisch als auch dynamisch durchgeführt.

### 5.1.2 Statische Berechnung

Bei den statischen Wirtschaftlichkeitsrechnungen wird der Zeitpunkt der jeweiligen Zahlung nicht berücksichtigt und es wird von konstanten Geldwerten ausgegangen. Das bedeutet, dass es zu keiner Verzinsung des eingesetzten Kapitals kommt.<sup>111</sup>

Für die gegenständliche Untersuchung wurde die Methode der Kostenvergleichsrechnung gewählt. Dabei werden alle Kosten (Investitionskosten, Instandhaltungskosten, Betriebserschwerungskosten), die im Lebenszyklus anfallen, durch die erreichte Nutzungsdauer dividiert:

---

<sup>111</sup> Vgl. VEIT, P.: Betriebswirtschaftslehre Bau - Kostenrechnung, Investition. Vorlesungsskriptum. S. 111.

$$\text{durchschnittliche Jahreskosten} = \frac{\text{Kosten während des Lebenszyklus}}{\text{erreichte Nutzungsdauer}}$$

Das Ergebnis sind die durchschnittlichen jährlichen Kosten, die für beide Varianten verglichen werden können.

### 5.1.3 Dynamische Berechnung

Im Gegensatz zu den statischen Verfahren wird bei der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung der Zeitpunkt der Zahlung mitberücksichtigt. Das bedeutet, dass die Kapitalbindungskosten in die Rechnung eingehen und alle Ein- bzw. Auszahlungen auf ein gewähltes Basisjahr auf- oder abgezinst werden.<sup>112</sup>

Für die gegenständliche Auswertung wurde die Annuitäten-Methode gewählt. Diese bezieht sich wiederum auf ein durchschnittliches Nutzungsjahr und macht Standardelemente mit verschiedenen Nutzungsdauern vergleichbar. Die Annuitäten errechnen sich dabei wie folgt:<sup>113</sup>

$$\text{Annuität} = K_0 * KWF$$

mit:

$K_0$  = Kapitalwert

KWF = Kapitalwiedergewinnungsfaktor

$$KWF = \frac{(1+i)^t * i}{(1+i)^t - 1}$$

mit:

t = Betrachtungszeitraum

i = Zinssatz

$$K_0 = \sum_{i=1}^n BW_n$$

mit:

BW = Barwert

$$BW = ZW * (1+i)^{-t}$$

mit:

ZW = Zeitwert der Auszahlung

t = Zeitpunkt der Auszahlung

i = Zinssatz

<sup>112</sup> Vgl. HEESEN, B.: Investitionsrechnung für Praktiker - Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen. 2. Auflage.. S. 15f.

<sup>113</sup> Vgl. GÖTZE, U.: Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage.. S. 74ff.

Da – wie eingangs schon erwähnt – lediglich Kosten verglichen werden sollen, werden nur Auszahlungen berücksichtigt und es handelt sich beim Berechnungsergebnis um reine Kostenannuitäten.

Für die Untersuchung wurde das Jahr der Investition als Bezugsjahr verwendet, auf das alle im Laufe des Lebenszyklus anfallenden Kosten mit einem kalkulatorischen Zinssatz von 5 % abgezinst wurden.

## 5.2 Beispiel

Die Berechnung des kritischen Jahres für die Schotterbettreinigung während des Lebenszyklus (strategische Nutzungsdauer des Standardelements) wird im Folgenden anhand eines Beispiels erklärt.

Für das Beispiel wurde jenes Standardelement ausgewählt, das im Netz der ÖBB am häufigsten vorkommt:

- Betonschwellen
- Belastung: 45.000 – 70.000 GesBt/Tag
- Radius > 600 m
- Schienenprofil 60E1
- Schienengüte R260
- 2 Gleise
- Strategische Nutzungsdauer: 30 Jahre

Es wird nun berechnet, wie hoch die durchschnittlichen Jahreskosten bzw. die Annuitäten sind, wenn das Gleis in einem bestimmten Jahr ausgebaut und re-investiert wird. Diese Berechnung wird für jedes Jahr des Lebenszyklus des jeweiligen Standardelements durchgeführt.

Ebenso wird berechnet, wie hoch die jährlichen Kosten bzw. die Annuitäten sind, wenn die strategische Nutzungsdauer genau erreicht wird, während des Lebenszyklus allerdings eine Schotterbettreinigung notwendig ist. Das Jahr in dem die Schotterbettreinigung durchgeführt wird, wird dabei ebenso für jedes Jahr des Lebenszyklus variiert, wie dies für die Re-Investition geschehen ist.

Beim Szenario in dem die Schotterbettreinigung durchgeführt wird, wurde berücksichtigt, dass sich der Stopfzyklus nach der Reinigung wieder auf den Zyklus eines neuen Gleises verlängert. Dies hatte beim gegenständlichen Standardelement wenig Einfluss, da der Stopfzyklus über die Nutzungsdauer konstant drei Jahre beträgt.

Das Ergebnis der statischen und dynamischen Berechnung ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Vergleich der Szenarien Re-Investition und REI für ein Standardelement (statisch und dynamisch)

Schildbahn 2 Gesamtkosten-Gehalt	RS-600 Pordel		Ecke		100 in Jahren = 30,0 Umsatzbau												Szenarielle Beton																		
	0	260	1	260	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
45.000 - 70.000	635.117	317.971	212.256	164.211	131.534	109.749	96.939	84.925	75.590	70.038	65.813	58.731	51.868	48.520	47.288	44.604	42.218	41.096	39.123	37.378	36.467	35.180	33.838	33.334	32.147	31.048	30.715	29.741	28.833	28.530	28.530	28.530	28.530	28.530	
LCC ohne REI	37.888	38.530	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530	37.888	38.530
LCC mit REI	666.872	341.991	233.784	184.434	151.213	129.109	115.841	103.801	94.466	88.631	82.515	77.439	74.307	70.604	67.412	65.841	63.360	61.174	59.885	58.127	56.572	55.695	54.414	53.250	52.612	51.633	50.736	50.258	49.494	48.788	48.530	48.530	48.530	48.530	
Annuität ohne REI	66.460	66.534	65.412	64.054	64.132	63.616	61.975	62.056	61.243	60.180	60.263	59.574	58.628	58.715	58.133	57.289	57.377	56.887	56.131	56.221	56.811	55.311	55.223	54.882	54.267	54.360	54.079	53.857	53.615	53.385	53.615	53.385	53.615	53.385	
Annuität mit REI																																			

Wird der Verlauf der jährlichen Kosten in einem Diagramm aufgetragen, so ergeben sich die Kurven in Abbildung 27.

Die blaue Kurve zeigt dabei die durchschnittlichen jährlichen Kosten, wenn das Gleis im jeweiligen Jahr re-investiert wird. Diese Kurve fällt anfangs stark ab und wird danach immer flacher. Dies liegt daran, dass die jährlichen Abschreibungskosten bei sehr kurzen Nutzungsdauern sehr hoch sind. Wird die Anlage länger genutzt, verteilen sich die Abschreibungskosten auf eine größere Anzahl von Jahren und die Kurve wird flacher. Das bedeutet, dass die Einsparungen, die durch eine Nutzungsdauerverlängerung erreicht werden können, am Ende des Lebenszyklus nur mehr gering sind.

Die rote Kurve beschreibt den Verlauf der durchschnittlichen Jahreskosten, wenn davon ausgegangen wird, dass genau die strategische Nutzungsdauer erreicht wird, allerdings während der Nutzungsdauer im jeweiligen Jahr eine Schotterbettreinigung durchzuführen ist. Diese Kurve verläuft bei der statischen Betrachtung nahezu horizontal. Kleine Abweichungen vom horizontalen Verlauf ergeben sich lediglich durch die Veränderung des Stopfzyklus durch die Schotterbettreinigung. Die Kurve für die dynamische Betrachtung hat einen leicht fallenden Verlauf. Das bedeutet, dass die Annuitäten sinken, da die Kosten für die Schotterbettreinigung stärker abgezinst werden, umso später die Reinigung durchgeführt wird.

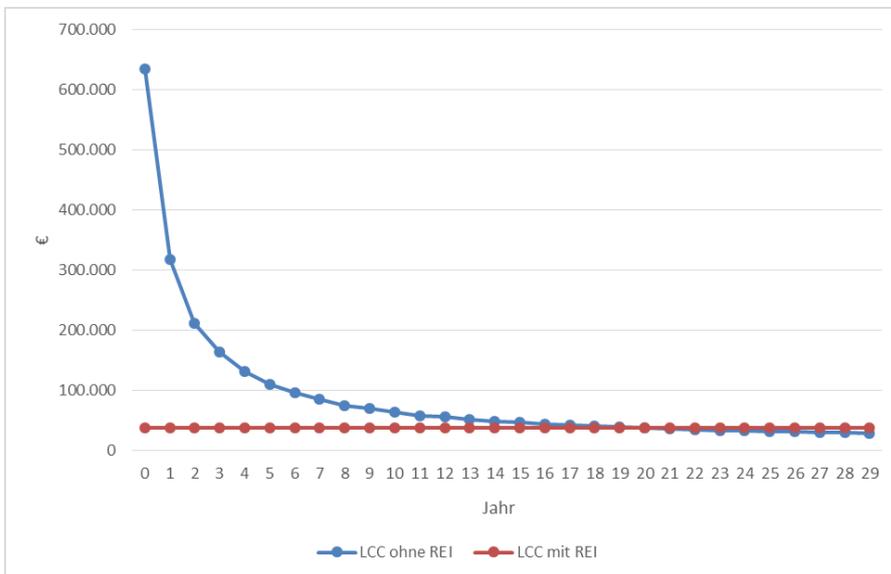


Abbildung 27: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung; statisch

Wie aus Tabelle 2 und Abbildung 27 erkannt werden kann, ist es zu Beginn des Lebenszyklus wirtschaftlich sinnvoller eine Schotterbettreinigung durchzuführen, um die strategische Nutzungsdauer zu erreichen, als das gesamte Gleis zu re-investieren. Ab einem bestimmten Jahr im Lebenszyklus – dem Schnittpunkt der beiden Kurven in Abbildung 27 – ist schließlich die Re-Investition die wirtschaftlichere Variante. In Abbildung 28 und Abbildung 29 ist der Bereich, in dem sich der Schnittpunkt und folglich das kritische Jahr befindet, für die statische und die dynamische Betrachtung dargestellt.

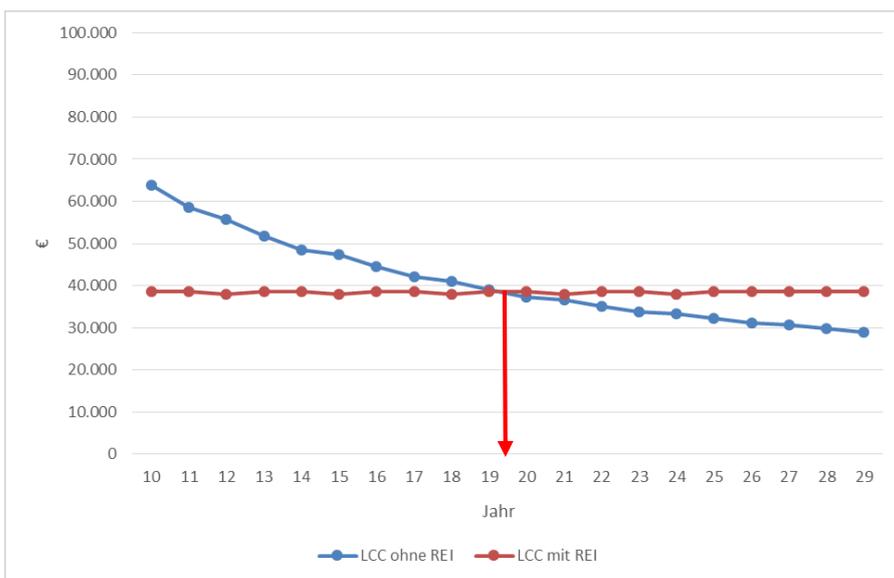


Abbildung 28: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung (statisch)

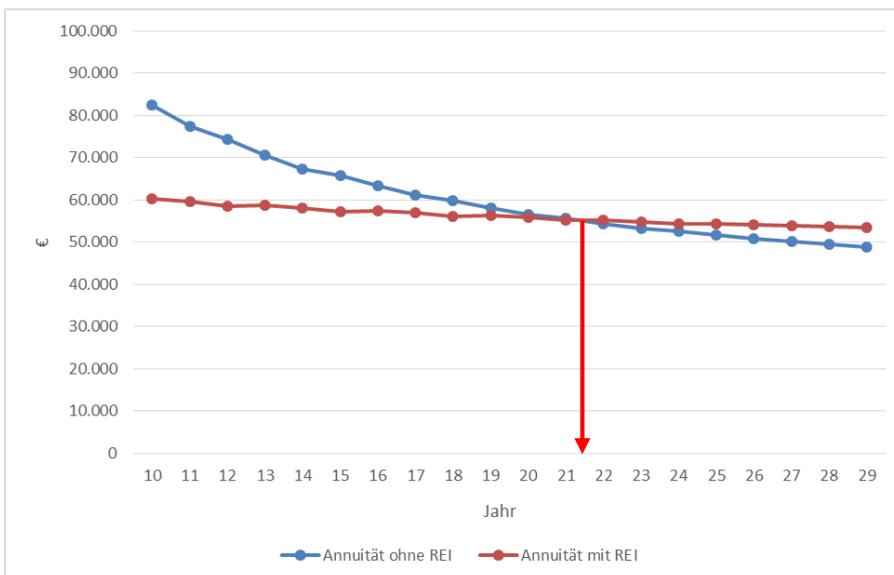


Abbildung 29: Verläufe der Kostenkurven für die Szenarien Re-Investition und Schotterbettreinigung (dynamisch)

Tabelle 3 zeigt die Beträge der durchschnittlichen Jahreskosten bzw. der Annuitäten um die jeweiligen kritischen Jahre für alle Szenarien.

**Tabelle 3: Vergleich der Szenarien Re-Investition und REI für ein Standardelement (statisch und dynamisch)**

	18	19	20	21	22	23
Re-Investition statisch	41.096	39.123	37.378	36.667	35.180	33.818
REI statisch	37.888	38.530	38.530	37.888	38.530	38.530
Re-Investition dynamisch	59.885	58.127	56.572	55.695	54.414	53.250
REI dynamisch	56.131	56.221	55.811	55.131	55.223	54.882

Daraus geht hervor, dass für die statische Berechnung ab dem Jahr 20 eine durchgehende Schotterbettreinigung wirtschaftlich nicht mehr sinnvoll ist. Ab diesem Jahr reichen die Kosten, die durch eine Verlängerung der Nutzungsdauer eingespart werden können, nicht mehr aus, um die Kosten für die Schotterbettreinigung zu kompensieren. Mit anderen Worten bedeutet das, dass bei einem entsprechend schlechten Schotterzustand bis zum Jahr 19 eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist und ab dem Jahr 20 die Re-Investition der gesamten Anlage die bessere Alternative darstellt. Da mit dem Jahr 0 das Jahr der Investition mitberücksichtigt werden muss, ist die Schotterbettreinigung auch noch im 20. Jahr wirtschaftlich sinnvoll.

Das bedeutet, dass eine Schotterbettreinigung genau bis zwei Drittel der strategischen Nutzungsdauer (bis 20 von 30 Jahren) durchgeführt werden soll, wenn es der Schotterzustand erfordert. Danach ist eine Re-Investition sinnvoller.

Bei der dynamischen Betrachtung verschiebt sich das kritische Jahr um zwei Jahre nach hinten. Das liegt daran, dass die Kosten für die Schotterbettreinigung abgezinst werden und somit weniger stark ins Gewicht fallen. Wird das Ergebnis aufgrund der Annuitäten herangezogen, ist die Schotterbettreinigung also bis inklusive dem 22. Jahr (73 % des Lebenszyklus) wirtschaftlich sinnvoll.

### 5.3 Ergebnisse

Die Berechnung, bis zu welchem Jahr des Lebenszyklus – bei entsprechend schlechtem Schotterzustand – eine Bettungsreinigung als Instandhaltungstätigkeit wirtschaftlich sinnvoll ist bzw. ab wann eine Re-Investition die wirtschaftlichere Variante darstellt, wurde wie im Beispiel beschrieben, für alle in Kapitel 4.2 ausgewählten Standardelemente durchgeführt. In den folgenden Tabellen sind alle Ergebnisse getrennt nach Schwellenart dargestellt. Dabei sind das Jahr, bis zu dem die Schotterbettreinigung sinnvoll ist, sowie die strategische Nutzungsdauer sowohl absolut als auch relativ ersichtlich.

Tabelle 4: Ergebnisse Betonschwellengleise (statische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Anzahl Gleise				Eingleisig				Zweigleisig					
	Schwellentyp		Schienenform		Schienenlänge		Schienenform		Schwellentyp		Schienenform		Schienenlänge	
	60E1	R260	350HT	R260	54E2	350HT	R260	60E1	350HT	R260	350HT	54E2	350HT	R260
<b>&gt;70.000</b>	R>600													
	400<R<600													
	250<R<400													
	R<250													
<b>45.000 - 70.000</b>	R>600	19/30 (63%)		19/30 (63%)			16/25 (64%)	20/30 (67%)						16/25 (64%)
	400<R<600						16/24 (67%)	19/28 (68%)						
	250<R<400							16/25 (64%)						
	R<250													
<b>30.000 - 45.000</b>	R>600	23/36 (64%)		23/36 (64%)			21/32 (66%)	25/36 (69%)						21/32 (66%)
	400<R<600							23/34 (68%)						
	250<R<400							18/28 (64%)						
	R<250													
<b>15.000 - 30.000</b>	R>600	27/40 (68%)		27/40 (68%)			23/36 (64%)	28/40 (70%)						25/36 (69%)
	400<R<600						22/34 (65%)	25/36 (69%)						23/34 (68%)
	250<R<400						15/28 (54%)	17/28 (61%)						21/30 (70%)
	R<250													
<b>8.000 - 15.000</b>	R>600	29/43 (67%)		29/43 (67%)			28/43 (65%)							29/43 (67%)
	400<R<600						26/40 (65%)							27/40 (68%)
	250<R<400						28/38 (74%)							
	R<250													

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Tabelle 5: Ergebnisse Betonschwellengleise (dynamische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Eingleisig				Zweigleisig			
	60E1		54E2		60E1		54E2	
	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform
	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260
	R>600					18/25 (69%)		
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
	R>600	19/30 (73%)	19/30 (73%)	16/25 (68%)	22/30 (73%)	22/30 (73%)	21/32 (72%)	16/25 (68%)
	400<R<600			16/24 (71%)	19/28 (71%)	19/28 (71%)		
	250<R<400				16/25 (64%)	15/25 (64%)		
	R<250							
	R>600	23/36 (72%)	23/36 (72%)	21/32 (69%)	25/36 (75%)	25/36 (75%)	21/32 (72%)	21/32 (72%)
	400<R<600				23/34(76%)	23/34 (74%)		
	250<R<400				18/28 (64%)	17/28 (64%)		
	R<250							
	R>600	27/40 (75%)	27/40 (75%)	23/36 (72%)	28/40 (78%)	27/40 (75%)	25/36 (75%)	25/36 (75%)
	400<R<600				25/36 (75%)	25/36 (75%)		23/34 (76%)
	250<R<400				24/34 (76%)	25/34 (76%)		21/30 (77%)
	R<250							
	R>600	29/43 (77%)	28/43 (74%)	28/43 (74%)				29/43 (77%)
	400<R<600	27/40 (75%)	27/40 (75%)	26/40 (75%)				27/40 (75%)
	250<R<400	28/38 (74%)	29/38 (76%)	29/38 (76%)				
	R<250							

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Tabelle 6: Ergebnisse Gleise mit besohlenen Betonschwellen (statische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Eingleisig				Zweigeisig			
	60E1		54E2		60E1		54E2	
	Schwellentyp	Beton besohlt						
	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260
<b>&gt; 70.000</b>	R>600							
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
<b>45.000 - 70.000</b>	R>600				29/42 (69%)	28/42 (67%)		
	400<R<600							
	250<R<400				23/31 (74%)			
	R<250							
<b>30.000 - 45.000</b>	R>600	33/50 (66%)			34/50 (68%)	34/50 (68%)		
	400<R<600				29/43 (67%)			
	250<R<400							
	R<250							
<b>15.000 - 30.000</b>	R>600	34/50 (68%)			35/50 (70%)	35/50 (70%)		
	400<R<600				33/47 (70%)			
	250<R<400	25/36 (69%)			26/36 (72%)			
	R<250							
<b>8.000 - 15.000</b>	R>600	34/50 (68%)						
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Tabelle 7: Ergebnisse Gleise mit besohlenen Betonschwellen (dynamische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Eingleisig				Zweigleisig				
	60E1		54E2		60E1		54E2		
	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform	Schwellentyp	Schienenform	
	R>600	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260	350HT	R260
<b>&gt;70.000</b>	400<R<600								
	250<R<400								
	R<250								
	R>600					33/42 (79%)		33/42 (79%)	
<b>45.000 - 70.000</b>	400<R<600								
	250<R<400					23/31 (74%)			
	R<250								
	R>600		38/50 (76%)			40/50 (80%)		39/50 (78%)	
<b>30.000 - 45.000</b>	400<R<600								
	250<R<400								
	R<250								
	R>600		39/50 (78%)			40/50 (80%)		40/50 (80%)	
<b>15.000 - 30.000</b>	400<R<600								
	250<R<400		28/36 (75%)			38/47 (81%)		29/36 (81%)	
	R<250								
	R>600		39/50 (78%)						
<b>8.000 - 15.000</b>	400<R<600								
	250<R<400								
	R<250								
	R>600								

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Tabelle 8: Ergebnisse Holzschwellengleise (statische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Eingleisig				Zweigleisig			
	60E1		54E2		60E1		54E2	
	Schwellentyp	Schwellenform	Schwellentyp	Schwellenform	Schwellentyp	Schwellenform	Schwellentyp	Schwellenform
>70.000	R>600	350HT	R260	350HT	350HT	R260	350HT	R260
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
45.000 - 70.000	R>600					20/30 (67%)	17/25 (68%)	17/25 (68%)
	400<R<600							
	250<R<400					15/25 (60%)	15/22 (68%)	
	R<250							
30.000 - 45.000	R>600					25/35 (71%)	25/35 (71%)	22/32 (69%)
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
15.000 - 30.000	R>600					25/35 (71%)	25/35 (71%)	25/35 (71%)
	400<R<600					25/35 (71%)		
	250<R<400					24/34 (71%)		
	R<250							
8.000 - 15.000	R>600					23/35 (66%)		
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Tabelle 9: Ergebnisse Holzschwellengleise (dynamische Betrachtung)

Verkehrsbelastung/Radius	Eingleisig				Zweigleisig			
	Anzahl Geise		Schwellentyp		Anzahl Geise		Schwellentyp	
	60E1	R260	54E2	R260	60E1	R260	54E2	R260
	350HT		350HT		350HT		350HT	
	R>3000							
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
	R>3000				22/30 (73%)		19/25 (76%)	18/25 (72%)
	400<R<600							
	250<R<400				16/25 (64%)		16/22 (73%)	
	R<250							
	R>3000			23/32 (72%)		26/35 (74%)		23/32 (72%)
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							
	R>3000					27/35 (77%)		26/35 (74%)
	400<R<600					26/35 (74%)		
	250<R<400					26/34 (76%)		
	R<250							
	R>600	26/35 (74%)						
	400<R<600							
	250<R<400							
	R<250							

kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung/strategische Nutzungsdauer

Grundsätzlich ist es bei der Interpretation der Ergebnisse schwierig, generelle, allgemein gültige Aussagen zu tätigen. Dies liegt darin begründet, dass die Lebenszyklen der verschiedenen Standardelemente stark unterschiedlich sind, was folglich zu stark unterschiedlichen Kostenentwicklungen führt. Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale der Standardelemente, welche wesentlichen Einfluss auf die Kostenentwicklung haben, sind:

- Nutzungsdauer
- Investitionskosten
- Notwendige Instandhaltungsmaßnahmen
- Betriebserschwerungskosten

Die unterschiedliche Ausprägung dieser Merkmale kann beim Vergleich verschiedener Standardelemente dazu führen, dass sich deren Effekte gegenseitig addieren oder aber auch gegenseitig aufheben.

