



Andrea Katharina Korenjak, BSc

# **Schwachstellen im Schotter: Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium

Bauingenieurwissenschaften - Infrastruktur

eingereicht an der

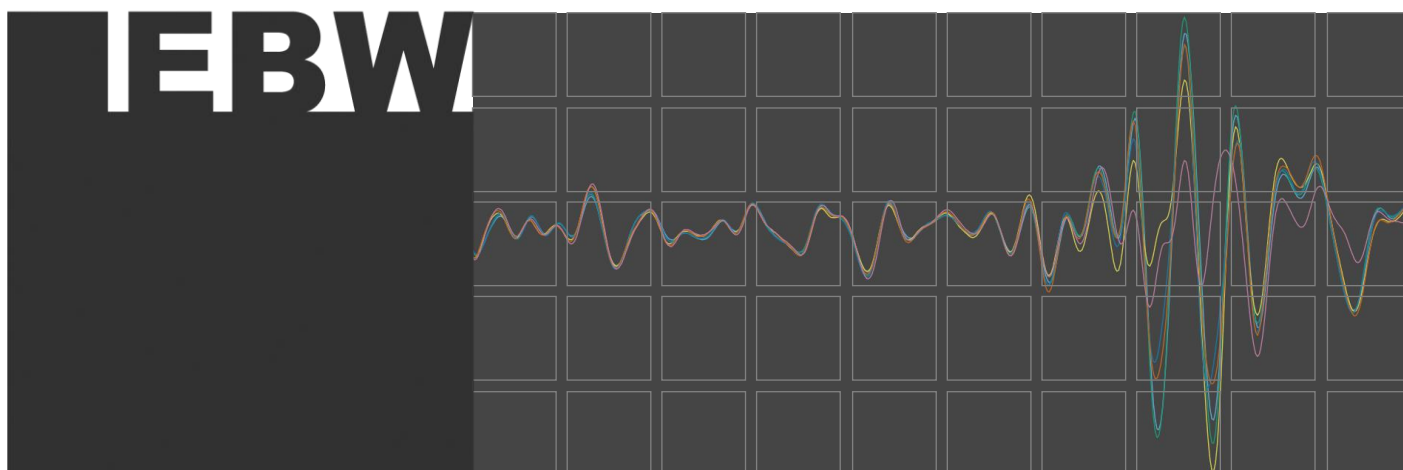
**Technischen Universität Graz**

## **Betreuer**

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn., Stefan Marschnig

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft

Graz, Oktober 2023



# Schwachstellen im Schotterbett: Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge

Masterarbeit

Abgabedatum 17.10.2023

Andrea Katharina Korenjak

BSc.

11812595

[andrea.korenjak@student.tugraz.at](mailto:andrea.korenjak@student.tugraz.at)

Betreuer:

Stefan Marschnig

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

[stefan.marschnig@tugraz.at](mailto:stefan.marschnig@tugraz.at)



## Danksagung

In diesem Abschnitt möchte ich meinen Dank an all jene Personen ausdrücken, die mich während des Verfassens dieser Masterarbeit sowie im Verlauf meines gesamten Studiums inspiriert und unterstützt haben. Diese Masterarbeit repräsentiert nicht nur meine individuelle Anstrengung, sondern auch die kollektive Unterstützung und Anstrengung vieler Menschen in meinem Leben, ohne die ich dieses Projekt nicht erfolgreich abschließen hätte können.

Besonders danke ich Professor Stefan Marschnig, der seit Beginn dieser Arbeit als mein Betreuer fungierte. Seine umfassende fachliche Expertise und außerordentliches Engagement haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit und zur Erweiterung meiner akademischen Fähigkeiten beigetragen. Ebenfalls möchte ich meinen geschätzten Arbeitskollegen für ihre Mitwirkung im täglichen fachlichen Wissensaustausch danken, der in den Apfel-Pausen stattfand und wertvolle Ideen sowie Ansichten für diese Arbeit lieferte.

Ein besonderer Dank gebührt meinen Mitstudierenden, insbesondere Julia, David, Mitch, Jürgen, Konsti und Jonathan, die durch ihre Zusammenarbeit und das Teilen ihres Wissens die Qualität dieser Arbeit steigerten. Ihre Unterstützung war stets präsent, sei es beim Lernen oder bei gemeinsamen Pausen. Besonderer Dank gilt David und Julia für die wunderbare Zeit im Masterstudium, in der unser Dreiergespann immer als ein Team agierte.

Zudem möchte ich dem Beton- und Holzbauzeichensaal meinen herzlichen Dank aussprechen, da er meine Studienzeit unvergesslich gemacht hat. Die Vorstellung, nicht Teil dieses Gemeinschaftsgefühls zu sein, ist schwer vorstellbar.

Ich möchte auch meinen Freunden außerhalb des Studiums danken, die mich gerade in den anspruchsvollen Phasen dieser Arbeit mit ihrer Begeisterung und vielen gemeinsamen Lachmomenten unterstützt haben.

Meine Eltern, meine Schwester und meine Großeltern verdienen besondere Anerkennung. Euer Vertrauen und eure kontinuierliche moralische Unterstützung über die gesamte Studienzeit hinweg haben mir die notwendige Motivation gegeben, um den Weg durch das Studium erfolgreich zu bestreiten. Eure Ermutigungen haben mir stets geholfen, den Fokus auf meine Ziele zu bewahren und niemals den Mut zu verlieren.

Abschließend möchte ich meinem Partner Thomas für seine Geduld, Liebe und Unterstützung in jeder Phase meiner Arbeit danken. Ohne unsere nahezu täglichen fachlichen Diskussionen beim Abendessen und sein beeindruckendes Wissen wäre das Ergebnis dieser Arbeit sicherlich ein anderes.

## Kurzfassung

Sicherheitskritische Zustände sowie Qualitätsänderungen der einzelnen Komponenten des Gleiskörpers können durch Messungen und anschließende Auswertung der Messdaten erfasst werden. Mithilfe der Fraktalanalyse und einer gleitenden Einflusslänge von 150 m lassen sich Qualitätsänderungen der einzelnen Komponenten des Gleiskörpers bestimmen. In diesem Zusammenhang wird das Längshöhensignal analysiert, um Aussagen über die Komponenten Schotterbett und Untergrund zu treffen. Aufgrund der Einflusslänge von 150 m können lokale Schwachstellen im Gleiskörper jedoch nicht genau lokalisiert werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die herkömmliche Fraktalanalyse so anzupassen, dass sie in der Lage ist, lokal auftretende Schwachstellen im Schotterbett zuverlässig zu identifizieren und deren Position präzise zu bestimmen. In diesem Zusammenhang werden acht verschiedene Einflusslängen untersucht. Dabei wird geprüft, ob Zustandsänderungen des Schotterbetts durch die Fraktalanalyse angemessen beschrieben werden können. Zusätzlich wird ermittelt, welche Einflusslänge sich am besten dazu eignet, lokal auftretende Fehler (Einzelfehler) zu erfassen.

Um diese Ziele zu erreichen, werden Längshöhensignale aus Streckenabschnitten verwendet, in denen unzureichender Qualitätszustand des Schotters bereits bekannt ist. Die Messdaten werden für eine adaptierte Fraktalanalyse genutzt, wobei die resultierenden fraktalen Dimensionen qualitativ auf Plausibilität geprüft werden. Zur Ermittlung der optimalen Einflusslänge für die Erkennung von Einzelfehlern werden Modelle erstellt und ein Schwellenwert für die berechnete fraktalen Dimension festgelegt. Dieser Schwellenwert wird mithilfe des  $F_1$ -Werts bestimmt, welcher das harmonische Mittel zwischen Präzision und Sensitivität darstellt und zur Bewertung der Leistung des Klassifizierungsmodells dient.

Die Auswertungen der adaptierten Fraktalanalyse für alle untersuchten Einflusslängen zeigen, dass sie den Zustand des Schotters zuverlässig erfassen und beschreiben können. Es konnte zudem festgestellt werden, dass Einzelfehler, die die Qualität des Schotterbetts beeinträchtigen können, am besten mit einer Fraktalanalyse mit einer gleitenden Einflusslänge von 12.5 m und einem Fraktal-Dimensionsschwellenwert von 25 erkannt werden können.

## Abstract

Safety-critical conditions as well as quality changes of the individual components of track can be detected on the basis of measurements performed on the track and the consecutive data analysis. Quality changes in the individual components of the track body can be determined with the aid of fractal analysis with an influence length of 150 m. In this context, the longitudinal level is analysed in order to make statements about the components ballast and subsoil. However, due to the influence length of 150 m, isolated defects (single failures) in track cannot be precisely localised.

The main objective of this work is to adapt the conventional fractal analysis in order to detect and pinpoint locally occurring single failures in the ballast bed. For this purpose, eight different influence lengths are investigated within the scope of this work. The aim is to ensure that the changes in the state of the ballast bed can be adequately described by the fractal dimensions. In addition, it is determined which influence length is best suited to capture single failures.

To achieve these objectives, the longitudinal level of sections with insufficient ballast quality is used. The measured data are used for the adapted fractal analysis, and the resulting fractal dimensions are checked for plausibility. Models are created to determine the optimum influence length for single fault detection. Moreover, a threshold value is set for the calculated fractal dimension. This threshold is determined using the  $F_1$  value, which is the harmonic mean between precision and recall and is used to evaluate the performance of the classification model.

The evaluations of the adapted fractal analysis for all investigated influence lengths show that they can reliably capture and describe the condition of the ballast. Furthermore, it is shown that single failures affecting the quality of the ballast bed can be detected most accurately with a fractal analysis based on a sliding influence length of 12.5 m as well as a fractal dimension threshold value of 25.

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Kurzfassung.....	II
Abstract .....	III
Abbildungsverzeichnis .....	VI
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Formelverzeichnis.....	IX
Abkürzungsverzeichnis .....	X
1 Einleitung .....	1
2 Gleiskörper .....	3
2.1 Schiene .....	3
2.2 Schienenbefestigung .....	3
2.3 Schwelle .....	3
2.4 Schotter.....	4
2.5 Entwässerung.....	4
3 Das Schottergleis .....	5
3.1 Anforderungen und Aufgaben .....	5
3.2 Eigenschaften .....	6
3.3 Verformungsverhalten .....	7
3.4 Schotterbettbearbeitung .....	9
4 Inspektion des Gleiskörpers .....	12
4.1 Messwagen .....	12
4.1.1 ÖBB Oberbaumesswagen EM 250 .....	14
4.1.2 Einsenkungsmesswagen .....	14
4.2 Georadar .....	15
5 Methodik und datengetriebene Analyse der Gleisqualität .....	18
5.1 Qualitätswerte .....	18
5.2 Gleislagefehler.....	18
5.2.1 Die vertikale Gleisgeometrie bzw. Längshöhe .....	19
5.2.2 SigmaH .....	22
5.3 Fraktalanalyse .....	24
5.3.1 Herkömmliche Fraktalanalyse.....	27
5.3.2 Adaptierte Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge .....	32
6 Untersuchung lokal auftretender Schwachstellen im Schotterbett .....	37
6.1 Aufbereitung der Messdaten .....	37
6.2 Untersuchung der Schotterbettqualitätsveränderung mittels adaptierten Fraktalanalyse..	38
6.2.1 Vergleich VV .....	40
6.2.2 Vergleich VN .....	41
6.2.3 Szenario NN.....	42
6.2.4 Interpretation der Ergebnisse der Schotterbetterneuerungsabschnitte .....	43
6.2.4.1 Szenario VV.....	44
6.2.4.2 Szenario VN.....	44
6.2.4.3 Szenario NN .....	44
6.3 Untersuchung von Einzelfehler mittels adaptierten Fraktalanalyse & SigmaH .....	45
6.3.1 Methodik zur Evaluierung der Modelle .....	45

6.3.2	Schwellenwertbestimmung für Qualitätssignal SigmaH .....	46
6.3.3	Schwellenwertbestimmung für Qualitätswert Fraktal Dimension .....	47
6.3.4	Schwellenwertbestimmung für Qualitätswert Fraktal Dimension & akkumulierte Summe der Differenzen der aufeinanderfolgenden Fraktal Dimensionen .....	48
6.3.5	Interpretation der bestimmten Schwellenwerte und Festlegung der Einflusslänge .....	49
7	Adaptierte Fraktalanalyse anhand eines ausgewählten Abschnittes .....	51
7.1	Auswertung der Mess- bzw. Qualitätssignale und Qualitätswerte .....	51
7.1.1	Position km 86,536 .....	55
7.1.2	Position km 86,615 .....	56
7.1.3	Position km 86,650 .....	57
7.1.4	Position km 86,910 .....	58
7.1.5	Position km 87,036 .....	59
7.1.6	Position km 87,188 .....	60
7.2	Interpretation der Qualitätswerte .....	61
8	Fazit .....	62

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufplan .....	2
Abbildung 2: Setzungen unter Betriebslast für verschiedene Gleisqualitäten [8] .....	7
Abbildung 3: Schematische Darstellung Schotter [5] .....	8
Abbildung 4: Wirkungsweise der Stopfung [8] .....	10
Abbildung 5: Schema des Gleisqualitätsverlaufes [8] .....	11
Abbildung 6: Messergebnis Einsenkungsmesswagen [10] .....	15
Abbildung 7: Erstellung eines Radargramms mittels Georadar [2] .....	16
Abbildung 8: Georadarauswertung der ÖBB [2] .....	17
Abbildung 9: Historische Messung der vertikalen Ausrichtung [15] .....	19
Abbildung 10: Wellenlängen von Gleisfehlern [14] .....	20
Abbildung 11: Gleisverhalten SigmaH [2] .....	23
Abbildung 12: Koch-Kurve [18] .....	24
Abbildung 13: Selbstähnlichkeit bei Quadraten ( $d = 2$ ) und Würfel ( $d=3$ ) [19] .....	25
Abbildung 14: Yardstick-Methode gezeigt an der Koch-Kurve [19] .....	25
Abbildung 15: Darstellung der bestimmten Länge $L_r$ mit dem dazugehörigen Radius $r$ [19] .....	26
Abbildung 16: Boxcounting - Dimension der Küstenlinie von Großbritannien [21] .....	27
Abbildung 17: Selektiertes Datensegment .....	28
Abbildung 18: Fehlerklassifizierung nach Wellenlängenbereichen in der gemessenen Längshöhe [22] .....	28
Abbildung 19: Unterteilung des Datensegment in Teilsegmente der Länge $\lambda_2$ .....	29
Abbildung 20: Iteration der Teilsegmente (links) [2] und Erstellung des Richardson-Plots (rechts) .....	30
Abbildung 21: Schematische Darstellung des RANSAC-Algorithmus zur Erkennung von Ausreißern [23] .....	34
Abbildung 22: Längshöhensignal eines beispielhaften Einzelfehlers .....	35
Abbildung 23: Beispielhafte Gegenüberstellung RANSAC (links) mit der adaptierten Linearer Regression (rechts) im Richardson-Plot für EL 25, 12.5 für den in Abbildung 22 gezeigten Einzelfehler .....	36
Abbildung 24: Szenario VV - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen vor durchführung der Schotterbetterneuerung .....	41
Abbildung 25: Szenario VN - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen vor und nach Durchführung der Schotterbetterneuerung .....	42
Abbildung 26: Szenario NN - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen nach Durchführung der Schotterbetterneuerung .....	43
Abbildung 27: Precision & Recall [26] .....	46

Abbildung 28: Längshöhensignal (3-25 m) und herkömmliche mittelwellige Fraktalanalyse .....	51
Abbildung 29: Streckenbild und LH - km 86,660 ± 10 m .....	52
Abbildung 30: Streckenbild und LH - km 86,900 ± 10 m .....	53
Abbildung 31: Längshöhensignal (3-25 m), SigmaH und adaptierte Fraktal Dimension mit EL 12.5 des untersuchten Abschnittes .....	54
Abbildung 32: Position km 86,536 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	55
Abbildung 33: Streckenbild km 86,536 - Messfahrt 2018 .....	55
Abbildung 34: Position km 86,615 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	56
Abbildung 35: Streckenbild km 86,615 - Messfahrt 2014 .....	56
Abbildung 36: Position km 86,650 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	57
Abbildung 37: Streckenbild km 86,650 – Messfahrt 2009 .....	57
Abbildung 38: Position km 86,910 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	58
Abbildung 39: Streckenbild km 86,910 - Messfahrt 2015 (links) und 2016 (rechts).....	58
Abbildung 40: Position km 87,040 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	59
Abbildung 41: Streckenbild km 87,036 Messfahrt 2013 (links) und 2018 (rechts) .....	59
Abbildung 42: Position km 87,188 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen .....	60
Abbildung 43: Streckenbild km 87,188 Messfahrt 2015 (links) und 2017 (rechts) .....	60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler der Gleislage [14] .....	21
Tabelle 2: Sicherheitsgrenze IAL für Einzelfehler der Längshöhe [14] .....	22
Tabelle 3: Zu untersuchte Datensegmentgrößen mittels Fraktalanalyse .....	32
Tabelle 4: Ermittlung des Zeitpunktes der durchgeführten Schotterbetterneuerung .....	40
Tabelle 5: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern $\pm 7.5$ m pro EL für SigmaH .....	47
Tabelle 6: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern $\pm 7.5$ m pro EL für die fraktalen Dimension .....	47
Tabelle 7: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern $\pm 7.5$ m pro EL für Fraktal Dimension und akkumulierte Differenz .....	48
Tabelle 8: Zusammenfassung errechneter $F_1$ -Werte (Trainingsset u. Validierungsset) ....	49
Tabelle 9: Zusammenfassung der potentiellen Einzelfehler .....	61

## Formelverzeichnis

Formel 1: Los Angeles Test mit $m$ = Siebdurchgang bei 1,6 mm Sieb.....	6
Formel 2: Berechnung der Wellenlänge nach Zimmermann .....	19
Formel 3: Maximale Wellenlänge für die Verformung der Bettung .....	20
Formel 4: Berechnung der Länge $L_r$ .....	25
Formel 5: Bestimmung von $L_r$ .....	26
Formel 6: Bestimmung der Yardstick-Dimension.....	26
Formel 7: Berechnung Boxcounting-Dimension.....	26
Formel 8: Berechnung der Polygonzuglänge $L(\lambda)$ .....	29
Formel 9: Bestimmung von $k$ .....	31
Formel 10: Bewertungsmetrik $F_1$ Wert.....	45
Formel 11: Bewertungsmetrik Precision.....	46
Formel 12: Bewertungsmetrik Recall .....	46

## Abkürzungsverzeichnis

Adapt. Lin. Reg.	.....	Adaptierte lineare Regression
AL	.....	Aufmerksamkeitsschwelle
EL	.....	Einflusslänge
IAL	.....	Sicherheitsgrenze
IL	.....	Eingriffsgrenze
LH	.....	Längshöhe
MAD	.....	mittlere absolute Abweichung vom Median
RANSAC	.....	Random Sample Consensus
SES	.....	Soforteingriffsschwelle
SigmaH	.....	Standardabweichung der Längshöhe
TS	.....	Trainingsdatensatz
VS	.....	Validierungsdatensatz

# 1 Einleitung

Die Finanzierung des Betriebs und Ausbaues der Eisenbahninfrastrukturen in Österreich erfordert Bindungen großer Kapitalmengen, die über die Einnahmen von Wegeentgelten für Zugfahrten allein nicht gedeckt werden können. Jährlich werden durch die ÖBB-Infrastruktur AG in Österreich rund 3 Milliarden Euro in Ausbau und Erhaltung der Infrastruktur investiert [1]. Ein wesentlicher Teil dieser Ausgaben entfällt auf Reinvestitionen inklusive Instandhaltung (0,7 Mrd. Euro) [1]. Um die momentan benötigten Kapitalmengen senken zu können, bedarf es vor allem an einer Optimierung der Instandhaltungs- und Reinvestitionsstrategie. Die Optimierung durchzuführender Instandhaltungsmaßnahmen kann anhand einer datengetriebenen Analyse der Gleislage erfolgen, bei der die Ursache der auftretenden Fehler festgestellt werden kann. Sobald die Fehlerursachen bekannt sind, können gezielte Instandhaltungsmaßnahmen ergriffen werden, die die Qualität der Gleislage langfristig verbessern. Dies ermöglicht, die Zeitintervalle zwischen den Instandhaltungszyklen zu vergrößern und die Lebensdauer der Gleise zu verlängern.

