



Matthias Landgraf, Dipl.-Ing.

Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn - Von der Messdatenanalyse zum Anlagenmanagement

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft (TU Graz)

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau (TU München)

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. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Dissertation identisch.

05.09.2016

Datum

Matthias Langner

Unterschrift

Danksagung

Allen voran danke ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Peter Veit, der mir die Möglichkeit gab am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft im Rahmen meiner Tätigkeit als Universitätsprojektassistent diese Dissertation zu erstellen. Durch sein enormes Fachwissen sowie seine Fähigkeiten dieses zu vermitteln, konnte er der Arbeit immer wieder entscheidende Impulse geben. Darüber hinaus danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein für seinen Aufwand als Zweitgutachter und Prüfer dieser Arbeit.

Ein spezieller Dank gebührt auch Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig. Ich durfte in den letzten Jahren durch zahlreiche Diskussionen sehr viel von Dir lernen und Du hast einen maßgeblichen Anteil daran, dass diese Arbeit nun vor mir liegt. Ich danke Dir für die freundschaftliche und konstruktive Zusammenarbeit.

Auch insbesondere mit Markus Enzi und Fabian Hansmann hat sich über die Jahre eine Bürofreundschaft entwickelt, die ich sehr schätze. Weit über das Berufliche hinaus gabt ihr mir immer wieder wertvolle Tipps und Anregungen. Ihr seid sicherlich einer der Gründe, weswegen mir die letzten fünf Jahre trotz der Anstrengungen derart viel Freude bereitet haben. Ein besonderer Dank gilt auch Georg Neuper und Armin Berghold. Ihr seid wesentlich dafür verantwortlich, dass mir der Einstieg in die Arbeit am Institut derart leicht gefallen ist. Ihr habt mich überaus freundlich in eurem Büro aufgenommen und hattet immer ein offenes Ohr für meine inhaltlichen sowie organisatorischen Fragen.

Generell möchte ich mich bei allen KollegInnen am Institut sowie sämtlichen Projektpartnern bedanken, welche mich darin unterstützt haben, meine Forschungstätigkeit voranzutreiben. Es war wirklich schön, in den letzten Jahren mit euch zusammen zu arbeiten.

Die Möglichkeit zu studieren ist nicht selbstverständlich. Meinen Eltern werde ich für immer dankbar sein, dass sie mir mein Studium finanziell ermöglicht, aber mich dabei auch in allen anderen Belangen jederzeit unterstützt haben. Meiner Schwester Christina danke ich für ihre Anregungen und ihren geschwisterlichen Rat in allen Lebenssituationen.

Meiner Frau Marie danke von ganzem Herzen für ihre unermüdliche Unterstützung, ihre Liebe und Motivation. Ich möchte Dir vor allem für Dein Verständnis in jenen Zeiten danken, in denen mein Beruf und meine Forschung an erster Stelle standen.

Kurzfassung

Anlagenmanagement für Eisenbahninfrastrukturunternehmen bedeutet, möglichst effizient mit immer knapper werdenden budgetären Ressourcen umzugehen. Dementsprechend essentiell gestaltet sich die Fragestellung nach dem Zustand der zu verwaltenden Anlagen.

Die hier entwickelte Methodik ermöglicht eine messdatengestützte und komponentenspezifische Zustandsbeschreibung des Eisenbahnfahrwegs. Aufgrund der Evaluierung der Komponenten *Schwelle* und *Schotter* kann eine notwendige Gleiserneuerungsmenge ermittelt werden. Die Komponentenbeurteilung des *Unterbaus* erlaubt darüber hinaus, bereits frühzeitig jenen Anteil der Reinvestitionsmaßnahmen abzuschätzen, welcher zusätzlich einer Unterbausanierung bedarf. Darauf basierend kann eine langfristige Planung des Mitteleinsatzes zu etabliert werden. Die erarbeitete Methodik ermöglicht dem Infrastrukturbetreiber die Evaluierung des Netzzustandes, wobei die Auswirkungen unterschiedlicher Investitionsstrategien analysiert werden können.

Verwendet werden dabei vorrangig Anlageninformationen und Messdaten, welche in einer an der TU Graz entwickelten Datenbank für rund 4000 Streckenkilometer der Österreichischen Bundesbahnen mit Zeitreihen seit 2001 vorliegen. Des Weiteren konnten auch vereinzelte Streckenabschnitte aus der Schweiz sowie den USA für Korrelationsanalysen herangezogen werden.

Die Erarbeitung der vorgestellten Methodik beinhaltet in einem ersten Schritt die Erarbeitung innovativer Messparameter. Diese werden aus verschiedenen Roh-Messsignalen sowie unterschiedlichen Messsystemen gewonnen, um die Charakteristika einzelner Signale besser fassen zu können. Jene Parameter werden einem eingehenden Validierungsprozess unterzogen. Anschließend wird diese Vielzahl an automatisiert messbaren Parametern fundiert zu je einer Zustandszahl für die Komponenten *Schwelle*, *Schotter* und *Unterbau* aggregiert.

Darüber hinaus wird im Rahmen der Arbeit aufgezeigt, welchen Nutzen die vorgestellte Methodik für das Anlagenmanagement eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers bringen kann. Einerseits im Rahmen einer netzweiten, gebiets-, strecken- oder querschnittspezifischen Zustandsbeschreibung, welche die vergangene sowie zukünftige Entwicklung des Streckennetzes beschreibt. Andererseits wird es ermöglicht, komponentenspezifische Instandhaltungsmaßnahmen sowie benötigte Erneuerungsmengen zu definieren.

Abstract

Cost pressure forces infrastructure managers to work sustainably and efficiently. Therefore, track engineers face increasing difficulty to carry out necessary measures owing to budget restrictions. Consequently, they should be supported in prioritising. This requires an objective tool enabling proper condition monitoring as well as component-specific, preventive maintenance and renewal planning. Hence, the right measures are to be executed at the right time.

This dissertation deals with a description of the railway track condition. A bottom-up approach provides an in-depth assessment of track using a variety of measurement signals and an aggregated component-specific assessment. Since the approach is based on well positioned measurement signals, it is valid for monitoring specific track sections as well as whole networks. Innovative analyses of various measurement signals form a sound basis to grasp their characteristics enabling a component specific condition evaluation of railway track. The use of historical measurement data allows for an analysis of track behaviour over time. A thorough validation process, including on-site inspections and excavations, shows that the presented approach is able to evaluate the actual condition of railway track.

The assessment of the specific components condition can be used for timely maintenance as well as renewal planning. Based on correlation analyses, the component specific evaluations are aggregated into one holistic quality figure. This enables asset managers to monitor the asset condition network-wide as well as to predict future budget demands.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	3
2	Der Eisenbahnfahrweg – Grundlagen und Dokumentation.....	5
2.1	Die Komponenten des Fahrwegs	5
2.2	Dokumentation und Speicherung der Anlageninformationen	6
2.3	Oberbautypen im Streckennetz	9
3	Zustandserfassung des Fahrwegs	14
3.1	Der Gleismesswagen	16
3.1.1	Die Gleislage	17
3.1.2	Die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage	21
3.1.3	Die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS)	26
3.2	Das Georadar	28
3.2.1	Messmethodik des Georadars	28
3.2.2	Zustandsbeschreibung mittels Georadar	31
3.2.3	Detailuntersuchung der Georadarevaluierungen.....	32
3.3	Weitere Methoden zur Zustandserfassung des Fahrwegs	37
3.3.1	Bodenmechanische Drucksondierung.....	37
3.3.2	Einsenkungsmesswagen	38
4	Validierungsprozess der eingeführten Analysemethoden.....	41
4.1	Netzweiter Validierungsprozess und Trendanalysen	41
4.1.1	Der Einfluss unterschiedlicher Schwellentypen	41
4.1.2	Globales Verhalten über die Gleisnutzungsdauer	44
4.1.3	Ein- und Ausbauqualität.....	48
4.1.4	Der Einfluss von Wasser im Gleiskörper	54
4.2	Abschnittsspezifische Validierungen der einzelnen Messmethoden	56
4.2.1	Der zeitliche Verlauf von Georadarevaluierungen	56
4.2.2	Der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen	62
4.2.3	Evaluierungen des Georadars und der Fraktalanalyse versus Drucksondierung	65

4.2.4	Fraktalanalyse und das visuelle In-Situ Verhalten	70
4.2.5	Die relative Einsenkungsmessung trifft die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage	73
4.2.6	Analyse von Lastplattendruckversuchen.....	76
5	Stochastische Korrelationsanalysen	79
5.1	Korrelationskoeffizienten und deren Signifikanz	79
5.1.1	Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman	80
5.1.2	Signifikanzniveau einer Korrelation	81
5.2	Das Georadar und der Gleismesswagen	83
5.2.1	Georadar vs. herkömmliche Gleislageanalyse (sigmaH)	83
5.2.2	Georadar vs. Fraktalanalyse	85
5.3	Die einzelnen Parameter Fraktalanalyse	87
5.4	SigModS vs. Fraktalanalyse	89
6	Aggregation zur Beschreibung des Fahrwegzustands	91
6.1	Etablierte Qualitätsziffern	91
6.2	Komponentenspezifische Zustandsbeschreibung.....	93
6.2.1	Schwellenzustand	94
6.2.2	Schotterzustand	96
6.2.3	Unterbauzustand	99
6.2.4	Sensitivitätsanalyse der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung	102
6.3	Aggregation Qualitätsziffer Fahrweg	106
6.3.1	Vergleich der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung	106
6.3.2	Aggregationsalgorithmus	107
6.3.3	Die Qualitätsziffer Fahrweg	110
7	Vom Zustand zum Anlagenmanagement	113
7.1	Netzweite Zustandsbeschreibung	114
7.1.1	Klasseneinteilung auf Basis altersspezifischer Werteverteilung	115
7.1.2	Zustandsklassifizierung	116
7.1.3	Mittelwert	119
7.2	Budgetrelevante Aspekte	120

	7.2.1 Abschätzung Erneuerungsmengen	120
	7.2.2 Aufteilung auf Regionen/Strecken	123
8	Zusammenfassung und Ausblick	125
9	Literaturverzeichnis	128

1 Einleitung

Das Betreiben von Eisenbahninfrastrukturen erfordert die Bindung von großen Kapitalmengen. Die ÖBB Infrastruktur AG investierte beispielsweise alleine im Jahr 2014 611,4 Millionen Euro in die Erneuerung sowie Erweiterung ihrer Anlagen und 493,3 Millionen Euro in deren Instandhaltung [ÖBB Infrastruktur AG 2015]. Ein wesentlicher Bestandteil der Aufgaben eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers ist die Entwicklung einer ausbalancierten Instandhaltungs- und Reinvestitionsstrategie sowie der damit verbundenen effizienten Nutzung des gebundenen Kapitals. Dadurch sollen mögliche Sicherheitsrisiken vermieden, die gewünschte Verfügbarkeit gewährleistet und der ständig wachsende Kostendruck reduziert werden. Dieses Aufgabengebiet kann mit dem Wort Anlagenmanagement beschrieben werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf das Management der Anlage Gleis gelegt. Die Schlüsselparameter des Anlagenmanagements stellen die Kapazität, die Substanz sowie die Qualität der Anlagen dar (Abbildung 1). Diese drei Parameter weisen dabei vor allem auch im Rahmen der Eisenbahninfrastruktur wesentliche Wechselwirkungen zueinander auf.

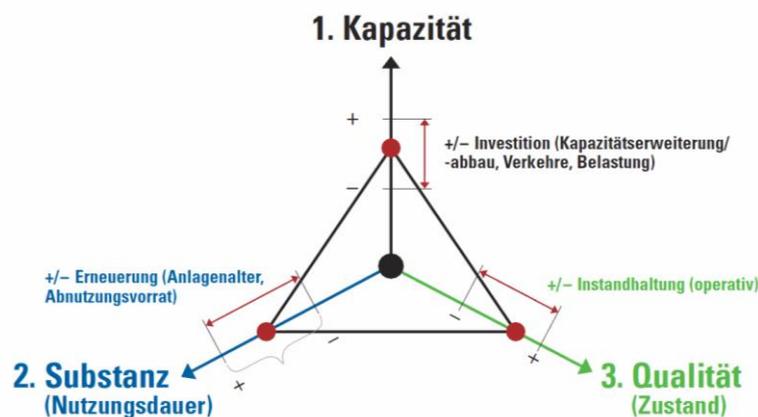


Abbildung 1: Schlüsselparameter Anlagenmanagement [Balfour Beatty Rail 2010]

Die Kapazität beschreibt insbesondere das aktuelle Leistungsvermögen von Anlagen, das maßgeblich von der Verfügbarkeit abhängig ist. Letztere wird von der Qualität bzw. dem Zustand der Anlage bestimmt. Die Qualität beschreibt inwieweit die Beschaffenheit der Anlage von ihrem optimalen Ausgangszustand abweicht. Überschreitet die Abweichung einen definierten Grenzwert muss eine Instandhaltungstätigkeit durchgeführt werden, um die Qualität der Anlage wieder auf ein gewünschtes Niveau zu heben. Die Verfügbarkeit der Anlage wird wiederum von jenen Instandhaltungsarbeiten reduziert, da das Gleis während dieser nicht oder lediglich mit einer reduzierten Geschwindigkeit befahren

werden kann. Werden Instandhaltungsarbeiten jedoch nicht oder zu spät durchgeführt, so muss die Geschwindigkeit in diesem Streckenabschnitt über einen längeren Zeitraum reduziert werden. Ist selbst diese Maßnahme nicht mehr ausreichend, um einen sicheren Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten, kann es sogar zu einer Streckensperre kommen bis der spezifische Streckenabschnitt wieder einem adäquaten Niveau zugeführt werden kann. Da diese Maßnahmen erhebliche negative Auswirkungen auf die Verfügbarkeit aufweisen, ergibt sich hier folgende Anforderung an das Anlagenmanagement: Instandhaltungsarbeiten sollen so selten und spät wie möglich durchgeführt werden, aber so oft wie nötig, um eine nachhaltige und adäquate Qualität sicher zu stellen.

Kapazität kann sich aber auch auf ein künftig notwendiges Leistungsvermögen beziehen, weswegen die zu errichtenden Anlagen in einer spezifischen Dimension errichtet werden müssen. Diese Dimension bzw. die Ausgestaltung der Anlagen beeinflusst den Parameter Substanz in zweierlei Aspekten: Einerseits, da generell Anlagen eine größere Nutzungsdauer aufweisen (sollten), je höher sich die eingebaute Anfangsqualität darstellt. Andererseits werden die Anlagen jedoch stärker abgenutzt, wenn eine größere Belastung eingebracht wird – im Eisenbahnverkehr vorrangig bezogen auf die Art, Anzahl und das Gewicht von Zügen.

Schlussendlich sind auch die Parameter Qualität und Substanz von essentiellen Abhängigkeiten geprägt. Prinzipiell kann die Substanz einer Anlage zu Beginn der Nutzungsdauer abgeschätzt werden, sofern diese Abschätzung auf fundierten Erkenntnissen mit derartigen Anlagen beruht. Dabei ist es jedoch unerlässlich spezifische Rahmenbedingungen zu unterscheiden, welche die Anlage charakterisieren, wie z. B. das eingebaute Material, die erwarteten Belastungen und topographische Besonderheiten. Im Rahmen des Anlagenmanagements der Eisenbahninfrastruktur werden hierfür erwartbare strategische Nutzungsdauern ermittelt (siehe 2.2). Diese Abschätzungen beruhen auf dem mittleren Verhalten aller Gleisabschnitte in einem Netz, welche dieselben Rahmenbedingungen besitzen. Der einzelne Abschnitt kann jedoch ein stark divergierendes Verhalten aufweisen, weswegen es unerlässlich ist, auch die aktuelle Qualität der Einzelabschnitte zu berücksichtigen. Eine schlechte Qualität bei einem geringeren Anlagenalter bedeutet automatisch eine verringerte erwartbare Nutzungsdauer (Substanz), wohingegen eine ausgezeichnete Qualität bei hohem Anlagenalter im Einzelfall eine - verglichen mit dem durchschnittlichen Erwartungswert - merklich verbesserte Substanz aufweist. Darüber hinaus ist es ausschließlich mit Hilfe einer adäquaten Erfassung des aktuellen Zustands (Qualität) möglich, ein nachhaltiges Instandhaltungsregime zu etablieren, welches eine möglichst hohe Nutzungsdauer der erstellten Anlage gewährleistet.

Eine derartige automatisierte Zustandserfassung der Qualität des Eisenbahnfahrwegs stellt auch das Ziel der vorliegenden Arbeit dar. Es wird dabei versucht, eine komponentenspezifische Beschreibung des Zustands zu etablieren, da diese einen maßgeblichen Beitrag zur Instandhaltungs- und Erneuerungsplanung des Eisenbahnfahrwegs darstellen könnte. Darüber hinaus wird versucht die erläuterten Begriffe Substanz und Qualität (Abbildung 1) zu verknüpfen, also eine messdatenbasierte Zustandserfassung der „substanziellen Qualität“ zu ermöglichen. Diese soll nicht nur eine Momentaufnahme der aktuellen Qualität gewährleisten, sondern darüber hinaus auch eine Abschätzung des Abnutzungsvorrats der einzelnen Komponenten unterstützen.

1.1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit ist also, den tatsächlichen Verschleißzustand der Komponenten eines Eisenbahnfahrwegs zu erfassen. Es handelt sich dabei um die für eine Erneuerungsmaßnahme und damit die Substanz maßgeblichen Komponenten Schwelle, Schotter und Unterbau (siehe 2.1). Neben dieser komponentenspezifischen Zustandserfassung soll auch eine gesamtheitliche, den Fahrweg beschreibende Qualitätsziffer entwickelt werden, welche zwar einen geringeren Informationsgehalt besitzt, jedoch für netzweite Vergleiche und Entwicklungen herangezogen werden könnte. Um diese Zielsetzungen zu erreichen bedarf es einer Fülle von Fragen, welche behandelt werden müssen. Die folgenden Fragestellungen ebnet somit einerseits den Weg zum Ziel und stellen dabei andererseits auch den Aufbau der vorliegenden Forschungsarbeit dar.

- I Ist es im Rahmen der Messdatenanalyse theoretisch möglich, aus den vorhandenen und automatisiert gemessenen Signalen den Zustand einzelner Komponenten zu erfassen? (siehe Kapitel 3)
- I Sind die einzelnen, generierten Methoden der Zustandserfassung in der Lage, die jeweils bewerteten Parameter in ihrer realen Beschaffenheit zu beschreiben? (siehe Kapitel 4)
- I Gelangen diese Erfassungsmethoden, bei all ihren spezifischen Ausprägungen, zu einer übereinstimmenden Zustandsbeschreibung der einzelnen Komponenten des Fahrwegs? (siehe Kapitel 5)
- I Ist es möglich, auf Basis der behandelten Erfassungs- bzw. neuen Analysemethoden eine komponentenspezifische Zustandsbeschreibung zu etablieren? (siehe Kapitel 6.2)

- I Kann diese komponentenspezifische Zustandsbeschreibung sinnvoll zu einer gesamtheitlichen Qualitätsziffer Fahrweg (exkl. Schienen) aggregiert werden? (siehe Kapitel 6.2.4)
- I (Wie) Kann eine derartige Zustandsbeschreibung sinnvoll im Anlagenmanagement Fahrbahn eingesetzt werden? (siehe Kapitel 7)

Um diese Fragestellungen zu beantworten, bedarf es einer eingehenden Messdatenanalyse sowie der Entwicklung innovativer statistischer Kennziffern, um die Charakteristika der Messdaten besser fassen zu können. Die dadurch etablierten Bewertungsparameter werden anschließend validiert und zueinander korreliert. Auf Basis der dadurch gewonnenen Erkenntnisse soll eine komponentenspezifische sowie anschließend eine gesamtheitliche *Qualitätsziffer Fahrweg* aggregiert werden (Abbildung 2).

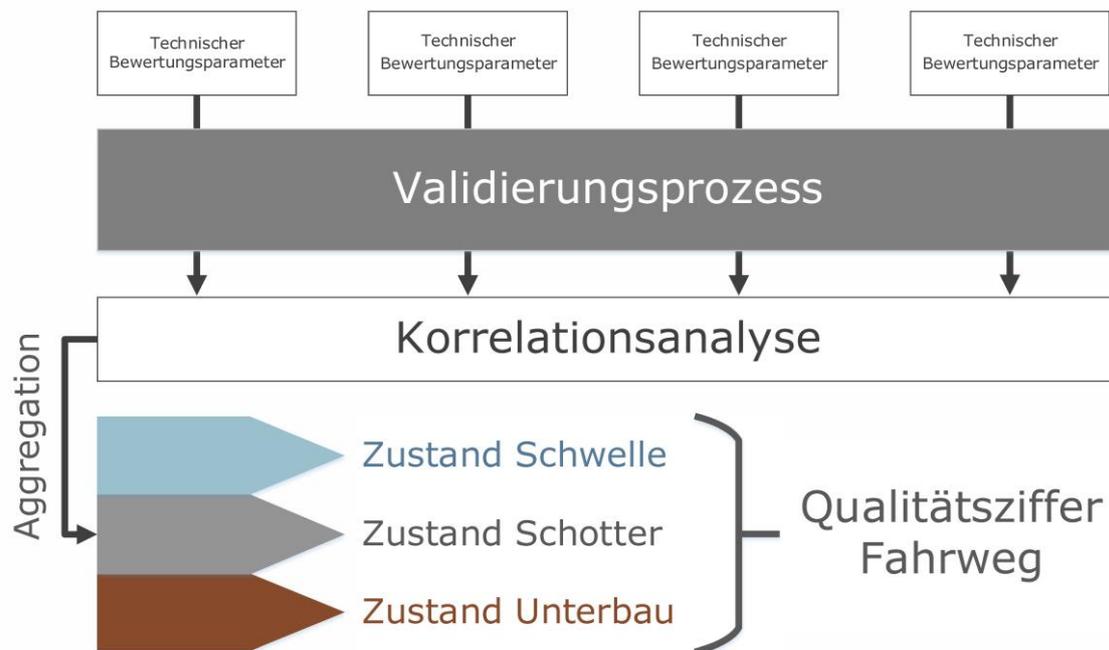


Abbildung 2: Vorgehensweise

2 Der Eisenbahnfahrweg – Grundlagen und Dokumentation

Der Fahrweg der Eisenbahn zeichnet sich durch besondere Rahmenbedingungen aus, da die Abtragung der eingebrachten Lasten durch mehrere Komponenten erfolgt, welche sehr starken Wechselwirkungen unterliegen. Darüber hinaus wird die erforderliche Lastabtragung immer wieder von äußeren Rahmenbedingungen – vorrangig negativ – beeinflusst. Umso wichtiger gestaltet es sich, möglichst viele dieser Rahmenbedingungen zu dokumentieren sowie den Zustand der Anlage durch objektive und automatisierte Messungen erfassbar zu machen.

2.1 Die Komponenten des Fahrwegs

Die bereits angesprochene Lastübertragung basiert dabei darauf, dass die großen nahezu punktuell eingebrachten Radlasten durch eine zunehmende Fläche bis in den anstehenden Boden abgetragen werden. Am Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene wird auf einer Fläche (Hertz'sche Fläche) von rund 3 cm² eine Spannung von rund 30.000 N/cm² aufgebracht. Durch eine möglichst optimale Ausgestaltung des Fahrwegs soll diese Kraft letztendlich am Gleisplanum auf rund 10.000 cm² verteilt werden, wodurch die Spannung auf rund 6 N/cm² verringert werden kann. Maßgeblich verantwortlich zeigen sich dafür die Komponenten Schiene, Schwelle und Schotter. Um eine Überbeanspruchung des anstehenden Bodens zu verhindern, muss dieser an seiner obersten Schicht oftmals bearbeitet werden, weswegen auch die Komponente Unterbau eine maßgebende Rolle in der Lastabtragung spielt [Kohler 2002].

Die vorliegende Forschungsarbeit behandelt die Zustandsbeschreibung dieser Komponenten; mit Ausnahme der Schiene. Dies liegt neben der notwendigen Abgrenzung des Forschungsthemas daran, dass sich diese Komponente zwar für einen wesentlichen Teil des Instandhaltungsbudgets verantwortlich zeigt, eine Gleiserneuerungsmaßnahme jedoch nur im Ausnahmefall aufgrund des Schienenzustands verursacht wird. Darüber hinaus kann die Schädigung der Schiene, angefangen von Schienenoberflächenfehlern bis zu Schienenverschleiß, mehr oder weniger entkoppelt vom Gesamtsystem betrachtet werden, da der Tausch der Schiene zumeist unabhängig vom übrigen System erfolgen kann. Lediglich im Falle der Erhöhung der eingebrachten Kräfte durch den Zustand der Schienenoberfläche (z. B. Riffelbildung) ist eine detailliertere Betrachtung dieser Interaktion notwendig. Diese Tatsache erlaubt es, Messsignale, die die Komponente Schiene betreffen, in dieser Arbeit unberücksichtigt zu lassen.

2.2 Dokumentation und Speicherung der Anlageninformationen

Einerseits ist es möglich, eine immer genauere Beschreibung des Gleisverhaltens durch Messdaten zu etablieren, andererseits wird die Anforderung an das Datenmanagement immer größer. Aus diesem Grund wurde in enger Kooperation zwischen den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) und dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft (TU Graz) die sogenannte TUG-Datenbank [Holzfeind & Hummitzsch 2008] erarbeitet (Abbildung 3). Auf Querschnitten in einem Abstand von fünf Metern sind dabei sämtliche zur Verfügung stehenden Informationen verknüpft. Umfasst werden dabei rund 4400 km des österreichischen Hauptnetzes (TUG-Netz), wobei auf jedem Querschnitt sämtliche Anlageninformationen, (Roh-)Messsignale und daraus generierte Qualitätssignale zur Verfügung stehen.

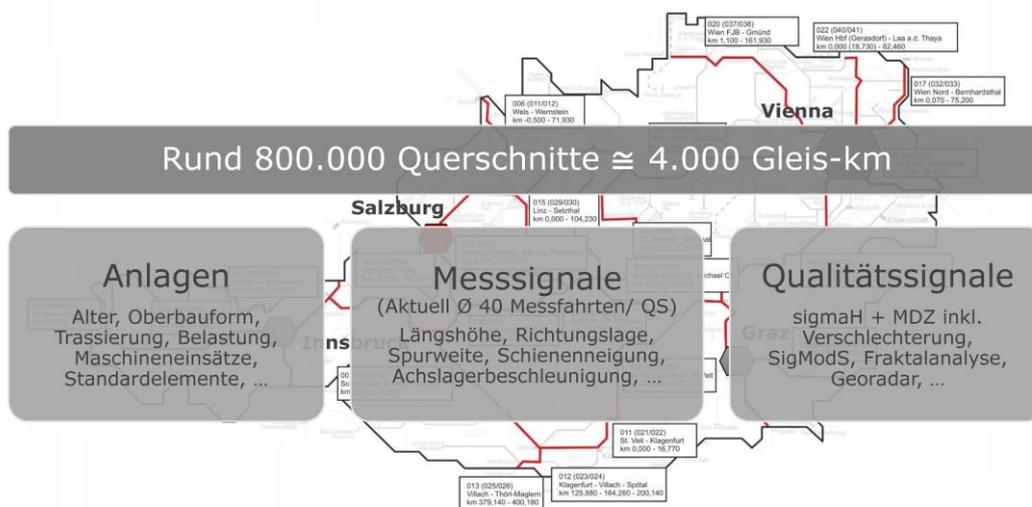


Abbildung 3: Übersicht TUG-Datenbank

Die Anlageninformation der einzelnen Gleise wird dabei insbesondere durch die Oberbaukonfiguration (Schwellentyp, Schienenprofil, Schienengüte), die Verkehrsbelastung sowie die Trassierung beschrieben. Die unterschiedliche Ausprägung dieser Eigenschaften führt zu unterschiedlichen Nutzungsdauern und Instandhaltungsintervallen und in weiterer Folge zu stark unterschiedlichen Lebenszyklen bzw. Lebenszykluskosten der verschiedenen Gleisabschnitte. Eine spezifische Ausprägung der oben beschriebenen Unterscheidungsmerkmale des Gleises wird dabei als Standardelement (Abbildung 4) bezeichnet. Für jede Parameterkombination – also jedes Standardelement – wurden vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz in Kooperation mit den ÖBB Arbeitszyklen entwickelt [Veit 2002].

		600<R<1000																	
GesBT/Tag, Gleis	Profil	Güte	Unterbau							Schwelle									
45.000 - 70.000	60E1	260	gut							Beton									
Instandhaltungsarbeit	ND in Jahren	30,0	0	1	2	3	4	5	6	7	.....	22	23	24	25	26	27	28	29
Neulage		1,0	1								.....							
Stopfen	alle x Jahre	3,0	1			1			1		.....			1			1		
Schleifen	Anzahl in ND	0,0									.....							
Schleifen HeadChecks	Anzahl in ND	6,0				1				1	.....		1				1		
Schienenwechsel	Anzahl in ND	0,0									.....							
Stoßpflege	Anzahl in ND	0,0									.....							
Zwischenlagenwechsel	Anzahl in ND	0,0									.....							
Mängelbehebung	Anzahl in ND	30,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	.....	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Abbildung 4: Beispiel Standardelement

Diese Standardelemente umfassen Fachexpertisen sowie statistischen Auswertungen gestützte Annahmen der strategischen Nutzungsdauer, sowie benötigte Instandhaltungsmaßnahmen für den Durchschnitt aller Gleise innerhalb der jeweiligen Rahmenbedingungen. Ein solches Standardelement bietet somit die Möglichkeit netzweiter Analysen und Strategieentwicklungen. Eine Anwendung auf spezifische Streckenquerschnitte ist jedoch nicht möglich, da diese Standardelemente - wie bereits erwähnt - das durchschnittliche Verhalten beschreiben. Einzelne Gleisabschnitte können aufgrund verschiedenster Einflüsse jedoch erheblichen Streuungen unterliegen.

Dementsprechend wurde parallel dazu auch das Gebiet der Gleislageforschung intensiviert, um das Verhalten des spezifischen Streckenquerschnitts besser beschreiben zu können. Die bisherige Forschung betrifft dabei vor allem das Verschlechterungsverhalten der Gleislage und die Entwicklung neuer Analyseformen, um das Verhalten des Gleises besser beschreiben zu können [Hummitzsch 2009; Holzfeind 2009; Hansmann 2015]. Darüber hinaus wurde dieses Wissen anschließend mit wirtschaftlichen Überlegungen verknüpft [Enzi 2011], um so den technisch und wirtschaftlich optimalen Reinvestitionszeitpunkt von Großprojekten zu ermitteln. Der Aufbau der Gleislagedatenbank fokussiert sich dabei weniger auf die Darstellung sämtlicher Werte und die Einhaltung von Sicherheitsgrenzen, sondern soll eine Filterung, Weiterverarbeitung, Klassifizierung und Zusammenführung der Gleismessdaten im Sinne einer gesamtheitlichen Zustandsbeschreibung ermöglichen.

Das Verschlechterungsverhalten des Fahrwegs wird naturgemäß auch besonders von der eingebrachten Belastung beeinflusst. Daher verfügt die Datenbank auch über querschnittsspezifische Belastungsinformationen in Form von Gesamtbruttotonnen pro Tag und Gleis. Diese erweisen sich als nützliche Annäherung, um die statische Belastung des Fahrwegs zu beschreiben. Von fahrzeugspezifischen Geschwindigkeiten und verschiedenen Fahrzeugtypen hervorgerufene, stark divergierende, dynamische Beanspruchungen des Gleiskörpers bleiben jedoch unberücksichtigt. Dies liegt einerseits am Mangel durchgängiger netzweiter Informationen zur Beschreibung dieser Effekte sowie andererseits an der

Notwendigkeit die Problemstellung für den im Rahmen dieser Arbeit vorgesehenen Gebrauch zu vereinfachen.

Wirtschaftliche, demographische oder politische Einflüsse bedingen gewisse Veränderungen der Streckenbelastung im Lebenszyklus einer Gleisanlage. Um jedoch nicht nur das Gleisalter und die aktuelle Lasteinbringung, sondern auch die bereits in den Fahrweg eingebrachte Belastung berücksichtigen zu können, ist es essentiell die kumulierte Belastung seit Gleiseinbau zu ermitteln. Daher wurden am Institut [Hansmann 2015] die Streckenbelastungen von 1971 bis 2013 [Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 1971-2001; ÖBB Holding AG 2016; Röhler] analysiert. Daraus wurde eine Methodik abgeleitet, welche es erlaubt, die querschnittsspezifische kumulierte Belastung in Gesamtbruttotonnen zu ermitteln. Die Häufigkeitsverteilung dieser Querschnitte (Abbildung 5) zeigt, dass es ab rund 500 Millionen GesBT zu einem Abfall der Querschnittszahl kommt. Dementsprechend werden auf kumulierter Belastung basierende Trendanalysen im Verlauf der gegenständlichen Arbeit bis zu eben jener Belastung ausgewertet.

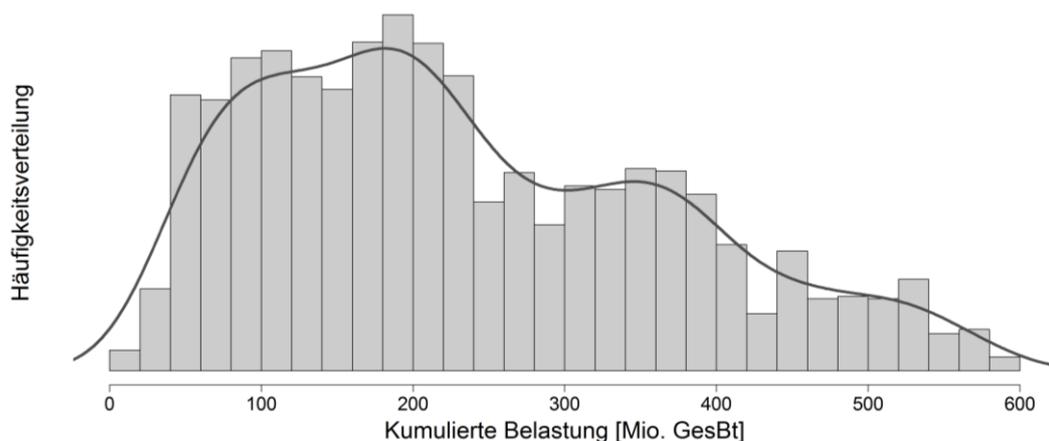


Abbildung 5: Verteilung kumulierter Belastung

Wird versucht, im Rahmen von Gleislageanalysen netzweite Verhaltensmuster zu identifizieren, so ist es oftmals notwendig gewisse Einschränkungen an der Grundgesamtheit der Daten vorzunehmen. Das grundsätzliche Verhalten des Eisenbahnfahrwegs kann vor allem durch punktuelle Einbauten (z. B. Brücken, Weichen) stark beeinflusst werden, wodurch die Auswertungen einer großen Streuung unterliegen und die Gefahr besteht ein surreales Verhalten abzubilden. Demzufolge erlaubt es das in der TUG-Datenbank verankerte Attribut „gültige Länge“ eben jene Effekte von der Betrachtung auszuschließen. Die gültige Länge berücksichtigt dabei neben dem Anfang und Ende von Maschineneinsätzen, auch Radius, Belastungsklasse, Schienenform, Schwellentyp, Bahnhofsbereiche, Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen und Tunnelabschnitte. Bei den in der vorliegenden Arbeit

durchgeführten Analysen wird jeweils explizit darauf hingewiesen, wenn eine solche Datenfilterung vorgenommen wurde.

2.3 Oberbautypen im Streckennetz

Unterschiedliche Oberbautypen beeinflussen das Fahrwegverhalten und insbesondere auch Verschleißerscheinungen in Schotterbett und Unterbau. Das Streckennetz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) verfügt aktuell mehrheitlich über einen Betonschwellenoberbau (Abbildung 6), deren Einbau in den 1970er Jahren die bis dahin dominierende Holzschwelle nach und nach ablöste.

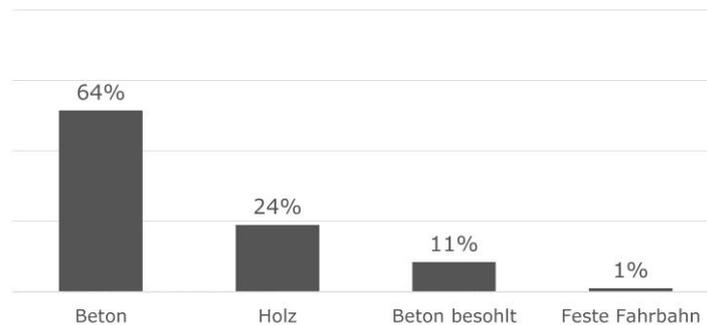


Abbildung 6: Aktuelle Verteilung der Schwellentypen im Netz der TUG-Datenbank

Innerhalb der letzten 15 Jahre hat die Anwendung der besohlenen Betonschwelle jedoch einen massiven Umbruch bewirkt. Nach dem Einbau dieser Technologie an mehreren Testabschnitten wird die Betonschwelle mit Besohlung in Österreich seit dem Jahr 2005 zunehmend flächendeckend - mittlerweile rund 70 % der jährlich installierten Schwellen - eingebaut (Abbildung 7). Im gesamten TUG-Netz sind aktuell bereits rund 11 % der eingebauten Betonschwellen mit einer elastischen Besohlung versehen (Abbildung 6). Diese verfügt über eine weniger als einen Zentimeter dicke elastische Schicht an der Unterseite der Betonschwelle, welche entweder nachträglich aufgeklebt, oder bereits beim Herstellungsprozess der Schwelle im Verbund angebracht wird. Die plastischen Eigenschaften der Schwellenbesohlungen erlauben eine kontinuierliche und weitgehend bleibende Einbettung der Schotterkörner in das Besohlungsmaterial. Demzufolge wird eine Vergrößerung der Kontaktfläche und eine deutliche Reduktion der Pressungen auf die anstehende Schotterlage bewirkt [Freudenstein, et al. 2011; Berghold 2016].

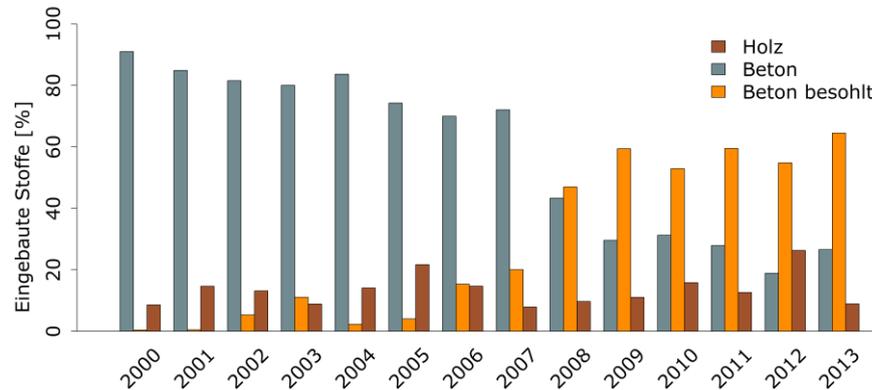


Abbildung 7: Verteilung der jährlich eingebauten Schwellentypen

Der Einbau von Holzschwellengleisen bleibt dabei einigermaßen konstant. Dies begründet sich darin, dass dieser Oberbautyp nach wie vor eingebaut wird, wenn es sich um Bogenbereiche (teilweise mit Stoßlückengleis), Tunnelbereiche mit Schotteroberbau oder Gleisabschnitte mit stark wechselndem Tragfähigkeitsverhalten und bzw. oder zu geringer Schotterbettstärke handelt.

Diese Entwicklung der Oberbaustrategie wird naturgemäß auch an der Altersverteilung der einzelnen Schwellentypen ersichtlich (Abbildung 8). Während Gleise mit Holzschwellen mit einem mittleren Einbaujahr von 1989 das höchste Oberbualter und eine rechtsschiefe Verteilung aufweisen, wurden die heute im Netz befindlichen Betonschwellen im Schnitt im Jahr 1995 eingebaut. Die besohnten Betonschwellen weisen bei einer stark linksschiefen Verteilung ein mittleres Gleisalter von fünf Jahren auf. Dies gilt es auch im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit zu berücksichtigen, wenn das Qualitätsverhalten der verschiedenen Schwellentypen untersucht wird.

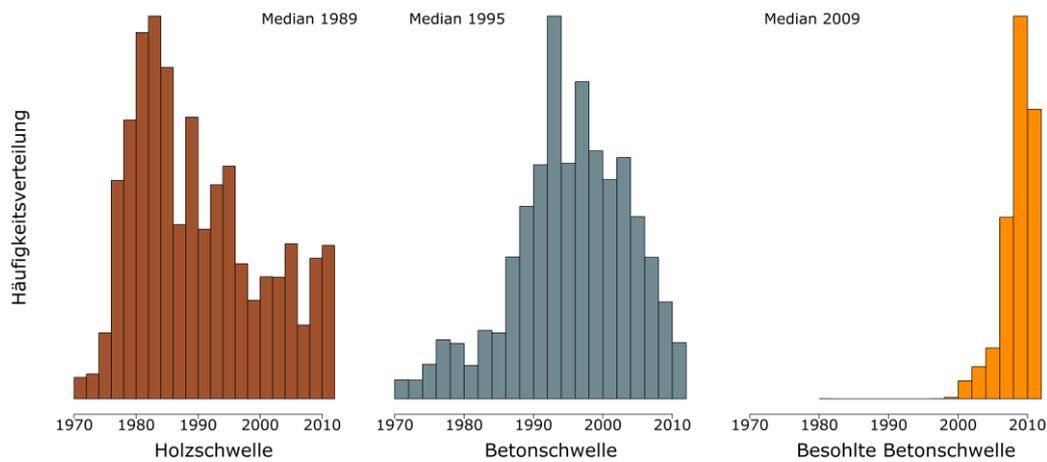


Abbildung 8: Schwellenspezifische Altersverteilung im TUG-Netz

Das Anlagenmanagement Fahrweg eines Infrastrukturbetreibers beschäftigt sich neben dessen adäquater Instandhaltung insbesondere auch mit dessen Erneuerung. Dementsprechend essentiell ist die Frage nach der Beschaffenheit der Streckenbereiche, welche mittelfristig einer Erneuerung unterzogen werden müssen. Für das in der TUG-Datenbank befindliche Streckennetz lässt sich dies anhand von Abbildung 9 illustrieren. Die Abszisse beschreibt dabei die Anzahl der im Netz befindlichen Querschnitte, während an der Ordinate die verbleibende Nutzungsdauer in Prozent dargestellt wird. Diese ergibt sich aus dem aktuellen Gleisalter sowie der laut Standardelement (siehe 2.2) erwarteten Nutzungsdauer des Einzelquerschnitts. Wie bereits erläutert, stellt die Nutzungsdauer einen mittleren Erwartungswert dar, weswegen es auch Querschnitte gibt, welche eine Restnutzungsdauer kleiner 0 % annehmen. Diese befinden sich aufgrund scheinbar optimaler Rahmenbedingungen bereits länger im Gleis als erwartet. Insgesamt weist das behandelte Streckennetz eine äußerst ausbalancierte Altersverteilung auf, was sich durch eine mittlere Restnutzungsdauer von 48 % ausdrückt.

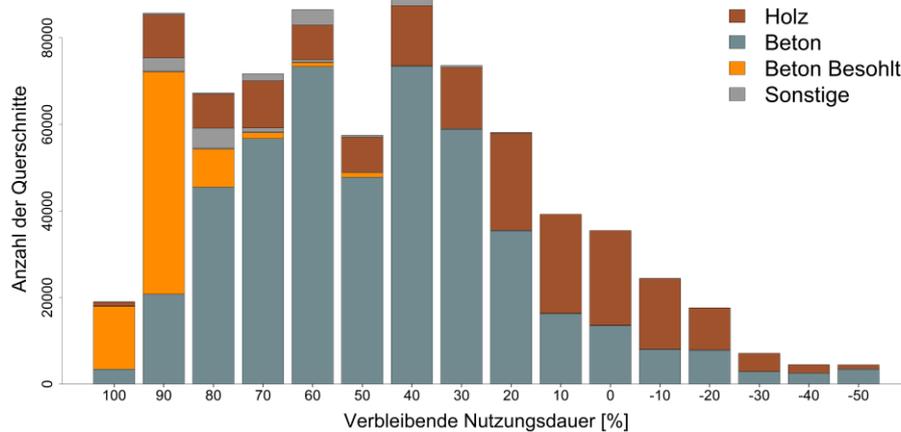


Abbildung 9: Verteilung der strategisch verbleibenden Nutzungsdauer

Hinsichtlich der Veränderung von Oberbaustrategien muss ein Aspekt immer berücksichtigt werden. Die Anlage Fahrweg zeichnet sich durch hohe Nutzungsdauern (meist 30 Jahre und mehr) aus, weswegen die Auswirkung jeder strategischen Maßnahme erst Jahr(zehnt)e später zu tragen kommt. Wie bereits erwähnt werden seit den 1970er Jahren zunehmend Betonschwellen anstelle von Holzschwellen eingebaut. Diese konventionellen Betonschwellen werden wiederum im Rahmen der Gleiserneuerung seit fast zehn Jahren mehrheitlich durch Betonschwellen mit Schwellenbesohlungen ersetzt (Abbildung 7). Nichtsdestotrotz weisen die Gleisabschnitte, welche sich aktuell am Ende der erwarteten Nutzungsdauer befinden, nach wie vor einen erheblichen Anteil an Holzschwellen auf (Abbildung 9). Dabei gilt es zu bedenken, dass Holz- und Betonschwellen gänzlich unterschiedlichen Verschleißkriterien unterliegen. Betonschwellen zeichnen sich durch ein sehr widerstandsfähiges Material aus, weswegen im Normalfall bis zum Ende der Nutzungsdauer ein adäquater Kraftschluss zwischen Schiene und Schwelle gewährleistet werden kann und die Schwellensubstanz üblicherweise keine nachhaltige Schädigung erfährt. Aufgrund der im Vergleich zu Holzschwellen geringeren Elastizität des Betons kommt es jedoch zu einer stärkeren Beanspruchung des Schotterbetts, weswegen mehrheitlich jene Komponente die Nutzungsdauer des Gleises bestimmt. Während die Holzschwelle eine geringere Belastung des Schotterbetts bewirkt, ist es hier meist die Schwelle selbst, welche bei fortgeschrittener Nutzungsdauer den erforderlichen Kraftschluss zwischen Schiene und Schwelle nicht mehr gewährleisten kann. Dies zeigt sich auch anhand einer Auswertung von insgesamt 110 aktuellen, österreichischen Reinvestitionsprojekten, welche in 43 % der Fälle aufgrund der Schwellensubstanz erneuert werden müssen (Abbildung 10). Diese Verteilung zwischen den beiden nutzungsdauerbegrenzenden Komponenten Schotter und Schwelle spiegelt exakt das Verhältnis von Holz- und Betonschwellen wider, welche sich nahe der erwartbaren Nutzungsdauer befinden (Abbildung 9).

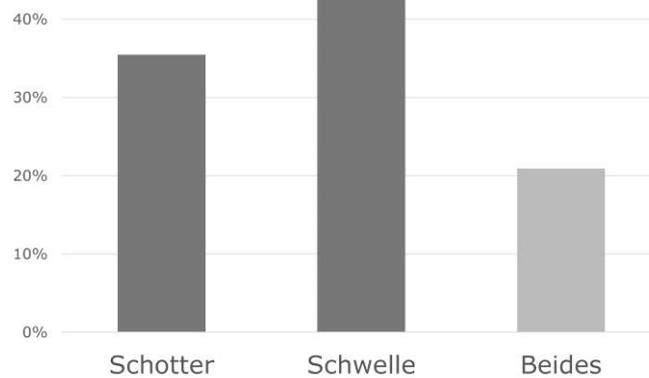


Abbildung 10: Aktuelle Auslöser für Gleisneulagen

Für das Anlagenmanagement der Fahrbahn ergibt sich daher eine interessante Konstellation. Einerseits wird das Streckennetz von Oberbautypen dominiert, deren Nutzungsdauer maßgeblich vom Zustand des Schotterbetts abhängt. Andererseits befindet sich in den aktuell zu erneuernden Streckenabschnitten ein erheblicher Anteil an Holzschwellen, deren Nutzungsdauer insbesondere vom Schwellenzustand begrenzt wird.

Dementsprechend essentiell gestaltet sich auch die Fragestellung nach einer Evaluierungsmethodik des komponentenspezifischen Fahrwegzustands, welche im Rahmen dieser Arbeit thematisiert werden soll.

3 Zustandserfassung des Fahrwegs

Um eine bestmögliche Erhaltung des Fahrwegs bei Eisenbahntrassen zu gewährleisten, ist eine möglichst präzise Beobachtung, Beschreibung und Dokumentation des Gleises notwendig. Dadurch sollen Fehler erkannt und deren Behebung geplant werden. Die zur Behebung eines Fehlers benötigte Instandsetzungsarbeit kann dabei präventiv oder auch reaktiv erfolgen. Unter einer reaktiven Instandsetzung versteht man das Einleiten von Maßnahmen, nachdem der Fehler auftritt bzw. er Dimensionen erreicht, in denen ein Hinzuzögern von Maßnahmen aufgrund sicherheitstechnischer Aspekte nicht mehr möglich ist. Die Strategie der präventiven Instandsetzung beinhaltet, Fehler zu korrigieren bevor sie definierte Eingriffsschwellen erreichen. Dies ermöglicht die Erarbeitung einer umsichtigen, strategischen und dadurch kostensparenden Instandhaltungsplanung. Unabhängig von der verfolgten Strategie sind die Regelmäßigkeit und die Qualität der durchgeführten Inspektionen von enormer Relevanz, um die Sicherheit des Betriebs gewährleisten zu können. Am Beispiel der ÖBB zeigt sich, dass in den letzten Jahren mehr und mehr auf automatisiert generierte Messdaten gesetzt wird (Abbildung 11).

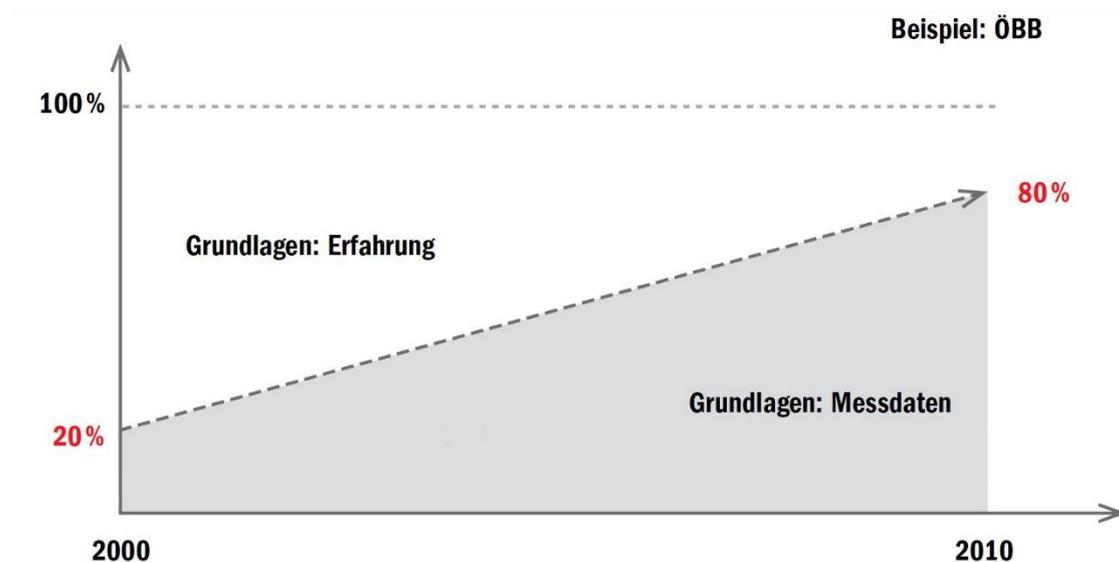


Abbildung 11: Zunehmender Einfluss der Messtechnik auf die Instandhaltung [Auer 2014]

Verschiedenste Messfahrzeuge ermöglichen aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeiten eine regelmäßige Erfassung des gesamten Streckennetzes ohne dabei den laufenden Eisenbahnbetrieb zu stören. Darüber hinaus werden objektive und zeitlich reproduzierbare Zustände ermittelt, welche die Grundlage einer nachhaltigen Instandhaltungs- und Reinvestitionsplanung darstellen. Dies sind auch die Gründe, weswegen die Zustandsbeschreibung im Rahmen dieser Arbeit vorwiegend auf derartigen Messsystemen basiert, ohne jedoch dabei die Notwendigkeit weiterer Inspektions- und Untersuchungsmethoden (Streckenbegehung, geotechnische Untersuchungen, etc.) in Frage zu stellen. Letztgenannte

Evaluierungsmethoden finden vor allem im Validierungsprozess der vorgestellten Methoden zur Zustandsbeschreibung Berücksichtigung.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit kooperierenden Eisenbahninfrastrukturunternehmen führen die Zustandserfassung des Fahrwegs mit einer Vielzahl von Werkzeugen durch (Abbildung 12). Die wesentlichen Unterschiede dieser Methoden betreffen dabei vorwiegend zwei Aspekte: (1) den Automatisierungsgrad und (2) die Erfassungsgeschwindigkeit. Je höher der Automatisierungsgrad, desto objektiver und damit personenunabhängiger ist die Erfassung. Eine hohe Erfassungsgeschwindigkeit ermöglicht eine Beurteilung des gesamten Streckennetzes, ohne dabei den laufenden Eisenbahnbetrieb zu stören. Außerdem gilt natürlich, je schneller das gesamte Netz befahren werden kann, desto regelmäßiger kann die netzweite Erfassung erfolgen. Dadurch kann eine profundere Zeitreihenanalyse und folglich Maßnahmenplanung durchgeführt werden.