Dennoch können einige allgemein gültige Aussagen getroffen werden:

Grundsätzlich liegt das kritische Jahr, bis zu dem eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist, bei der dynamischen Betrachtung etwas später im Lebenszyklus als bei der statischen Betrachtung. Dies kann damit begründet werden, dass die Kosten für die Schotterbettreinigung auf das Basisjahr (Jahr der Investition) abgezinst werden und somit weniger stark ins Gewicht fallen.

Bei Betonschwellengleisen liegt das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung nachdem ca. 68 % (statische Betrachtung) bzw. 74 % (dynamische Betrachtung) der strategischen Nutzungsdauer verstrichen sind.

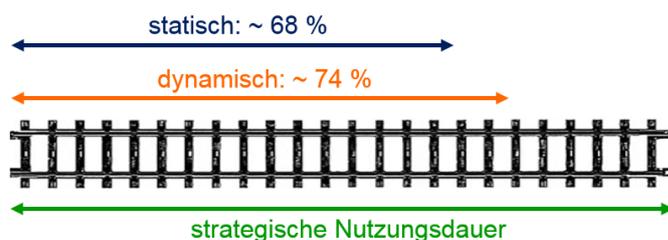


Abbildung 30: Gesamtergebnis für Gleise mit Betonschwellen

Bei Gleisen mit besohlenen Betonschwellen kommt das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung bei ca. 69 % (statische Betrachtung) bzw. 79 % (dynamische Betrachtung) des Lebenszyklus zu liegen.

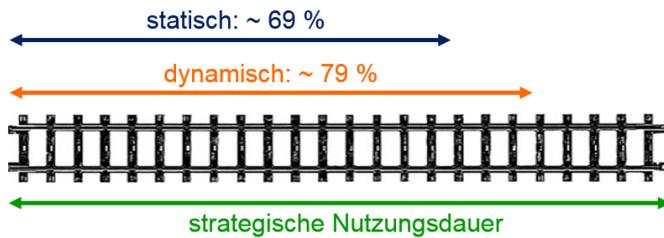


Abbildung 31: Gesamtergebnis für Gleise mit besohlenen Betonschwellen

Bei Holzschwellengleisen befindet sich das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung bei 69 % (statische Betrachtung) bzw. bei 73 % (dynamische Betrachtung) der strategischen Nutzungsdauer.

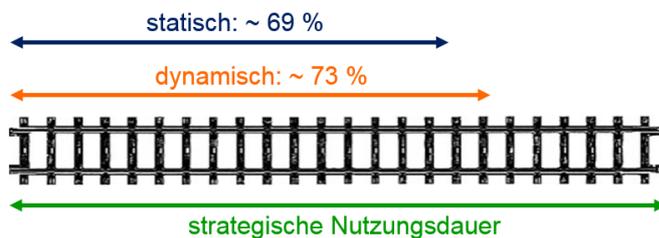


Abbildung 32: Gesamtergebnis für Gleise mit Holzschwellen

Es zeigt sich, dass sich eine Schotterbettreinigung bei Standardelementen mit längeren Nutzungsdauern, wie es jene mit besohlenen Betonschwellen sind, etwas länger bezahlt macht. Der Grund dafür ist die bei längeren Nutzungsdauern immer flacher werdende Kurve der jährlichen Kosten bzw. der Annuitäten. Dies bedeutet, dass die Unterschiede der jährlichen Kosten bzw. Annuitäten bei längeren Nutzungsdauern immer geringer werden. Dadurch wirken sich Veränderungen in den Kosten – wie sie durch eine Verlängerung des Stopfzyklus nach dem REI-Einsatz entstehen – stärker aus und das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung verschiebt sich nach hinten.

Bei zweigleisigen Strecken liegt das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung tendenziell geringfügig später im Lebenszyklus. Alleiniger Grund dafür sind die Betriebserschwerungskosten, die aufgrund der fehlenden Ausweichmöglichkeit bei eingleisigen Strecken höher sind. Diese erhöhen die Kosten für die Schotterbettreinigung bei eingleisigen Strecken und machen diese im Vergleich zur Re-Investition bereits etwas früher unwirtschaftlich.

Aufgrund des geringen Unterschiedes, werden die Standardelemente in den weiteren Auswertungen allerdings nicht mehr nach der Gleisanzahl differenziert. Ebenso ergeben sich aufgrund der Schienengüte lediglich geringfügige Unterschiede in den Ergebnissen. Aufgrund dessen passiert in den weiteren Untersuchungen auch bezüglich der Schienengüte keine separate Betrachtung der Standardelemente. Bei Standardelementen, die sich lediglich aufgrund der Gleisanzahl und/oder der Schienengüte unterscheiden, werden diese zusammengefasst und jenem Standardelement zugeordnet, das öfter vorkommt.

## 6 Auswertung auf Basis der Fraktalanalyse

Im folgenden Kapitel wird auf Basis der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung und anhand der Fraktalanalyse das Netz der ÖBB hinsichtlich des aktuellen und zukünftigen Bedarfs an Schotterbettreinigungen untersucht.

### 6.1 Methodik – Fraktalanalyse

#### 6.1.1 Allgemeines

Wie in Kapitel 2 bereits beschrieben wurde, ist es durch den Einsatz moderner Messwägen möglich, Problembereiche in Bezug auf die Gleislage zu identifizieren. Eine Feststellung der Ursache für etwaige Gleislageprobleme war durch diese Methoden bisher allerdings nicht möglich. Die Fraktalanalyse bietet auf Basis der Welligkeit der vertikalen Gleislage nun allerdings die Möglichkeit, auf die Ursache von Gleislagefehlern zu schließen.

Bereits 1967 beschäftigte sich Mandelbrot<sup>114</sup> mit der Beschreibung komplexer Kurven hinsichtlich ihrer Rauigkeit. Er begründete mit der Fraktalanalyse geometrischer Formen eine Möglichkeit zur Linearisierung nicht-linearer Formen und beschrieb dies am Beispiel der Berechnung der Länge der stark zerklüfteten Küste Großbritanniens.

Grundsätzlich lassen sich Kurven durch eine Dimension und Flächen durch zwei Dimensionen beschreiben. Mandelbrot ging davon aus, dass Kurven aufgrund ihrer Rauigkeit zwischen diesen ganzzahligen Dimensionen zu liegen kommen können. Diese neuartige Dimension beschrieb er als fraktale Dimension.<sup>115</sup>

Erstmals wurde die Fraktalanalyse von Hyslip<sup>116</sup> zur Gleislageanalyse verwendet. Er untersuchte die Rauigkeit der vertikalen Gleislagegeometrie unterschiedlicher Frequenzbereiche am Beispiel des Nord-Ost-Korridors der National Railroad Passenger Corporation.

Hansmann und Landgraf<sup>117</sup> wendeten schließlich die Fraktalanalyse auf das Netz der ÖBB an und schafften somit erstmals eine Möglichkeit netzweit auf die Ursache von Fehlern in der vertikalen Gleislage zu schließen. Die Fraktalanalyse erfüllt die Voraussetzungen einer detaillierten Ermittlung von Gleislagefehlern unterschiedlicher Wellen-

<sup>114</sup> Vgl. MANDELBROT, B.: How long is the coast of Britain?. In: Science, 156/1967. S. 636 ff.

<sup>115</sup> Vgl. MANDELBROT, B.: Fractal Geometry: what is it, and what does it do?. In: Proceedings of the royal society, A 423/1989. S. 3 ff.

<sup>116</sup> Vgl. HYSLIP, F. P.: Fractal analysis of Geometry Data for railway track condition assessment. Dissertation.

<sup>117</sup> Vgl. HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn?. In: ZEVrail, 11-12/2013. S. 462 ff.

länge, wie auch einer einfachen Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Weiters bietet sie den großen Vorteil, dass sich der Rechenaufwand in handhabbaren Grenzen hält und sie somit auch für netzweite Auswertungen praktikabel macht. Die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit basieren auf den Ergebnissen der Berechnungen von Hansmann und Landgraf. Deren Methodik wird im folgenden Kapitel beschrieben.

### 6.1.2 Funktionsweise<sup>118</sup>

Das Hauptziel der Anwendung der Fraktalanalyse ist es, die Charakteristik des Messsignals der vertikalen Gleislage zu erfassen und daraus nähere Informationen über den Zustand der Gleisanlage zu gewinnen.

Dies wurde mit Hilfe der Modified Divider Length Method durchgeführt. Dabei wird eine Kurve (im konkreten Fall das Messsignal) in gleich lange Segmente  $\lambda$  unterteilt und die Länge des resultierenden Polygonzugs  $L(\lambda)$  berechnet (Abbildung 33).

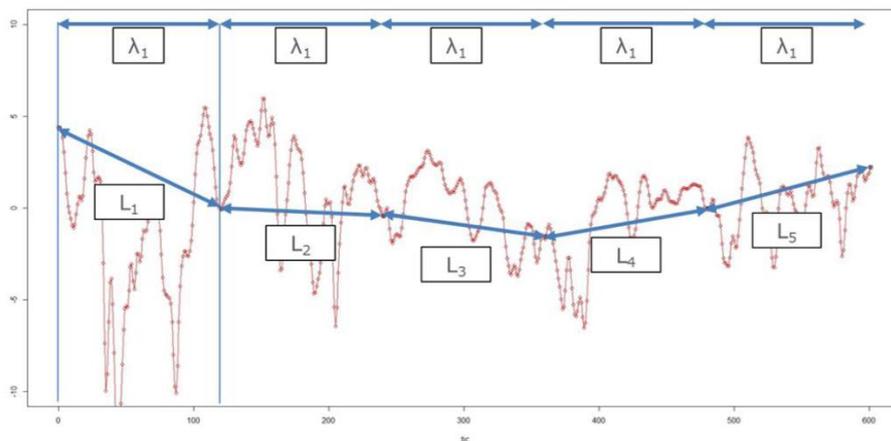


Abbildung 33: Beispielhafte Interpolation eines Messsignals nach der Unterteilung in 5 gleich lange Abschnitte der Länge  $\lambda$ <sup>119</sup>

Danach wird die Länge der Segmente reduziert und der Polygonzug erneut berechnet. Dadurch passt sich der Polygonzug mit Fortdauer der Iteration immer besser an die Kurve an, bis er sie schließlich vollständig beschreibt (Abbildung 34, oben).

<sup>118</sup> Vgl. HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn?. In: ZEVrail, 11-12/2013. S. 462ff.

<sup>119</sup> HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 83.

Dabei besteht der folgende Zusammenhang:<sup>120</sup>

$$L(\lambda) = n * \lambda^{1-D_r}$$

mit:

$L(\lambda)$ : Länge des Polygonzugs in Abhängigkeit von  $\lambda$

$\lambda$ : Länge des Teilstrecks

$n$ : Anzahl der Unterteilungen

$D_r$ : Fraktale Dimension

Daraus ergibt sich:

$$\log L(\lambda) = (1 - D_r) \log \lambda + \log n$$

Damit kann die Zunahme der Länge des Polygonzugs mit steigender Anzahl an Unterteilungen über eine Regression bzw. deren Steigung beschrieben werden. Werden die errechneten Polygonlängen in Abhängigkeit ihrer Segmentlängen im logarithmischen Maßstab dargestellt (Richardson Plot; Abbildung 34, unten), ergibt sich die fraktale Dimension der Kurve zu:

$$D_r = 1 - m$$

mit:

$m$ : Steigung der approximierten Linien

Die fraktale Dimension ergibt sich also als Steigung jener Geraden, die sich bestmöglich an die doppellogarithmische Darstellung anpasst.

Die Divider Length Method wurde auf das Gesamtnetz, welches in der TUG-Datenbank enthalten ist, angewendet. Als Grundlage für die Analyse diente das 1-bis-70-m-Messsignal der vertikalen Gleislage der linken und rechten Schiene mit einer Abtastweite von 25 cm. Für netzweite Auswertungen und zeitlich reproduzierbare Werte des gleichen Abschnitts war es notwendig, eine fixe Einflusslänge zu definieren. Da diese von den minimal und maximal auftretenden Wellenlängen des Eingangssignals maßgeblich abhängt, wurde eine Einflusslänge von 150 m definiert.

---

<sup>120</sup> Vgl. MANDELBROT, B.: How long is the coast of Britain?. In: Science, 156/1967. S. 636 ff.

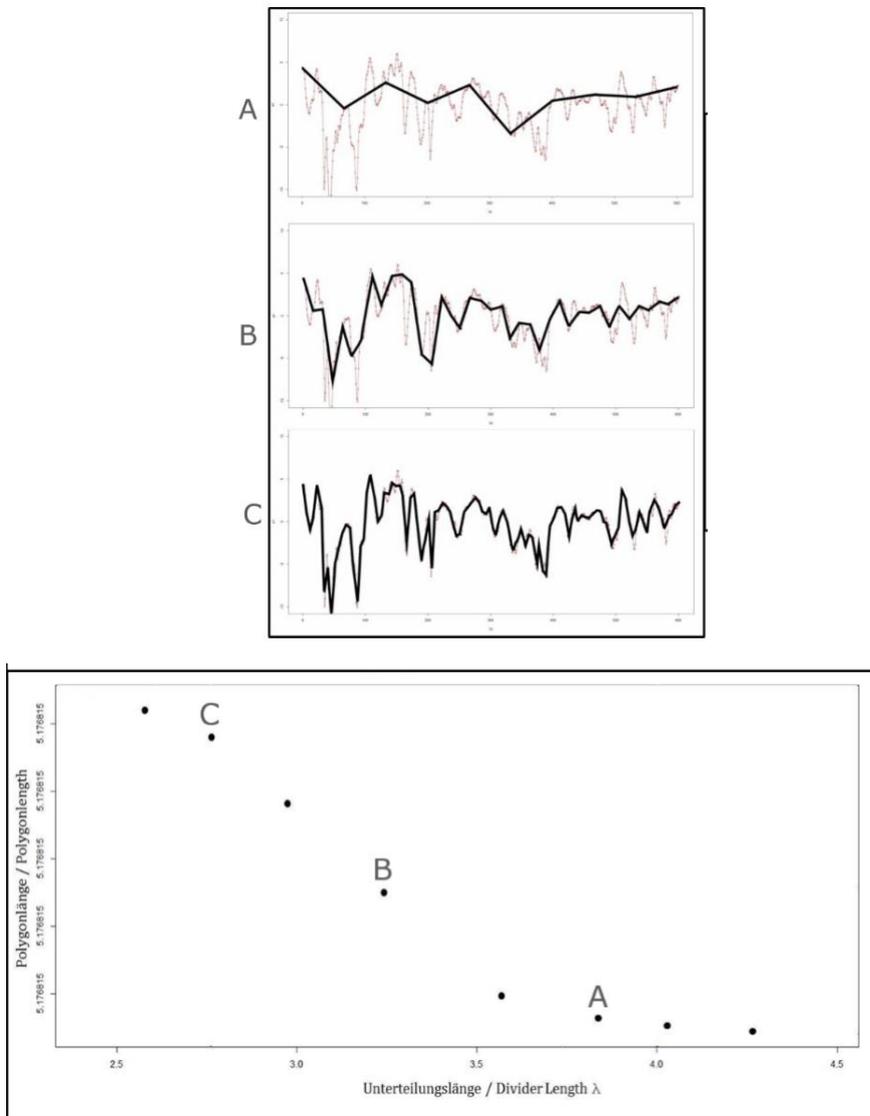


Abbildung 34: Charakteristischer Verlauf der Polygonlänge in Abhängigkeit der Unterteilungslänge<sup>121</sup>

Das Signal der „1-70 m Gleislage“ kann mit Hilfe von drei Dimensionen hinreichend genau beschrieben werden. Die drei Dimensionen stellen dabei kurz- (Slope1), mittel- (Slope3) und langwellige (Slope2) Gleislagefehler dar. Umso größer die Steigung in einem Bereich ist, desto größer ist die Ausprägung des jeweiligen Wellenlängenbereichs und somit des jeweiligen Fehlers im betrachteten Gleisabschnitt.

Dies kann am Beispiel einer Sinuswelle mit unterschiedlichen Wellenlängen gezeigt werden. Fall A zeigt eine Sinuswelle mit 20 m Wellenlänge. Dabei ist eindeutig eine starke Steigung im mittelwelligen Sektor zu beobachten. Bei einer Wellenlänge von 100 m prägt sich die

<sup>121</sup> HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 83.

Steigung im langwelligen Sektor besonders aus. Werden die beiden Wellen superponiert, zeigen sich sowohl im mittel- als auch im langwelligen Sektor erhöhte Steigungen.

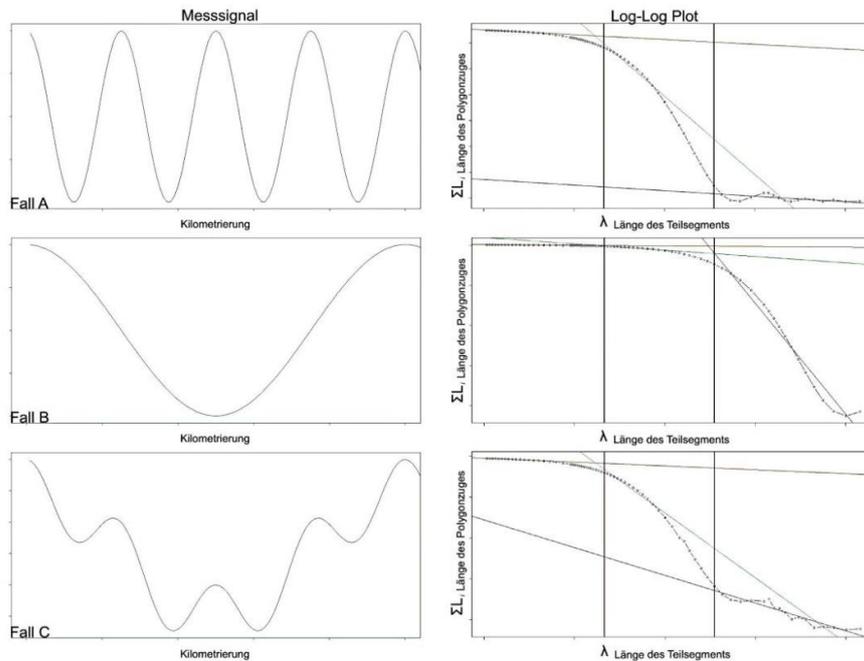


Abbildung 35: Auswirkungen unterschiedlicher Wellenlängen auf die Ergebnisse der Fraktalanalyse<sup>122</sup>

Die fraktalen Dimensionen (in weiterer Folge als Fraktalzahl bezeichnet) wurden für das gesamte in der TUG-Datenbank abgebildete Netz der ÖBB – gleitend über 100 m – ermittelt und in Querschnitten alle fünf Meter ausgegeben. Dies geschah für Messdaten ab dem Jahr 2005, womit auch Zeitreihenanalysen ermöglicht werden.