Eine Methode zur Beurteilung der Qualität der Gleislage besteht darin, das Längshöhensignal zu nutzen, das durch den Oberbaumesswagen erfasst wird. Anhand dieses Signals werden Qualitätswerte wie die Standardabweichung berechnet. Die Verschlechterung der Gleislage kann anhand einer Zeitreihe dieser Werte festgestellt werden. Zur Feststellung der Fehlerursache kann eine Fraktalanalyse des Längshöhensignals durchgeführt werden, wobei eine Einflusslänge von 150 m angewandt wird. Durch die daraus resultierenden Fraktalwerte kann die Ursache für Fehler im Gleisquerschnitt auf drei unterschiedliche Bereiche eingegrenzt und den dort vorhandenen Komponenten zugeordnet werden [2]. Die aktuelle Fraktalanalyse erfordert aufgrund der Erfassung des Zustands mehrerer Komponenten eine Einflusslänge von 150 m. Diese große Einflusslänge führt jedoch dazu, dass Einzelfehler in der vertikalen Gleislage über eine Strecke von 150 m verteilt werden. Eine genaue Positionsbestimmung von lokal auftretenden Schwachstellen ist somit nicht möglich.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Fraktalanalyse so anzupassen, dass sie in der Lage ist, lokal auftretende Schwachstellen im Schotterbett zu erkennen. Dies erfordert eine Anpassung der Einflusslänge der Fraktalanalyse. Es werden acht verschiedene Einflusslängen untersucht, um lokale Schwachstellen im Schotterbett zu erkennen. Die Forschungsfragen, die in diesem Kontext beantwortet werden sollen, lauten wie folgt:

- I Ist es möglich den Zustand/die Qualität des Schotters durch die Analyse des Längshöhensignals mithilfe der Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge angemessen zu beschreiben?

- I Können Einzelfehler durch die Reduktion der Einflusslänge der Fraktalanalyse erkannt und die daraus resultierende Schotterqualität ermittelt und lokalisiert werden?
- I Welche der acht gewählten Einflusslängen ermöglicht die genaueste Einzelfehlererkennung und Beschreibung der Schotterqualität?

Die formulierten Forschungsfragen werden mittels deskriptiver Datenanalyse beantwortet. Hierfür werden Längshöhensignale aus 39 Abschnitten verwendet, die über mehrere Kilometer reichen und Messungen zwischen 2005 und 2022 einschließen.

Die Literaturrecherche in dieser Arbeit vermittelt ein grundlegendes Verständnis für die Funktion des Gleiskörpers und seiner Komponenten. Kapitel 2 erläutert die beteiligten Komponenten und ihre Anforderungen sowie Aufgaben. In Kapitel 3 wird das Schotterbett genauer untersucht, da es die Gleislage maßgeblich beeinflusst. Kapitel 4 gibt einen Überblick über die in Österreich verfügbaren Gleisinspektionsmethoden. Kapitel 5 behandelt die Theorie der datengetriebenen Gleislageanalyse und erläutert die Berechnung der Standardabweichung des Längshöhensignals sowie der Fraktalanalyse. Kapitel 6 bewertet die adaptierte Fraktalanalyse für acht Einflusslängen hinsichtlich ihrer Plausibilität und Funktionalität. In Kapitel 7 wird die Leistungsfähigkeit der Analyse anhand einer Strecke mit lokalen Schwachstellen im Schotterbett demonstriert. Alle Analysen werden mithilfe der Programmiersprache Python implementiert. Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Arbeit.

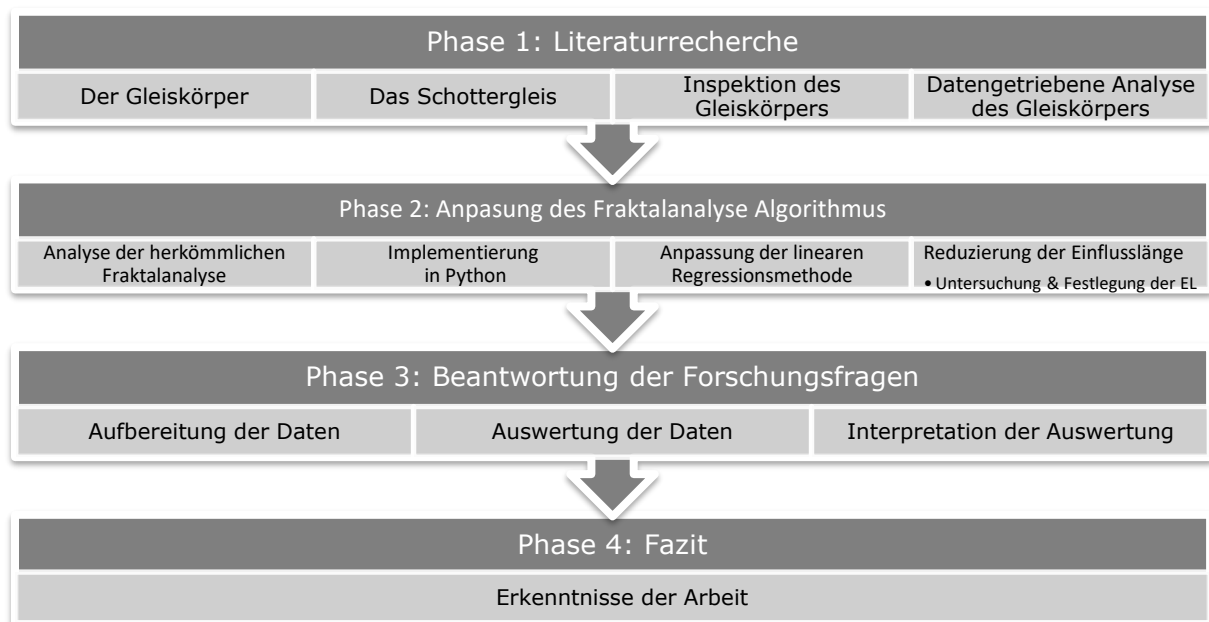


Abbildung 1: Ablaufplan

## 2 Gleiskörper

Der Gleiskörper, auch Oberbau genannt, besteht aus mehreren Einzelkomponenten, die in sich als System agieren und nicht isoliert betrachtet werden sollten. Der Oberbau hat die Aufgabe Fahrzeuge entgleisungssicher zu führen, die auf den Gleiskörper einwirkenden Kräfte über den Gleisrost und das Schotterbett in den Untergrund abzuleiten und einen guten Fahrkomfort, aber auch eine hohe Verfügbarkeit für die Produktion sicherzustellen [3]. Bestandteile des Oberbaus sind:

- I Schiene
- I Schienenbefestigung
- I Schwellen
- I Gleisbettung

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Aufgaben und Eigenschaften der jeweiligen Systemkomponenten genauer erläutert.

### 2.1 Schiene

Neben der Aufgabe der Spurführung stellt die Schiene den Kontakt zum Fahrzeug über den Rad-Schienen-Kontakt her und leitet die Lastabtragung über den Schienenfuß der Schiene in den Gleiskörper ein. Die Schiene wirkt hierbei als Längsträger und verteilt aufgrund ihrer Durchbiegung, die einwirkende Last auf 5 bis 9 Schwellen [4].

### 2.2 Schienenbefestigung

Die Schienenbefestigung stellt einen sicheren Kontakt der Schiene und Schwelle sicher und wirkt als Widerstandskraft gegen die in der Schiene auftretenden Längskräfte, die durch Antriebs-, Bremskräfte und Temperaturspannungen resultieren. Weiters hindert die Schienenbefestigung die Schiene daran seitlich zu kippen [4].

### 2.3 Schwelle

Durch die Anordnung der Schwelle rechtwinklig zur Schiene, wirkt die Schwelle aufgrund des Querverschiebewiderstandes einer seitlichen Verschiebung und Verwerfung der Schiene entgegen. Die Schwelle trägt somit zur Erhaltung der Spurweite bei. Die Lastabtragung über die Schwelle in die Schotterbettung findet über viele einzelne Lastpfade statt. Dafür ist eine ausreichende Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotterbett nötig, die wiederum von der Art der Schwelle abhängig ist (z.B. Holz, Stahl, Kunststoff, Beton, Beton besohlt) [4].

## 2.4 Schotter

Der Schotter besteht aus witterungsbeständigem Hartgestein wie Basalt, Diabas, Quarzporphyr oder Grauwacke. Die Bettung muss mindestens 30 cm, gemessen von der Unterkante der Schwelle, stark sein. Die Qualität des Schotters ist abhängig von der Festigkeit der Gesteinsart, der Kornform (gedrungen, nicht länglich), der Kantigkeit und der Sieblinie. Der Schotter trägt die über die Schwellen einwirkenden Kräfte über einzelne Lastpfade, die über sich berührende und aufeinanderliegende Schotterkörner hindurch gebildet werden, in den Untergrund ab. Weiters ist es wichtig, dass das Schotterbett Elastizität besitzt und eine durchgängige Wasserableitung gewährleistet ist [4].

## 2.5 Entwässerung

Die Hauptaufgabe der Entwässerung ist es, Wasser abzuleiten. Kann dies nicht gewährleistet werden, so sammelt sich Wasser im Bahngraben und Pflanzen beginnen in diesem Bereich zu wachsen. Die Wurzeln der Pflanzen können sich in Richtung der Gleisbettung ausbreiten und die für das System relevante Elastizität negativ beeinflussen [4].

### 3 Das Schottergleis

Die Hauptaufgabe des Schotteroberbaus ist es, die Verkehrslasten, die von der Schiene über die Schwelle in den Schotter eingeleitet werden, gleichmäßig auf den Unterbau zu verteilen. Um dies zu gewährleisten, muss die Bettungsstärke richtig dimensioniert und eine funktionierende Entwässerung des Planums sichergestellt sein [5]. Die Verkehrslast manifestiert sich im Schotterbett als statische und dynamische Kräfte, die aus der Wechselwirkung des Rad-Schiene Kontakts entstehen und einen signifikanten Einfluss auf den Zustand des Gleises nehmen. Die durch Pressungen und Spannungen verursachten vertikalen Kräfte müssen vom Schotterbett, aber auch vom Untergrund aufgenommen werden können [5].

Um den Zustand einer Gleiskonstruktion objektiv bewerten zu können, muss dieser durch aussagekräftige und messbare Größen beschreibbar sein. Ein dafür besonders geeigneter Parameter zur Beschreibung der Gleisqualität ist der mittlere Längshöhenfehler über eine bestimmte Streckenlänge [3].

#### 3.1 Anforderungen und Aufgaben

Eine wesentliche Voraussetzung für ein funktionierendes Rad-Schiene-System ist ein sauberes, homogenes und elastisches Schotterbett. Diese drei Anforderungen haben sowohl auf die Lebensdauer als auch auf die Qualität der Gleislage und somit auch auf die Wirtschaftlichkeit der Instandhaltung des Oberbaus einen erheblichen Einfluss [5].

Um die Erhaltung der Tragfähigkeit des Unterbaues zu gewährleisten, muss das Schotterbett dafür sorgen, dass die auf den Gleiskörper einwirkenden Kräfte auf den Untergrund gleichmäßig verteilt und die einwirkenden dynamischen Kräfte durch die Elastizität des Schotterbettes reduziert werden. Durch die lose Körnung des Schotterbettes ist einerseits eine leichte Wiederherstellung der Gleislage nach deren Veränderung durch die Betriebslast und andererseits auch eine gute Wasser- und Luftdurchlässigkeit gegeben. Neben der Krafteinleitung und Erhaltung der Tragfähigkeit des Untergrundes soll das Schotterbett die Lage der Schwelle sicherstellen und daraus folgend eine lange Lebensdauer der Schwelle gewährleisten. Dazu muss das Schotterbett einen großen Widerstand gegen die auftretenden Längs- und Querverschiebungen der Schwelle bieten [5].

### 3.2 Eigenschaften

Der Gleisschotter setzt sich aus unregelmäßig geformten, scharfkantigen, keilförmigen und kubischen Körnern zusammen, die durch das Brechen von hartem Gestein wie beispielsweise Granit, Diabast oder Basalt gewonnen wird [6].

Damit die Anforderungen an das Schotterbett erfüllt werden können, muss das eingesetzte Rohgestein des Gleisschotters folgende Eigenschaften aufweisen [5]:

- I Wetterbeständigkeit
- I Große Zähigkeit
- I hohe Schlag- und Druckbeständigkeit
- I Keine Beimengung, die die Luft- und Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigt (z.B. Lehm, Erde)
- I würflich und scharfkantiges Brechen des Gesteins
- I schlag- und kantenfester gebrochener Schotter

Die oben genannten Anforderungen an den Gleisschotter werden durch in Normen festgelegten Versuchen nachgewiesen. Um beispielsweise die Verwitterungsbeständigkeit des Schotters nachzuweisen, wird dieser in einer Salzlösung gekocht. Die Wasseraufnahme darf 0,5 Gew.% nicht überschreiten, ansonsten ist der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechseln und ein Kristallisationsverfahren durchzuführen [5]. Ein weiterer nachzuweisender Parameter ist der Widerstand gegen Zertrümmerung, welcher aufgrund der hohen Korn-zu-Korn-Spannungen von Relevanz ist. Dieser wird mittels Los Angeles Test (LA-Test) ermittelt [6]. Hierbei wird eine Probe von 10 kg (50% Körnung 31,5/40 und 50% Körnung 40/50) gemeinsam mit 12 Stahlkugeln in einem Zylinder mit einer Geschwindigkeit von 31-33 U/min 1000-Mal um seine Achse gedreht. Nach Beendigung des Versuches wird der Abrieb der Gesteinskörner anhand eines Siebdurchganges mit einem 1,6 mm-Sieb bestimmt und der LA-Koeffizient, wie in Formel 1 gezeigt, berechnet [5].

$$LA = \frac{10000 - m}{100}$$

Formel 1: Los Angeles Test mit m = Siebdurchgang bei 1,6 mm Sieb

Je kleiner der LA-Koeffizient, desto höher ist der Widerstand des Schotters gegen Zertrümmerung.

Wie bereits in Kapitel 2.4 erwähnt, ist die Qualität des Gleisschotters auch stark von der Kantigkeit der Sieblinie abhängig. Je monotoner die Kornverteilung, desto größer wird der Porenanteil, womit die Elastizität steigt. Dies führt jedoch zu einer Verringerung der

Scherfestigkeit des Gefüges [5]. Demnach ist es wichtig, eine optimale Abstufung der Tragfähigkeit und Elastizität des Schotterbetts zu wählen [7].

### 3.3 Verformungsverhalten

Das Verformungsverhalten des Schotterbetts ist von den folgenden Punkten abhängig:

- I von der Betriebsbelastung
- I von der Qualität des Oberbaus
- I von der Verschmutzung des Schotterbetts

Diese drei Kriterien bestimmen ebenfalls den Verlauf der Gleisqualität [8]. Abbildung 2 zeigt das Verformungs- bzw. Setzungsverhalten des Schotterbettes in Abhängigkeit der Betriebsbelastungen und kann in eine Anfangsphase der schnellen Setzungen und in die darauffolgende Konsolidierungsphase, bei der das Setzungsverhalten näherungsweise linear angesetzt werden kann, unterteilt werden [3].