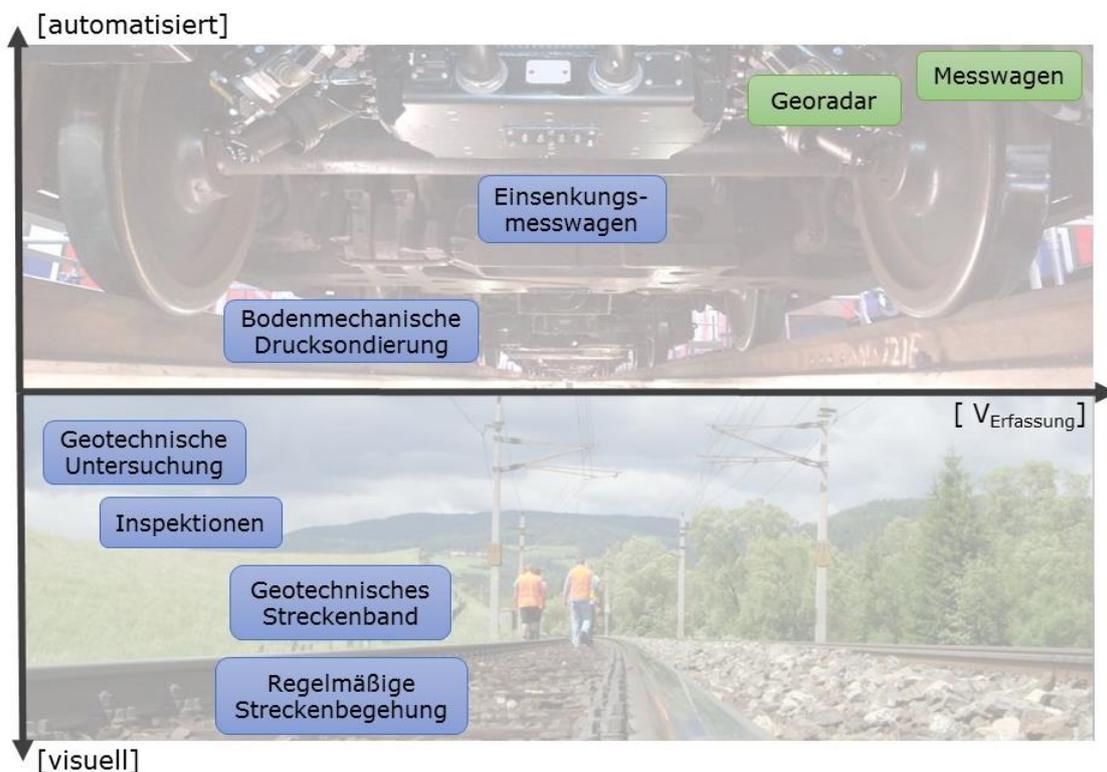


Abbildung 12: Behandelte Werkzeuge zur Zustandserfassung Fahrweg

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Werkzeuge zur Zustandserfassung in drei grundlegende Bereiche unterteilt: Um eine netzweite Zustandsbeschreibung etablieren zu können, werden vordergründig (1) der Gleismesswagen und (2) das Georadar behandelt (Abbildung 12, grün hervorgehoben); im Rahmen des Validierungsprozesses werden auch (3) die weiteren Erfassungsmethoden berücksichtigt.

Letztere beinhalten vordergründig punktuelle Erfassungsmethoden, welche teilweise in der Lage sind verschiedenste Komponenten des Fahrwegs getrennt voneinander zu beurteilen (z. B. Schotterproben, Tragfähigkeit des Planums). Diese Untersuchungen sind netzweit allerdings nicht realisierbar; erst recht nicht in regelmäßigen Abständen um eine adäquate Zeitreihe zu erhalten. Dementsprechend ergibt sich folgende Fragestellung, welche in diesem Kapitel behandeln werden soll:

- I Ist es im Rahmen der Messdatenanalyse möglich, aus den vorhandenen und automatisiert gemessenen Signalen den Zustand einzelner Komponenten zu erfassen?

3.1 Der Gleismesswagen

Bereits seit Ende des Zweiten Weltkriegs, als ein früherer Salonwagen zu einem Messwagen umgebaut wurde, wird die Gleisgeometrie in Österreich spurgebunden und automatisiert ermittelt. Aktuell sind dabei Messgeschwindigkeiten von bis zu 250 km/h möglich. Die Messung der Gleisgeometrie ist international definiert [EN 13848-1 2009] und umfasst im Wesentlichen folgende Parameter (Abbildung 13):

- I Gleislage: Längshöhen- und Richtungslage (*engl.: Level, Alignment*)
- I Spurweite (*engl.: Gauge*)
- I Überhöhung, daraus abgeleitet die Verwindung (*engl.: Cant, Twist*)

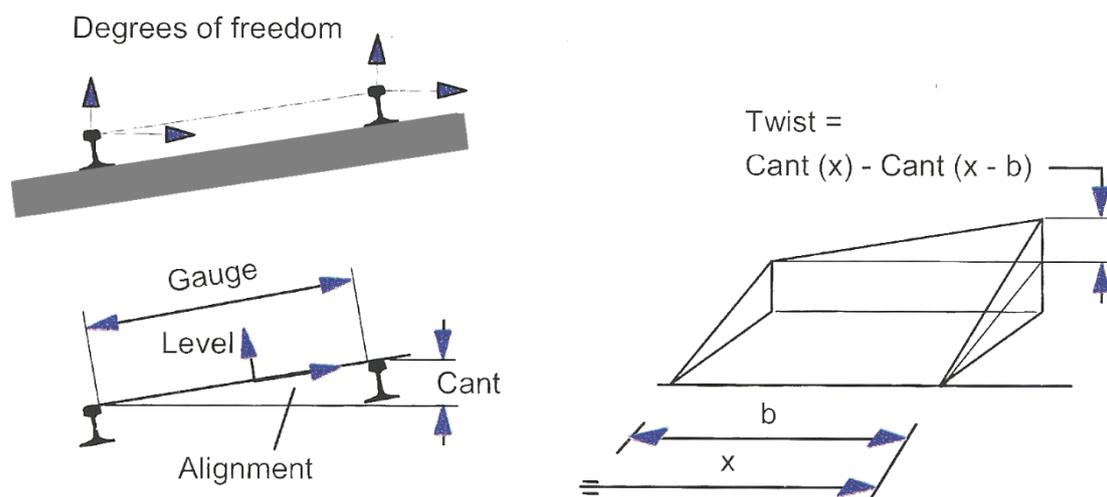


Abbildung 13: Parameter der geometrischen Gleislage [Esveld 2001]

Die Spurweite wird, ebenso wie die exakte Geometrie des Schienenprofils und die Schienenneigung, über optische Messsysteme mittels Laser genau 14 mm unter der Schie-

nenoberkante erfasst und als Wert in Millimeter ausgewiesen [EN 13848-1 2009]. Der Parameter Überhöhung wird sowohl über einen Lichtwellenkreislauf gemessen, als auch über die exakte Lage der beiden Schienen zueinander (siehe 3.1.1) ermittelt. Darüber hinaus können mittlerweile Messsysteme betreffend des Lichtraumprofils, der Fahrleitung, der Schienenoberfläche, der Achslagerbeschleunigung, der thermographischen Erfassung und weiterer in einem selbstfahrenden oder durch Triebfahrzeuge gezogenen Gleismesswagen installiert werden.

3.1.1 Die Gleislage

Die Gleislage – insbesondere in vertikaler Richtung – stellt eines der wichtigsten Messsignale im Eisenbahnwesen dar. Neben Stopfeinsätzen werden vor allem auch Schotterbettreinigungen und dementsprechend auch Erneuerungsmaßnahmen insbesondere auch auf Basis dieses Signals geplant. Daher spielt im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch die vertikale Richtung der Gleislage eine zentrale Rolle.

3.1.1.1 Die Messung der vertikalen Gleisgeometrie

Die Gleislage kann je nach Messwagengeneration und –anbieter über zwei verschiedene Hauptsysteme ermittelt werden: dem Sehnennmessverfahren und dem Inertialmessverfahren.

Wird ein inertiales Messprinzip angewandt, so erfolgt die eigentliche Messung über einen Messrahmen, auf welchem neben den zwei optischen Spurweitenmesssystemen (Dual OGMS) eine Inertialmesseinheit (IMU) installiert ist. Der messtechnische Aufbau der IMU beinhaltet Beschleunigungsaufnehmer sowie Drehgeber zur Messung der Winkeländerung. Die zweifache Integration der gemessenen Beschleunigungen ergibt die Lage des Messwertaufnehmers bezogen auf das inertielle Koordinatensystem [Oberweiler 1987]. Wird auch der Abstand zwischen Aufnehmer und Schiene gemessen, kann die Lage der Schiene im Raum exakt definiert werden. Um dies zu gewährleisten, wird der erwähnte Messrahmen an den Achslagern des Drehgestells befestigt, was eine ständig parallele Ausrichtung der Sensoren zur Schienenoberfläche garantiert. Diese ermittelte Raumkurve ermöglicht es, Gleislagefehler mit einer Wellenlänge von mehr als 150 m abzubilden.

Das Sehnennmessverfahren basiert auf einer Distanzmessung des Abstandes zwischen Achse und Gleis an der mittleren von drei Fahrzeugachsen, während über die beiden äußeren Achsen eine Sehne aufgespannt wird. Durch die kontinuierliche Ausführung dieser Messung kann anhand der Sehnenausrichtung (Stellung des Fahrzeugs) und der Distanz zur Schiene eine relative Gleislage ermittelt werden, wobei keine Mindestgeschwindigkeit notwendig ist. Ein wesentlicher Nachteil besteht allerdings darin, dass die reale, formtreue

Gleisgeometrie in Bezug auf Amplitude und Phase verzerrt wiedergegeben wird. Diese Verzerrung ist abhängig von der Sehnenlänge (Basislänge) und deren Teilung. Handelt es sich um eine asymmetrische Sehnenenteilung, so ist das Messergebnis zusätzlich von der Messrichtung abhängig [Wolter, et al. 2013]. Auf Basis der vorhandenen Achsabstände lässt sich eine Übertragungsfunktion ermitteln, deren Kenntnis es erlaubt, gemessene in wahre Amplituden umzurechnen. Es wird empfohlen die Achsabstände der drei Achsen asymmetrisch anzuordnen, da anderenfalls spezielle Wellenlängen überhaupt nicht erfasst und somit auch mittels bekannter Übertragungsfunktion nicht in die formtreue Gleislage umgewandelt werden können [Rießberger 1975].

Um sicher zu stellen, dass die verwendeten Messmethoden äquivalent, die Übertragungsfunktionen der Filter identisch und die Ausgaben und Datenformate vergleichbar sind, wurde eine europäische Norm [EN 13848-2 2004] entwickelt, welche diese Thematik behandelt. Das Ergebnis einer Messung ist letztendlich erst durch eine zusätzliche Angabe der Messunsicherheiten ausreichend definiert, welche ebenfalls internationaler Bestimmungen unterliegen [ENV 13005 1999].

3.1.1.2 Analyse und Zustandsbeschreibung der Gleislage in Österreich

Die Gleislageinformation durch den Messwagen ist international genormt und liefert daher – abhängig vom Umfang des installierten Messequipments – dieselben Rohdaten. Dennoch gibt es neben der Datenaufbereitung (Stationierung, Filterung) unterschiedlichste Herangehensweisen an die messdatenbasierte Zustandsbeschreibung und Instandhaltungsplanung.

In Österreich entwickelten die ÖBB bereits vor mehr als zehn Jahren das „New Austrian Track Analyzing System“ (NATAS). Dies umfasst eine gesamtheitliche Darstellung aller relevanten Messdaten und Anlageninformationen. Es handelt sich hierbei um vier Blätter für jeweils einen Streckenabschnitt von fünf Kilometern, welche die gemessenen Werte der Gleislage und des Schienenzustands sowie in vielen Fällen auch deren zugehörige Eingriffsschwellen darstellen. Darüber hinaus sind auch ausgeführte Maschineneinsätze der letzten 15 Jahre sowie Trassierung, Oberbautyp und Einbaujahr inkludiert. Ein derartiges NATAS-Blatt für die Analyse der Gleislage ist in Abbildung 14 ersichtlich.

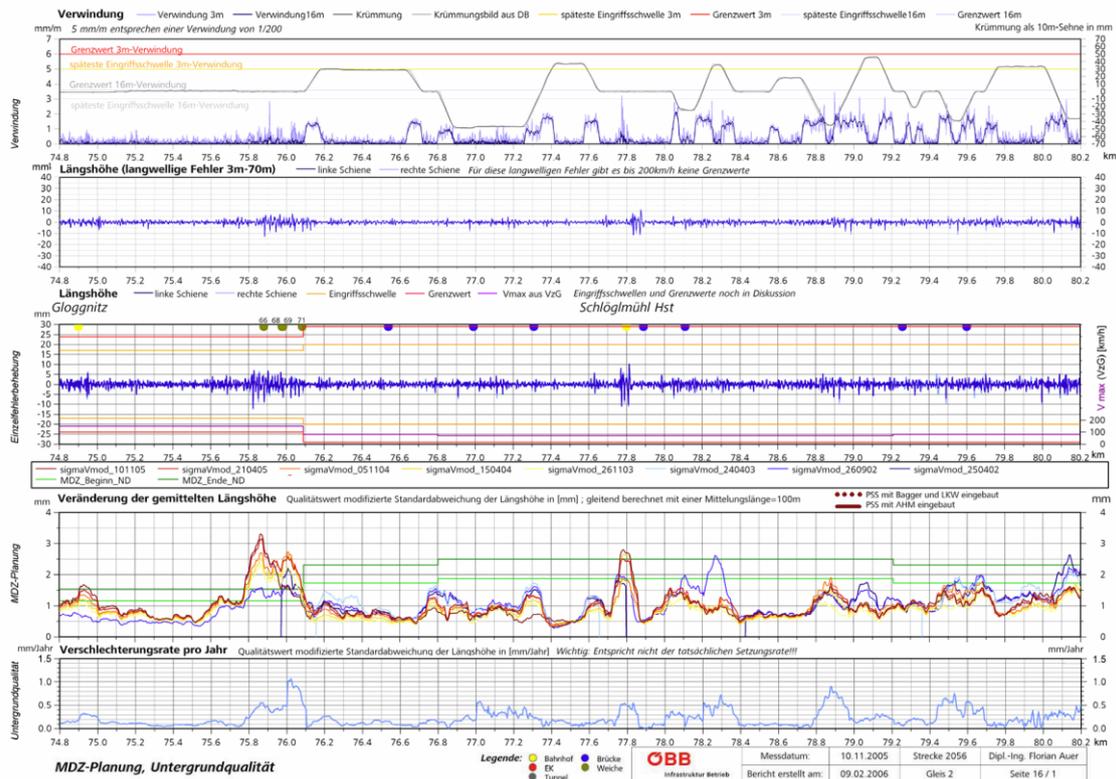


Abbildung 14: Gleislageanalyse der österreichischen Bundesbahnen [Auer 2010]

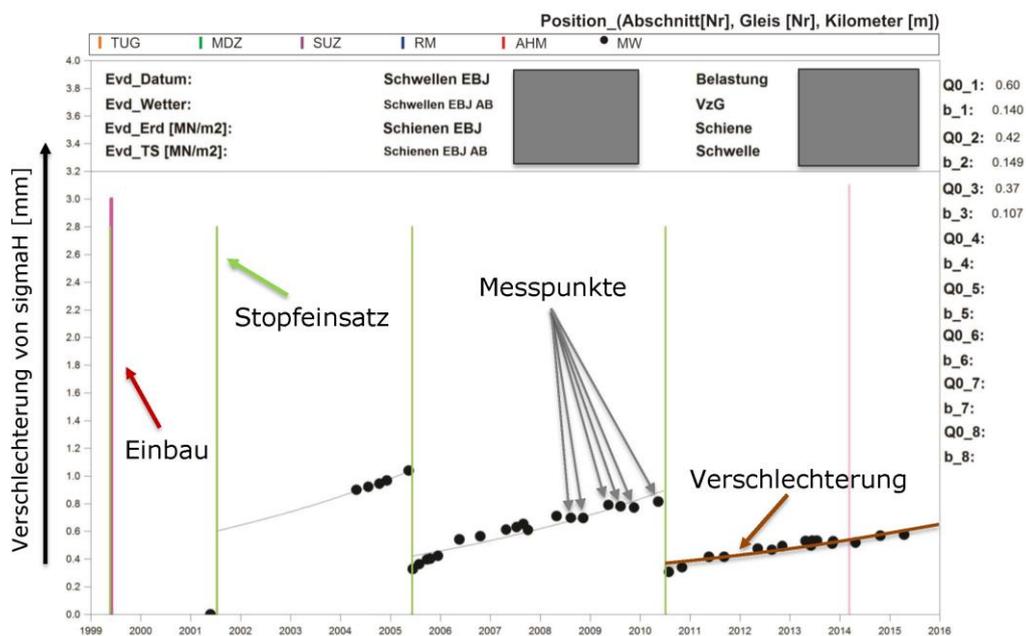
Dieses Werkzeug erlaubt durch dessen Übersichtlichkeit die Amplituden sämtlicher Messsignale grafisch mit deren spezifischen Grenzwertniveaus zu vergleichen. Eigens definierte Aufmerksamkeits- (AL), und Eingriffsschwellen (IL) gewährleisten eine Überschreitung der sicherheitskritischen Soforteingriffsschwelle (IAL) möglichst zu verhindern [EN 13848-5 2008]. Folglich ist dieses System eine maßgebliche Unterstützung für die Instandhaltung und einen infrastrukturseitig sicheren Eisenbahnbetrieb in Österreich. Es stößt allerdings für überregionale Reinvestitions- bzw. Instandhaltungsplanungen an seine Grenzen, da zwar jeder Streckenbereich als gedrucktes Blatt abrufbar ist, die einzelnen Werte jedoch nicht netzweit filter- oder klassifizierbar sind. Aus diesem Grund ist es weder möglich eine netzweite, automatisierte Maßnahmenplanung noch eine gesamtheitliche Zustandsbeschreibung für den Fahrweg zu generieren.

3.1.1.3 Die herkömmliche Gleislage im Rahmen der TUG-Datenbank

Eine derartige Filterung und Klassifizierung sämtlicher Mess- und Qualitätssignale des gesamten Streckennetzes kann mit der bereits erwähnten TUG-Datenbank (Abbildung 3) durchgeführt werden. Die inkludierten Werte der vertikalen Gleisgeometrie lassen sich dabei in zwei Aspekte gliedern [Auer 2004]:

- I Anhand der Rohdaten des Längshöhensignals können bereits während der Befahrung mit dem Oberbaumesswagen punktuelle Überschreitungen von Schwellenwerten detektiert werden.
- I Durch Mittelung verschiedener Messwerte über eine bestimmte Länge soll der durchschnittliche Gleislagezustand eines definierten Bereichs beschrieben werden.

Um ein derartiges Qualitätssignal zu kalkulieren, ist die Bildung diskreter oder gleitender Mittelwerte über eine vordefinierte Abschnittslänge (üblicherweise 100m/200m/500m) anerkannt. Eine Erweiterung dessen stellt die Standardabweichung dar, welche laut EN13848-5 mit einer Einflusslänge von 200 m definiert ist. Sie beschreibt die Streuung der Werte um ihren Mittelwert und dient somit als Indikator für Unregelmäßigkeiten des Längshöhensignals. Zusätzlich bietet sich die Möglichkeit, diese Qualitätssignale in einer zeitlichen Betrachtung zu analysieren. Eine durch ein Regressionsmodell kalkulierte Verschlechterungsrate erlaubt eine Identifikation einer zukünftigen Überschreitung einzelner Schwellenwerte. Die TUG-Datenbank beinhaltet dabei jene Standardabweichung der Längshöhe (σ_H), welche auch innerhalb der ÖBB verwendet wird [Auer 2004]. Das zeitliche Verhalten dieser (Abbildung 15) wird über eine exponentielle Regressionsfunktion [Holzfeind & Hummitzsch 2008] beschrieben.

Abbildung 15: Gleislageverhalten σ_H

Diese Mess- und Qualitätssignale ermöglichen eine Beschreibung der Gleislagequalität sowohl punktuell als auch über längere Abschnitte. Die aus den Messpunkten berechnete Regressionsfunktion wird sowohl bei linearem als auch exponentiellem Ansatz durch die Raumanfangsqualität und die Verschlechterungsrate eindeutig definiert. Damit ist es

möglich, den aktuellen Zustand zu bewerten sowie das Gleislageverhalten zu prognostizieren.

3.1.2 Die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage

Die Analyse der Gleislage bildet seit jeher eine Grundlage für die zustandsabhängige Maßnahmenplanung im Bereich der Eisenbahninfrastruktur. Über die Jahre entwickelten sich unterschiedliche Herangehensweisen, die es ermöglichten, die mit einem Oberbaumesswagen aufgenommenen Rohsignale in Qualitätswerte zu transformieren. Die statistischen Qualitätswerte erlaubten eine Beschreibung der Gleislage und eine Darstellung ihrer zeitlichen Entwicklung. Früh versuchte man mit Hilfe der spektralen Analyse von Gleislagendaten auf unterschiedliche Schadensfälle zu schließen, wengleich diese Versuche oftmals an der Möglichkeit einer netzweiten Auswertung scheiterten. Die Fraktalanalyse generiert dabei erstmals die Möglichkeit, die Daten der Gleislage hinsichtlich unterschiedlicher Wellenlängenbereiche zu untersuchen und bezüglich unterschiedlicher Fehlercharakteristika zu bewerten. Entwickelt wurde diese Analyseform bereits vor mehr als 40 Jahren [Mandelbrot 1967], um die zerklüftete Küstenlänge Großbritanniens beschreiben zu können. Später wurde sie benutzt, um die Rauigkeit kornförmiger Materialien in der Geologie zu beschreiben [Hyslip & Vallejo 1997], ehe sie ihre erste Anwendung im Eisenbahnwesen im Rahmen von Untersuchungen im Netz der amerikanischen AMTRAK [Hyslip 2002] erfuhr. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich, die Irregularitäten der Gleisgeometrie dem maßgeblich verursachenden Wellenlängenbereich und somit die spezifische Fehlercharakteristik der Gleislagendaten einem spezifischen Schadensbild zuzuordnen.

3.1.2.1 Methodik

Die am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft verwendete und umgesetzte Methodik sowie der programmierte Algorithmus der Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage wurde in enger Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Dr. Fabian Hansmann erarbeitet. Demzufolge umfasst dieses Kapitel Ergebnisse und Textpassagen, die teilweise schon veröffentlicht sind [Hansmann 2015; Landgraf 2015; Landgraf, et al. 2014; Hansmann & Landgraf 2013]. Wortgleiche Textpassagen sind als solche gekennzeichnet.

Die netzweite Berechnung der Fraktalanalyse erfolgt gleitend über das gesamte Streckennetz mit einer Einflusslänge von 150 Metern. Die verwendete Modified Divider Length Method [Mandelbrot 1967] benötigt zumindest zwei Stützpunkte, um eine Wellenlänge ausreichend zu beschreiben. Da das in Österreich derzeit vorhandene Messsignal Wellenlängen bis zu 70 m enthält, wurden die erwähnten 150 m Einflusslänge gewählt, um sämtliche Wellenlängen beschreiben zu können. Die Ausgabe des Ergebnisses erfolgt dabei über eine gleitende Mittelung.

Am Beginn des Algorithmus wird die Gleislage schienengetreu eingelesen und auf möglich vorhandene Fehlerwerte überprüft. Dabei beinhaltet ein Datensegment pro Querschnitt und Messfahrt bei einer gewählten Einflusslänge von 150 Metern 600 Einzelmessungen und erstreckt sich über eine Länge von ± 75 m zum aktuellen Bewertungsquerschnitt. Iterativ wird das Datensegment in immer kleiner werdende Teilabschnitte λ unterteilt und der zugehörige Messpunkt Y_i ermittelt (Abbildung 16). Kommt dabei die Unterteilung zwischen zwei real gemessenen Punkten zu liegen, so wird zwischen diesen Messwerten interpoliert. Im Anschluss daran werden die Längen der zwischen den Punkten aufgespannten Polygone mit Hilfe des pythagoräischen Lehrsatzes ermittelt und summiert.

$$L = \sum_1^N L_i = \sum_1^N \sqrt{(Y_{i-1} - Y_i)^2 + \left(\frac{EL}{N}\right)^2}$$

N ... Anzahl der Unterteilungen
 i ... Laufvariable
 EL ... Länge des Datensegments

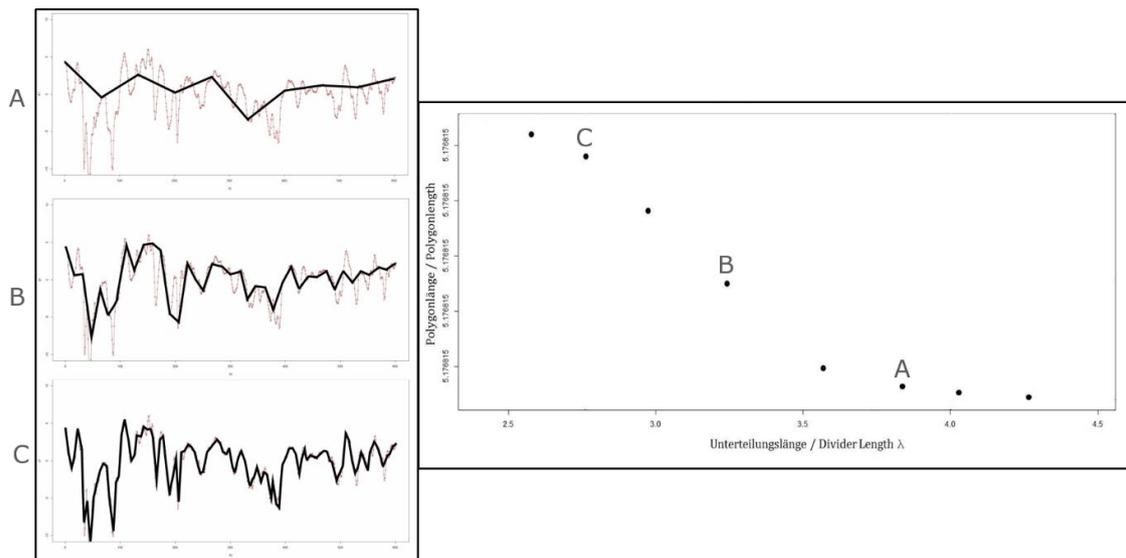


Abbildung 16: Iteration der Unterteilungslänge (links) und Erstellung des Richardson-Plots (rechts)

Die immer größer werdenden Gesamt-Polygonzuglängen (Ordinate) werden im Anschluss gegenüber den immer kleiner werdenden Längen der Teilsegmente (Abszisse) im logarithmischen Maßstab aufgetragen (Richardson-Plot, Abbildung 16). Die nun sichtbaren unterschiedlichen fraktalen Dimensionen werden durch eine Regressionsgerade beschrieben. Die drei Dimensionen stellen dabei kurz-, mittel- und langwellige Gleislagefehler dar, wobei jeweils die Steigung der berechneten Regressionsgerade für die Ausprägung des jeweiligen Wellenbereiches im Datensegment steht.

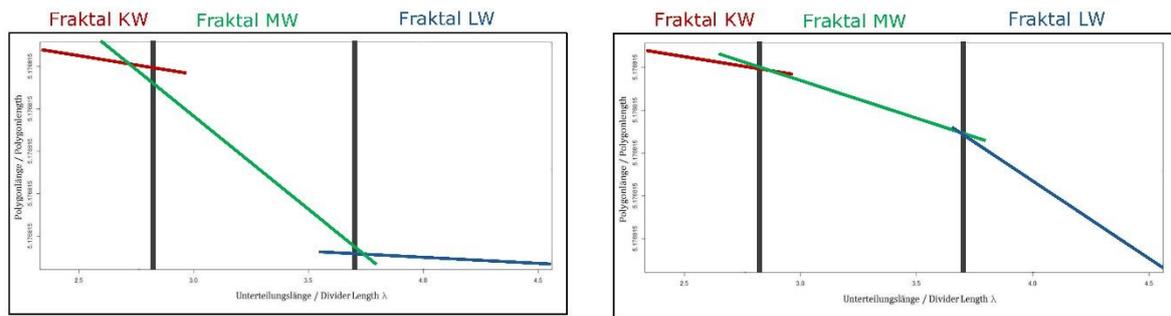


Abbildung 17: Richardson-Plot mit erhöhter Steigung im mittelwelligen (links) und langwelligen Bereich (rechts)

Höhere Werte bedingen dabei eine stärkere Repräsentation des betrachteten Wellenbereichs im Datensegment, während niedrigere Werte geringere Ausprägungen beschreiben (Abbildung 17). Dieser Algorithmus wird dabei auf das Längshöhensignal beider Schienen angewandt. Aufgrund des vernachlässigbaren Unterschieds der Ergebnisse der einzelnen Schienenstränge [Hansmann & Landgraf 2013] wird jeweils das Ergebnis der linken Schiene herangezogen. Die Betrachtung eines gleis- und nicht schienenspezifischen Ergebnisses ist notwendig, um eine Vergleichbarkeit zu anderen Mess- und Qualitätssignalen herstellen zu können.

3.1.2.2 Interpretation

In ihrer derzeitigen in Österreich verwendeten Form [Hansmann & Landgraf 2013] werden Irregularitäten der Gleislage - basierend auf dem sogenannten Richardson-Plot - in drei Wellenlängenbereiche unterschieden (Tabelle 1). Die Einteilung der Wellenlängenbereiche ist theoretisch variabel, eine weitere Unterteilung könnte jedoch einen negativen Einfluss auf die Aussagekraft der Fraktalanalyse ausüben.

Wellenlängenbereich	Beschreibung	Bezeichnung
$\lambda \leq 3 \text{ m}$	Kurzwelliger Bereich (KW)	Slope 1
$3 \text{ m} < \lambda \leq 20 \text{ m}$	Mittelwelliger Bereich (MW)	Slope 3
$20 \text{ m} < \lambda \leq 70 \text{ m}$	Langwelliger Bereich (LW)	Slope 2

Tabelle 1: Unterscheidung der fraktalen Wellenlängenbereiche

Es wird angenommen, dass der mittelwellige Bereich eine Fehlercharakteristik erfasst, welche den Zustand des Schotterbetts an sich beschreibt. Der langwellige Bereich wiederum soll eher das untere Schotterbett, den Vermischungsbereich bzw. auch den Unterbauzustand bewerten (Abbildung 18).

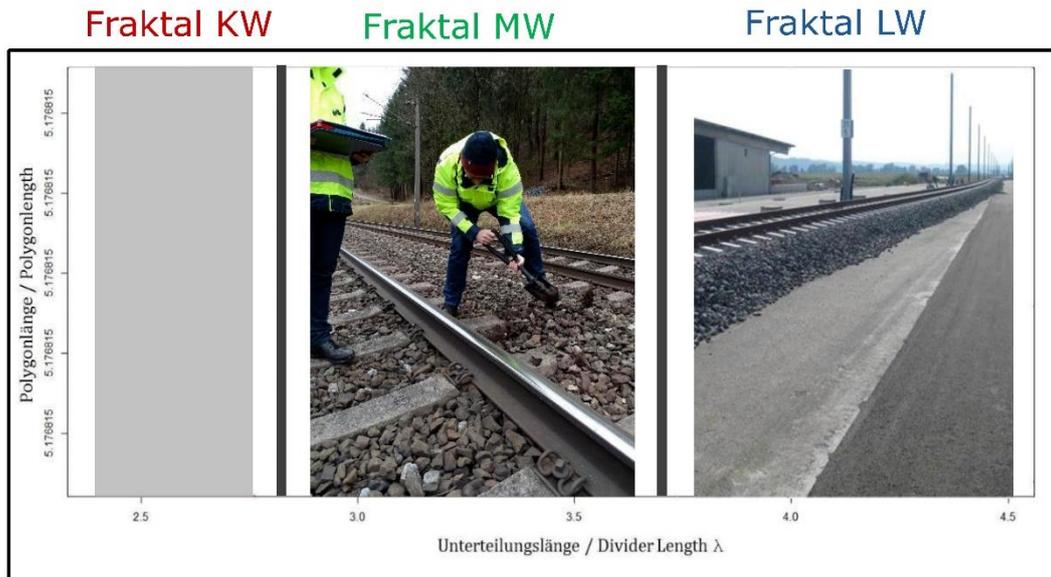


Abbildung 18: Einteilung der Sektoren des Richardson-Plots hinsichtlich deren Aussagekraft

Diese Annahmen konnten bereits im Rahmen eines umfassenden Validierungsprozesses [Hansmann 2015; Landgraf 2015; Landgraf, et al. 2014] vor allem durch Vergleiche mit dem In-Situ Verhalten sowie stochastischen Auswertungen bestätigt werden. Eine Ausweitung der Analysen über Wellenlängen von mehr als 70 Metern wäre im Rahmen des geschaffenen Algorithmus denkbar, jedoch für die in Österreich gebräuchlichen Geschwindigkeiten nicht notwendig. Dieser dafür generierte Wellenlängenbereich D3 [EN 13848-5 2008] zielt eher darauf ab, Hochgeschwindigkeitsstrecken über 300 km/h zu untersuchen. Der kurzwellige Bereich wurde bisher noch nicht in derselben Tiefe untersucht, da in den dafür relevanten Wellenlängenbereichen das Messrauschen der Messsysteme eine gewisse Rolle spielen könnte. Es zeigt sich jedoch bereits in Ansätzen, dass der kurzwellige Bereich vor allem im Interaktionsbereich Befestigung-Schwelle-Schotter zu hilfreichen Aussagen führen kann.

3.1.2.3 Internationaler Vergleich der Fraktalwerte

Eine der Fragen, welche sich im Rahmen der Fraktalanalyse zwangsläufig stellen, ist folgende: Können vergleichbare Analysen für verschiedene Messverfahren (Sehnenmessverfahren und inertielle Messung) durchgeführt werden? Um diese Fragen zu beantworten, wird diese Form der Wellenlängenanalyse auf Messdaten verschiedener Infrastrukturbetreiber angewendet. Neben dem in der TUG-Datenbank eingespeisten österreichischen Streckennetz konnte hierfür einerseits eine Strecke aus dem Netz der Schweizerischen Bundesbahnen SBB (Länge ~ 55 km) untersucht werden, welche im Gegensatz zu

den ÖBB einen Messwagen verwendet, der mit einem Sehnemessverfahren ausgestattet ist (siehe 3.1.1). Diese Messdaten beziehen sich auf eine relativ junge Strecke mit sehr guter Schotterqualität und bituminöser Tragschicht. Der Oberbau besitzt durchgehend dasselbe Einbaujahr, weswegen diese Strecke durchgehend einen guten Zustand aufweisen sollte. Andererseits wurden die Analysen auch für den *Northeast-Corridor* der amerikanischen *National Railroad Passenger Corporation Amtrak* (Länge ~ 100 km) durchgeführt. Dieser Abschnitt befindet sich in mittelmäßigem Zustand und unterliegt einer starken Streuung des Oberbaualters. Die Gleislagemessung erfolgt hierbei ebenfalls über einen Messwagen, welchem das Sehnemessverfahren zu Grunde liegt.

Die Vergleiche dieser Auswertungen (Abbildung 19) zeigen, dass sowohl im mittel- als auch im langwelligen Bereich die netzweiten Fraktalwerte der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sehr gut mit den amerikanischen Werten übereinstimmen. Dies erscheint plausibel, da beiden Bereichen eine vergleichbare Altersstruktur zu Grunde liegt indem sich in der Grundgesamtheit Streckenabschnitte jeden Alters befinden. Demzufolge bestätigt sich, dass sowohl durch Sehnem- als auch Inertialmessverfahren ermittelte Fraktalwerte vergleichbar sind. Der kurzwellige Bereich unterscheidet sich jedoch. Dies kann daran liegen, dass einerseits vor allem bei einem Wellenlängenbereich unter drei Metern ein gewisses Messrauschen nicht ausgeschlossen werden kann. Andererseits ist es auch dieser Wellenlängenbereich, welcher unter anderem Aufschluss über den Schwellenzustand bzw. die Interaktion zwischen Schienenbefestigung, Zwischenlage, Schwelle und Schotter geben könnte. Dementsprechend können die Unterschiede teilweise auch davon beeinflusst sein, dass in Österreich bzw. allgemein in Mitteleuropa der Standard der eingebauten Oberbaustoffe sehr hoch ist.

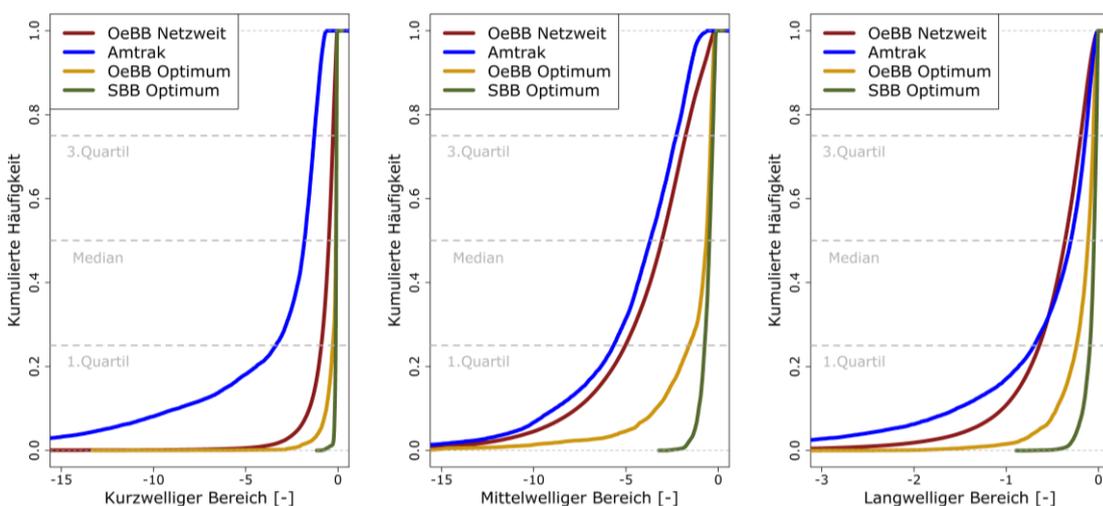


Abbildung 19: Internationaler Benchmark der Fraktalwerte

Wie bereits erwähnt handelt es sich beim schweizerischen Streckenabschnitt um ein relativ junges Gleis mit ausgezeichneten Ober- und Unterbaukomponenten. Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, werden daher auch aus dem österreichischen Streckennetz Abschnitte gefiltert, welche diesen Kriterien einigermaßen entsprechen. Diese Filterung des österreichischen Streckennetzes bezieht sich dabei auf Streckenabschnitte, welche ein Alter unter 10 Jahren aufweisen und mit besohlenen Betonschwellen ausgestattet sind. Generell lässt sich in Abbildung 19 eine gute Vergleichbarkeit der Fraktalwerte *OeBB Optimum* und *SBB Optimum* erkennen. Die etwas geringere Ausprägung der schweizerischen Fraktalwerte im mittelwelligen Bereich lässt sich durch den als Bahnschotter verwendeten Kieselkalk erklären, welcher eine überdurchschnittlich gute Qualität besitzt [Berghold 2016]. Die Vorteile des schweizerischen Streckenabschnitts im langwelligen Bereich ergeben sich durch die bereits erwähnte bituminöse Tragschicht, wodurch eine Vermischung des Tragschichtbereichs mit dem Schotterbett nahezu ausgeschlossen werden kann.

3.1.3 Die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS)

Die Messung der Spur wird als Abweichung zur Normspurweite ermittelt. Diese Abweichung darf im am häufigsten vorkommenden Geschwindigkeitssegment ($120 \text{ km/h} < V_{\text{max}} \leq 160 \text{ km/h}$) Werte von $-10/+35$ nicht überschreiten [EN 13848-5 2008]. Diese Norm bezieht sich somit auf im Gleis auftretende Einzelfehler. Darüber hinaus wird eine Abweichung zur mittleren Spurweite über 100 m empfohlen, welche eine Erfassung von Gleisabschnitten ermöglichen soll. Dies erlaubt sicherheitskritische Streckenquerschnitte bzw. –abschnitte zu eruieren. Eine Klassifizierung des bereits beschriebenen Verschleißverhaltens (siehe 2.1) oder eine darüber hinausgehende Prognose dessen ist allerdings nicht möglich. Um dieses Verhalten erfassen zu können, bedarf es einer Methodik, welche in der Lage ist das Rauschen des Signals zu quantifizieren. Eine simple Standardabweichung – wie im Falle der vertikalen Gleislage – führt hier allerdings nicht zur Lösung des Problems. Dies ist auf die beiden folgenden Besonderheiten dieses Messsignals zurückzuführen: Zum einen streut dieses Messsignal nicht um einen fixen Wert (bspw. Nulllinie), sondern kann Werte zwischen -10 mm und $+35 \text{ mm}$ und darüber hinaus annehmen. Zum anderen tendiert die Spur in Bogenbereichen dazu größere Werte anzunehmen (Abbildung 20, oben). In einigen Fällen wird eine Spurerweiterung in Bogenbereichen absichtlich eingebaut, um eine bessere Bogenläufigkeit zu gewährleisten. Eine berechnete Standardabweichung des Spursignals (Sigma-Spursignal) wird dabei maßgeblich von den langwelligen Spurerweiterungen beeinflusst. Die zeigt sich vor allem in den Übergangsbereichen, in welchen es zu einer rapiden Änderung der Werte kommt (Abbildung 20). Das kurz- bzw. mittelwellige Rauschen, welches den Kraftschluss zwischen Schienenbefestigung und Schwelle sowie einen Verschleiß der Zwischenlage bzw. das Einpressen der Rippenplatte beschreiben soll, wird somit nicht bzw. stark unterrepräsentiert erfasst.

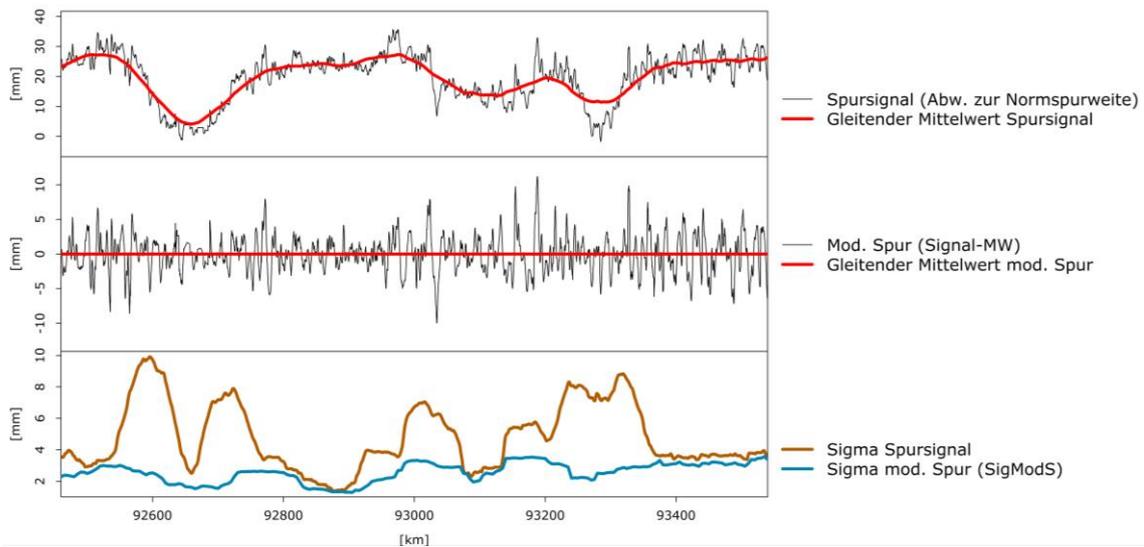


Abbildung 20: Methodik Standardabweichung modifizierte Spur (SigModS)

Um diese Problematik zu lösen, kann nun ein Hochpassfilter angewendet werden, welcher Signalanteile mit Frequenzen oberhalb ihrer Grenzfrequenz annähernd ungeschwächt passieren lässt, Anteile mit niedrigeren Frequenzen dagegen dämpft. Um eine derartige Filterung durchzuführen, wird nun das Delta zwischen dem Rohsignal und dessen gleitendem Mittelwert bei einer Einflusslänge von 25 m berechnet [Hansmann 2015]. Demzufolge ergibt sich ein modifiziertes Spursignal (mod. Spur), welches um die Nulllinie streut (Abbildung 20, Mitte) und nicht mehr auf langwellige Einflüsse reagiert. Bildet man nun die Standardabweichung dieses modifizierten Spursignals (SigModS), so zeigt sich ein vollkommen anderes Bild im Vergleich zur Standardabweichung des Rohsignals (Abbildung 20, unten). Während letztere einer starken Streuung unterliegt – maßgeblich bedingt durch die erwähnten Übergangsbereiche – zeigt erstere einen kontinuierlicheren Verlauf, welcher in der Lage ist, das kurz- und mittelwellige Rauschen des Signals zu erfassen. In längeren Geradenbereichen (bspw. km 92,800-92,900 oder km 93,400 ff) nähern sich die Werte der beiden Standardabweichungen einander an. Dies ist eine weitere Bestätigung dafür, dass die Standardabweichung des modifizierten Spursignals (SigModS) das Rauschen erfasst, ohne dabei von vorsätzlich eingebauten bzw. in Bogenbereichen entstandenen langwelligen Spurerweiterungen beeinflusst zu werden.

Die Häufigkeitsverteilung dieses Qualitätssignals über das gesamte in der TUG-Datenbank befindliche Streckennetz wird in Abbildung 21 ersichtlich. Es zeigt sich dabei, dass der Median für sämtliche Querschnitte einen Wert von rund 0,95 mm annimmt. Filtert man aus diesem Grunddatensatz nun die *Gültigen Längen*, so zeigt das Balkendiagramm eine Reduktion der Grundgesamtheit auf rund ein Drittel der Werte. Wie bereits erläutert (siehe 6), umfassen die Querschnitte gültiger Längen homogene Bereiche am freien Streckengleis. Dementsprechend weist auch die Standardabweichung der modifizierten Spur

(SigModS) in diesen Bereichen einen besseren Zustand aus. Dies wird durch einen Medianwert von rund 0,8 mm SigModS ersichtlich.

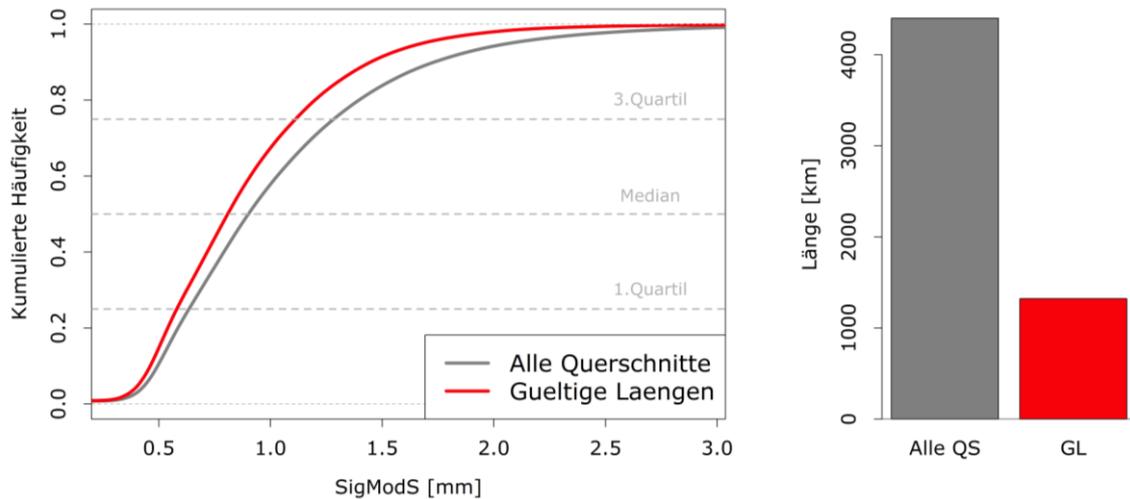


Abbildung 21: Häufigkeitsverteilung SigModS

Die 90 % bzw. 95 %-Quantile sämtlicher Querschnitte betragen 1,73 mm bzw. 2,07 mm SigModS. Dementsprechend kann bereits lediglich auf Basis dieser ersten statistischen Auswertungen der Beginn eines schlechten Zustands in diesem Wertebereich vermutet werden.

3.2 Das Georadar

Das Georadar ist ein geophysikalisches Messsystem, welches keine Gleislagemessung vornimmt, sondern die Beschaffenheit des Ober- und Unterbaus eruiert. Damit stellt es ein völlig konträres Messprinzip im Vergleich zum beschriebenen Gleismesswagen dar. Das Georadar ist sowohl ein Sender als auch Empfänger von elektromagnetischen Impulsen, aus deren Laufzeit und Intensität die Eigenschaften verschiedener Materialien abgeleitet werden können. Seit einigen Jahren wird das Georadar (auch Bodenradar genannt) u.a. in der Rohstoffexploration, der Leitungsverlauf erkundung und auch in der Untersuchung von Luftfeinschlüssen in Beton eingesetzt. Mittlerweile wird diese Explorationsmethode auch im Eisenbahnwesen vermehrt verwendet, um die Beschaffenheit der Materialien des Fahrwegs zu beschreiben. Ein besonderer Vorteil ist dabei die Messgeschwindigkeit, welche eine Erkundung der Bodenbeschaffenheit bei Geschwindigkeiten von mehr als 100 km/h erlaubt [Eriksen, et al. 2006].

3.2.1 Messmethodik des Georadars

Die eingebrachten elektromagnetischen Impulse reflektieren mit einer unterschiedlichen Geschwindigkeit und Stärke an den verschiedenen Materialien, abhängig von deren

dielektrischer Konstante. Die verschiedenen Reflexionen eines eingebrachten Impulses werden als eine Funktion von Zeit in Nanosekunden und deren Amplitude in Millivolt dargestellt. Anschließend wird dieser Funktion ein spezifischer Farbcode hinterlegt, wodurch aufgrund von einer Aneinanderreihung der einzelnen Messungen ein Radargramm entsteht (Abbildung 22). Dieses Radargramm ermöglicht eine grafische Auswertung der Georadarmessungen, wobei es insbesondere möglich ist, Schichtgrenzen und eventuelle Einbauten (Leitungen, Packlagen etc.) zu identifizieren.