### 6.1.3 Anwendungsmöglichkeiten

Wie oben bereits erwähnt, ist es das Ziel der Fraktalanalyse, aufgrund der Signalcharakteristik des Längshöhensignals der vertikalen Gleislage auf die Ursache eines etwaigen Gleislagefehlers zu schließen.

Hansmann<sup>123</sup> konnte einen Zusammenhang zwischen zerstörtem bzw. verschmutztem Schotter und insbesondere mittelwelligen Gleislagefehlern (Slope3) nachweisen. Dies geschah durch die Analyse der Auswirkungen von Schotterbettreinigungseinsätzen und stichprobenartigen Überprüfungen der Ergebnisse bei Gleisbegehungen. Ebenso besteht ein Zusammenhang zwischen dem kurzwelligen Bereich (Slope1) und dem Schotterzustand. Da allerdings die Gefahr besteht, dass der

<sup>122</sup> HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn?. In: ZEVrail, 11-12/2013. S. 467.

<sup>123</sup> Vgl. HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 85ff.

kurzwellige Sektor auch von Schienenoberflächenfehlern und einem Grundrauschen des Messsignals beeinflusst wird, wird in weiterer Folge der mittelwellige Bereich als Grundlage zur Beurteilung des Schotterzustandes herangezogen.

Im Gegensatz dazu deutete eine starke Ausprägung des langwelligen Sektors (Slope2) auf Probleme im Unterbau hin. Damit ist es erstmals möglich, nicht nur Bereiche schlechter Gleislage zu orten, sondern mit Hilfe der Messsignalanalyse auch auf deren Ursache zu schließen.<sup>124</sup>

## 6.2 Grundlagen für die Auswertung

Wie bereits erwähnt, wird für die gegenständliche Auswertung die Steigung der Regressionsgeraden im mittelwelligen Sektor (Slope3) zur Beurteilung des Schotterzustandes herangezogen und es wird in weiterer Folge nur noch auf diesen einen der drei Bereiche eingegangen.

Da die Messsignale sowohl für die linke als auch die rechte Schiene eines Querschnitts zur Verfügung stehen, können auch die Fraktalwerte für beide Schienenstränge ermittelt werden. Bei der Beurteilung des Schotterzustandes ergibt sich zwischen den beiden Schienensträngen allerdings ein Unterschied der vernachlässigbar klein erscheint.<sup>125</sup> Aufgrund dessen werden für die weiteren Auswertungen lediglich die Fraktalwerte der linken Schiene berücksichtigt.

Hansmann konnte bei einer netzweiten Betrachtung der Slope3-Werte über die Nutzungsdauer eine annähernd lineare und ungestörte Verschlechterung feststellen.<sup>126</sup> Aus diesem Grund wird auch in der gegenständlichen Untersuchung von einem linearen und gleichmäßigen Verschlechterungsverhalten der fraktalen Dimension über die Nutzungsdauer ausgegangen.

Diese Annahme beinhaltet allerdings auch die Vernachlässigung des Einflusses von während der Liegedauer durchgeführten Instandhaltungstätigkeiten und hier insbesondere von Stopfmaßnahmen. Der Einfluss von Stopfmaßnahmen auf eine etwaige Verbesserung der Fraktalzahl wurde von Hansmann untersucht, es konnten aber keine eindeutigen Auswirkungen festgestellt werden.<sup>127</sup>

Nachfolgend werden alle noch ausständigen Werte ermittelt, die notwendig sind, um mit dem aktuellen Anlagenalter sowie der Fraktalzahl den wirtschaftlich sinnvollsten Umgang mit dem derzeit eingebauten Schotter zu ermitteln.

<sup>124</sup> Vgl. HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn?. In: ZEVrail, 11-12/2013. S. 469f.

<sup>125</sup> Vgl. HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 93.

<sup>126</sup> Vgl. Ebenda. S. 103f.

<sup>127</sup> Vgl. Ebenda. S. 100ff.

### 6.2.1 Fraktalzahl bei Gleisneulage

Ein neues Gleis wird aufgrund von Toleranzen beim Einbau und Anfangssetzungen zwischen der Gleisneulage und der ersten Messfahrt nie eine perfekte Lage und somit eine fraktale Dimension von 0 aufweisen. Abbildung 36 zeigt die mittelwellige fraktale Dimension unterschiedlicher Schwellenarten bei der ersten Messfahrt nach der Gleisneulage. Dabei zeigen besohlte Betonschwellen geringfügig bessere und Holzschwellen geringfügig schlechtere Werte als unbesohlte Betonschwellen. Aufgrund der relativ geringen Unterschiede zwischen den einzelnen Schwellentypen, wurde für die gegenständliche Arbeit pauschal ein Wert von **-1,25** für alle Schwellenarten herangezogen, was dem Median von Betonschwellen entspricht.

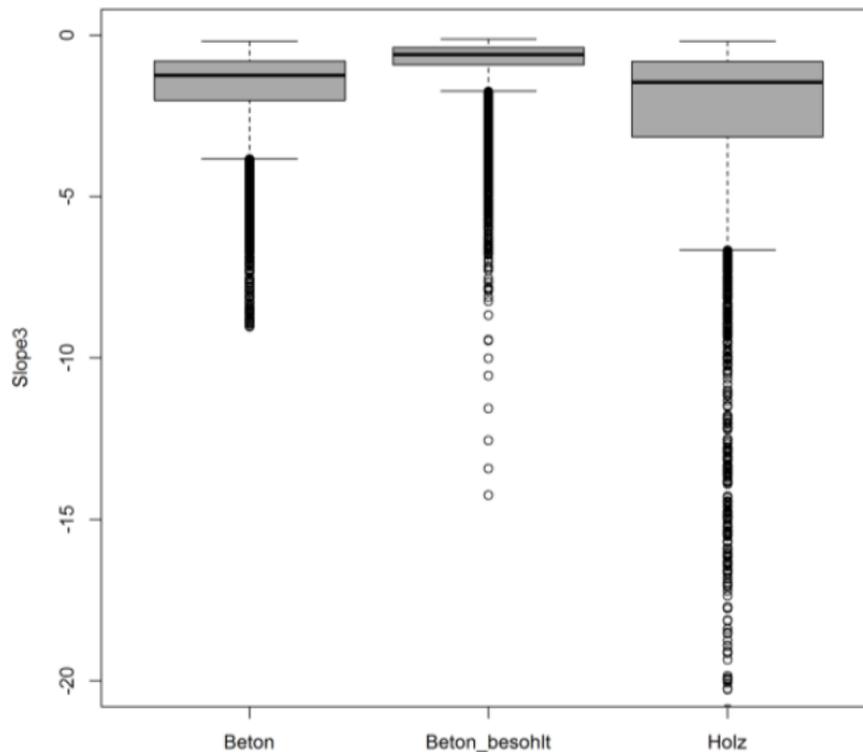


Abbildung 36: Ausprägung der mittelwelligen Dimension bei verschiedenen Schwellentypen nach einer Gleisneulage<sup>128</sup>

<sup>128</sup> HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. S. 105.

### 6.2.2 Fraktalzahl bei Notwendigkeit einer Schotterbettreinigung

Wesentlich ist, die kritische fraktale Dimension im mittelwelligen Bereich zu ermitteln, ab der eine Schotterbettreinigung überhaupt notwendig ist.

Dabei wurde definiert, dass eine Schotterbettreinigung durchzuführen ist, wenn das Stopfintervall in einem Abschnitt nur noch ein Jahr beträgt. Diese Festlegung wurde getroffen, da ein jährliches Stopfintervall auf schwerwiegende Gleislagefehler hindeutet und sowohl aus betrieblichen als auch aus wirtschaftlichen Gründen problematisch ist.

Zur Ermittlung aller Querschnitte, die durch ein durchschnittliches jährliches Stopfintervall gekennzeichnet sind, wurde festgelegt, dass dieses in einem fünfjährigen Zeitraum vorliegen muss. Dafür wurden die Jahre 2009 bis 2013 gewählt, da es sich hierbei um den aktuellsten Fünfjahreszeitraum handelt, für den zum Zeitpunkt der Auswertung Messdaten aus der TUG-Datenbank zur Verfügung standen.

Obwohl eine konstante Verschlechterung der fraktalen Dimension über die Nutzungsdauer angenommen wird, muss beachtet werden, dass der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen auf die Fraktalzahl noch nicht gesichert beschrieben werden kann und die Werte einer gewissen natürlichen Streuung unterliegen. Aus diesem Grund wurde für die gegenständliche Auswertung für jeden Querschnitt der Maximalwert des fünfjährigen Betrachtungszeitraums herangezogen.

Weiters wurden nur Gleise berücksichtigt, die 1995 oder früher eingebaut worden sind. Dadurch kann die fälschliche Mitberücksichtigung von Querschnitten vermieden werden, in denen im Betrachtungszeitraum eine Gleisneulage durchgeführt wurde und aufgrund derer mehrere Stopfeinsätze in der Datenbank eingetragen sind. Andererseits werden so besonders jene Gleise erfasst, für die aufgrund ihres Alters die Frage, ob eine Schotterbettreinigung eine sinnvolle Instandhaltungsmaßnahme darstellt, besonders relevant ist.

Ebenso wurde festgelegt, dass keine Störstellen wie Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen, Tunnels oder Bahnhöfe in die Betrachtung eingehen sollen. Diese Einschränkung wurde getroffen, da die beschriebenen Sonderbauwerke oft spezielle, intensive und andere Instandhaltungsmaßnahmen als eine Schotterbettreinigung benötigen. Damit unterscheiden sie sich deutlich vom freien Streckengleis, auf das aber der Hauptfokus in der gegenständlichen Arbeit gerichtet werden soll.

Abbildung 37 zeigt die Verteilung der Fraktalwerte des mittelwelligen Bereichs für Querschnitte, die innerhalb von fünf Jahren ein jährliches durchschnittliches Stopfintervall aufweisen und die oben genannten Randbedingungen erfüllen.

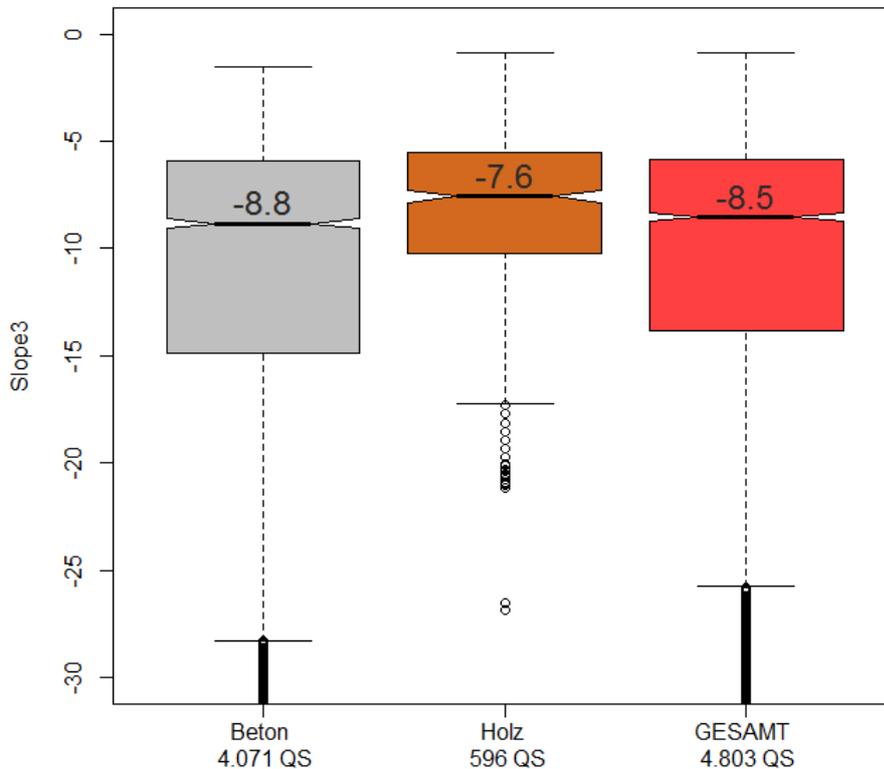


Abbildung 37: Verteilung der Slope3-Werte bei jährlichem Stopfintervall

Die Auswertung ergibt für Betonschwellen einen Median von -8,8 und für Holzschwellen von -7,6. Das bedeutet, dass der Fraktalwert bei Querschnitten mit Holzschwellen bei einem jährlichen Stopfintervall geringfügig besser ist als bei jenen mit Betonschwellen. Dabei muss allerdings berücksichtigt werden, dass die Stichprobe bei Holzschwellenquerschnitten deutlich kleiner ist. Insgesamt lässt sich für beide Schwellenarten ein Median von -8,5 errechnen. Besohlte Betonschwellen wurden in der gegenständlichen Auswertung nicht berücksichtigt, da diese erst seit ca. 10 Jahren eingebaut werden, ein deutlich besseres Gleislageverhalten aufweisen und somit noch keine Querschnitte mit jährlichem Stopfintervall vorliegen.

Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen den unterschiedlichen Schwellenarten wurde die kritische Fraktalzahl im mittelwelligen Bereich, ab der eine Schotterbettreinigung notwendig ist, mit **-8,5** pauschal für alle Schwellentypen festgelegt.

Zur Verifizierung des Ergebnisses wurden noch weitere Auswertungen mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt. Die wichtigsten Resultate sind in Abbildung 38 dargestellt.

Der mittlere Boxplot zeigt Gleise, die ebenfalls vor 1995 eingebaut wurden und somit älter als 20 Jahre sind, allerdings – im Gegensatz zum rechten Boxplot – ein fünfjähriges Stopfintervall aufweisen. Die fraktale Dimension zeigt sich im Vergleich zu jenen Querschnitten mit jährlichem Stopfintervall klar verbessert. Dies bestätigt die eingangs getroffene Annahme der Korrelation zwischen dem Stopfintervall und der Fraktalzah im mittelwelligen Bereich.

Der linke Boxplot repräsentiert Querschnitte, die ebenfalls ein fünfjähriges Stopfintervall aufweisen, allerdings erst nach dem Jahr 2005 eingebaut worden sind. Die Fraktalzahlen dieser Gleise zeigen sich nochmals deutlich verbessert. Das Ergebnis scheint äußerst plausibel, da der Schotterzustand von jüngeren Gleisen aufgrund der noch geringeren Verschmutzung durch Feinteile von außen bzw. durch den Schotterverschleiß selbst, im Allgemeinen besser ist als bei älteren Gleisen.

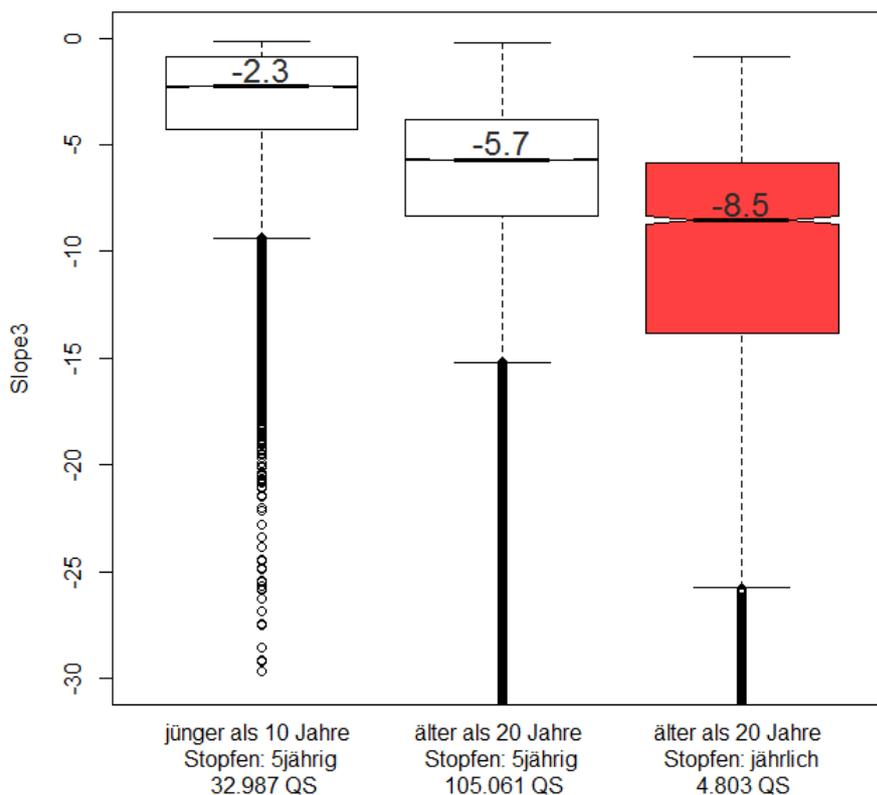


Abbildung 38: Vergleich der Verteilungen der Slope3-Werte bei unterschiedlichen Randbedingungen

### 6.2.3 Zusammenfassung

Die in den letzten Kapiteln ermittelten Werte können nun in einem Diagramm (Abbildung 39) eingetragen werden, wobei auf der Abszisse das Alter des Gleises und auf der Ordinate die Fraktalzahl aufgetragen wird. Dadurch ergibt sich ein kritischer Verlauf der Fraktalzahl über die Zeit (grüne Linie).

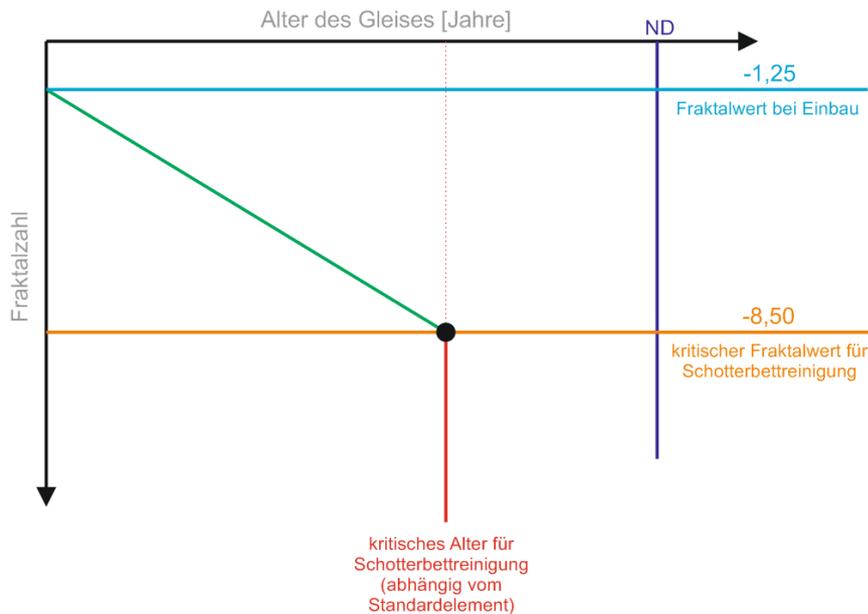


Abbildung 39: Maßnahmenableitung aufgrund des Schotterzustandes

Im in Abbildung 39 dargestellten Diagramm ergeben sich nun vier Bereiche (Abbildung 40), die es ermöglichen zu überprüfen, ob eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist. Weiters kann der aktuelle Bedarf an Schotterbettreinigungen bzw. Re-Investitionen sowie der zukünftige Bedarf an Schotterbettreinigungen für ein Standardelement abgeschätzt werden:

- **Bereich 1:** Querschnitte, die sich in diesem Bereich befinden, verhalten sich besser als der kritische Verlauf bzw. ist das kritische Alter, bis zu dem ein REI-Einsatz sinnvoll ist, überschritten. Das bedeutet, eine Schotterbettreinigung stellt weder zum aktuellen Zeitpunkt noch in Zukunft eine wirtschaftliche Instandhaltungsmaßnahme dar.
- **Bereich 2:** Derzeit ist aufgrund der Fraktalzahl noch keine Schotterbettreinigung notwendig. Querschnitte in diesem Bereich erreichen den kritischen Wert für einen REI-Einsatz allerdings bevor das kritische Jahr für eine Schotterbettreinigung im Lebenszyklus erreicht wird. Das bedeutet, dass eine Schotterbettreinigung in Zukunft notwendig wird und aus wirtschaftlichen Überlegungen auch sinnvoll ist und somit durchgeführt werden soll.

- **Bereich 3:** Der Grenzwert für eine Schotterbettreinigung ist bereits erreicht und das Alter von Querschnitten in diesem Bereich liegt vor dem kritischen Jahr für die Schotterbettreinigung. Das bedeutet, ein REI-Einsatz stellt zum aktuellen Zeitpunkt eine wirtschaftlich sinnvolle Instandhaltungsmaßnahme dar.
- **Bereich 4:** Der kritische Fraktalwert, der eine Schotterbettreinigung notwendig macht, ist bei Querschnitten in diesem Bereich bereits erreicht. Aufgrund des hohen Anlagenalters stellt eine Schotterbettreinigung allerdings keine wirtschaftlich sinnvolle Instandhaltungsmaßnahme mehr dar. Das bedeutet, dass für Abschnitte, die in diesem Bereich zu liegen kommen, zum jetzigen Zeitpunkt eine Re-Investition der gesamten Anlage die wirtschaftlichste Variante ist.