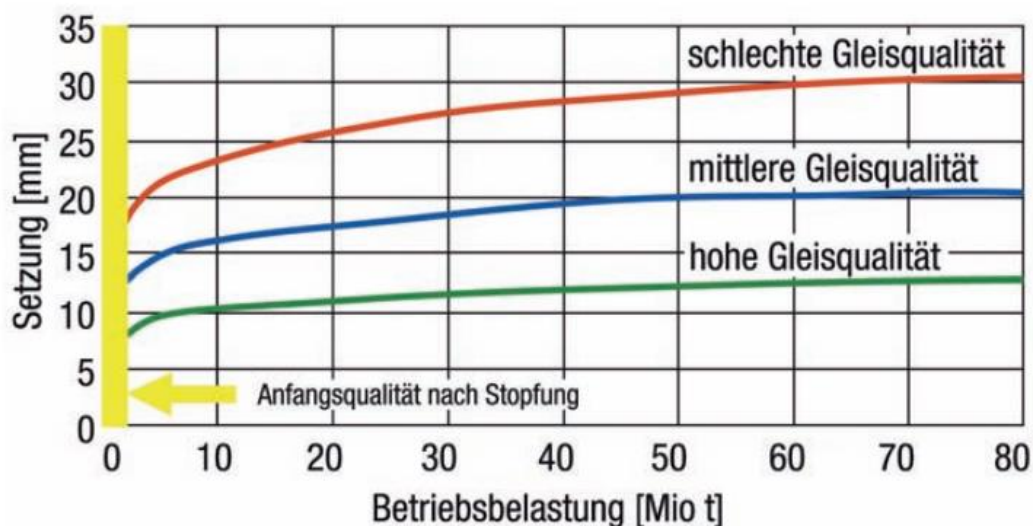


Abbildung 2: Setzungen unter Betriebslast für verschiedene Gleisqualitäten [8]

Der Einfluss der Betriebslast bzw. die Einwirkungen auf das Schotterbett werden durch die Streckenbelastung pro Jahr (MGT/Jahr), durch den Achsdruck und die Fahrgeschwindigkeit bestimmt. Hohe Achsdrücke führen zu starken Setzungen. Bei einer Erhöhung der Radlast um 10 % ist von einer Verkürzung der Instandhaltungszeiträume von 30 % auszugehen [8]. Ein weiterer erheblicher Einfluss auf das Setzungsverhalten des Schotters ist die Größe der Schotterpressung (statische Achslast und dynamische Stoßlasten). Durch die einwirkenden Verkehrsbelastungen entstehen im Schotterbett Kornumlagerungen, Kornverschleiß durch Abrieb und Kornbruch nimmt zu [3]. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten steigen die auf das Schotterbett wirkenden dynamischen Kräfte an,

wodurch sich eine höhere Schotterpressung ergibt [8]. Weiters wird das Schotterbett durch die dynamischen Beanspruchungen mit Frequenzen angeregt. Bei Anregungen ab etwa 40 Hz beginnt der Schotter ein elasto-liquides Verhalten aufzuzeigen und neigt in Folge dessen zur Forminstabilität [3].

Die Qualität des Oberbaus ist auf der einen Seite von der Oberbaukonstruktion wie der Schienenform, der Art der Schwelle und der Befestigung geprägt und auf der anderen Seite von dem darunter liegenden Schottermaterial, der Bettungsstärke, dem Unterbauplanum und von der vorhandenen Planumsschutzschicht abhängig [8]. Bei der Untersuchung des Verformungsverhaltens von Schotter konnte festgestellt werden, dass durch die zufällige Anordnung der Gesteinskörnungen und der unterschiedlichen Anfangsverdichtungen, das Setzungsverhalten des Schotterbetts, selbst bei offenbar gleichen Randbedingungen, eine starke Streuung aufweist. Nasser Schotter fördert das Anwachsen der Verformungen/Setzungen und die Winkeligkeit des Schotters hat einen größeren Einfluss auf das Setzungsverhalten als die Abriebeigenschaft. Verfügt der eingebaute Schotter über eine weitgestufte Sieblinie und/oder kleinere Korngrößen, so kann dieser besser verdichtet werden, womit auch die Setzungseigenschaften des Schotterbetts verbessert werden. Neben den Korn-eigenschaften und der Kornzusammensetzung des Schotters, hat auch die Art der Schwelle einen Einfluss auf das Setzungsverhalten. Stahl- und Betonschwellen zeigen im Vergleich zu Holzschwellen ein annähernd gleiches, schlechtes Setzungsverhalten auf. Aufgrund der Anpassungsfähigkeit und Weichheit des Materials Holz, verfügen Holzschwellen über eine größere Kontaktfläche zum Schotterbett. Dadurch treten geringeren Spannungsspitzen in der Kontaktzone zwischen Holzschwellenunterkante und Schotter auf, die einwirkenden Lasten können besser verteilt werden. Geringere Setzungen sind die Folge [3].

Mit Zunahme der Verschmutzung des Schotterbetts wird der Setzungsverlauf beschleunigt [5]. Durch den Abrollvorgang des Rades auf der Schiene wird die Schwelle vor tatsächlichem Erreichen geringfügig angehoben. Dies führt beim Überrollen der Schwelle zu einem Aufschlagen auf den darunter liegenden Schotter. Dabei kommt es an den Berührungspunkten zu Absplitterungen der Schotterkörner.

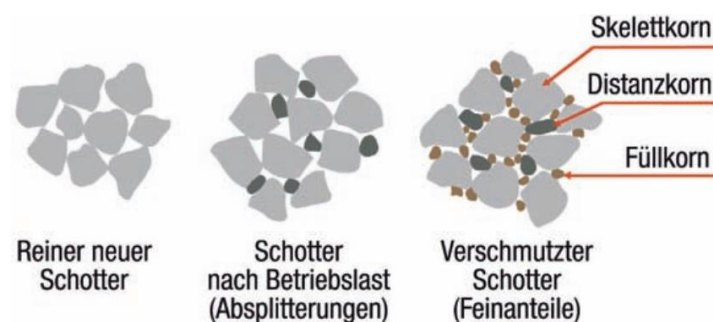


Abbildung 3: Schematische Darstellung Schotter [5]

Die vorhandenen Distanzkörner, die sich in den Zwischenräumen der Skelettkörner befinden (siehe Abbildung 3), sorgen zunächst für eine höhere Festigkeit, eine Vergrößerung der Kontaktfläche und die Erhöhung der Scherfestigkeit. Durch das immer wiederkehrende Aufschlagen der Schwelle auf den Schotter entstehen jedoch immer mehr Distanzkörner. Dadurch bildet sich immer feiner werdendes Material (Füllkorn). Nach einer gewissen Beanspruchung sind die Skelettkörner mit Distanz- und einem immer größer werdenden Anteil an Füllkörner umschlossen. Dies führt aufgrund des kleineren inneren Reibungswinkels des Materials zu einem Verlust der Scher- und Tragfestigkeit [5]. Ist das Schotterbett in einem derartigen fortgeschrittenen Stadium der Verschmutzung, so ist eine Schotterbettreinigung durchzuführen, um die durch die Verschmutzung hervorgerufenen, zunehmenden Gleislagefehler (Längshöhe, Quershöhe und Richtung) zu beheben [9]. Aufgrund der Reduktion der Hohlräume zwischen den Skelettkörnern durch Abrundung und Zuwachs von Feinanteilen, wird das Niederschlagswasser zurückgehalten; die Feinteile werden durch den Regen nach unten geschwemmt, das Planum bleibt feucht und seine Tragfähigkeit nimmt ab [3]. Häufigere Stopfeinsätze sind die Konsequenz [9].

### 3.4 Schotterbettbearbeitung

Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, soll der einzubauende Gleisschotter möglichst frei von Verunreinigungen wie Lehm oder anderen Feinanteilen sein und eine kantige Kornform besitzen (höhere Scherfestigkeit als bei Rundkörner). Dies führt zu einer höheren Druckfestigkeit und vergrößert den Querverschiebewiderstand [9].

Kapitel 3.3 zufolge sind Schotterbettreinigungen dann durchzuführen, wenn starke Verschmutzungen des Schotterbettes vorliegen. Dies soll zur Wiederherstellung der Gleislage und zur Erhöhung der Scher- und Tragfähigkeit dienen. Mögliche Ursachen der Verschmutzung des Schotters können grob in vier Kategorien eingeteilt werden [3]:

- I Transport
- I Luft
- I Stopfen
- I Verkehr

Aufgrund des schwimmend gelagerten Gleisrostes im Schotterbett ist es möglich, dass die entstandenen Verschmutzungen wie auch die Setzungen, die eine veränderte Gleislage bewirken, mit geringen Kosten durch vollautomatisierte Oberbaumaschinen berichtigt werden können [9]. Wichtig bei der Schotterbettbearbeitung ist jedoch, dass nicht nur Stopfarbeiten durchgeführt werden, um die Gleislage wiederherzustellen, sondern dass auch die

Schotterbettung gereinigt wird. Wird auf die Reinigung verzichtet, kann das Gleis in kurzer Zeit wieder in die schlechte Lage zurück sinken [3].

Beim Vorgang des maschinellen Stopfens des Gleises werden die Schotterkörner mittels Pickel unter die Schwelle gedrückt. Dadurch kann die Soll-Lage des Gleises wiederhergestellt werden. Aufgrund der Reibkräfte zwischen den Schotterkörnern bleiben diese dort unverändert liegen. Damit der Schotter unter der Schwelle eingebracht werden kann, muss das Gleis bei der Stopfung auf die Soll-Lage angehoben werden. Dadurch entsteht unter der Schwelle der benötigte Hohlraum, welcher durch das asynchrone Gleisdruck-Stopfprinzip der Stopfaggregate mit gerichteter und geradliniger Schwingung und einer Stopffrequenz von 35 Hz verfüllt wird und das Auflager gleichmäßig verdichtet [8]. In Abbildung 4 ist die davor beschriebene Wirkungsweise der Stopfung visualisiert dargestellt.

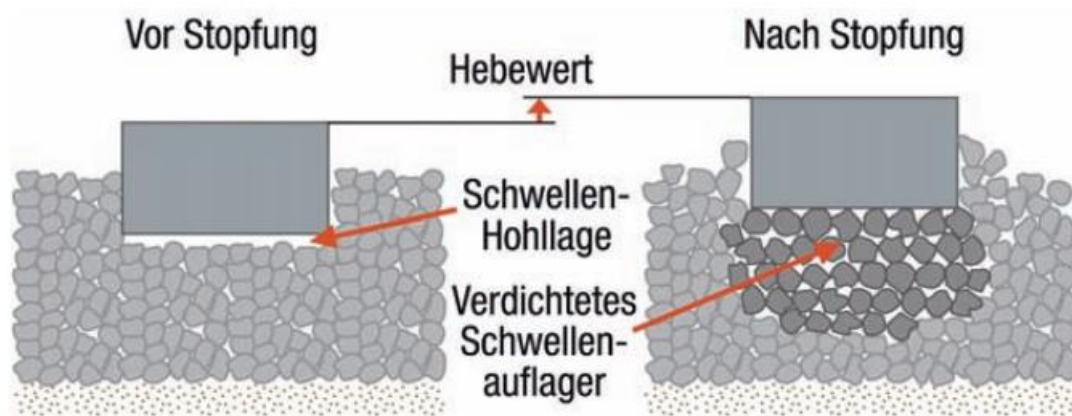


Abbildung 4: Wirkungsweise der Stopfung [8]

Im Zuge der Stopfarbeiten kommt es im Schotterbett im Wesentlichen zu einer Umlagerung der Schotterkörner, es ist nur von einer geringfügigen Absplitterung der Gesteinskrönung auszugehen (abhängig von der Qualität des Schotters). Untersuchungen zeigten, dass die Entstehung von Feinanteilen durch Stopfungsarbeiten lediglich einen theoretischen, vernachlässigbaren Anteil ausmachen [8].

Weist das Schotterbett Verschmutzungen auf, so ergibt sich eine ungünstige Druckverteilung auf das Planum. Feinteile steigen aufgrund der fehlenden Niederwasserableitung vom Untergrund in das Schotterbett auf, bis diese (im schlimmsten Fall) an der Oberfläche erkennbar sind. Dies führt zu ungleichmäßigen Setzungen, die unter Umständen zu Entgleisungen führen können. Die Notwendigkeit einer Schotterbettreinigung kann anhand von Messdaten des Messwagens eruiert werden [8]. Um das Schotterbett zu reinigen, wird das Material mit Räumketten ausgehoben, auf einem Förderband zu Siebanlagen befördert und gesiebt, um das Über- und Unterkorn sofort auszuscheiden. Anschließend wird der

wieder einzubringende Schotter gewaschen und gebrochen und anhand der Förderbänder an die Aushubstelle zurückgebracht, wo es schlussendlich unter Zugabe von Neuschotter wieder eingebaut wird [3].

In Abbildung 5 ist der schematische Qualitätsverlauf eines Gleises dargestellt. Hierbei ist ersichtlich, dass nach der Durchführung der Stopfungsarbeiten eine deutliche Verbesserung der Gleislage eintritt. Wird der Betrieb am Gleis wieder aufgenommen, kommt es zu starken Anfangssetzungen, die jedoch schnell abklingen und somit in Form einer logarithmischen Funktion beschrieben werden können. Diese Setzungen resultieren aus der Kornumlagerung und des Brechens der Schotterkörnung und treten innerhalb der ersten Belastungen von 0,5 bis 2 MGT auf. Danach kann die Veränderung der Gleislage anhand einer linearen Funktion angenähert werden. Das Erreichen der Eingriffsschwelle ist vor allem von der Höhe der Anfangsqualität bestimmt, die wiederum von der Verlegung bzw. Errichtung des Gleises und der durchgeführten Instandhaltung abhängig ist [8].

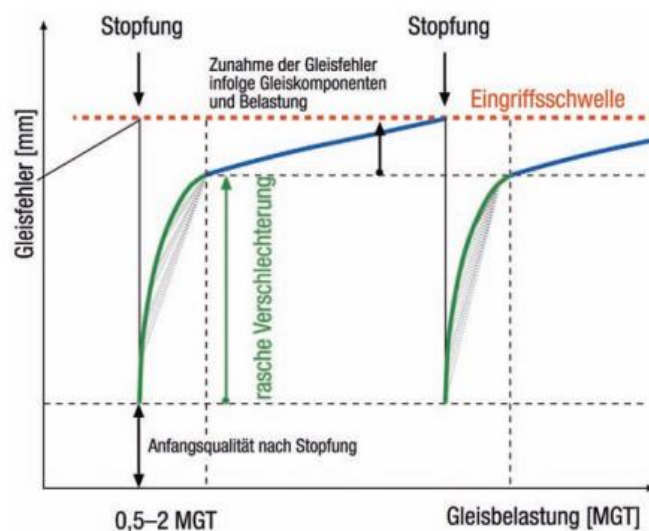


Abbildung 5: Schema des Gleisqualitätsverlaufes [8]

## 4 Inspektion des Gleiskörpers

Die Inspektion des Gleises wird vom Infrastrukturbetreiber durchgeführt und besteht aus der Detektion von Verschleißzuständen des Gleises bzw. seiner Einzelkomponenten. Hierbei ist es vor allem wichtig, sicherheitskritische Zustände zu detektieren und bei Erreichen sicherheitskritischer Grenzwerte sofort einzugreifen (SES Soforteingriffsschwelle) [10]. Inspektionen verfolgen heutzutage, neben dem Aspekt der Sicherheit, auch den Aspekt des Qualitätsmanagements und dessen Automatisierung [11]. Dabei liegt der Fokus vor allem auf folgenden Punkten:

- I Gleislage
- I Verwindung
- I Schienenabnutzung
- I Spurweite

Die Inspektion kann visuell oder maschinell erfolgen, in aller Regel aber durch den Einsatz eines Gleismesswagens. Die visuelle Erfassung des Gleiszustandes und des erweiterten Fahrwegs wird zweimal jährlich durchgeführt [10]. Zusätzlich kann die Bewertung des Zustandes des Fahrweges in zwei Bereiche eingeteilt werden: Anhand des Oberbaumesswagens können verschiedenste Gleisparameter erfasst werden. Die Messwerte der vertikalen Gleislage liefern dabei beispielsweise Aufschlüsse über das Setzungsverhalten des Gleises. Durch das Einsetzen des Georadars können Längsschnitte des Gleises erstellt werden, an denen der Feuchtigkeitsgehalt des Schotters und des Untergrundes, wie auch Verschmutzungen detektiert und ersichtlich gemacht werden können [2]. Zusätzlich zu den bereits gemessenen Daten, kommen vermehrt Video-Monitoring Systeme zum Einsatz, um die visuelle Inspektion vor Ort zu reduzieren. Neben der Detektion der klassischen Gleisparameter wie der Verwindung und Spurweite, wird hier vor allem auf die Reproduzierbarkeit der Messdaten Wert gelegt. Das bedeutet, dass die Messsysteme in den unterschiedlichsten Fahrzeugzusammenstellungen auch bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und mehrmaliger Messung stets dasselbe Ergebnis liefern [11].

In den nachstehenden Kapiteln werden die für die maschinelle Inspektion verwendeten Geräte näher erläutert.

### 4.1 Messwagen

Der Einsatz des Messwagens dient der Optimierung der visuellen Inspektion. Die daraus gewonnenen Messdaten bilden eine objektive Grundlage für die Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen. Bei der Bestimmung des einzusetzenden Messwagens

haben die Art und Anzahl der Messsysteme, die Anzahl der Arbeitsplätze, die generelle Raumerfordernis, die Messgeschwindigkeit, die Mitarbeitererfordernis, sowie die Raumaufteilung einen großen Einfluss [11]. Je nach Anforderung und Anzahl der integrierten Messsysteme kann ein Gleismesswagen eine Vielzahl an Parametern liefern. Der Messwagen hat keine vordefinierte Größe oder Anzahl an Parametern und kann somit je nach Wunsch des Kunden angepasst werden. Die Messung der Verwindung, der Gleislage, des Schienenprofils und der Spurweite sollte jedoch immer inkludiert sein [10].

Bei den in Einsatz befindenden Messwagen bildet das Gleisgeometriemesssystem die Basisausstattung. Die Gleisgeometrie kann grundsätzlich mit zwei verschiedenen Messprinzipien ermittelt werden. Dabei unterscheidet man zwischen der Sehnennmessung und der Inertialmessung. Weiters sind Videoaufzeichnungen und/oder weitere installierbare Messsysteme abhängig von der zur Verfügung stehenden Fahrzeuggröße, welche sich aus den vorhandenen Platzverhältnissen der Rechnerschränke und Auswerteeinheiten, als auch aus der gewünschten Fahrgeschwindigkeit des Messwagens ergeben. Um den Messwagen auch während der Betriebszeit fahren lassen zu können, ist eine Fahrgeschwindigkeit von zumindest 160 km/h wünschenswert, welche auch mit selbstfahrenden Messfahrzeugen erreicht werden kann. Aktuell sind Messwagen im Einsatz, die mit einer Messgeschwindigkeit von bis zu 250 km/h betrieben werden können. Weiters weisen die Messfahrzeuge schallisolierte und klimatisierte Kabinen auf und verfügen über Führerstände, bei der beide Fahrtrichtungen betrieben werden können. Die Größe bzw. der Raumbedarf im Messfahrzeug wird durch die Anzahl an benötigtes Personal bestimmt. So kann ein Fahrzeug über Besprechungs- oder Konferenzräume, Küchenblock, Schlafräume, Sanitärräume mit Dusche und Toilette sowie Werkstätten verfügen. Hierbei spielt die Netzgröße des zu detektierenden Netzes und die geplanten Einsätze über mehrtägige Aufenthalte am Messfahrzeuges eine große Rolle [11].