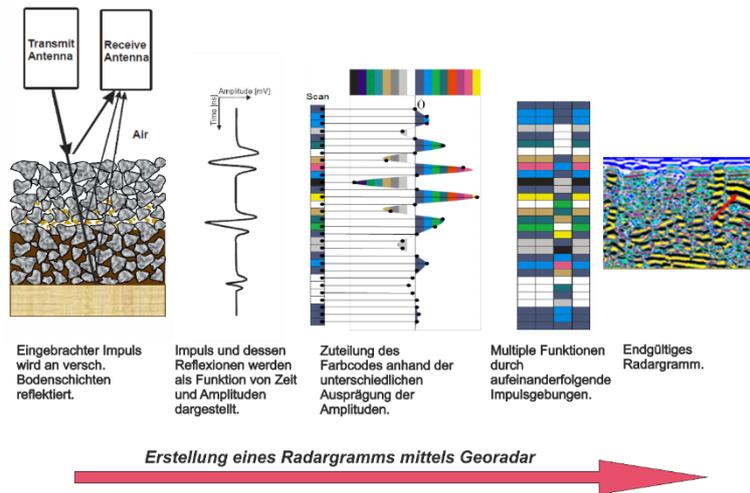


Abbildung 22: Erstellung eines Radargramms mittels Georadar [Roberts & Rudy 2006; Sussmann, et al. 2003; Niessen 2005; De Bold 2011]

Möchte man jedoch die Materialeigenschaften sowie die Tiefe der anstehenden Schichten ermitteln, muss man die vorhandenen physikalischen Größen berechnen. Die Formel für die Propagationsgeschwindigkeit eines dielektrischen Mediums [Daniels, et al. 1988] kann wie folgt beschrieben werden:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Formel 1: Propagationsgeschwindigkeit eines dielektrischen Mediums

Wobei:

v ... Propagationsgeschwindigkeit des Mediums [m/s]

c ... Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r ... dielektrische Konstante des Mediums

Da sowohl der Weg als auch die Zeit – ergo die Geschwindigkeit – des reflektierten elektromagnetischen Impulses bekannt ist, bleibt lediglich die dielektrische Konstante als Unbekannte dieser Formel. Die auf diesem Weg ermittelte dielektrische Konstante kann nun mit im Eisenbahnwesen relevanten Materialien (Tabelle 2) verglichen werden. Folglich erlaubt diese Methode, die Beschaffenheit der vorhandenen Bodenschichten zu definieren.

Material	ϵ_r	V [m/s]
Luft	1,0	$3,00 \cdot 10^8$
Wasser	81,0	$0,33 \cdot 10^8$
Trockener, reiner Schotter	3,0	$1,73 \cdot 10^8$
Feuchter, reiner Schotter	3,5	$1,60 \cdot 10^8$
Gesättigter, reiner Schotter	26,9	$0,48 \cdot 10^8$
Trockener, unreiner Schotter	4,3	$1,45 \cdot 10^8$
Feuchter, unreiner Schotter	7,8	$1,07 \cdot 10^8$
Gesättigter, unreiner Schotter	38,5	$0,58 \cdot 10^8$

Tabelle 2: Dielektrische Konstanten für im Eisenbahnwesen relevante Materialien [Clark, et al. 2001]

Abgesehen von der Beschaffenheit ist natürlich auch die Mächtigkeit der vorhandenen Bodenschicht von Interesse. Diese ist laut [Gallagher, et al. 2000] durch folgenden Zusammenhang definiert:

$$t_r = \frac{2 * d}{v} = \frac{2 * d * \sqrt{\epsilon_r}}{c}$$

Wobei:

t_r ... Zeitdifferenz zwischen Impulsausstoß und -empfang [s]

d ... Abstand zwischen zwei Schichtgrenzen (=Schichtdicke) [m]

v ... Propagationsgeschwindigkeit des Mediums [m/s]

c ... Lichtgeschwindigkeit ($3 \cdot 10^8$ m/s)

ϵ_r ... Dielektrische Konstante des Mediums

Somit kann auch die Mächtigkeit der einzelnen Schichten als einzig Unbekannte der oben stehenden Formel errechnet werden.

3.2.2 Zustandsbeschreibung mittels Georadar

Jede Form von Zustandsanalyse wird – neben der möglichst realgetreuen Beurteilung des Zustands – vor allem auch an einem Aspekt gemessen: deren Simplizität. Um von einer Vielzahl an Anwendern bedient und auch verstanden zu werden, bedarf es einer möglichst übersichtlichen und klaren Darstellung der endgültigen Aussage. Diese Erwartung kann mit dem vorläufigen Endprodukt des Georadars, dem Radargramm (Abbildung 22), nicht ausreichend erfüllt werden. Aus diesem Grund entwickelten unter anderem [Olhoeft 2000], [Sussmann, et al. 2003], [Eriksen, et al. 2006] und [De Bold 2011] spezifische Indikatoren, um die Erkenntnisse der Georadarbefahrungen übersichtlicher zu fassen. Basierend auf den Amplituden-Zeit Diagrammen (Abbildung 22) werden vor allem die Feuchtigkeit, der Verschmutzungsgrad und der Verlehmungsgrad des Gleiskörpers bewertet. Die Ebenheit einzelner Schichten in Längsrichtung kann anhand der Rauigkeit der jeweiligen Linie im Radargramm ermittelt werden.

Eine übersichtliche Darstellung des derzeit für die Österreichischen Bundesbahnen arbeitenden Anbieters *Ground Control Geophysik & Consulting GmbH* zeigt Abbildung 23. In einem Längsschnitt des Gleises wird die Mächtigkeit des Schotterbetts – unterteilt in verschmutzt und nicht verschmutzt – sowie die darunter liegende Zwischenschicht dargestellt. Die sich darunter befindlichen und farblich codierten Bewertungsbänder betreffen die Information hinsichtlich der bereits angesprochen Indikatoren, welche aus den Rohdaten generiert werden, um eine bessere Verständlichkeit des Ergebnisses zu erzielen. Zusätzlich kann, aufgrund der Profilmessungen an den Gleisflanken, auch die Querneigung des Planums überprüft werden. Verschiedene Georadaranbieter verfügen aufgrund der spezifischen Darstellungssoftware über unterschiedliche Ausgabeprotokolle, die generierte Information jedoch weist eher geringe Unterschiede auf.

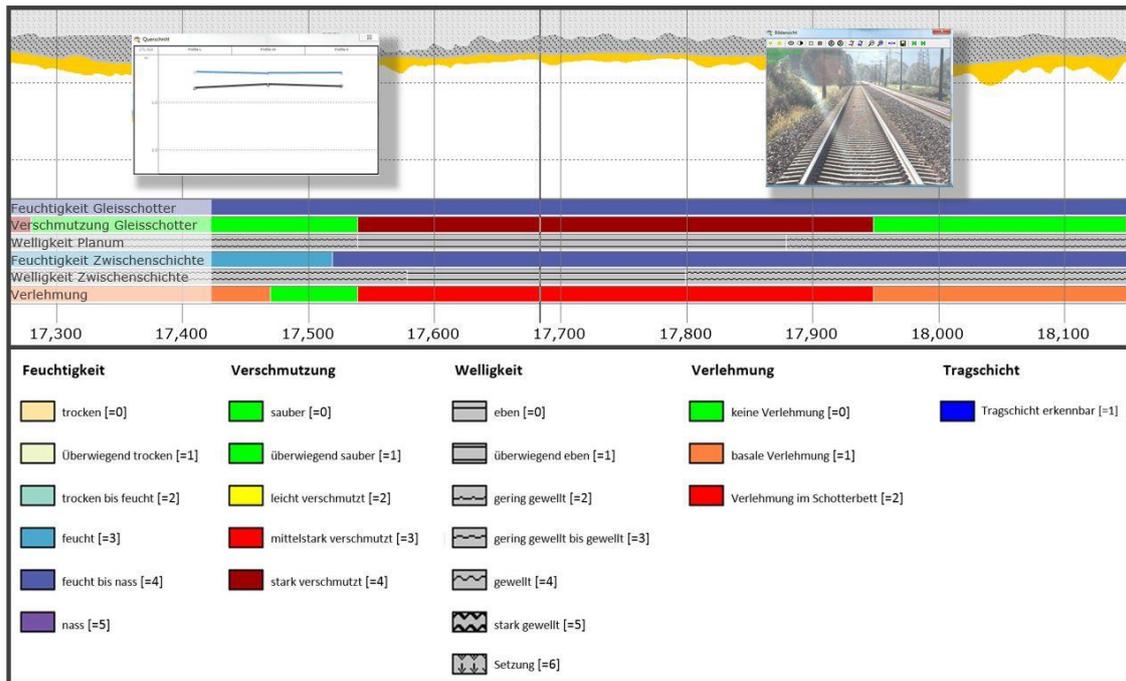


Abbildung 23: Darstellung einer Georadarauswertung der ÖBB

3.2.3 Detailuntersuchung der Georadarevaluierungen

In Österreich wurden in den Jahren 2012 bis 2015 rund 1500 Gleiskilometer einer Georadarevaluierung unterzogen. Im ersten Schritt wurden diese Evaluierungen aufbereitet, um mit der TUG-Datenbank des Instituts für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft verknüpft werden zu können. Danach war es möglich, die durch die Georadarbefahrungen gewonnenen Erkenntnisse umfassenden Analysen zu unterziehen, um sie auf ihre Anwendbarkeit im Eisenbahnwesen zu prüfen. Diese Analysen werden im folgenden Kapitel eingehend erläutert. In einem weiteren Schritt ist es aufgrund der Verknüpfung mit der TUG-Datenbank auch möglich, die Evaluierungen des Georadars mit jenen der Gleislage- sowie der daraus gewonnenen Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage zu korrelieren (Kapitel 5).

3.2.3.1 Analyse der bewerteten Parameter

Die Distribution der Parameter hinsichtlich der Beschreibung des Schotterzustands ist in Abbildung 24 ersichtlich. Hinsichtlich der *Verschmutzung Gleisschotter (GS)* fällt auf, dass die Beurteilung *sauber* nur äußerst selten vergeben wird, wohingegen *überwiegend sauber* den größten Teil des Netzes beschreibt. Auch im Rahmen der Feuchtigkeit fällt auf, dass die Bestnote *trocken* nur in sehr wenigen Fällen präsent ist. Dies kann natürlich einerseits darauf hindeuten, dass die Gleiskörper nicht im besten Zustand sind oder dass andererseits diese Bestnoten im Auswerteverfahren des Georadaranbieters nur sehr schwer erreichbar sind. Eine basale oder gar starke Verlehmung wird nur in speziellen Fällen ersichtlich.

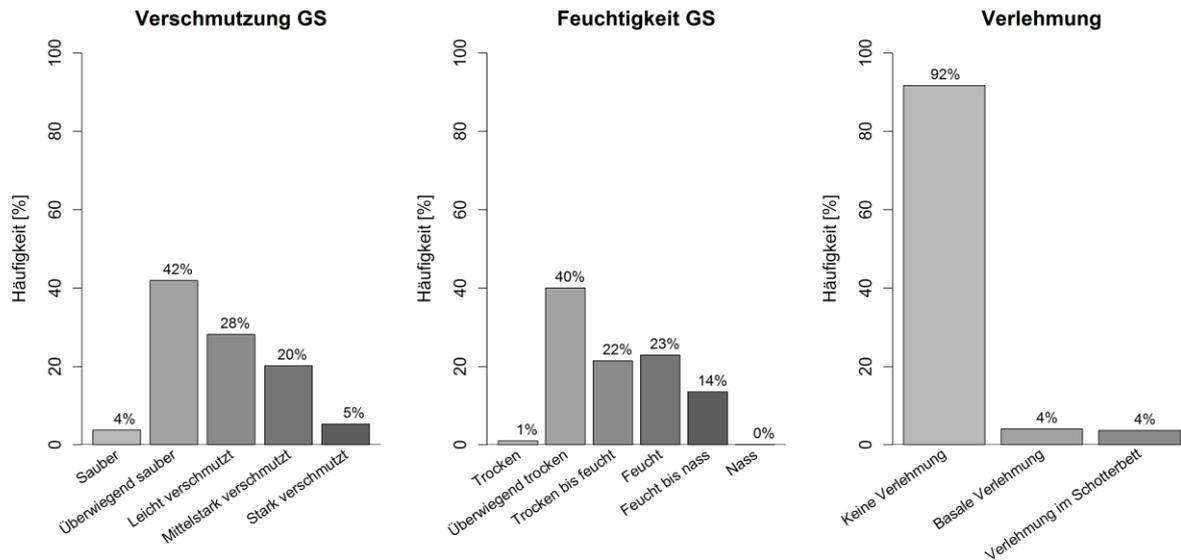


Abbildung 24: Verteilung Georadar-Parameter Schotter

Die Welligkeit des Gleisplanums scheint im Großen und Ganzen wenig Grund zur Besorgnis zu geben, da die Bewertungen zwischen gering gewellt bis gewellt und Setzung nur in sehr wenigen Fällen vorkommen (Abbildung 25). Wiederum zeigt sich, dass das optimale Bewertungskriterium eben de-facto nicht erreicht wird. Im Hinblick auf die Welligkeit der Zwischenschicht wird ersichtlich, dass die Kriterien *gering gewellt bis gewellt* und *gewellt* bedeutend häufiger vorkommen als am Gleisplanum. Dies erscheint durchaus plausibel, da es sich hier bereits um den Übergang der meist nur an der Oberfläche behandelten Zwischenschicht zum anstehenden Boden handelt.

Hinsichtlich der Feuchtigkeit wird *trocken* so gut wie nie beurteilt. Darüber hinaus fällt auf, dass die Verteilung der Feuchtigkeit auf mehr Nässe in der Zwischenschicht gegenüber dem Gleisschotter schließen lässt. Dies lässt sich auf die stark unterschiedliche Kornverteilung der beiden Schichten zurückführen und ist daher als plausibel zu erachten. Eine eingehende Analyse, ob diese Messungen etwaigen Beeinflussungen unterliegen, wenn es vor bzw. während der Messung zu einem Regenereignis kommt, wird im Rahmen des Validierungsprozesses (siehe 4.2.1.1) durchgeführt.

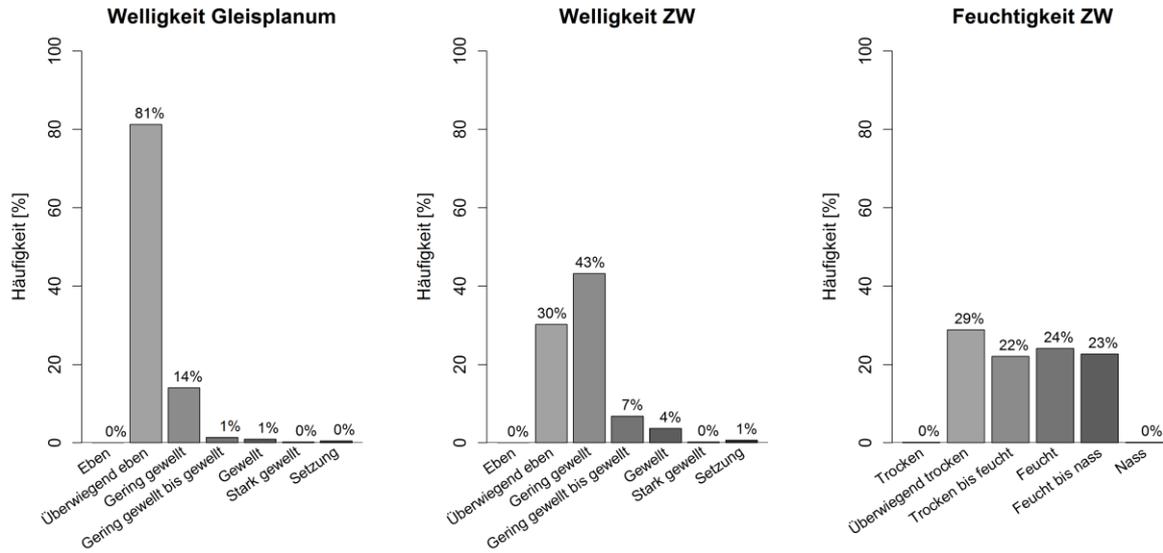


Abbildung 25: Verteilung Georadar-Parameter Gleisplanum/Zwischenschicht

Die Verteilung der erkannten Tragschichten (Abbildung 26) erkennt eine ebensolche in rund 13 % der Fälle. Im Rahmen der Georadarbefahrungen wurde zusätzlich die Art der Tragschicht unterschieden. Die Länge der mit Tragschicht erkannten Strecken von 160 km wurde dabei als 120 km Planumsschutzschichte (PSS) und 40 km Tragschichte (TS) spezifiziert.

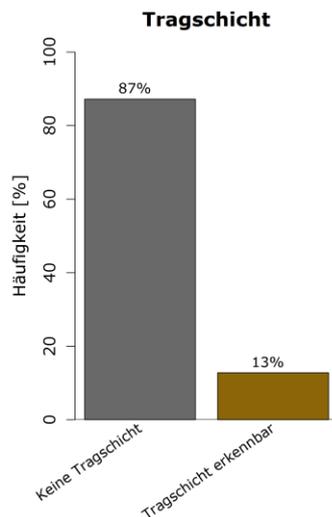


Abbildung 26: Verteilung Georadar-Parameter Tragschicht

Im gesamten Hauptnetz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) wurden bereits bis zum Jahr 2007 547 km unterbausaniert [Auer, et al. 2007]. Aus diesen Werten, kombiniert mit den Maschineneinsatzlängen aus der TUG-Datenbank (Stand 2015) ergibt sich

eine Quote von rund 20 % aller Gleiskilometer im Hauptnetz, welcher einer Unterbausaniierung unterzogen wurden. Die Georadarevaluierungen wurden auf repräsentativen Gleisabschnitten mit einer Länge von rund 1500 km durchgeführt, weswegen sich diese Quote auch hier widerspiegeln sollte. Da im Rahmen dieser Evaluierungen jedoch lediglich auf 13 % der bewerteten Länge eine Tragschicht erkannt wurde, wird der Parameter *Tragschicht* im Folgenden näher analysiert.

3.2.3.2 Tragschichtenerkennung des Georadar

Laut Rücksprache mit dem Anbieter der Georadarevaluierungen wird im Rahmen einer Georadarfahrt eine Tragschicht als erkannt ausgewiesen, wenn folgende Kriterien erfüllt sind:

- I Keine Welligkeit in Längsrichtung
- I Homogene Schicht einer spezifischen Mächtigkeit
- I Klare Trennschicht zwischen Schotterbett und Unterbau erkennbar

Es wird auch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Präsenz dieser drei Anforderungen derart gewählt und kombiniert wurde, um im Zweifelsfall keine Tragschicht auszuweisen. Somit soll verhindert werden, dass guter und tragfähiger Unterbau mit einer eingebauten Tragschicht verwechselt wird. Dadurch wird gezielt in Kauf genommen, nicht alle unterbausanierten Bereiche als solche zu erkennen.

Daraus folgt, dass beispielweise auch bituminöse Tragschichten nicht immer als solche erkannt werden können, weil vor allem die Mächtigkeit der homogenen Schicht im Vergleich zu einer herkömmlichen Tragschicht in diesem Fall natürlich nicht gegeben ist. Darüber hinaus kann es vorkommen, dass in Bereichen mit schwierigen Untergrundverhältnissen eine Vermischung der Tragschicht mit dem Schotterbett nach mehreren Jahren wieder einsetzt. Diese Streckenbereiche erfüllen somit nicht mehr die oben genannten Kriterien und werden daher auch nicht mehr als mit einer Tragschicht versehen erkannt.

Eine Verteilung der Zeitpunkte der Untergrundsaniierungen (USan) für Bereiche, an welchen eine tatsächlich eingebaute Tragschicht erkannt bzw. nicht erkannt wurde, zeigt Abbildung 27. Es wird ersichtlich, dass im Rahmen der Georadarevaluierungen richtigerweise erkannte Tragschichten eine kürzere Liegedauer im Gleis aufweisen. Damit bestätigt sich die Vermutung, dass Tragschichten nicht mehr erkannt werden, sobald sie ihre perfekte Anfangsqualität verlieren und damit nicht mehr eindeutig von einem sehr guten nicht unterbausanierten Boden zu unterscheiden sind.

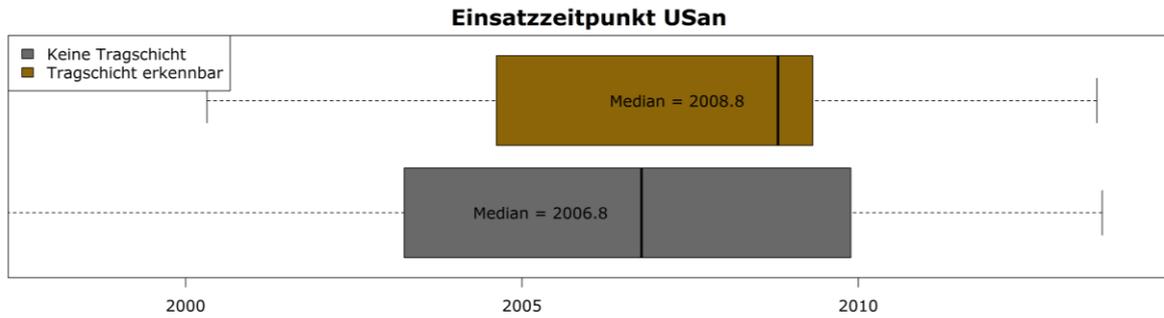


Abbildung 27: Einsatzzeitpunkt USan erkannter/nicht erkannter Tragschichten

Unter der Annahme, dass die Analysen des Georadars eine Tragschicht nicht erkennen, weil sie nicht mehr perfekt als solche funktioniert, müssten eben diese Bereiche auch über einen schlechteren Zustand des Gleiskörpers verfügen. Dementsprechend werden in Abbildung 28 sämtliche Bereiche untersucht, welche seit dem Jahr 2000 einer Unterbausaniierung unterzogen wurden. Es wird dabei eruiert, ob jene Bereiche, in welchen die Tragschicht nicht erkannt wurde, tatsächlich einen schlechteren Zustand aufweisen als die in der TUG-Datenbank als unterbausaniert ausgewiesenen Streckenbereiche.

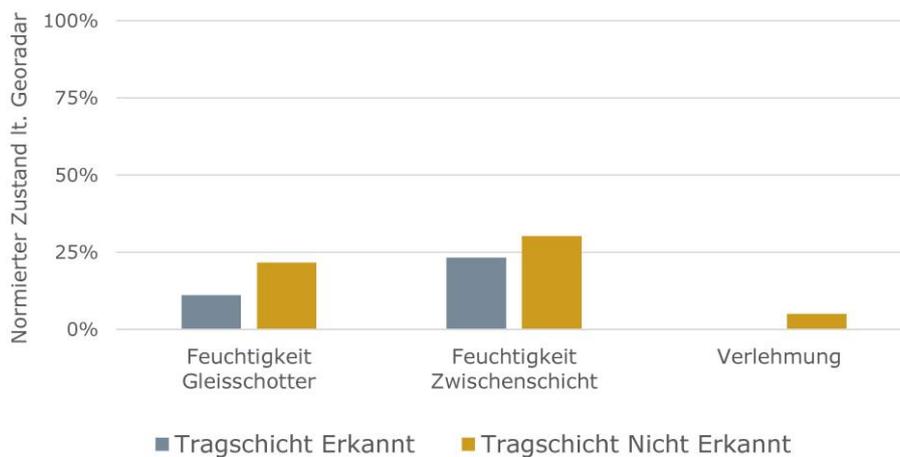


Abbildung 28: Zustand des unterbausanierten Gleiskörpers erkannter und nicht erkannter Tragschichten

Es wird offensichtlich, dass die Bereiche, welche nicht als unterbausaniert erkannt werden, einen eindeutig schlechteren Zustand aufweisen. Dies trifft vor allem auf die Feuchtigkeit der Zwischenschicht aber auch des Schotterbetts zu. Des Weiteren wird ersichtlich, dass die wenigen Abschnitte mit Verlehmungen lediglich erkannt werden, wenn die Bereiche vom Georadar als nicht unterbausaniert bewertet werden.

Folglich kann bestätigt werden, dass adäquat funktionierende Tragschichten sehr wohl auch als solche erkannt werden. Bereiche hingegen, in welchen die Tragschicht ihre Funktion nicht mehr optimal wahrnehmen kann, werden im Rahmen der Georadarbefahrung als nicht unterbausaniert ausgewiesen. Dies bedeutet keineswegs, dass diese Bereiche einen schlechten Unterbauzustand aufweisen, jedoch das Prädikat *Tragschicht vorhanden* nicht mehr erhalten. Dieser Umstand muss auf alle Fälle berücksichtigt werden, wenn man Zustandsanalysen basierend auf den Ergebnissen des Georadars vornimmt.

3.3 Weitere Methoden zur Zustandserfassung des Fahrwegs

Im Rahmen der Fahrweginspektion bedient man sich, abgesehen des Gleismesswagens und des Georadars, einer Vielzahl von unterschiedlichsten Zustandserfassungsmethoden. Neben regelmäßig durchgeführten Streckenbegehungen durch qualifiziertes Fachpersonal werden, vor allem im Rahmen von Reinvestitionsprojekten, umfassende geotechnische Untersuchungen durchgeführt. Diese sollen vordergründig darüber Aufschluss geben, ob und in welchen Streckenbereichen eine Untergrundsanierung notwendig ist. Die Untersuchungen umfassen dabei vor allem drei Methoden: (1) Gleisschürfe, um eine visuelle Begutachtung des Aufbaus der Bodenschichten gewährleisten zu können; (2) Prüfung der Korngrößenverteilung des Schotters, um dessen Verschmutzungsgrad zu bewerten und (3) dynamische Plattendruckversuche mit dem leichten Fallgewichtsgesetz, um die Tragfähigkeit des anstehenden Bodens zu ermitteln [Auer, et al. 2007].

Im Rahmen des Validierungsprozesses werden mit der bodenmechanischen Drucksondierung und dem Einsenkungsmesswagen zwei weitere spezielle Erfassungsmethoden verwendet, welche im Folgenden erläutert werden.

3.3.1 Bodenmechanische Drucksondierung

Die Drucksondierung (Cone Penetration Test, CPT) wird als Sondierungsverfahren im Rahmen der Baugrunderkundung verwendet. Dabei wird ein Messkopf mit kegelförmiger Spitze und konstanter Geschwindigkeit in den Boden gedrückt. Aufgrund der gemessenen Werte Spitzendruck und Mantelreibung kann die Tragfähigkeit des Bodens eruiert werden. Darüber hinaus lässt sich mit Hilfe dieser Methode auch der Porenwasserdruck ermitteln [Lunne, et al. 1997].

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurden in den Jahren 2013 und 2014 gleisgebundene bodenmechanische Drucksondierungen durchgeführt, um deren Aussagekraft hinsichtlich der Tragfähigkeit des Planums und der Beschaffenheit des anstehenden Bodens zu überprüfen. Dazu werden die zur Schotterentnahme notwendigen Bagger sowie die Drucksonde an sich auf Niederflurwagen situiert. Als erster Schritt wird ein Hüllrohr in das

Schotterbett eingerüttelt dessen Inhalt mittels Drehbohrung entnommen wird. Folglich ist es sowohl möglich die Drucksonde in den anstehenden Boden einzuführen, als auch die entnommenen Schotterproben separat zu untersuchen.



Abbildung 29: Gleisgebundene Drucksondierung (Links: eingerütteltes Hüllrohr, Mitte: Schotterentnahme, Rechts: Drucksonde)

Die Probeentnahme dauert mit Hilfe der derzeit verfügbaren Zusammenstellung der gleisgebundenen Drucksondierung rund 20 min pro Untersuchungspunkt. Diese Methodik kann daher für spezielle Aufschlüsse als geeignet angesehen, für einen netzweiten Einsatz aber nicht empfohlen werden.

3.3.2 Einsenkungsmesswagen

Bei einem konventionellen Gleismesswagen ist sämtliches Messequipment direkt an der Wagenunterseite situiert, weswegen naturgemäß ein durch eine Zugüberfahrt belasteter Zustand aufgenommen wird. Dies ist auch nachvollziehbar, da sämtliche Sicherheitsgrenzen auf diesen Zustand ausgerichtet sind. Einen darüber hinaus interessanten, auf diese Art nicht messbaren Parameter, stellt die relative Einsenkung dar. Dieser Parameter gibt vor allem Aufschluss über die Steifigkeit des Fahrwegs. Die dafür notwendige Messausrüstung beinhaltet einen Wagen, welcher an der Hinterachse mit 20 Tonnen belastet wird, und zwei kleine Messwagen als Teil eines Stahlgerüsts (Abbildung 30). Dadurch wird es mit Hilfe simpler geometrischer Zusammenhänge möglich die relative Einsenkung zwischen dem belasteten und unbelasteten Zustand zu messen [Luomala, et al. 2014].



Abbildung 30: Eisenkungsmesswagen SBB [Soldati 2013]

Typische Werte der Eisenkung variieren von rund 0,6 mm (Schotteroberbau mit Betonschwelle) bis rund 2,0 mm (Schotteroberbau mit besohlte Betonschwelle) [Schilder 2013]. Diese Werte zeigen sich auch in einer beispielhaften Darstellung der Eisenkungsmessungen eines fünf Kilometer langen Abschnittes (Abbildung 31), welche vom Messteam der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) durchgeführt wurden.

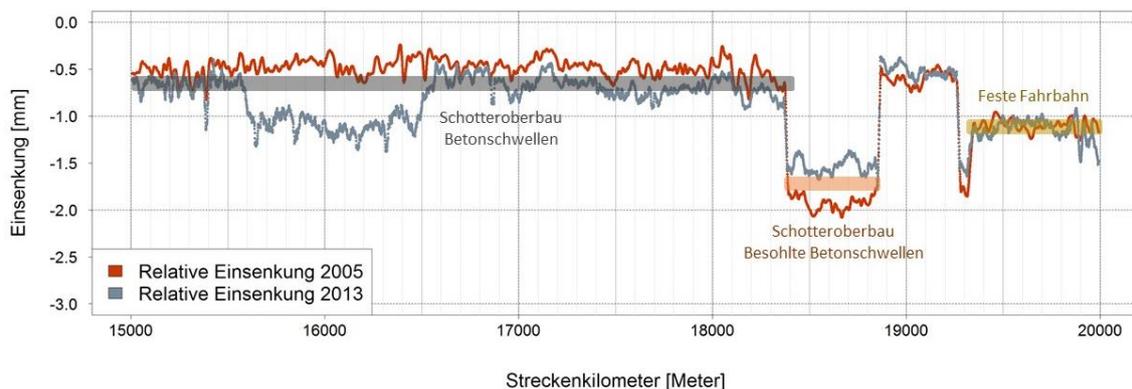


Abbildung 31: Darstellung Eisenkungsmessungen

Jene vom Oberbautyp abhängigen unterschiedlichen Eisenkungen spiegeln sich auch in einer Auswertung des Gesamtdatensatzes (Abbildung 32) wider, welcher rund 55 Gleis-km umfasst. Das unbesohlte Betongleis zeigt auch hier die geringste Eisenkung (Median rund 0,7 mm), während das besohlte Betongleis mit einem Median von rund 1,7 mm die größte Eisenkung aufweist. Dazwischenliegend befinden sich die Bereiche der Festen Fahrbahn, welche in den Tunnelabschnitten ausgeführt sind, und eine größere Eisenkung als das Betongleis aufweisen.

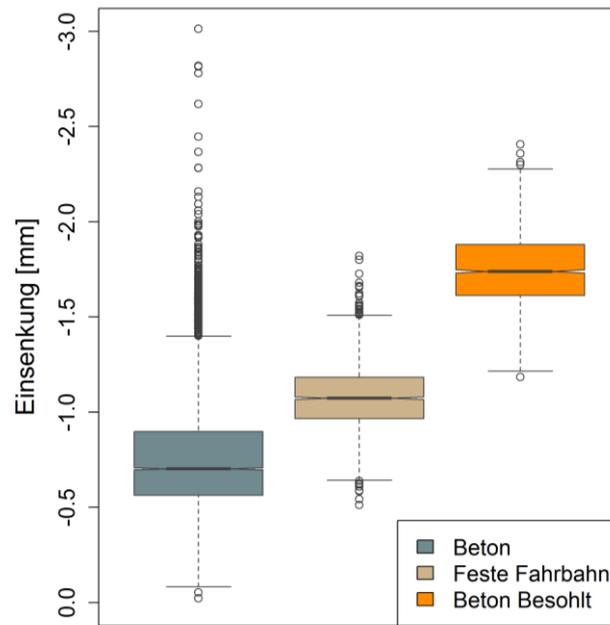


Abbildung 32: Einsenkung der unterschiedlichen Oberbauformen

4 Validierungsprozess der eingeführten Analysemethoden

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendeten Formen der Zustandserfassung unterscheiden sich, wie in Kapitel 3 erläutert, grundlegend hinsichtlich der dahinterstehenden Messmethoden. Neben Lagemessungen mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmern bzw. Sehnemessverfahren (Gleismesswagen) werden auch geophysikalische Messsysteme (Georadar), geometrische Relativmessungen (Einsenkungsmesswagen) sowie eine direkte Penetration des Unterbaus (Drucksondierung) thematisiert. Dementsprechend leitet sich daraus folgende Fragestellung ab, welche im Folgenden untersucht werden soll:

- I Sind die einzelnen Methoden der Zustandserfassung in der Lage die jeweils bewerteten Parameter in ihrer Beschaffenheit zu beschreiben?

Diese Frage soll im Rahmen des hier durchgeführten Validierungsprozesses beantwortet werden. Hierfür werden einerseits netzweite Analysen (Eingangsdaten über eine Länge >100 km) als auch abschnittspezifische Untersuchungen sowie Vergleiche mit anderen Messsystemen (Eingangsdaten über eine Länge <100 km) durchgeführt. Die herkömmliche, vertikale Gleislageanalyse (siehe 3.1.1.3), spielt dabei eine vergleichsweise untergeordnete Rolle, da deren Verhalten bereits im Rahmen mehrerer Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen [Hummitzsch 2009; Holzfeind 2009; Hansmann 2015; Esveld 2001; Auer 2004; Audley & Andrews 2013] in unterschiedlichsten Ausprägungen erforscht und erfolgreich validiert werden konnte.

4.1 Netzweiter Validierungsprozess und Trendanalysen

Die netzweiten Untersuchungen beinhalten größtenteils stochastische Analysen, wobei versucht wird, den Einfluss einzelner Parameter und Randbedingungen auf das netzweite Verhalten der Analysemethoden zur Zustandsbeschreibung zu erläutern. Dabei handelt es sich um zeitliche Trendanalysen und einen Zustandsvergleich verschiedener Erfassungsmethoden vor bzw. nach Erneuerungsmaßnahmen. Diese sollen Aufschluss darüber geben, ob die untersuchten Parameter dem erwartbaren Verhalten entsprechen und demzufolge in der Lage sind, das Verhalten zu beschreiben.

4.1.1 Der Einfluss unterschiedlicher Schwellentypen

Unterschiedliche Oberbauformen beeinflussen das Fahrwegverhalten und insbesondere auch Verschleißerscheinungen in Schotterbett und Unterbau. Im Streckennetz der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) verfügt der maßgebliche Anteil über einen Betonschwellenoberbau (Abbildung 6), welcher seit den 1970er Jahren dominierend eingebaut wurde.

Innerhalb der letzten 15 Jahre hat die Anwendung der besohnten Betonschwelle jedoch einen massiven Umbruch bewirkt (siehe 2.3). Die plastischen Eigenschaften der Schwellenbesohlungen erlauben eine kontinuierlichere Lastableitung der Kräfte in das Schotterbett. Verursacht wird dies durch eine Vergrößerung der Kontaktfläche und eine deutliche Reduktion der Pressungen auf die anstehende Schotterlage [Freudenstein, et al. 2011; Berghold 2016].

Diese Änderung der Oberbaustrategie gilt es zu berücksichtigen, wenn man das Qualitätsverhalten der verschiedenen Schwellentypen hinsichtlich der Fraktalanalyse sowie der Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS) untersucht.

Betrachtet man nun die Parameter der Fraktalanalyse hinsichtlich der unterschiedlichen Wellenlängenbereiche (Abbildung 33), so zeigt sich in sämtlichen Bereichen das angesprochene gute Qualitätsverhalten der besohnten Betonschwellen. Im kurzwelligen Bereich kann man ein nahezu gleiches Verhalten der Holz- sowie Betonschwellen erkennen. Dies begründet sich darin, dass aufgrund der vergleichbaren Altersstruktur (Abbildung 8) auch ein dementsprechend vergleichbarer Verschleiß in diesem Wellenlängenbereich vorzufinden wird. Während die erhöhten Werte der Betonschwelle auf eine nicht mehr adäquate Interaktion zwischen Schwelle und Schotter sowie verschlissene Zwischenlagen hindeuten, werden die Holzschwellen vom Einpressen der Rippenplatte in die Schwellensubstanz dominiert.

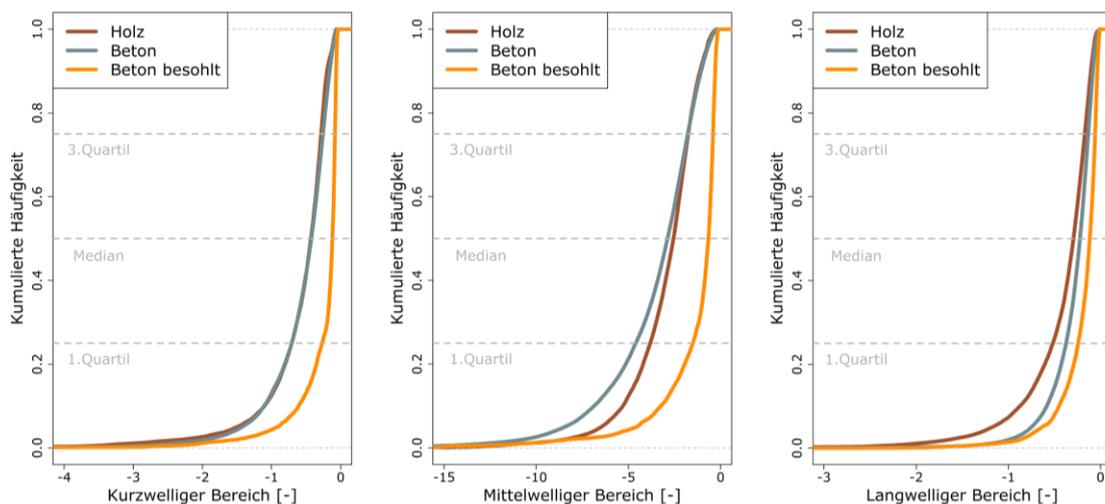


Abbildung 33: Schwellenspezifische Ausprägung Fraktalanalyse

Der mittelwellige Fraktalbereich (Abbildung 33) hingegen weist eindeutig der Betonschwelle den schlechtesten Zustand zu. Dies lässt sich dadurch beschreiben, dass die Betonschwelle aufgrund ihrer geringen Elastizität vor allem am Ende der Nutzungsdauer in Form einer Schlagbelastung auf das Schotterbett einwirkt. Aus diesem Grund ergibt sich

ein erheblich größerer Schotterverschleiß, als dies bei anderen Schwellentypen der Fall ist [Berghold 2016]. Der langwellige fraktale Bereich, welcher den Zustand des Unterbaus repräsentiert, zeigt den schlechtesten Zustand bei Holzschwellengleisen, gefolgt von den Betonschwellengleisen. Letztere weisen aufgrund ihres hohen mittleren Alters sowie deren Gewicht nachvollziehbarerweise keinen optimalen Unterbauzustand auf. Der Umstand allerdings, dass Holzschwellen trotz ihres geringeren Gewichts und der erhöhten Elastizität einen schlechteren Zustand aufweisen, verwundert jedoch – selbst, wenn das mittlere Alter hier einen höheren Wert annimmt (Abbildung 8). Dies lässt sich allerdings mit Hilfe von zwei Rahmenbedingungen erläutern: (1) Holzschwellen werden im Streckennetz der ÖBB heutzutage neben ihrem vorschriftsmäßigen Einsatz (Stoßlückengleis und in Tunnelbereichen mit Schotteroberbau) vor allen Dingen in Gleisabschnitten mit stark wechselndem Tragfähigkeitsverhalten und bzw. oder zu geringer Schotterbettstärke eingesetzt – oftmals auf Bergstrecken. (2) Darüber hinaus wurden allein zwischen den Jahren 1993 und 2007 in Kombination mit dem Einbau von Betonschwellen rund 550 km Untergrund saniert [Auer, et al. 2007]. Diese beiden Umstände bedingen zwangsläufig, dass Holzschwellen oftmals in Bereichen schlechten Unterbauzustands eingebaut werden, währenddessen Betonschwellen – falls nötig – kombiniert mit einem Tragschichteinbau verlegt werden. Somit lassen sich auch die etwas höheren Werte des langwelligen fraktalen Bereichs bei Holzschwellen erklären.

Betrachtet man den Einfluss der unterschiedlichen Schwellentypen auf die modifizierte Standardabweichung der Spur (SigModS), so zeigt sich eine eindeutige Divergenz zwischen Beton- und Holzschwellen (Abbildung 34). Erstere weisen aufgrund ihres steiferen Gesamtsystems ein geringeres Rauschen des Spursignals auf. Dabei verhalten sich besohlte Betonschwellen besser als unbesohlte. Der hier behandelte Parameter bezieht sich vordergründig auf das Zusammenwirken zwischen Schwelle, Zwischenlage und Schienenbefestigung. In den letzten Jahren wurde in Österreich besonders hinsichtlich der Zwischenlagen auf weichere Elemente gesetzt, um das Gesamtsystem elastischer auszubilden. Dies bezieht sich jedoch auf besohlte ebenso wie auf unbesohlte Betonschwellen, weswegen die Differenz in der Summenhäufigkeit insbesondere mit der unterschiedlichen Altersverteilung begründet werden kann (Abbildung 8).

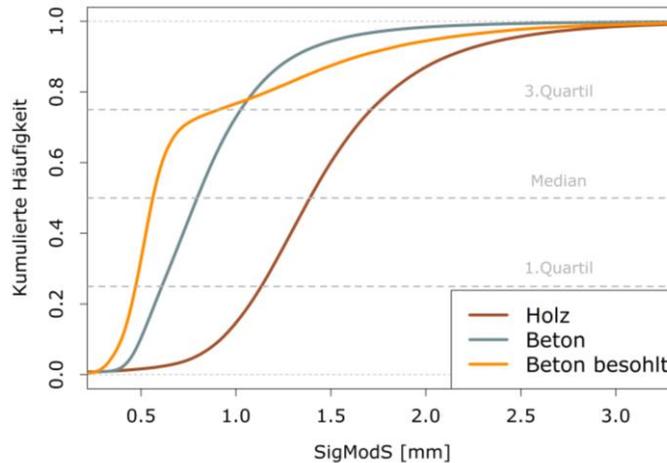


Abbildung 34: Schwellenspezifische Ausprägung SigModS

Die Holzschwellen weisen im Gegensatz zu den Betonschwellen einen bedeutend schlechteren Zustand nach SigModS auf (Abbildung 34). Ein Umstand, der sich über den unterschiedlichen Komponentenaufbau unschwer erklären lässt. Während zwischen Betonschwelle und Schiene lediglich die Zwischenlage für ein elastisches Verhalten sorgt, interagiert das System der Holzschwellen prinzipiell elastischer.

Zusammenfassend kann also statuiert werden, dass sich das Verhalten der unterschiedlichen Schwellentypen sowohl im Rahmen der Fraktalanalyse als auch der Standardabweichung der modifizierten Spur (SigModS) als vollkommen nachvollziehbar erweist.

4.1.2 Globales Verhalten über die Gleisnutzungsdauer

Um die Frage zu beantworten, ob die vorgestellten Analysemethoden in der Lage sind, den realen Fahrwegzustand zu beschreiben, ist es essentiell, deren zeitliches Verhalten zu beobachten. Eine derartige Betrachtung soll jedoch nicht nur die Gleisliegedauer, sondern auch die Belastung der einzelnen Gleisabschnitte berücksichtigen. Demzufolge wird das zeitliche Verhalten nicht über Jahre, sondern als kumulierte Belastung (siehe 2.2) ausgewertet. Diese wird jedem Querschnitt innerhalb der Datenbank (siehe 2.2) zugeordnet, weswegen eine Trendanalyse über die gesamte Nutzungsdauer eines Gleises ermöglicht wird, obgleich die Datenbank Mess- sowie Qualitätssignale der letzten 15 Jahre beinhaltet. Es gilt daher zu bedenken, dass es sich nicht um eine durchgehende zeitliche Analyse desselben Querschnitts handelt, sondern jüngere Querschnitte die niedrigeren und ältere Querschnitte die höheren Werte der kumulierten Belastung repräsentieren.

4.1.2.1 Fraktalanalyse

Die Fraktalanalyse ermöglicht es, Irregularitäten der Gleislage in wellenlängenspezifische Anteile zu unterscheiden (siehe 3.1.2). Dabei wurde die These formuliert, dass die kurzwellige Dimension einen Aufschluss über den Schwellenzustand bzw. die Interaktion zwischen Schwelle und Schotterbett geben könnte. Die mittelwellige bzw. langwellige Dimension soll in der Lage sein, die Schotterverschmutzung bzw. den Unterbauzustand zu quantifizieren. Letzterer – sofern adäquat beurteilt – müsste einer verhältnismäßig geringen Verschlechterung über die Nutzungsdauer unterliegen. Dies erklärt sich einerseits dadurch, dass bei vorteilhaften geotechnischen Bedingungen die Gleisanlage verschleißt ohne dabei die Unterbauqualität zu beeinflussen. Andererseits wird bei nicht ausreichender Tragfähigkeit versucht, den Unterbau nachhaltig – also für mehr als eine Gleisnutzungsdauer – zu sanieren, während die darüber liegenden Komponenten einem stärkeren direkten Verschleiß ausgesetzt sind und somit die Nutzungsdauer begrenzen. Dementsprechend wird eine maßgebliche Verschlechterung im langwelligen Bereich eher auf Abschnitten mit schlechten Untergrundverhältnissen zu finden sein, welche (noch) nicht saniert wurden oder nur schwer sanierbar sind. Diese erwartbaren Effekte werden in Abbildung 35 ersichtlich, wonach die kurz- und mittelwellige Dimension einer signifikanten Verschlechterung über die kumulierte Belastung unterliegt. Sichtbar wird diese anhand der Aneinanderreihung der Boxplots, welche jeweils einen Wertebereich von 25 Mio. kumulierten Tonnen Belastung darstellen. Die langwellige Dimension hingegen zeigt einen Anstieg zu Beginn der kumulierten Belastung und danach einen nahezu konstanten zeitlichen Verlauf.

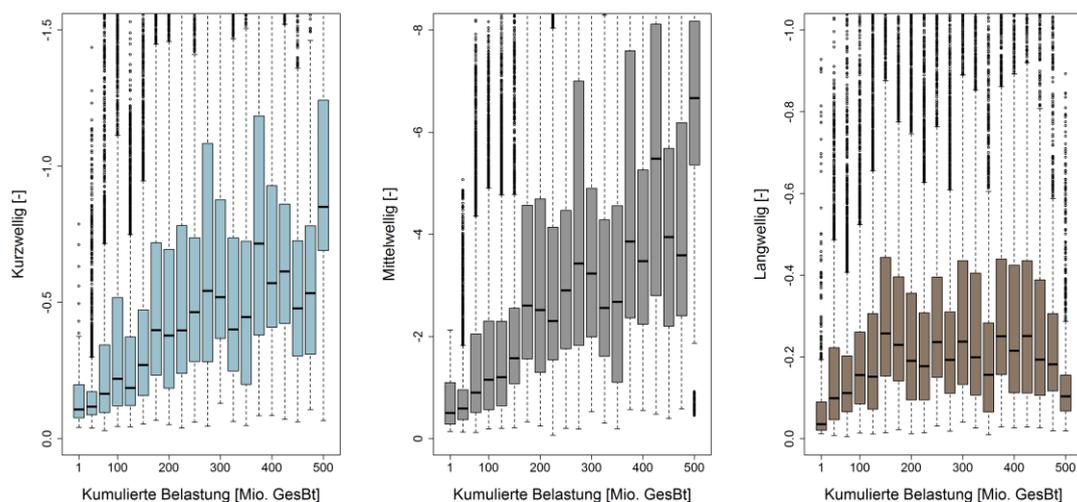


Abbildung 35: Fraktalanalyse zu kumulierter Belastung

Betrachtet man die langwellige Dimension jedoch im Rahmen einer schwelenspezifischen Auswertung (Abbildung 36), zeigt sich ein stark divergierendes Verhalten der verschiedenen Oberbautypen, welche durch die verschiedenen Glättungskurven repräsentiert werden. Diese sogenannten *Splines* ergeben sich durch stückweise definierte Polynomfunktionen mit einem Glättungsfaktor von 0,8. Im Hintergrund sind die Boxplots ohne eine Unterscheidung in die spezifischen Oberbautypen ersichtlich, um eine bessere Vergleichbarkeit zu Abbildung 35 darzustellen.

Die in der Netzverteilung mit rund zwei Drittel dominierende Betonschwelle verfügt über den bereits erläuterten konstanten Verlauf hinsichtlich der langwelligen Dimension. Die Holzschwelle hingegen weisen eine signifikante Verschlechterung auf – ähnlich zu jenen der kurz- und mittelwelligen Dimension. Dies kann wiederum darin begründet werden, dass Holzschwellen heutzutage vordergründig auf Bergstrecken sowie Abschnitten mit äußerst heterogenem Tragfähigkeitsverhalten und bzw. oder zu geringer Schotterbettstärke eingebaut werden. Dementsprechend startet der Fraktalwert der langwelligen Dimension bereits auf einem verhältnismäßig hohen Niveau und verschlechtert sich kontinuierlich mit den zunehmenden Irregularitäten im Längshöhensignal der Gleislage. Den deutlich besten Zustand hinsichtlich des langwelligen Fraktalwerts weist – wie vermutet – die neueste Technologie der besohnten Betonschwellen auf. Die Analysen hinsichtlich dieser Oberbaukonstruktion können jedoch zum jetzigen Zeitpunkt naturgemäß nur für die erste Hälfte der erwarteten Nutzungsdauer betrachtet werden, da ein flächendeckender Einbau erst seit 2005 durchgeführt wird.

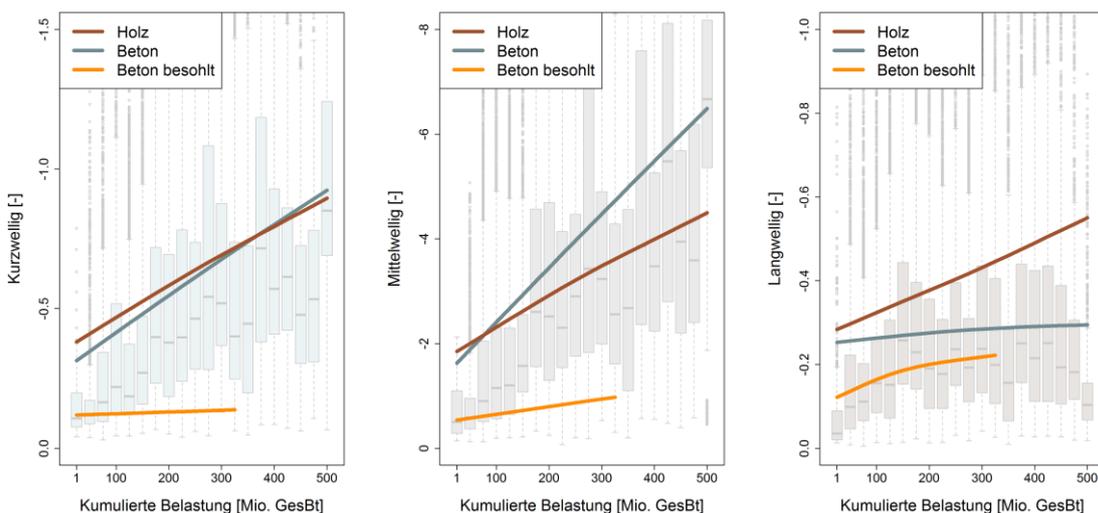


Abbildung 36: Fraktalanalyse zu kumulierter Belastung, schwelenspezifisch

Der ausgezeichnete Zustand der Abschnitte mit besohnten Betonschwellen wird ebenso sowohl im kurz- als auch im mittelwelligen Bereich ersichtlich (Abbildung 36). Dies

verwundert kaum, da durch die ins System eingebrachte Elastizität auch die Beanspruchung des gesamten Schotterbetts vermindert werden kann. Daher zeigt sich in der mittelwelligen fraktalen Dimension nicht nur eine verbesserte Anfangsqualität, sondern auch eine signifikant verringerte Verschlechterungsrate im Vergleich zu den übrigen betrachteten Oberbauformen. Hierbei zeigt sich vor allem die vergleichsweise hohe Belastung des Schotterbetts durch die konventionelle Betonschwelle, welche den schlechtesten Zustand laut mittelwelligen Fraktalwert aufweist. Dies wird verstärkt durch den angesprochenen Umstand, dass die Holzschwelle vor allem bei herausfordernden, zum Teil schwierigen, Randbedingungen eingebaut wird. Nichtsdestotrotz bedingt die Elastizität – und die damit verbundene Flächenvergrößerung bei der Kraftübertragung – der Holzschwelle einen niedrigeren Verschleiß des Schotterbetts, ergo eine geringere Schotterverschmutzung.