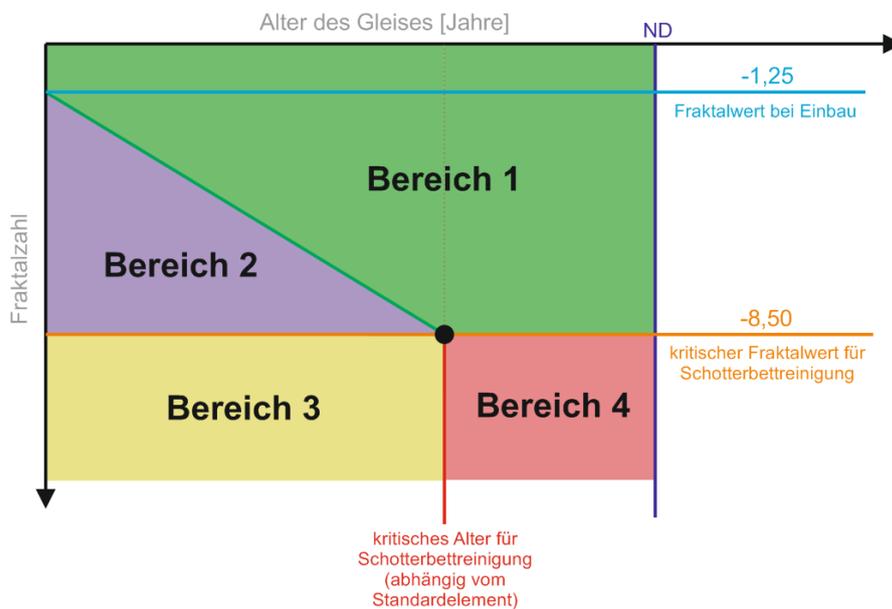


Abbildung 40: Bereichseinteilung aufgrund der abgeleiteten Maßnahmen

### 6.2.4 Zuordnung

Ziel ist es nun, möglichst einfach zu überprüfen, in welchem Bereich des Diagramms sich ein konkreter Gleisabschnitt befindet und wie mit diesem umgegangen werden soll.

Ist der aktuelle Fraktalwert bereits unter -8,5, kann eine Zuordnung entweder zum Bereich 3 oder 4 erfolgen und ist lediglich vom aktuellen Anlagenalter abhängig.

Ist das Gleis bereits älter als das kritische Alter für die Schotterbettreinigung, kann der Abschnitt entweder dem Bereich 1 oder 4 angehören. Die Zuordnung hängt davon ab, ob der kritische Fraktalwert bereits erreicht ist oder nicht.

Die Feststellung, ob ein Gleisabschnitt dem Bereich 1 oder 2 angehört, ist davon abhängig, ob sich der betrachtete Abschnitt besser oder schlechter als der kritische Verlauf verhält. Nachfolgend wird beschrieben, wie anhand des aktuellen Anlagenalters, der Fraktalzahls sowie dem kritischen Alter für die Schotterbettreinigung die Zuordnung zu den beiden Bereichen erfolgen kann.

Aufgrund des geometrischen Zusammenhangs, kann der kritische Verlauf der Fraktalzahls über die Zeit mit folgender linearer Funktion beschrieben werden:

$$F_{krit} = k_{krit} * A_{krit} + F_{Einbau}$$

mit:

$F_{krit}$  = kritische Fraktalzahls für die Schotterbettreinigung

$k_{krit}$  = kritische Steigung der Geraden

$A_{krit}$  = kritisches Alter für die Schotterbettreinigung

$F_{Einbau}$  = Fraktalzahls bei Einbau des Gleises (Anfangsqualität)

Die kritische Fraktalzahls für die Schotterbettreinigung (-8,5) sowie die Fraktalzahls bei Einbau des Gleises (-1,25) sind dabei bekannt. In Kapitel 5.3 wurde berechnet, dass das kritische Alter, bis zu dem eine Schotterbettreinigung sinnvoll ist, für Betonschwellen bei statischer Betrachtung bei ca. 68 % der strategischen Nutzungsdauer (ND) liegt. Dabei wurde der Wert für Betonschwellen verwendet, da Gleise mit unbesohlenen Betonschwellen besondere Relevanz in Bezug auf mögliche Schotterbettreinigungen haben. Das statische Ergebnis wurde gewählt, da die Entscheidung, ob eine Schotterbettreinigung durchgeführt werden soll oder nicht, erst während dem Lebenszyklus, wenn ein Abschnitt als problematisch detektiert wird, getroffen werden muss. Dann die Schotterbettreinigung auf das Basisjahr (Jahr der Investition) abzusinsen (dynamische Betrachtung), wäre nicht sinnvoll.

Setzt man nun diese Werte in die obige Formel ein, kann die kritische Steigung in Abhängigkeit der strategischen Nutzungsdauer des betrachteten Gleisabschnittes wie folgt berechnet werden:

$$k_{krit} = \frac{-7,25}{ND * 0,68}$$

Die Steigung des Verlaufs der Fraktalzahls eines bestimmten Abschnittes kann bei angenommenem linearem Verhalten mit folgender Funktion beschrieben werden:

$$F_{akt} = k_{akt} * A_{akt} + F_{Einbau}$$

mit:

$F_{krit}$  = aktuelle Fraktalzahls des betrachteten Abschnitts

$k_{krit}$  = aktuelle Steigung des betrachteten Abschnitts

$A_{krit}$  = aktuelles Anlagenalter des betrachteten Abschnitts

$F_{Einbau}$  = Fraktalzahls bei Einbau des Gleises (Anfangsqualität)

Damit ergibt sich die Steigung des aktuellen Verlaufs der Fraktalzahls über die Zeit zu:

$$k_{akt} = \frac{F_{akt} - 1,25}{A_{akt}}$$

Aus Abbildung 40 wird ersichtlich, dass der vorliegende Verlauf flacher sein muss als der kritische, damit der Abschnitt dem Bereich 1 zugeordnet werden kann. Damit gilt die Bedingung:

$$|k_{krit}| > |k_{akt}|$$

Durch Einsetzen und Umformen kommt man schließlich zu folgender Bedingung, die erfüllt sein muss, damit der betrachtete Gleisabschnitt Bereich 1 zugeordnet werden kann:

$$10,66 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

Ist die Bedingung nicht erfüllt, gehört der untersuchte Abschnitt Bereich 2 an.

### 6.3 Beispiel

Anhand eines Beispiels soll im Folgenden erläutert werden, wie die Auswertung der einzelnen Standardelemente durchgeführt wurde und die Interpretation der Ergebnisse erfolgte.

Für das Beispiel wurde wiederum jenes Standardelement ausgewählt, das im Netz der ÖBB am häufigsten vorkommt.

Wie schon in Kapitel 5.2 gezeigt wurde, stellt sich für dieses Standardelement die Schotterbettreinigung bis zu einem Anlagenalter von 20 Jahren (statische Betrachtung) bzw. 22 Jahren (dynamische Betrachtung) als wirtschaftlich sinnvolle Instandhaltungsmaßnahme heraus.

Wird nun die Auswertung für das konkrete Standardelement durchgeführt, so ergibt sich das in Abbildung 41 bzw. Tabelle 10 (statische Auswertung) dargestellte Bild.

Die Auswertung bzw. die Zuordnung der unterschiedlichen Querschnitte erfolgte dabei mit dem Statistikprogramm „R“.

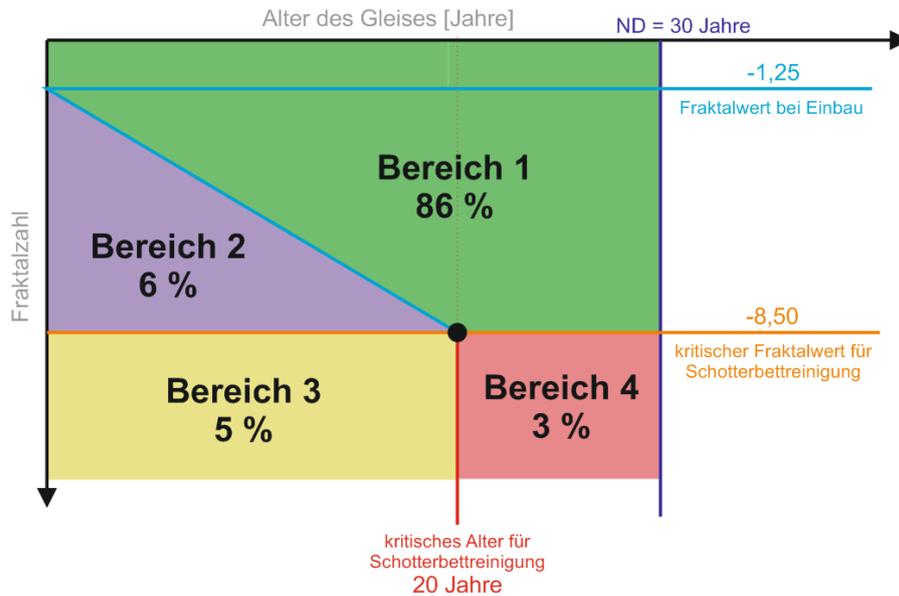


Abbildung 41: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch

Tabelle 10: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch

Betonschwellen; Belastung 45.000-70.000; Radius >600; Schiene 60E1					
	Bereich 1	Bereich 2	Bereich 3	Bereich 4	Gesamt
Anzahl an QS	108.937	7.496	5.995	4.505	126.933
Länge in km	544,7	37,5	30,0	22,5	634,7
Verteilung der QS	86%	6%	5%	3%	100%

Das Ergebnis zeigt, dass 3 % aller Querschnitte oder 22,5 km, die dem konkreten Standardelement zuzuordnen sind, sich in Bereich 4 befinden. Das bedeutet, dass eine Re-Investition für diese Abschnitte die sinnvollste Maßnahme darstellt.

5 % der Querschnitte oder 30 km befinden sich in Bereich 3. Das heißt, dass für diese Abschnitte zum jetzigen Zeitpunkt eine Schotterbettreinigung eine sinnvolle Instandhaltungstätigkeit darstellt.

Im Bereich 2 kommen 6 % aller Querschnitte oder 37,5 km zu liegen. Diese Abschnitte haben den kritischen Fraktalwert für eine Schotterbettreinigung noch nicht erreicht. Diese Abschnitte verhalten sich jedoch schlechter als der kritische Verlauf der Fraktalzahl. Das bedeutet, dass für diese Abschnitte eine Schotterbettreinigung notwendig werden wird und aus wirtschaftlichen Überlegungen auch durchgeführt werden kann.

Die restlichen 84 % der Querschnitte bzw. 544,7 km befinden sich in Bereich 1 und verhalten sich somit besser als der kritische Verlauf der Fraktalzahl. Für diese Abschnitte wird im Lebenszyklus keine Schotterbettreinigung notwendig bzw. wird diese im Lebenszyklus erst so spät erforderlich, dass sie nicht mehr sinnvoll ist und daher eine Re-Investition die wirtschaftlichere Variante darstellen wird.

In Kapitel 5.2 wurde gezeigt, dass das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung bei der dynamischen Betrachtung zwei Jahre später zu liegen kommt. Abbildung 42 und Tabelle 11 zeigen die Ergebnisse der dynamischen Auswertung für das betrachtete Standardelement. Dabei wird augenscheinlich, dass sich durch die Verschiebung des kritischen Jahres für die Schotterbettreinigung der kritische Verlauf der Fraktalzahlfächer flacher einstellt. Dies hat zur Folge, dass sich der Bereich 1 verkleinert und sich im Gegenzug der Bereich 2 vergrößert. Das bedeutet, dass sich für eine größere Zahl an Abschnitten eine Schotterbettreinigung in Zukunft als wirtschaftlich sinnvoll erweist. Ebenso verhält es sich mit Bereich 3 – welcher größer wird – und Bereich 4, der sich verkleinert. Dies hat zur Folge, dass für mehr Abschnitte aktuell eine Schotterbettreinigung die wirtschaftlich sinnvollste Maßnahme darstellt und sich andererseits jene Bereiche, die zum jetzigen Zeitpunkt re-investiert werden sollen verringern.

Das bedeutet zusammengefasst, dass sich bei der dynamischen Betrachtung durch die Abzinsung der Kosten für die Schotterbettreinigung auf das Basisjahr, der REI-Einsatz länger im Lebenszyklus des Gleises bezahlt macht. Somit stellt die Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme für eine größere Anzahl an Abschnitten eine sinnvolle Alternative dar.

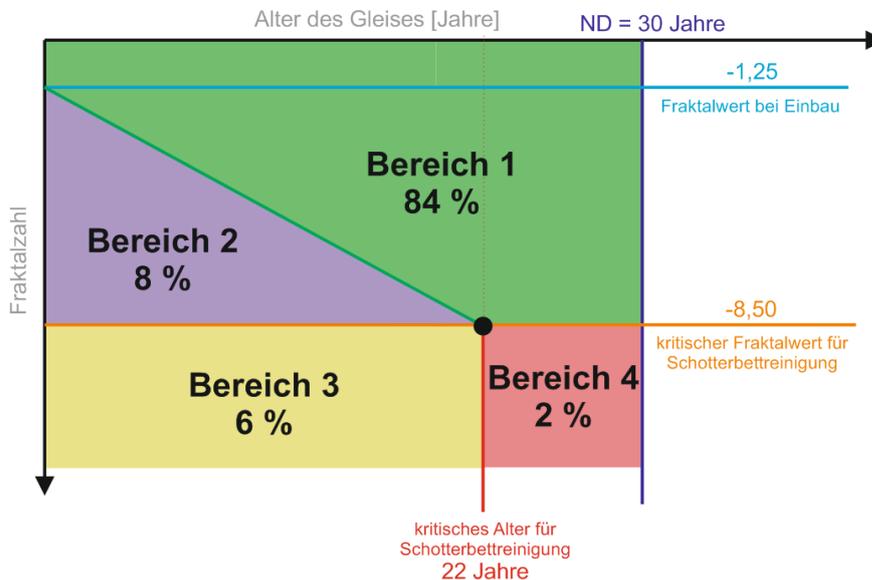


Abbildung 42: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch

Tabelle 11: Ergebnis für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag;  
 Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch

<b>Betonschwellen; Belastung 45.000-70.000; Radius &gt;600; Schiene 60E1</b>					
	<b>Bereich 1</b>	<b>Bereich 2</b>	<b>Bereich 3</b>	<b>Bereich 4</b>	<b>Gesamt</b>
<b>Anzahl an QS</b>	106.296	10.146	7.996	2.495	126.933
<b>Länge in km</b>	531,5	50,7	40,0	12,5	634,7
<b>Verteilung der QS</b>	84%	8%	6%	2%	100%

Zur Verifizierung der bisher entwickelten Methodik und zur Validierung der ersten Ergebnisse für jenes Standardelement, das im Netz der ÖBB am häufigsten vorkommt, wurden für dieses Zusatzauswertungen durchgeführt.

Dabei wurden einerseits Querschnitte untersucht, die sich in Brückenbereichen befinden. Diese Abschnitte stellen bezüglich der Gleislage häufig Problembereiche dar und verhalten sich schlechter als das von Störstellen unbeeinflusste freie Streckengleis. Wie erwartet kommen hier deutlich weniger Querschnitte in Bereich 1 zu liegen als bei der Auswertung für alle Querschnitte des Standardelements. Dafür nehmen die Querschnitte, welche in den Bereichen 2, 3, und 4 liegen und somit eine Schotterbettreinigung bzw. eine Re-Investition erfordern, zu. Damit decken sich die Ergebnisse der Auswertung mit der Annahme, dass sich Brückenbereiche schlechter verhalten als das von Störstellen unbeeinflusste freie Streckengleis.

Andererseits wurden Querschnitte ausgewählt, in denen eine Schotterbettreinigung ohne Auswechslung des Gleisrostes durchgeführt wurde – die also über eine intakte Schotterbettung verfügen. Dabei wurde immer die erste Messung nach dem REI-Einsatz herangezogen. Auch bei dieser Auswertung zeigt sich das Ergebnis wie erwartet. Nahezu alle Querschnitte befinden sich im Bereich 1, was bedeutet, dass sowohl derzeit als auch später im Lebenszyklus keine weitere Schotterbettreinigung notwendig bzw. wirtschaftlich sinnvoll ist.

Wieder zeigt sich in allen Fällen eine leichte Verschiebung vom Bereich 1 in den Bereich 2, sowie vom Bereich 4 in den Bereich 3, wenn die Analyse dynamisch durchgeführt wird. Der Grund hierfür liegt wiederum darin, dass eine Schotterbettreinigung im Lebenszyklus länger wirtschaftlich sinnvoll ist.

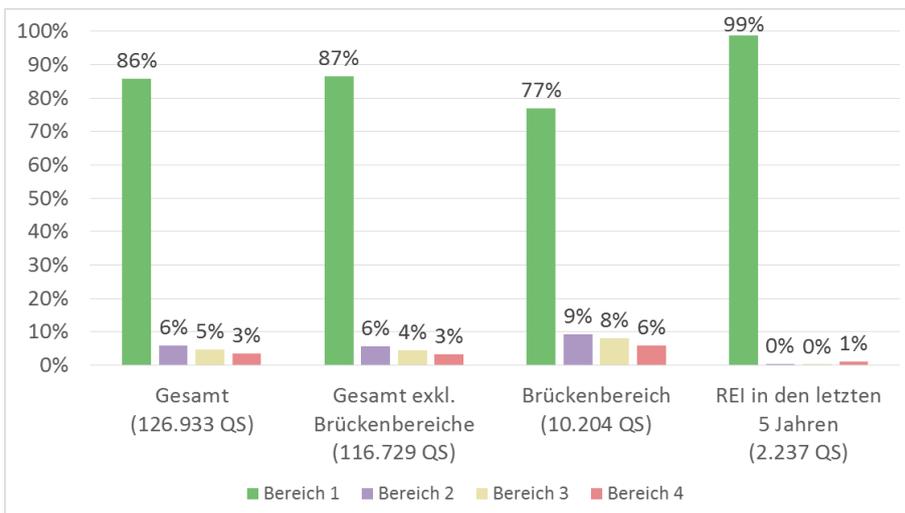


Abbildung 43: Ergebnis der Spezialauswertungen für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; statisch

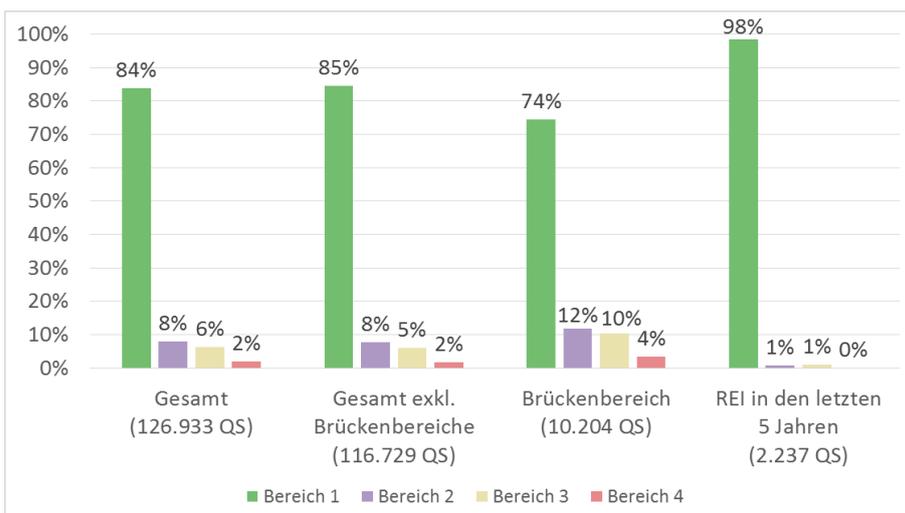


Abbildung 44: Ergebnis der Spezialauswertungen für das Standardelement 45.000 - 70.000 GesBt/Tag; Radius>600; Betonschwellen; Schiene 60E1; dynamisch

## 6.4 Ergebnisse

Für alle weiteren in Kapitel 4.2 ausgewählten Standardelemente wurde die Auswertung wie im Beispiel beschrieben sowohl statisch als auch dynamisch durchgeführt. Aufgrund der schon in Kapitel 6.2.4 angestellten Überlegungen und der relativ geringen Unterschiede in den Auswertungsergebnissen, werden in weiterer Folge allerdings nur noch die Detailergebnisse der statischen Betrachtung dargestellt.

Wie schon in Kapitel 5.3 beschrieben, wurden Standardelemente, die sich lediglich aufgrund der Schienengüte oder der Gleisanzahl unterscheiden, zusammengefasst.

Aufgrund dessen ergaben sich für die Auswertung insgesamt 42 verschiedene Parameterkombinationen. Diese decken 75 % aller Querschnitte mit Beton-, besohlenen Beton- oder Holzschwellen ab, die in der TUG-Datenbank vorhanden sind. Dabei handelt es sich um insgesamt 548.740 Querschnitte bzw. 2.743,7 km Gleis. Wie sich diese auf die einzelnen Schwellenarten verteilen, kann aus Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Übersicht über die ausgewerteten Querschnitte

	ausgewertete Querschnitte	vorhandene Querschnitte	ausgewerteter Anteil	Anzahl an Parameterkombinationen
Beton	391.530	474.243	83%	22
Beton besohlt	57.773	77.994	74%	8
Holz	99.437	174.860	57%	12
<b>GESAMT</b>	<b>548.740</b>	<b>727.097</b>	<b>75%</b>	<b>42</b>

Der Vollständigkeit halber sei angemerkt, dass sich in der TUG-Datenbank insgesamt 810.150 Querschnitte befinden. Einige davon liegen allerdings in Weichenbereichen bzw. sind mit fester Fahrbahn, Sonderformen von Schwellen oder unbekanntem Schwellentypen ausgestattet und scheinen somit nicht in Tabelle 12 auf.