Verfügt ein Messfahrzeug über ein berührungsloses Gleisgeometriemesssystem mit integrierter GPS-Navigation und doppelter optischer Spurweitenmessung, können damit die Längshöhe und Richtungslage der linken und rechten Schiene, die Spurweite, die Überhöhung, die Querhöhe, die Längsneigung, die Verwindung, die Krümmung, der Bogenradius, die GPS-Position und die Messgeschwindigkeit gemessen werden. Diese Parameter sind vor allem für die Planung von Stopfungsarbeiten notwendig. Anhand des Längshöhensignals können Stellen mit fortschreitendem Schotterverschleiß und Problemstellen im Untergrund festgestellt werden. Um den Zustand der Schienenprofile zu detektieren, werden Laser- und Videokameras eingesetzt. Hierbei befinden sich Messwertgeber mit Lasersender und Empfangskameras auf dem Drehgestell des Messfahrzeugs. Die verbauten Lasereinheiten filtern störendes Umgebungslicht heraus, die Empfangskameras erfassen das gesamte Schienenprofil. Anhand dieser Daten kann der Austausch von Schienen geplant werden. Für die Überprüfung der Schienenbefestigung in engen Gleisbögen werden die Messdaten

der Schienenneigung, des Schienenfußabstandes sowie der Spurweite herangezogen. Weiters können Indikatoren wie die äquivalente Konizität, die Auskunft über das Laufverhalten liefert, bestimmt werden. Auch Systeme wie die Achslagerbeschleunigung kommen zum Einsatz [11].

#### 4.1.1 ÖBB Oberbaumesswagen EM 250

Der bei der ÖBB-Infrastruktur AG eingesetzte Messwagen EM 250 kann an Regelzüge angehängt werden, sodass eine Inspektion auch während der Betriebszeit durchgeführt werden kann. Aufgrund der GPS-Stützung der Messung und der Aufnahme der Fahr- und Messgeschwindigkeit sind alle Messsignale stationiert und interpretierbar. Die Messung der Gleisgeometrie erfolgt standardmäßig über eine Inertialmesseinheit (IMU), zwei optischen Spurweitenmesssysteme (Dual OGMS) und einer Navigationsanlage (Navigationscomputer mit integriertem GPS-Empfänger und GPS-Antenne). Das eingebaute Messsystem erfasst die translatorische und rotatorische Beschleunigung, aus denen anschließend die Gleislage anhand von doppelter Integration berechnet werden kann. Durch die Messung der Spurweite kann die Raumkurve für beide Schienen separat ermittelt werden. Die Genauigkeit dieses eingesetzten Messsystems liegt, bei einem Geschwindigkeitsbereich von 5 km/h bis 250 km/h, unter 1 mm und liefert somit eine eindeutige Kilometrierung. Mithilfe der verbauten Beschleunigungsmessgeber, die vertikal am Achslager einer Laufachse des Messdrehgestells befestigt sind, wird die Beschleunigung aufgenommen. Diese liefert Information über Schweißstöße, Weichenherzbereiche sowie Information über womöglich auftretende Schlupfwellen und Riffel in der Schienenoberfläche. Über die im Messwagen verbauten Lasersensoren wird alle 5 mm die absolute Höhenlage jeder Schiene über eine Dreipunkt-Messsehne gemessen. Daraus können Rückschlüsse auf Schienenoberflächenfehler gewonnen werden [10].

#### 4.1.2 Einsenkungsmesswagen

Der Einsenkungsmesswagen kann je nach Gleisqualität mit einer Geschwindigkeit von 15 bis 25 km/h Messungen am Gleis durchführen. Dieser misst die mittlere, linke und rechte Gleiseinsenkung bei einer Achslast von 20 t bei einer Messgenauigkeit von  $\pm 0,2$  mm. Der Einsenkungsmesswagen kommt vor allem bei Oberbauabnahmen und bei Erkundungen von Unterbauproblemen zum Einsatz. Ein Gleis im guten Zustand zeigt eine Einsenkung zwischen 1 und 3 mm. Misst der Einsenkungsmesswagen eine Einsenkung  $< 1$  mm, so weist dies auf ein zu steifes System hin und der Schotter wird sehr stark beansprucht. Wird eine Einsenkung  $> 3$  mm detektiert, so weist dies auf ein zu weiches System hin, der Untergrund kann die einwirkenden Kräfte nicht aufnehmen [10].

Abbildung 6 zeigt Messdaten eines Einsenkungsmesswagens von einem 5,0 km langen Streckenabschnitt der SBB im Jahr 2013 und 2015. Bei der Gegenüberstellung der Messdaten

von 2013 und 2015 kann erkannt werden, ob und wie stark sich das Gleis in der Höhe über die Länge verändert hat. So können durchgeführte Instandhaltungen oder neu auftretende Fehlerstellen detektiert und gezielt Instandhaltung durchgeführt werden. Die großen Sprünge der gemessenen Einsenkungen sind auf Übergängen von unterschiedlich eingesetzten Komponenten zurückzuführen. Deshalb sollten diese in der Praxis so wenig wie möglich zum Einsatz kommen.

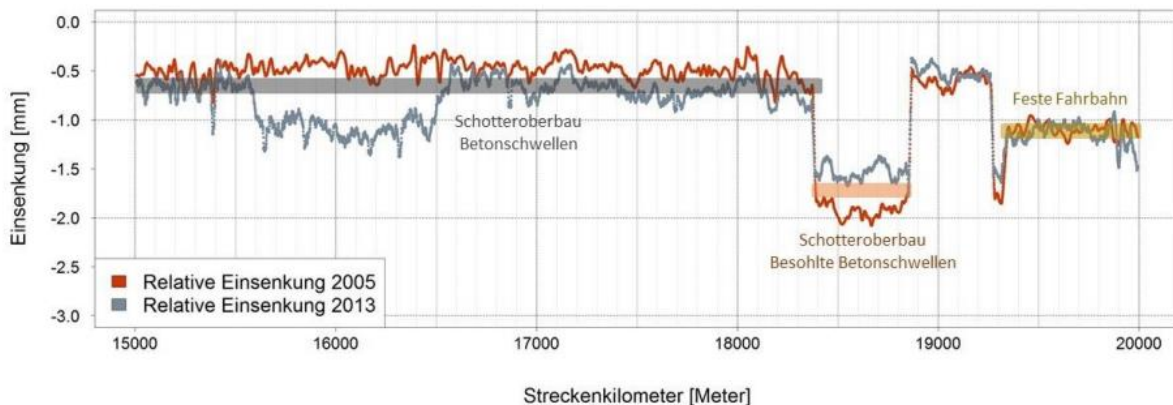


Abbildung 6: Messergebnis Einsenkungsmesswagen [10]

## 4.2 Georadar

Das Georadar wendet ein geophysikalisches Messsystem an, bei dem keine Gleislagemessung durchgeführt wird, sondern die Beschaffenheit des Ober- und Unterbaus erfasst werden. Dies entspricht, verglichen zum Gleismesswagen, einem absolut konträres Messsystem. Das Georadar wird als Empfänger und gleichzeitig als Sender für elektromagnetische Impulse verwendet. Aus den elektromagnetischen Impulsen können anhand der Laufzeit und Intensität, die Eigenschaften verschiedener Materialien abgeleitet werden. Die Messgeschwindigkeit des Georadars liegt bei mehr als 100 km/h [2].

Wie in Abbildung 7 gezeigt, werden durch die Sendung der elektromagnetischen Impulse in den darunterliegenden Boden die Impulse mit unterschiedlicher Geschwindigkeit und Intensität, abhängig des vorliegenden Materials, reflektiert. Die reflektierten Impulse werden anhand einer Funktion über die Zeit (in Nanosekunden) und deren Amplitude (in Millivolt) beschrieben. Um diese Funktion besser interpretieren zu können, wird diese mit einem Farbcode hinterlegt, bei dem spezifische Eigenschaften einem spezifischen Farbcode zugeordnet werden. Aufgrund mehrerer, hintereinander durchgeführter Messungen kann, nach einer Aneinanderreihung der Messdaten, das Radargramm ausgegeben werden. Um das Radargramm lesen und interpretieren zu können, bedarf es an speziellem Knowhow. Da jedoch für die Praxis eine simple Zustandsanalyse des Gleiskörpers anzustreben ist, wurden spezifische Indikatoren ermittelt, die die Erkenntnisse der Georadarbefahrung übersichtlicher zusammenfassen. Damit wurde ein Amplituden-Zeit Diagramm

erstellt, bei dem die Feuchtigkeit, der Verschmutzungsgrad und der Verlehmungsgrad des Gleiskörpers bewertet werden. Ebenheiten einzelner Schichten in Längsrichtung können durch die Rauigkeit der im Radargramm angezeigten Linien ermittelt werden.

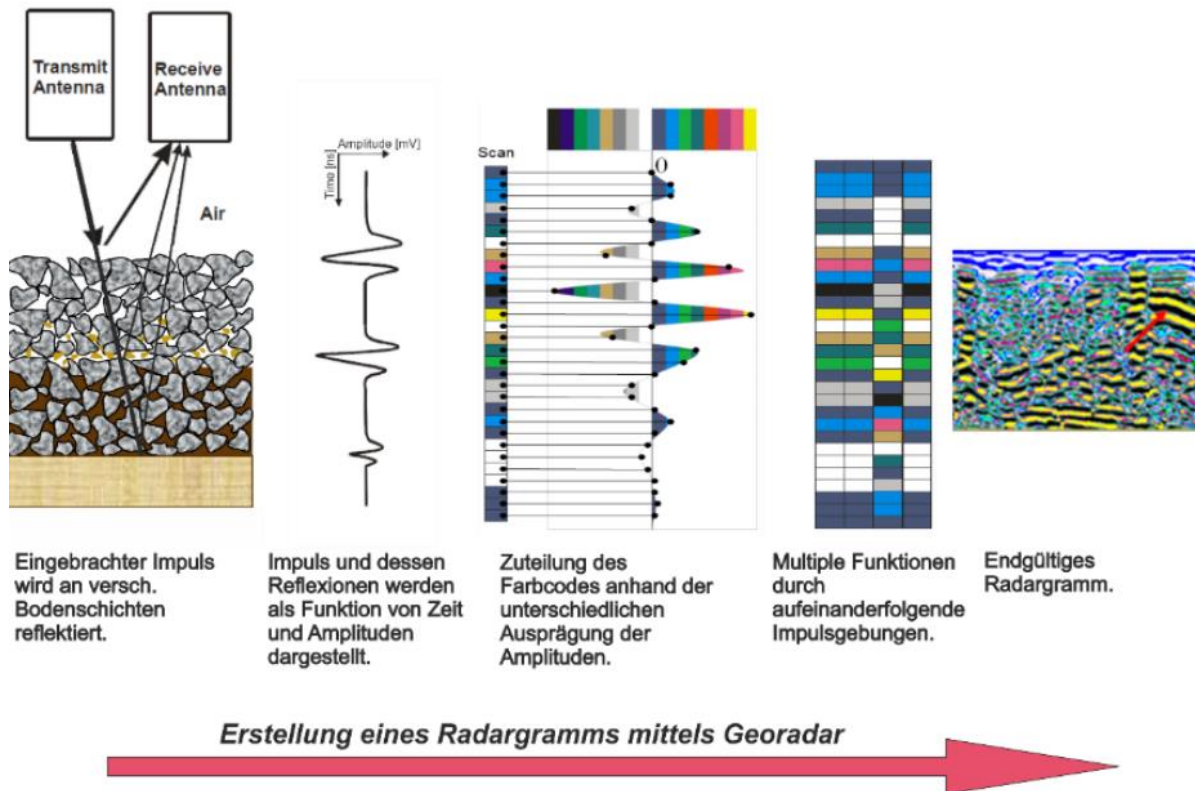


Abbildung 7: Erstellung eines Radargramms mittels Georadar [2]

Anhand der Erfassung der Geschwindigkeit und Zeitdifferenz des Impulsausstoßes und -empfanges können ebenfalls die Mächtigkeit der einzelnen Schichten im Untergrund berechnet werden. Dazu werden jedoch die dielektrischen Konstanten für die relevanten Materialien benötigt, die die Bodenbeschaffenheiten der vorhandenen Bodenschichten definiert. Diese können einer Tabelle entnommen werden.

Verglichen mit der Kilometerleitung des Oberbaumesswagens, wird das Georadar in Österreich nur sehr selten eingesetzt. Der Einsatz des Georadars in Österreich umfasste in den Jahren 2021 bis 2015 rund 1.500 Gleiskilometer [2].

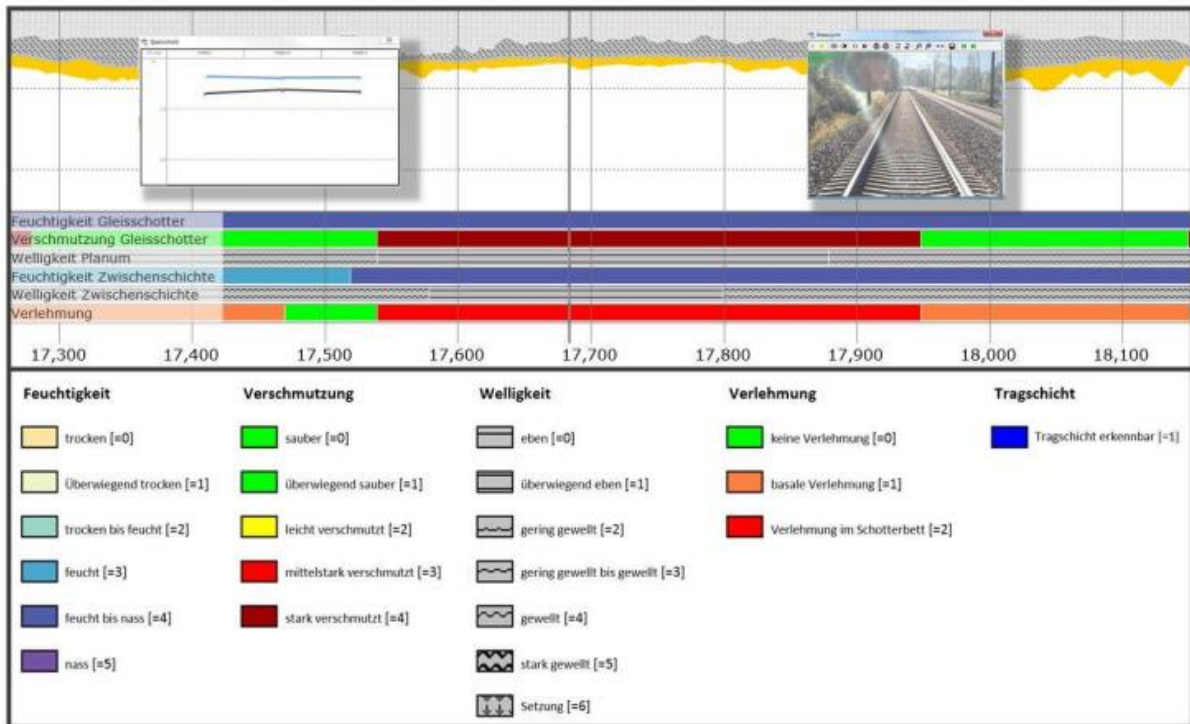


Abbildung 8: Georadarauswertung der ÖBB [2]

Abbildung 8 zeigt eine bei der ÖBB momentan verwendete Darstellung der Auswertung eines Georadars, bei dem ein Längsschnitt des Gleises erstellt wird. In diesem sind die Stärken der jeweiligen Schichten, sowie dessen Verschmutzungsgrad erkenntlich gemacht. Die unter dem Längsschnitt befindenden Farbbalken geben Aufschluss über die davor erläuterten spezifischen Indikatoren, die aus den Rohdaten gewonnen werden. Bei dieser Darstellung bedarf es keines speziellen Knowhows, um ein Radargramm lesen zu können. Dies führt zu einer besseren Verständlichkeit der Ergebnisse [2].

## 5 Methodik und datengetriebene Analyse der Gleisqualität

Die Gleislageinformationen durch den Oberbaumesswagen schaffen eine Grundlage für die Bewertung der Gleisqualität und sind international genormt. Daraus resultiert, dass unabhängig von der Art des installierten Messequipments von verschiedenen Oberbaumesswagen gleiche oder zumindest ähnliche Rohdaten geliefert werden. Um die Fehlerursache detektieren zu können, werden die Rohdaten aufbereitet und genauer analysiert. Meist wird jedoch nur der Gleislagefehler behoben und nicht die tatsächliche Ursache. Die Kenntnis über die Art des Fehlers ist ein wichtiger Aspekt für eine nachhaltige und fehlerorientierte Instandhaltung der Fahrbahn [12].

### 5.1 Qualitätswerte

Um die Qualität des Gleiskörpers beurteilen zu können, werden unterschiedliche Messsignale, Qualitätssignale und Qualitätswerte für die Auswertung herangezogen. Damit die Aussagekraft und die Möglichkeiten der Auswertung der einzelnen Signalkanäle richtig angewendet wird, sind zunächst folgende Definitionen der nachstehenden Begriffe notwendig [13]:

- Messignal  
= Signale, die vom Messwagen aufgenommen, nachstationiert und gefiltert für weitere Auswertungen herangezogen werden
- Qualitätssignal  
= Kennziffern, die aus den Messsignalen errechnet werden, entweder direkt am Messwagen oder im Nachhinein
- Qualitätswerte  
= Werte, die aus einer Regressionsanalyse von Mess- und Qualitätssignalen hervorgehen

### 5.2 Gleislagefehler

Für die Sicherstellung des Fahrkomforts und um einen sicheren Eisenbahnbetrieb zu gewährleisten, müssen Gleislagefehler so schnell wie möglich erfasst und bei Überschreiten von sicherheitskritischen Schwellenwerten behoben werden. Es wird von einem Gleislagefehler gesprochen, wenn die erfasste Lage bzw. Höhe eines Gleises nicht der Soll-Höhe entspricht. Diese Fehler entstehen in der Regel während der Nutzung des Gleises unter Betriebseinwirkungen [14].

### 5.2.1 Die vertikale Gleisgeometrie bzw. Längshöhe

Die vertikale Gleisgeometrie, auch als Längshöhe bekannt, wurde historisch durch eine symmetrische Sehnemessung mit einer 10 m langen Sehne gemessen (siehe Abbildung 9). Heutzutage wird die Längshöhe mithilfe des Oberbaumesswagens über die in dem Messwagen verbaute Inertialmesstechnik gemessen [14].