Der Einsatz von elastischen Schwellenbesohlungen führt insbesondere zu einer deutlichen Reduktion der Kontaktspannungen zwischen der Schwelle und der obersten Schotterlage [Freudenstein, et al. 2011], womit die guten kurzwelligen Fraktalwerte zu erklären sind. Dieser Umstand wird sicher auch dadurch bedingt, dass diese Oberbauform auf Österreichs bedeutendsten Strecken zum Einsatz kommt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass es sich auch um hochentwickelte sowie spezifisch aufeinander abgestimmte Komponenten bei Schienenbefestigungen, Zwischenlagen o.ä. handelt. Da die kurzwellige fraktale Dimension, wie bereits erläutert, eben jenen Wirkungsbereich beschreiben sollte, kann der erkennbare Zustand sicherlich nicht ausschließlich der elastischen Schwellensohle zugeordnet werden.

Dass die Holzschwelle einen der konventionellen Betonschwelle ähnlichen Zustand aufweist, kann dem Effekt zugeordnet werden, dass Holzschwellen dazu tendieren, über die Ausweitung der Befestigungslöcher und Risse in der Schwelle den nötigen Kraftschluss nicht mehr sicherstellen zu können. Das Einpressen der Rippenplatten in die Schwellensubstanz trägt zusätzlich dazu bei [Schultheiß & Schulz 1985].

Die Qualitätssignale der kurz- und mittelwelligen fraktalen Dimension zeigen dementsprechend gegenüber der langwelligen Dimension eine höhere Verschlechterungsrate im Laufe einer Gleisnutzungsdauer. Dies bestätigt eben jene Annahme, dass sich Verschleißerscheinungen innerhalb der Komponenten Schwelle und Schotter stärker ausprägen als im Unterbau. Hinsichtlich der beurteilten Komponenten weist die Oberbauform der elastisch besohlenen Betonschwelle den besten Zustand auf. Bei der konventionellen Betonschwelle hingegen manifestiert sich insbesondere im Rahmen der mittelwelligen fraktalen Dimension ein vergleichsweise schlechter Zustand, was auf die suboptimale Interaktion zwischen Schotter und Schwelle zurückgeführt werden kann.

4.1.2.2 SigModS – Standardabweichung der modifizierten Spur

Die Zustandsbeschreibung der Schwelle bzw. der Interaktion zwischen Schiene und Schwelle erfolgt über die Berechnung der gleitenden Standardabweichung eines tiefpassgefilterten Spurweitesignals (siehe 3.1.3), genannt SigModS. Ähnlich zur Fraktalanalyse soll auch hier das zeitliche Zustandsverhalten unter Berücksichtigung der kumulierten Belastung (siehe 2.2) untersucht werden, wobei eine simple lineare Regression der Medianwerte verwendet wird, welche sich jeweils auf einen Bereich von 25 Mio. kumulierte Tonnen Belastung beziehen. Dabei zeigt sich eine kontinuierliche Verschlechterung des Signals bei zunehmender Lasteinbringung (Abbildung 37, links).

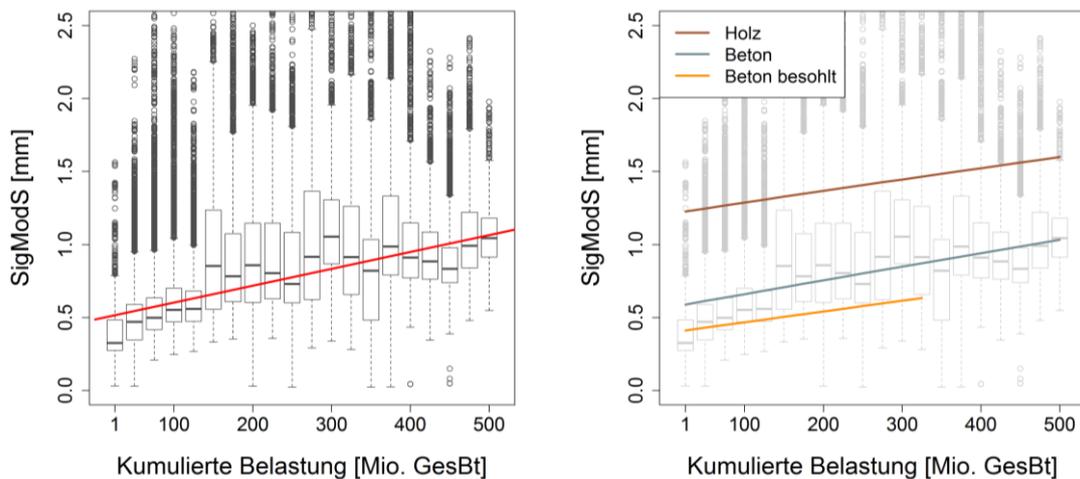


Abbildung 37: SigModS zu kumulierter Belastung, schwellenspezifisch

Betrachtet man das Verhalten der spezifischen Oberbauformen (Abbildung 37, rechts) kommen bei Holzschwellengleisen die eindeutig höchsten Werte zum Vorschein. Das damit nachgewiesene geringere Rauschen des Signals bei Betonschwellen kann mit deren widerstandsfähigeren Materialeigenschaften gegenüber eingebrachten Lasten begründet werden. Dadurch kann ein adäquater Kraftschluss zwischen Schwellenschraube und Schwelle sichergestellt und – sofern die Zwischenlagen rechtzeitig getauscht werden – eine nachhaltige Schädigung des Schienenaufagers verhindert werden. Die besohlte Betonschwelle zeigt dabei zur konventionellen Betonschwelle ähnliche Verhaltensmuster, da der Einfluss der elastischen Schwellensole auf das Zusammenwirken zwischen Schiene, Schienenbefestigung und Schwelle eine vergleichsweise untergeordnete Rolle annimmt.

4.1.3 Ein- und Ausbauqualität

Eine Sanierungs- bzw. Erneuerungsmaßnahme führt bei jeder beliebigen Anlage zu einer Verbesserung des Urzustands – sofern sie adäquat durchgeführt wurde. Natürlich

besitzt diese Annahme auch für die Anlage Gleis ihre Gültigkeit. Eine Gleisneulage beschreibt in Österreich nahezu ausschließlich eine Erneuerung sämtlicher Komponenten des Fahrwegs von der Schiene bis zum Schotterbett. Darüber hinaus wird eine Untergrundsanierung (USan) durchgeführt, wenn die Tragfähigkeit des anstehenden Bodens nicht in ausreichendem Maß gewährleistet werden kann.

Dementsprechend müssen auch zustandsbeschreibende Mess- und Qualitätssignale diesen qualitativen Unterschied erkennen können, um eine Rechtfertigung als Werkzeug zur Zustandsbeschreibung zu besitzen. Die folgenden Auswertungen beziehen sich dabei auf die Aussagen der Georadarbefahrung sowie der Fraktalanalyse, da eine dementsprechende Untersuchung für die Standardabweichung der modifizierten Spur bereits erfolgreich durchgeführt werden konnte [Hansmann 2015].

4.1.3.1 Fraktalanalyse der vertikalen Gleisgeometrie

Die Beurteilung der Auswirkung von Erneuerungsmaßnahmen bezieht sich dabei nicht ausschließlich auf den letzten vor bzw. den ersten Wert nach einer Neulage, da mit dieser Methodik die notwendige Robustheit gegenüber etwaigen Messausreißern nicht gewährleistet werden kann. Demzufolge wird jeweils der Mittelwert aller Messungen ein Jahr vor bzw. ein Jahr nach der Neulage gegenübergestellt.

Dabei zeigt sich, dass sowohl die Fraktalwerte des kurz- als auch mittelwelligen Bereichs, wie erwartet, einer durch die Neulage verursachten signifikanten Verbesserung unterliegen (Abbildung 38). Es verbessert sich dabei nicht nur der Medianwert, sondern insbesondere auch die Streuung der Werte, wodurch den Neulagenbereichen eine homogene Qualitätssteigerung bescheinigt werden kann. Die Relation der Verbesserung zeigt sich dabei in beiden Wellenlängenbereichen nahezu ident. Dies spiegelt den Komplettersatz der durch jene Qualitätssignale beschriebenen Komponenten wider.

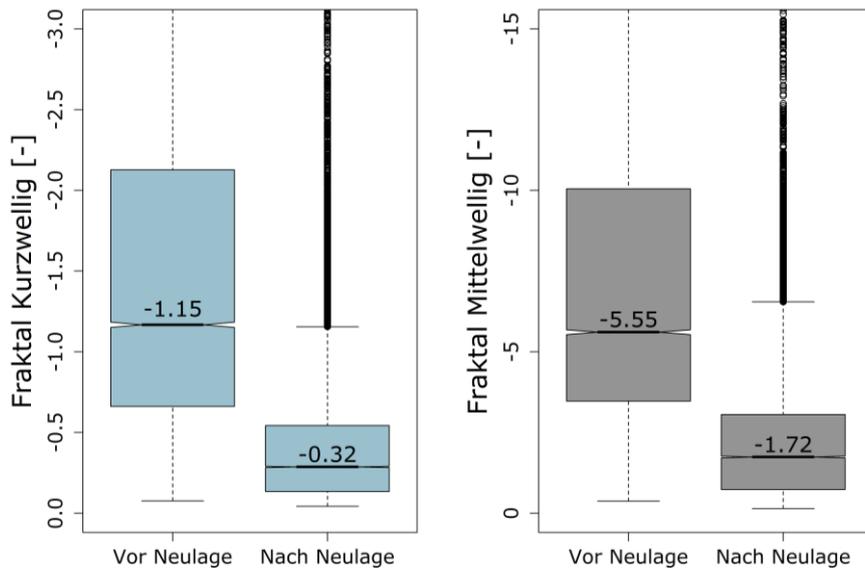


Abbildung 38: Fraktal kurz- und mittelwellig vor und nach Gleisneulage

Eine in gewisser Weise divergierende Ausgangslage stellt sich für den langwelligen fraktalen Bereich und die damit beschriebene Unterbauqualität dar. In vielen Fällen wird der Unterbau nicht explizit behandelt, wenngleich auch im Rahmen einer Schotterbettreinigung die verschmutzte Übergangsschicht zwischen Schotter und Unterbau entnommen und ein adäquates Gleisplanum (wieder-)hergestellt wird. Die langwellige fraktale Dimension wird neben der Tragfähigkeit des anstehenden Bodens auch vor allem durch den Zustand bzw. den Verschmutzungsgrad eben jener Übergangsschicht beeinflusst. Daher sollte im Rahmen jeder Gleisneulage eine Verbesserung innerhalb dieses Qualitätssignals sichtbar werden. Die Vermutung besteht jedoch, dass die Qualitätssteigerung ein größeres Ausmaß annimmt, wenn im Rahmen der Gleisneulage auch eine Untergrundsanie rung (USan) exerziert wurde. Dementsprechend bezieht sich die Analyse der Aus- bzw. Einbauqualität in diesem speziellen Fall der langwelligen Dimension nicht nur auf eine allgemeine Gleisneulage. Es wird vielmehr in die Aus- und Einbauqualität bei Gleisneulagen mit bzw. ohne Untergrundsanie rung unterschieden. Dabei zeigt sich, dass die Ausbauqualität einen signifikant schlechteren Zustand aufweist, wenn im Rahmen der Gleisneulage zusätzlich auch eine Rehabilitation der darunter liegenden Bodenschicht durchgeführt wurde (Abbildung 39). Dies bestätigt einerseits die adäquate Funktionsweise dieser Analyse methode und andererseits die Entscheidung der Anlagenverantwortlichen, in diesen Bereichen eine Untergrundsanie rung durchzuführen.

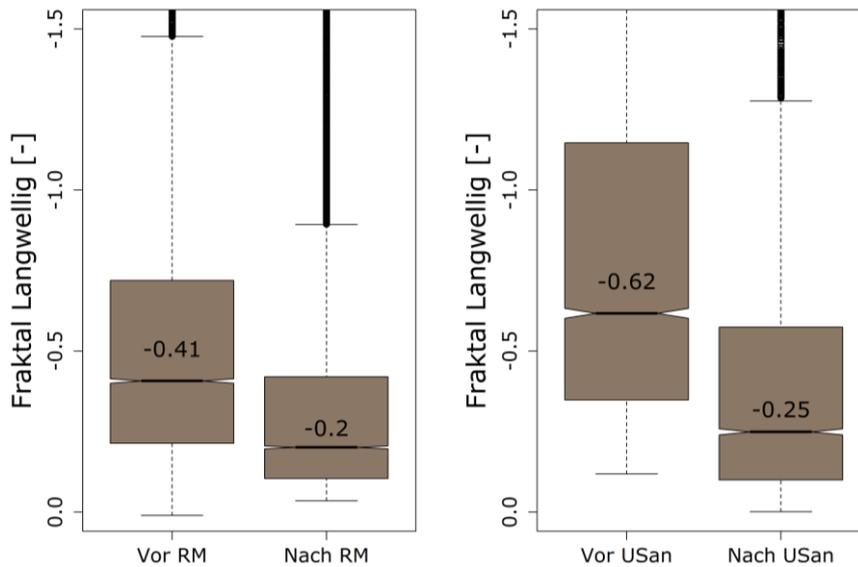


Abbildung 39: Fraktal Langwellig vor und nach Schotterbettreinigung bzw. Untergrundsanie rung

Ein – wenn auch geringerer – Unterschied zwischen den beiden Ausführungsmethoden der Fahrbahnerneuerung manifestiert sich auch in der ersichtlichen Einbauqualität nach Durchführung der Maßnahme (Abbildung 39). Nach einer Schotterbettreinigung wird nicht nur eine etwas bessere Einbauqualität, sondern auch eine geringere Streuung jener ersichtlich. Dies liegt einerseits daran, dass Streckenbereiche, welche keiner Unterbausanie rung unterzogen werden müssen, bereits über einen dementsprechend tragfähigen gewachsenen Boden verfügen. Diese natürlich vorhandenen, für den Eisenbahnverkehr wünschenswerten Bodenarten weisen in den überwiegenden Fällen hervorragende Verformungsmoduln auf. Andererseits konnte nachgewiesen werden, dass sich durch Umlagerungseffekte die Tragfähigkeit am Gleisplanum vom Tragschichteinbau bis 2000 Tage danach bis zu einem Faktor 2,0 verbessert [Auer, et al. 2007]. Dementsprechend stellt eine Untergrundsanie rung eine nachhaltige Verbesserung der Tragfähigkeit dar, deren volle Wirkung auch in der Gleislage eher nicht bereits sofort nach Einbau ersichtlich wird [Vidovic 2016].

Nichtsdestotrotz kann eine erhöhte relative Verbesserung attestiert werden, wenn im Rahmen der Gleisneulage nicht nur eine Schotterbettreinigung (Verbesserung Faktor 2,0), sondern auch eine Untergrundsanie rung (Faktor 2,5) durchgeführt wurde.

4.1.3.2 Georadar

Im Folgenden sollen auch die Auswertungen des Georadars hinsichtlich ihrer Ein- und Ausbauqualität untersucht werden. Da es sich bei dieser Analysemethodik (siehe 3.2) sowohl um den Schotter als auch den Unterbau beschreibende Parameter handelt, ist auch in diesem Fall essentiell, die Information der Ausführungsart (mit oder ohne Untergrundsanierung) nicht zu vernachlässigen. Die vorhandenen Unterbausanierungen wurden in den mehrheitlichen Fällen vor dem Gros der Georadarbefahrungen in den Jahren 2012 bis 2015 durchgeführt. Es gibt aber auch Querschnitte, welche eine Unterbausanierung erfuhren, nachdem die Analyse durch das Georadar erstellt wurde. Somit ist es möglich zu analysieren, ob die zu sanierenden Streckenbereiche einen schlechteren Zustand laut Georadar aufweisen als jene, deren Unterbau bereits saniert wurde. Es ist jedoch – im Gegensatz zur Fraktalanalyse – nicht möglich, die Ein- und Ausbauqualität ein und desselben Querschnitts zu betrachten. Dies ergibt sich, da lediglich ein vergleichsweise kurzer Streckenabschnitt (rund 50 km) einer zweifachen Georadarbefahrung unterzogen wurde, welcher im Rahmen dieser Arbeit noch eingehend behandelt wird (siehe 4.2.1). Als Einschränkung wurde festgelegt, dass jeder Querschnitt, welcher im Folgenden eine Ein- oder Ausbauqualität repräsentiert, maximal ein Jahr vor bzw. nach der Gleisneulage einer Georadarbefahrung unterzogen wurde. Eine Beeinflussung der tendenziellen Grundaussagen hinsichtlich der Ein- und Ausbauqualität kann dennoch ausgeschlossen werden.

Sofern bei einer Gleisneulage auf eine Untergrundsanierung verzichtet wurde, sollte sich der Zustand des Gleiskörpers vor einer Reinvestition besser darstellen, als wenn eine Untergrundsanierung als notwendig erachtet wurde. Abbildung 40 bestätigt diese Annahme, dass sowohl die Zwischenschicht als auch das Schotterbett über deutlich weniger Feuchtigkeit verfügen, wenn im Rahmen der Projektplanung eine Schotterbettreinigung als ausreichend erachtet wurde.

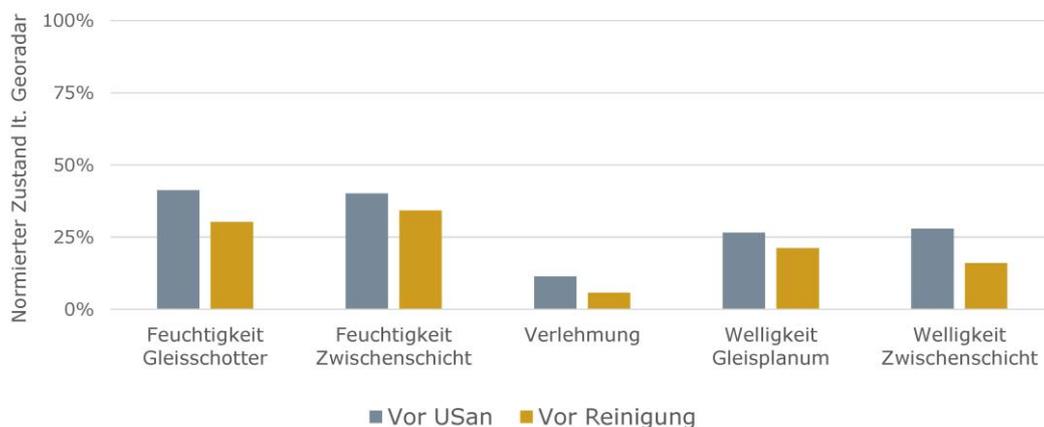


Abbildung 40: Georadar vor Neulage: Unterbausanieret vs. Schotterbettgereinigt

Ein ähnliches Bild zeigt sich hinsichtlich der Welligkeit sowie der Verlehmung. Wurde von den geotechnischen Experten eine Untergrundsanie rung empfohlen, so zeigt das Georadar vor Durchführung der Sanierungsmaßnahmen eine höhere Anzahl an Verlehmungen, Welligkeit am Gleisplanum sowie in der Zwischenschicht für diese Bereiche.

Ein Überblick der Parameter hinsichtlich Feuchtigkeit zeigt etwas unterschiedliche Verhaltensmuster nach und vor einer Untergrundsanie rung (Abbildung 41). Die Feuchtigkeit der Zwischenschicht, aber vor allen Dingen die Feuchtigkeit des Gleisschotter zeigt die positiven Auswirkungen einer Untergrundsanie rung (USan) bzw. einer durchgeführten Gleisneulage auf die Feuchtigkeit im Gleiskörper. Dieser Umstand kann als eindeutiges Indiz einer funktionierenden Beschreibung des Gleiskörpers durch das Georadar angesehen werden. Die Verringerung des Feuchtigkeitsgehalts nimmt jedoch im Rahmen des Gleisschotter weit höhere Ausmaße an als in der Zwischenschicht. Der Grund dafür liegt sicherlich zum Großteil darin, dass die Komponente Schotter im Rahmen einer Neulage mit Untergrundsanie rung vollständig ersetzt, während die Zwischenschicht verbessert bzw. mit altbrauchbaren Stoffen (Recyclingschotter) versehen wird. Darüber hinaus wird die Tragschicht bereits mit einem spezifischen Wassergehalt von optimal 7,4 % eingebaut [Schilder & Piereder 2000].

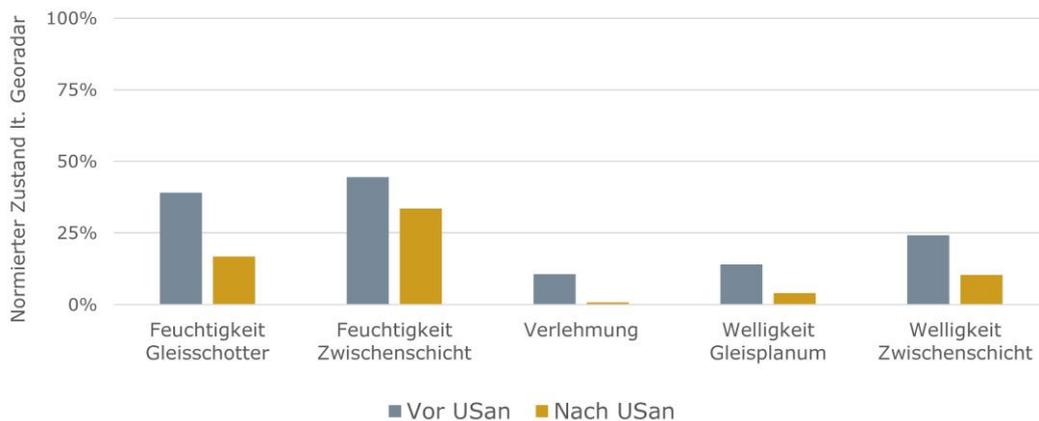


Abbildung 41: Zustand laut Georadar vor und nach Gleisneulage mit Unterbausanie rung

Einen essentiellen Parameter des Unterbaus stellt der Parameter *Verlehmung* dar. Dieser zeigt, dass die Analysen des Georadars bzw. die Durchführung der Untergrundsanie rung als effektiv beurteilt werden können. Während vor AHM-Einsätzen (in Österreich verwendete Unterbausanie rungsmaschine) durchaus basale bzw. starke Verlehmungen detektiert werden konnten, war die getätigte Maßnahme in der Lage diese nahezu gänzlich zu entfernen.

4.1.4 Der Einfluss von Wasser im Gleiskörper

Einer der essentiellen Vorteile der Fahrwegbeurteilung mittels Georadar (siehe 3.2) besteht darin, dass diese Methodik dazu fähig ist, Wassermoleküle in den einzelnen Schichten zu detektieren. Dementsprechend kann auf den Entwässerungszustand des Fahrwegs rückgeschlossen werden, da ein als *feucht* ausgewiesenes Schotterbett bzw. eine als *feucht* ausgewiesene Zwischenschicht eindeutig einen inadäquaten Entwässerungszustand beschreibt. In diesem Fall werden die hinsichtlich der Entwässerung vorhandenen Zustandsbeurteilungen des Schotterbetts sowie der Zwischenschicht verknüpft. Anschließend werden Querschnitte, welche sich im unteren Quartil befinden – ergo die „feuchtesten“ 25 % - als *schlechte Entwässerung* klassifiziert. Dementsprechend wird die Klassifizierung *gute Entwässerung* vom oberen Quartil, also den „trockensten“ 25 %, repräsentiert.

Analysiert man nun den Entwässerungszustand aus dem Georadar im Vergleich zur Fraktalanalyse (siehe 3.1.2), so zeigt sich der Vorteil, den diese spezielle Methodik der Fraktalanalyse im Gegensatz zur herkömmlichen Gleislageanalyse mit sich bringt. Es zeigt sich dabei in Abbildung 42, dass schlecht entwässerte Bereiche eine moderate Erhöhung des mittelwelligen fraktalen Bereichs erfahren (rund 15 %), während sich der langwellige Bereich eklatant vergrößert (rund 40 %). Hierbei stellen die im Streudiagramm befindlichen Punkte jeweils einen Querschnitt dar, welcher durch einen Fraktalwert der mittelwelligen sowie der langwelligen Dimension beschrieben wird. Allein aus Gründen der Schwerkraft wird ein erhöhtes Wasseraufkommen im Gleiskörper im Normalfall - so gut wie (noch) möglich - nach unten, also in die Zwischenschicht bzw. den anstehenden Boden, wandern. Dementsprechend muss aus technischer Sicht vermutet werden, dass sich ein erhöhtes Wasseraufkommen insbesondere negativ auf die Tragfähigkeit des Planums bzw. des Unterbaus auswirkt. Der überdurchschnittliche Anstieg des langwelligen fraktalen Bereichs bestätigt somit, dass dieser einen probaten Indikator für den Unterbauzustand darstellt, welcher in diesem Fall – zumindest unter anderem – durch den Wasserandrang negativ beeinflusst wird. Die bewerteten Abschnitte mit Betonschwellen weisen dabei in beiden Fällen (gute und schlechte Entwässerung) eine nahezu idente Altersstruktur (Abbildung 42, rechts) auf, weswegen hier auch jene Oberbauform als Beispiel angeführt wird. Eine Verzerrung des Ergebnisses aufgrund unterschiedlicher Altersverteilungen kann ausgeschlossen werden.

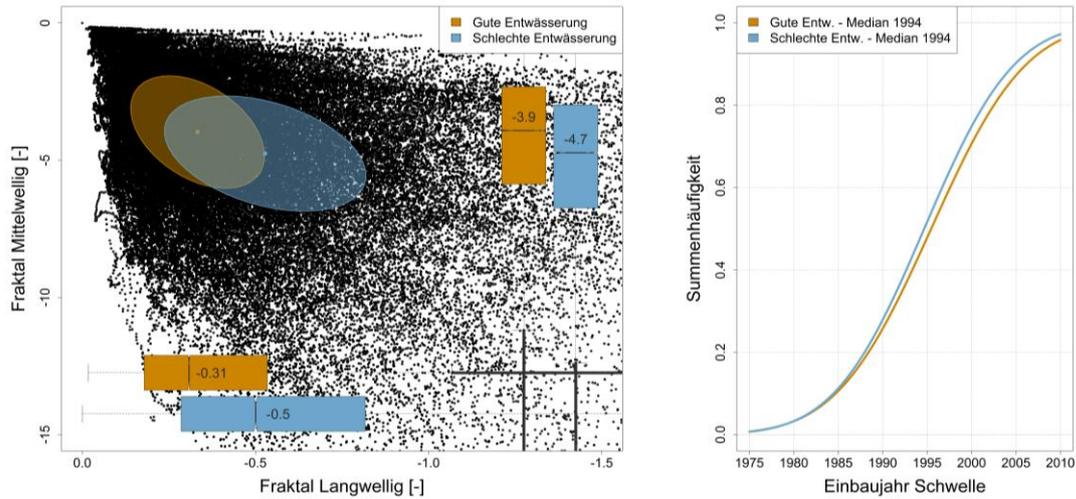


Abbildung 42: Einfluss der Entwässerung im Rahmen der Fraktalanalyse, Betonschwellen

Im Folgenden sollen die unterschiedlichen Qualitätszustände des Entwässerungsverhaltens auch mit den Ergebnissen der herkömmlichen Gleislageanalyse verglichen werden. Die Altersverteilung der Betonschwellen bleibt hierbei naturgemäß gleich, da sich auch die im Rahmen der Analyse verwendete Grundgesamtheit nicht ändert. Es zeigt sich in diesem Fall, dass sowohl die Standardabweichung der Längshöhe als auch deren Verschlechterungsrate auf den Zustand der Entwässerungsanlage reagieren (Abbildung 43). Im Gegensatz zur Fraktalanalyse prägt sich bei keinem der beiden Parameter die Korrelation signifikant stärker aus.

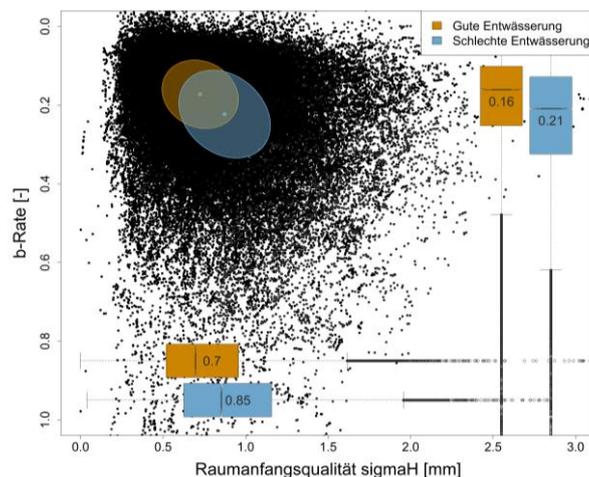


Abbildung 43: Einfluss der Entwässerung auf die Gleislage, Betonschwellen

Dementsprechend zeigt sich einerseits, welche Auswirkungen eine nicht funktionierende Entwässerungsfähigkeit des Gleiskörpers auf dessen Zustand besitzt. Andererseits

zeigt dieses Beispiels auch die Zusatzinformation, welche durch die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage gewonnen werden kann. Während die herkömmliche Gleislageanalyse die negativen Auswirkungen auf den Unterbau nur bedingt fassen kann, zeigt sich im Rahmen der Fraktalanalyse, dass der Verlust der Tragfähigkeit durch die langwellige Dimension dieser Analysemethode quantifizierbar wird.

4.2 Abschnittsspezifische Validierungen der einzelnen Messmethoden

Im Rahmen der abschnittsspezifischen Analysen werden Parameter und Erfassungsmethoden untersucht, welche aufgrund der vorhandenen Datengrundlage vorrangig auf Abschnitten kleiner als 100 km durchgeführt werden können. Des Weiteren werden die Fraktalanalyse, das Georadar sowie die Standardabweichung der modifizierten Spur (Sig-ModS) mit weiteren Methoden der geotechnischen sowie messtechnischen Fahrwegerkundung verglichen. Es konnte bereits bestätigt werden, dass die eingeführten Analysemethoden im netzweiten Vergleich plausible Ergebnisse aufzeigen. Die folgenden Auswertungen sollen erläutern, ob diese ebenfalls in der Lage sind, den abschnittsspezifischen Zustand des Fahrwegs zu beschreiben.

4.2.1 Der zeitliche Verlauf von Georadarevaluierungen

Im Jahr 2015 konnten 55 km einer Untersuchung mittels Georadar unterzogen werden, welche bereits im Jahr 2012 evaluiert wurden. Somit wurde die Möglichkeit geschaffen, die zeitliche Veränderung des Fahrwegs hinsichtlich der Georadarevaluierungen zu analysieren. Es wurde bewusst ein Streckenbereich gewählt, welcher sich durch erhebliche Qualitätsunterschiede auszeichnet, um die Trends verschiedener Qualitätsstufen abdecken zu können. Darüber hinaus verfügt der gewählte Streckenbereich auch über Abschnitte, welche zwischen 2012 und 2015 reinvestiert wurden. Daher kann die Auswirkung einer Gleisneulage auf die Evaluierungen des Georadars ebenfalls analysiert werden.

4.2.1.1 Bewertungskriterium Feuchtigkeit

Die erwartete zeitliche Veränderung über die gesamte wiederholt evaluierte Streckenlänge sollte eine kontinuierliche Verschlechterung der Parameter aufweisen. Zwar wurden Instandhaltungstätigkeiten bzw. auch Gleisneulagen in spezifischen Teilabschnitten vorgenommen, was den grundsätzlichen Trend des Gesamtabschnittes jedoch nicht beeinflussen sollte.

Betrachtet man nun die Entwicklung des Parameters Feuchtigkeit zwischen 2012 und 2015, so zeigt sich die erwartete Verschlechterung des Zustands (Abbildung 44). Man kann vor allen Dingen hinsichtlich des Parameters *Feuchtigkeit Gleisschotter* (Abbildung 44, links) eine kontinuierliche Feuchtigkeitszunahme laut Georadarevaluierung erkennen,

da sich der Maximalwert der Dichtekurve lediglich horizontal verschiebt. Der Mittelwert verändert sich dabei von 2,3 (trocken bis feucht lt. Abbildung 23) zu 3,0 (feucht). Erklären lässt sich dies vor allem dadurch, dass sich der Feinkornanteil im Schotterbett kontinuierlich erhöht. Je höher eben jener Feinkornanteil, desto mehr Wassermoleküle können sich im Schotterbett festsetzen. Dies führt letztendlich zu einer Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts. Auch in der Zwischenschicht zeigt sich eine Zunahme des Feuchtigkeitsgehalts (Abbildung 44, rechts), welche im Untersuchungszeitraum eine größere Ausprägung annimmt als im Schotterbett. Die Zwischenschicht wird im betrachteten Streckenbereich bereits als feucht bis nass (Abbildung 23) bezeichnet. Eine proportional höhere Feuchtigkeitszunahme als im Schotterbett erscheint plausibel, da die Zwischenschicht übermäßig beansprucht wird, wenn der Gleisschotter seine Entwässerungsfunktion nicht mehr adäquat wahrnehmen kann.

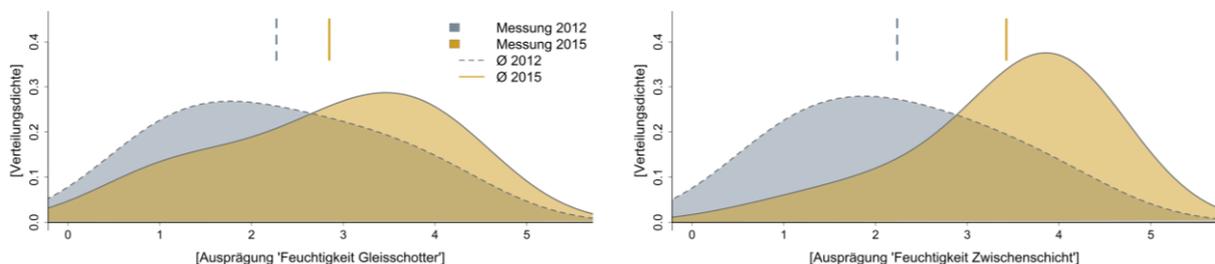


Abbildung 44: Zeitreihe Georadar Feuchtigkeit

Nichtsdestotrotz erscheint dessen Ausmaß in der Zwischenschicht doch erstaunlich. Aus diesem Grund werden die Niederschlagsmengen zweier nahegelegener Wetterstationen in der betreffenden Messwoche analysiert (Abbildung 45). Es lässt sich dabei erkennen, dass in den Tagen davor kein übermäßiger Niederschlag aufgezeichnet wurde, sehr wohl aber am Tag der Messung mäßig bis starker [Koppe & Stozek 1999] Regen in den nahegelegenen Wetterstationen sichtbar wird.

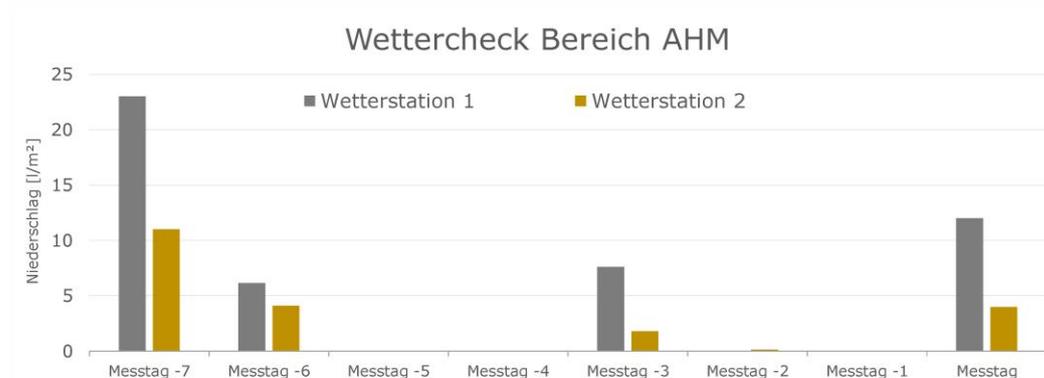


Abbildung 45: Wettercheck Georadarmessung 2015 [<http://at.wetter.com/>]

Auch die im Rahmen der Georadarbefahrung aufgenommenen Streckenbilder (Abbildung 46) deuten darauf hin, dass es kurz zuvor geregnet hat und die Strecke (siehe vor allem Betonschwellen rechts) gerade auf trocknet. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass die moderate Zunahme im Schotterbett dem realen Zustand entspricht, da dieses das Wasser bereits nach unten entwässert hat. Die Zwischenschicht scheint jedoch vom Niederschlag beeinflusst zu sein.

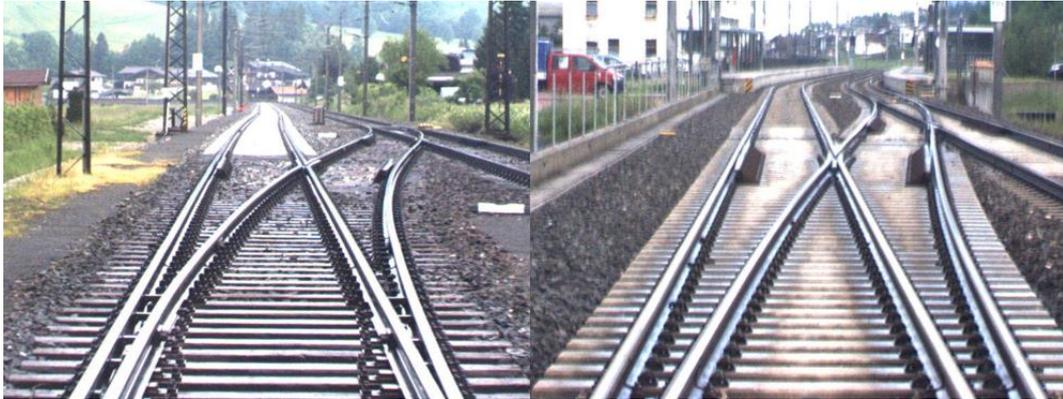


Abbildung 46: Streckenbilder zur Detektion von Niederschlag, Georadarmessung 2015

Somit muss davon ausgegangen werden, dass unmittelbar (weniger als 60 min) vor der Messung auftretender Niederschlag die Feuchtigkeitsmessung der Zwischenschicht beeinflusst. Für jene 55 km Georadarbefahrung muss dementsprechend berücksichtigt werden, dass dieser Parameter gegenüber des Realzustands leicht erhöhte Werte aufweist. Um derartige Effekte für das gesamte georadarbefahrene Netz ausschließen zu können, wird an dieser Stelle eine Überprüfung des Einflusses der Wetterverhältnisse in den einmalig befahrenen Streckenbereichen (rund 1400 Gleis-km) vorgenommen.

Exkurs: Netzweite Analyse des Wettereinflusses auf Georadarevaluierungen

Um diese Analyse vornehmen zu können, wurden für sämtliche befahrene Streckenabschnitte die Wetterdaten der betreffenden Zeiträume bei der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) angefordert. Zur Verwendung aufbereitet wurden dabei der Feuchtigkeitsgehalt sowie die Niederschlagsmenge bereits ab sieben Tage vor der Befahrung. Hinsichtlich der Luftfeuchtigkeit kann festgestellt werden, dass diese scheinbar keinen großen Einfluss auf die Georadarevaluierungen besitzt (Abbildung 47). Die erkenntlichen Auffälligkeiten lassen sich durch unterschiedliche Charakteristika der Strecken begründen. Beispielsweise zeigt Strecke 8 den höchsten Feuchtigkeitsgehalt in Schotter und Gleisplanum laut Georadarevaluierungen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass diese Strecke zu vergleichsweise großen Teilen als Bergstrecke definiert werden kann, wodurch eine schwierige Entwässerungssituation vorliegt. Strecke 14 wiederum ist über weite Teile mit

einer bituminösen Tragschicht ausgeführt, wodurch eine außergewöhnlich gute Wasserab-
leitung erreicht werden kann. In den guten Bewertungen durch das Georadar spiegelt sich
eben dieser Umstand wider.

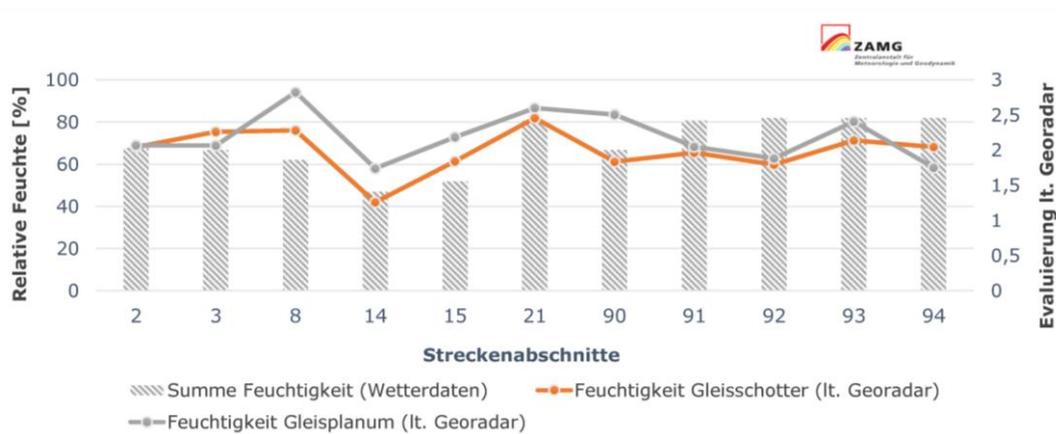


Abbildung 47: Gegenüberstellung Luftfeuchtigkeit und Georadarevaluierungen

Die gemessenen Niederschlagsmengen erweisen sich im Allgemeinen als gering (Abbildung 48), wenn man berücksichtigt, dass ein Starkregenereignis mit mehr als 4 l/m² pro Stunde definiert ist [Koppe & Stozek 1999]. Im Rahmen dieser Auswertungen weist Strecke 8 die größte Niederschlagsmenge auf, welche über sieben Tage vor der Georadarbefahrung summiert einen Wert von 1,58 l/m² besitzt. Das im Hinblick auf die Georadarmessung aktuellste Regenereignis fand auf Strecke 15 statt, an welcher es rund zwölf Stunden vor der Messfahrt regnete. Der Umstand, dass die Bewertungen des Georadars in sämtlichen Streckenbereichen einer starken - scheinbar nicht mit dem Niederschlag korrelierenden - Schwankung unterliegen, indiziert daher, dass die vorherrschenden Wetterbedingungen keinen signifikanten Einfluss auf jene Evaluierungen besitzen.

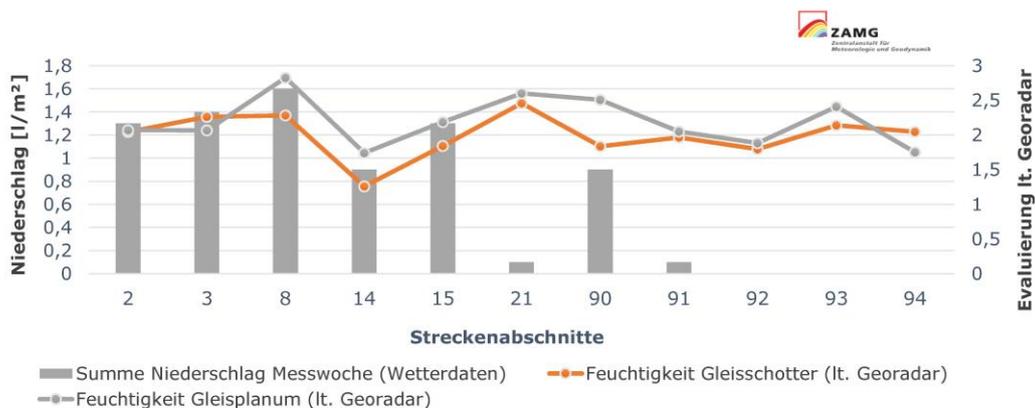


Abbildung 48: Gegenüberstellung Niederschlag in Messwoche und Georadarevaluierungen

Darüber hinaus sind die Strecken 21 und 91 bzw. 92, 93 und 94 jeweils in derselben Region und daher am selben Tag sowie bei identen Wetterverhältnissen evaluiert worden. Betrachtet man nun die Ergebnisse der Georadarbefahrung, so lässt sich erkennen, dass vor allem zwischen Strecke 21 und 91 sowie 92 und 93 signifikante Unterschiede bestehen. Dies deutet wiederum darauf hin, dass die Bewertungen des Georadars hinsichtlich Feuchtigkeit des Gleisplanums und –schotters nicht von den Wetterbedingungen abhängen.

Berücksichtigt man also sowohl die Erkenntnisse aus zuvor erläuterten Zeitreihenanalysen (Abbildung 44) als auch der durchgeführten netzweiten Analysen, so lässt sich hinsichtlich des Einflusses der Wetterverhältnisse folgende Zusammenfassung formulieren: Ein Regenereignis während bzw. kurz vor der Georadarbefahrung scheint einen geringen Einfluss auf die Feuchtigkeitsmessung im Gleisplanum zu besitzen, weswegen jene Abschnitte im Rahmen der folgenden netzweiten Korrelationsanalysen auch nicht berücksichtigt wurden. Der Feuchtigkeitsgehalt des Schotterbetts bleibt dabei scheinbar unbeeinflusst. Einem Regenereignis, welches zumindest zwölf Stunden zurückliegt, kann keinerlei Einfluss auf die Georadarevaluierungen nachgewiesen werden.

4.2.1.2 Die Bewertungskriterien Verschmutzung, Verlehmung und Welligkeit

Hinsichtlich der Verschmutzung des Gleisschotters bzw. der Verlehmung des Gleiskörpers zeigen sich divergierende Ergebnisse. Der Parameter *Verschmutzung Gleisschotter* unterliegt im Untersuchungszeitraum von drei Jahren einer maßgeblichen Verschlechterung (Abbildung 49, links). Dies unterstreicht die zuvor aufgestellte These, wonach der Feuchtigkeitsgehalt des Gleisschotters unter anderem aufgrund des erhöhten Feinkornanteils zunimmt. Ein anderes Bild zeigt der Parameter *Verlehmung*, welcher im Jahr 2015 nahezu die idente Verteilung zeigt wie drei Jahre zuvor (Abbildung 49, rechts). Anhand des Mittelwerts kann man erkennen, dass lediglich eine marginale Verschlechterung stattgefunden hat. Dies lässt sich dadurch erklären, dass eine Lehmschicht im Gleiskörper vorrangig von den bodenmechanischen Eigenschichten des betroffenen Abschnitts beeinflusst wird. Der Verschleiß durch die im Eisenbahnwesen eingebrachten Lasten spielt hier eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle. Dies gilt insbesondere dann, wenn – so wie in diesem Fall – der betroffene Streckenbereich insgesamt eine geringe Verlehmungsproblematik aufweist. Ein Einfluss des erwähnten Niederschlags in der Nacht zuvor (Abbildung 45) kann im Rahmen dieser Parameter gänzlich ausgeschlossen werden.

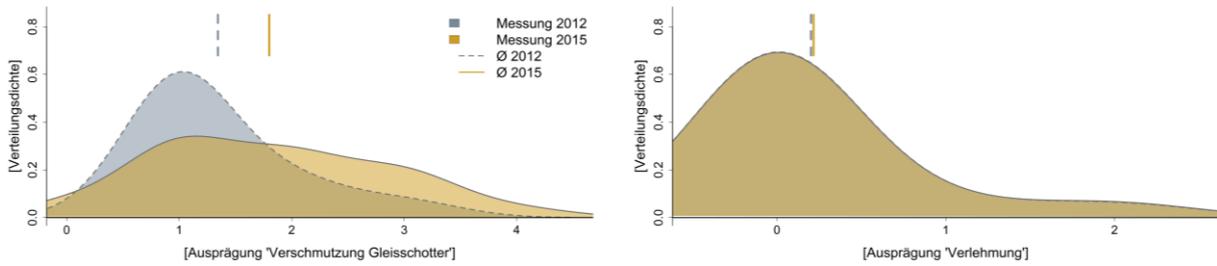


Abbildung 49: Zeitreihe Georadar Verschmutzung

Der bodenmechanische Aufbau entlang einer Bahnstrecke unterliegt in jedem Fall einer gewissen Inhomogenität. Diese ergibt sich vor allem aufgrund der natürlichen Zusammensetzung des Bodens, aber auch aufgrund verschiedener Trassierungselemente wie Damm- und Einschnittbereiche. Des Weiteren in spezifischen Bereichen ebenso dadurch, dass gewisse Bereiche einer Bodenverbesserung oder Untergrundsanie rung unterzogen werden. Diese auftretenden Änderungen der bodenmechanischen Eigenschaften führen zu unterschiedlichem Tragfähigkeitsverhalten, welches durch regelmäßige Lasteinwirkung in weiterer Folge zu inhomogenen Setzungen im Gleiskörper führt. Im Rahmen der Evaluierung des Fahrwegzustands durch das Georadar werden jene inhomogenen Setzungen als Welligkeit bezeichnet. Diese Welligkeit des Gleis- sowie des Erdplanums sollte nach einer Gleisneulage – insbesondere, wenn mit Unterbausanierung ausgeführt – möglichst gering ausgebildet sein. Im Laufe der Zeit nimmt sie allerdings zu, sofern keine umfassenden Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt wurden. Eben jene Zunahme zeigt sich in Abbildung 50 als Verschlechterung der Parameter *Welligkeit Gleisplanum* sowie *Welligkeit Zwischenschicht*. Die Welligkeit des Erdplanums unterliegt hierbei einer stärkeren Verschlechterung, was darauf basieren könnte, dass auch die Zunahme des Feuchtigkeitsgehaltes in diesem Bereich des Gleiskörpers größer ist als jene im Schotterbett (Abbildung 44).

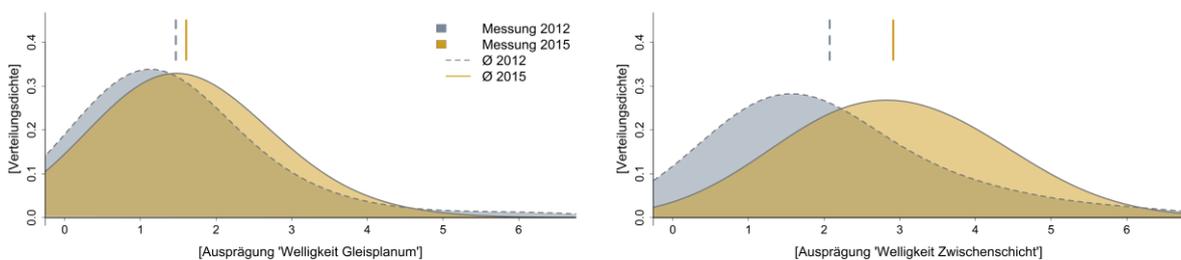


Abbildung 50: Zeitreihe Georadar Welligkeit

Eine Beeinflussung des Verschlechterungsverhaltens der Parameter betreffend Welligkeit durch den zuvor analysierten Niederschlag kann auch in diesem Fall ausgeschlossen werden.