Im ersten Schritt wurden die Analysen für jedes Standardelement einzeln durchgeführt. Dies war ein unumgänglicher Schritt, da sich die Standardelemente aufgrund der Nutzungsdauer und des kritischen Jahres für die Schotterbettreinigung deutlich unterscheiden.

Im Anschluss daran konnten die Standardelemente aufgrund von verschiedenen Merkmalen wie Belastungsklasse, Radienklasse und Schwellenart zusammengefasst und der Einfluss dieser Parameter auf das Ergebnis untersucht werden.

Die Ergebnisse, für die einzelnen ausgewerteten Standardelemente sind in Tabelle 13, Tabelle 14 und

Tabelle 15 dargestellt. Dabei wird für jedes Standardelement ersichtlich, welcher Anteil an Querschnitten sich welchem Bereich zuordnen lässt.

Tabelle 13: Ergebnisse für Gleise mit Betonschwellen; statisch

BEREICH	1	2	3	4
<b>Beton; &gt;70.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 11.776)	91%	5%	2%	2%
<b>Beton; 45.000-70.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 77.089)	86%	6%	5%	3%
<b>Beton; 45.000-70.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 9.823)	84%	2%	0%	14%
<b>Beton; 45.000-70.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 5.012)	94%	4%	1%	1%

<b>Beton; 45.000-70.000; 400&lt;R&lt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 1.200)	76%	11%	2%	11%
<b>Beton; 45.000-70.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 2.592)	83%	10%	4%	3%
<b>Beton; 30.000-45.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 50.161)	83%	12%	5%	0%
<b>Beton; 30.000-45.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 21.672)	86%	3%	4%	7%
<b>Beton; 30.000-45.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 3.032)	83%	12%	5%	0%
<b>Beton; 30.000-45.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 2.224)	89%	8%	1%	2%
<b>Beton; 15.000-30.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 66.190)	82%	11%	7%	0%
<b>Beton; 15.000-30.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 45.022)	77%	7%	11%	5%
<b>Beton; 15.000-30.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 3.240)	90%	5%	5%	0%
<b>Beton; 15.000-30.000; 400&lt;R&lt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 5.360)	89%	2%	4%	5%
<b>Beton; 15.000-30.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 4.442)	93%	5%	2%	0%
<b>Beton; 15.000-30.000; 250&lt;R&lt;400; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 5.013)	90%	4%	2%	4%
<b>Beton; 8.000-15.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 6.342)	88%	12%	0%	0%
<b>Beton; 8.000-15.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 8.629)	83%	12%	5%	0%
<b>Beton; 8.000-15.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 610)	80%	19%	1%	0%
<b>Beton; 8.000-15.000; 400&lt;R&lt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 2.770)	90%	7%	3%	0%
<b>Beton; 8.000-15.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 877)	71%	28%	1%	0%
<b>Beton; 8.000-15.000; 250&lt;R&lt;400; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 3.597)	74%	15%	11%	0%

Tabelle 14: Ergebnisse für Gleise mit besohnten Betonschwellen; statisch

<b>BEREICH</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Beton bes.; 45.000-70.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 16.334)	90%	10%	0%	0%
<b>Beton bes.; 45.000-70.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 1.536)	99%	1%	0%	0%

<b>Beton bes.; 30.000-45.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 16.968)	92%	8%	0%	0%
<b>Beton bes.; 30.000-45.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 1.518)	98%	2%	0%	0%
<b>Beton bes.; 15.000-30.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 12.581)	95%	5%	0%	0%
<b>Beton bes.; 15.000-30.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 2.591)	96%	4%	0%	0%
<b>Beton bes.; 15.000-30.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 4.583)	98%	2%	0%	0%
<b>Beton bes.; 8.000-15.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 1.622)	96%	4%	0%	0%

Tabelle 15: Ergebnisse für Gleise mit Holzschwellen; statisch

<b>BEREICH</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Holz; 45.000-70.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 4.165)	85%	12%	1%	2%
<b>Holz; 45.000-70.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 20.482)	92%	2%	1%	5%
<b>Holz; 45.000-70.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 861)	97%	3%	0%	0%
<b>Holz; 45.000-70.000; 250&lt;R&lt;400; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 1.893)	83%	13%	3%	1%
<b>Holz; 30.000-45.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 3.262)	91%	8%	1%	0%
<b>Holz; 30.000-45.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 23.926)	92%	5%	1%	2%
<b>Holz; 15.000-30.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 3.518)	93%	6%	1%	0%
<b>Holz; 15.000-30.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 23.926)	92%	2%	2%	4%
<b>Holz; 15.000-30.000; 400&lt;R&lt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 634)	90%	10%	0%	0%
<b>Holz; 15.000-30.000; 250&lt;R&lt;400; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 769)	73%	26%	1%	0%
<b>Holz; 8.000-15.000; R&gt;600; 60E1</b> (Anzahl Querschnitte: 4.011)	99%	1%	0%	0%
<b>Holz; 8.000-15.000; R&gt;600; 54E2</b> (Anzahl Querschnitte: 2.338)	82%	16%	1%	1%

### 6.4.1 Ergebnisse nach Schwellentypen

Abbildung 45 zeigt das Gesamtergebnis in Abhängigkeit des Schwellentyps.

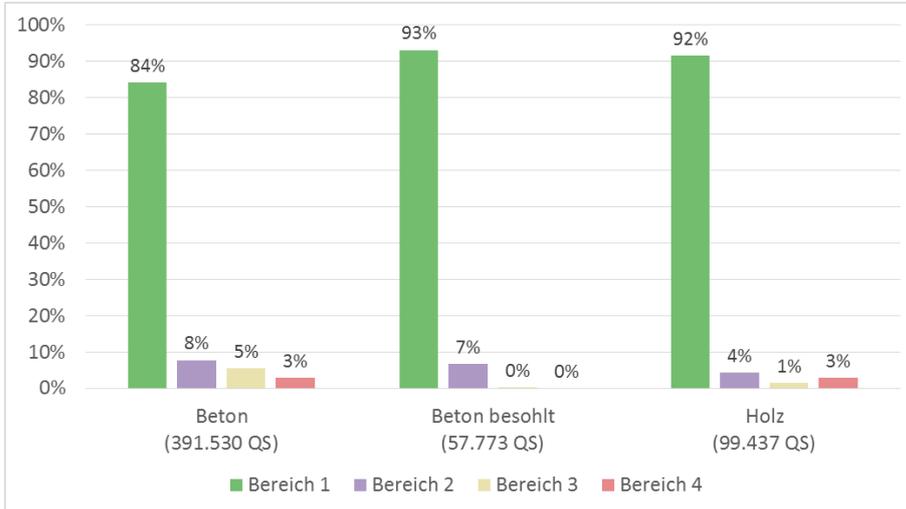


Abbildung 45: Ergebnis nach Schwellentyp; statisch

Dabei wird deutlich ersichtlich, dass die eingangs getroffene Annahme, dass die Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme ganz besonders für Betonschwellengleise große Relevanz besitzt, zutrifft. Sowohl der aktuelle (Bereich 3) als auch der zukünftige wirtschaftlich sinnvolle Bedarf (Bereich 2) an Schotterbettreinigungen ist bei Betonschwellen am größten. Der aktuelle Re-Investitionsbedarf ist bei Beton- und Holzschwellengleisen gleich groß. Bei besohlenen Betonschwellen wird kein Re-Investitionsbedarf ausgewiesen. Dies liegt daran, dass Betonschwellen mit Besohlung erst seit einigen Jahren verbaut werden und daher noch nicht das kritische Anlagentaler erreichen konnten, ab dem eine Re-Investition die wirtschaftlichere Variante darstellt. Allerdings wird bei besohlenen Betonschwellen auch kein aktueller REI-Bedarf ausgewiesen, was für das gute Qualitätsverhalten von Gleisen mit besohlenen Betonschwellen spricht.

## 6.4.2 Ergebnisse nach Belastungsklassen

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Auswertungen spezifisch nach Belastungsklassen für unterschiedliche Schwellenarten dargestellt.

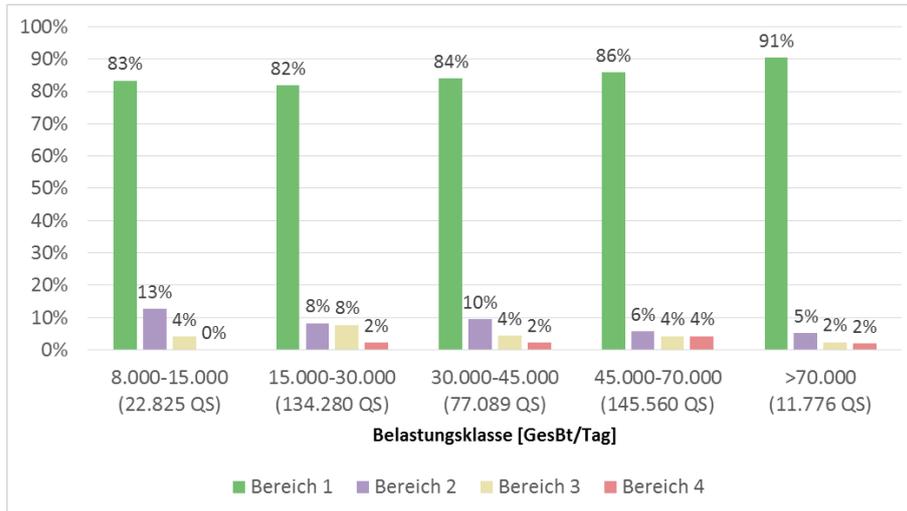


Abbildung 46: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit Betonschwellen; statisch

Abbildung 46 zeigt die Ergebnisse für Betonschwellen. In Bezug auf den aktuellen Schotterbettreinigungsbedarf (Bereich 3) ist festzustellen, dass dieser mit zunehmender Belastung abnimmt. Lediglich die Belastungsklasse 8.000 – 15.000 GesBt/Tag stellt hierbei eine Ausnahme dar. Auch der Bedarf an zukünftigen Schotterbettreinigungen (Bereich 2) zeigt sich in höheren Belastungsklassen vermindert. Der aktuelle Re-Investitionsbedarf nimmt in den verschiedenen Belastungsklassen ähnliche Größenordnungen an.

Dieses Ergebnis stellt sich konträr zu der grundsätzlichen Vermutung dar, dass der Schotterverschleiß und somit der Bedarf an Schotterbettreinigungen bei höheren Belastungen größer ist. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die intensivere Instandhaltungstätigkeit bei stärker belasteten Gleisen sein, zumal der Einfluss von Stopfarbeiten auf die Fraktalzahl noch nicht ausreichend geklärt ist. Weitere mögliche Gründe für das vorliegende Ergebnis sind die vermehrte Neuschotter-zugabe sowie die Verwendung hochwertigerer Schotterarten auf höher belasteten Strecken.

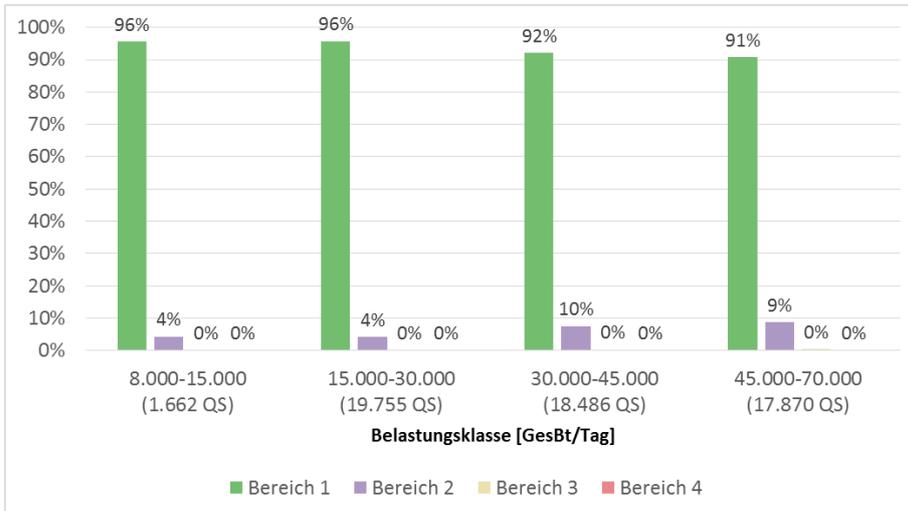


Abbildung 47: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit besohlenen Betonschwellen; statisch

Im Gegensatz zu unbesohlenen Betonschwellen zeigen Betonschwellen mit Besohlung auf stärker belasteten Gleisen einen deutlich höheren Bedarf an zukünftigen Schotterbettreinigungen (Bereich 2). Dies würde die Vermutung bestätigen, dass der Schotterverschleiß und somit der Bedarf an Schotterbettreinigungen auf höher belasteten Strecken größer ist. Die Belastungsklasse >70.000 GesBt/Tag wurde aufgrund der geringen Anzahl an auswertbaren Daten nicht mitberücksichtigt.

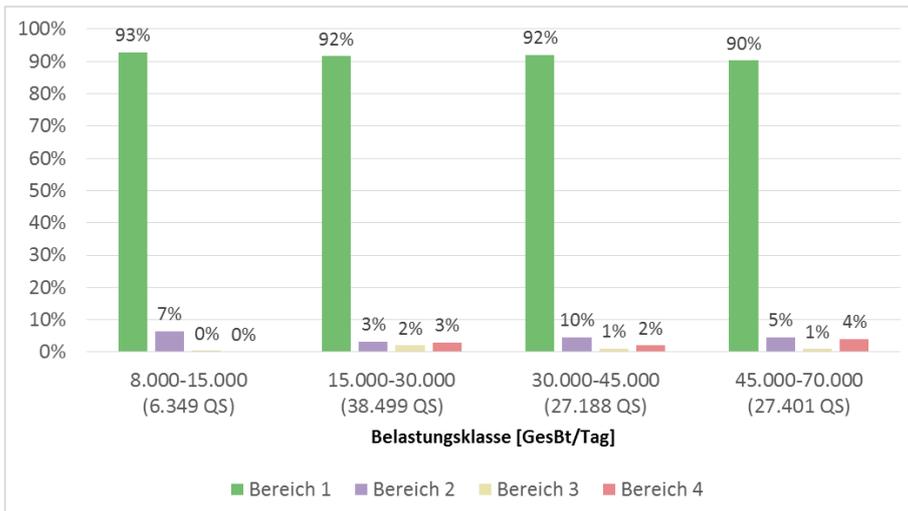


Abbildung 48: Ergebnis nach Belastungsklassen für Gleise mit Holzschwellen; statisch

Keine allgemein gültigen Aussagen betreffend der Belastungsklasse können bei Gleisen mit Holzschwellen getätigt werden. Die Belastungsklassen 30.000-45.000 GesBt/Tag weist hierbei mit 10 % den größten Bedarf an zukünftigen Schotterbettreinigungen (Bereich 2) auf, die Klasse 15.000 – 30.000 GesBt/Tag den geringsten. Der aktuelle

Bedarf an Re-Investitionen ist in der Belastungsklasse 45.000 – 70.000 GesBt/Tag am größten. Ebenso wie bei besohlenen Betonschwellen wurde aufgrund der quasi nicht vorhandenen Anzahl an auswertbaren Daten auf die Analyse der Belastungsklasse >70.000 GesBt/Tag verzichtet.

### 6.4.3 Ergebnisse nach Radienklassen

Die folgenden Abbildungen zeigen das Auswertungsergebnis spezifisch für die einzelnen Radienklassen. Dabei werden die Trassierungsradien der Strecke in drei Gruppen unterteilt:

- Radius zwischen 250 m und 400 m ( $250 < R < 400$ )
- Radius zwischen 400 m und 600 m ( $400 < R < 600$ )
- Radius größer als 600 m ( $R > 600$ )

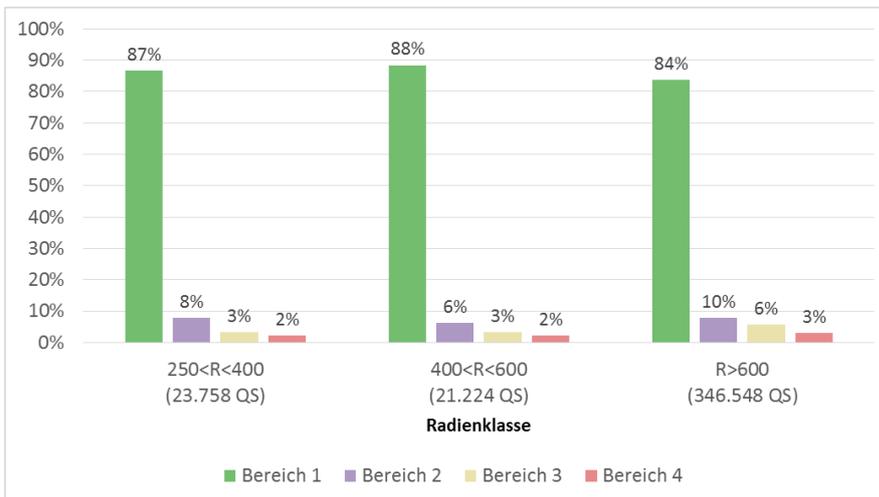


Abbildung 49: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit Betonschwellen; statisch

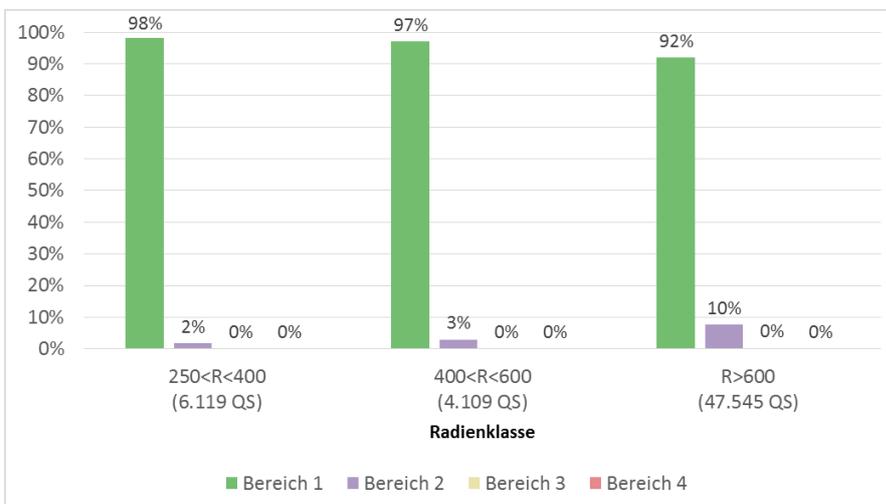


Abbildung 50: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit besohlenen Betonschwellen; statisch

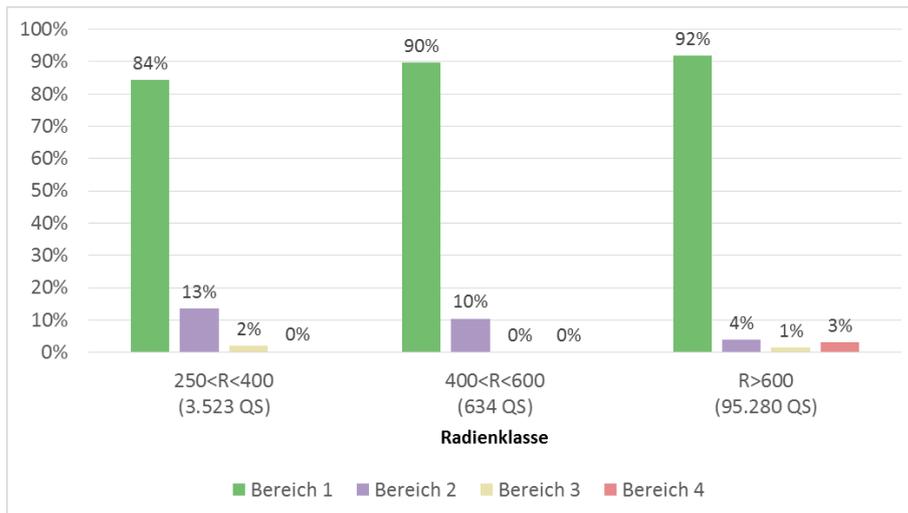


Abbildung 51: Ergebnis nach Radienklassen für Gleise mit Holzschwellen; statisch

Der größte wirtschaftlich sinnvolle Bedarf an Schotterbettreinigungen – sowohl gegenwärtig als auch zukünftig – zeigt sich für Betonschwellen in der Radienklasse  $R > 600$ . Ebenso prägt sich der Bereich 2 bei besohlenen Betonschwellen in der Radienklasse  $R > 600$  am stärksten aus. Dies kann wiederum, wie schon in Kapitel 6.4.2 beschrieben, mit der Intensität bzw. der Qualität der Instandhaltung zu tun haben bzw. auf die Schotterart zurückzuführen sein. Auch die im Allgemeinen geringeren Geschwindigkeiten im Bogen und die daraus resultierenden niedrigeren Belastungen können ein möglicher Grund für den geringeren Bedarf an Schotterbettreinigungen sein.

Im Gegensatz dazu zeigt sich bei Holzschwellen vor allem bei engen Radien ( $250 < R < 400$ ) ein hoher zukünftiger Bedarf an Schotterbettreinigungen, der aus wirtschaftlichen Gründen gedeckt werden sollte.