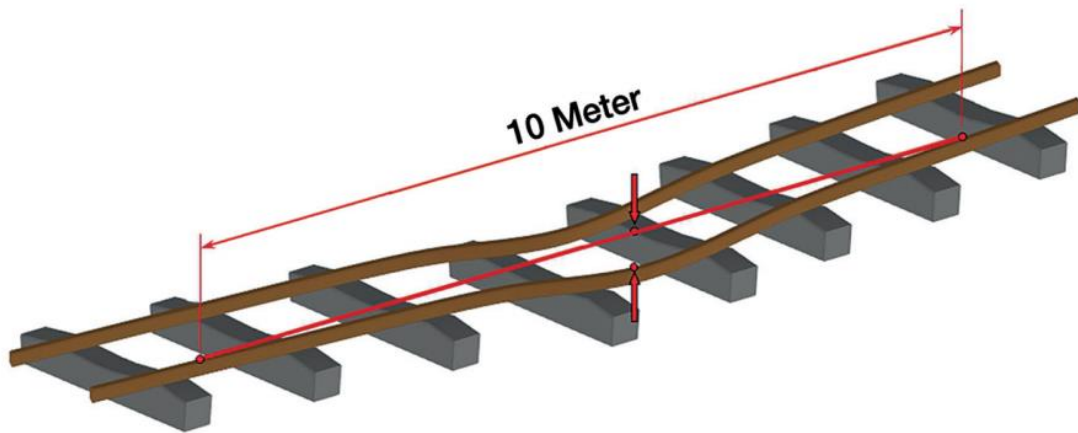


Abbildung 9: Historische Messung der vertikalen Ausrichtung [15]

Bei der Messung der Längshöhe werden mit Hilfe des Oberbaumesswagens der Zusammenhang dreier Punkte an der Schienenoberkante auf einer Schiene hergestellt. Die auf den Schotter einwirkenden Lasten führen zu sich ständig ändernden Steifigkeitsverhältnissen, die Veränderungen des Schottergefüges und des Unterbauplanums bewirken. Diese Veränderungen haben ungleichförmige Einsenkungen zur Folge, es entstehen bleibende Setzungen. Diese bewirken eine Veränderung der Höhenlage der Schiene, die anhand der Messung der Längshöhe detektiert werden kann [16]. Mithilfe der Rohdaten des Längshöhensignals kann eine punktuelle Überschreitung von Schwellenwerte schon während der Befahrung mit dem Oberbaumesswagen erkannt werden [2].

Immer wiederkehrende, periodische Gleislagefehler können durch ihre Wellenlänge charakterisiert werden. Die Wellenlänge kann mithilfe des Berechnungsverfahrens von Zimmermann in Abhängigkeit von der Biegesteifigkeit der Schiene  $E \cdot I$  und der Gleissteifigkeit  $c_G$  berechnet werden (siehe Formel 2) [14].

$$\lambda_s \geq 2\pi \cdot \sqrt[3]{\frac{8EI}{c_G}}$$

Formel 2: Berechnung der Wellenlänge nach Zimmermann

Durch die Interaktion zwischen Fahrweg und Fahrzeug entsteht die maximale Wellenlänge für die Verformung der Bettung. Die maximale Wellenlänge ist einerseits durch die

Geschwindigkeit des Fahrzeuges  $v$  und andererseits durch die vertikale Eigenfrequenz des Fahrzeuges  $f_F$  festgelegt (siehe Formel 3).

$$\lambda_s \leq \frac{v}{f_F}$$

Formel 3: Maximale Wellenlänge für die Verformung der Bettung

Gleislagefehler, die aus der Interaktion zwischen dem Fahrzeug und der Bettung resultieren, können zusätzlich mit Gleislagefehlern überlagert sein, die aus dem Zustand des Unterbaues bzw. Untergrundes hervorgerufen werden [14].

Abbildung 10 zeigt typische Fehlerwellenbänder, die empirisch ermittelt und zur Beurteilung der Vertikalgeometrie herangezogen werden:

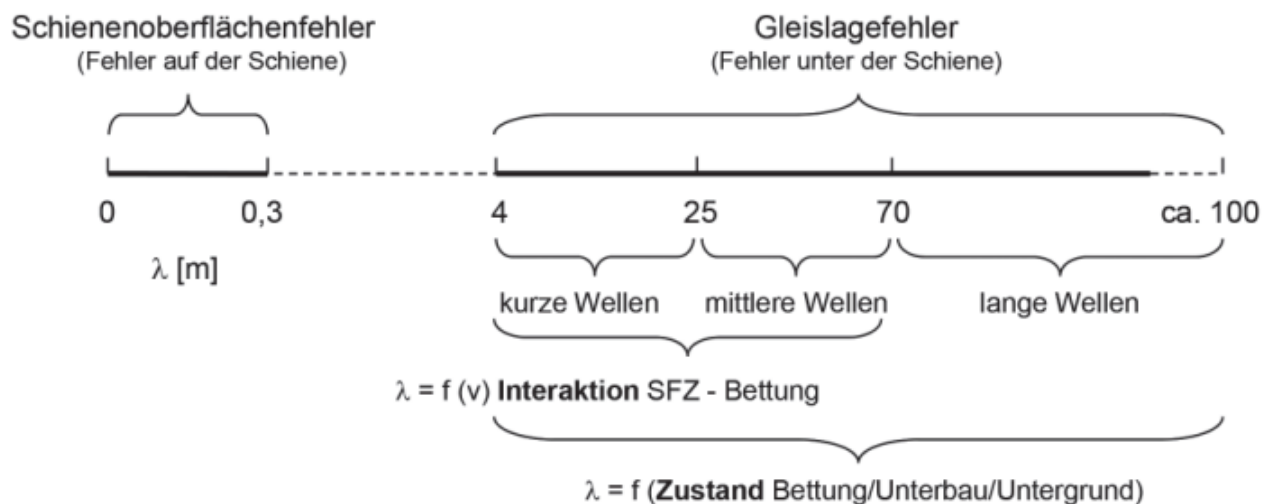


Abbildung 10: Wellenlängen von Gleisfehlern [14]

**Wellen von 0 bis 3 m:** Dieser Fehler tritt in Längsrichtung des Schienenkopfes und in der Geradheit der Schiene auf (z.B. Schlupfwellen, Riffel, schlechte Schweißstellen, Walzungsrundheiten bei der Schienenherstellung etc.). Um den Fehler zu beseitigen, müssen die Schienen geschliffen oder Stoßbiegerichtet durchgeführt werden. Wellen von 0 bis 3 m weisen die Tendenz auf, sich in längere Fehlerwellen zu entwickeln [3].

**Wellen von 3 bis 25 m:** Dieser Fehler wird durch unterschiedliche Gleissetzungen hervorgerufen. Achsabstände der Wagen und deren dynamische Bewegung wirken sich ebenfalls negativ in diesem Bereich aus. Stopfarbeiten können zur Berichtigung des Fehlers herangezogen werden [3].

**Wellen von 25 bis 70 m:** Dieser Fehler wird meist durch Fehler in der Trassierung, durch schlechte Instandhaltung oder durch Nachgeben des Gleisunterbaus aufgrund nicht ausreichender Tragfähigkeit verursacht. Die Erfassung dieser Fehler kann mittels

Gleismessvorwagen EMSAT oder manuelle Langsehnvermessung durchgeführt und durch Stopfmaschinen berichtigt werden [3].

**Wellen über 70 m:** Dieser Fehler tritt bei Entwurfseigenheiten oder -fehlern auf [3] und wird auch durch inhomogene Setzungen im Unterbau bzw. Untergrund hervorgerufen. Diese Wellenlängen resultieren nicht aus der Interaktion zwischen Fahrzeug und Bettung und sind anhand moderner Vermessungsmethoden genau erfassbar [14].

Gleislagefehler mit einer Wellenlänge von 4 bis 25 m zeigen sicherheitskritische Fehler auf, die die Betriebssicherheit stark beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Bestimmung dieser Gleislagefehler ein wesentlicher Bestandteil der regelmäßigen Gleisgeometrieprüfung. Für die Beurteilung der Einzelfehler der Längshöhe sind gemäß RIL 821 folgende Beurteilungsmaßstäbe vorgeschriebene [14]:

- I  $SR_A$  ... bei Überschreitung ist eine vorbereitende Planung einer Instandhaltungsmaßnahme notwendig
- I  $SR_{100}$  ... beinhaltet den technischen/wirtschaftlichen Abnutzungsvorrat, bei Überschreitung ist eine Instandsetzung vor der Regelinspektion durchzuführen; der spätmöglichste Zeitpunkt ist durch das Maß der Überschreitung von  $SR_{100}$  in Verbindung mit der Fehlerentwicklung zu bestimmen
- I  $SR_{lim}$  ... bei einer Überschreitung von  $SR_{lim}$  ist mit einer Beeinträchtigung der Funktionsfähigkeit zu rechnen – es muss eine Instandsetzung in kürzester Zeit vollzogen werden

Tabelle 1 zeigt die jeweiligen Ausprägungen der oben erläuterten Beurteilungsmaßstäbe in Abhängigkeit der auf den betrachteten Abschnitt festgelegten Höchstgeschwindigkeiten.

Beurteilungsgröße	Einheit	$SR_{100}$					$SR_{lim}$		
Geschwindigkeit	km/h	$\leq 80$	$\leq 120$ > 80	$\leq 160$ > 120	$\leq 230$ > 160	> 230	$\leq 160$ > 120	$\leq 230$ > 160	> 230
Längshöhe	mm	15	13	11	9	7	14	11	9

Tabelle 1: Beurteilungsmaßstäbe für Einzelfehler der Gleislage [14]

Gleislagefehler mit einer Wellenlänge >25 m wirken sich nicht sicherheitsrelevant aus, haben jedoch einen großen Einfluss auf den Fahrkomfort. Für die Beurteilung der Gleisqualität gemäß der europäischen Norm EN 13848 sind für kurz-, mittel- und langwellige Gleislagefehler folgende Grenzwerte (siehe Tabelle 2) definiert. Hierbei sind die Wellenbereiche in

drei Bereiche D1 ( $3 < \lambda \leq 25$  m), D2 ( $25 < \lambda \leq 70$  m) und D3 ( $70 < \lambda \leq 150$  m) untergliedert.

Geschwindigkeit [km/h]	Sicherheitsgrenze IAL Mittelwert-Spitze [mm] Wellenlängenbereiche		
	D1	D2	D3
	$3 < \lambda \leq 25$ m	$25 < \lambda \leq 70$ m	$70 < \lambda \leq 150$ m
$v \leq 80$	28	N/A	N/A
$80 < v \leq 120$	26	N/A	N/A
$120 < v \leq 160$	23	N/A	N/A
$160 < v \leq 230$	20	33	N/A
$230 < v \leq 300$	16	28	N/A
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 50px; height: 20px; background-color: #cccccc; margin-right: 10px;"></div> Grenzwert für Längshöhenfehler aufgrund ihrer Auswirkung auf die Betriebssicherheit </div>			
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 50px; height: 20px; background-color: #d9ead3; margin-right: 10px;"></div> Keine Grenzwertfestlegung in EN 13848, da lediglich Auswirkung auf den Fahrkomfort, aber für Monitoring des Zustandes Bettung/Unterbau/Untergrund relevant </div>			

Tabelle 2: Sicherheitsgrenze IAL für Einzelfehler der Längshöhe [14]

Aus der EN 13848, Teil 5 können folgende Sicherheitsniveaus entnommen werden:

**Aufmerksamkeitsschwelle (AL):** Wird dieser Wert überschritten, so wird eine Analyse des geometrischen Gleiszustandes durchgeführt und eine Berücksichtigung des Abschnittes in der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen berücksichtigt.

**Eingriffsgrenze (IL):** Wird dieser Wert überschritten, so sind korrigierende Instandhaltungsmaßnahmen nötig, damit die Sicherheitsgrenze nicht vor der nächsten Inspektion erreicht wird.

**Sicherheitsgrenze (IAL):** Wird dieser Wert überschritten, sind sofortige Maßnahmen zu setzen, die das Risiko einer Entgleisung reduzieren, sodass ein akzeptabler Zustand des Gleises wiederhergestellt wurde. Dies kann beispielsweise durch Sperren der Gleise, Reduzierung der Geschwindigkeit oder durch die Korrektur der Gleisgeometrie erfolgen.

Harmonische kurz- und mittelwellige Gleislagefehler deuten auf Fehler in der Bettung hin, die auf die Interaktion zum Fahrzeug zurückzuführen sind. Nichtharmonische mittel- und langwelliger Gleislagefehler sind zumeist Indikatoren für Störstellen im Unterbau/Untergrund und sollten daher bei einer Zustandsbewertung für den Fahrweg bei der Instandhaltung berücksichtigt werden [14].

### 5.2.2 SigmaH

Ein Indikator für die Unregelmäßigkeit ist die Standardabweichung des Längshöhensignals (SigmaH) und beschreibt die Streuung der Werte um ihren Mittelwert. Die dafür zu betrachtende Einflusslänge ist gemäß EN 13848-5 mit 200 m festgelegt. Durch die

Standardabweichung des Längshöhensignals können diese Qualitätssignale zusätzlich in einer zeitlichen Betrachtung analysiert werden. Anhand dieser Betrachtung kann durch eine aus dem Regressionsmodell kalkulierte Verschlechterungsrate ermittelt werden, die eine Identifikation einer zukünftigen Überschreitung einzelner Schwellenwerte liefert [2]. Die Standardabweichung des Längshöhensignals wird vor allem für die Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen herangezogen, da diese Informationen über die Veränderung des zeitlichen Gleislageverhalten liefert [17].

In Abbildung 11 wird eine beispielhafte Darstellung des Gleislageverhaltens, das durch SigmaH beschrieben wird, gezeigt. Diese zeigt das zeitliche Verhalten einer Stelle im Gleis, die durch eine exponentielle Regressionsfunktion beschrieben werden kann. Weiters ist hier der Zeitpunkt des Einbaues als auch die Auswirkungen der Stopfeinsätze ersichtlich (Reduktion von SigmaH nach Durchführung von Stopfungseinsätzen) [2].

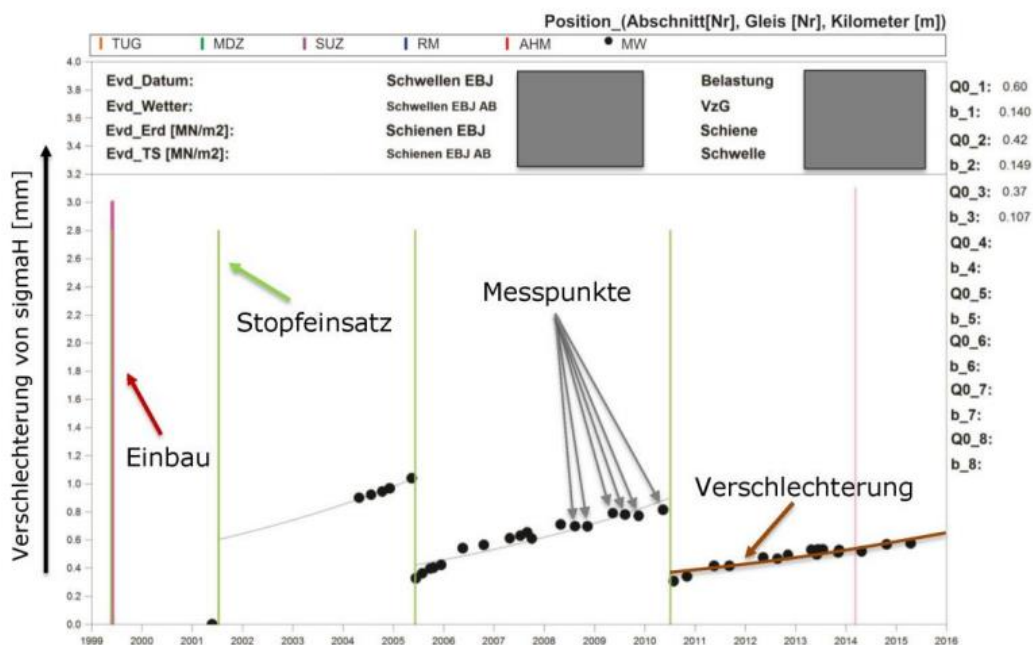


Abbildung 11: Gleisverhalten SigmaH [2]

Die Gleisqualität kann mit Hilfe dieser Mess- und Qualitätswerte punktuell, wie auch über längere Abschnitte beschrieben werden. Der Ansatz der Regressionsfunktion kann hier entweder mit einem linearen oder mit einem exponentiellen Ansatz erfolgen und ist durch die Raumfunktionsqualität und der Verschlechterungsrate eindeutig definiert. Aufgrund dieser Bedingungen kann der aktuelle Zustand des Gleises bewertet und das Gleislageverhalten prognostiziert werden [2].

### 5.3 Fraktalanalyse

Wie auch bei der Standardabweichung der Längshöhe werden bei der Fraktalanalyse die Rohdaten, die vom Oberbaumesswagen aufgenommen werden, in Qualitätswerte umgewandelt. Dadurch entsteht die Möglichkeit, die Daten zur Gleislage hinsichtlich unterschiedlicher Wellenlängenbereiche zu betrachten und ihnen unterschiedliche Fehlercharakteristika zuzuordnen [2]. Ursprünglich galten Fraktale lediglich als mathematische Objekte [18]. Benoit Mandelbrot führte die Fraktalanalyse erstmals 1975 ein und brachte sie mit der Natur in Verbindung. Er zeigte, dass einige Küstenlinien und natürliche Objekte keine glatten Kurven, sondern Kurven mit unendlicher Länge ähnlich der Koch-Kurve (siehe Abbildung 12) sind. Diese Entdeckung führte zu einer intensiveren Erforschung von Fraktalen und ihrer Anwendung in verschiedenen Bereichen, wie der harmonischen Analyse und der geometrischen Maßtheorie. Frühere Arbeiten von Mathematikern wie Wiener, Winter, Erdős und Hausdorff hatten Fraktale lediglich als mathematische Objekte betrachtet. Durch die Untersuchung von Fraktalen können wir komplexe Naturstrukturen besser verstehen und ihre Eigenschaften beschreiben [18]. Später fand die Fraktalanalyse Anwendung in der Geologie zur Beschreibung der Rauigkeiten kornförmiger Materialien, bevor sie schließlich im Eisenbahnwesen eingesetzt wurde. Die Anwendung der Fraktalanalyse ermöglicht die Charakterisierung und Analyse der auftretenden Irregularitäten in der Gleisgeometrie. Dadurch ist es möglich, erfasste Gleislagedaten einem bestimmten Schadensbild zuzuordnen [2].