4.2.2 Der Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen

Neben den bereits untersuchten Ein- bzw. Ausbauqualitäten der einzelnen Analysemethoden (siehe 4.1.3), ist natürlich auch ebenso von Bedeutung, inwieweit Instandhaltungsmaßnahmen eine Veränderung des Qualitätszustands auslösen. Dabei stellt sich eine gegensätzliche Erwartungshaltung an die eingeführten Analysewerkzeuge dar. Die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS) beschreibt das Rauschen des Spurweitensignals und damit vorrangig den Kraftschluss bzw. die Lastübertragung zwischen Schiene, Schienenbefestigung und Schwelle. Sofern die Schwellensubstanz also noch nicht nachhaltig beschädigt wurde, muss eine Instandhaltungsmaßnahme zwangsläufig zu einer Verbesserung des Qualitätssignals führen. Die Fraktalanalyse jedoch beschreibt vorrangig den Schotterzustand bzw. die Unterbauqualität. Da im Rahmen eines herkömmlichen Stopfeinsatzes zwar die Gleislage berichtigt, der Urzustand dieser beiden Komponenten jedoch größtenteils unverändert bleibt, sollte eine derartige Instandhaltungsmaßnahme die Fraktalanalyse in geringem Ausmaß beeinflussen. Da für die Bewertungen des Georadars keine ausreichenden Zeitreihen zur Verfügung stehen, kann diese Methode hier nicht untersucht werden. Ein Einfluss auf die durch das Georadar bewerteten Parameter sollte bei sämtlichen Instandhaltungsmaßnahmen – mit Ausnahme einer Verbesserung der Entwässerungssituation – nicht vorhanden sein.

Der Einfluss von Instandhaltungstätigkeiten auf die Standardabweichung der modifizierten Spur (SigModS) wird dabei auf Streckenabschnitten einer Bergstrecke mit engen Bögen untersucht. Für diese Abschnitte war es möglich, vom Infrastrukturbetreiber detaillierte Aufzeichnungen der durchgeführten Tätigkeiten zu erhalten. Jene Bereiche, welche mit den geringsten Radien trassiert sind, verfügen dabei naturgemäß über Holzschwellen (Tabelle 3). Die getätigte Instandhaltungsmaßnahme bestand darin, sämtliche Kleineisen zu ersetzen. Die in Bereichen mit etwas größeren Radien verlegten Betonschwellen wurden einem durchgehenden Zwischenlagentausch unterzogen.

Schwellentyp	Länge	Median Radius	Instandhaltungstätigkeit; Zeitpunkt
Holz	675 m	189 m	Tausch Klemmplatte, Hakenschraube und Federring; Herbst 2012
Beton	2250 m	575 m	Wechsel der Zwischenlagen; Herbst 2012

Tabelle 3: Auflistung der Instandhaltungstätigkeiten bei Schwellen in Bogenbereichen

Im Rahmen der Auswertungen (Abbildung 51, rechts) zeigen sich – wenig überraschend – die Holzschwellengleise in den engen Bögen besonders auffällig. Dies liegt neben den Materialeigenschaften der Holzschwellen auch daran, dass diese bei den hier vorliegenden engen Bögen als Stoßlückengleis eingebaut werden. Sowohl das allgemeine Qualitätsniveau der Holzschwellengleise als auch die Verschlechterung desselbigen nehmen demzufolge ein vergleichsweise großes Ausmaß an. Dementsprechend wirkungsvoll erweist sich jedoch auch die getätigte Maßnahme im Jahr 2012. Im Rahmen der Analysen hinsichtlich Betonschwellen manifestiert sich ein gänzlich besseres Qualitätsniveau. Dies liegt natürlich einerseits an den hinlänglich beschriebenen Materialeigenschaften der Betonschwelle, aber auch an dem Faktum, dass diese nicht bei derart geringen Radien eingebaut werden. Die Ausbauqualität der Zwischenlagen bei Betonschwellen (Abbildung 51, links) entspricht dabei mit rund 1,2 mm SigModS bereits vorgeschlagenen Grenzwerten [Hansmann 2015], um eine nachhaltige Schädigung der Schwellensubstanz zu verhindern.

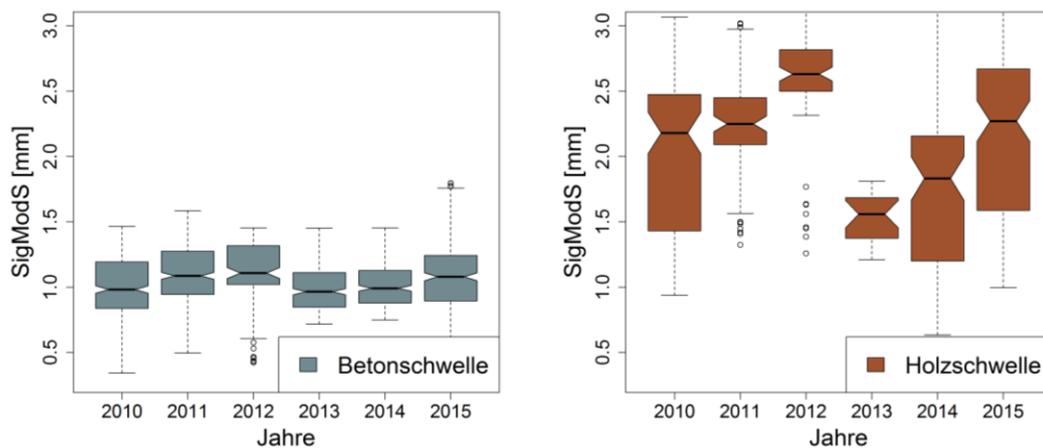


Abbildung 51: Einfluss des Zwischenlagentauschs auf Beton- bzw. Holzschwellen

Es kann daher konstituiert werden, dass im Rahmen der Zeitreihenanalyse des Qualitätssignals SigModS die getätigten Instandhaltungsmaßnahmen wie erwartet erkannt werden können. Wie bereits eingangs erwähnt, ist die Erwartungshaltung an die Zeitreihen der Fraktalanalyse eine gänzlich andere. Sofern die Fraktalanalyse wirklich in der Lage ist, den Zustand des Schotterbetts bzw. des Unterbaus zu beschreiben, sollte sie nur in geringem Ausmaß von Instandhaltungsmaßnahmen – in diesem Fall Stopfeinsätzen – beeinflusst werden. Um diese Annahme zu überprüfen, werden an dieser Stelle Regressionsalgorithmen für die Fraktalanalyse (siehe 3.1.2) und die Standardabweichung der Längshöhe (σ_H) (siehe 3.1.1) herangezogen. Letztere wird als Indikator für notwendige Stopfeinsätze herangezogen und auch dementsprechend stark von denselben beeinflusst. Dies zeigt sich auch an dem beispielhaft dargestellten Querschnitt (Abbildung 52, rechts), an welchem seit Einbau im Herbst 2009 zweimal eine Gleisstopfung durchgeführt wurde. Diese

Maschineneinsatz beeinflusst. Die Vermutung liegt nahe, dass dieser – wenn auch sehr geringe – Einfluss teilweise dann zu Stande kommt, wenn im Rahmen der Gleisstopfung auch eine Neuschotterzugabe erfolgt. Diese Methode wird vor allem dann angewandt, wenn es sich um einen Abschnitt bemerkenswert schlechter Gleislage handelt, da durch diese Zugabe an neuem Schotter eine nachhaltige Hebung und damit Verbesserung der Gleislagequalität erreicht werden kann. Diese Maßnahme wird dementsprechend dann auch im Qualitätssignal der Fraktalanalyse ersichtlich.

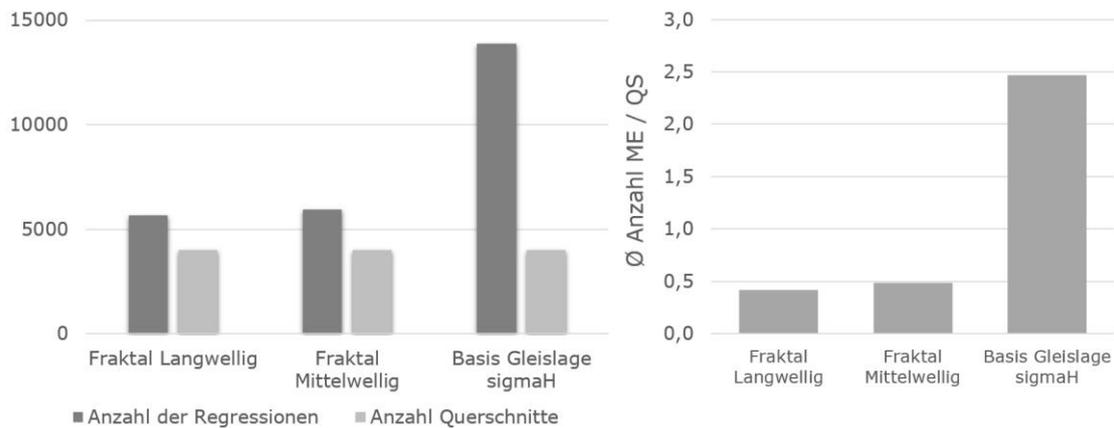


Abbildung 53: Einfluss von Instandhaltungsmaßnahmen auf die Fraktalanalyse

Die zuvor formulierte Annahme, wonach die Fraktalanalyse den Zustand des Schotterbetts bzw. Unterbaus beschreibt und demzufolge nicht wesentlich von Stopfmaßnahmen beeinflusst wird, kann somit bestätigt werden.

4.2.3 Evaluierungen des Georadars und der Fraktalanalyse versus Drucksondierung

Im Rahmen eines Pilotprojekts wurden insgesamt drei Streckenabschnitte mit Hilfe der bodenmechanischen Drucksondierung (siehe 3.3.1) beprobt. Davon werden die beiden Abschnitte A und B im Rahmen der vorliegenden Arbeit näher betrachtet. Diese beiden Abschnitte zeichnet aus, dass Vergleichswerte mit Georadarevaluierungen und bzw. oder der Fraktalanalyse vorliegen. Neben der Auswertung der bodenmechanischen Erkenntnisse wurde auch eine Korrelation dieser mit den Ergebnissen der in der TUG-Datenbank befindlichen Messdaten vorgenommen.

Aufgrund der zuvor erfolgten Schotterentnahme eignet sich der mittelwellige Bereich der Fraktalanalyse naturgemäß nicht für diesen Vergleich, weswegen lediglich der langwellige, den Unterbau bzw. Untergrund beschreibende Bereich, herangezogen wird. Eine qualitative Darstellung der durch das Institut für Bodenmechanik und Grundbau (TU Graz) ausgewerteten Ergebnisse der Drucksondierung findet sich an der oberen Seite von Abbildung 54. Betrachtet werden dabei die Bereiche 1, 2 und 4, da im Bereich 2 innerhalb

der TUG-Datenbank keine Gleismessdaten vorliegen und demzufolge auch keine Fraktalanalyse kalkuliert werden kann. Es zeigt sich, dass der grün hinterlegte Bereich 3 in einer Tiefe von ein bis zwei Metern unter Schienenoberkante noch verhältnismäßige gute Spitzenwiderstandswerte aufweist und daher eine gute Tragfähigkeit besitzt. Dies trifft in abgeschwächter Form auch auf eine Tiefe größer als 2 m zu. Bereich 1 hingegen zeigt nicht nur geringere Widerstandswerte im oberen Bereich, sondern nahezu keinen Spitzenwiderstand ab einer Tiefe von zwei Metern. Daher ist dieser Bereich definitiv als in schlechterem Zustand befindlich einzustufen. Den mit Abstand schlechtesten Zustand hinsichtlich der Ergebnisse der bodenmechanischen Drucksondierung zeigt allerdings Bereich 4. Hier konnten von Beginn an nur äußerst geringe Spitzenwiderstände gemessen werden, welche ab einer Tiefe von rund 1,5 m bereits auf nahezu null MPa abfallen.

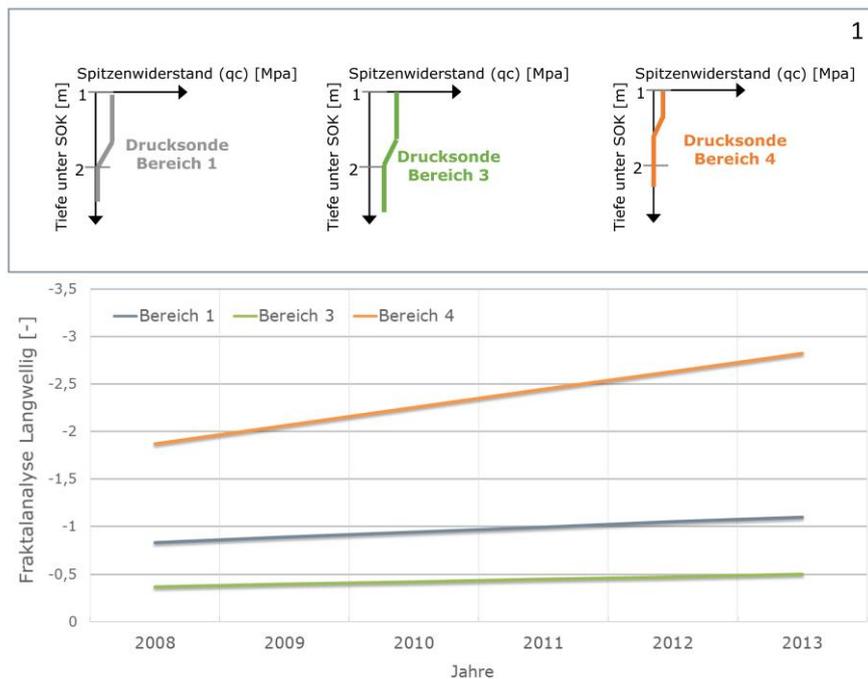


Abbildung 54: Drucksondierung Abschnitt A: Zusammenhang mit Fraktalanalyse

Vergleicht man nun die besprochenen Ergebnisse der bodenmechanischen Drucksondierung mit jenen der langwelligigen Fraktalanalyse, so kann man eine ausgezeichnete Korrelation in den untersuchten Bereichen erkennen. Der tragfähigste Bereich 3 zeigt nicht

¹ Auswertungen der Spitzenwiderstände sind Ergebnisse eines gemeinsamen Projekts mit dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

nur die aktuell besten Werte der Fraktalanalyse, sondern auch die geringste Verschlechterungsrate innerhalb der letzten fünf Jahre. Der als laut bodenmechanischer Drucksondierung durchschnittlich evaluierte Bereich 1 zeigt hinsichtlich der Fraktalanalyse bereits signifikant schlechtere Ergebnisse. Der mit Abstand schlechteste Bereich im Rahmen der Fraktalanalyse ist Bereich 4, was ebenfalls die Ergebnisse der bodenmechanischen Drucksondierung untermauert.

Im selben Streckenabschnitt kann für die Bereiche 1 und 2 auch ein Vergleich mit Evaluierungen des Georadars durchgeführt werden. Es kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der beiden Untersuchungsmethoden in ihren Grundaussagen übereinstimmen, wonach beide den Bereich 1 als eindeutig schlechteren Bereich ausweisen (Abbildung 55). Die im Rahmen der bodenmechanischen Drucksondierung als inadäquat beurteilte Tragfähigkeit kann auch im Georadar durch die vorhandene starke Welligkeit des Gleisplanums als auch der Zwischenschicht bestätigt werden. Der Feuchtigkeitsgehalt des Gleisschotters sowie der Zwischenschicht spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Die geringere Verschmutzung des Gleisschotters in Bereich 2 ist vermutlich aufsteigenden Feinteilen geschuldet. Dies kann allerdings an dieser Stelle nicht weiter analysiert werden, da – wie bereits erwähnt – die Drucksonde in das Gleisplanum eingeführt und der Schotter davor entfernt wird.

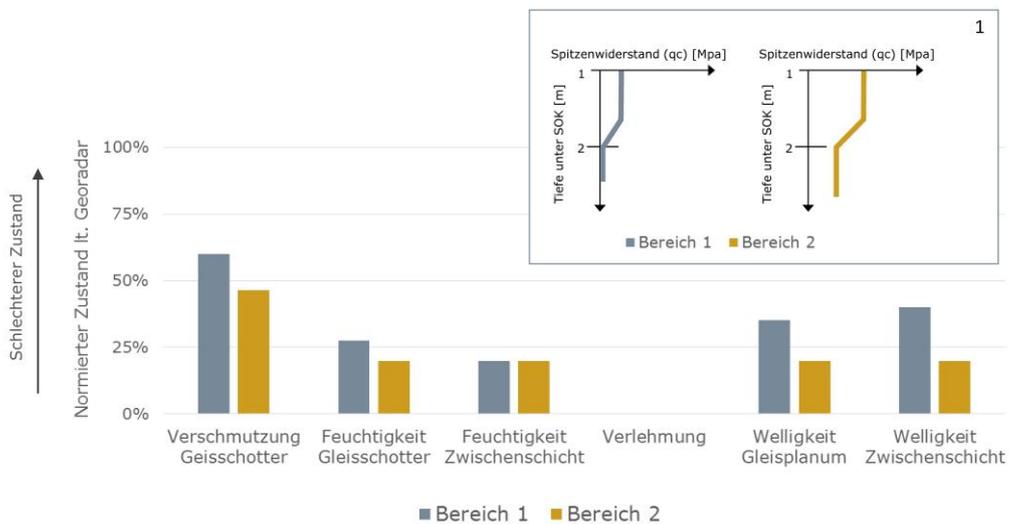


Abbildung 55: Drucksondierung Abschnitt A: Vergleich mit Evaluierungen des Georadars

¹ Auswertungen der Spitzenwiderstände sind Ergebnisse eines gemeinsamen Projekts mit dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

Im Rahmen des Pilotprojekts wurden auch an einem weiteren Streckenabschnitt B detaillierte bodenmechanische Untersuchungen vorgenommen. Dabei wurde nicht nur eine bodenmechanische Drucksondierung, sondern auch eingehende Analysen des zuvor entnommen Schotterbetts sowie Untersuchungen hinsichtlich des Wassergehalts durchgeführt.

Die Auswertungen der Schotterbeprobungen (Abbildung 56) belegen eindeutig, dass die Verschmutzung des Schotterbetts (obere 30 cm) in Kilometrierungsrichtung zunimmt. Die darunter liegende Schicht (Schicht Nr. 4) zeigt jedoch keine relevante Veränderung der Kornverteilung. Dies deckt sich insofern mit den Ergebnissen des Georadars (Abbildung 58), als dass die Verschmutzung des Gleisschotters ab km 6,400 stark zunimmt, wohingegen über den gesamten Bereich keine Verlehmung detektiert wird.

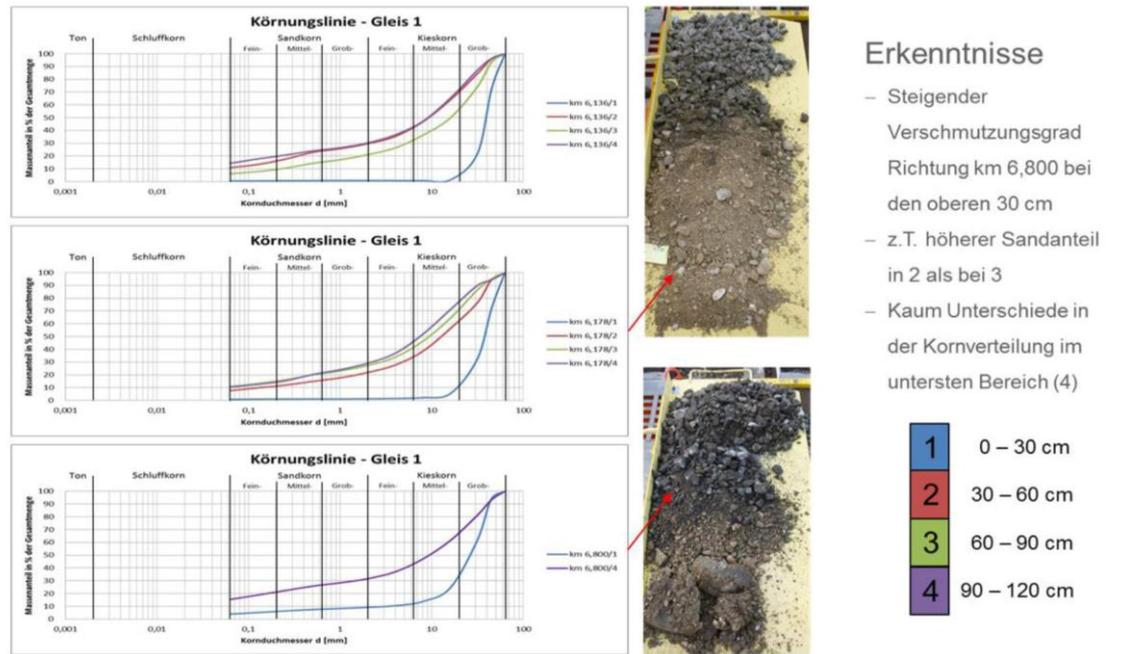


Abbildung 56: Drucksondierung Abschnitt B: Schotterbeprobung¹

Der erkannte Anstieg des Wassergehalts (Abbildung 57) im Rahmen der bodenmechanischen Untersuchungen spiegelt sich teilweise auch in den Befahrungen des Georadars wider (Abbildung 58), da der Feuchtigkeitsgehalt der Zwischenschicht zunimmt. Dieser

¹ Ergebnisse eines gemeinsamen Projekts mit dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

nimmt jedoch im Gegensatz zu den Untersuchungen im Rahmen der Drucksondierung später wieder leicht ab, was der Grund für den als „teilweise“ bezeichneten Zusammenhang ist.

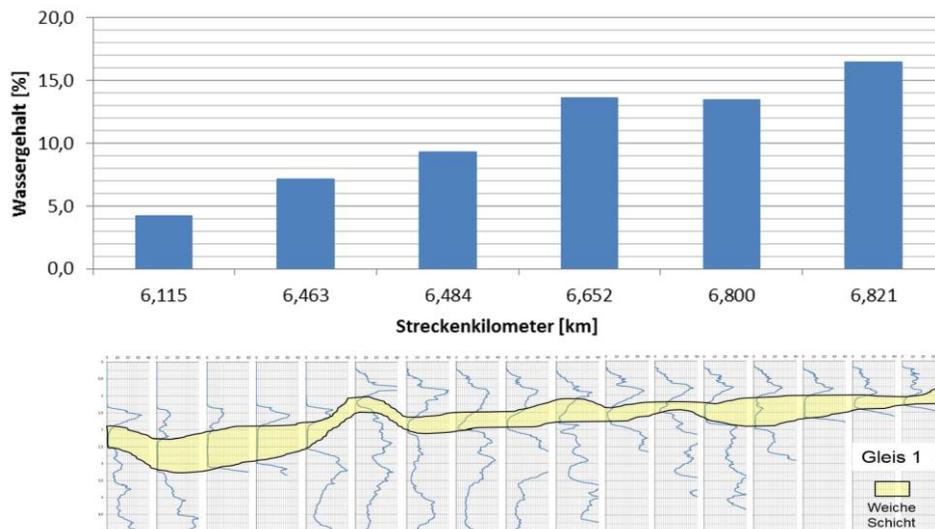


Abbildung 57: Drucksondierung Abschnitt B: Wassergehalt und Analyse Bodenschichten¹

Die Analyse der tiefer liegenden Bodenschichten zeigt im Rahmen der bodenmechanischen Drucksondierung ein „Wandern“ einer weichen Bodenschicht (Abbildung 57) an die Oberfläche. Dieses Phänomen kann ebenso in den Illustrationen des Georadars sehr gut erkannt werden. Ab etwa km 6,400 wird nämlich sowohl ein gewelltes Gleisplanum als auch eine gewellte Zwischenschicht erkannt (Abbildung 58), was auf eine Abnahme der Tragfähigkeit hindeutet. In den davor liegenden Bereichen werden diese Schichten als eben evaluiert, was auch den Erkenntnissen der Drucksonde entspricht, welche in diesem Bereich die weiche Schicht sehr viel tiefer im Erdkörper angesiedelt sehen. Dementsprechend geringer ist hier auch der negative Einfluss auf den Bereich des Gleisplanums.

¹ Ergebnisse eines gemeinsamen Projekts mit dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau der TU Graz.

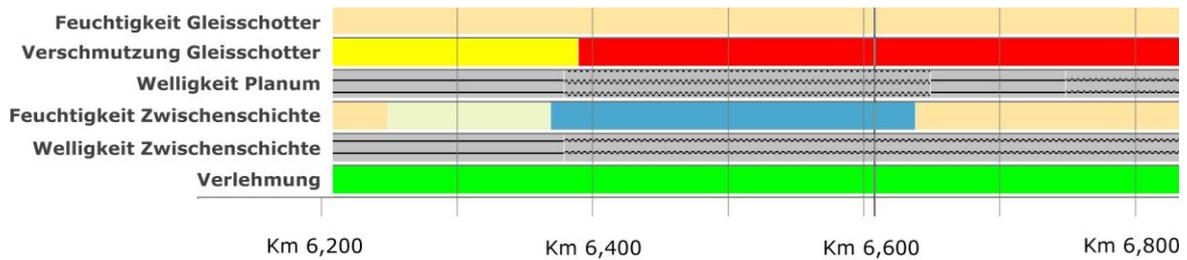


Abbildung 58: Drucksondierung Abschnitt B: Ergebnisse der Georadarevaluierungen

Die Erkenntnisse aus Georadarbefahrungen können somit in diesem Streckenbereich auch durch punktuell vorgenommene bodenmechanische Untersuchungen vorwiegend bestätigt werden. Es ist allerdings dennoch nicht zu erwarten, dass die Aussagen des Georadars durchgehend den exakten Verschmutzungsgrad bzw. den Wassergehalt der einzelnen Bodenschichten quantitativ erkennen werden. Es soll vielmehr als qualitativer Indikator des Zustands der behandelten Komponenten dienen, welcher neben einer Zustandsbeschreibung auch eine Prognose desselbigen zulässt. Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte Validierungsprozess bestätigt, dass einer solchen Verwendung des Georadars zugestimmt werden kann. Die Detailebene und Genauigkeit einer bodenmechanischen Untersuchung kann diese Analysemethoden jedoch nicht erreichen.

4.2.4 Fraktalanalyse und das visuelle In-Situ Verhalten

Die einfachste und zugleich vermutlich umfassendste - wenn auch aufwendigste und subjektivste - Möglichkeit sämtliche Randbedingungen eines Eisenbahnfahrwegs zu erfassen, stellt nach wie vor die Gleisbegehung dar. Diese visuelle Zustandsbeurteilung ist auch weiterhin ein fester Bestandteil der Inspektions- und Instandhaltungsstrategien eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers. Im Rahmen des Validierungsprozesses der Fraktalanalyse konnten mehreren Gleisbegehungen unter fachkundiger Begleitung durchgeführt werden. Neben bereits untersuchten Beispielen für die Verwendungsfähigkeit des mittelwelligen fraktalen Bereichs zur Beschreibung des Schotterzustands [Hansmann 2015], soll in der vorliegenden Arbeit insbesondere der langwellige Bereich analysiert werden. Hierzu werden exemplarisch zwei Streckenabschnitte näher erläutert.

Beispiel I (Abbildung 59) stellt die in Längsrichtung dargestellten Ergebnisse der Fraktalanalyse von 2005 bis 2013 dem vor Ort vorgefundenen Verhalten gegenüber. Darüber hinaus sind für diesen Streckenabschnitt auch Georadarbefahrungen vorhanden. Die Fraktalanalyse weist dabei nicht nur Schädigungen im mittel- oder langwelligen Bereich auf, sondern auch eine Überlagerung derselben. Im Rahmen der Gleisbegehung konnte massiver Schotterabrieb („weiße Stellen“) an der obersten Lage des Schotterbetts festgestellt werden. Darüber hinaus wurde nach Entfernen dieser obersten Lage offenkundig,

dass das Schotterbett zusätzlich durch vom Unterbau aufsteigende Feinteile verschmutzt wird. Demzufolge muss einerseits auf eine inadäquate Tragfähigkeit sowie Trenn- und Filterwirkung des anstehenden Bodens geschlossen werden. Andererseits kann das Schotterbett die ihm zugeordnete Wasserableitung nicht mehr ausführen, wodurch der visuell sichtbar hohe Feuchtigkeitsgehalt im Schotterbett erklärt werden kann. Eine mögliche Ursache des sich zeigenden Zustands könnte die gänzlich blockierte Entwässerungsanlage darstellen, wodurch das anfallende Oberflächenwasser am Gleisplanum nicht mehr abgeführt werden kann. Die daraus folgend verminderte Tragfähigkeit führt zum Aufsteigen der Feinteile und der damit einhergehenden Verschmutzung des Schotterbetts.

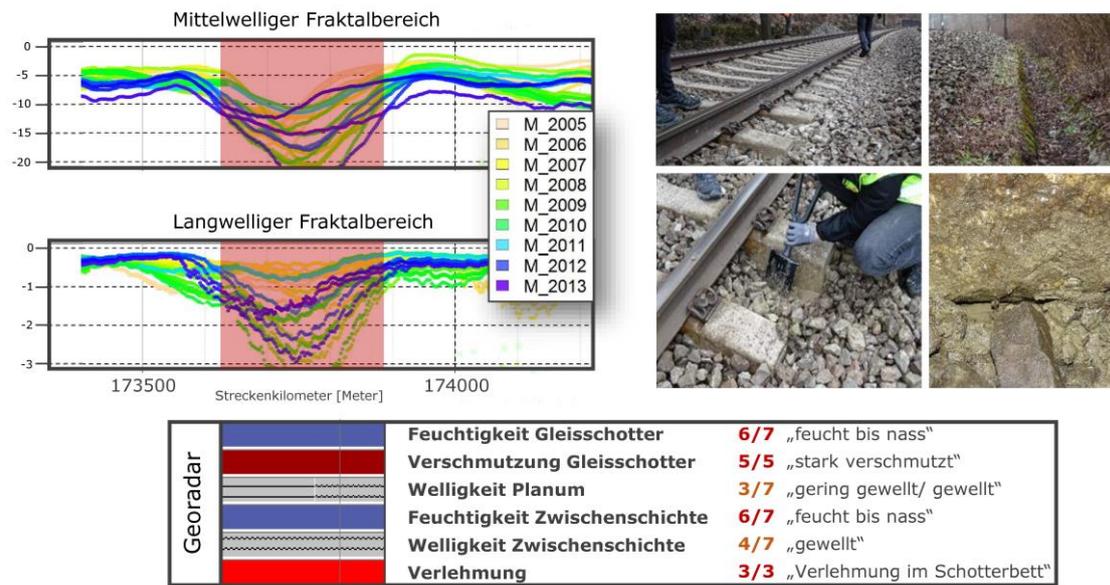


Abbildung 59: Validierung Fraktalanalyse – Gleisbegehung Beispiel I

Der durch die Fraktalanalyse korrekt erkannte Zustand der Gleisanlage kann auch von den Beurteilungen der Georadarbefahrung bestätigt werden (Abbildung 59, unten). Sowohl die Feuchtigkeit des Gleisschotters als auch der Zwischenschichte werden mit dem zweitschlechtesten von sieben Beurteilungsziffern (Abbildung 23) bewertet. Ebenso wird der Gleisschotter als stark verschmutzt analysiert und eine Verlehmung festgestellt, welche vom anstehenden Boden bereits in das Schotterbett vorgedrungen ist. Die Welligkeit des Gleisplanums sowie der Zwischenschichte in Längsrichtung deutet ebenfalls darauf hin, dass es sich bei diesem Abschnitt um heterogene Tragfähigkeitsbedingungen handelt.

Die Standardabweichung der Längshöhe beschreibt vorrangig die Amplituden des Signals, während die Fraktalanalyse in der Lage ist, vor allem die Wellenlängen zu erfassen (siehe 3.1.2). Dementsprechend ist es auch möglich, anhand der Fraktalanalyse der vertikalen Gleisgeometrie Phänomene zu erfassen, welche mit der herkömmlichen Gleisla-

geanalyse nicht oder erst zu einem späteren Zeitpunkt erkannt werden können. Eine derartige Ausprägung soll anhand des zweiten Validierungsbeispiels (Abbildung 60) erläutert werden. Es handelt sich dabei um einen im Jahr 2001 eingebauten und mit konventionellen Betonschwellen ausgestatteten Streckenbereich. Verglichen wird dabei der Unterbauzustand zweier Querschnitte (QS 1 und QS 2), welche sich rund 180 m entfernt zueinander befinden. Im Rahmen der herkömmlichen Gleislageanalyse (σ_{mH}) zeigt sich nahezu kein Unterschied zwischen den beiden Punkten. Das Gleislageverhalten nach Einbau kann als sehr gut bezeichnet werden, welches zusätzlich durch einen Stopfeinsatz im Jahr 2006 deutlich verbessert werden konnte. Dies bestätigt sich auch dadurch, dass die Aufmerksamkeitsschwelle (AS) noch nicht annähernd erreicht wurde, was aufgrund der vorherrschend niedrigen Verschlechterungsrate auch in den kommenden Jahren nicht zu erwarten ist.

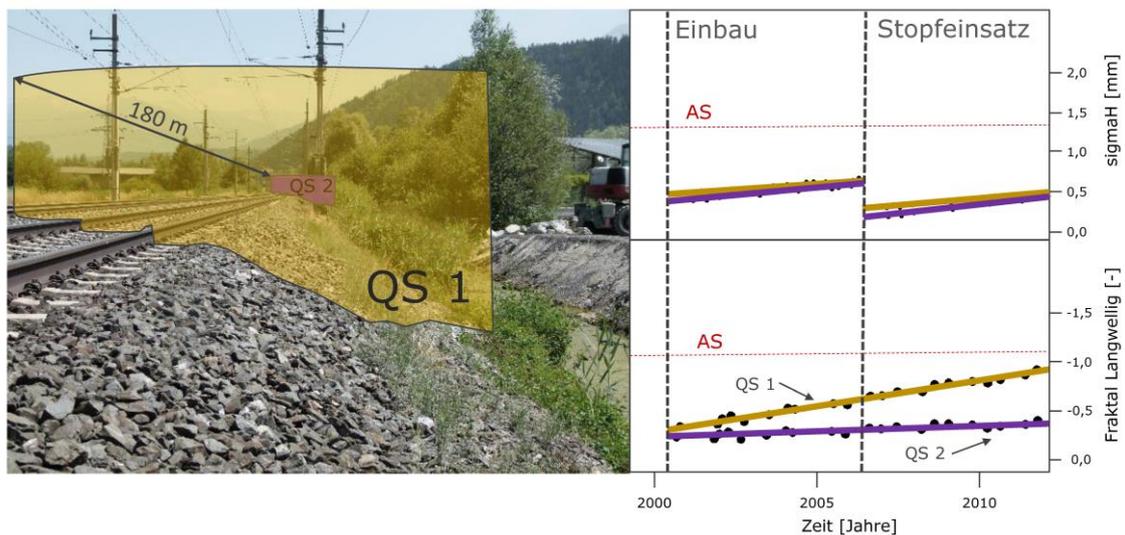


Abbildung 60: Validierung Fraktalanalyse – Gleisbegehung Beispiel II

Anders stellt sich die Situation dar, wenn man die beiden Streckenquerschnitte mit Hilfe der langwelligen Dimension der Fraktalanalyse bewertet. Zunächst fällt auf, dass dieses Qualitätssignal nicht vom 2006 durchgeführten Stopfeinsatz beeinflusst wird. Dies bestätigt wiederum die bereits eingehend untersuchte Annahme (siehe 4.2.2), wonach die Fraktalanalyse tatsächlich in der Lage ist das substanzielle Verhalten der Komponente Unterbau zu beschreiben und dementsprechend auch nicht wesentlich von kurzfristigen Berichtigungsmaßnahmen der Gleislage beeinflusst wird. Darüber hinaus wird – im Gegensatz zur Analyse laut σ_{mH} – auch ein signifikanter Qualitätsunterschied zwischen den beiden Querschnitten sichtbar (Abbildung 60). Querschnitt 2 entspricht dem im Rahmen der herkömmlichen Gleislageanalyse erkannten ausgezeichneten Verhalten und weist dabei nahezu keine zeitliche Verschlechterung auf. Querschnitt 1 hingegen zeigt eine maßgebliche

Verschlechterung des Zustands und droht die aus netzweiten Analysen ermittelte Aufmerksamkeitsschwelle [Hansmann 2015] von -1,1 [-] zeitnah zu erreichen.

Im Rahmen der Gleisbegehung konnte auch die Ursache dieses Verhaltens vorgefunden werden. Während bei Querschnitt 2 keine besonderen Auffälligkeiten erkennbar sind, ist der Entwässerungsgraben bei Querschnitt 1 mit Wasser gefüllt. Zurückzuführen ist diese Wasseransammlung auf einen nicht funktionsfähigen Wasserdurchlass, gepaart mit einem vergleichsweise hohen Grundwasserspiegel. Dies lässt die Vermutung zu, dass das gestaute Wasser sich auch im Unterbau des Eisenbahnfahrwegs befindet, wodurch die Tragfähigkeit beeinträchtigt wird. Durch die Höhe und das daraus folgende Gewicht des Bahndamms kommt es schlussendlich zu inhomogenen Setzungen, welche durch den langwelligigen Fraktalwert jedoch frühzeitig erkannt werden können. Dementsprechend kann dem beschriebenen Verhalten entgegengewirkt und somit ein zukünftig erhöhter Instandhaltungsbedarf verhindert werden.

4.2.5 Die relative Einsenkungsmessung trifft die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage

Im Rahmen dieser Auswertung soll die Frage beantwortet werden, ob sich Zusammenhänge zwischen den Werten der Einsenkung (siehe 3.3.2) und der Fraktalanalyse ergeben. Es handelt sich dabei um die Analyse eines Streckenbereichs von rund 50 km. Eingebaut wurde der gesamte Bereich im Jahr 2003, wobei das Gleisplanum als bituminöse Tragschicht ausgeführt ist. Da dadurch Unterbauprobleme vernachlässigt werden können, konzentriert sich die Untersuchung des freien Streckenbereichs (Gültige Länge, siehe 2.2) auf den mittelwelligen fraktalen Bereich. Dieser wird in einem Streudiagramm den gemessenen Werten der relativen Einsenkung gegenübergestellt. Wie bereits erläutert (siehe 4.1.1), reagiert die Fraktalanalyse unterschiedlich auf verschiedene Oberbauformen. Aus diesem Grund sind die in diesem Bereich vorhandenen Oberbauformen Beton, Beton besohlt sowie Feste Fahrbahn in Abbildung 61 farblich gekennzeichnet.

Dabei lässt sich der Zusammenhang zwischen der relativen Einsenkung und den verwendeten Oberbauformen auf den ersten Blick erkennen. Während die Betonschwellen eine relative Einsenkung von rund 0,7 mm erfahren, senkt sich der Gleiskörper bei Fester Fahrbahn um 1,2 mm bzw. bei besohlenen Betonschwellen im Mittel um 1,7 mm. Eindeutig sichtbar wird darüber hinaus auch die bessere Qualität im Sinne der Fraktalanalyse bei erhöhter Einsenkung – also bei Fester Fahrbahn und besohlenen Betonschwellen. Dahingegen nehmen unbesohlte Betonschwellen nicht nur die höchsten mittelwelligen Fraktalwerte an, sondern zeigen auch die größte Streuung derer. Dies bestätigt den bereits erläuterten Effekt, wonach die Interaktion bzw. die Lastverteilung zwischen Betonschwellen und Schotterbett besser funktioniert, wenn dazwischen eine elastische Schwellensole verbaut wird.

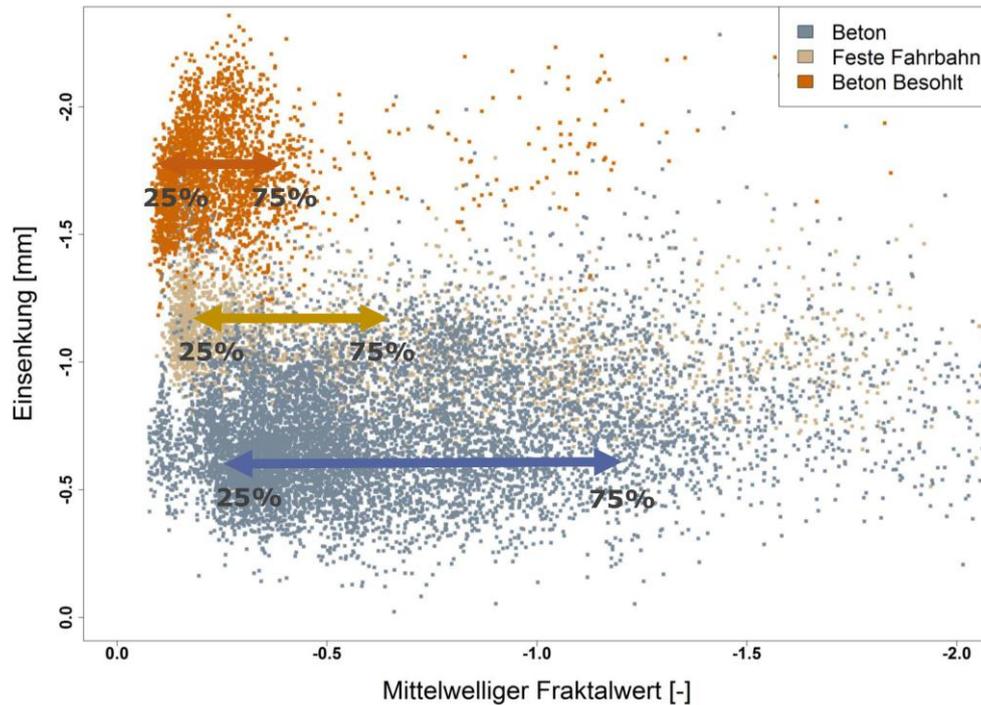


Abbildung 61: Korrelation der Ergebnisse der Einsenkungsmessungen und der Fraktalanalyse des mittelwelligen Bereichs

Auffällig zeigt sich auch die Streuung der Abschnitte mit Fester Fahrbahn (Abbildung 61), was bedeutet, dass auch bei dieser Oberbauform erhöhte Werte vorzufinden sind. Diese erhöhten Werte im mittelwelligen Bereich könnten darauf hindeuten, dass es Bereiche gibt, in welchen die in diesen Abschnitten eingebauten Tragplatten der Fester Fahrbahn unerwünschte Bewegungen erfahren. Diese Vermutung kann jedoch im Rahmen dieser Auswertungen weder bestätigt noch widerlegt werden. Hier besteht definitiv Forschungsbedarf für zukünftige Arbeiten, um herauszufinden, inwiefern die Fraktalanalyse den Zustand von Bereichen mit Fester Fahrbahn beschreiben kann.

Abgesehen von den Einsenkungen der unterschiedlichen Oberbauformen an sich sind natürlich auch die Einsenkungen der Übergangsbereiche von wesentlicher Bedeutung. Diese zeigen ob ein kontinuierlicher Steifigkeitsauf- bzw. -abbau erreicht werden konnte. Im Rahmen der Auswertungen (Abbildung 62) zeigt sich, dass dies für die Übergangsbereiche von Betonschwellen auf besohlte Betonschwellen und vor allem von Fester Fahrbahn auf besohlte Betonschwellen erreicht werden konnte. Es wird allerdings ersichtlich, dass zwischen unbesohnten Betonschwellen und Fester Fahrbahn keine kontinuierliche Steifigkeitszunahme erreicht werden konnte (Abbildung 62, Mitte). Der Grund liegt darin, dass in jenen Übergangsbereichen für jeweils rund 50 Meter eine Schwellenbesohlung eingebaut wurde, welche sowohl eine größere Einsenkung als die unbesohlte Betonschwelle als auch

die Feste Fahrbahn aufweist. Daher bildet sich in diesen speziellen Übergangsbereichen ein Steifigkeitssprung zwischen den beiden zu verbindenden Oberbauformen aus.

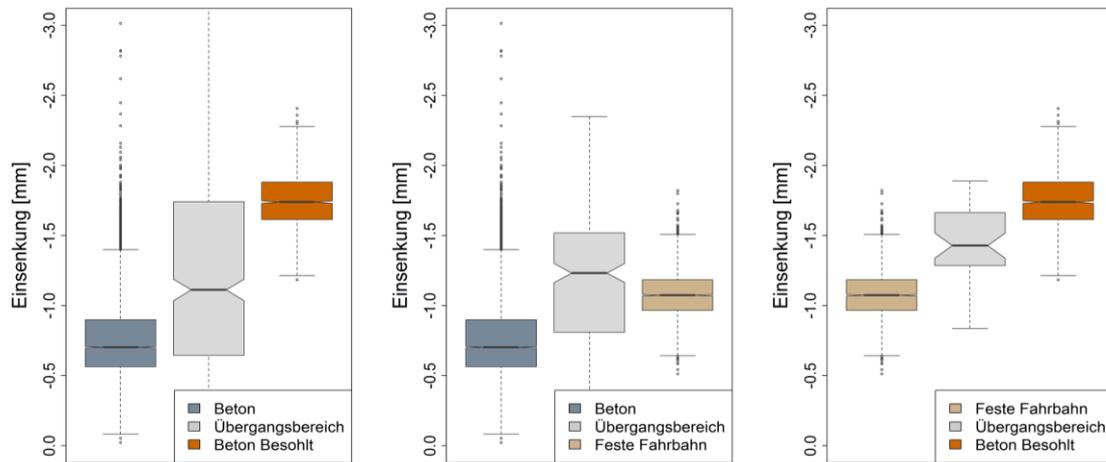


Abbildung 62: Einsenkungen in Übergangsbereichen zwischen zwei Oberbauformen

Auch im Rahmen der Fraktalanalyse zeigt die Auswertung der Übergangsbereiche bemerkenswerte Ergebnisse. Der kurzwellige als auch vor allem der mittelwellige Bereich zeigen wiederum den negativen Einfluss von Übergängen unbesohlter Betonschwellen zu Fester Fahrbahn. Wie bereits erläutert wurden hier als Übergangskonstruktion über einen kurzen Abschnitt von 50 m Schwellenbesohlungen eingebaut, welche allerdings einen unerwünschten Steifigkeitssprung verursachen (Abbildung 62). Es wird nun auch im Rahmen der Fraktalanalyse (Abbildung 63) ersichtlich, dass sich diese Bereiche als Problembereiche darstellen. Hinsichtlich der langwelligen Dimension der Fraktalanalyse ändert sich das Ergebnis, da hier die Feste Fahrbahn ein nahezu perfektes Signal liefert, weswegen sich die Ausprägungen in den Übergangsbereichen zur Festen Fahrbahn als besonders auffällig darstellen.

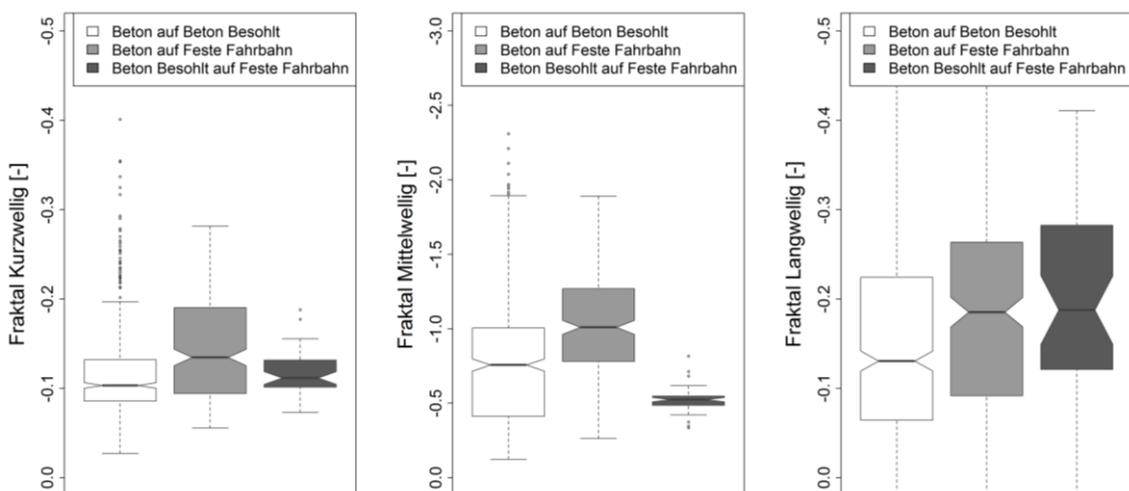


Abbildung 63: Fraktalanalyse in Übergangsbereichen zwischen zwei Oberbauformen

Den Übergangskonstruktionen von konventioneller Betonschwelle bzw. Fester Fahrbahn auf Bereiche mit besohnten Betonschwellen kann auch im Rahmen der Fraktalanalyse (Abbildung 63) ein sehr guter Zustand attestiert werden. Damit kann die positive Auswirkung von technisch einwandfreien Übergangskonstruktionen nachgewiesen werden. Unerwünschte Steifigkeitssprünge hingegen führen zu punktuellen Problemstellen und folglich einem erhöhten Instandhaltungsaufwand.

Generell lässt sich damit zusammenfassen, dass eine höhere relative Einsenkung und eine damit verbundene höhere Elastizität im Gesamtsystem Gleis eine gleisschonendere Lastabtragung ermöglichen. Die erhöhte Elastizität muss dabei natürlich auf bzw. zwischen den im Fahrweg verbauten Komponenten abgestimmt werden. Darüber hinaus muss man berücksichtigen, dass die Erhöhung der Elastizität nur bis zu einem gewissen Maß dem Gesamtsystem dient. Eine relative Einsenkung größer als 3 mm deutet demnach darauf hin, dass sich das Gleis nicht mehr in einem optimalen Zustand befindet [Luomala, et al. 2014]. Die spezifische Festlegung von Grenzwerten oder Eingriffsschwellen ist dabei naturgemäß von den gefahrenen Geschwindigkeiten sowie den eingebrachten Lasten abhängig.

4.2.6 Analyse von Lastplattendruckversuchen

Eine weitere Validierung der Ergebnisse der Georadarauswertungen wird durch den Vergleich mit dynamischen Verformungsmoduln (E_{vd} -Werte) durchgeführt. Diese werden insbesondere im Rahmen des Planungsprozesses von Gleiserneuerungsprojekten sowie als Qualitätskontrolle bei Tragschichteinbauten als im Regelfall ausreichende und zuverlässige Unterbaubewertung ermittelt [ÖBB-Infrastruktur AG 2014]. Mit Hilfe des leichten Fallgewichtsgärts lässt sich durch diese Form der geotechnischen Untersuchung die Tragfähigkeit des darunter liegenden Untergrunds verhältnismäßig einfach und auch in jeder gewünschten Höhenlage im Zuge von Gleisschürfen bestimmen [Auer, et al. 2007]. Innerhalb der mit dem Georadar befahrenen Streckenabschnitte wurden viele derartige geotechnische Untersuchungen durchgeführt, welche zum Vergleich mit den Parametern des Georadars herangezogen werden können. Es handelt sich dabei um geotechnische Erkundungen, welche im letzten Drittel der Gleisnutzungsdauer vorgenommen wurden, um die Planung einer mittelfristig anstehenden Reinvestitionsmaßnahme zu unterstützen. Die für das Tragfähigkeitsverhalten maßgeblichen Parameter des Georadars stellen dabei die Feuchtigkeit der Zwischenschicht, die Welligkeit des Gleisplanums sowie potentiell erkannte Verlehmungen dar.

Dabei lässt sich bei diesem Vergleich (Abbildung 64) folgendes klar erkennen: Je höher der Feuchtigkeitsanteil der Zwischenschicht und im Untergrund laut Georadar, desto geringer ist die durch den Verformungsmodul gemessene Tragfähigkeit. Ebenso wird

die Welligkeit des Gleisplanums schlechter bewertet, je kleiner sich die gemessenen E_{vd} -Werte darstellen. Hinsichtlich des Parameters Verlehmung muss angemerkt werden, dass eine nicht vorhandene feinkörnige Schicht im Gleiskörper nicht automatisch eine hohe Tragfähigkeit des Gleisplanums bedingt, da hier mehrere Faktoren eine wesentliche Rolle spielen. Wird allerdings eine Verlehmung erkannt, so verringern sich die gemessenen E_{vd} -Werte, wenn die Verlehmung bereits im Schotterbett detektiert werden konnte.