#### 6.4.4 Gesamtergebnis

Das Gesamtergebnis für alle ausgewerteten Standardelemente ist in Abbildung 52 dargestellt.

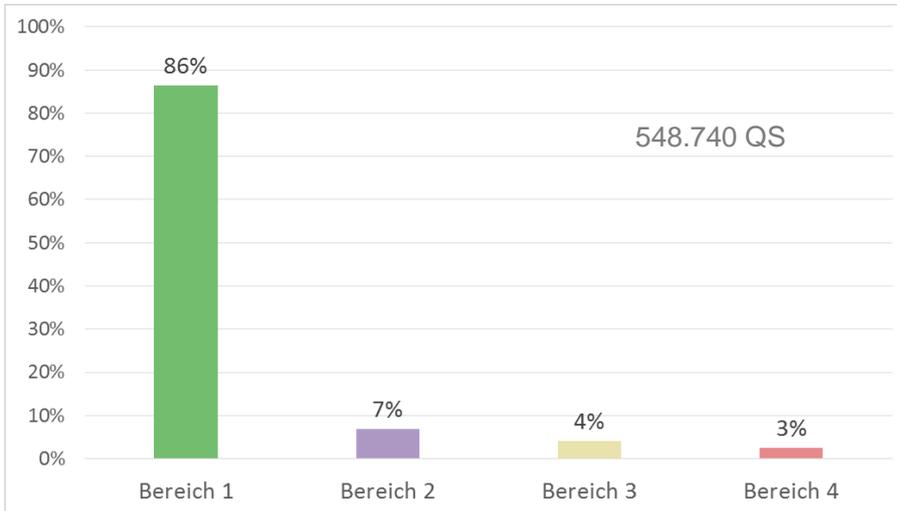


Abbildung 52: Ergebnis gesamt; statisch

Das Ergebnis zeigt bei statischer Betrachtung einen aktuellen wirtschaftlich sinnvollen Schotterbettreinigungsbedarf in 4 % des Netzes. In 7 % des Netzes wird eine Schotterbettreinigung in Zukunft notwendig werden und deren Durchführung ist aus wirtschaftlichen Überlegungen sinnvoll. Zudem zeigt das Ergebnis, dass derzeit auf 3 % des Netzes eine Schotterbettreinigung notwendig wäre, aufgrund des bereits hohen Alters der Anlage allerdings wirtschaftlich nicht mehr vertretbar ist. Das bedeutet, dass für diese Abschnitte eine Re-Investition die sinnvollste Variante darstellt.

Werden die Prozentwerte auf alle Querschnitte umgelegt, die derzeit in der TUG-Datenbank vorhanden und mit Beton-, besohnten Beton- oder Holzschnellen ausgestattet sind (727.097 Querschnitte bzw. 3.635,5 km), ergeben sich die in Abbildung 53 dargestellten Längen. Dabei wird wiederum die statische Auswertung betrachtet.

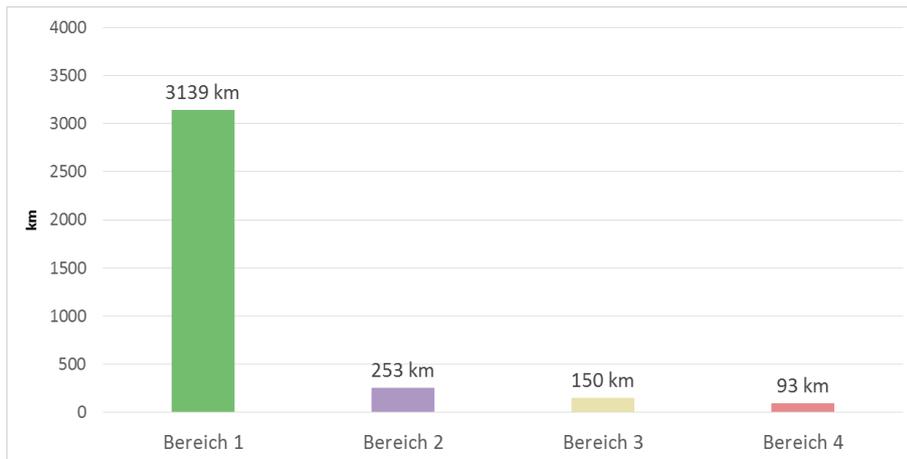


Abbildung 53: Ergebnis gesamt, hochgerechnet auf das TUG-Netz; statisch

Die Analyse der TUG-Datenbank ergab, dass in den Jahren 2009 bis 2013 im Durchschnitt jährlich auf 16 km Gleis eine Schotterbettreinigung durchgeführt wurde. Dies liegt somit deutlich unter jener Menge, für die aktuell ein Schotterbettreinigungsbedarf besteht. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass in den letzten Jahren anstatt der Schotterbettreinigung andere Instandhaltungstätigkeiten durchgeführt wurden, die allerdings nicht dazu geeignet waren, die Fraktalzahl über den Grenzwert von  $-8,5$  zu heben und sich der Bedarf an REI-Einsätzen somit über die Jahre aufsummiert hat. Die Auswirkung von Stopfeinsätzen auf die Fraktalzahl ist allerdings noch nicht ausreichend erforscht. Aus diesem Grund wäre es durchaus möglich, dass sich für einige Streckenabschnitte, die sich derzeit in Bereich 3 befinden, eine Schotterbettreinigung durch Stopfarbeiten mit ausreichender Neuschotterzugabe noch einige Jahre hinauszögern lässt.

Ebenso ergab die Analyse, dass in den Jahren 2009 bis 2013 im Durchschnitt jährlich auf 101 km eine Gleisneulage durchgeführt wurde. Dies deckt sich sehr gut mit dem aktuell notwendigen Re-Investitionsbedarf von 93 km. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass die in der Datenbank vermerkten Re-Investitionen nicht nur aufgrund des schlechten Schotterzustandes durchgeführt wurden. Gleisneulagen erfolgen oft auch aufgrund des Versagens anderer Komponenten wie beispielsweise der Schwelle. Das bedeutet, dass neben dem in Abbildung 53 ausgewiesenen Re-Investitionsbedarf von 93 km, der ausschließlich aufgrund des schlechten Schotterzustandes zustande kommt, noch weitere Abschnitte aufgrund des Versagens anderer Komponenten hinzukommen. Somit wird der gesamte aktuelle Re-Investitionsbedarf höher sein als die durchschnittlich durchgeführte Menge an Gleisneulagen in den letzten Jahren.

## 7 Weiterführende Analysemöglichkeiten

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode zur Überprüfung der Wirtschaftlichkeit der Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme während der strategischen Nutzungsdauer des Gleises, bietet eine Reihe weiterer Analysemöglichkeiten. Obwohl diese nicht zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind, sollen in den nachfolgenden Unterkapiteln vier dieser Möglichkeiten kurz beschrieben werden. Dabei wird wie schon in den Kapiteln zuvor, jenes Standardelement beispielhaft analysiert, welches im Netz der ÖBB am häufigsten vorkommt (siehe Kapitel 5.2).

### 7.1 Verlängerung der Nutzungsdauer

Bei der Berechnung des kritischen Jahres im Lebenszyklus, bis zu dem eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist, wurde bisher immer davon ausgegangen, dass die gesamte Anlage maximal die strategische Nutzungsdauer erreichen kann. Geht man allerdings davon aus, dass der Schotter das kritische Element ist, welches die Nutzungsdauer des Gleises beschränkt, so kann die tatsächliche Nutzungsdauer auch über die strategische Nutzungsdauer hinaus verlängert werden, wenn während des Lebenszyklus eine Schotterbettreinigung durchgeführt wird. Voraussetzung dafür ist aber in jedem Fall, dass alle anderen Komponenten und hier vor allem die Schwellen, ebenfalls länger als die strategische Nutzungsdauer ohne teure Instandhaltungstätigkeiten bzw. Erneuerungsmaßnahmen auskommen.

Zur Untersuchung der Auswirkungen einer Nutzungsdauerverlängerung, wurde die Berechnung auf dieselbe Art und Weise, wie in Kapitel 5 beschrieben, durchgeführt. Dabei wurden jedoch die Nutzungsdauern um drei, sechs und neun Jahre verlängert, wenn eine Schotterbettreinigung während des Lebenszyklus durchgeführt wird. Ab Erreichen der strategischen Nutzungsdauer wurde eine um jährlich 10 % erhöhte Mängelbehebung angesetzt, was den zunehmenden Bedarf an kleineren Instandhaltungstätigkeiten mit zunehmendem Analagenalter abbildet. Das Stopfintervall wurde in den Jahren nach Ende der strategischen Nutzungsdauer nicht verändert, da angenommen werden kann, dass es sich aufgrund der Schotterbettreinigung in intaktem Zustand befindet. Umfangreichere Instandhaltungstätigkeiten wie der Austausch von Schwellen wurden nicht berücksichtigt.

Tabelle 16 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen mit einer angenommenen Nutzungsdauerverlängerung von drei, sechs und neun Jahren für das Hauptstandardelement der ÖBB.

**Tabelle 16: Kritisches Jahr für die Schotterbettreinigung bei Verlängerung der Nutzungsdauer**

Verlängerung der ND	Ergebnis statisch	Ergebnis dynamisch
0 Jahre	20/30 (67%)	22/30 (73%)
3 Jahre	22/33 (67%)	24/33 (73%)
6 Jahre	23/36 (64%)	26/36 (72%)
9 Jahre	25/39 (64%)	28/39 (72%)

Das Ergebnis zeigt, dass sich bei einer Verlängerung der Nutzungsdauer auch das kritische Jahr für die Schotterbettreinigung nach hinten verschiebt. Bei einer angenommenen Verlängerung der Nutzungsdauer um jeweils drei Jahre, verlängert sich der Zeitraum, bis zu dem eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist, bei statischer Betrachtung um jeweils ein bis zwei und bei dynamischer Betrachtung um je zwei Jahre.

Relativ auf die angenommene Nutzungsdauer bezogen, bleibt der Zeitraum bis zu dem der REI-Einsatz wirtschaftlich sinnvoll ist – unabhängig von der Nutzungsdauer, die erreicht wird, – nahezu gleich. Im Beispiel reicht dieser Zeitraum bei statischer Berechnung bis ca. zwei Drittel und bei dynamischer Betrachtung bis knapp drei Viertel des Lebenszyklus.

Das bedeutet umgekehrt, dass auch sehr einfach abgeschätzt werden kann, wie lange sich die Nutzungsdauer verlängern müsste, wenn die Schotterbettreinigung in einem bestimmten Jahr durchgeführt werden soll. Da das Ergebnis, relativ auf die Nutzungsdauer bezogen, annähernd gleich bleibt, kann diese Abschätzung mit den in Tabelle 4 bis Tabelle 9 dargestellten Faktoren getroffen werden, welche sich auf die strategische Nutzungsdauer beziehen.

Dies gilt allerdings ebenfalls nur unter der Voraussetzung, dass es auch bei einer etwaigen Verlängerung der Nutzungsdauer durch eine Schotterbettreinigung zu keinen umfangreichen und teuren Instandhaltungsmaßnahmen an anderen Komponenten kommt. Werden diese Tätigkeiten notwendig, so müssten diese in der Wirtschaftlichkeitsrechnung Berücksichtigung finden. Das bedeutet, dass dann eine Überprüfung, ob eine Schotterbettreinigung in einem bestimmten Jahr wirtschaftlich sinnvoll ist, für den Einzelfall mit den entsprechenden Randbedingungen erfolgen müsste.

## 7.2 Zeitpunkt der Schotterbettreinigung

Für das Hauptstandardelement im Streckennetz der ÖBB wurde ebenfalls untersucht, wann der sinnvollste Zeitpunkt ist, eine Schotterbettreinigung durchzuführen, wenn diese in Zukunft notwendig wird. Dabei wurde angenommen, dass der REI-Einsatz aufgrund des Verlaufs der Fraktalzahls über die Zeit kurz vor Erreichen des kritischen Jahres für die Schotterbettreinigung erforderlich wird. Es stellt sich nun die Frage, ob die Schotterbettreinigung bei Erreichen des kritischen Niveaus oder bereits früher erfolgen soll. Der Unterschied besteht darin, dass bei einer früheren Durchführung des REI-Einsatzes intensive Instandhaltungsmaßnahmen (Stopfarbeiten) eingespart werden können, die notwendig werden, wenn abgewartet wird, bis das kritische Niveau des Schotterzustandes erreicht wird. Die Auswertung wurde dabei wiederum mit Hilfe des Monitorings der durchschnittlichen Jahreskosten (statische Betrachtung) und der Annuitäten (dynamische Betrachtung) durchgeführt.

Das Ergebnis der statischen Betrachtung zeigt, dass es sinnvoll ist, die Schotterbettreinigung möglichst früh durchzuführen. Dies scheint plausibel, da umso früher der REI-Einsatz erfolgt, umso mehr Instandhaltung (Stopfeinsätze) eingespart werden kann. Weiters kommt es zu keiner Abzinsung der Kosten für die Schotterbettreinigung. Somit fällt in der Berechnung nicht ins Gewicht, wann diese durchgeführt wird. Damit kann gesagt werden, dass aufgrund der statischen Betrachtung die Schotterbettreinigung bezüglich des Zeitpunktes so früh erfolgen soll, dass vor dem REI-Einsatz so wenig Instandhaltungstätigkeiten wie möglich anfallen.

Im Gegensatz dazu zeigt die dynamische Betrachtung, dass es sinnvoller ist, die Schotterbettreinigung erst kurz vor Erreichen des kritischen Wertes für einen entsprechend schlechten Schotterzustand durchzuführen. Das Ergebnis ist darauf zurückzuführen, dass umso später der REI-Einsatz angesetzt wird, umso stärker die Kosten für den Einsatz abgezinst werden. Wenn die Schotterbettreinigung hinausgezögert wird, fallen zwar mehr Instandhaltungstätigkeiten (Stopfarbeiten) an, die Abzinsung der Kosten für den REI-Einsatz wirken sich allerdings stärker aus als der zusätzliche Stopfaufwand. Dabei ist zu beachten, dass der Zahlungszeitpunkt der Kosten für die Stopfarbeiten ebenso berücksichtigt wird und es somit ebenfalls zu einer Abzinsung dieser Kosten kommt.

Die Frage, wann die Schotterbettreinigung durchgeführt werden soll, wird sich meist deutlich vor dem Erreichen des kritischen Niveaus der Schotterqualität stellen. Aufgrund dessen handelt es sich bei dieser Fragestellung um einen Ausblick vieler Jahre in die Zukunft und die Anwendung der dynamischen Berechnungsmethode scheint in diesem Fall sinnvoller. Das bedeutet, dass die Tendenz dahin gehen soll, die Schotterbettreinigung erst kurz vor dem Erreichen des kritischen Schotterzustandes durchzuführen. Dies bringt zudem den Vorteil mit sich, dass bei einer späteren Durchführung des REI-Einsatzes die

Wahrscheinlichkeit steigt, die Nutzungsdauer der gesamten Gleisanlage über die strategische Nutzungsdauer hinaus verlängern zu können.

Die oben getätigten Überlegungen stellen einen grundsätzlichen bzw. strategischen Ansatz dar. Wie die wirtschaftlich optimale Vorgehensweise im Einzelfall aussieht, muss jeweils im Detail geprüft werden. Hierbei spielt – neben den oben getätigten Überlegungen – die Geschwindigkeit der Verschlechterung des Schotterzustandes und damit der Zeitpunkt im Lebenszyklus, wann das kritische Niveau der Schotterqualität erreicht wird, eine zentrale Rolle. Des Weiteren muss geprüft werden, ob der REI-Einsatz sinnvoll mit anderen Instandhaltungstätigkeiten im selben oder in benachbarten Gleisabschnitten kombiniert werden kann.

### 7.3 Zukünftiger Re-Investitionsbedarf

Da der Fokus der Arbeit auf der Ermittlung des aktuellen und zukünftigen Bedarfs an Schotterbettreinigungen gelegt wurde, ist der zukünftige Bedarf an Re-Investitionen während der strategischen Nutzungsdauer bisher nicht berücksichtigt worden.

Da diese Information mit einigen Adaptierungen an der bisher entwickelten Methodik gewonnen werden kann, wird nachfolgend erklärt, wie der zukünftige Re-Investitionsbedarf während der strategischen Nutzungsdauer ermittelt werden kann. Dazu ist es sinnvoll, das Diagramm aus Abbildung 40 – wie in Abbildung 54 dargestellt – um den Bereich 5 zu ergänzen.

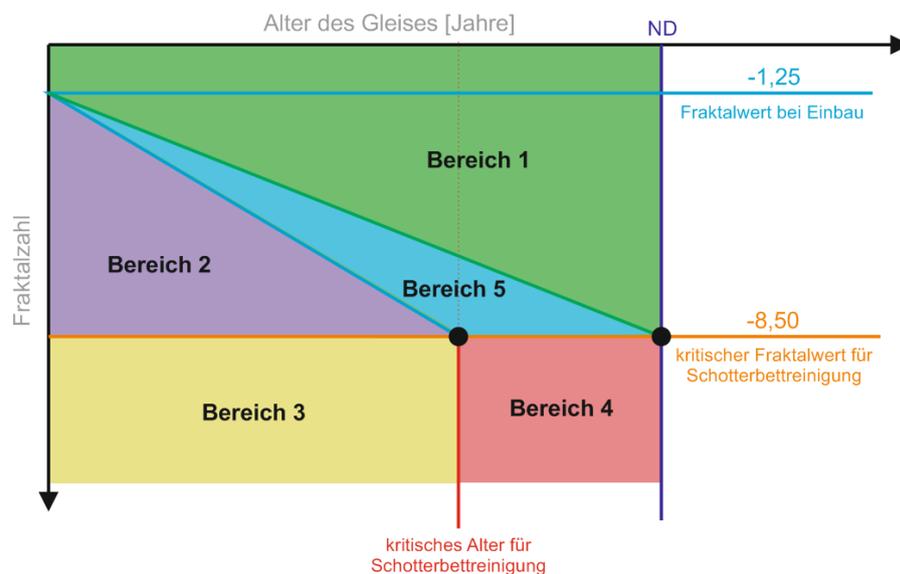


Abbildung 54: Adaptierte Bereichseinteilung aufgrund der abgeleiteten Maßnahmen

Die Aussagen bzw. die Maßnahmen, die mit der Bereichseinteilung in Verbindung stehen, bleiben für die Bereiche 2, 3, und 4 unverändert. Das bedeutet, dass für Abschnitte in Bereich 2 in Zukunft eine Schotterbettreinigung notwendig wird und aus wirtschaftlichen Überlegungen auch durchgeführt werden soll. Bereich 3 gibt den aktuell vorhandenen, wirtschaftlich sinnvollen Schotterbettreinigungsbedarf an und Bereich 4 stellt den aktuellen, aufgrund des Schotterzustandes notwendigen Re-Investitionsbedarf dar.

Für all jene Querschnitte, die zuvor in Bereich 1 zu liegen gekommen sind, lautete die Strategie, dass keine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist. Der Grund liegt entweder darin, dass sie innerhalb der strategischen Nutzungsdauer aus technischer Sicht nicht notwendig wird oder wirtschaftlich nicht sinnvoll ist, da sie erst nach Erreichen des kritischen Jahres für die Schotterbettreinigung erforderlich wird. Letzteres beschreibt mit anderen Worten den Re-Investitionsbedarf, der vor Erreichen der strategischen Nutzungsdauer aufgrund des mangelhaften Schotterzustandes auftritt und wird nun mit Hilfe von Bereich 5 abgebildet. Das bedeutet auch, dass sich Abschnitte, die sich nun in Bereich 1 befinden, aufgrund des Schotterzustandes die strategische Nutzungsdauer zumindest erreichen bzw. diese überschreiten und länger genutzt werden können.

### 7.3.1 Zuordnung

Die Zuordnung eines konkreten Gleisabschnittes zu den Bereichen 3 und 4 erfolgt unter den gleichen Bedingungen wie in Kapitel 6.2.4: Ist die kritische Fraktalzah für die Schotterbettreinigung unterschritten, hängt es vom aktuellen Anlagenalter ab, ob der Abschnitt Bereich 3 oder 4 angehört.

Wird die Bedingung

$$10,66 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

aus Kapitel 6.4.2 nicht erfüllt, kommt der betrachtete Abschnitt wiederum in Bereich 2 zu liegen. Ist die Bedingung erfüllt, so ist nun zu prüfen, ob der Abschnitt Bereich 1 oder Bereich 5 zugeordnet wird.