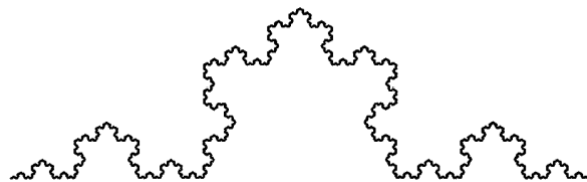


Abbildung 12: Koch-Kurve [18]

Für die Schätzung der fraktalen Dimensionen stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

- **Selbstähnlichkeitsdimension**

Bei der Bestimmung der Selbstähnlichkeitsdimension ist keine Grenzwertbetrachtung notwendig, sie ist daher einfach in der Anwendung. Grundvoraussetzung für die Verwendung dieser Methode ist jedoch, dass das zu untersuchende Objekt selbstähnlich ist [19]: Unter selbstähnlichen Objekten versteht man demnach, dass das betrachtete Objekt aus vielen einzelnen Kopien seiner selbst besteht, wie beispielsweise Abbildung 13 zeigt.

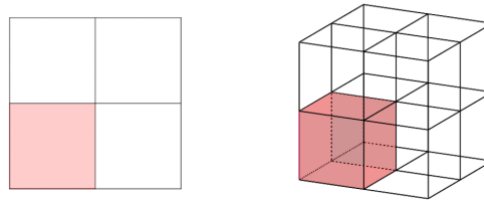


Abbildung 13: Selbstähnlichkeit bei Quadraten ( $d = 2$ ) und Würfeln ( $d=3$ ) [19]

#### ▪ Yardstick-Dimension

Liegen Objekte vor, die per Definition nicht selbstähnlich sind, so kann die Generalisierung der fraktalen Dimension, die Yardstick-Dimension, berechnet werden. Um die Vorgehensweise zur Bestimmung der fraktalen Dimension zu zeigen, wird diese an der Koch-Kurve gezeigt [19]:

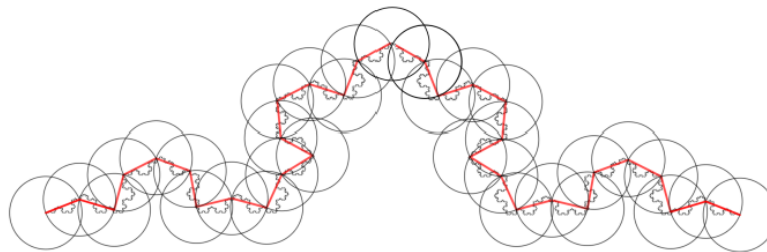


Abbildung 14: Yardstick-Methode gezeigt an der Koch-Kurve [19]

Die in Abbildung 14 dargestellte Methode zeigt, dass die rote Linie die tatsächliche Form der Koch-Kurve vereinfacht darstellt. Es wird versucht, durch das Zeichnen von Kreisen mit dem Radius  $r$  am Anfangspunkt eine Art "Messlatte" zu erzeugen. Der sich ergebende Schnittpunkt des Kreises mit der tatsächlichen Form der Koch-Kurve wird als neuer Mittelpunkt für den nächsten Kreis mit dem gleichen Radius  $r$  verwendet. Auf diese Weise wird das abzubildende Objekt nach und nach vollständig vermessen. Ist das gesamte Objekt vermessen, so werden die Anzahl der Kreise  $N(r)$  gezählt und die sich daraus ergebende Länge  $L(r)$  des resultierenden Polygonzuges wie folgt bestimmt [19]:

$$L(r) = N(r) \cdot r$$

Formel 4: Berechnung der Länge  $L(r)$

In einem iterativen Prozess wird der gewählte Radius  $r$  immer weiter verkleinert, d.h.  $r \rightarrow 0$ . Je näher  $r$  bei 0 ist, desto besser wird die eigentliche Form der Koch-Kurve angenähert. Werden nun die bestimmten Werte  $L(r)$  und  $r$  in einem Diagramm aufgetragen (siehe Abbildung 15), so kann festgestellt werden, dass diese am besten durch eine Potenzfunktion angenähert werden können [19].

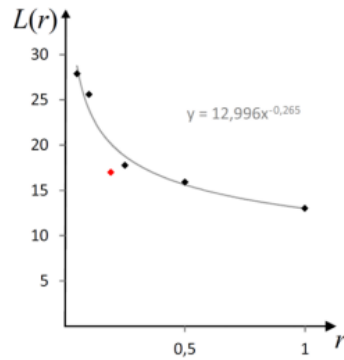


Abbildung 15: Darstellung der bestimmten Länge  $L(r)$  mit dem dazugehörigen Radius  $r$  [19]

Somit kann die Länge  $L(r)$  auch wie folgt bestimmt werden:

$$L(r) = c + r^a$$

Formel 5: Bestimmung von  $L(r)$

Der für die Koch-Kurve bestimmte Wert  $a$  ergibt sich mit  $a \approx -0.265$ . Für die Bestimmung der gesuchten Dimension wird nun Formel 4 und Formel 5 gleichgesetzt und logarithmiert. Weiters wird folgende Annahme getroffen:  $d := 1 - a$  und es wird gezeigt, dass [19]:

$$r * N(r) = c * r^a$$

$$N(r) = c * r^{-d}$$

$$\ln(N(r)) = \ln(r^{-d}) + \ln(c)$$

$$\ln(N(r)) = b - d * \ln(r)$$

$$d = \frac{b - \ln(N(r))}{\ln(r)}$$

Während  $b := \ln(c)$  eine Konstante beschreibt, die unabhängig von  $r$  ist.

Die Dimension kann nun bestimmt werden, indem man den folgenden Grenzwert betrachtet [19]:

$$d = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{b - \ln(N(r))}{\ln\left(\frac{1}{r}\right)}$$

Formel 6: Bestimmung der Yardstick-Dimension

#### ▪ **Boxcounting-Methode**

Mithilfe der Boxcounting-Methode wird die zu untersuchende Menge mit einem Gitter der Gitterbreite  $\varepsilon$  überdeckt. Ist  $N(\varepsilon)$  die Zahl der Menge belegter Boxen, so ist die Box-Dimension [20]:

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(N(\varepsilon))}{\log\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)}$$

Formel 7: Berechnung Boxcounting-Dimension

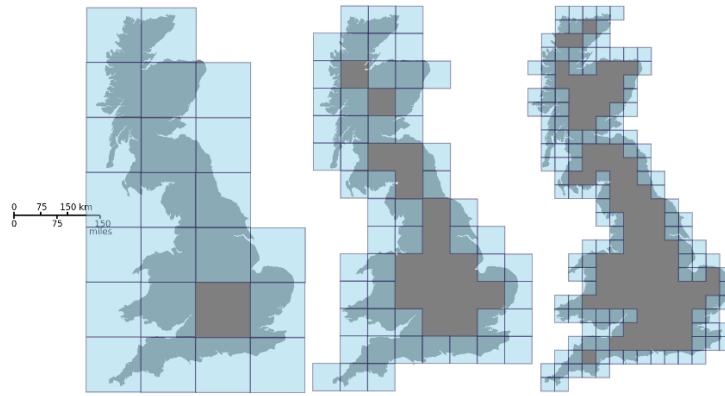


Abbildung 16: Boxcounting - Dimension der Küstenlinie von Großbritannien [21]

### 5.3.1 Herkömmliche Fraktalanalyse

In Österreich wird zur Bewertung des Zustands der Systemkomponenten die Fraktalanalyse mit einer gleitenden Einflusslänge von 150 m eingesetzt. Mit dieser Analysemethode können Zustände des Schotterbetts und des Untergrunds beschrieben werden.

Der Ablauf des Fraktalanalyse-Algorithmus ist ein iterativer Prozess, der in folgende Schritte unterteilt werden kann:

1. Festlegung der zu betrachtenden Stelle
2. Aufspannen eines Fensters um die betrachtete Stelle (betrachtetes Datensegment). Die Breite des Fensters wird Einflusslänge genannt.
3. Unterteilung des Datensegments in Teilsegmente mit einer Länge von  $\lambda$
4. Bestimmung der Schnittpunkte zwischen dem Längshöhensignal und den Teilsegmentgrenzen
5. Für jedes Teilsegment wird die Verbindung zwischen den zwei Schnittpunkten berechnet (Teillänge)
6. Berechnung der Polygonzuglänge  $L(\lambda)$  als Summe der Teillängen
7. Auftragen der Polygonzuglänge  $L(\lambda)$  und der dazugehörigen Teilsegmentlänge  $\lambda$  in einem Log-Log Diagramm (Richardson-Plot)
8. Anwendung der adaptierten linearen Regression im Richardson-Plot und Bestimmung der fraktalen Dimension

**Schritt 1 und 2:** Zu Beginn der Anwendung der Fraktalanalyse wird das Längshöhensignal eingelesen und auf vorhandene Fehlerwerte überprüft. Das betrachtete Datensegment pro Position im Gleis und Messfahrt umfasst 601 Einzelmessungen ( $1 + 4 \cdot 150$  m) und erstreckt sich über eine Länge von  $\pm 75$  m entlang der betrachteten Position. Daraus resultiert ein Einflussbereich von 150 m Länge, wobei sich die zu betrachtende Position in der Mitte befindet (siehe Abbildung 17).

### Längshöhe

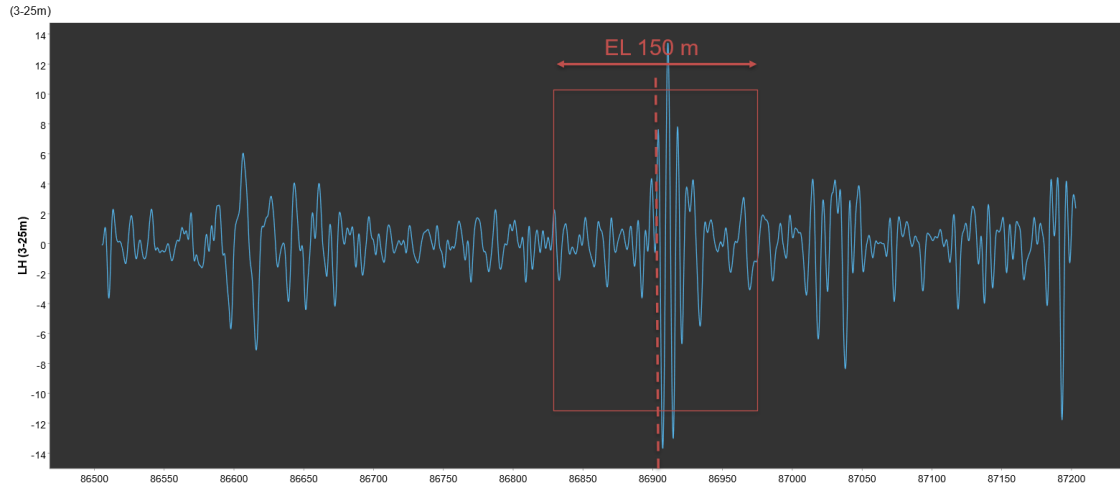


Abbildung 17: Selektiertes Datensegment

Wie bereits in Kapitel 5.2.1 dargelegt, entstehen im Längshöhensignal Wellenlängen zwischen 3 und 70 m aufgrund der Interaktion zwischen Fahrzeug und Bettung. Diese Wellenlängen im Längshöhensignal lassen sich spezifischen Komponenten im Gleis zuordnen (vgl. Abbildung 18). Aufgrund dieses Aspekts und der Tatsache, dass das derzeitige Messsignal Wellenlängen bis zu 70 m enthält, wurde die Einflusslänge so gewählt, dass alle Wellenlängen erfasst werden können.

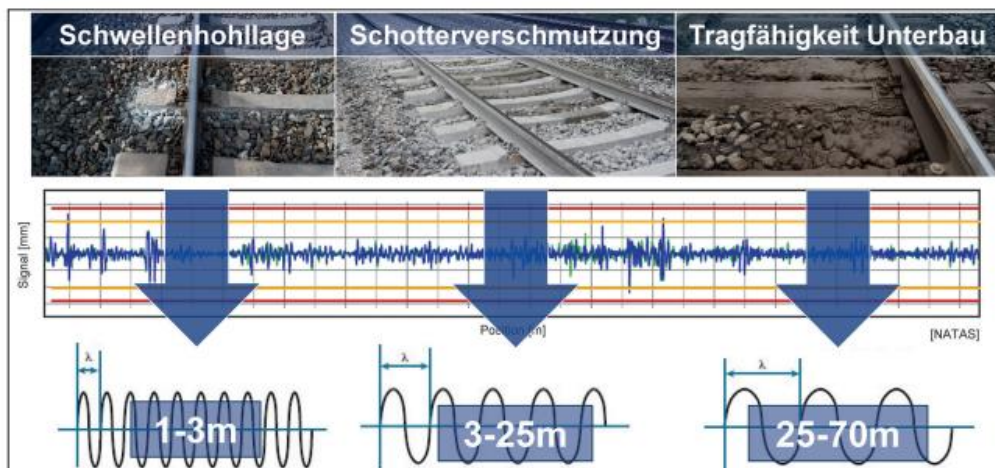


Abbildung 18: Fehlerklassifizierung nach Wellenlängenbereichen in der gemessenen Längshöhe [22]

**Schritt 3 und 4:** Das Datensegment wird anschließend in immer kleinere Teilsegmente mit einer Länge von  $\lambda$  unterteilt, wobei die dazugehörigen Messpunkte  $Y_i$  bestimmt werden (siehe Abbildung 19) [2]. Die Wahl der Teilsegmentlänge  $\lambda$  hängt von der Größe der Einflusslänge ab und wird mithilfe einer vordefinierten Divider-Matrix bestimmt. Die Divider-Matrix gibt an, in wie viele Teilsegmente die Einflusslänge geteilt werden soll. Aufgrund dieser Vorgabe werden die Teilsegmentlängen  $\lambda$  bestimmt.



Abbildung 19: Unterteilung des Datensegment in Teilsegmente der Länge  $\lambda_2$

Liegt der Anfangs- und Endpunkt des Teilsegments nicht auf einem real gemessenen Punkt, wird zwischen den vorhandenen Messwerten linear interpoliert. Zur Berechnung der Länge des resultierenden Polygonzugs werden die Geraden  $L_i$  der Teilsegmente mithilfe des Pythagoräischen Lehrsatzes berechnet und anschließend summiert [2].

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

Formel 8: Berechnung der Polygonzuglängen  $L(\lambda)$

Mit:

$N$  ... Anzahl der Unterteilungen

$i$  ... Laufvariable

*EL* ... Länge des Datensegments

**Schritt 5, 6 und 7:** Zur Bestimmung der fraktalen Dimension wird die Länge des jeweiligen Polygonzugs  $L(\lambda)$  und die dazugehörige Teilsegmentlänge  $\lambda$  in einem Log-Log-Plot (Richardson-Plot) aufgetragen (siehe Abbildung 20). Die Teilsegmente werden dabei immer kleiner,

was zu einer Zunahme der Länge des Polygonzugs führt. Dieser passt sich dadurch immer besser an das tatsächliche Messsignal an.

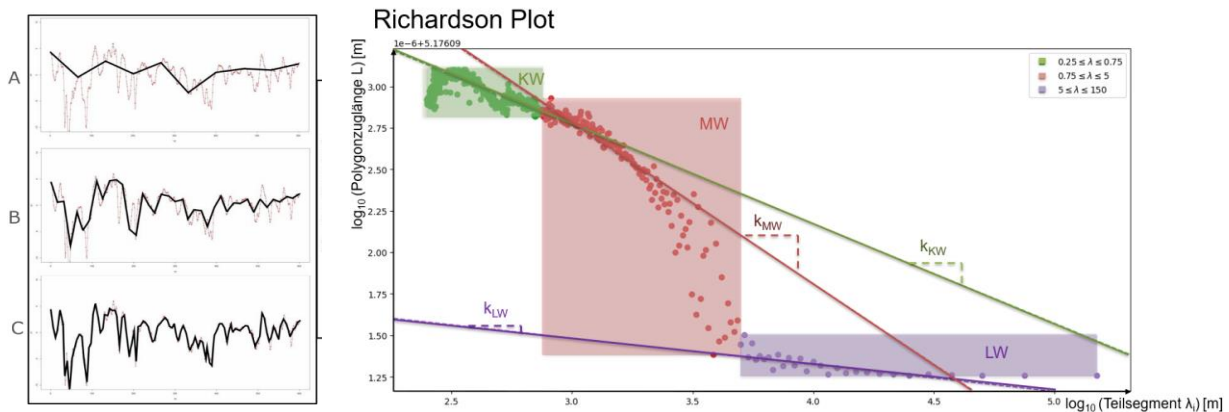


Abbildung 20: Iteration der Teilsegmente (links) [2] und Erstellung des Richardson-Plots (rechts)

**Schritt 8:** Nach Abarbeitung der Divider-Matrix wird die fraktale Dimension bestimmt. Dazu werden im Richardson-Plot drei verschiedene Bereiche definiert, nämlich in kurz-, mittel- und langwellige Fraktalbereiche unterteilt. Diese werden in Abbildung 18 mit verschiedenen Farben dargestellt. Die Grenzen der Fraktalbereiche sind durch die Teilsegmentlänge  $\lambda$  definiert und wurden empirisch ermittelt. Der kurzwellige Bereich erstreckt sich zwischen  $\lambda$  0,25 - 0,75 m und beschreibt den Zustand von Schiene und Schwelle [2]. Der mittelwellige Bereich wird durch eine Teilsegmentlänge  $\lambda$  von 0,75 – 5 m begrenzt und beschreibt den Zustand des Schotters [2]. Der langwellige Bereich der Fraktalanalyse wird durch eine Teilsegmentlänge  $\lambda > 5$  m beschrieben und spiegelt den Zustand des Unterbaus wider [2]. Um die fraktale Dimension des jeweiligen Bereichs zu bestimmen, werden lineare Regressionen in dem jeweiligen Bereich berechnet. Bei der Berechnung der linearen Regression werden sowohl für den kurzwelligen, als auch für den mittelwelligen Bereich die ersten sechs Punkte von links aus im Richardson-Plot fixiert, eine lineare Regression berechnet und das daraus resultierende Bestimmtheitsmaß  $R^2$  bestimmt. Anschließend wird erneut eine lineare Regression berechnet, jedoch wird nun auch der von links aus siebte Punkt für die Berechnung hergenommen. Danach wird erneut  $R^2$  bestimmt. Dieser Vorgang wird fortgesetzt, bis alle Punkte in der Menge der für die lineare Regression zu berücksichtigenden Punkte enthalten sind. Anschließend werden die so ermittelten  $R^2$ -Werte betrachtet und die lineare Regression mit dem größten  $R^2$ -Wert als endgültige lineare Regression bestimmt. Bei der Bestimmung der linearen Regression für den langwelligen Bereich werden, im Gegensatz zum kurz- und mittelwelligen Bereich, die ersten sechs Punkte von *rechts* fixiert und zur Berechnung der linearen Regression herangezogen. Das weitere Vorgehen ist identisch. Aus der Steigung der endgültigen Regressionsgeraden kann die Ausprägung der jeweiligen fraktalen Dimension bestimmt werden (siehe Formel 9). Je

größer die Steigung der Regressionsgeraden ist, desto stärker ist der betrachtete Wellenbereich im Datensegment repräsentiert, was wiederum Aufschluss über den Bereich der Fehlerursache gibt [2].