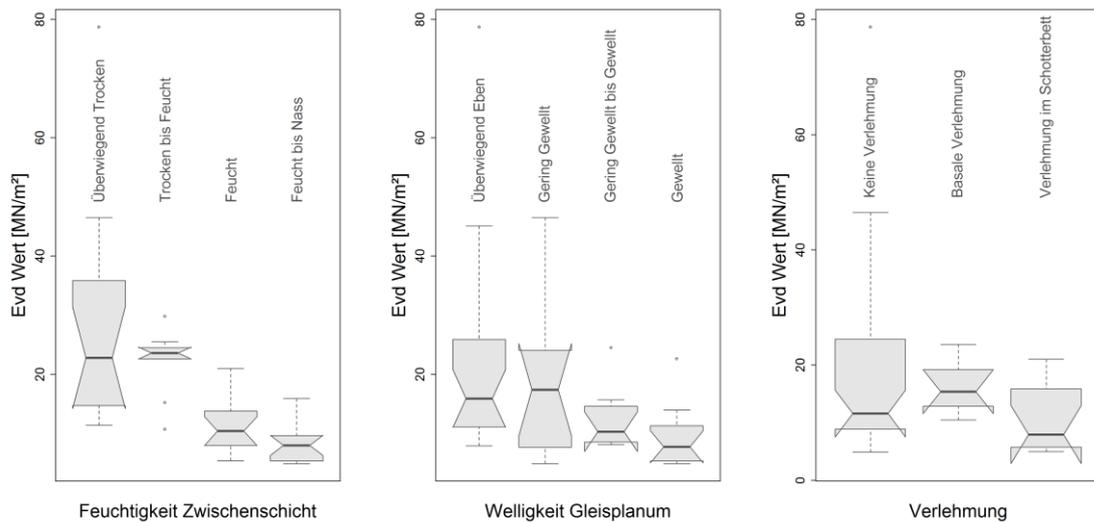


Abbildung 64: Ergebnisse der Lastplattendruckversuche verglichen mit Georadarevaluierungen

Diese dokumentierten Lastplattendruckversuche stellen natürlich auch eine Möglichkeit dar, die Erkenntnisse der Fraktalanalyse zu validieren. Dies eignet sich vor allem für die langwellige Dimension der Fraktalanalyse, als diese auch den Zustand des Unterbaus und damit in gewisser Weise dessen Tragfähigkeit beurteilen sollte. Tatsächlich zeigen die Untersuchungen einen starken Zusammenhang zwischen der punktuell gemessenen Tragfähigkeit und den dazugehörigen Werten der Fraktalanalyse (Abbildung 65). Vor allem aufgrund der Glättungskurve mit zugehörigem Konfidenzband wird ersichtlich: Je höher die Tragfähigkeit, desto geringer die Ausprägung hinsichtlich des langwelligen fraktalen Bereichs.

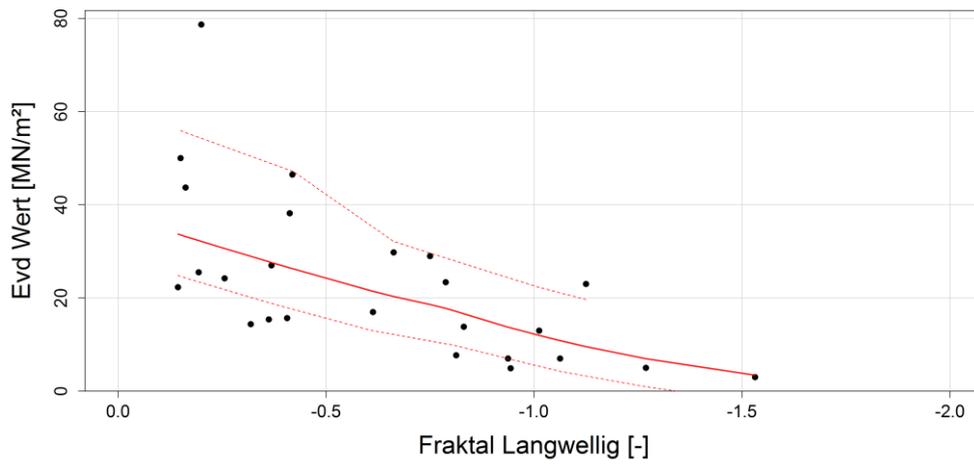


Abbildung 65: Lastplattendruckversuche verglichen mit Fraktalanalyse langwellig

Dementsprechend werden die grundlegenden Aussagen der Fraktalanalyse sowie der Georadarbefahrungen auch von der durch Lastplattendruckversuchen ermittelten Tragfähigkeit bestätigt werden.

5 Stochastische Korrelationsanalysen

Die in der vorliegenden Arbeit eingeführten Methoden zur Zustandsbeschreibung (Fraktalanalyse, Georadar, SigModS) unterscheiden sich vor allem hinsichtlich deren Messmethodiken essentiell. Die von den Messdaten des Gleismesswagens (Fraktalanalyse, SigModS) entwickelten Analysemethoden beruhen auf Lagemessungen mit Hilfe von Beschleunigungsaufnehmer bzw. Sehnemessverfahren. Die Georadarmessung hingegen basiert auf einem geophysikalischen Messsystem, welches sowohl als Sender als auch Empfänger von elektromagnetischen Impulsen fungiert. Dementsprechend ergibt sich daraus folgende Fragestellung, welche im Rahmen der stochastischen Korrelationsanalysen behandelt werden soll:

- I Gelangen diese Erfassungsmethoden, bei all ihren spezifischen Ausprägungen, zu einer übereinstimmenden Zustandsbeschreibung der einzelnen Komponenten des Fahrwegs?

Die aufgrund der Korrelationsanalysen gewonnen Erkenntnisse sollen schließlich als grundlegende Aussagen darüber dienen, ob bzw. wie eine Aggregation der einzelnen Messmethoden zu einer gesamtheitlichen Zustandsbeschreibung vorgenommen werden kann.

5.1 Korrelationskoeffizienten und deren Signifikanz

Im Rahmen dieser Arbeit werden Parameter unterschiedlicher Skalenniveaus untersucht. Während sämtlichen vom Gleismesswagen stammenden Analyseformen (Fraktalanalyse, SigModS und sigmaH) eine metrische Skala zu Grunde liegt, sind die Evaluierungen des Georadars ordinal skaliert. Basierend auf diesen Skalenniveaus ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten stochastischer Korrelationsanalysen [Piazolo 2011] zweier statistischer Variablen x und y (Abbildung 66).

X \ Y	metrisch	ordinal	nominal
metrisch	Kovarianz Bravais-Pearson Korrelations- koeffizient	↑	↑
ordinal	←	Rangkorrelation nach Spearman	↑
nominal	←	←	Kontingenz- koeffizient

Abbildung 66: Korrelationsanalysen in Abhängigkeit des Skalenniveaus [Piazolo 2011]

Demzufolge wird für Korrelationsanalysen im Rahmen dieser Arbeit die Rangkorrelation nach Spearman verwendet, welche sowohl für metrische als auch ordinal skalierte Variablen eine gängige Methodik darstellt. Darüber hinaus besitzt diese Analyseform den Vorteil, dass sie auch nicht-lineare Zusammenhänge erkennt und keine Normalverteilung der Daten voraussetzt. Die hier vorgestellten Korrelationsanalysen werden jeweils mit der Filterung *Gültige Länge* (siehe 2.2) durchgeführt, da die oberste Prämisse die Beschreibung von allgemein gültigen Gesetzmäßigkeiten darstellt. Eine parameterspezifisch unterschiedliche Ausprägung in Weichenbereichen, auf Brücken o.ä. würde dabei die Darstellung jener Gesetzmäßigkeiten verzerren.

5.1.1 Der Rangkorrelationskoeffizient nach Spearman

Für die Analysen, welche ordinal skalierte Daten beinhalten, wird der Korrelationskoeffizient von Spearman [Fahrmeir, et al. 2007] verwendet, auch Rangkorrelationskoeffizient genannt. Ein Rangkorrelationskoeffizient ist ein parameterfreies Maß für Korrelationen. Das bedeutet, er misst, wie gut eine beliebig monotone Funktion den Zusammenhang zwischen zwei Variablen beschreiben kann. Annahmen über die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen werden hierbei nicht getroffen. Der Spearman'sche Korrelationskoeffizient ρ_{SP} (auch Spearman'sches *rho*) wird gebildet, indem die Daten in Ränge konvertiert werden, bevor der Korrelationskoeffizient wie folgt berechnet wird:

$$\rho_{SP} = \frac{\sum_i (rg(x_i) - \bar{rg}_x) (rg(y_i) - \bar{rg}_y)}{\sqrt{\sum_i (rg(x_i) - \bar{rg}_x)^2 \sum_i (rg(y_i) - \bar{rg}_y)^2}} = \frac{Cov(rg_x, rg_y)}{\sigma_{rg_x} \sigma_{rg_y}}$$

Formel 2: Korrelationskoeffizient rho nach Spearman [Fahrmeir, et al. 2007]

Dabei ist:

$rg(x_i)$ der Rang von x_i (selbiges gilt für y_i),

\bar{rg}_x der Mittelwert der Ränge von x (selbiges gilt für y),

σ_{rg_x} die Standardabweichung der Ränge von x (selbiges gilt für y) und

$Cov(rg_x, rg_y)$ die Kovarianz von $rg(x)$ und $rg(y)$.

Die Werte des Spearman'schen Korrelationskoeffizienten ρ_{SP} sind dabei wie folgt zu interpretieren:

Wertebereich:	$-1 \leq \rho_{SP} \leq 1$
$\rho_{SP} > 0$	Gleichsinniger monotoner Zusammenhang, Tendenz: x groß \rightarrow y groß; x klein \rightarrow y klein
$\rho_{SP} < 0$	Gegensinniger monotoner Zusammenhang, Tendenz: x groß \rightarrow y klein; x klein \rightarrow y groß
$\rho_{SP} \approx 0$	Kein monotoner Zusammenhang

Ab welcher Größe eines Wertes allerdings von einer statistisch signifikanten Korrelation gesprochen werden kann, hängt sehr stark von der Skalierung der Eingangsdaten und vor allem deren Grundgesamtheit ab. Dementsprechend wird das Signifikanzniveau einer Spearman'schen Korrelation im Folgenden genauer untersucht.

5.1.2 Signifikanzniveau einer Korrelation

Die bereits erwähnten Erklärungen erläutern, dass eine gewisse Korrelation zwischen den Eingangsparametern vorliegt, solange der Korrelationskoeffizient einen Wert ungleich Null annimmt. Ab welchem Wert kann nun jedoch von einer signifikanten Korrelation gesprochen werden? Dazu bedient man sich dem Wahrscheinlichkeitswert (p-value, Abbildung 67), welcher die Wahrscheinlichkeit für das Eintreffen der Null-Hypothese beziffert. Im Rahmen der Korrelationsanalysen beschreibt die Null-Hypothese den Fall der Unabhängigkeit bzw. Unkorreliertheit [Fahrmeir, et al. 2007]. Das Eintreffen dieser Null-Hypothese wird mit einer Wahrscheinlichkeit von $2,2 \cdot 10^{-16}$ beziffert (Abbildung 67), womit

die Nullhypothese verworfen werden muss und eine eindeutige Korrelation nachgewiesen werden kann.

```
Spearman's rank correlation rho
data: Ballast_Fouling and Fraktal_Slope_2_1_Netzweit_Mittelwert_41_X2013
S = 6.509786e+12, p-value < 2.2e-16
alternative hypothesis: true rho is not equal to 0
sample estimates:
rho
-0.2172485 |
```

Abbildung 67: Korrelationsanalyse in R-Project

Generell wird das Signifikanzniveau einer Korrelation sehr stark von der Anzahl der Beobachtungen beeinflusst. Die t-Verteilung (auch Student-Verteilung) verlangt bei Beobachtungen von $n > 30$ einen Wert T, welcher 2,3263 übersteigt, um mit einer Eintreffenswahrscheinlichkeit von mindestens 99 % eine signifikante Korrelation zu bestätigen (Formel 3).

$$t = \text{abs} \left(\frac{\rho_{SP}}{\sqrt{1 - \rho_{SP}^2}} \times \sqrt{n - 2} \right) > 2,3263$$

Formel 3: Signifikanz t-Verteilung

Dementsprechend ist es möglich, für verschiedenste Mengen an Beobachtungen einen kritischen Korrelationsfaktor ρ_{SP} zu ermitteln, welcher gerade noch eine signifikante Korrelation zwischen den Eingangsparametern beschreibt. Je kleiner die Beobachtungsmenge desto höher das geforderte ρ_{krit} für eine bestehende Korrelation. Im Rahmen der in diesem Projekt durchgeführten Korrelationsanalysen stehen für sämtliche Eingangsparameter mindestens 50.000 Beobachtungen zur Verfügung. Das aus Formel 3 resultierende ρ_{krit} ergibt sich folglich zu $\pm 0,0104$.

Kritisches ρ	Beobachtungen n	Wahrscheinlichkeit für Unabhängigkeit (Nullhypothese)	$t_{0,99}(50.000)$
$\pm 0,0104$	50.000	$2,2 \cdot 10^{-16}$	$\pm 2,3263$

Tabelle 4: Ermittlung ρ_{krit} für eine signifikante Korrelation

Es kann somit festgehalten werden, dass die hier durchgeführten Analysen eine statistisch signifikante Korrelation aufweisen, sobald der Spearman'sche Korrelationskoeffizient ρ_{SP} den Wert $\pm 0,0104$ übersteigt.

5.2 Das Georadar und der Gleismesswagen

Im Folgenden werden anhand der erläuterten Methodik mögliche Korrelationen zwischen den Parametern des Georadars und jenen des Gleismesswagens untersucht. Bei den verglichenen Werten handelt es sich um die zeitlich einmalig gemessenen Parameter des Georadars (siehe 3.2.3) und den zeitlich jeweils am nächsten liegenden Werten der Messungen des Gleismesswagens. Die Parameter des Gleismesswagens umfassen dabei die herkömmliche Gleislageanalyse (σ_H und dessen Verschlechterungsrate) sowie die Ergebnisse der Fraktalanalyse der vertikalen Gleisgeometrie.

5.2.1 Georadar vs. herkömmliche Gleislageanalyse (σ_H)

Der bereits nachgewiesene Wert (Tabelle 4) von $\pm 0,0104$ wird im Rahmen der Korrelationsanalyse zwischen Georadar und Gleislage für nahezu jeden Parameter erfüllt. Es kann somit bei den Zusammenhängen von einer statistisch signifikanten Korrelation gesprochen werden. Die Ergebnisse der Korrelationsanalyse zwischen der Standardabweichung der Längshöhe (σ_H) und dessen Verschlechterungsrate (b-Rate) mit den Parametern des Georadars zeigt folgende Ergebnisse (Abbildung 68):

- I Die Parameter *Verlehmung*, *Feuchtigkeit GS* und *Feuchtigkeit GP* beeinflussen sowohl σ_H als auch deren Verschlechterungsrate im gleichen Ausmaß. Eine eindeutige Zuordnung der Schadensbilder zu einem der beiden Gleislageparameter kann daher nicht vorgenommen werden.
- I Die Verschmutzung des Gleisschotters spiegelt sich vor allem in der Standardabweichung der Längshöhe wider.
- I Die Evaluierungen hinsichtlich der Welligkeiten (Gleisplanum sowie Zwischenschicht) zeigen keine konsistenten Erkenntnisse.
- I Werden Tragschichten erkannt, führt dies vor allem zu einer bedeutend besseren Standardabweichung der Längshöhe.

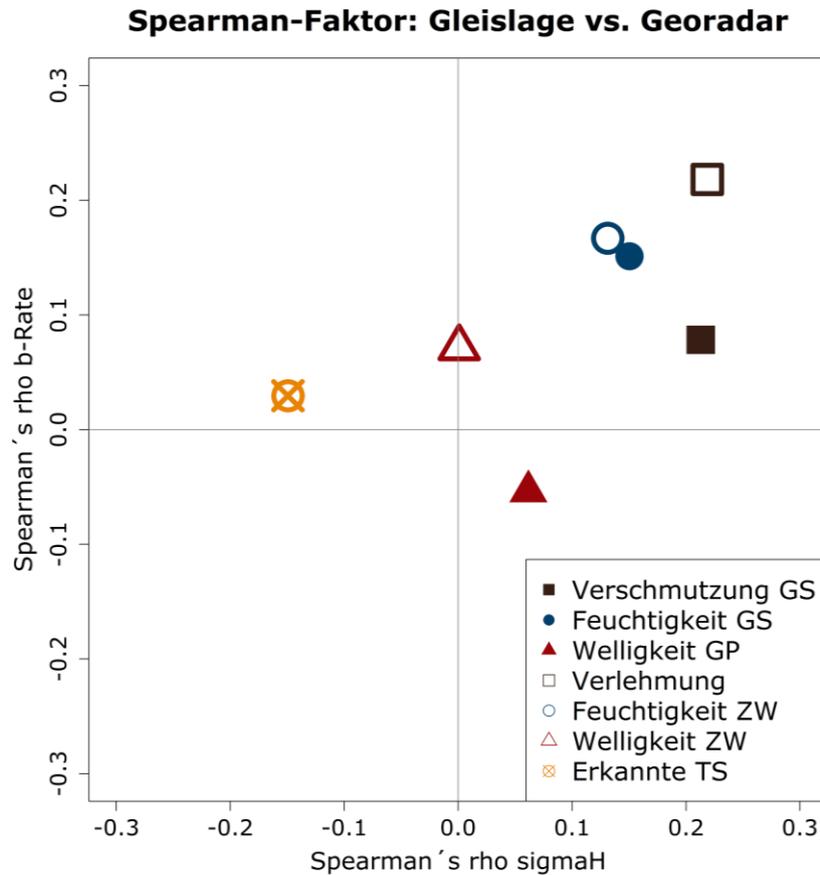


Abbildung 68: Korrelation Georadar und Gleislageverhalten, Detail

Die grafisch dargestellten Ergebnisse werden in Abbildung 69 zusätzlich auch in tabellarischer Form aufgelistet. Hier lässt sich auch eindeutig erkennen, dass der minimal erforderliche Spearman'sche Korrelationskoeffizient von $\pm 0,0104$ in 13 von 14 Fällen erreicht wird. Lediglich zwischen der Standardabweichung der Längshöhe und der Welligkeit der Zwischenschicht besteht keine statistisch signifikante Korrelation.



Abbildung 69: Korrelation Georadar und Gleislageverhalten, Übersicht

Zusammenfassend kann dementsprechend festgestellt werden, dass das gesamt-heitliche Gleislageverhalten stark von den durch das Georadar evaluierten Schadensbildern

beeinflusst ist. Eine Zusecheidung der einzelnen Schadensbilder zu den einzelnen Gleislagparametern (σ_H , Verschlechterungsrate) ist jedoch nur in Ausnahmefällen (*Verschmutzung GS* und *Erkannte Tragschicht*) möglich. Aufgrund der bisherigen Erläuterungen hinsichtlich des Gleislageverhaltens (siehe 3.1.1.2) verwundert dieser Umstand nicht. Jene Identifikation der Schadensbilder soll anhand der Methode der Fraktalanalyse jedoch signifikant verbessert werden.

5.2.2 Georadar vs. Fraktalanalyse

Wie bereits erläutert (siehe 3.1.2.2), soll es die Fraktalanalyse der vertikalen Gleislage ermöglichen, die einzelnen Schadensbilder im Gleiskörper zu identifizieren. Dementsprechend stellt sich die Frage, ob im Rahmen dieser Korrelationsanalyse eindeutigere Trends der einzelnen Schadensbilder ersichtlich sind, als im Vergleich zum Gleislageverhalten. Die in Abbildung 70 dargestellten Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren:

- I Anhand der Evaluierung des Feuchtigkeitsgehalts zeigt sich sehr gut, dass die Fraktalanalyse, wie erhofft, zwischen Problemen im Schotterbett und im Unterbau unterscheiden kann. Während die Feuchtigkeit im Gleisschotter sehr stark mit der mittelwelligen Dimension korreliert, besteht ein starker Zusammenhang zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt in der Zwischenschicht und der langwelligen Dimension.
- I Die Verlehmung des Gleiskörpers zeigt sich als einer der maßgebenden Parameter der Georadarevaluierung und korreliert wie erwartet insbesondere mit der langwelligen Dimension.
- I Auch die Ergebnisse hinsichtlich der Welligkeit bestätigen die Möglichkeiten der Fraktalanalyse, da diese sowohl am Gleisplanum als auch in der Zwischenschicht ausschließlich mit dem langwelligen Sektor korrelieren. Des Weiteren ist es vollkommen nachvollziehbar, dass eine stärkere Korrelation mit der Welligkeit des Gleisplanums vorhanden ist, da jenes eine Ebene höher liegt und damit die Gleislage naturgemäß etwas mehr beeinflusst.
- I Eine erkannte Tragschicht korreliert bedingt auch mit dem mittelwelligen Bereich um einiges mehr als mit dem langwelligen. Dies ist dadurch begründet, dass der Tragschichteinbau eine Unterbausanierung beschreibt, wodurch die positive Auswirkung vordergründig den langwelligen Bereich beeinflusst.
- I Die Verschmutzung des Gleisschotters korreliert stärker mit dem langwelligen Sektor. Dieser Umstand impliziert, dass die Georadarevaluierung in diesem Fall die Verschmutzung des unteren Schotterbetts bzw. der Mischzone mit der Zwischenschicht evaluiert. Dies deckt sich mit amerikanischen Untersuchungen [Sussmann, et al.

2003], welche den Parameter *Ballast Fouling* ebenfalls als in diesem Bereich angesiedelt erachten.

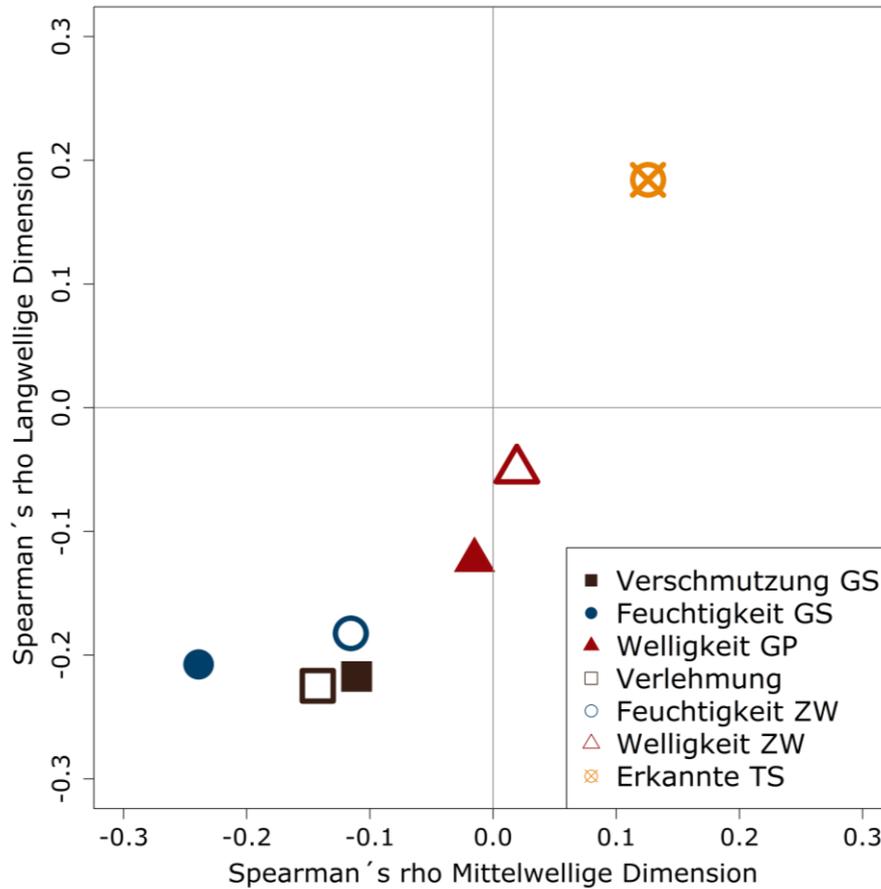


Abbildung 70: Korrelation Georadar und Fraktalanalyse, Detail

Die grafisch dargestellten Ergebnisse werden in Abbildung 71 zusätzlich auch in tabellarischer Form aufgelistet. Hier lässt sich auch eindeutig erkennen, dass der minimal erforderliche Spearman'sche Korrelationskoeffizient von $\pm 0,0104$ in jedem der untersuchten Fälle erreicht wird.



Abbildung 71: Korrelation Georadar und Fraktalanalyse, Übersicht

Zusammenfassend kann somit bestätigt werden, dass es tatsächlich möglich ist, mit Hilfe der Fraktalanalyse unterschiedliche Schadensbilder des Gleiskörpers zu identifizieren. Es bestätigt sich vor allem die Annahme, dass durch die Einteilung der Wellenlängenbereiche in mittelwellig und langwellig erklärt werden kann, ob eine Problematik im Schotterbett oder im Unterbau vorliegt. Das Georadar kann darüber hinaus noch zusätzliche Informationen hinsichtlich Verschmutzung, Ebenheit und Feuchtigkeit liefern.

5.3 Die einzelnen Parameter Fraktalanalyse

Nachdem bereits eine signifikante und darüber hinaus vor allem auch logisch nachvollziehbare Korrelation der einzelnen Aussagen der Fraktalanalyse mit jenen des Georadars nachgewiesen werden konnte, stellt sich nun folgende Frage: Inwieweit weisen die unterschiedlichen Wellenlängenbereiche der Fraktalanalyse Abhängigkeiten zueinander auf? Um diese Frage zu beantworten, wird eine Korrelationsanalyse der Fraktalanalyse vorgenommen, welche auf den ersten Längshöhemessungen beruht, welche im Jahr 2014 gemessen wurden.

Im Rahmen dieser Korrelationsanalyse zeigt sich wie vermutet, dass der mittelwellige Bereich (Abbildung 72, Mitte) sowohl mit dem kurz- als auch dem langwelligen eine gleichermaßen signifikante Korrelation besitzt. Die Abhängigkeit zwischen den kurzen und langen Wellenlängenbereichen fällt hingegen bedeutend geringer aus.

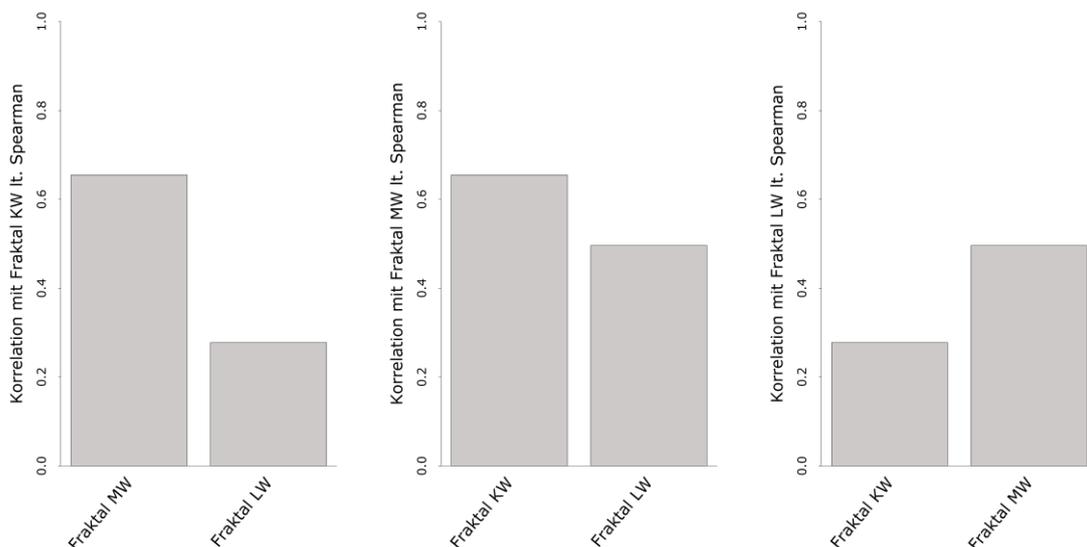


Abbildung 72: Korrelation der einzelnen Parameter der Fraktalanalyse

Daraus kann geschlossen werden, dass der mittelwellige Bereich in den überwiegenden Fällen entweder gemeinsam mit dem kurz- oder langwelligen Bereich eine Ausprägung erfährt. Dies erklärt sich technisch dadurch, dass neben dem normalen zeitlichen

Verschleiß eine übermäßige Schotterbettverschmutzung überwiegend von den folgenden beiden Ursachen dominiert wird:

- I Eine gestörte Interaktion zwischen Schwelle und Schotterbett führt zu einer ungünstigen Kraftübertragung und demzufolge zu einer Überbeanspruchung des Schotterbetts.
- I Ein nicht tragfähiger Untergrund bzw. eine nicht mehr gegebene Trennwirkung zwischen Tragschicht und Schotterbett führt zu einer Durchmischung des Schotterbetts mit aufsteigenden Feinteilen des Untergrunds.

Demzufolge erscheint es vollkommen plausibel, dass der mittelwellige Bereich der Fraktalanalyse in vielen Fällen nicht unabhängig, sondern in Überlagerung mit einem der beiden anderen Wellenlängenbereiche auftritt. Die gemäßigte Korrelation zwischen dem kurz- und langwelligen Bereich ergibt sich durch ein komplettes Systemversagen des gesamten Fahrwegs am Ende der Nutzungsdauer. Dabei ist in vielen Fällen sowohl das Zusammenwirken zwischen Schwelle und Schotter als auch Schotter und Tragschicht gestört.

Demzufolge sollte ein Streckenbereich, welcher lediglich über Problemstellen im Bereich des Zusammenwirkens zwischen Schwelle und Schotter und einen nahezu perfekten Unterbauzustand verfügt, ausschließlich Korrelationen zwischen dem kurz- und mittelwelligen Bereich aufweisen. Ob dies tatsächlich der Realität entspricht lässt sich anhand eines rund 50 km langen Streckenabschnitts untersuchen, welcher ein Alter von ca. zehn Jahren aufweist und mit bituminöser Tragschicht eingebaut wurde. Der Oberbau ist dabei mit konventionellen Betonschwellen ausgeführt.

Die explorativen Analysen (Abbildung 73) belegen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen den kurz- und mittelwelligen Fraktalwerten. Während der langwellige Bereich keinerlei Auffälligkeiten zeigt, geht eine Erhöhung des mittelwelligen Fraktalwerts in den meisten Fällen mit einer Erhöhung des kurzwelligen Bereichs einher. Die einzelnen Parameter der Fraktalanalyse interagieren also entsprechend den realen Bedingungen vor Ort, wonach Problemstellen im Schotterbett – wenn vorhanden – durch eine inadäquate Interaktion zwischen der konventionellen Betonschwelle und dem Schotterbett verursacht werden. Der Unterbau hingegen weist weder im In-Situ Verhalten noch im Rahmen der Fraktalanalyse Problembereiche auf, weswegen etwaige Schädigungen im Schotterbett auch nicht von dieser Komponente verursacht werden.

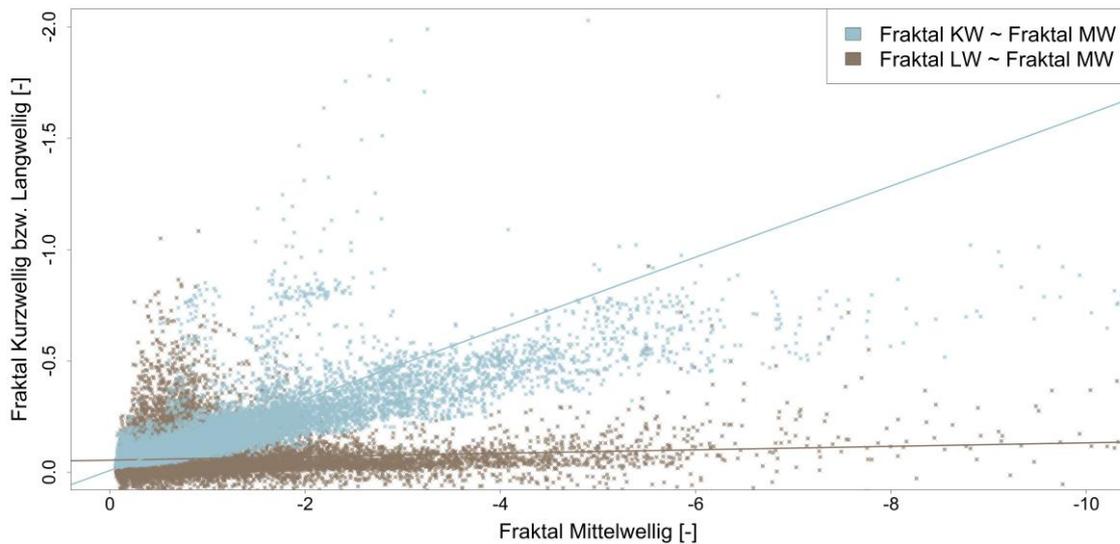


Abbildung 73: Korrelationen Fraktal bei optimalen Unterbaubedingungen

Um das Korrelationsergebnis nicht nur in grafischer, sondern auch in statistischer Form zu belegen, wird zusätzlich auch noch der Spearman'sche Korrelationskoeffizient (Spearman'sches ρ) berechnet (siehe 5.1.1). Dieser Rangkorrelationskoeffizient ist ein parameterfreies Maß für Korrelationen. Das bedeutet, er definiert, wie stark der Zusammenhang zwischen zwei Variablen ist (Tabelle 5).

Korrelierte Variablen	Spearman Faktor
<i>Fraktal Mittelwellig ~ Fraktal Kurzwellig</i>	$\rho_{SP} = 0,8757$
<i>Fraktal Mittelwellig ~ Fraktal Langwellig</i>	$\rho_{SP} = 0,1957$

Tabelle 5: Spearman-Faktor Fraktalanalyse bei optimalen Unterbaubedingungen

Es bestätigt sich somit auch auf Basis der stochastischen Analysen, dass eine sehr starke Korrelation zwischen dem mittelwelligen und dem kurzwelligen fraktalen Sektor vorliegt, während die Korrelation mit dem langwelligen Sektor als vergleichsweise gering erachtet werden kann.

5.4 SigModS vs. Fraktalanalyse

Die in Kapitel 3.1.3 eingeführte Standardabweichung des modifizierten Spursignals (SigModS) beschreibt das Rauschen bzw. eine niederfrequente horizontale Bewegung eines oder beider Schienenstränge. Diese Bewegung vergrößert sich, sobald die Kraftübertragung zwischen Schiene und Schwelle nicht mehr optimal funktioniert. Einerseits beinhaltet

jede horizontale Bewegung auch eine anteilige Bewegung in vertikale Richtung. Andererseits führt eine inadäquate Kraftübertragung zwischen Schiene und Schwelle zwangsläufig zu einer Störung der Interaktion zwischen Schwelle und Schotter. Dementsprechend wird in Abbildung 74 ersichtlich, ob eine Ausprägung in SigModS auch erhöhte Werte im Rahmen der Fraktalanalyse bedingt. Aufgrund der beschriebenen Berechnungsmethodik von SigModS liegt die Vermutung nahe, dass insbesondere mit dem kurzwelligen Bereich der Fraktalanalyse eine Korrelation vorliegt.

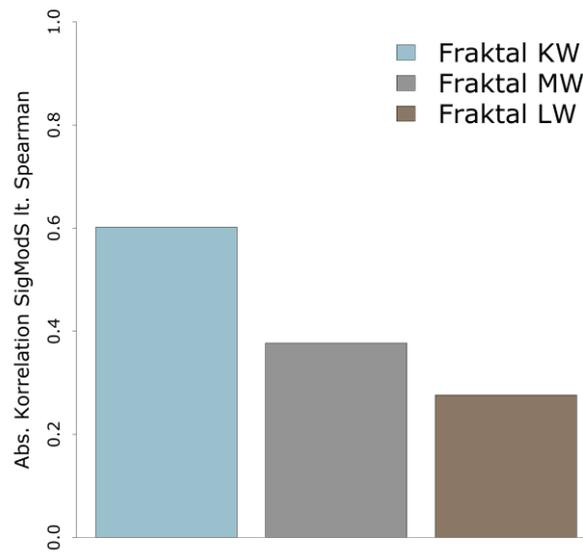


Abbildung 74: Korrelation SigModS vs. Fraktalanalyse

Eben jene Vermutung bestätigt die Korrelationsanalyse, welche wiederum mit dem Spearman-Faktor (siehe 5.1) durchgeführt wird. Diese zeigt, dass die vorliegende Korrelation zwischen SigModS und des kurzwelligen fraktalen Bereichs bedeutend größer ist als jene mit dem mittel- sowie langwelligen fraktalen Bereich. Dementsprechend scheinen diese beiden Parameter dafür geeignet, den Zustand der Schwelle bzw. deren Zusammenwirken mit der Schiene sowie dem Schotterbett zu beschreiben.

6 Aggregation zur Beschreibung des Fahrwegzustands

Eine gesamtheitliche Zustandsbeschreibung des Gleises, welche nichtsdestotrotz bei Bedarf in mehrere, komponentenspezifische Detailebenen gegliedert werden kann, ist eine der wesentlichen Herausforderungen im heutigen Anlagenmanagement Gleis. Dieser Aufbau ermöglicht sowohl eine gesamtheitliche Zustandsbeschreibung als auch eine Aussage darüber, welche Komponente(n) sich für einen schlechten Zustand verantwortlich zeigen. Daher kann nicht nur eine allgemeine Qualitätsbeurteilung des Netzes vorgenommen, sondern auch eine Instandhaltungsplanung durchgeführt werden. Im Folgenden soll neben einer Erläuterung der bisher verwendeten Systeme vor allem die Methodik der in dem vorliegenden Werk erarbeiteten Zustandsbeschreibung diskutiert werden. Diese basiert dabei insbesondere auf den vorgestellten Methoden der Zustandserfassung (siehe 3) sowie den durchgeführten Validierungs- (siehe 4) und Korrelationsanalysen (siehe 5). Dabei sollen insbesondere folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- I Ist es möglich auf Basis der behandelten Erfassungs- bzw. neuen Analysemethoden eine komponentenspezifische Zustandsbeschreibung zu etablieren?
- I Kann diese komponentenspezifische Zustandsbeschreibung sinnvoll zu einer gesamtheitlichen Qualitätsziffer Fahrweg (exkl. Schiene) aggregiert werden?

6.1 Etablierte Qualitätsziffern

Dahingehende Überlegungen beginnen bereits mit einer gewichteten Kombination verschiedener Messsignale in den 1960er Jahren bei der Britischen Bahn [Schramm 1967]. Dieses System, genannt „Neptune“, basiert darauf, dass die Abweichungen der Nulllinie je nach Messsignal mit anderen Gewichtungsfaktoren versehen werden. Schlussendlich kann dadurch eine vergleichbare und gesamtheitliche Zustandsbeschreibung generiert werden (Abbildung 75). Verwendet werden dabei die Gleisverwindung, die Krümmungs- sowie Senkungslinie der beiden Schienen.



Abbildung 75: Fehlerbewertungssystem „Neptune“ [Schramm 1967]

In den meisten Ländern wird, wie bereits erläutert (siehe 3.1.1), die Standardabweichung der Längshöhe verwendet, um die Instandhaltung zu planen. Zunehmend wurden in den letzten Jahren jedoch auch TQIs (Track Quality Indices) entwickelt, um eine gesamtheitliche Beschreibung des Fahrwegs zu gewährleisten. Die Eingangsfaktoren bleiben dabei konstant (Gleislage vertikal und horizontal, Spurweite und Verwindung) und werden als deren Standardabweichungen berücksichtigt. Der Unterschied der verschiedenen Ziffern liegt in den jeweiligen Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Parameter und der Einflusslänge. Stellvertretend sollen an dieser Stelle der J-Koeffizient [Madejski & Grabczyk 2002] und der Track Geometry Index (TGI) [Berawi, et al. 2010] Erwähnung finden (Formel 4), welchen eine Einflusslänge von 100 m bzw. 200 m zu Grunde liegt.

J - Koeffizient

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5 * S_e}{3,5}$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i=1} - \bar{x})^2}$$

S_z StAbw Vertikale Gleislage
 S_y StAbw Horizontale Gleislage
 S_w StAbw Verwindung
 S_e StAbw Spurweite

Track Geometry Index

$$TGI = \frac{2 * UI + TI + GI + 6 * AI}{10}$$

$$GI, TI, AI, UI = 100 * e^{-\frac{(\sigma_{mes} - \sigma_n)}{(\sigma_{maint} - \sigma_n)}}$$

UI Vertikale Gleislage
 AI Horizontale Gleislage
 TI Verwindung
 GI Spurweite
 σ_{mes} StAbw akt. Messwert
 σ_n StAbw Messwert Neulage
 σ_{maint} StAbw Eingriffsschwelle

Formel 4: Track Geometry Index und J-Koeffizient

Eine bemerkenswerte Gemeinsamkeit der beiden Qualitätsziffern wird ersichtlich, wenn man den Parameter Spurweite genauer betrachtet. Sowohl innerhalb des J-Koeffizienten (S_e) als auch im Track Geometry Index (GI) wird dieser Parameter im Vergleich zur Gleislage unterrepräsentiert. Die Erklärung dafür findet sich in einem bereits behandelten Phänomen: Die Spurweite tendiert dazu, in Bogenbereichen größere Werte anzunehmen. Teilweise wird eine Spurerweiterung in Bogenbereichen absichtlich eingebaut, um eine bessere Bogenläufigkeit zu gewährleisten. Eine berechnete Standardabweichung des Spursignals wird dabei maßgeblich von diesen langwelligen Spurerweiterungen beeinflusst. Deshalb wird damit nicht der Schwellenzustand, sondern die Präsenz von Bogenbereichen erfasst. Im Rahmen dieser Arbeit (siehe 3.1.3) konnte diese Problematik bereits durch die modifizierte Standardabweichung der Spur (SigModS) gelöst werden. Im Rahmen des J-Koeffizienten sowie des Track Geometry Index wurde Abhilfe geschaffen, indem das Spurweitensignal eine niedrigere Gewichtung erfährt, um eine Verzerrung der Aussagen in Bogenbereichen zu reduzieren.

In ihrer neuesten Ausfertigung findet sich auch innerhalb der EN 13484-6 [EN 13848-6 2014] ein Vorschlag für einen Track Quality Index. Die spezifische Bezeichnung lautet *Kombinierte Standardabweichung* (CoSD) und soll es ermöglichen, „die Bewertung der gesamten Gleislagequalität eines Gleisabschnittes“ [EN 13848-6 2014] vorzunehmen. Auch hier handelt es sich um die bereits erwähnten Parameter, wobei dem Infrastrukturbetreiber freigestellt wird, welche Gewichtungsfaktoren zu verwenden sind.

$$CoSD = \sqrt{w_{\overline{AL}} * SD_{\overline{AL}}^2 + w_G * SD_G^2 + w_{CL} * SD_{CL}^2 + w_{\overline{LL}} * SD_{\overline{LL}}^2}$$

SD	Standardabweichung der individuellen Parameter
w	Gewichtungsfaktor der individuellen Parameter
\overline{AL}	Mittelwert beider Schienen - Richtung (horizontale Gleislage)
G	Spurweite
CL	Überhöhung
\overline{LL}	Mittelwert beider Schienen - Längshöhe (vertikale Gleislage)

Formel 5: Vorschlag TQI laut EN 13484-6

Diese Track Quality Indices ermöglichen eine Beschreibung der Gleislagequalität – je nach Wahl der Gewichtungsfaktoren entsprechen diese mehr oder weniger dem Verhalten der Gleislage. Der Zustand des Fahrwegs bzw. insbesondere dessen einzelner Komponenten lässt sich jedoch nicht ausreichend eruieren. Dementsprechend soll – basierend auf den eingeführten Analysemethoden, deren Validation und Korrelation – im Folgenden versucht werden, eine derartige komponentenspezifische Zustandsbeschreibung zu etablieren.

6.2 Komponentenspezifische Zustandsbeschreibung

Für die Zustandserfassung des Fahrwegs werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Analysemethoden verwendet (siehe 3). Mehrere davon wurden am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft (weiter-)entwickelt. Andere beschreiben bereits gängige Verfahren, welche jedoch erstmals im Kontext einer komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung des Eisenbahnfahrwegs verwendet werden. Im Folgenden sollen diese Analysemethoden plausibel kombiniert werden, um den komponentenspezifischen Zustand von Schwelle, Schotter und Unterbau beschreiben zu können. Diese Verknüpfung basiert dabei auf den Ergebnissen des Validierungsprozesses (siehe 4) sowie den stochastischen Korrelationsanalysen (siehe 5). Die Methodik der Zustandsbeschreibung verwendet historische Messdaten und daraus kalkulierte Verschlechterungsraten, um den bisherigen und zukünftigen Verlauf des Zustands zu berücksichtigen. Da die Ergebnisse des Georadars in der vorgestellten Methodik einen Einflussparameter darstellen, wird die Aggregationsme-

thodik für den Zustand im Jahr 2014 durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt die vorhandenen Georadarevaluierungen vorliegen. Die Evaluierungen mittels Georadar wurden dabei nicht für das gesamte Netz vorgenommen, weswegen sich die erarbeitete Methodik der Zustandsbeschreibung auf 1200 km der rund 4000 im TUG-Netz (siehe 2.2) befindlichen Kilometer bezieht. Eine Sensitivitätsanalyse sollte jedoch zeigen, ob bzw. wie es möglich ist, diese Zustandsbeschreibung auf die gesamte Netzlänge auszuweiten, wenn man lediglich Informationen benutzt, welche netzweit und in Form von Zeitreihen verfügbar sind.

6.2.1 Schwellenzustand

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Schwellenzustand durch die folgenden Parameter definiert:

- I Kraftschluss zwischen Schiene und Schwelle (Schienenbefestigung)
- I Materialzustand bzw. Materialermüdung (Risse, Abbröckelungen, etc.)
- I Zustand und Funktionsfähigkeit der Schwellenunterseite und der damit verbundenen Lastübertragung zwischen Schwelle und Schotter

Die Eigenschaften und vor allen Dingen deren Verhalten über die Zeit hängen – wie bereits nachgewiesen – naturgemäß maßgeblich von den verwendeten Schwellen ab (siehe 4.1.1 und 4.1.2.2). Im Rahmen des Validierungsprozesses (siehe 4) sowie der Korrelationsanalysen (siehe 5) zeigt sich darüber hinaus, dass die beiden erstgenannten Eigenschaften mit Hilfe der modifizierten Standardabweichung der Spur (SigModS) beschrieben werden können. Für den letztgenannten Parameter bestätigt sich der kurzweilige Fraktalwert als jenes Qualitätssignal, welches in der Lage ist, übermäßige vertikale Bewegungen der Schwelle und damit vorrangig die Interaktion zwischen Schotter und Schwelle zu beschreiben (siehe 5.3 und 5.4).

Die Beschreibung des Schwellenzustands SZ_m hinsichtlich der unterschiedlichen Evaluierungsmethodiken ergibt sich damit von selbst, da in diesem Fall die beiden Evaluierungsmethodiken über je einen Parameter verfügen. Der Zustand laut Evaluierungsmethodik ergibt sich durch den Wert N , welcher durch einen Mittelwert der Jahre 2010 bis 2014 oder seit der letzten Instandhaltungsmaßnahme oder Erneuerung repräsentiert wird. Dieser Wert wird normiert auf den möglichen Maximalwert, welcher durch das 99 %-Quantil aller Werte beschreiben wird (Formel 6).

$$SZ_m = \left(1 - \frac{N_m}{Max_m}\right) * 100 \quad ZZ_{Schwelle} = \sum_{m=1}^n SZ_m * \psi_m$$

- SZ_m *Schwellenzustand laut Evaluierungsmethodik m*
- N_m *Wert der Evaluierungsmethodik m*
- Max_m *Maximalwert der Evaluierungsmethodik m*
- ψ_m *Gewichtungskoeffizient für Gesamtzustand Schwelle der Evaluierungsmethodik m*
- ZZ *Zustandszahl*

Formel 6: Zustandszahl Schwelle

Die essentielle Frage hinsichtlich der Zustandsbeschreibung der Komponente Schwelle ist damit jene nach den Gewichtungsfaktoren ψ der beiden Qualitätssignale bzw. Evaluierungsmethodiken. Dieser ergibt sich anhand der drei oben angeführten Parameter zur Zustandsbeschreibung der Schwelle. Wie bereits erläutert, lassen sich die beiden erstgenannten durch SigModS und der letztgenannte durch den kurzwelligen Fraktalwert beschreiben. Demzufolge ergibt sich auch eine Gewichtung ψ von zwei Drittel für die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (SigModS). Da der kurzwellige Fraktalwert vorrangig einen von drei Parametern beschreibt, wird dieses Qualitätssignal mit einem Drittel gewichtet (Tabelle 6).

Evaluierungsmethodik	Max Wert
Fraktalanalyse	
Fraktal KW	-2,54 (99% Quantile)

Evaluierungsmethodik	Max Wert
Spurweite	
SigModS	2,16 (99% Quantile)

$\psi = 33\%$

$\psi = 67\%$

}

ZZ_{Schwelle}

Tabelle 6: Zusammensetzung Zustandszahl Schwelle

Betrachtet man das netzweite Verhalten der beiden normierten Qualitätssignale, lässt sich in beiden Fällen eine linksschiefe Verteilung erkennen (Abbildung 76). Diese Verteilung erscheint plausibel, wenn man bedenkt, dass sich der Großteil der Querschnitte in einem guten und sicheren Zustand befindet bzw. befinden muss. Dieser Umstand erfordert daher auch zwingend eine linksschiefe Verteilung der Werte. Dieser Effekt sollte bzw. wird sich für sämtliche weitere Verteilungen von netzweit analysierten Qualitätssignalen und Zustandsbeschreibungen einstellen.

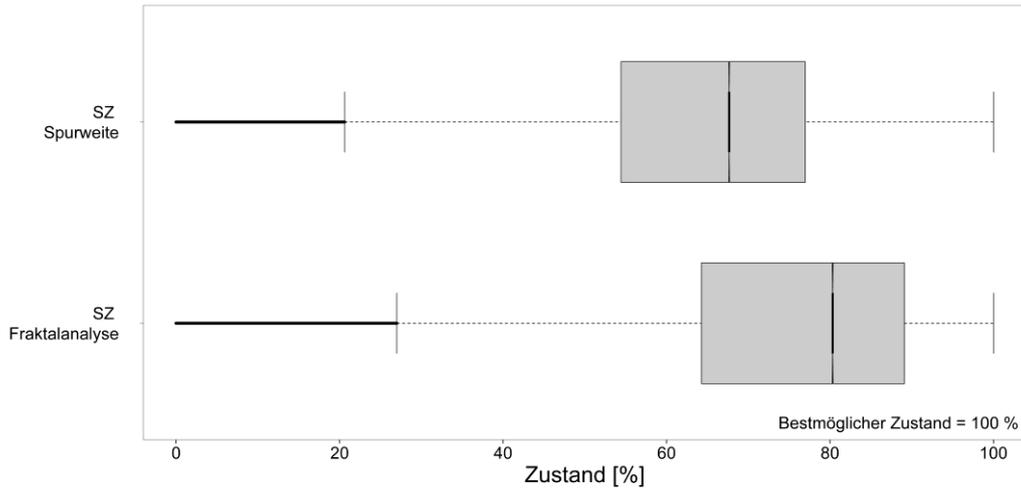


Abbildung 76: Verteilung der Qualitätssignale Schwelle

Damit stellt sich ein entsprechender Zustand der Komponente Schwelle über das gesamte Streckennetz ein, welcher in Abbildung 77 dargestellt wird. Naturgemäß ergibt auch die Superposition der beiden Evaluierungsmethoden eine linksschiefe Verteilung, deren Median einen Wert von 71 % einnimmt. Eine eingehende Analyse des Schwellenzustands wird dabei im Verlauf dieser Arbeit als Vergleich zu den beiden verbleibenden Komponenten Schotter und Unterbau durchgeführt.