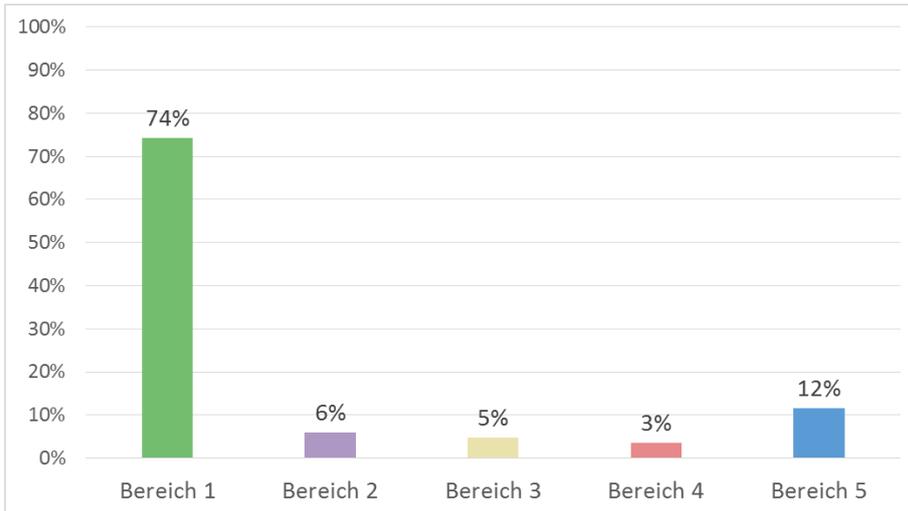
Dabei ist nun die Steigung der Geraden in Abhängigkeit der strategischen Nutzungsdauer maßgeblich und es muss die folgende Bedingung überprüft werden:

$$7,25 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

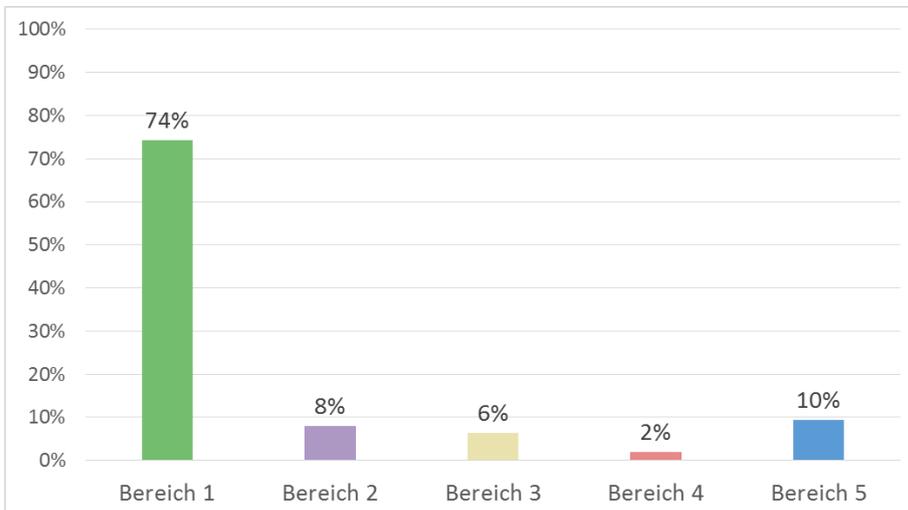
Ist diese Bedingung erfüllt, ist der Abschnitt Bereich 1 zuzuordnen, ansonsten Bereich 5.

### 7.3.2 Auswertungsbeispiel

Abbildung 55 (statische Betrachtung) und Abbildung 56 (dynamische Betrachtung) zeigen die Verteilung aller Querschnitte des Hauptstandardelements der ÖBB auf die unterschiedlichen Bereiche.



**Abbildung 55: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf; statisch**



**Abbildung 56: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf; dynamisch**

Vergleicht man die statischen Ergebnisse der adaptierten mit der ursprünglichen Untersuchung, wird ersichtlich, dass 12 % aller Querschnitte nun in Bereich 5 zu liegen kommen und sich zuerst in Bereich 1 befunden haben. Die Bereiche 2, 3, und 4 prägen sich hingegen gleich aus, was aufgrund der Geometrie des Diagramms auch der Fall sein muss.

Das bedeutet, dass jene 12 %, die sich nun in Bereich 5 befinden, die kritische Fraktalzahl erst nach dem kritischen Alter für eine Schotterbetteinigung, allerdings noch innerhalb der strategischen Nutzungsdauer, erreichen. Somit ist für Querschnitte in diesem Bereich eine Re-Investition die wirtschaftlichste Variante, wenn sich ein entsprechend schlechter Schotterzustand eingestellt hat.

74 % der Querschnitte befinden sich nun in Bereich 1. Für diese Abschnitte bedeutet das, dass während der strategischen Nutzungsdauer weder eine Schotterbetteinigung noch eine Re-Investition aufgrund von schlechtem Schotterzustand notwendig ist. Weiters heißt das, dass diese Anlagen – solange keine größeren und teuren Instandhaltungstätigkeiten an anderen Komponenten notwendig sind – länger genutzt werden können als es die strategische Nutzungsdauer angibt.

Vergleicht man wieder die Ergebnisse der statischen und der dynamischen Berechnungen, so kommt es – wie schon in den Betrachtungen zuvor – zu einer Verschiebung von Bereich 3 in Bereich 2. Des Weiteren kommt es zu einer Verlagerung der Anzahl von Querschnitten von Bereich 5 zu Bereich 2. Dies liegt wiederum darin begründet, dass in der dynamischen Betrachtung das kritische Jahr für die Schotterbetteinigung etwas später im Lebenszyklus des Standardelements zu liegen kommt und sich die Schotterbetteinigung somit länger wirtschaftlich bezahlt macht.

## 7.4 Intensivierter Instandhaltungsbedarf

In den bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass ein Fraktalwert von -8,5 erreicht werden muss, ehe eine Schotterbettreinigung notwendig wird. Der kritische Fraktalwert wurde dabei aufgrund jener Gleise ermittelt, die bereits über mehrere Jahre hinweg ein jährliches Stopfintervall aufweisen. Das bedeutet allerdings auch, dass für Gleise, die knapp davor sind den kritischen Fraktalwert zu erreichen, bereits ein erhöhter Instandhaltungsaufwand notwendig ist.

Diese Gleisabschnitte können durch die Ergänzung des Diagramms in Abbildung 54 durch den Bereich 6 ersichtlich gemacht werden (Abbildung 57).

Für die gegenständliche Betrachtung wird vereinfacht ein Fraktalwert von -7,1 angenommen, ab dem es zu einem merkbar erhöhten Instandhaltungsbedarf kommt. Dieser Wert entsteht durch die Mittelung des kritischen Fraktalwerts (-8,5) und dem Wert von -5,7. Letzterer wurde in Kapitel 6.2.2 ermittelt und stellt jenen Fraktalwert dar, bei dem Gleise mit bereits deutlich fortgeschrittenem Anlagenalter noch ein relativ hohes Instandhaltungsintervall von fünf Jahren aufweisen.

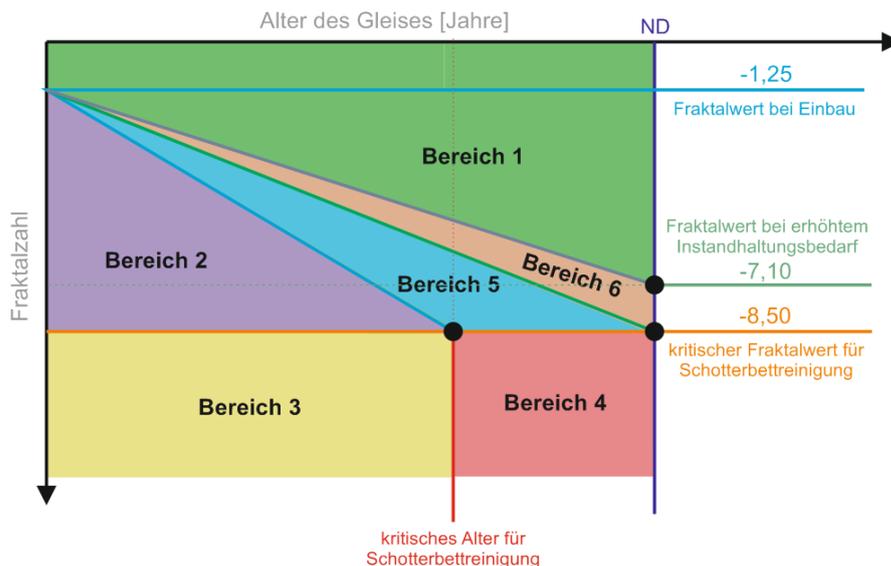


Abbildung 57: Adaptierte Bereichseinteilung inkl. Bereich mit erhöhtem Instandhaltungsaufwand

### 7.4.1 Zuordnung

Die Zuordnung von konkreten Gleisabschnitten erfolgt für die Bereiche 3, 4, 2 und 5 wie schon in Kapitel 7.3.1 beschrieben. Sind die beiden Bedingungen

$$10,66 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

und

$$7,25 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

erfüllt, gehört der betrachtete Abschnitt entweder Bereich 1 oder 6 an. Dazu muss noch folgende Überprüfung durchgeführt werden:

$$5,85 > \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

Diese Bedingung überprüft die Steigung des Verlaufs der aktuellen Fraktalzahls über die Zeit im Vergleich zur Steigung jener Linie, die den kritischen Verlauf bezüglich eines intensivierten Instandhaltungsbedarfs darstellt. Ist die Bedingung erfüllt, ist der Abschnitt Bereich 1 zuzuordnen, wenn nicht, gehört der Abschnitt dem Bereich 6 an.

#### 7.4.2 Auswertungsbeispiel

Abbildung 58 zeigt wiederum für das Hauptstandardelement im ÖBB-Netz, wie sich die Querschnitte auf die einzelnen Bereiche verteilen. Dabei wird deutlich, dass es in den Bereichen 2, 3, 4 und 5 zu keinen Veränderungen kommt. Im neu definierten Bereich kommen nun 7 % aller Querschnitte zu liegen, die sich von Bereich 1 hierhin verschieben. Für Abschnitte in diesem Bereich ist innerhalb der strategischen Nutzungsdauer aufgrund des Schotterzustandes zwar weder eine Schotterbetteinigung noch eine Re-Investition notwendig, der Instandhaltungsbedarf wird sich bis zum Ende der Nutzungsdauer allerdings deutlich erhöhen. Dies spiegelt einen Zustand wider, der schlechter ist, als jener, der von einem Gleis erwartet wird, dessen Alter sich noch innerhalb der strategischen Nutzungsdauer befindet.

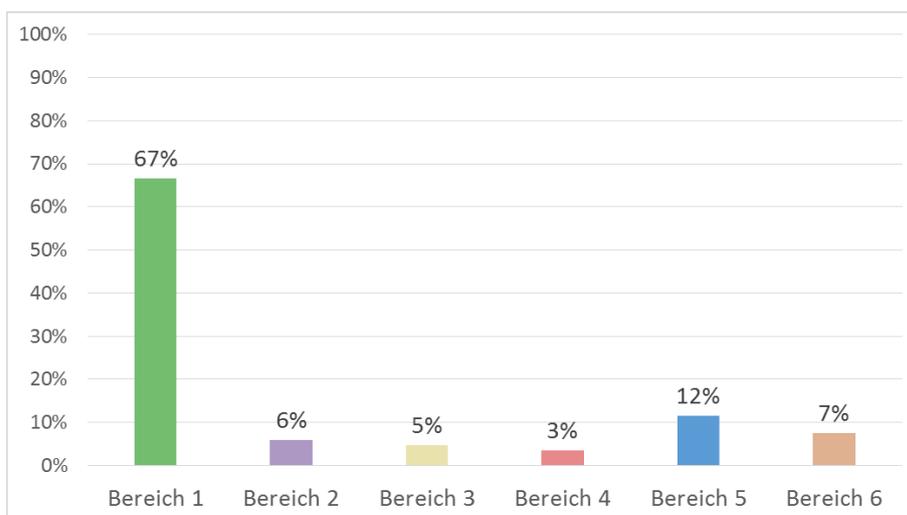
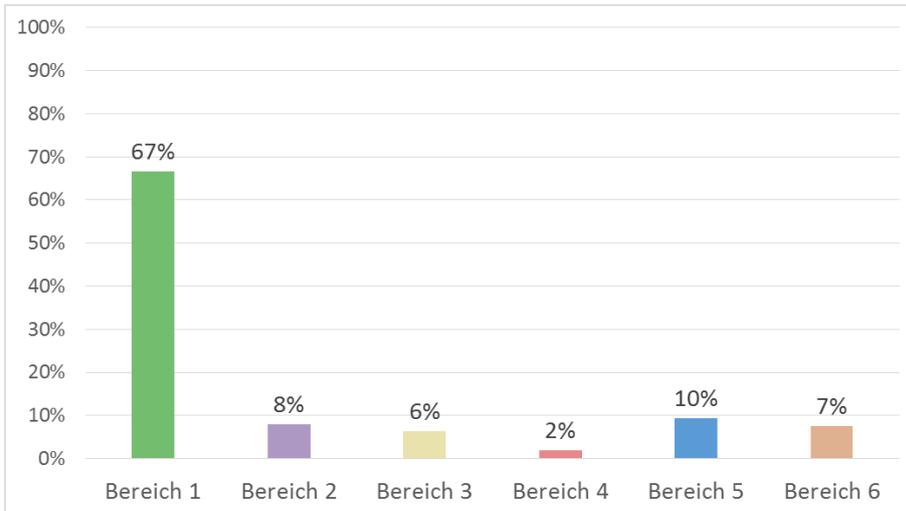


Abbildung 58: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf und Bedarf an erhöhter Instandhaltung; statisch



**Abbildung 59: Ergebnis für das Hauptstandardelement im Netz der ÖBB inkl. zukünftigem Re-Investitionsbedarf und Bedarf an erhöhter Instandhaltung; dynamisch**

Betrachtet man das dynamische Ergebnis (Abbildung 59), so kommt es zu keinen Veränderungen in den Bereichen 1 und 6, da diese nicht vom kritischen Jahr für die Schotterbettreinigung abhängig sind. Beim Vergleich der statischen und dynamischen Betrachtung kommt es in den Bereichen 2, 3, 4 und 5 zu den gleichen Verschiebungen wie schon in Kapitel 7.3, da die Ergänzung von Bereich 6 keinen Einfluss auf diese Bereiche hat.

## 7.5 Anpassung der Instandhaltung

Mit Hilfe der entwickelten Methodik ist es möglich, aufgrund der aktuellen Fraktalzahls, des aktuellen Anlagenalters sowie der strategischen Nutzungsdauer eine Strategie zu entwickeln, wie mit der Schotterbettung gegenwärtig bzw. zukünftig umgegangen werden soll. Dadurch wird es allerdings auch möglich, die gesamte Instandhaltung für einen betrachteten Gleisabschnitt anzupassen, damit sich die Lebenszykluskosten der Anlage möglichst gering gestalten. Dies soll exemplarisch anhand von Abbildung 60 erklärt werden.

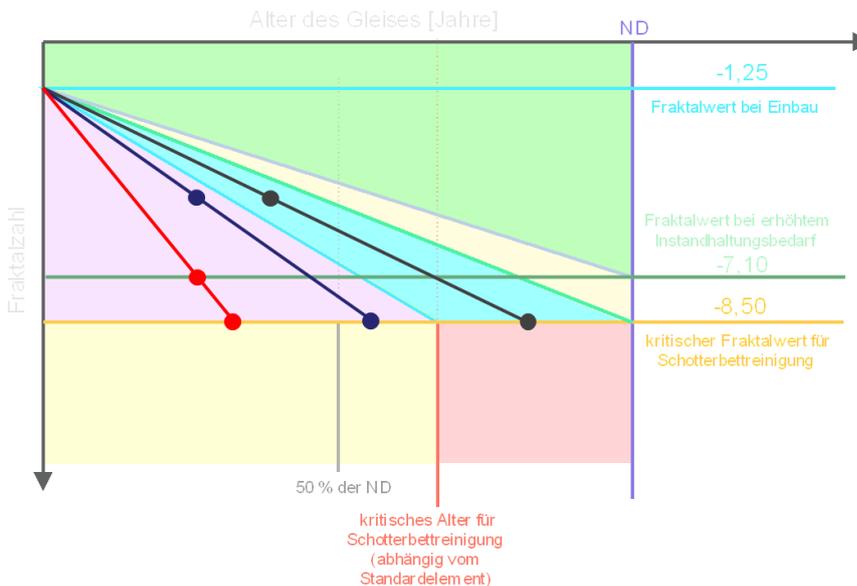


Abbildung 60: Beispiele möglicher Verläufe der Fraktalzahls über die Zeit

Tritt beispielsweise der Fall auf, dass ein Abschnitt in Bereich 5 zu liegen kommt (schwarze Linie), bedeutet dies, dass der Schotterzustand vor Erreichen der strategischen Nutzungsdauer entsprechend schlecht ist und das Schotterbett gereinigt werden müsste. Aufgrund des dann schon fortgeschrittenen Anlagenalters, stellt allerdings eine Re-Investition der gesamten Anlage zu diesem Zeitpunkt die wirtschaftlichere Variante dar. Da es somit möglich ist, den Zeitpunkt abzuschätzen, wann eine Re-Investition notwendig wird, kann die Instandhaltung der Gesamtkonstruktion so angepasst werden, dass kurz vor der Erneuerung der Anlage keine wesentlichen bzw. teuren Instandhaltungstätigkeiten (z.B. Zwischenlagenwechsel, Schienenschleifen) mehr durchgeführt werden.

Stellt sich der Verlauf wie in Abbildung 60 durch die blaue Linie dargestellt ein, bedeutet das, dass ein REI-Einsatz notwendig werden wird, nachdem bereits mehr als 50 % der Nutzungsdauer verstrichen sind, das kritische Alter für die Schotterbettreinigung allerdings noch nicht erreicht ist. Das bedeutet, dass eine Schotterbettreinigung eine wirtschaftliche Instandhaltungstätigkeit darstellen wird, wenn sich ein entsprechend schlechter Schotterzustand (bzw. eine Fraktalzahls von -8,5) einstellt. Dabei ist wesentlich, dass während des gesamten Lebenszyklus für die übrigen

Komponenten alle notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen gesetzt werden, da gewährleistet werden muss, dass diese die strategische Nutzungsdauer erreichen. Würde das Versagen anderer Komponenten eine Re-Investition vor dem Ende der strategischen Nutzungsdauer notwendig machen, gefährdet dies die Wirtschaftlichkeit eines durchgeführten REI-Einsatzes.

Die rote Linie beschreibt den Fall, dass eine Schotterbettreinigung bereits notwendig wird, bevor die Hälfte der strategischen Nutzungsdauer verstrichen ist. In diesem Szenario ist zu prüfen, ob es möglich ist, durch intensive Instandhaltungstätigkeiten einen REI-Einsatz bis nach der Hälfte der Nutzungsdauer hinauszuzögern. Gelingt das nicht, muss befürchtet werden, dass während der Nutzungsdauer der Anlage eine zweite Schotterbettreinigung notwendig wird. Des Weiteren ist ebenfalls darauf zu achten, dass an den übrigen Komponenten der Anlage alle notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, damit die strategische Nutzungsdauer erreicht werden kann.

In allen beschriebenen Szenarien muss beachtet werden, dass ab dem Zeitpunkt, wo ein Fraktalwert von  $-7,1$  erreicht wird, mit einem erhöhten Instandhaltungsaufwand am Schotterbett zu rechnen ist.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit einer durchgehenden Schotterbettreinigung als Instandhaltungsmaßnahme entwickelt.

Dazu wurde in einem ersten Schritt berechnet, bis zu welchem Jahr des Lebenszyklus eines Standardelements eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist, wenn dadurch gewährleistet wird, dass genau die strategische Nutzungsdauer erreicht wird. Die Berechnung wurde für insgesamt 84 Standardelemente sowohl statisch als auch dynamisch (Zinssatz 5 %) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Tabelle 17 für alle Schwellenarten zusammengefasst. Bei den Werten in der Tabelle handelt es sich um gewichtete Mittelwerte auf Basis der Anzahl der Querschnitte jedes einzelnen Standardelements.

**Tabelle 17: Ergebnisse, bis wann eine Schotterbettreinigung im Lebenszyklus sinnvoll ist – bezogen auf die strategische Nutzungsdauer**

	ausgewertete Standardelemente	Ergebnis statisch	Ergebnis dynamisch
Beton	54	68%	74%
Beton besohlt	14	69%	79%
Holz	16	69%	73%

Mit Hilfe der Fraktalanalyse gelingt es, auf den Zustand des Schotters zu schließen. In der vorliegenden Arbeit wurde der kritische Fraktalwert, ab dem eine Schotterbettreinigung notwendig ist, mit -8,5 errechnet.

Mit Hilfe des kritischen Alters, bis zu dem eine Schotterbettreinigung wirtschaftlich sinnvoll ist, der kritischen Fraktalzahl und der Annahme, dass sich die Fraktalzahl linear über die Zeit verschlechtert, kann das in Abbildung 40 dargestellte Diagramm gezeichnet werden, welches in 4 Bereiche unterteilt ist. Dieses lässt sich um weitere 2 Bereiche ergänzen (Abbildung 57), wobei aus der Zuordnung zu einem der Bereiche die folgenden Konsequenzen abgeleitet werden können:

- **Bereich 1:** Abschnitte, die sich in diesem Bereich befinden, erreichen den kritischen Fraktalwert während der strategischen Nutzungsdauer nicht. Das bedeutet, dass für Abschnitte in diesem Bereich eine Schotterbettreinigung weder aktuell noch in Zukunft technisch notwendig ist. Ebenso ist während der strategischen Nutzungsdauer kein erhöhter Instandhaltungsaufwand zu erwarten.
- **Bereich 2:** Dieser Bereich sagt aus, dass aktuell noch keine Schotterbettreinigung notwendig ist. Aufgrund des – im Vergleich zum kritischen Verlauf – ungünstigeren Verschlechterungsverhaltens, wird die kritische Fraktalzahl allerdings vor dem kritischen Jahr für die Schotterbettreinigung erreicht. Das bedeutet

ein REI-Einsatz wird notwendig werden und kann aus wirtschaftlichen Überlegungen auch durchgeführt werden.