Die verwendete Methodik zur Bestimmung der fraktalen Dimension folgt einer abgewandelten Variante der in Kapitel 5.3 beschriebenen Yardstick-Methode. Hierbei werden nicht wie bei der Yardstick Methode Kreise im Signal gezogen, sondern das betrachtete Daten-segment in konstante Teilsegmentlängen  $\lambda$  (horizontale Fixabstände) unterteilt. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die im Richardson-Plot erzeugten Punkte am besten durch eine Potenzfunktion angenähert werden können. Somit gilt:  $L(\lambda) = c \cdot \lambda^a$

Demnach kann die fraktale Dimension wie folgt bestimmt:

$$L(\lambda) = c \cdot \lambda^a$$

Mit der Konstante  $b := \ln(c)$  folgt

$$\begin{aligned} \ln(L(\lambda)) &= b + a \cdot \ln(\lambda) \\ a &= \frac{\ln(L(\lambda)) - b}{\ln(\lambda)} \end{aligned}$$

Man kann zeigen, dass die fraktale Dimension mit  $d := 1 - a$  bestimmt werden kann [19]

$$d = 1 - \frac{\ln(L(\lambda)) - b}{\ln(\lambda)}$$

Wie bei der Yardstick Methode muss nun folgender Grenzwert bestimmt werden:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} 1 - \frac{\ln(L(\lambda)) - b}{\ln(\lambda)} = 1 - \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\ln(L(\lambda))}{\ln(\lambda)}$$

Der vorgestellte Algorithmus der Fraktalanalyse schätzt mittels linearer Regression im Richardson-Plot die Größe

$$k \approx \lim_{\lambda \rightarrow 0} \frac{\ln(L(\lambda))}{\ln(\lambda)}$$

Formel 9: Bestimmung von  $k$

Demnach gilt, dass die fraktale Dimension des analysierten Signals  $d \approx 1 - k$  entspricht. Da  $|k| \ll 1$  führt die Berechnung  $-k + 1$  zu numerischen Problemen (Gleitkommaarithmetik). Deshalb wird bei allen Experimenten auf die additive Konstante 1 verzichtet. Des Weiteren wird  $-k$  im Rahmen dieser Arbeit mit dem Faktor  $10^7$  multipliziert, um existierende Experimente aus der Literatur [2, 13] zu reproduzieren und Vergleiche dazu und zu der Standardabweichung des Längshöhensignals herzustellen.

### 5.3.2 Adaptierte Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge

Bevor näher auf den angepassten Algorithmus der Fraktalanalyse eingegangen wird, sollen die Vorteile sowie die Auswirkungen einer Reduzierung der Einflusslänge diskutiert werden. Der ursprüngliche Gedanke, die Einflusslänge zu reduzieren, ist auf die große Einflusslänge von 150 m zurückzuführen. Diese hat zur Folge, dass Einzelfehler im Längshöhensignal über eine Strecke von 150 m wirksam sein können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass Einzelfehler nur lokale Auswirkungen auf den Gleiskörper haben und sich die Qualitätsminderungen auf Bereiche von weniger als 150 m beschränken. Die aktuell angewandte Fraktalanalyse untersucht drei verschiedene fraktale Dimensionen, die den Zustand von drei verschiedenen Komponenten (Schwelle, Schotterbett, Untergrund) beschreiben. Da Fehlerursachen im Untergrund im Längshöhensignal mit Wellenlängen zwischen 25 und 70 m auftreten, wird der Datenausschnitt so gewählt, dass auch Wellenlängen, die den Zustand des Untergrunds widerspiegeln, erfasst werden. Durch die Reduzierung der Einflusslänge der Fraktalanalyse können lokal auftretende Einzelfehler im Längshöhensignal besser lokalisiert werden, da sich der Einfluss der Fehler auf einen kleineren Bereich auswirkt. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der reduzierten Einflusslänge nicht alle Wellenlängen, die im Längshöhensignal gebildet werden, vollständig in einem Datensegment erfasst werden können. Daher ist es nicht möglich, alle Komponenten zu analysieren. Beschränkt man sich jedoch auf eine bestimmte Komponente, in diesem Fall das Schotterbett, kann ein reduziertes Datensegment betrachtet werden. Bei der Reduktion der Einflusslänge ist zu beachten, dass mit kleiner werdender Einflusslänge ebenso die Anzahl der möglichen Unterteilungen des Fensters (Anzahl der möglichen Teilsegmentlängen  $\lambda$ ) abnimmt. Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob die Einflusslänge der Fraktalanalyse so reduziert werden kann, dass diese die Schotterbettung des Gleises am besten beschreibt. Da bei der Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge nur noch die Schotterkomponente analysiert wird, kann die Größe des zu untersuchenden Datensegments deutlich reduziert werden. Nachdem davon auszugehen ist, dass sich Schotterverunreinigungen im Längshöhensignal mit einer Wellenlänge von 3-25 m ausprägen, werden im Rahmen dieser Arbeit acht verschiedene Datensegmentgrößen zwischen 6.25 m und 50 m untersucht.

	EL 150	EL 50	EL 25	EL 20	EL 15	EL 12.5	EL 10	EL 8	EL 6.25
<b>Eingangssignal</b>	LH (3-70m)	LH (3-25m)							
<b>Einflusslänge</b>	150 m	50 m	25 m	20 m	15 m	12.5 m	10 m	8 m	6.25 m
$\lambda_{\min}$ [m]	0.75 m								
$\lambda_{\max}$ [m]	5	50	25	20	15	12.5	10	8	6.25
<b>Delta Gliding</b>	2.5 m	1 m							
<b>Anzahl Teilungen</b> $\lambda$	59	66	33	26	20	16	13	10	8

Tabelle 3: Zu untersuchte Datensegmentgrößen mittels Fraktalanalyse

Tabelle 3 vergleicht die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflusslängen und stellt die daraus resultierenden Randbedingungen für die Fraktalanalyse dar. Die orange markierten Zellen zeigen die Randbedingungen für den bereits entwickelten Fraktalanalyse-Algorithmus mit einer Einflusslänge von 150 m und dienen als Vergleichsbasis für die zu untersuchenden Einflusslängen. Es fällt auf, dass sich bereits die zu untersuchenden Eingangssignale unterscheiden. Das Eingangssignal für die konventionelle Fraktalanalyse EL 150 umfasst das Längshöhensignal der linken Schiene mit Wellenlängen zwischen 3 m und 70 m. Dies ist erforderlich, um Komponenten zu untersuchen, bei denen Wellenlängen von bis zu 70 m zu erwarten sind. Bei den Fraktalanalysen mit EL 6.25 bis EL 50 wird das Längshöhensignal der linken Schiene mit Wellenlängen zwischen 3 und 25 m untersucht, da nur das Schotterbett analysiert werden soll. Beide Eingangssignale weisen eine Messdatendichte von jeweils 25 cm auf. Zusätzlich ist anzumerken, dass die untere Grenze der Teilsegmentlänge mit  $\lambda_{min} = 0.75$  m aus der konventionellen Fraktalanalyse übernommen wurde. Die obere Grenze der Teilsegmentlänge wurde jedoch nicht wie bei der konventionellen Fraktalanalyse gewählt, sondern wird durch die Länge des zu betrachtenden Einflusslängenfensters begrenzt ( $\lambda_{max} = EL$ ). Der gewählte Abstand (Delta Gliding), mit dem die Fraktalanalyse das zu untersuchende Signal abtastet, wird von 2.5 m auf 1 m reduziert. Dadurch kann die Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge eine höhere Abtastrate aufweisen. Dies führt zu einer genaueren Bestimmung der fraktalen Dimensionen. Die Abtastrate der konventionellen Fraktalanalyse wurde aufgrund der Rechenzeit in  $R$  mit 2.5 m etwas größer gewählt. Aufgrund einer effizienten Implementierung des Fraktalanalyse-Algorithmus in Python sind nun auch kleinere Abtastraten möglich. Dabei ist zu beachten, dass eine höhere Anzahl an Teilsegmenten zu einer höheren Auflösung führt, aber auch mehr Rechenzeit benötigt. Die Wahl der Einflusslänge beeinflusst die Anzahl der möglichen Teilsegmente und somit auch die Anzahl der im Richardson-Plot generierten Punkte, was sich wiederum auf die benötigte Rechenzeit auswirkt. Es ist also entscheidend, eine geeignete Einflusslänge zu wählen, um eine effiziente Berechnung zu erreichen.

### **Unterschiede Herkömmlicher Fraktalanalyse – Fraktalanalyse mit reduzierter EL**

Die Anzahl der Teilsegmente und die sich daraus ergebenden Teilsegmentlängen werden nicht wie bei der konventionellen Fraktalanalyse durch eine vorgegebene Divider-Matrix bestimmt, sondern stellen die maximal mögliche Anzahl von Teilsegmenten dar, die bei vorgegebener maximaler und minimaler Teilsegmentlänge  $\lambda$  möglich sind. Weiters ist zu erwähnen, dass die lineare Regression im Richardson Plot mit Hilfe des RANSAC Algorithmus berechnet wird. Eine manuelle Festlegung der für die lineare Regression zu verwendenden Punkte ist daher nicht erforderlich. Durch den Einsatz von RANSAC konnte die Rechenzeit des Algorithmus deutlich reduziert werden. Um die Vorgehensweise des RANSAC-Algorithmus nachvollziehen zu können, wird dieser im folgenden Abschnitt näher erläutert.

### RANSAC-Algorithmus (Random Sample Consensus)

Die Menge an Punkten, die für die Regression herangezogen wird, beinhaltet Ausreißer. Diese sollten davor entfernt werden. Eine Methode, dies zu bewerkstelligen ist RANSAC: Im Allgemeinen wird RANSAC als robustes Schätzverfahren bezeichnet. Der RANSAC-Algorithmus kann, unter bestimmten Annahmen, probabilistisch schätzen, ob und wie viele Ausreißer im gegebenen Datensatz enthalten sind. Dabei teilt der Algorithmus die gegebenen Daten in Ausreißer (Outliers) und nicht Ausreißer (Inliers) ein. Der Algorithmus ist wie folgt aufgebaut. Sei

$$X = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$$

die Menge an Punkten mit Ausreißern, die für die Modellbildung herangezogen wird.

Der folgende Algorithmus wird für eine fixe Anzahl an Iterationen durchlaufen:

1. Zufälliges wählen einer (kleinen) Teilmenge  $S \subset X$
2. Schätzung des Modells anhand von  $S$  (z.B. Verbindung der beiden Datenpunkte wenn  $|S| = 2$ )
3.  $X$  wird in Inliers und Outliers kategorisiert: Für einen Schwellenwert  $\delta$  wird für jeden Datenpunkt  $(x_i, y_i) \in X$  geprüft, ob  $y_i$  weiter als  $\delta$  vom geschätzten Modell entfernt ist. Solche Punkte werden als Outlier klassifiziert, der Rest als Inlier. (siehe Abbildung 18).
4. Die Anzahl an Inliers wird pro Modell gespeichert.

Jenes Modell mit der höchsten Anzahl an Inliers wird als finales Modell betrachtet.

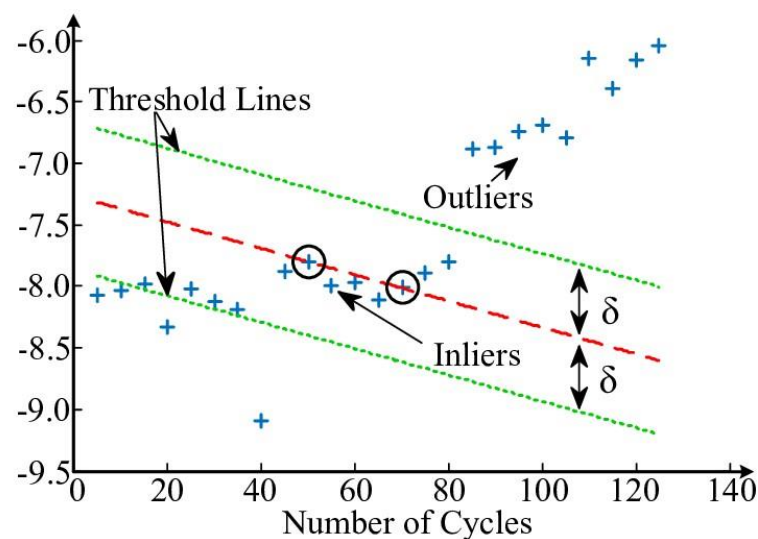


Abbildung 21: Schematische Darstellung des RANSAC-Algorithmus zur Erkennung von Ausreißern [23]

In der Python-Implementierung des Fraktalanalyse-Algorithmus wird die RANSAC Implementierung der Python Bibliothek *scikit-learn* verwendet und der Schwellenwert für RANSAC auf die mittlere absolute Abweichung vom Median (MAD) aller Daten des betrachteten Datensatzes gesetzt. Die lineare Regression kann nun durch die Punkte gelegt werden, die durch den RANSAC-Algorithmus in Schritt 4 bestimmt wurden, und die fraktale Dimension kann, wie bereits in der konventionellen Fraktalanalyse beschrieben, bestimmt werden.

### Auswirkungen der Unterschiede auf die Fraktalanalyse

Durch die Verkürzung der Einflusslängen EL ist es nun einerseits möglich, Einzelfehler im Längshöhensignal genauer zu untersuchen, da der Einflussbereich der Einzelfehler mit kleiner werdender Einflusslänge der Fraktalanalyse abnimmt. Dadurch kann der Einfluss des Einzelfehlers auf die Schotterbettung genauer eingegrenzt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass mit immer kleiner werdenden Einflusslängen die Anzahl der im Richardson-Plot erzeugten Punkte stark abnimmt und ggf. zu wenige Punkte erzeugt werden, um eine aussagekräftige fraktale Dimension zu bestimmen. Abbildung 23 zeigt die Auswirkungen bzw. Unterschiede unterschiedlicher Einflusslängen bei Verwendung von RANSAC im Vergleich zur linearen Regression in vier Richardson-Plots (2 Stück pro EL), in denen jeweils die gleiche Stelle des in Abbildung 22 dargestellten Längshöhensignals untersucht wird. Bei der zu untersuchenden Stelle ist davon auszugehen, dass sich hier Verunreinigungen im Schotterbett befinden.

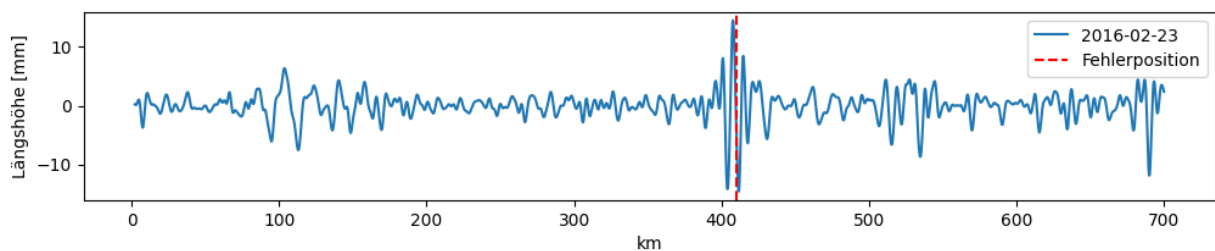


Abbildung 22: Längshöhensignal eines beispielhaften Einzelfehlers

Die Richardson-Plots in Abbildung 23 zeigen das Resultat der linearen Regression mittels RANSAC auf der linken Seite und die adaptierte lineare Regression auf der rechten Seite. Aus den Darstellungen ist zu entnehmen, dass die mit RANSAC ermittelte Regressionsgerade bei allen Einflusslängen eine geringere Steigung aufweist als bei Verwendung der adaptierten linearen Regression. Außerdem werden die Auswirkungen der Verringerung der Einflusslänge auf die im Richardson-Diagramm generierten Punkte dargestellt.