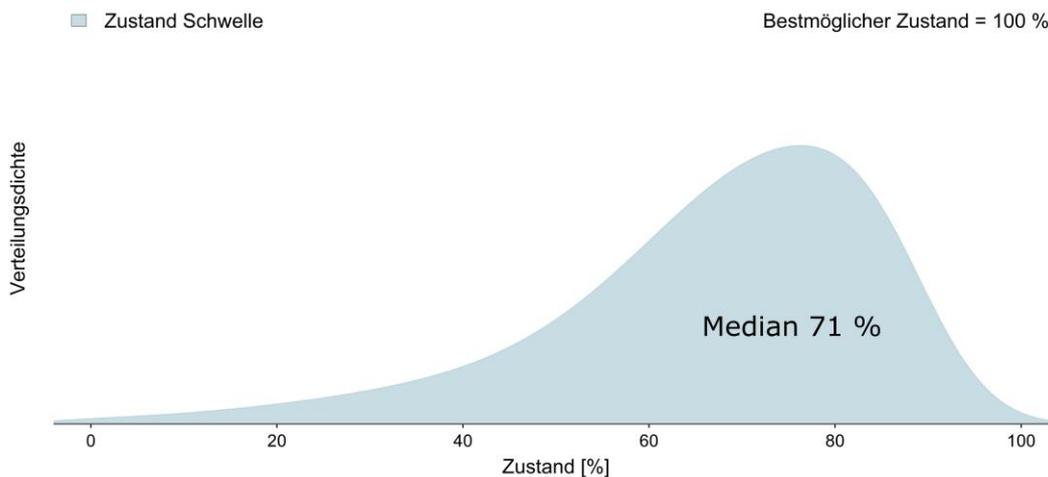


Abbildung 77: Zustandszahl Schwelle

6.2.2 Schotterzustand

Auch der Zustand dieser Komponente wird prinzipiell nach demselben Algorithmus entwickelt. Die unterschiedlichen Evaluierungsmethoden (Georadar, Fraktalanalyse, Gleis-

lageanalyse) verfügen dabei jedoch über jeweils mehrere Bewertungsparameter. Dementsprechend verläuft die Aggregation des Komponentenzustands in zwei Stufen (Formel 7). Anfangs wird der Schotterzustand hinsichtlich der einzelnen Evaluierungsmethoden (BZ_m) anhand der Gewichtungparameter ε ermittelt. Der Wert N wird dabei einerseits von den Werten der Georadar-Parameter (siehe 3.2) sowie der Verschlechterungsrate b (siehe 3.1.1) repräsentiert. Im Falle der Fraktalanalyse (siehe 3.1.2) sowie der Standardabweichung der vertikalen Gleislage (siehe 3.1.1) wird ein Mittelwert der Jahre 2010 bis 2014 oder seit der letzten Instandhaltungsmaßnahme bzw. Erneuerung gebildet. Diese Zustandsbewertungen BZ_m werden anschließend mit den Gewichtungsfaktoren γ in eine komponentenspezifische Zustandszahl überführt.

$$BZ_m = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{N_{m,i}}{Max_{m,i}} * \varepsilon_{m,i}\right) * 100 \quad ZZ_{Schotter} = \sum_{m=1}^n BZ_m * \gamma_m$$

BZ_m	Schotterzustand laut Evaluierungsmethodik m
$N_{m,i}$	Wert des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
$Max_{m,i}$	Maximum des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
$\varepsilon_{m,i}$	Gewichtungskoeffizient für Schotter des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
γ_m	Gewichtungskoeffizient für Gesamtzustand Schotter der Evaluierungsmethodik m
ZZ	Zustandszahl

Formel 7: Zustandszahl Schotter

Die Gewichtungsfaktoren ε werden dabei auf dem Validierungsprozess sowie den Korrelationsanalysen basierend ermittelt. Im Rahmen der Untersuchungen hinsichtlich des Georadars konnte herausgefunden werden, dass vorrangig die Feuchtigkeit und die Verschmutzung des Gleisschotters Auskunft über den Schotterzustand geben (siehe 4.2.3 und 5.2). Dabei wurde auch auffällig, dass das Beurteilungskriterium *Verschmutzung Gleisschotter* insbesondere die Übergangsschicht (Mischzone) zwischen Schotter und Gleisplanum beschreibt, weswegen dieses Kriterium hier eine geringere Gewichtung erfährt. Insgesamt hat das Georadar seine Stärken eher im Bereich des Unterbaus als in der Beschreibung des Schotterzustands, was sich dementsprechend auf den Gewichtungsfaktor γ auswirkt (Tabelle 7).

Evaluierungsmethodik Georadar		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung ε [%]
Verschmutzung GS	4	28
Feuchtigkeit GS	5	61
Welligkeit GP	6	4
Verlehmung	2	8
Feuchtigkeit ZW	5	0
Welligkeit ZW	6	0

$\gamma = 25\%$

Evaluierungsmethodik Fraktalanalyse		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung ε [%]
Fraktal MW	-12 (99% Quantile)	80
Fraktal LW	-1,5 (99% Quantile)	20

$\gamma = 40\%$

Evaluierungsmethodik Gleislageanalyse		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung ε [%]
sigmaH	2,2 (99% Quantile)	60
b-Rate (sigmaH)	0,73 (99% Quantile)	40

$\gamma = 35\%$

ZZSchotter

Tabelle 7: Zusammensetzung Zustandszahl Schotter

Hinsichtlich der Evaluierungsmethodik Fraktalanalyse konnte klar festgestellt werden, dass die mittelwellige fraktale Dimension den Schotter- und die langwellige fraktale Dimension den Unterbauzustand beschreibt. Die gewählte 80 - 20 Gewichtung ergibt sich daraus, dass zwischen diesen beiden Komponenten immer auch eine gewisse Wechselwirkung besteht, welche nicht gänzlich vernachlässigt werden sollte. Die herkömmliche Gleislageanalyse (siehe 3.1.1) findet ebenfalls Anwendung in der Beschreibung des Schotterzustands, da diese die vertikale Gleislage an sich abdeckt. Hierbei wird der Standardabweichung der Längshöhe eine etwas höhere Bedeutung beigemessen als deren Verschlechterungsrate, welche eher den langfristigen Setzungen zugeordnet werden kann [Holzfeind 2009].

Für den Schotterzustand hinsichtlich der einzelnen Evaluierungsmethodiken BZ_m ergeben sich damit Verteilungen, welche in Abbildung 78 dargestellt sind. Auch hier findet sich wieder in sämtlichen Boxplots die bereits erläuterte linksschiefe Verteilung. Die Bewertung des Georadars – vorrangig definiert durch die Feuchtigkeit des Schotters – weist dabei einen vergleichsweise schlechteren Zustand aus, während die Fraktalanalyse den Schotterzustand etwas besser beurteilt. Der Grund liegt in der durch die Fraktalanalyse bewerteten Schotterverschmutzung, welche sich vor allem am Ende der Nutzungsdauer verschlechtert, wenn das Gesamtsystem bereits gestört ist.

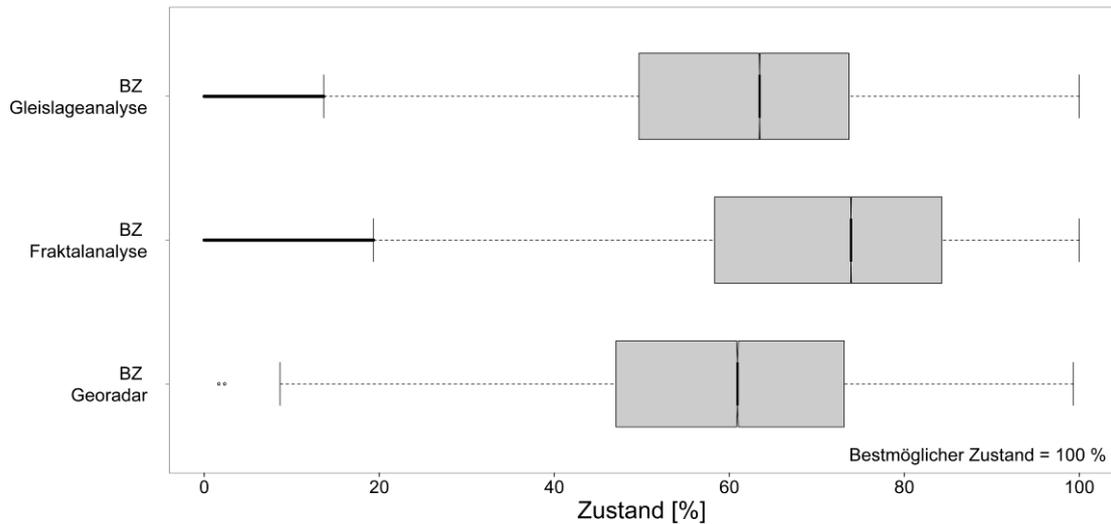


Abbildung 78: Verteilung der Evaluierungsmethodiken Schotter

Die Superposition der drei Evaluierungsmethodiken bestätigt wiederum die links-schiefe Verteilung des netzweiten Zustands (Abbildung 79). Mit einem Medianwert von 63 % zeigt sich der Schotterzustand jedoch schlechter gegenüber jenem der Schwelle.

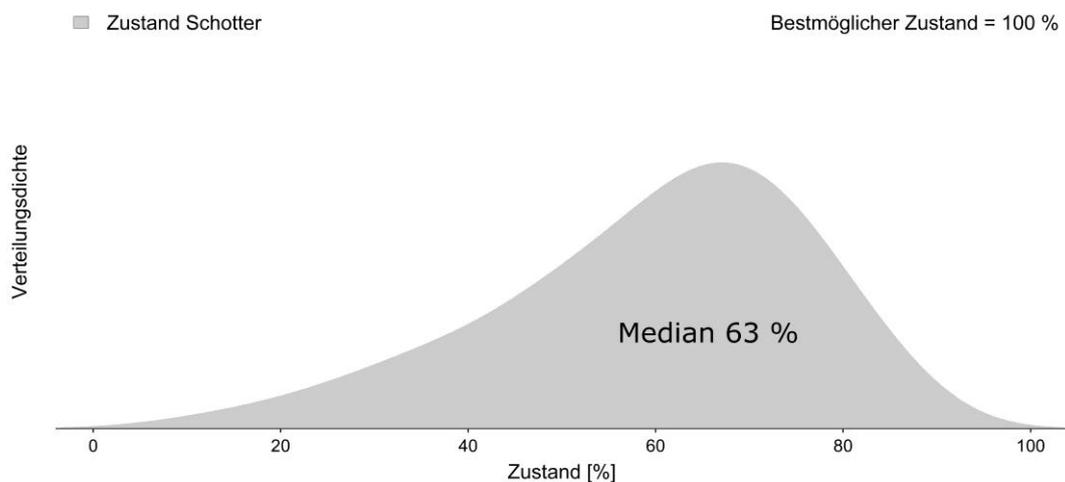


Abbildung 79: Zustandszahl Schotter

6.2.3 Unterbauzustand

Analog zum Komponentenzustand der Schwelle und des Schotters wird auch der Unterbauzustand aggregiert. Die unterschiedlichen Evaluierungsmethodiken verfügen dabei, wie bereits bei der Zustandsbeschreibung Schotter, über jeweils mehrere Bewertungsparameter. Dementsprechend verläuft die Aggregation des Komponentenzustands wiederum in zwei Stufen (Formel 8). Anfangs wird der Schotterzustand hinsichtlich einzelner

Evaluierungsmethodiken (UZ_m) anhand der Gewichtungparameter δ ermittelt. Der Wert N wird dabei einerseits von den Werten der Georadar-Parameter (siehe 3.2) sowie der Verschlechterungsrate b (siehe 3.1.1) repräsentiert. Im Falle der Fraktalanalyse (siehe 3.1.2) sowie der Standardabweichung der vertikalen Gleislage (siehe 3.1.1) wird ein Mittelwert der Jahre 2010 bis 2014 oder seit der letzten Instandhaltungsmaßnahme oder Erneuerung gebildet. Diese Zustandsbewertungen UZ_m werden anschließend mit den Gewichtungsfaktoren β in eine komponentenspezifische Zustandszahl Unterbau überführt.

$$UZ_m = \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{N_{m,i}}{Max_{m,i}} * \delta_{m,i} \right) * 100 \quad ZZ_{\text{Unterbau}} = \sum_{m=1}^n UZ_m * \beta_m$$

UZ_m	Unterbauzustand laut Evaluierungsmethodik m
$N_{m,i}$	Wert des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
$Max_{m,i}$	Maximum des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
$\delta_{m,i}$	Gewichtungskoeffizient für Unterbau des Bewertungsparameters i der Evaluierungsmethodik m
β_m	Gewichtungskoeffizient für Gesamtzustand Unterbau der Evaluierungsmethodik m
ZZ	Zustandszahl

Formel 8: Zustandszahl Unterbau

Die Gewichtungskoeffizienten δ ergeben sich dabei insbesondere für die Bewertungsparameter des Georadars wiederum aus dem bereits durchgeführten Validierungsprozess (siehe 4) sowie den Korrelationsanalysen (siehe 5). Hinsichtlich der Fraktalanalyse sowie der Gleislageanalyse drehen sich die Gewichtungen im Vergleich zum Schotter um. Der Unterbau wird also im Rahmen der Fraktalanalyse vorrangig von der langwelligen Dimension beschrieben. Hinsichtlich der Gleislageanalyse erfährt die Verschlechterungsrate eine etwas höhere Gewichtung als die Standardabweichung der Längshöhe (σ_H) selbst. Wie bereits eingehend erläutert (siehe 3.1.1), wird die Standardabweichung der Längshöhe (σ_H) vorrangig durch die Amplituden der vertikalen Gleisgeometrie beeinflusst. Dementsprechend ist ihre Aussagekraft – insbesondere hinsichtlich des Unterbauzustands – vermindert, weswegen hier auch eine dementsprechend geringe Gewichtung β gewählt wird (Tabelle 8).

Das Georadar hingegen zeigt vor allem im Bereich des Eisenbahnunterbaus seine Stärken, weswegen diese Evaluierungsmethodik hier auch eine höhere Gewichtung β erfährt als in der Bewertung des Schotterzustands. Die Validierung sowie das Ergebnis der Korrelationsanalysen weisen darauf hin, dass die Parameter *Verlehmung* und *Feuchtigkeit Zwischenschicht* einen großen Einfluss auf das Unterbauverhalten besitzen. Dementsprechend werden auch die Gewichtungskoeffizienten δ gewählt (Tabelle 8).

Evaluierungsmethodik Georadar		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung δ [%]
Verschmutzung GS	4	19
Feuchtigkeit GS	5	6
Welligkeit GP	6	16
Verlehmung	2	29
Feuchtigkeit ZW	5	23
Welligkeit ZW	6	6

Evaluierungsmethodik Fraktalanalyse		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung δ [%]
Fraktal MW	-12 (99% Quantile)	20
Fraktal LW	-1,5 (99% Quantile)	80

Evaluierungsmethodik Gleislage		
Bewertungsparameter	Max Wert	Gewichtung δ [%]
sigmaH	2,2 (99% Quantile)	40
b-Rate (sigmaH)	0,73 (99% Quantile)	60

Tabelle 8: Zusammensetzung Zustandszahl Unterbau

Die Zustandsbeschreibung für den Unterbau der unterschiedlichen Evaluierungsmethodiken UZ_m wird in Abbildung 80 illustriert. Wie gewohnt kommt es zu einer linksschiefen Verteilung, wobei die Gleislageanalyse einen marginal schlechteren Zustand als die Fraktalanalyse und das Georadar ausweist.

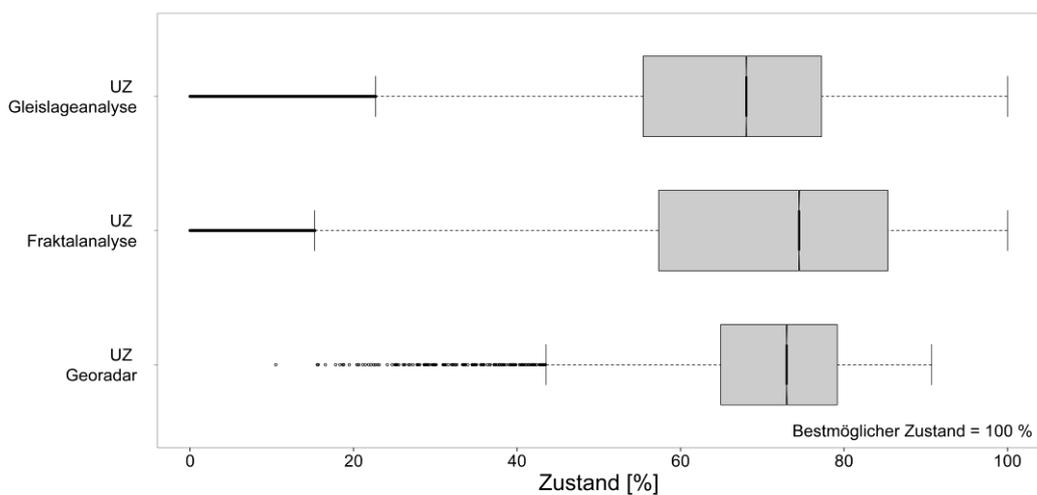


Abbildung 80: Verteilung der Evaluierungsmethodiken Unterbau

Mit einem Medianwert von 69 % zeigt sich die Mehrheit der Streckenabschnitte in gutem Zustand (Abbildung 81). Dies scheint dem realen netzweiten Zustand des Unterbaus zu entsprechen, da auf rund 20 % der 4000 in der TUG-Datenbank befindlichen Kilometer in den letzten 20 Jahren eine Unterbausanierung durchgeführt wurde. Demzufolge sollte mittlerweile im österreichischen Hauptnetz das Gros an Bereichen schlechten Unterbaus bereits saniert sein. Nichtsdestotrotz finden sich natürlich auch Querschnitte, welche noch immer oder eventuell schon wieder über einen inadäquaten Unterbauzustand verfügen. Dies betrifft vor allem jene Querschnitte, die im Rahmen der gegenständlichen Zustandsbewertung einen Wert kleiner 50 % aufweisen.

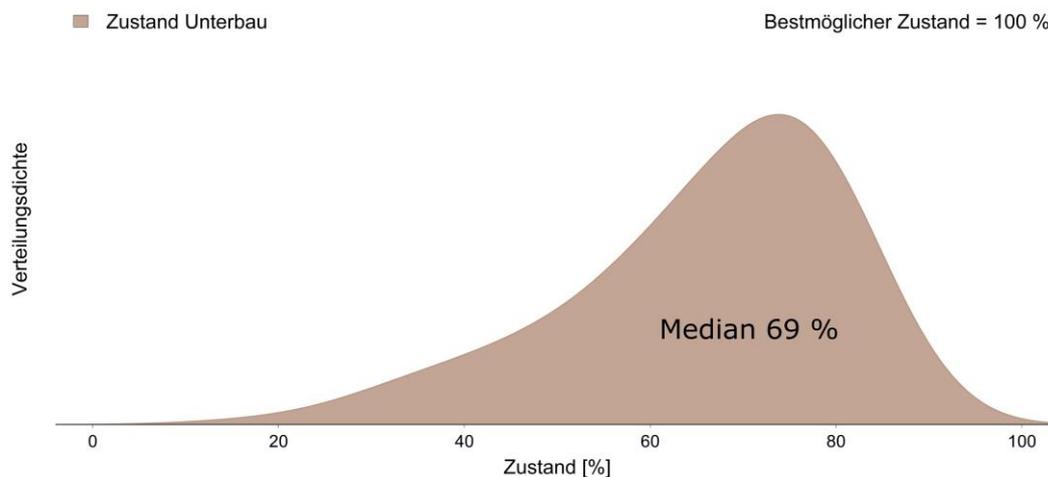


Abbildung 81: Zustandszahl Unterbau

6.2.4 Sensitivitätsanalyse der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung

Nach deren Aggregation sollen die komponentenspezifischen Zustandsbeschreibungen im Folgenden einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. Einerseits, um die Robustheit der Methodik zu überprüfen und andererseits, da die Grundgesamtheit des Datensatzes durch die Berücksichtigung der Georadar-Informationen maßgeblich reduziert wird. Dies ergibt sich aus den nicht flächendeckend vorhandenen Georadar-Informationen (siehe 3.2), wodurch im Aggregationsalgorithmus die Zustandsbeschreibung für den kleinsten gemeinsamen Nenner an Daten exerziert wird. Nichtsdestotrotz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Methodik der Zustandsbeschreibung mit den Georadar-Informationen vorgenommen, da durch das Mehr an Bewertungsparametern eine bessere Detailtreue und sicherere Ergebnisse erzielt werden können. Zudem ist die Stichprobe mit mehr als 1000 befahrenen Kilometern (entspricht rund einem Viertel des Gesamtnetzes) bei Weitem ausreichend um die Methodik zu erarbeiten.

Dennoch soll überprüft werden, ob eine Exklusion der Georadar-Information zu vergleichbaren Ergebnissen führt. Dadurch kann die Sensitivität der Ergebnisse überprüft und zugleich eine netzweite Abdeckung der Zustandsbeschreibung erreicht werden. Da die Bewertungen des Georadars in die Komponentenbeurteilung Schotter und Unterbau einfließen, werden auch diese beiden näher betrachtet. Zuerst ist es notwendig die Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Evaluierungsmethodiken der einzelnen Komponentenbeurteilungen (Tabelle 7 und Tabelle 8) zu modifizieren. Die Evaluierungsmethodik Georadar wurde dabei jeweils auf 0 gesetzt. Die beiden anderen Evaluierungsmethodiken wurden im selben Verhältnis dahingehend erhöht, sodass sie wiederum eine Summe von 1 ergeben (Abbildung 82).

	Schotter		Unterbau
$Y_{Georadar}$	$0,25 \rightarrow 0$		$\beta_{Georadar}$
$Y_{Fraktal}$	$0,4 \rightarrow 0,53$		$0,4 \rightarrow 0$
$Y_{Gleislage}$	$0,35 \rightarrow 0,47$		$\beta_{Fraktal}$
			$0,4 \rightarrow 0,67$
			$\beta_{Gleislage}$
			$0,2 \rightarrow 0,33$

Abbildung 82: Modifizierung der Gewichtungsfaktoren für die Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen der Auswertungen werden dabei der etablierte und der modifizierte Komponentenzustand verglichen. Der modifizierte Komponentenzustand verfügt dabei über zwei unterschiedliche Datenfilterungen. Datensatz 1 bezieht sich dabei auf dieselbe Grundgesamtheit wie der herkömmliche Komponentenzustand, beschreibt also jene Querschnitte, welche einer Georadarbefahrung unterzogen wurden, ohne jedoch die Informationen des Georadars zu berücksichtigen. Datensatz 2 bezieht sich hingegen auf das gesamte TUG-Netz (siehe 2.2) und beschreibt daher eine weitaus größere Grundgesamtheit an Daten (Tabelle 9). Damit wird auch bereits gezeigt, dass für die zukünftige Verwendung der erarbeiteten Methodik die Möglichkeit besteht, diese ohne Georadar-Informationen auf das gesamte Streckennetz anzuwenden.

Datensatz	Anzahl Querschnitte	Medianwert Schotter [%]	Medianwert Unterbau [%]
<i>Komponentenzustand</i>	212.742	63	69
<i>Komponentenzustand Modifiziert (Datensatz 1)</i>	212.742	64	68
<i>Komponentenzustand Modifiziert (Datensatz 2)</i>	731.600	66	71

Tabelle 9: Ergebnisse Sensitivitätsanalyse

Die Ergebnisse der durchgeführten Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Methodik ausgesprochen robust erscheint. Vor allem zwischen dem etablierten Komponentenzustand und dem *modifizierten Komponentenzustand Datensatz 1* besteht nahezu kein Unterschied. Dies gilt sowohl für die Komponente Schotter als auch Unterbau (Tabelle 9). Darüber hinaus zeigt auch der *modifizierte Komponentenzustand Datensatz 2* lediglich eine marginale Verschiebung der Ergebnisse, obwohl dieser auf einer Grundgesamtheit mit der vierfachen Anzahl an Daten basiert. Auffällig zeigt sich dabei, dass bei Verwendung des Datensatzes 2, also dem gesamten vorhandenen Streckennetz der TUG-Datenbank, die Qualität etwas zunimmt. Dies könnte eventuell daran liegen, dass Georadarbefahrungen eher auf Strecken unternommen wurden, welche bekanntermaßen schwierige Rahmenbedingungen aufweisen. Nichtsdestotrotz handelt es sich hierbei um eine Verbesserung von lediglich 2 %, weswegen die verschiedenen Komponentenzustände (etabliert, modifiziert Datensatz 1 und modifiziert Datensatz 2) als zueinander ähnlich betrachtet werden können.

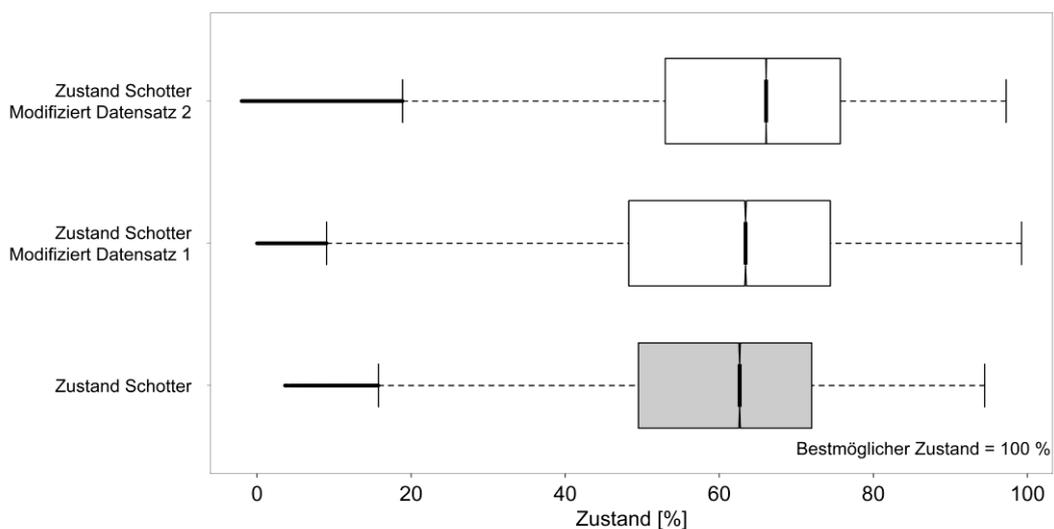


Abbildung 83: Sensitivitätsanalyse, Zustand Schotter

Diese Ähnlichkeit der Verteilungen zeigt sich auch im Rahmen der Analyse des Zustands der Komponente Schotter mittels Boxplots (Abbildung 84). Hier zeigt sich, dass die jeweiligen Datensätze auch unabhängig vom Medianwert eine ähnliche Verteilung aufweisen. Die Veränderung durch die Modifizierung der Gewichtungen (Abbildung 82) bleibt insbesondere beim Komponentenzustand Schotter gering, da hier die Georadar-Informationen ohnehin einen geringeren Einfluss besitzen, als dies beim Unterbau der Fall ist.

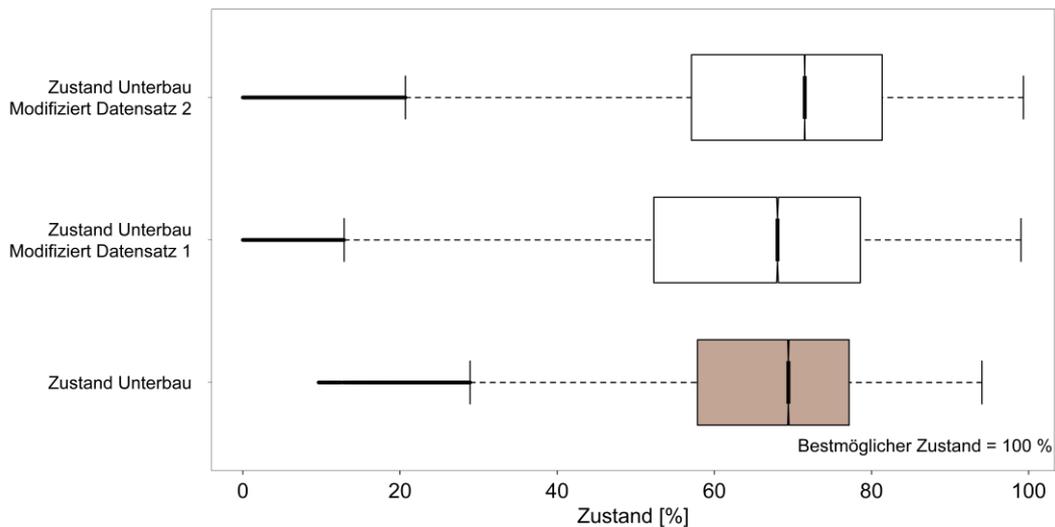


Abbildung 84: Sensitivitätsanalyse, Zustand Unterbau

Dementsprechend zeigt sich im Rahmen des Unterbauzustands eine geringfügige Veränderung. Während die Medianwerte nahezu ident bleiben, kann man hier im Rahmen der modifizierten Datensätze eine höhere Streuung erkennen. Dies ist darin begründet, dass die Berücksichtigung der Georadar-Informationen eine bessere Genauigkeit sowie ein sichereres Ergebnis liefert.

Demzufolge kann im Rahmen der Sensitivitätsanalyse bestätigt werden, dass es sich um eine äußerst robuste Methodik zur komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung handelt. Durch die Modifizierung der Datensätze und eine wesentliche Erhöhung der Grundgesamtheit verändert sich das Ergebnis der jeweiligen Komponentenzustände nur marginal. Es kann somit auch nachgewiesen werden, dass es für zukünftige Anwendungen möglich ist, diese Methodik auszuführen, ohne dabei die – oftmals nicht vorhandenen – Georadar-Informationen zu berücksichtigen.

6.3 Aggregation Qualitätsziffer Fahrweg

Die erste der beiden eingangs in diesem Kapitel aufgeworfenen Fragen lässt sich damit bereits beantworten: Es ist möglich eine komponentenspezifische Zustandsbeschreibung zu etablieren. Darüber hinaus ist es auch möglich diese zu einer gesamtheitlichen Qualitätsziffer Fahrweg zu aggregieren. Die Frage bleibt nur: Wie? Diese kurze und doch so komplexe Frage, wird im Folgenden behandelt.

6.3.1 Vergleich der komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung

Um über eine Aggregation des komponentenspezifischen Zustands nachdenken zu können, muss dieser zuerst im Vergleich zueinander analysiert werden. Hierbei wird bereits anhand der Medianwerte (Tabelle 10) ersichtlich, dass sich der Schotterzustand schlechter darstellt als der Zustand der Schwellen bzw. des Unterbaus.

Zustandszahl	Netzweiter Medianwert [%]
<i>Schwelle</i>	71
<i>Schotter</i>	63
<i>Unterbau</i>	69

Tabelle 10: Vergleich der Zustandszahlen; Medianwerte

Dieses Ergebnis spiegelt eindeutig die Verhältnisse wider, welche durch den stattgefundenen Wechsel von Holz- auf Betonschwellen seit den 1970er Jahren hervorgerufen wurden. In den mehrheitlichen Fällen ist demnach nämlich nicht mehr die (Holz-) Schwelle der Grund für eine Gleisneulage, sondern der Zustand der Schotterbettung. Dieser Effekt wird durch die Eigenschaften der konventionellen Betonschwelle hervorgerufen, welche sehr widerstandsfähige Materialeigenschaften besitzt, jedoch eine stärkere Belastung der Schotterbettung verursacht. Dieses Phänomen konnte durch die Einführung der elastischen Schwellensohle vermindert werden. Nichtsdestotrotz ist das gegenständliche Streckennetz derzeit zu fast zwei Drittel (Abbildung 6) mit konventionellen Betonschwellen ohne elastische Schwellensohle ausgestattet. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass auch bei beschlachten Betonschwellen eine notwendige Erneuerung durch die Komponente Schotter hervorgerufen wird – natürlich dementsprechend später. Generell manifestiert sich im Gleisschotter die Nutzungsdauer des Fahrwegs, da diese Komponente sämtliche Verschleißzustände von möglichst optimalem Einbauzustand bis hin zu einem verschlissenen Ausbauzustand durchläuft. Demzufolge gestaltet sich sein netzweiter Zustand auch schlechter als jener der Schwelle (Abbildung 85).

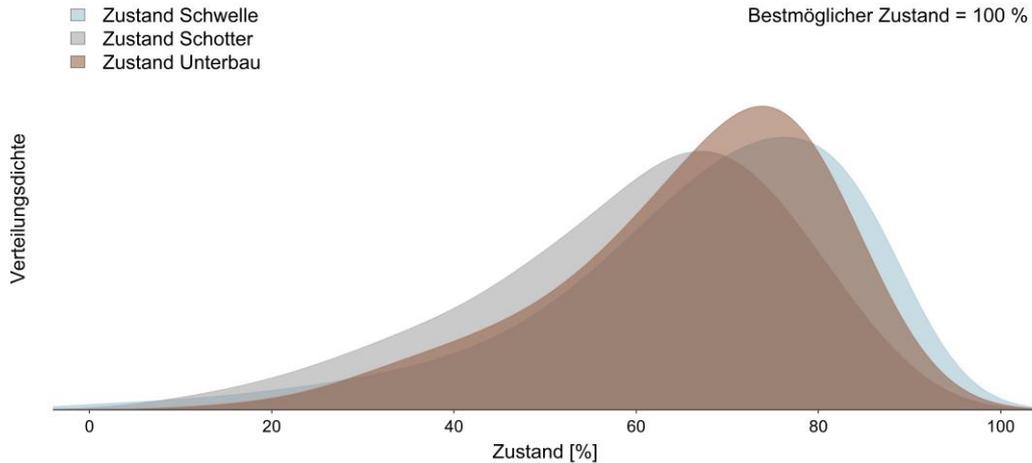


Abbildung 85: Vergleich der komponentenspezifischen Zustandszahlen

Einen ähnlich guten netzweiten Zustand wie die Komponente Schwellen weist auch die Komponente Unterbau auf. Diese verfügt dabei auch über eine geringere Streuung, was sich auch durch den höheren Gipfel der Verteilungskurve (Abbildung 85) zeigt. Dieses Verhalten lässt sich durch die spezifischen Eigenschaften der Komponente Unterbau erklären. Wie bereits analysiert (siehe 4.1.2.1), verfügt der Unterbau nur in sehr geringem Ausmaß über eine zeitliche Verschlechterung. Dies trifft vor allem auf gute Unterbauverhältnisse bei natürlich gewachsenem Boden zu, welche sich über die Nutzungsdauer nicht maßgeblich verändern – sofern eine adäquate Entwässerungssituation gewährleistet werden kann. Im österreichischen Hauptnetz sind laut TUG-Datenbank bereits rund 20 % der Streckenquerschnitte in den letzten Jahren einer Unterbausanierung unterzogen worden. Dementsprechend kann davon ausgegangen werden, dass bereits ein Großteil der Bereiche saniert wurde, welche durch schlechte Bodenverhältnisse beeinträchtigt sind. Daher ergibt sich auch der gute netzweite Unterbauzustand. Nichtsdestotrotz gibt es eine gewisse Anzahl an Bereichen, welche nach wie vor bzw. schon wieder über einen schlechten Unterbauzustand verfügen. Diese können anhand der etablierten komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung jedoch lokalisiert werden.

6.3.2 Aggregationsalgorithmus

Die algebraische Formulierung der Aggregation der einzelnen Komponentenzustände ergibt sich naturgemäß zu Formel 9. Die entscheidende Frage ist jedoch jene nach der Wahl der Gewichtungskoeffizienten α . Da diese Zahl die Qualität des gesamten Fahrwegs (exklusive Schiene) beschreiben soll, liegt diesem Gewichtungsfaktor eine demen-

sprechende Bedeutung zu Grunde. Insbesondere, wenn man das teilweise stark unterschiedliche (zeitliche) Verhalten der einzelnen Zustandsbeschreibungen der verschiedenen Komponenten berücksichtigt.

$$\mathbf{Qualitätsziffer}_{\text{Fahrweg}} = \sum_{k=1}^n ZZ_k * \alpha_k$$

ZZ_k Zustandszahl der Komponenten k (Schwelle, Schotter und Unterbau)
 α_k Gewichtungskoeffizient für die einzelnen Komponenten

Formel 9: Qualitätsziffer Fahrweg

Die einfachste Möglichkeit wäre natürlich jeder Komponente dieselbe Wichtigkeit beizumessen und den Gewichtungsfaktor dementsprechend durchgehend mit 1 anzunehmen. Doch entspricht diese Gewichtung der Realität? Welche Komponente ist für einen Infrastrukturbetreiber eigentlich am „Wichtigsten“? Einerseits natürlich jede Komponente, welche zu einem gewissen Zeitpunkt den sicheren Eisenbahnverkehr nicht mehr gewährleisten kann. Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit, wie auch im Anlagenmanagement der Infrastrukturbetreiber, wird die Nutzungsdauer einer Komponente auf deren wirtschaftliche Nutzungsdauer optimiert. Dementsprechend wird jegliche Optimierung nicht auf die technische Nutzungsdauer vorgenommen, weswegen sicherheitstechnische Aspekte nicht relevant werden sollten. Eine Bewertung der Sicherheit von Fahrwegkomponenten kann netzweit ohnehin nicht ausreichend durchgeführt werden, da dieser Aspekt nur querschnittsspezifisch von den regionalen Verantwortlichen wahrgenommen werden kann. Sie tragen letztendlich auch Verantwortung für den sicheren Eisenbahnbetrieb. Demzufolge bleiben andererseits die Kosten, welche dem Infrastrukturbetreiber die Wichtigkeit einer Fahrwegkomponente definieren. Durch kleinere Instandhaltungstätigkeiten lässt sich dabei der substanzielle Zustand der Komponenten nicht nachhaltig verbessern, wenngleich es natürlich möglich ist, eine bessere Gleislage herzustellen bzw. die Nutzungsdauer einzelner Komponenten damit zu strecken. Daher macht es auch Sinn, die entstehenden Erneuerungskosten der einzelnen Komponenten anzusetzen. Diese Kosten sind es auch, welche das Budget eines Infrastrukturbetreibers vorrangig beeinflussen. Eine Betrachtung der Erneuerungskosten einzelner Komponenten bleibt dabei bis zu einem gewissen Maß eine theoretische Größe, da es das wirtschaftliche Ziel sein sollte, eine Gleisneulage des gesamten Fahrwegs zu forcieren. Dennoch bleibt diese Variante die beste Annäherung, die „Wichtigkeit“ einzelner Komponenten erfassen. Eine zueinander relative Darstellung der einzelnen Kostenblöcke zeigt Abbildung 86. Dabei wird ersichtlich, dass die Schotterbettreinigung die

geringsten Kosten verursacht, während die Unterbausanierung und demzufolge der Unterbau die essentiellste Komponente darstellt. Gewichtungskoeffizienten α ergeben sich daher zu 0,36 für den Schwellen-, 0,2 für den Schotter- und 0,44 für den Unterbauzustand.

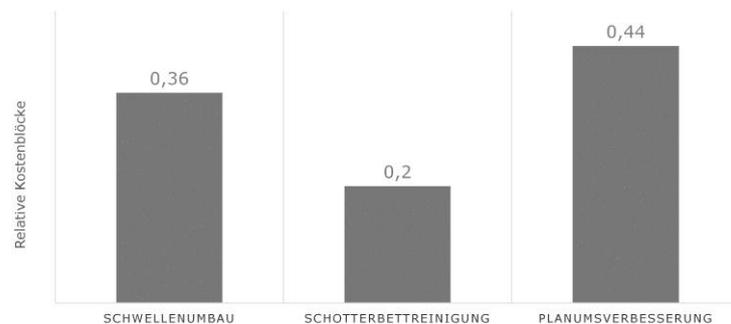


Abbildung 86: Kostenblöcke eines theoretischen Komponentenersatzes

Die immense Bedeutung der Komponente Unterbau entspricht dabei bereits an der TU Graz durchgeführten Berechnungen [Veit 2006], wonach diese den essentiellsten Kostentreiber eines Eisenbahnfahrwegs darstellt. Die Lebenszykluskosten des Fahrwegs können demnach im Extremfall um den Faktor acht steigen, wenn ein sehr schlechter Unterbauzustand vorzufinden ist.

Eine weitere Möglichkeit der Aggregation würde darin bestehen, anstatt des Wiederbeschaffungswerts die entstehenden Kosten der jeweils anfallenden Instandhaltungsmaßnahmen zu berücksichtigen. Eine derartige Qualitätsziffer würde den Fokus nicht auf die Substanz, sondern den aktuellen Zustand einer Anlage legen. Es wäre auch durchaus denkbar, beide Aggregationsverfahren parallel zu verwenden, um zwei unterschiedliche Ergebnisse zur Verfügung zu generieren: Nämlich einerseits eine Aussage über den substanzialen Zustand (Substanz) und andererseits über den aktuellen und kurzfristig verbesserbaren Zustand der Anlage. Letztere bedürfte dabei einer genaueren Berücksichtigung unterschiedlicher Instandhaltungsmaßnahmen zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Nutzungsdauer und bei unterschiedlichen Oberbautypen bzw. Rahmenbedingungen. So ist es beispielsweise von maßgeblicher Bedeutung für die Instandhaltungskosten ob der Oberbau des jeweiligen Abschnitts mit Holz- oder Betonschwellen ausgestattet ist, da sich dadurch unterschiedliche Instandhaltungsoptionen und -zyklen ergeben.

Für den in der vorliegenden Arbeit gewählten Aggregationsalgorithmus auf Basis der entstehenden Erneuerungskosten spielt die vorhandene Oberbaukomponente eine untergeordnete Rolle. Dies liegt einerseits daran, dass diese durch die Kosten der zukünftigen verbauten Stoffe charakterisiert werden und damit überwiegend einem einheitlichen Stan-

dard entsprechen. Andererseits ändert sich das Verhältnis zwischen Schwellen- und Schotterereinbau sowie einer Unterbausanierung auch bei unterschiedlichen Materialien nur marginal.

6.3.3 Die Qualitätsziffer Fahrweg

Die netzweit aggregierte Qualitätsziffer Fahrweg ergibt sich dabei wie in Abbildung 87 illustriert. Die linksschiefe Verteilung zeigt sich, wie bereits in den Zustandsbeschreibungen der einzelnen Komponenten, auch im Gesamtzustand. Diese ergibt sich, aus den spezifischen Gegebenheiten in der Eisenbahninfrastruktur, welche sich beispielweise anhand der Standardabweichung der Längshöhe erläutern lassen. Diese kann im Extremfall Werte bis 4,5 mm annehmen, während die Aufmerksamkeitsschwelle für eine Instandhaltungsmaßnahme je nach Geschwindigkeitsniveau bei 1,2 mm bzw. 1,4 mm [EN 13848-5 2008] beginnt. Dementsprechend beträgt der netzweite Medianwert rund 1,0 mm, wodurch eine symmetrische Verteilung der Werte niemals erreicht werden kann. Am Beispiel dieses Qualitätssignals lässt sich ebenso erläutern, weshalb sich der bestmögliche Zustand von 100 % als nahezu unerreichbar darstellt. Selbst direkt nach der Herstellung einer Gleisanlage kann bei Schotteroberbau bestenfalls eine Standardabweichung der Längshöhe von 0,3 mm (Medianwert 0,5 mm) erreicht werden [Hansmann 2015]. Dieses Verhalten wird von gewissen Toleranzen der Gleisstoffe (z. B. Geradheit der Schienen, Schötterkörnung, Tragfähigkeit des Unterbaus) verursacht und als *inherente Gleislage* bezeichnet [Rießberger 1997].

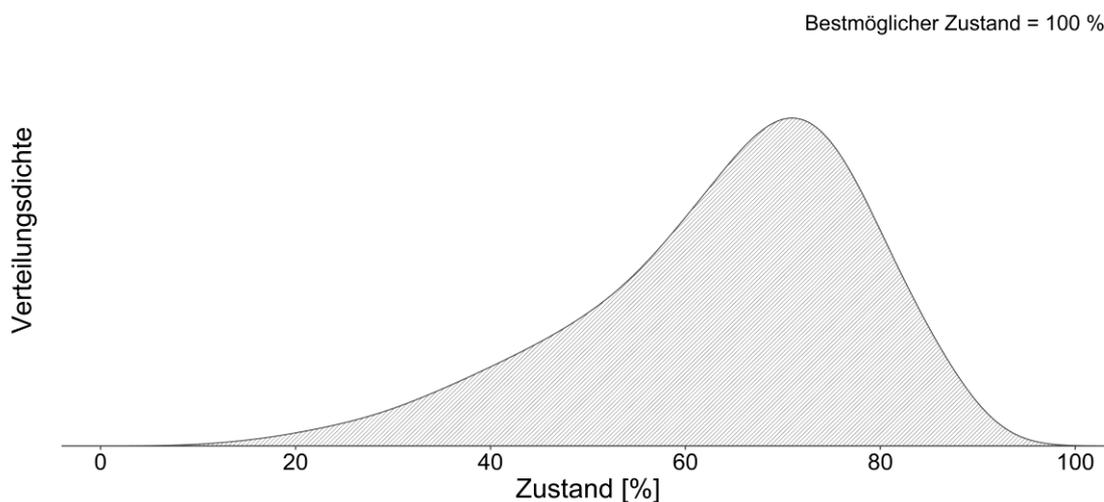


Abbildung 87: Qualitätsziffer Fahrweg

Dieses Verhalten trifft ebenso auf die Evaluierungen des Georadars und der Fraktalanalyse (siehe 4.1.3) sowie die Standardabweichung der modifizierten Spurweite (siehe

4.1.2.2) zu. Aufgrund dieser Aggregation kann die netzweite Qualität des Fahrwegs quantifiziert werden (Abbildung 87). Dabei stellt sich jedoch die Frage: Beschreibt diese nun eine gute, schlechte oder entsprechende Qualität des Streckennetzes?

Um diese Frage zu beantworten wird versucht, die Verteilung der Qualitätsziffer Fahrweg mit jener der Restnutzungsdauer auf Basis der Standardelemente gegenüber zu stellen. Der Grund dafür liegt darin, dass diese Qualitätsziffer – wie bereits erläutert – den substanziellen Zustand der Anlage beschreibt. Demzufolge sollte sie auch – zumindest annähernd – mit der Altersverteilung im Streckennetz übereinstimmen. Ein überaltetes Netz sollte demnach einen unterdurchschnittlichen Zustand aufweisen. Ein Streckennetz hingegen, welches im Mittel der Abschnitte 50 % seiner Nutzungsdauer noch nicht erreicht hat, sollte demnach einen überdurchschnittlichen Zustand aufweisen. Für diesen Vergleich bedarf es zweier Maßnahmen, um eine sinnvolle Vergleichbarkeit der Datensätze zu gewährleisten: Einerseits werden Streckenabschnitte aus dem Datensatz gefiltert, welche die strategische Nutzungsdauer laut Standardelement bereits überschritten haben und dementsprechend eine negative Restnutzungsdauer aufweisen würden. Andererseits muss die Verteilung der Qualitätsziffer Fahrweg modifiziert werden, da aufgrund der bereits erläuterten Eigenschaften der Verteilung 95 % aller Querschnitte zwischen einem Zustand von 34 % und 92 % zu liegen kommen. Dementsprechend kann ein sinnvoller Vergleich mit einem annähernd normalverteilten Datensatz, wie es bei der Restnutzungsdauer der Fall ist, nicht gewährleistet werden. Daher wird die Verteilung der Qualitätsziffer Fahrweg – basierend auf deren oberen und unteren Whisker – auf eine Skalierung von 0 % - 100 % gestreckt (Abbildung 88).

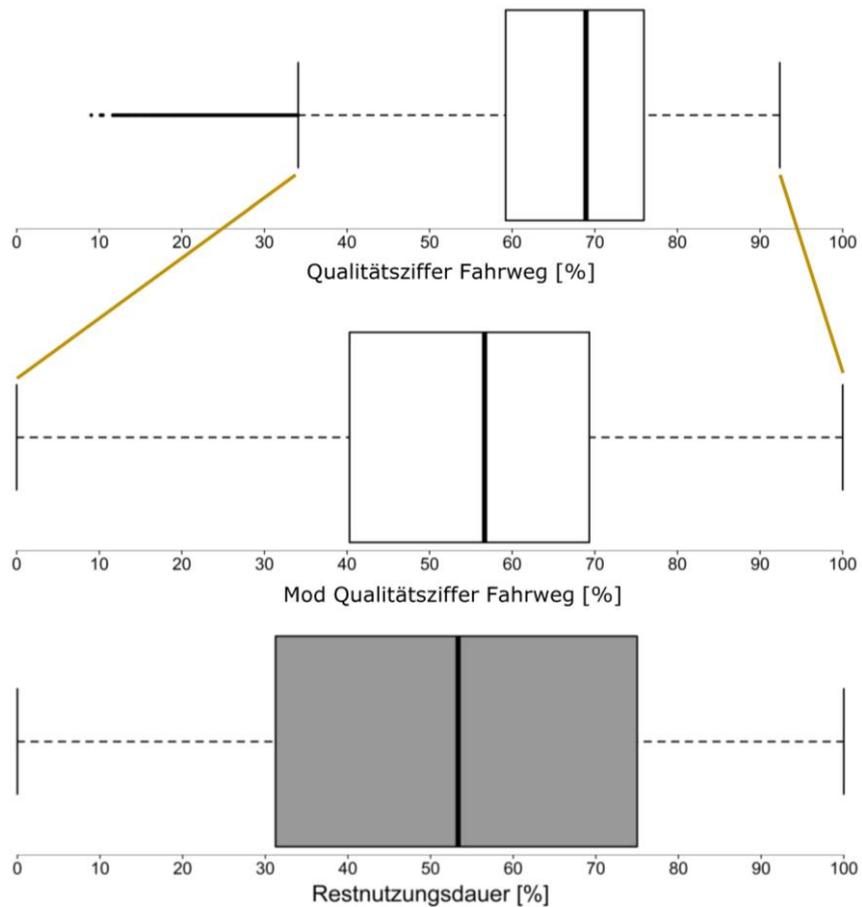


Abbildung 88: Strategische Restnutzungsdauer und Qualitätsziffer Fahrweg

Durch diese modifizierte Verteilung zeigt sich, dass die Restnutzungsdauer einer vergleichbaren Verteilung unterliegt. Darüber hinaus kommt der Median in beiden Fällen zwischen 50 % und 60 % zu liegen. Dies bedeutet einerseits, dass das betrachtete Netz (ohne Berücksichtigung überalteter Streckenquerschnitte!) eine Restnutzungsdauer von 54 % aufweist. Andererseits zeigt sich eine leicht überdurchschnittlich gute Qualität von 56 %. Folglich kann die eingangs formulierte Frage, ob die Qualitätsziffer Fahrweg nun eine gute, schlechte oder entsprechende Qualität des Streckennetzes beschreibt, damit beantwortet werden, dass die netzweite Qualität dem gemäß Altersverteilung erwartbaren Zustand entspricht bzw. sogar marginal besser ist.

7 Vom Zustand zum Anlagenmanagement

Der Internationale Eisenbahnverband [UIC 2010] definiert als primäres Ziel eines Anlagenmanagements die *„lebenszykluskostenoptimierte Entscheidungsfindung über Inspektion, Instandhaltung, Neulage und Verbesserung der Anlage“*. Dementsprechend stellen die Erarbeitung des Anlagenzustands und die Planung von Instandhaltungs- bzw. Erneuerungsmaßnahmen zwei wesentliche Punkte des Anlagenmanagements dar. Diese Planungen sollen dabei immer lebenszykluskostenoptimiert, und damit unter Berücksichtigung der Kosten, welche über die gesamte Lebensdauer einer Anlage anfallen, vorgenommen werden. All diese Überlegungen müssen dabei im Kontext des für den Infrastrukturbetreiber vorhandenen Budgets vorgenommen werden. Dementsprechend notwendig ist es, die vorhandenen Ressourcen optimal zu nutzen und die richtigen Maßnahmen zum richtigen Zeitpunkt zu treffen. Doch selbst bei effizientester Nutzung des vorhandenen Budgets, bleibt dessen Größe dennoch in vielen Fällen ein limitierender Faktor. Man könnte daher - leicht provokativ - zu folgender Feststellung gelangen:

„Man muss sich die Frage stellen, ob man das Budget an das Netz anpasst oder das Netz an das Budget.“ (Veit)

Die Adaptierung des Netzes bzw. dessen Zustands an das vorhandene Budget ist für viele Eisenbahninfrastrukturbetreiber bereits bis zu einem gewissen Maß zur Realität geworden, da sich die zur Verfügung gestellten Budgets verringern. Folglich wird einerseits versucht, Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen zu vermeiden, wenn diese nicht aus sicherheitstechnischen Gründen zwingend notwendig sind. Dieser verschlechtert den netzweiten Zustand des Eisenbahnfahrwegs kontinuierlich, wodurch zu einem späteren Zeitpunkt ein Gros dieser „eingesparten“ Erneuerungsmaßnahmen gleichzeitig anfällt und dadurch eine verzögerte Erhöhung der Reinvestitionsquote umso notwendiger wird. Darüber hinaus wirken sich nicht rechtzeitig ausgeführte Instandhaltungsmaßnahmen negativ auf die Nutzungsdauer des Gleises aus, wodurch sich die notwendige Reinvestitionsquote langfristig zusätzlich erhöht [Marschnig 2016]. Andererseits kann sich der Eisenbahninfrastrukturbetreiber auch dafür entscheiden, gewisse (Neben-)Strecken zu schließen, wenn der Zustand dieser Strecke bereits schlecht ist, und daher eine Vielzahl an Maßnahmen zu tätigen wäre.