- **Bereich 3:** Der kritische Fraktalwert ist bereits unterschritten, das kritische Jahr für die Schotterbetteinigung ist allerdings noch nicht erreicht. Das bedeutet, dass der Schotterzustand entsprechend schlecht ist und eine Schotterbetteinigung aus wirtschaftlicher Sicht aktuell eine sinnvolle Instandhaltungstätigkeit darstellt.
- **Bereich 4:** Der kritische Fraktalwert ist in diesem Bereich ebenfalls bereits unterschritten. Aufgrund des hohen Anlagenalters ist eine Schotterbetteinigung allerdings nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll und eine Re-Investition stellt die wirtschaftlichere Handlungsalternative dar.
- **Bereich 5:** Für Abschnitte in diesem Bereich wird der kritische Fraktalwert vor Ende der strategischen Nutzungsdauer, allerdings erst nach dem kritischen Jahr für die Schotterbetteinigung, erreicht. Aufgrund des dann schon weit fortgeschrittenen Anlagenalters ist eine Schotterbetteinigung nicht mehr wirtschaftlich sinnvoll. Daher stellt eine Re-Investition für diese Abschnitte zukünftig die wirtschaftlichste Alternative dar.
- **Bereich 6:** Kommen Abschnitte in diesem Bereich zu liegen, bedeutet das, dass innerhalb der strategischen Nutzungsdauer aufgrund des Schotterzustandes weder ein REI-Einsatz noch eine Re-Investition notwendig wird. Aufgrund der stärkeren Verschlechterung der Fraktalzahl über die Zeit, ist allerdings mit einem erhöhten Instandhaltungsaufwand während und vor allem gegen Ende der strategischen Nutzungsdauer zu rechnen.

Aufgrund der entwickelten Methodik lässt sich nun die Zuordnung von konkreten Gleisabschnitten zu den sechs Bereichen und damit zur zugehörigen Strategie einfach durchführen. Dazu müssen die folgenden Parameter bekannt sein:

- aktueller Fraktalwert
- strategische Nutzungsdauer
- aktuelles Anlagenalter

Tabelle 18: Erweiterung der Zuordnung von Gleisabschnitten zum entsprechenden Bereich bzw. der zugehörigen Strategie

<b>F<sub>akt</sub> &gt; -8,5 und Z<sub>krit</sub> &lt; 5,85</b>	<b>Bereich 1</b>
<b>F<sub>akt</sub> &gt; -8,5 und Z<sub>krit</sub> &gt; 10,66</b>	<b>Bereich 2</b>
<b>F<sub>akt</sub> &lt; -8,5 und A<sub>akt</sub> &lt; ND * 0,68</b>	<b>Bereich 3</b>
<b>F<sub>akt</sub> &lt; -8,5 und A<sub>akt</sub> &gt; ND * 0,68</b>	<b>Bereich 4</b>
<b>F<sub>akt</sub> &gt; -8,5 und 7,25 &lt; Z<sub>krit</sub> &lt; 10,66</b>	<b>Bereich 5</b>
<b>F<sub>akt</sub> &gt; -8,5 und 5,85 &lt; Z<sub>krit</sub> &lt; 7,25</b>	<b>Bereich 6</b>

mit:

$$Z_{krit} = \left| \frac{(F_{akt} - 1,25) * ND}{A_{akt}} \right|$$

F<sub>akt</sub> = aktueller Fraktalwert

A<sub>akt</sub> = aktuelles Anlagenalter

ND = strategische Nutzungsdauer

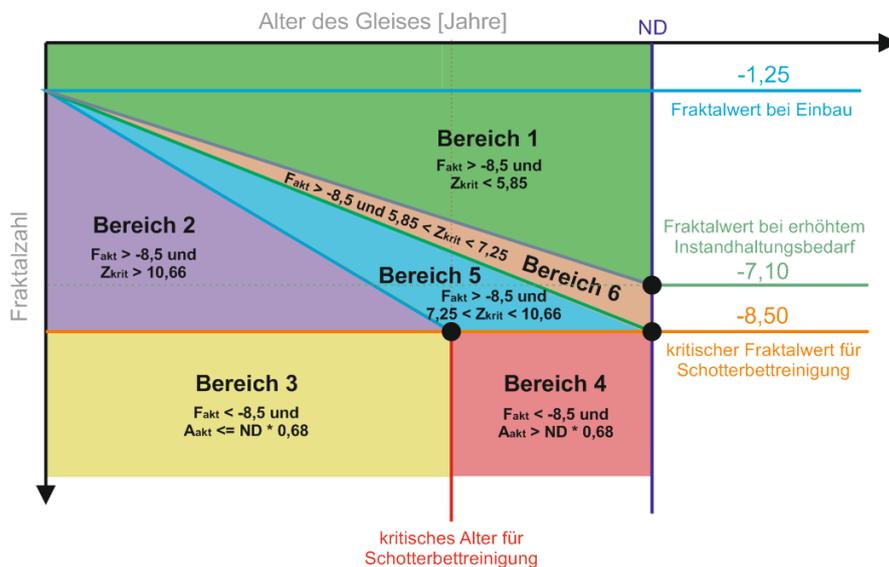


Abbildung 61: Erweiterung der Zuordnung von Gleisabschnitten zum entsprechenden Bereich bzw. der zugehörigen Strategie

Die beschriebene Vorgehensweise bietet zahlreiche Möglichkeiten zur genauen Analyse des Einflusses verschiedener Parameter wie der Schwellenart, der Streckenbelastung oder der Radienklasse auf den Bedarf an Schotterbettreinigungen. Diese netzweit durchgeführten Auswertungen zeigten insbesondere, dass sich die Annahme bestätigt, dass die Schotterbettreinigung vor allem für Gleise mit unbesohlenen

Betonschwellen ein wesentliches Thema darstellt. Im Gegensatz dazu weisen Gleisanlagen, die mit besohlenen Betonschwellen oder Holzschwellen ausgestattet sind, einen wesentlich geringeren aktuellen bzw. zukünftigen Bedarf an Schotterbetteinigungen auf.

Grundsätzlich bietet die entwickelte Methodik eine praktikable Möglichkeit zur Abschätzung des aktuellen und zukünftigen Schotterbetteinigungs- und Re-Investitionsbedarfs aufgrund von mangelhaftem Schotterzustand. Zur Entwicklung und insbesondere zur Anwendung der Methode auf das Streckennetz der ÖBB mussten allerdings einige Annahmen getroffen werden, deren Verifikation bzw. Präzision und eventuell Anpassung Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten sein sollte. Dabei handelte sich um größtenteils technische und weniger um wirtschaftliche Parameter.

So wurde beispielsweise das Verschlechterungsverhalten der Fraktalzah über die Zeit vereinfacht als linear angenommen. Dementsprechende Streubreiten – dies ist insbesondere am Beginn der Nutzungsdauer zu beachten – existieren auch beim tatsächlichen Verhalten des Verlaufs der Fraktalwerte über die Zeit. Detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen dazu existieren derzeit allerdings noch nicht und sollten ein zukünftiges Forschungsgebiet darstellen. Weiters ist der Einfluss von Instandhaltungsarbeiten und hier insbesondere der Einfluss von Stopfarbeiten auf die Fraktalzah bisher nicht detailliert betrachtet worden. Auch hier besteht zukünftiger Forschungsbedarf.

Dies ist insbesondere am Beginn der Nutzungsdauer zu berücksichtigen, da hier bereits geringe Streuungen der Fraktalzah zur Zuordnung zu unterschiedlichen Bereichen führen können.

Ist der Verlauf der Fraktalzah über die Zeit genauer erforscht, so könnte dies in Zukunft auch dazu genutzt werden, die tatsächlich erreichbare Nutzungsdauer des Schotters zu prognostizieren. Dies würde der erreichbaren Nutzungsdauer der gesamten Gleisanlage entsprechen, wenn der Schotter das kritische Element darstellt.

Weiters sei angemerkt, dass die entwickelte Methode die Möglichkeit von netzweiten Analysen und die Zuordnung von Gleisabschnitten zu verschiedenen Strategien bietet. Dies macht es möglich strategische Mengen für Schotterbetteinigungen und Re-Investitionen abzuschätzen. Konkrete Umsetzungsprojekte können dabei aber nicht ausgegeben werden, da sinnvolle Mindest- bzw. Maximallängen von Baustellen in der gegenständlichen Betrachtung unberücksichtigt blieben. Hierbei wären noch eine Reihe von baubetrieblichen, budgetären und die Charakteristika des konkreten Streckenabschnittes betreffenden Randbedingungen zu berücksichtigen. Des Weiteren bleibt der Verschleiß anderer Komponenten unberücksichtigt. Wird ein konkretes Projekt bewertet, muss auch dieser in die Analyse einfließen, da es sein kann, dass aufgrund notwendiger Instandhaltungstätigkeiten an anderen

Komponenten, eine Schotterbettreinigung zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr sinnvoll ist. Dies kann allerdings nicht auf strategischer Ebene für das gesamte Netz oder größere Teile davon erfolgen, sondern muss jeweils im Einzelfall geprüft werden.

Ebenso ist im Einzelfall zu prüfen, wann die Schotterbettreinigung am sinnvollsten durchgeführt werden soll. Dies hängt davon ab, wie viel Instandhaltung durch einen vorgezogenen REI-Einsatz eingespart bzw. um wie viel die Nutzungsdauer bei einer hinausgezögerten Schotterbettreinigung verlängert werden könnte. Ebenso ist zu berücksichtigen ob der REI-Einsatz mit anderen Instandhaltungstätigkeiten im selben oder in benachbarten Bereichen kombiniert werden kann.

Unabhängig davon bietet das entwickelte Schema eine einfache Methode, mit der die Wirtschaftlichkeit von Schotterbettreinigungen abgeschätzt werden kann. Zusätzliche, in Zukunft gewonnene Erkenntnisse – speziell das Verhalten der Fraktalwerte über die Zeit betreffend – würden dazu dienen das Schema genauer zu kalibrieren ohne jedoch die grundsätzliche Methodik zu verändern.

## Literaturverzeichnis

- BECKER, R.; VIERLINGER, P.: Nachhaltiges Wirtschaften durch gleisgebundenes Schotterrecycling. In: Eisenbahningenieur, 06/2004.
- BEILHACK, F.: RU 800 S - ein Einsatzvergleich nach drei Jahren. In: Eisenbahningenieur, 09/2009.
- BERNHARD, L.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. Hamburg. Tetzlaff Verlag, 2010.
- BOSCH, R. v.: Querverschiebewiderstandsmessung mit dem dynamischen Gleisstabilisator.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei\\_0706\\_02.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei_0706_02.pdf). Datum des Zugriffs: 13.03.2015.
- ENZI, M.; LANDGRAF, M.: Data-based research - time series are the key. Präsentation in: LCM conference. Frankfurt/Main. TU Graz, 2013.
- ESVALD, C.: Modern Railway Track.  
[http://www.esveld.com/MRT\\_Selection.pdf](http://www.esveld.com/MRT_Selection.pdf). Datum des Zugriffs: 16.03.2015.
- FLATSCHER, P.-J.: Wirtschaftliche Fahrweginstandhaltung für hohe Verfügbarkeit des Fahrweges.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei\\_0904\\_1.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei_0904_1.pdf). Datum des Zugriffs: 12.03.2015.
- FREDERICH, F.: Die Gleislage aus fahrzeugtechnischer Sicht. In: ZEVrail, 12/1984.
- GETZNER WERKSTOFF GMBH: Schwellensohlen für den Schotteroberbau. Brochure. 2008.
- GÖTZE, U.: Investitionsrechnung - Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben. 7. Auflage.. Berlin, Heidelberg. Springer Gabler, 2014.
- HANKER, R.: Eisenbahnoberbau. Wien. Springer Verlag, 1952.
- HANSMANN, F.: Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis. Dissertation. Graz. Technische Universität Graz, 2015.
- HANSMANN, F.; LANDGRAF, M.: Wie fraktal ist die Eisenbahn?. In: ZEVrail, 11-12/2013.
- HAUKE, R.; SAUTNER, M.: Oberbau-Stopfmaschinen für spezielle Aufgaben.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/etr\\_1105\\_2.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/etr_1105_2.pdf). Datum des Zugriffs: 11.03.2015.

- HEESEN, B.: Investitionsrechnung für Praktiker - Fallorientierte Darstellung der Verfahren und Berechnungen. 2. Auflage.. Wiesbaden. Springer Gabler, 2012.
- HERING, E.: Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Wiesbaden. Springer Vieweg, 2014.
- HOLZFEIND, J.; ROBERT, H.: Qualitätsverhalten von Gleisen. In: ZEVrail, 06-07/2008.
- HUMMITZSCH, R.: Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen - Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells. Disseratation. Graz. Technische Universität Graz, 2009.
- HYSLIP, F. P.: Fractal analysis of Geometry Data for railway track condition assessment. Dissertation. University of Massachusetts, 2002.
- KLOTZINGER, E.: Weiterentwicklung der maschinellen Bettungsreinigung. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 10/2001.
- LERCHER, T.: Einfluss von Materialfluss und Logistik auf die Dauer von Gleissperren. Masterarbeit. Graz. Technische Universität Graz, 2011.
- LICHTBERGER, B.: Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. Hamburg. Tetzlaff Verlag, 2003.
- : Moderne Vier-Schwellen-Stopftechnologie. In: Eisenbahningenieurkalender 2011. Hrsg.: E.V., V. D.: Hamburg. DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2010.
- : Der Einflsus des Dynamischen Gleisstabilisators auf die Haltbarkeit der Gleise.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei\\_0106\\_2.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei_0106_2.pdf). Datum des Zugriffs: 13.03.2015.
- : Handbuch Gleis - Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit. 3. Auflage. Hamburg. Tetzlaff Verlag, 2010.
- MANDELBROT, B.: How long is the coast of britain?. In: Science, 156/1967.
- : Fractal Geometry: what is it, and what does it do?. In: Proceedings of the royal society, A 423/1989.
- MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerungskosten - Definition, Berechnung, Anwendung. Präsentation in: Unterbau Experten Treffen. Nürnberg. 2011.
- MARSCHNIG, S.; BERGHOLD, A.: Besohlte Schwellen im netzweiten Einsatz. In: Eisenbahntechnische Rundschau, 05/2011.
- MARX, L.; MOßMANN, D.: Arbeitsverfahren für die Instandhaltung des Oberbaus. 7. Auflage. Berlin. Bahn Fachverlag GmbH, 2011.

- MISAR, H.: Präzise Weichen- und Gleisinstandhaltung.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei\\_0804.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/ei_0804.pdf). Datum des Zugriffs: 11.03.2015.
- : Kriterien für eine wirtschaftliche Bettungsreinigung. In: Eisenbahningenieur, 08/2004.
- PLASSER & THEURER: 30 Jahre kontinuierliche Stopftechnologie.  
[http://www.plassertheurer.com/pdf/aktuell/aktuell43126de\\_07.pdf](http://www.plassertheurer.com/pdf/aktuell/aktuell43126de_07.pdf). Datum des Zugriffs: 09.03.2015.
- PLASSER & THEURER: Internationaler Erfolg der 3X-Technologie.  
<http://www.plassertheurer.com/pdf/publications/aktF114-10f.pdf>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.
- RIEßBERGER, K.: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit - oder - wie gut muß ein Gleis sein?. In: ÖVG Spezial, Band 41/1998.
- SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 111 1938: Geleisestopf-Maschine System "Scheuchzer". <http://retro.seals.ch/digbib/view?pid=sbz-002:1938:111:112::1654>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.
- SCHWEIZERISCHE-BAUZEITUNG 69/70 1917: Neue Gleise-Stopfmaschine. <http://retro.seals.ch/digbib/view?pid=sbz-002:1917:69:70::2192>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.
- THIEME, T.: Gleisbau - Gleisinstandhaltung. Berlin. Transpress VEB, 1966.
- TREND.AT: Plasser & Theurer: Thriller im Familienbetrieb.  
<http://www.trend.at/articles/1306/581/352084/plasser-theurer-thriller-familienbetrieb>. Datum des Zugriffs: 10.03.2015.
- VEIT, P.: Das Projekt "Strategie Fahrweg" der ÖBB. In: ZEVrail, 09/2004.
- : Life Cycle Costing. Vorlesungsunterlagen. Graz. Technische Universität Graz, 2015.
- : Infrastructure maintenance strategies. In: Rail International, 06/2002.
- : Betriebswirtschaftslehre Bau - Kostenrechnung, Investition. Vorlesungsskriptum. Graz. Technische Universität Graz, 2010.
- VEIT, P.; KLAUS, P.: Betriebserschwerungskosten - ein Baustein zur Systemoptimierung. In: ZEVrail, 05/2008.
- VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Betriebserschwerungskosten. Projektbericht. Graz. Technische Universität Graz, 2006.
- VEIT, P.; MARSCHNIG, S.: Standardlemente. Folder. Graz. Technische Universität Graz.
- VEIT, P.; PETRI, K.: Akutelle Kalkulation der Betriebserschwerungskosten. Präsentation in: Fahrwegoptimierung des Rad/Schiene-Systems - Neue europäische Randbedingungen. Salzburg. 2007.

VEIT, P.; WALTER, S.; FRISEE, A.: Eisenbahnwesen GL.  
Vorlesungsskriptum. Graz. Technische Universität Graz, 2014.

WENTY, R.: Neuste Entwicklungen bei der Gleissanierung und -  
instandsetzung. In: Eisenbahningenieur, 11/2006.

— : Drei Jahrzehnte kontinuierlich arbeitende Stopfmaschinen - Der Weg  
zu höheren Stopfleistungen. Präsentation in: Kontinuierliche  
Gleisdurcharbeitungstechnologie im internationalen Vergleich  
(Fachseminar im Rahmen der InnoTrans 2014). Berlin. Plasser &  
Theurer, 2014.

## Linkverzeichnis

<http://konzern.oebb.at/de/Konzern/Organisation/index.jsp>. Datum des Zugriffs: 04.03.2015.

[http://www.oebb.at/infrastruktur/de/2\\_0\\_Das\\_Unternehmen/Daten\\_und\\_Fakten/index.jsp](http://www.oebb.at/infrastruktur/de/2_0_Das_Unternehmen/Daten_und_Fakten/index.jsp). Datum des Zugriffs: 04.03.2015.

<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Definition/eisenbahnverkehr.html>. Datum des Zugriffs: 05.03.2015.

[http://www.oebb.at/infrastruktur/de/\\_p\\_3\\_0\\_fuer\\_Kunden\\_Partner/3\\_4\\_EVU\\_am\\_Netz/](http://www.oebb.at/infrastruktur/de/_p_3_0_fuer_Kunden_Partner/3_4_EVU_am_Netz/). Datum des Zugriffs: 05.03.2015.

<http://www.drehscheibe-online.de/foren/read.php?17,6168124>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/unternehmen/geschichte.html>. Datum des Zugriffs: 09.03.2015.

<http://www.bahnbilder.de/bild/oesterreich~bahndienstfahrzeuge~sonstige/647638/dynamic-stopfexpress-09-4xskl-x962006-7-arbeitet-emsig-auf-der.html>. Datum des Zugriffs: 08.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stopfung.html>. Datum des Zugriffs: 10.03.2015.

[http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/hebe\\_und\\_richtaggregate.htm](http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/hebe_und_richtaggregate.htm). Datum des Zugriffs: 10.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/newsletter/1409-01.htm>. Datum des Zugriffs: 11.03.2015.

<http://www.bahnbilder.de/bild/Deutschland~Bahndienstfahrzeuge~Stopfmaschinen/641030/eine-unimat-sprinter-gleisstopfmaschine-von-db-netz.html>. Datum des Zugriffs: 11.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/unternehmen/presse-aussendung-grossauftrag-bulgarien.html>. Datum des Zugriffs: 12.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stabilisierung-verdichtung.html>. Datum des Zugriffs: 13.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/stabilisierung-verdichtung-dgs-90-n.html>. Datum des Zugriffs: 13.03.2015.

<http://www.ckkaempfe.de/bahn/companies/bahnbau/swietelsky.html>. Datum des Zugriffs: 17.03.2015.

<http://www.plassertheurer.com/iaf2013/de/urm700.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<http://www.sinekvilaga.hu/vissznyeremenyi-anyagok-beepitese-nagygepes-technologiaival>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/gleisumbau-gleisneubau-ru-800-s.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/bettungsreinigung-rm-80-uhr.html>. Datum des Zugriffs: 19.06.2015.

<http://www.plasserindia.com/en/machines/rm-80-uhr.htm>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<http://mec01.info/akt2013.htm>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<http://www.plassertheurer.com/pics/maschinen-systeme/740/rm95800w-7.jpg>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<http://www.welt.de/wirtschaft/article139261656/Dieses-Monstrum-revolutioniert-den-Gleisbau.html>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

[http://www.geotest.pl/aktualnosci/nadzor\\_nad\\_budowa\\_szybkiej\\_kolei](http://www.geotest.pl/aktualnosci/nadzor_nad_budowa_szybkiej_kolei). Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<http://www.eurailpool.com/resources/downloads/PM-1000-URM-Gesamt.pdf>. Datum des Zugriffs: 07.08.2015.

<http://www.gleisbau-welt.de/site/fahrzeuge/schotterbearbeitung.htm>. Datum des Zugriffs: 12.08.2015.

<http://www.plassertheurer.com/de/maschinen-systeme/messarbeiten-em250.html>. Datum des Zugriffs: 12.08.2015.

[http://www.beretta-modelle.ch/gleisbaumaschinen/html/fp\\_rm\\_80\\_uhr.html](http://www.beretta-modelle.ch/gleisbaumaschinen/html/fp_rm_80_uhr.html). Datum des Zugriffs: 08.09.2015.