Die Anpassung des Budgets an das Netz wäre aus Sicht des Eisenbahninfrastrukturbetreibers natürlich die wünschenswerte Lösung. Dieser könnte sich den gewünschten Zustand des vorhandenen Netzes definieren und das Budget dementsprechend adaptieren. Diese Herangehensweise wird jedoch maßgeblich durch den Geldgeber definiert. Die Mög-

lichkeit einer Umsetzung hängt dabei insbesondere davon ab, wie gut der Infrastrukturbetreiber die Notwendigkeit der benötigten Mittel belegen kann. Dazu muss dieser in der Lage sein, anhand der Entwicklung des Netzzustands aufzuzeigen, dass er von nun an weiterhin ein vergleichbares oder sogar größeres Budget benötigt, um eine adäquate Qualität zu gewährleisten.

Sowohl für die möglichst effiziente Nutzung der vorhandenen Ressourcen in Bezug auf Erneuerungsmengen (siehe 7.2), als auch die Darstellung des Zustands (siehe 7.1) eines Netzes, einer Strecke bzw. eines Querschnittes soll die in dieser Forschungsarbeit etablierte Zustandsbeschreibung als Unterstützung dienen. Einer der Vorteile dieser Methodik besteht darin, dass diese Zustandsbeschreibung querschnittspezifisch passiert. Dementsprechend können sämtliche generierte Komponentenzustände sowie die *Qualitätsziffer Fahrweg* netzweit, für eine Region, eine Strecke oder auch einen spezifischen Streckenkilometer ausgewiesen werden.

Eine Beschreibung des Netzzustands sowie die Eruiierung von Erneuerungsmengen sollten dabei immer anlagenspezifisch erfolgen. Dementsprechend werden in diesem Kapitel vorgenommene Analysen mit Datensätzen durchgeführt, welche zuvor nach *Gültigen Längen* (siehe 2.2) gefiltert wurden.

7.1 Netzweite Zustandsbeschreibung

Die Darstellung sowie Interpretation des netzweiten Anlagenzustands kann mittels verschiedenster Varianten durchgeführt werden. Die „eine, perfekte“ Variante gibt es dabei nicht, sondern jede Möglichkeit den erhobenen Anlagenzustand zu interpretieren hat Vor- wie auch Nachteile. Von essentieller Bedeutung ist es dabei, sich für eine Variante zu entscheiden und diese jährlich zu aktualisieren. Dadurch wird gewährleistet, dass der zeitliche Verlauf analysiert werden kann, da die Interpretation des Anlagenzustands durchgehend auf derselben Methodik beruht. Unabhängig von der gewählten Variante ist es jedoch zwingend notwendig, eine objektive und flächendeckende Zustandsbeschreibung zu etablieren, wie dies bereits im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit durchgeführt wurde.

Im Folgenden werden drei mögliche Methoden zur Darstellung, Klassifizierung und Interpretation des Netzzustands diskutiert. Zwei davon berücksichtigen insbesondere den Bezug zum Gleisalter und beziehen sich damit nicht mehr ausschließlich auf die aktuelle Qualität, sondern jene, welche dem Alter entsprechend zu erwarten wäre. Ein schlechter Zustand am Ende der Nutzungsdauer wird demnach weit weniger stark gewichtet, als der absolut gleich schlechte Zustand am Anfang der Nutzungsdauer.

7.1.1 Klasseneinteilung auf Basis altersspezifischer Werteverteilung

Eine relativ simple Möglichkeit den Netzzustand zu klassifizieren, bietet eine Klasseneinteilung, welche auf der altersspezifischen Verteilung der Werte basiert. Dabei wird – basierend auf der kumulierten Belastung – in Klassen zu 25 Millionen Gesamtbruttotonnen je ein Boxplot der in diesem Bereich vorhandenen Werte der *Qualitätsziffer Fahrweg* erstellt. Mittels linearer Regressionen kann danach ein Verschlechterungsverlauf des oberen Whiskers (OW), des dritten Quartils (Q3), des Medianwerts (Med), des ersten Quartils (Q1) und des unteren Whiskers (UW) kalkuliert werden. Damit wird es möglich, die Qualität jedes einzelnen Querschnitts mit dessen spezifischen kumulierten Gesamtbruttotonnen diesen Verschlechterungsverläufen gegenüber zu stellen. Der lineare zeitliche Verlauf des Medianwerts beschreibt dabei die zum jeweiligen Alter erwartbare Qualität. Befindet sich diese über dem Medianwert, so kann eine Qualität attestiert werden, welche besser ist, als nach dieser Anzahl an kumulierten Gesamtbruttotonnen zu erwarten wäre. Dementsprechend werden die Querschnitte je nach Qualität in die Klassen A bis E eingeteilt (Abbildung 89).

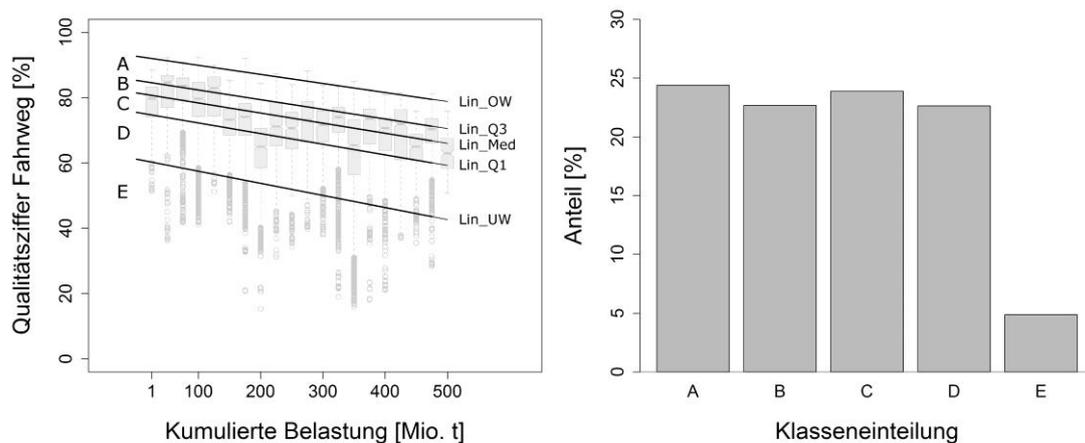


Abbildung 89: Klasseneinteilung auf Basis altersspezifischer Werteverteilung

Die Qualität der einzelnen Querschnitte kann mit Hilfe dieser Methodik sehr gut interpretiert werden, da der Einfluss des Gleisalters mitabgebildet werden kann. Um der Klasse A zugeordnet zu werden, darf ein Querschnitt nach 500 Millionen Gesamtbruttotonnen etwa eine bei weitem schlechtere *Qualitätsziffer Fahrweg* aufweisen, als am Beginn der Nutzungsdauer. Dies entspricht auch den Überlegungen eines Infrastrukturbetreibers, welcher sich von einer neuen Anlage einen perfekten Zustand erwartet, um die angestrebte Nutzungsdauer bestmöglich ausschöpfen zu können.

Der Nachteil dieses Systems ist die Interpretation der Klasseneinteilung selbst (Abbildung 89, rechts). Aufgrund der Eigenschaften eines Boxplots verteilen sich die Klassen zueinander immer auf gleiche Art und Weise. Insbesondere, wenn man die stochastische Grenzwertermittlung der einzelnen Klassen mit der Beimengung aktueller Messdaten jedes Mal aufs Neue kalibriert. Dementsprechend wäre es denkbar, diese Kalibrierung einmalig durchzuführen und die Grenzwerte danach als fixen Wert anzusetzen. Damit wäre eine Entwicklung der Klasseneinteilung über die Zeit sichtbar.

7.1.2 Zustandsklassifizierung

Eine weitere Möglichkeit zur Zustandsklassifizierung ist die Umrechnung der querschnittspezifischen *Qualitätsziffer Fahrweg* in eine sogenannte *Kennzahl Fahrweg*. Diese berücksichtigt das Alter der Anlage bereits über einen Alterskoeffizienten (K_{Alter}), welcher durch den Quotient der aktuellen kumulierten Belastung zur kumulierten Belastung am erwarteten Ende der Nutzungsdauer berechnet wird (Formel 10). Dieses erwartete Ende der Nutzungsdauer basiert dabei auf den Annahmen der Standardelemente (siehe 1). Der Alterskoeffizient kann dabei einen Wertebereich von null bis eins annehmen, wobei sich dieser über die Nutzungsdauer linear verändert. Da sich der Wertebereich der Zustandszahl vordergründig zwischen 85 % und 60 % bewegt, müssen diese unterschiedlichen Deltas mit Hilfe des *Einflussfaktors C* umgerechnet werden (Formel 10). Dieser setzt sich aus der absoluten Differenz des 95 %-Quantils mit dem 5 %-Quantil der *Qualitätsziffer Fahrweg* zusammen.

$$Kennzahl_{Fahrweg} = \frac{(Qualitätsziffer_{Fahrweg} + C * K_{Alter})}{1 + C}$$

$$K_{Alter} = \frac{kumBel_{akt}}{kumBel_{EndeND}}$$

$$Einflussfaktor C = abs(Qualitätsziffer_{Fahrweg_{95\%}} - Qualitätsziffer_{Fahrweg_{5\%}})$$

$Qualitätsziffer_{Fahrweg}$	Etablierte Zustandsbeschreibung des Fahrwegs am jeweiligen Gleisquerschnitts
$kumBel_{akt}$	Aktuelle kumulierte Belastung des Querschnitts seit Einbau
$kumBel_{EndeND}$	Kumulierte Belastung des Querschnitts zum erwarteten Ende der Nutzungsdauer
$Qualitätsziffer_{Fahrweg_{95\%}}$	95% Quantil des netzweiten Fahrwegzustands
$Qualitätsziffer_{Fahrweg_{5\%}}$	5% Quantil des netzweiten Fahrwegzustands

Formel 10: Kennzahl Fahrweg

Durch diesen Algorithmus werden die Qualitäten sämtlicher Querschnitte auf eine dem Alter entsprechende Kennzahl überführt. Dies verzerrt natürlich den realen Zustand des Querschnitts, gewährleistet jedoch eine altersunabhängige Vergleichbarkeit sämtlicher

Querschnitte. Dies manifestiert sich dadurch, dass die eingeführte *Kennzahl Fahrweg* nahezu keiner zeitlichen Verschlechterung unterliegt (Abbildung 90, rechts).

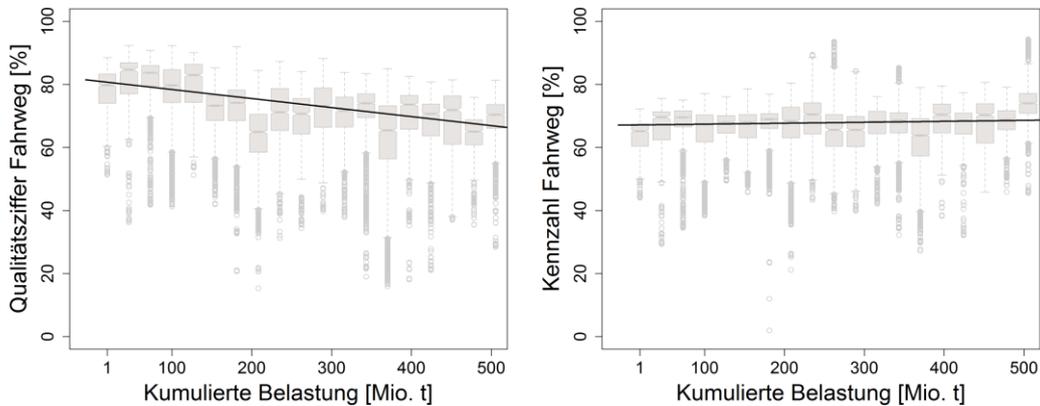


Abbildung 90: Überführung Zustand Fahrweg in Kennzahl Fahrweg

Dieser bereits enthaltene Einfluss des Alters erlaubt es nun, die *Kennzahl Fahrweg* in ein beliebiges Noten- bzw. Klassifizierungssystem zu überführen. Insbesondere bei der Wahl der Klassifizierungsskala gilt die bereits angesprochene Notwendigkeit der Durchgängigkeit. Wird diese einmal eingeführt, so darf sie unter keinen Umständen im Laufe der Jahre verändert werden, da eine Vergleichbarkeit der Klassifizierungen nicht mehr gegeben wäre. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine individuelle Skala etabliert, um eine derartige Methodik vorführen zu können (Tabelle 11).

Klasse	Prozent	Interpretation
A	100 – 79	Dem Alter entsprechend sehr guter Zustand
B	78 – 71	Dem Alter entsprechend guter Zustand
C	70 - 63	Dem Alter entsprechender Zustand
D	62 - 54	Dem Alter entsprechend schlechter Zustand
E	53 - 0	Dem Alter entsprechend sehr schlechter Zustand

Tabelle 11: Individuelle Klassifizierung Kennzahl Fahrweg

Es stellt sich dabei allerdings die Frage, welche Klasse eigentliche jene ist, die ein Eisenbahninfrastrukturbetreiber erreichen möchte. Man ist sicherlich geneigt, hier Klasse A, also den besten Zustand, zu favorisieren. Dabei muss man jedoch bedenken, dass es sowohl in der Erneuerung als auch in der Instandhaltung äußerst kostenintensiv wäre, den Großteil der netzweiten Querschnitte in Klasse A zu verschieben. Vor allem hinsichtlich der

eingeschränkten budgetären Möglichkeiten ist dieser Ansatz weder durchführbar noch sinnvoll. Wie bereits erläutert, wird vom Anlagenmanagement insbesondere auch verlangt, die zur Verfügung stehenden Budgetmittel lebenszyklusorientiert und effizient einzusetzen. Dementsprechend sollen so viele Instandhaltungsmaßnahmen getätigt werden wie nötig, aber auch so wenige wie möglich. In diesem Kontext betrachtet, erscheint es logisch die Klasse C, also einen „dem Alter entsprechenden Zustand“, anzustreben. Vor allem, wenn man bedenkt, wie sich dieser definiert: Nämlich durch eine sehr hohe Anfangsqualität der Komponenten, welche bis zum Ende der Nutzungsdauer kontinuierlich abnimmt. Dies entspricht der Definition einer effizienten Nutzung der vorhandenen Ressourcen und stellt auch eindeutig die häufigste Klasse im betrachteten Netz dar (Abbildung 91).

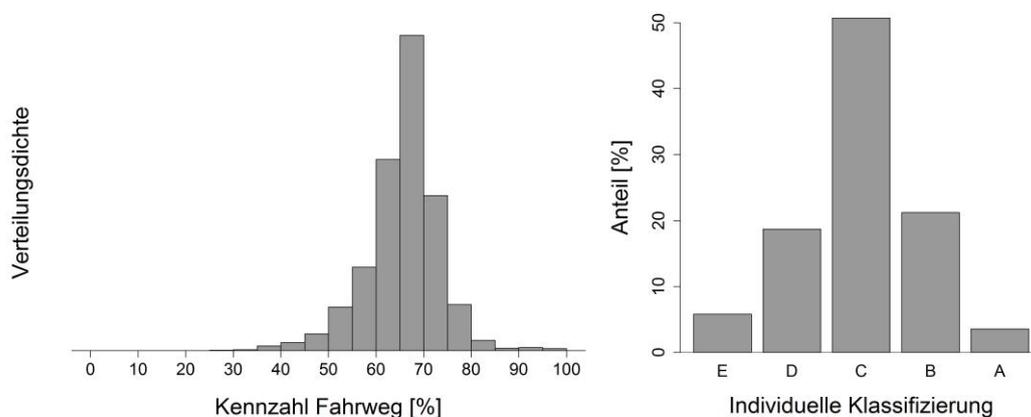


Abbildung 91: Verteilung Kennzahl Fahrweg; Verteilung bei Individueller Klassifizierung

Allerdings unterliegt eine derartige Klassifizierung immer einer gewissen Subjektivität, insbesondere hinsichtlich der Wahl der Klassengrenzen. Dies soll anhand mehrerer Beispiele illustriert werden, welchen jeweils derselbe Datensatz (Abbildung 91, links) zu Grunde liegt wie der individuellen Klassifizierungsskala (Abbildung 91, rechts). Hierfür werden die offiziellen Schulnotenskalen von Österreich, Deutschland, Brasilien, Großbritannien, Estland [Kultusministerkonferenz – Zentralstelle für ausländisches Bildungswesen 2016] sowie jene der USA [House of Representatives Florida 2001] als Grundlage verwendet. Dadurch lässt sich erkennen, welche Unterschiede aufgrund verschiedener Klassifizierungsskalen entstehen können. Die Grundaussage, wonach die Häufigkeitsverteilung ihre Spitze eher in der Mitte der Klassifizierungsskala zeigt, bleibt jedoch bei sämtlichen Systemen einigermaßen erhalten.

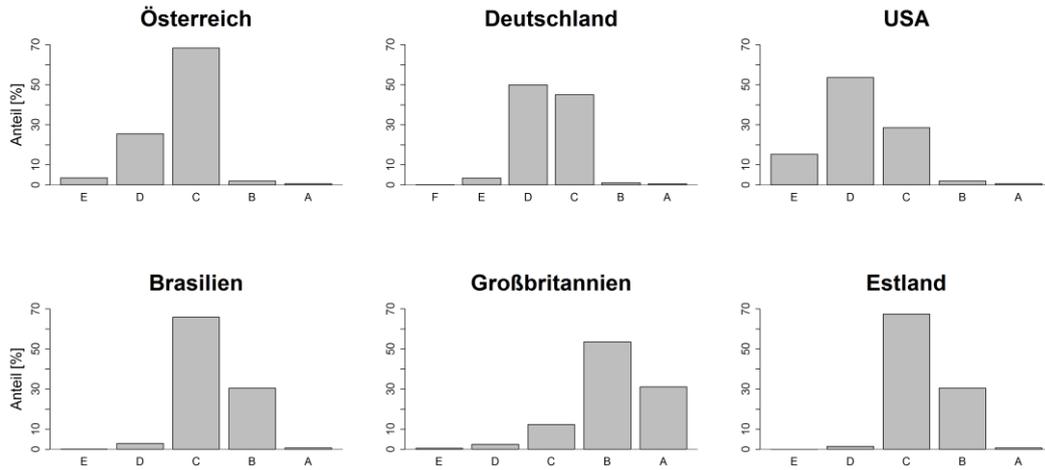


Abbildung 92: Klassifizierung auf Basis Schulnotensysteme

Dieser Umstand muss auch insbesondere dann berücksichtigt werden, wenn man internationale Vergleiche zwischen verschiedenen Infrastrukturbetreibern durchführen möchte. Hierfür sind dann – äquivalent zum Schulsystem – Umrechnungstabellen zu erstellen, um eine Vergleichbarkeit gewährleisten zu können.

7.1.3 Mittelwert

Die einfachste Lösung besteht darin, den Mittelwert der verschiedenen Parameter zu bilden. Im hier gezeigten Beispiel wurden die *Qualitätsziffer Fahrweg* (siehe 6.3.3), die *Kennzahl Fahrweg* (siehe 7.1.2) und die einzelnen Komponentenzustände (siehe 6.2) gewählt (Abbildung 93). Somit wird einerseits der technische Zustand abgebildet, durch die *Kennzahl Fahrweg* aber auch das Anlagenalter der jeweiligen Querschnitte berücksichtigt.

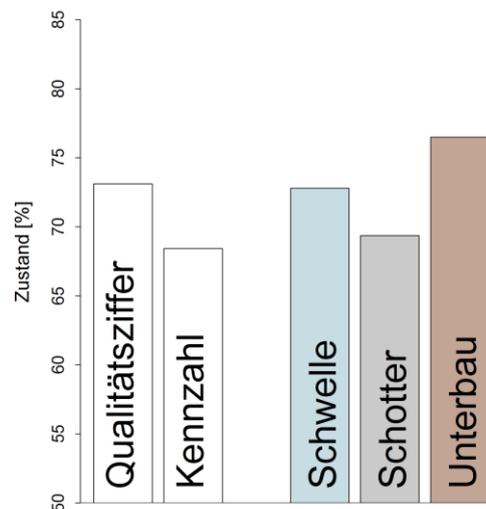


Abbildung 93: Netzweiter Zustand; Mittelwert

Diese Variante ist einerseits leicht verständlich und andererseits einfach umsetzbar. Dadurch ist diese Methodik auch einer geringen Fehlerquote bei der Erstellung und Aktualisierung ausgesetzt. Daher kann auch sichergestellt werden, dass die Zustandsbeschreibungen in sich schlüssig und damit vergleichbar bleiben.

7.2 Budgetrelevante Aspekte

Ein maßgeblicher Teil des Budgets eines Infrastrukturbetreibers wird für die Erneuerung der Anlagen verwendet. Eine frühzeitige und adäquate Abschätzung der Erneuerungsmengen spielt daher eine wesentliche Rolle. Im Folgenden soll erläutert werden, ob bzw. wie die in dieser Forschungsarbeit etablierte Zustandsbeschreibung den aktuellen Erneuerungsbedarf beschreiben kann. Die Methodik wird dabei wiederum auf das freie Streckengleis angewendet (Filterung *Gültige Längen*, siehe 2.2).

7.2.1 Abschätzung Erneuerungsmengen

Um in der Lage zu sein, die erneuerungsbedürftigen Streckenquerschnitte zu identifizieren, muss zunächst analysiert werden, ab welchem Zustand eine Erneuerung notwendig wird. Hierzu wurden Informationen eines langjährigen Kooperationsprojekts zwischen den ÖBB und dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft herangezogen. Seit vier Jahren bewertet das Institut jährlich eine Vielzahl von Reinvestitionsprojekten und berechnet deren optimalen Reinvestitionszeitpunkt aus technisch-wirtschaftlicher Sicht. Gegen Ende der Gleisnutzungsdauer verschlechtert sich der Zustand, wodurch häufigere Instandhaltungsmaßnahmen benötigt werden, um ein Mindestmaß an Qualität für den sicheren Eisenbahnbetrieb gewährleisten zu können. Ziel ist es nun den Zeitpunkt zu finden, an dem die Kosteneinsparung durch die sinkende Abschreibung von der Kostenerhöhung der notwendigen Instandhaltung egalisiert wird. Dementsprechend ist es notwendig, die Instandhaltungsarbeiten zu definieren, welche benötigt werden würden, um die Nutzungsdauer des Gleises zu strecken. Somit lässt sich der Instandhaltungsbedarf der kommenden Jahre quantifizieren und der optimale Zeitpunkt für die Erneuerung der Gleisanlage kann ermittelt werden. Die maßgeblichsten, weil auch teuersten, Instandhaltungsmaßnahmen stellen dabei der Einzelschwellenwechsel (ESW) und die Schotterbettreinigung (REI) dar. Diese Instandhaltungsmaßnahmen werden dabei im Rahmen der Projektbewertung unter Zuhilfenahme aller verfügbaren Messdaten, den Einschätzungen der regionalen Verantwortlichen der ÖBB sowie der vorgenommenen Streckenbegehungen ermittelt. Darüber hinaus werden für die angesprochenen Reinvestitionsprojekte eingehende geotechnische Untersuchungen durchgeführt, um die Streckenabschnitte ermitteln zu können, welche einer Unterbausanierung (USan) bedürfen. Auf diesen Informationen basierend ist es nun möglich den Komponentenzustand zu ermitteln, welcher eine Erneuerung der jeweiligen

Komponente erfordert. Die Abschnitte, welcher dieser Untersuchung zu Grunde liegen, sind in Tabelle 12 gelistet.

Geplante Maßnahme	Anzahl Abschnitte	Gesamtlänge
Einzelschwellenwechsel (ESW)	47	13,11 km
Schotterbettreinigung (REI)	39	9,16 km
Unterbausanierung (USan)	10	3,22 km

Tabelle 12: Stichprobe Maßnahmenplanung für Ermittlung kritischer Zustand

Ziel ist es nun, diese Abschnitte mit der etablierten Zustandsbeschreibung zu vergleichen. Eines Aspektes muss man sich dabei allerdings bewusst sein: Die im Rahmen der Projektbewertung erarbeiteten Instandhaltungsmaßnahmen wurden bereits dahingehend konzipiert, dass die Maßnahme über eine plausible – also nicht zu kurze – Bauabschnittslänge getätigt wird. Dementsprechend sind nicht sämtliche Einzelquerschnitte innerhalb dieser Instandhaltungsabschnitte zu erneuern. Vielmehr kommen auch immer wieder kurze Bereiche mit gutem Zustand innerhalb dieser Abschnitte vor, welche aus wirtschaftlichen Gründen sowie aus Gründen der Homogenisierung des Gleiszustands sinnvollerweise mitbehandelt werden. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, den Medianwert der einzelnen Komponentenzustandsbeschreibungen als Grenzwert heranzuziehen, sondern das 1. Quartil. Eben dieses zeigt, dass bei sämtlichen Komponenten bei einem Zustand von rund 30 % eine Erneuerung durchzuführen ist (Abbildung 94).

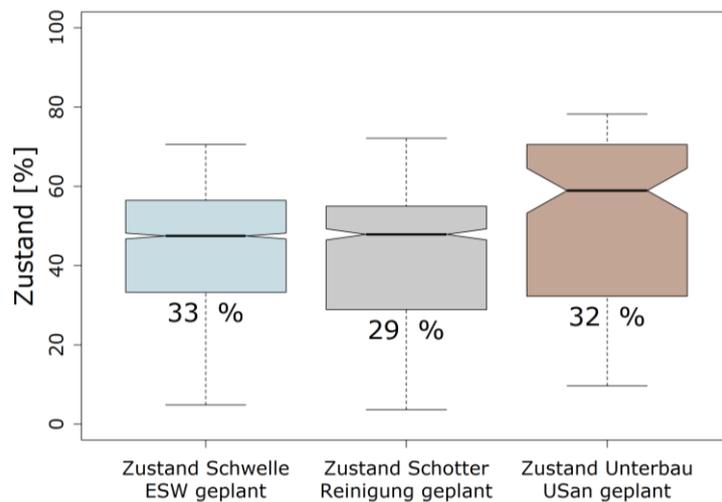


Abbildung 94: Ermittlung Kritischer Zustand

Unter Berücksichtigung der ermittelten Grenzwerte kann nun ein Erneuerungsbedarf kalkuliert werden. Zur Veranschaulichung dient dabei ein Streudiagramm, welches den Schotterzustand an der Ordinate und den Schwellenzustand an der Abszisse darstellt

(Abbildung 95, links), da diese beiden Komponenten die direkten Auslöser einer Gleisneulage darstellen. Somit ist jeder Einzelquerschnitt durch seinen Schwellen- sowie Schotterzustand repräsentiert. Darüber hinaus wird ein unterschrittener Unterbauzustand (> 32 %) in einer dritten Dimension durch braune Rechtecke illustriert. Es lässt sich dementsprechend bereits erkennen, dass es Einzelquerschnitte gibt, welche entweder hinsichtlich des Schwellenzustands (Quadrant I) oder aufgrund des Schotterzustands (Quadrant III) erneuert werden müssen. Natürlich gibt es auch Bereiche, in welchen sowohl aufgrund der Schwelle als auch aufgrund des Schotters ein Erneuerungsbedarf besteht (Quadrant IV). Auffallend zeigt sich, dass Einzelquerschnitte, welche einer Unterbausanierung bedürfen, nahezu ausschließlich in den Quadranten III und IV zu finden sind. Dies sind jene Quadranten, welche über einen erneuerungsbedürftigen Schotterzustand verfügen. Dies erscheint plausibel und bestätigt somit auch die etablierte Methodik, da zwischen den Komponenten Schotter und Unterbau eine sehr starke Wechselwirkung besteht. Dementsprechend ist es technisch nahezu unmöglich, dass ein schlechter Schwellenzustand in Kombination mit einem schlechten Unterbauzustand auftritt, während sich die Schotterbettung in einem sehr guten Zustand befindet. Dieser Fall könnte, rein theoretisch, direkt nach einer durchgeführten Schotterbettreinigung eintreten, welche jedoch keinesfalls sinnvoll sein kann, da aufgrund des schlechten Zustands der beiden anderen Komponenten eine gesamte Gleisneulage mit Sicherheit angebracht gewesen wäre.

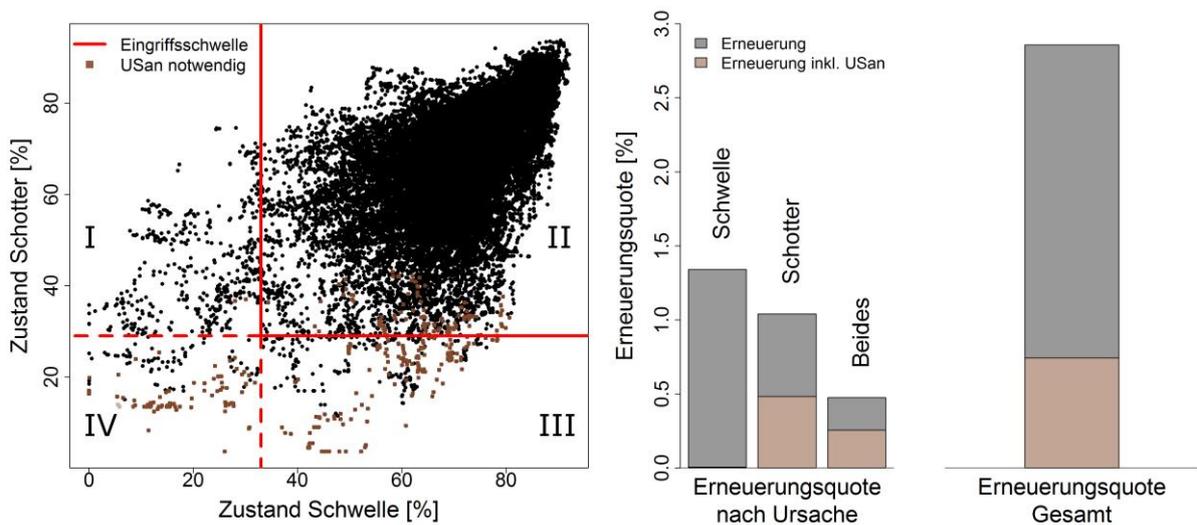


Abbildung 95: Abschätzung Erneuerungsmengen

Diese Analysen ermöglichen es nun, den gesamten Erneuerungsbedarf sowie den Erneuerungsbedarf unterteilt nach der auslösenden Komponente zu ermitteln (Abbildung 95, rechts). Innerhalb des behandelten Netzes erfordern dabei rund 2,7 % der Einzelquerschnitte eine Erneuerungsmaßnahme. Diese jährliche Erneuerungsquote würde im behandelten Streckennetz einer mittleren Gleisnutzungsdauer von 37 Jahren entsprechen. Dabei

muss berücksichtigt werden, dass die TUG-Datenbank (siehe 2.2) das Hauptnetz Österreichs und dementsprechend keine schwach belasteten Nebenbahnen beinhaltet. Die Quote an Querschnitten, welche einer Unterbausanierung bedürfen (rund 20 %) entspricht den in Österreich vorherrschenden Verhältnissen (siehe 3.2.3.1). Dementsprechend kann konstituiert werden, dass die etablierte Methodik plausible Ergebnisse liefert und scheinbar in der Lage ist, den realen Zustand des Fahrwegs zu erfassen.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde bereits thematisiert, dass Budgetknappheit und möglichst effizienter Umgang mit den vorhandenen Ressourcen immer wichtiger wird. Als zusätzliche Entscheidungshilfe kann im Rahmen der etablierten Methodik dementsprechend auch eine Abstufung der Grenzwerte vorgenommen werden. Damit wäre es möglich, die schlechtesten Bereiche zu identifizieren, welche unbedingt erneuert werden müssen. Bei Bereichen, welche nahe des kritischen Zustands (Abbildung 94) zu liegen kommen, könnte man die Erneuerung eventuell noch ein wenig verzögern.

7.2.2 Aufteilung auf Regionen/Strecken

Wie bereits erwähnt handelt es sich bei der etablierten Methodik um eine querschnittsspezifische Zustandsbeschreibung, weswegen es möglich ist diese auf beliebige Segmente des Streckennetzes anzuwenden. Dementsprechend kann die in Kapitel 7.2.1 erläuterte Methodik zur Ermittlung der Erneuerungsmengen äquivalent auf einzelne Strecken oder Gebiete (Abbildung 96) angewendet werden. Damit lässt sich ermitteln, welches Gebiet einen schlechteren Zustand in dem jeweiligen Streckennetz aufweist und damit einer größeren Menge an Erneuerungen bedarf. Dies gilt natürlich ebenso für den notwendigen Anteil an Unterbausanierungen.

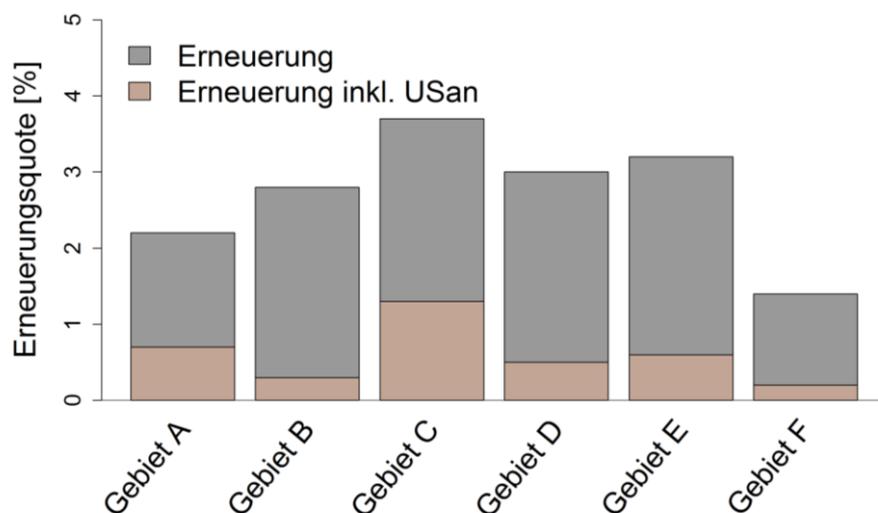
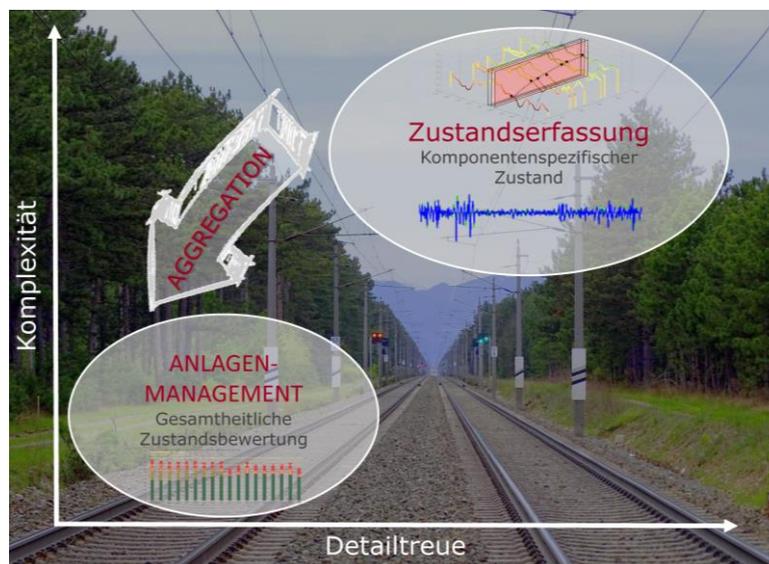


Abbildung 96: Beispielhafte gebietsspezifische Verteilung

Dies ermöglicht es dem Infrastrukturbetreiber das Erneuerungsbudget dementsprechend für verschiedene Gebiete oder Strecken seines Netzes zu verteilen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit präsentiert eine messdatengestützte, komponentenspezifische Anlagenzustandserfassung als Grundlage für ein nachhaltig agierendes Anlagenmanagement im Bereich des Eisenbahnfahrwegs. Die erarbeitete Methodik dient dabei gleichermaßen zur Beurteilung einzelner Streckenquerschnitte als auch eines gesamten Netzzustands. Die Zustandsbeschreibung umfasst eine Vielzahl an spezifischen Parametern, welche einen äußerst detaillierten Aufschluss über den Fahrwegzustand liefern können. Diese Parameter werden anschließend zu einer komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung für Schwelle, Schotter und Unterbau sowie zu einer gesamtheitlichen Qualitätsziffer Fahrweg aggregiert. Somit wird es ermöglicht, je nach Anwendung ein detailtreues und dadurch komplexes oder ein übersichtliches Level der Zustandsbeschreibung zu verwenden.



Darüber hinaus wird im Rahmen der Arbeit aufgezeigt, welchen Nutzen die vorgestellte Methodik für das Anlagenmanagement eines Eisenbahninfrastrukturbetreibers bringen kann. Einerseits im Rahmen einer netzweiten, gebiets-, strecken- oder querschnittspezifischen Zustandsbeschreibung, welche die vergangene sowie zukünftige Entwicklung des Streckennetzes beschreibt. Andererseits wird es ermöglicht, komponentenspezifische Instandhaltungsmaßnahmen sowie benötigte Erneuerungsmengen zu definieren. Es erlaubt darüber hinaus zu spezifizieren, ob eine notwendige Gleisneulage vom Schwellen- oder Schotterzustand ausgelöst wird. Die Zustandsbeschreibung des Unterbaus dient dabei zur Ermittlung jener Bereiche, welche zusätzlich zur Gleisneulage einer Unterbausanierung bedürfen.

Die Erarbeitung dieser Methodik beginnt mit der Erschaffung neuer statistischer Kennziffern, welche aus verschiedenen Messsignalen gewonnen werden, um die Charakteristika dieser Signale besser fassen zu können. Parallel dazu werden bereits bekannte Messsignale analysiert und weiter aufbereitet. Sämtliche Bewertungsparameter werden anschließend einem umfassenden Validierungsprozess unterzogen, um zu prüfen, ob sie sich für den Einsatz einer komponentenspezifischen Zustandsbeschreibung eignen.

Im Folgenden werden eingehende Korrelationsanalysen zwischen den unterschiedlichen Parametern durchgeführt, um zu eruieren, in welcher Art und Weise diese zu einer komponentenspezifischen Zustandsbeurteilung aggregiert werden können.

Der Aggregationsprozess gliedert sich in zwei Schritte: Zuerst werden die Bewertungsparameter auf Basis der Ergebnisse des Validierungsprozesses sowie der Korrelationsanalysen in einen komponentenspezifischen Zustand für Schwelle, Schotter und Unterbau verbunden. Anschließend wird aus diesen Zustandsbeschreibungen der Komponenten die Qualitätsziffer Fahrweg gebildet, welche eine übersichtliche Beschreibung des gesamtheitlichen Fahrwegzustands darstellt.

Die entwickelte Methodik konnte demnach ausreichend validiert und deren Beitrag für das Anlagenmanagement des Fahrwegs klar dargelegt werden. Trotz der damit beantworteten Fragestellungen, ergibt sich aus der vorliegenden Arbeit auch weiterer Forschungsbedarf in diesem Themengebiet, welcher an dieser Stelle keineswegs unerwähnt bleiben sollte.

Daher sollte eines der ersten weiteren Ziele darin bestehen, die Methodik der Zustandsbeschreibung dahingehend anzupassen, dass Informationen des Georadars jederzeit optional berücksichtigt werden können. In der vorliegenden Arbeit wird bewusst entschieden, diese Informationen zur Gänze zu beachten, da sich damit die Tiefe und Sicherheit der generierten Aussage erhöht. Die Netzlänge, für welche die Zustandsbeschreibung durchgeführt wird, hat sich damit allerdings verringert, da die Informationen des Georadars nicht über das gesamte Streckennetz zur Verfügung stehen. Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse kann jedoch bereits gezeigt werden, dass es möglich ist, eine komponentenspezifische Zustandsbeurteilung für das gesamte Streckennetz zu erstellen, ohne dabei Informationen des Georadars zu benötigen. Eine zukünftige Adaptierung des dahinter liegenden Algorithmus sollte daher – je nach Datenverfügbarkeit – automatisiert eine Zustandsbeschreibung mit oder ohne Informationen des Georadars erstellen, um das gesamte Streckennetz abdecken zu können.

Des Weiteren muss berücksichtigt werden, dass die entwickelte Beurteilungsmethodik querschnittspezifisch aufgebaut ist. Dies ist von enormem Vorteil, da dadurch eine Beschreibung des gesamten Streckennetzes, beliebiger Streckensegmente oder auch eines Einzelquerschnittes vorgenommen werden kann. Die daraus ermittelten Erneuerungsmengen beziehen sich dementsprechend auf Segmente, welche durch eine rein technisch ermittelte Aneinanderreihung von Einzelquerschnitten entstehen und bereits den kritischen Zustand erreicht haben. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese Segmente automatisch eine wirtschaftlich sinnvolle Bauabschnittslänge ergeben. Diese Ermittlung der Bauabschnittslängen passiert derzeit im Rahmen des Projektvorlaufs größtenteils manuell bis semi-automatisch. Es wäre jedoch durchaus denkbar und sinnvoll, eine Methodik zu entwickeln, um Segmente, welcher einer Erneuerung oder Instandhaltung bedürfen, automatisiert in eine wirtschaftlich sinnvolle Bauabschnittslänge zu überführen.

In der Wissenschaft gibt es nie ein Erreichen des Ziels.

In der Wissenschaft gibt es immer nur Etappenziele.

(Henning M. Beier)

9 Literaturverzeichnis

- Audley, M. & Andrews, J.D. 2013, *The effects of tamping on railway track geometry degradation*, Journal of Rail and Rapid Transit, 227, no. 4, pp. 379-391.
- Auer, F. 2014, *Berührungslos arbeitende Gleismessfahrzeuge und Auswertung der Messdaten*, Eisenbahn Ingenieur Kalender EIK, pp. 53-66.
- Auer, F. 2010, *Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen*, Technische Universität Graz.
- Auer, F. 2004, *Gleislagequalitätsanalyse zur Instandhaltungsoptimierung*, ETR Eisenbahntechnische Rundschau, no. 01, pp. 838-844.
- Auer, F., Zuzic, M., Schilder, R. & Breymann, H. 2007, *13 Jahre Erfahrung mit gleisgebundener Untergrundsanierung im Netz der ÖBB*, Eisenbahntechnische Rundschau, no. 12, pp. 817-827.
- Balfour Beatty Rail 2010, *Service Anlagenmanagement*, Balfour Beatty Rail GmbH, Germany.
- Berawi, A., Delgado, R., Calçada, R. & Vale, C. 2010, *Evaluating Track geometrical Quality through different Methodologies*, International Journal of Technology, no. 1, pp. 38-47.
- Berghold, A. 2016, *Wirkungsweise von unterschiedlichen Gleisschotterarten mit und ohne Schwellenbesohlung*, ZEV Rail, 140, no. 1-2, pp. 45-52.
- Bundesministerium für Wissenschaft und Verkehr 1971-2001, *Eisenbahn- und Seilbahnstatistik*, Republik Österreich, Wien.
- Clark, M., Gillespie, R., Kemp, T., McCann, D. & Forde, M. 2001, *Electromagnetic properties of railway ballast*, NDT & E International, 34, no. 5, pp. 305-311.
- Daniels, D.J., Gunton, D.J. & Scott, H.F. 1988, *Introduction to subsurface radar*, Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F, 135, no. 4, pp. 278-320.
- De Bold, R. 2011, *Non-Destructive Evaluation of Railway Trackbed Ballast*, University of Edinburgh.
- EN 13848-1 2009, *Bahnanwendungen, Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie, Teil 1: Beschreibung der Gleisgeometrie*, ÖNORM, Österreichisches Normungsinstitut, 1020, Wien.
- EN 13848-2 2004, *Bahnanwendungen, Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie, Teil 2: Messgeräte - Gleismessfahrzeuge*, ÖNORM, Österreichisches Normungsinstitut, 1020, Wien.
- EN 13848-5 2008, *Bahnanwendungen, Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie, Teil 5: Geometrische Qualitätsstufen*, ÖNORM, Österreichisches Normungsinstitut, 1020, Wien.
- EN 13848-6 2014, *Bahnanwendungen, Oberbau - Qualität der Gleisgeometrie, Teil 6: Charakterisierung der geometrischen Gleislagequalität*, ÖNORM, Österreichisches Normungsinstitut, 1020, Wien.

- ENV 13005 1999, *Leitfaden zur Angabe der Unsicherheiten beim Messen*, ÖNORM, Österreichisches Normungsinstitut, 1020, Wien.
- Enzi, M. 2011, *Optimaler Re-Investitionszeitpunkt für den Oberbau von Streckenabschnitten*, Technische Universität Graz.
- Eriksen, A., Venables, B., Gascoyne, J. & Bandyopadhyay, S. 2006, *Benefits of high speed GPR to manage trackbed assets and renewal strategies*, PWI Conference Brisbane, 19th June.
- Esveld, C. 2001, *Modern Railway Track*, 2nd MRT-Productions, Netherlands.
- Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. & Tutz, G. 2007, *Statistik*, 7th Springer, Heidelberg.
- Freudenstein, S., Iliev, D. & Ahmad, N. 2011, *Die Kontaktspannung zwischen elastisch besohlenen Schwellen und Schotter*, ETR Eisenbahntechnische Rundschau, no. 05, pp. 13-20.
- Gallagher, G., Leiper, Q. & Forde, M. 2000, *Ballast Evaluation using Ground-Penetrating-Radar*, Railway Gazette International, 02, pp. 101-102.
- Hansmann, F. 2015, *Innovative Messdatenanalyse - ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis*, TU Graz.
- Hansmann, F. & Landgraf, M. 2013, *Wie fraktal ist die Eisenbahn?* ZEV Rail, 137, no. 11-12, pp. 462-470.
- Holzfeind, J. & Hummitzsch, R. 2008, *Qualitätsverhalten von Gleisen*, ZEV Rail, Glasers Annalen 132, no. 6-7, pp. 212-224.
- Holzfeind, J. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen - Analyse des Qualitätsverhaltens am Einzelquerschnitt*, Technische Universität Graz.
- House of Representatives Florida, [Online], *High School Grading Scale - Fact Sheet*. Available: <http://www.leg.state.fl.us/data/publications/2002/house/reports/EdFactSheets/fact%20sheets/grading.pdf> [2016, 17.05.].
- Hummitzsch, R. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen - Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells*, Technische Universität Graz.
- Hyslip, J. 2002, *Fractal Analysis of Geometry Data for railway track condition assessment*, University of Massachusetts.
- Hyslip, J. & Vallejo, L. 1997, *Fractal analysis of the roughness and size distribution of granular materials*, Engineering Geology, 48, pp. 231-244.
- Kohler, M. 2002, *Der Bettungsmodul für den Schotteroberbau von Meterspurbahnen*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Koppe, P. & Stozek, A. 1999, *Kommunales Abwasser*, 4th Vulkanverlag, Essen.
- Auswärtiges Amt, Deutschland, [Online], *anabin - Infoportal zu ausländischen Bildungsabschlüssen*. Available: http://anabin.kmk.org/no_cache/bildungswesen.html [2016, 17.05].

- Landgraf, M. 2015, *From track data to asset management*, European Railway Review, 21, no. 2, pp. 58-61.
- Landgraf, M., Hansmann, F., Marschnig, S. & Veit, P. 2014, *Track Geometry and Substructure - a Provable Correlation?* ACTGEORAIL 14, ed. Librairie Ifsttar, 978-2-7208-2621-4 Paris, 07.11.2014.
- Lunne, T., Robertson, P.K. & Powell, J.J.M. 1997, *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, E & FN Spon, New York.
- Luomala, H., Peltokangas, O. & Nurmikolu, A. 2014, *Stiffmaster - a continuous Track Stiffness Measurement Device*, ACTGEORAIL 14, ed. Librairie Ifsttar, Paris, 07.11.2014.
- Madejski, J. & Grabczyk, J. 2002, *Continuous geometry measurement for diagnostics of tracks and switches*, Delft University of Technology, Netherland.
- Mandelbrot, B. 1967, *How long is the coast of Britain?* Science, 156, pp. 636-638.
- Marschnig, S. 2016, *iTAC - innovative Track Access Charges*, Habilitationsschrift, Technische Universität Graz, Graz.
- Niessen, J. 2005, *Einsatz des GeoRail-Verfahrens*, Eisenbahningenieur, 56, no. 8, pp. 48-53.
- ÖBB Holding AG 2016, *Geschäftsbericht 2007-2015*, Wien.
- ÖBB Infrastruktur AG 2015, *Geschäftsbericht 2014*, Wien.
- ÖBB-Infrastruktur AG 2014, *Regelwerk 09.02 – Tragschichten, Gestaltung der Randbereiche einschließlich Kabeltröganlagen*, Wien.
- Oberweiler, G. 1987, *Vom Gleisrevisionswagen zur Oberbau-Meßwageneinheit (OMWE)*, Eisenbahntechnische Rundschau ETR, 36, no. 01+02, pp. 73-79.
- Olhoeft, G.R. 2000, *Maximizing the Information Return from Ground Penetrating Radar*, Journal of Applied Geophysics, 43, no. 2, pp. 175-187.
- Piazolo, M. 2011, *Statistik für Wirtschaftswissenschaftler: Daten sinnvoll aufbereiten, analysieren und interpretieren*, 2nd Verlag Versicherungswirtschaft GmbH, Karlsruhe.
- Rießberger, K. 1997, *Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit - oder - wie gut muss ein Gleis sein?* Österreichische Verkehrswissenschaftliche Gemeinschaft, Fraz.
- Rießberger, K. 1975, *Das Verhalten der Meß- und Fehlerverkleinerungssysteme der Gleisbaumaschinen in periodischen Gleisfehlern bei Arbeiten im Ausgleichsverfahren*, Eisenbahntechnische Rundschau ETR, 24, no. 11, pp. 417-424.
- Roberts, R. & Rudy, J. 2006, *Railroad ballast fouling detection using ground penetrating radar: A new approach based on scattering from voids*, ECNDT 2006-Th.4.5, 1,.
- Röhler, M. *Jahresbericht 2005 - 2013*, Schienen-Control GmbH, Wien.

- Schilder, R. & Piereder, F. 2000, *Planumsverbesserung mit der Aushubmaschine AHM 800-R*, Eisenbahntechnische Rundschau ETR, 49, no. 9, pp. 577-586.
- Schilder, R. *Übergangskonstruktionen Feste Fahrbahn - Schotter: Neue Entwicklungen*, Vortrag im Rahmen der Vorlesung "Oberbau", Technische Universität Graz, 2013, Graz.
- Schramm, G. 1967, *Fortschritte in der Gleismessung*, Eisenbahntechnische Rundschau ETR, no. 4, pp. 124-127.
- Schultheiß, H. & Schulz, G. 1985, *Schwellen für die Deutsche Bundesbahn*, Eisenbahntechnische Rundschau, no. 10, pp. 723-728.
- Soldati, G. *Den Geheimnissen der Einsenkung auf der Spur*, Vortrag im Rahmen der Jahrestagung, Interessensgemeinschaft Unterbau, 2013, Bern.
- Sussmann, T.R., Selig, E.T. & Hyslip, J.P. 2003, *Railway Track Condition Indicators from Ground Penetrating Radar*, NDT & E International, 36, no. 3, pp. 157-167.
- UIC 2010, *Guidelines for the Application of Asset Management in Railway Infrastructure Organisations*, International Union of Railways, Paris.
- Veit, P. 2006, *Qualität im Gleis - Luxus oder Notwendigkeit*, Eisenbahningenieur EI, 57, no. 12, pp. 32-37.
- Veit, P. 2002, *Infrastructure Maintenance Strategies*, Rail International, no. 6, pp. 2-10.
- Vidovic, I. 2016, *Das Gleislageverhalten nach Einbau einer Tragschicht*, Technische Universität Graz.
- Wolter, U., Neubert, J. & Erhard, F. 2013, *Inspektion der Gleislage nach der EN 13848 mit Sehnenmessverfahren*, Eisenbahntechnische Rundschau ETR, no. 1+2, pp. 28-30.