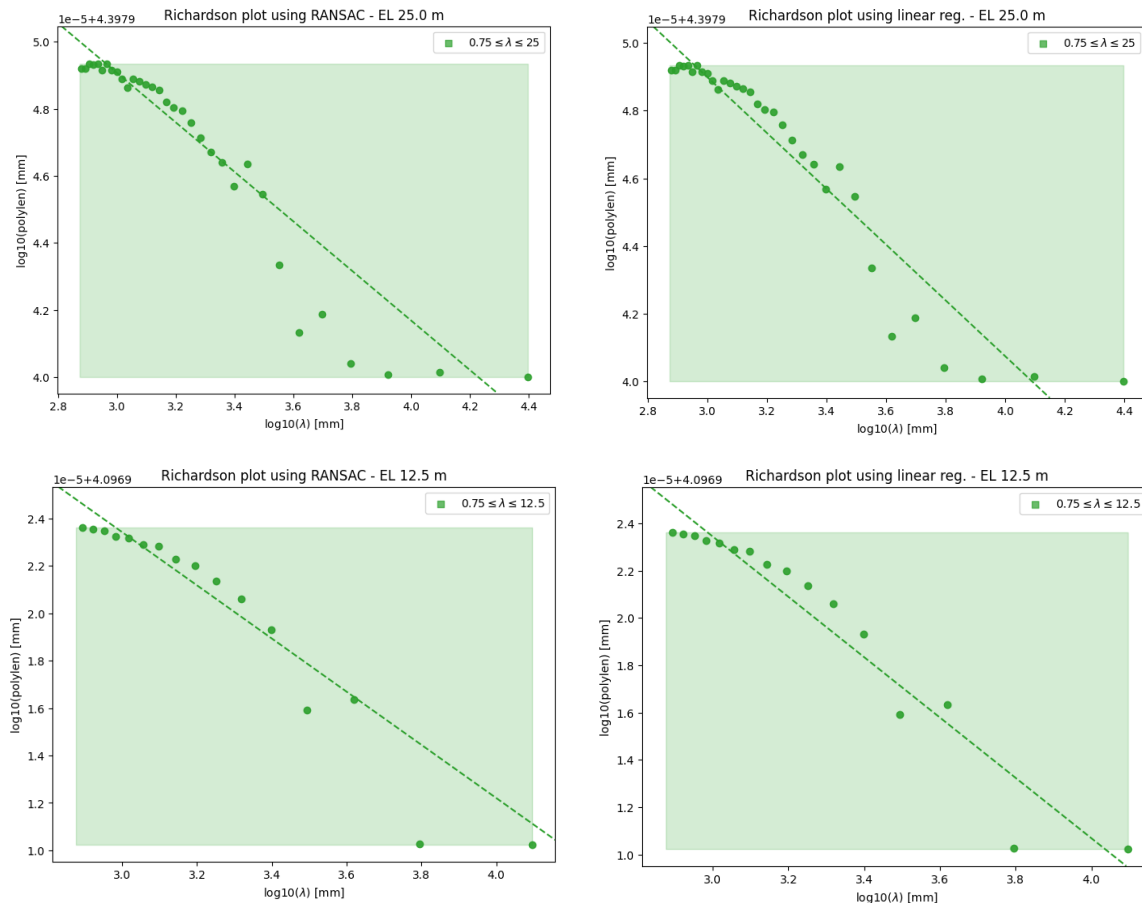


Abbildung 23: Beispielhafte Gegenüberstellung RANSAC (links) mit der adaptierten Linearer Regression (rechts) im Richardson-Plot für EL 25, 12.5 für den in Abbildung 22 gezeigten Einzelfehler

Durch die Modifikation der klassischen Fraktalanalyse sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- I Ist es möglich den Zustand/die Qualität des Schotters durch die Analyse des Längshöhensignals mithilfe der Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge angemessen zu beschreiben?
- I Können Einzelfehler durch die Reduktion der Einflusslänge der Fraktalanalyse erkannt und die daraus resultierende Schotterqualität ermittelt und lokalisiert werden?
- I Welche der gewählten acht Einflusslängen ermöglicht die genaueste Einzelfehlererkennung und Beschreibung der Schotterqualität?

## 6 Untersuchung lokal auftretender Schwachstellen im Schotterbett

Punktuelle Instabilitäten werden häufig durch das Zusammenwirken mehrerer Umstände hervorgerufen: Beispielsweise durch das Vorhandensein bindiger, teilweise wassergesättigter Böden und lokal erhöhter dynamischer Einwirkungen auf den Gleiskörper [22] sowie durch Unstetigkeiten in der Steifigkeit des Schotterbettes. Liegt eine signifikante Änderung der Gleissteifigkeit vor, so machen sich die Einzelfehler verstärkt bemerkbar [16]. Einzelfehler können anhand des gemessenen Längshöhensignals (LH-Signal) erkannt werden und äußern sich als lokal stark auftretende Ausprägungen des Messsignals, die im Vergleich zu den umliegenden Messpunkten deutlich höhere Amplituden aufweisen [17]. Es ist davon auszugehen, dass ein einzelner Fehler mit der Zeit immer größer wird und in den Messreihen, die kurz vor der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahme liegen, am stärksten ausgeprägt ist [24].

### 6.1 Aufbereitung der Messdaten

Die für die Auswertung zur Verfügung stehenden Daten umfassen Messdatenreihen aus den Jahren 2001 bis 2022, die jeweils mehrere Messfahrten pro Jahr umfassen. Bei den zu untersuchenden Datensätzen handelt es sich um insgesamt 39 Datensätze, die zwischen 34 und 97 Messdatenreihen umfassen und sich über Längen zwischen 695 m und 735 m erstrecken. Jede Messdatenreihe tastet das LH-Signal alle 25 cm ab. Somit können pro Messfahrt zwischen 2777 und 2941 gemessene Punkte zur Auswertung herangezogen werden.

Bevor die zu untersuchenden Datensätze einer Zeitreihenanalyse unterzogen werden können, muss sichergestellt werden, dass die aufeinanderfolgenden Messfahrten räumlich korrekt zueinander liegen. Um dies zu gewährleisten, werden die Längshöhensignale mit einem bereits existierenden Verfahren so zueinander verschoben, dass sie eine möglichst geringe Differenz zueinander aufweisen. Zur besseren Visualisierung der Messdaten könnte eine Aggregation der Messdaten pro Jahr (z.B. durch Mittelung der Messwerte) durchgeführt werden. Dies führt jedoch zu Verzerrungen der durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen und deren Auswirkungen und wird daher im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Bei den verfügbaren Daten handelt es sich um bereits aufbereitete, stationierte Längshöhenmesssignale der linken Schiene, die den Frequenzbereich mit einer Wellenlänge zwischen 3 und 25 Metern umfassen. Zusätzlich kann auf Bildmaterial zurückgegriffen werden, das mit dem Oberbaumessfahrzeug aufgenommen wurde.

Die zu untersuchenden Datensätze werden in zwei getrennt betrachtete Datensätze unterteilt;

- I 20 Abschnitte beinhalten Strecken, in denen das Schotterbett erneuert wurde  
(Datenmenge *Schotterbetterneuerung*)
- I 19 Abschnitte beinhalten (oftmals mehrfach) auftretende Einzelfehler  
(Datenmenge *Einzelfehler*)

Der Datensatz *Schotterbetterneuerung* wird verwendet, um festzustellen, ob die Qualitätsverbesserung im Schotterbett mit Hilfe der adaptierten Fraktalanalyse beschrieben werden kann. Es soll gezeigt werden, dass alle im Vorfeld ausgewählten Einflusslängen in der Lage sind, die Qualität der Schotterbettung zu beschreiben. Sollte sich im Zuge dieser Arbeit herausstellen, dass eine der gewählten Einflusslängen (50 m, 25 m, 20 m, 15 m, 12.5 m, 10 m, 8 m, 6.25 m) den Zustand des Schotterbettes nicht beschreibt, so ist diese für die weiteren Auswertungen nicht weiter zu berücksichtigen.

Mithilfe von 75% der Datenmenge *Einzelfehler* soll die angepasste Fraktalanalyse kalibriert werden, um örtlich auftretende Schwachstellen im Schotterbett zu erkennen. Der verbleibende Teil von 25% der der Datenmenge *Einzelfehler* wird zur Validierung des kalibrierten Modells verwendet.

Der herkömmliche Algorithmus der Fraktalanalyse dient als Grundlage für die adaptierte Fraktalanalyse und wird, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben, modifiziert. Anhand des adaptierten Fraktalanalyse-Algorithmus werden die Auswirkungen der jeweils gewählten Einflusslängen in der Fraktalanalyse und eventuell auftretende Zusammenhänge mit SigmaH untersucht. Die Auswertung und Aufbereitung der Daten sowie die Entwicklung des angepassten Fraktalanalyse-Algorithmus werden im Rahmen dieser Arbeit mithilfe von Jupyter-Notebooks unter Verwendung der Programmiersprache Python durchgeführt.

## 6.2 Untersuchung der Schotterbettqualitätsveränderung mittels adaptierten Fraktalanalyse

Um sicherzustellen, dass die adaptierte Fraktalanalyse den Zustand des Schotterbettes beschreibt, werden 20 Abschnitte untersucht, in denen eine Schotterbetterneuerung durchgeführt wurde. In diesen Abschnitten ist davon auszugehen, dass die Qualität des Schotterbettes vor der Erneuerung einem schlechten Zustand zuzuordnen ist. Diese Annahme erfolgt, da andernfalls keine Schotterbetterneuerung durchgeführt werden müsste. Nach Durchführung der Schotterbetterneuerung kann von einem guten Zustand der Schotterbettqualität ausgegangen werden. Da der Zustand des Schotterbetts vor und nach der

Erneuerung damit als bekannt vorausgesetzt werden kann, werden die folgenden Messdaten miteinander verglichen:

- I **Vergleich VV:** Vergleich zweier Messdatenreihen, die beide unmittelbar VOR der Schotterbetterneuerung aufgenommen worden sind
- I **Vergleich VN:** Vergleich zwischen zwei Messdatenreihen, die unmittelbar VOR der Schotterbetterneuerung und unmittelbar NACH der Schotterbettreinigung aufgenommen worden sind
- I **Vergleich NN:** Vergleich zweier Messdatenreihen, die beide unmittelbar NACH der Schotterbetterneuerung aufgenommen worden sind

Zur Bewertung der Funktionalität der adaptierten Fraktalanalyse werden die Längshöhen-signale der Schotterbetterneuerungsabschnitte herangezogen und die daraus resultierenden Fraktaldimensionen ermittelt. Pro Abschnitt ergeben sich dabei acht Datensätze (pro Einflusslänge und Abschnitt ein Datensatz), in denen für jede Messfahrt und zugehörige Kilometrierung die jeweilige Fraktaldimension gespeichert ist. Um einen Vergleich der verschiedenen Abschnitte zu ermöglichen, wird die Länge der zu erneuernden Schotterbettung pro Abschnitt betrachtet und der Mittelwert der fraktalen Dimensionen über diese Länge berechnet. Um die Veränderung der Fraktaldimension über die Zeit beschreiben zu können, werden die zuvor berechneten mittleren Fraktalwerte herangezogen und der mittlere Fraktalwert der Messfahrt zum Zeitpunkt  $t_i$  vom mittleren Fraktalwert der Messfahrt zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  subtrahiert. Die resultierenden Differenzen stellen die Zunahme der Fraktal Dimensionen über die Zeit dar. Durch Ermittlung der größten Differenz pro Abschnitt kann der Zeitpunkt der Bettungserneuerung bestimmt werden. Der Zeitpunkt wird ausgehend von dem durch die maximale Differenz bestimmten Zeitpunkt für die Szenarien VV, VN und NN festgelegt. Neben der Bewertung der Funktionalität der adaptierten Fraktalanalyse soll hier auch der Unterschied und Vorteil des in der adaptierten Fraktalanalyse verwendeten RANSAC-Algorithmus aufgezeigt werden.

In Tabelle 4 werden die Streckenabschnitte, die jeweiligen Zeiten der Schotterbetterneuerung und die Messfahrten vor und nach der Erneuerung dargestellt. Diese werden anhand des oben beschriebenen Algorithmus ermittelt. Die fraktalen Dimensionen der drei Szenarien wurden mittels der adaptierten linearen Regression sowie der Regressionsmethode RANSAC berechnet, um diese anschließend miteinander vergleichen zu können.

Tabelle 4: Ermittlung des Zeitpunktes der durchgeführten Schotterbetterneuerung

Abschnitt	behooben	RANSAC VOR	RANSAC NACH	adapt. Lin. Reg VOR	adapt. Lin. Reg NACH
Abschnitt 1	2010	07.10.2010	05.05.2011	07.10.2010	05.05.2011
Abschnitt 2	2010	07.10.2010	05.05.2011	07.10.2010	05.05.2011
Abschnitt 3	2017	26.04.2017	04.10.2017	26.04.2017	04.10.2017
Abschnitt 4	2017	26.04.2017	04.10.2017	26.04.2017	04.10.2017
Abschnitt 5	2017	26.04.2017	04.10.2017	26.04.2017	04.10.2017
Abschnitt 6	2017	26.04.2017	04.10.2017	26.04.2017	04.10.2017
Abschnitt 7	2017	10.05.2017	15.11.2017	10.05.2017	15.11.2017
Abschnitt 8	2017	10.05.2017	15.11.2017	10.05.2017	15.11.2017
Abschnitt 9	2017	10.05.2017	15.11.2017	10.05.2017	15.11.2017
Abschnitt 10	2018	07.05.2018	13.05.2019	07.05.2018	13.05.2019
Abschnitt 11	2011	29.10.2010	07.06.2011	29.10.2010	07.06.2011
Abschnitt 12	2014	27.05.2014	06.11.2014	27.05.2014	06.11.2014
Abschnitt 13	2020	05.06.2020	28.09.2020	05.06.2020	28.09.2020
Abschnitt 14	2010	27.10.2009	09.03.2010	27.10.2009	09.03.2010
Abschnitt 15	2020	15.06.2020	02.11.2020	15.06.2020	02.11.2020
Abschnitt 16	2011	23.10.2013	19.03.2014	28.03.2011	13.07.2011
Abschnitt 17	2013	19.08.2013	19.03.2014	19.08.2013	19.03.2014
Abschnitt 18	2019	08.05.2019	06.08.2019	08.05.2019	06.08.2019
Abschnitt 19	2012	08.11.2011	10.09.2012	08.11.2011	10.09.2012
Abschnitt 20	2011	19.08.2010	10.08.2011	19.08.2010	10.08.2011

In Tabelle 4 ist zu erkennen, dass die ausgewählten Messfahrten, mit Ausnahme von Abschnitt 16, in den Zeitraum der protokollierten Schotterbetterneuerung fallen. Um eine Aussage über den Zustand der Schotterbettung treffen zu können, werden nur jene Abschnitte herangezogen, die im zeitlichen Rahmen des protokollierten Erneuerungszeitraumes liegen. Somit werden für die weitere Beurteilung der Funktionalität der adaptierten Fraktalanalyse 19 Abschnitte betrachtet.

#### 6.2.1 Vergleich VV

Bei den beiden Messfahrten unmittelbar vor der Schotterbetterneuerung ist davon auszugehen, dass die Fraktalwerte mit abnehmendem zeitlichen Abstand zum Zeitpunkt der Schotterbetterneuerung tendenziell zunehmen. Eine Zunahme der fraktalen Dimension zeigt an, dass sich der Zustand des Schotterbettes verschlechtert. Nach der Bildung der Differenz der aufeinanderfolgenden Fraktale ist aufgrund der Zunahme der Fraktale eine negative Differenz zu erwarten.

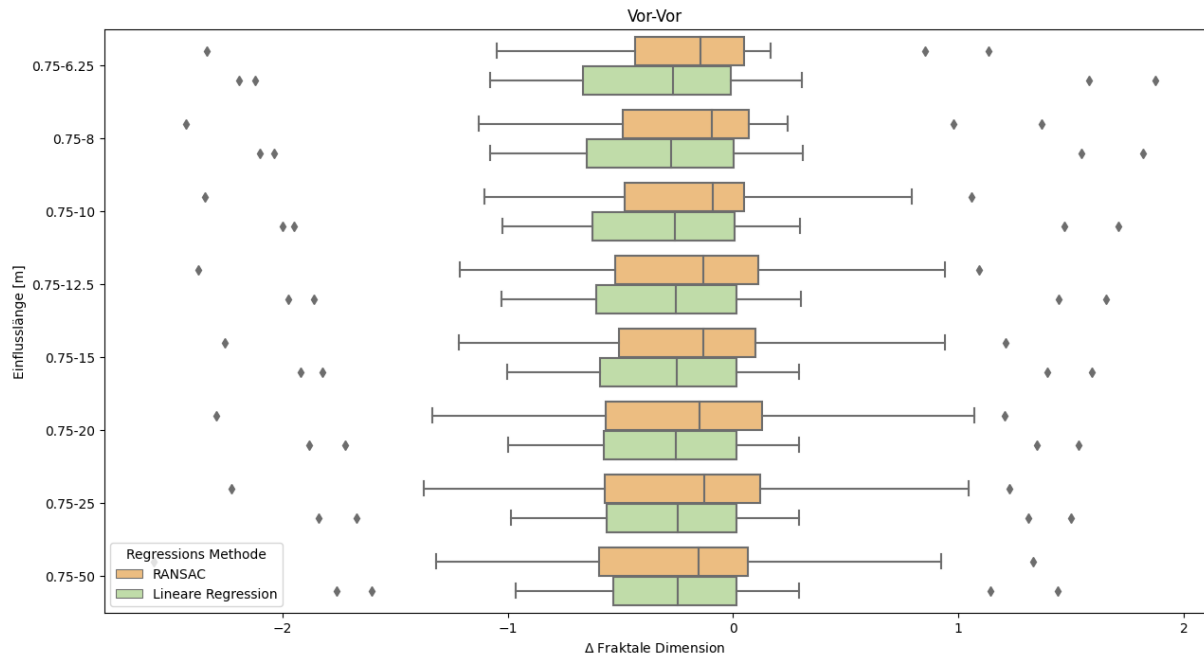


Abbildung 24: Szenario VV - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen vor durchführung der Schotterbetterneuerung

In dieser Arbeit werden insgesamt acht Einflusslängen (6.25 m, 8 m, 10 m, 12.5 m, 15 m, 20 m, 25 m, 50 m) untersucht. Abbildung 24 zeigt die Differenz zweier ermittelter Fraktaldimensionen von aufeinanderfolgenden Messfahrten unmittelbar vor der Schotterbetterneuerung. Die Boxplots sind orange und grün eingefärbt und unterscheiden sich in der angewandten Regressionsmethode zur Berechnung der fraktalen Dimensionen. Für die orangefarbenen Boxplots wurde die Regressionsmethode RANSAC verwendet. Die grünen Boxplots zeigen hingegen die Regressionsmethode der konventionellen Fraktalanalyse (adaptierte lineare Regression), die bereits in Kapitel 5.3.1 beschrieben wurde. In Abbildung 25 zeigt sich, dass sowohl bei Verwendung von RANSAC, als auch bei Verwendung der adaptierten linearen Regression, alle untersuchten Einflusslängen ein ähnliches Verhalten aufweisen - der Median aller Einflusslängen liegt bei einer Differenz der fraktalen Dimensionen zwischen -0.1 und -0.3.

### 6.2.2 Vergleich VN

Für die Messfahrt vor der Schotterbetterneuerung und die Messfahrt nach der Schotterbetterneuerung ist davon auszugehen, dass die Differenzen der fraktalen Dimensionen positive Werte darstellen, da hier eine Verbesserung der Schotterqualität zu erwarten ist.

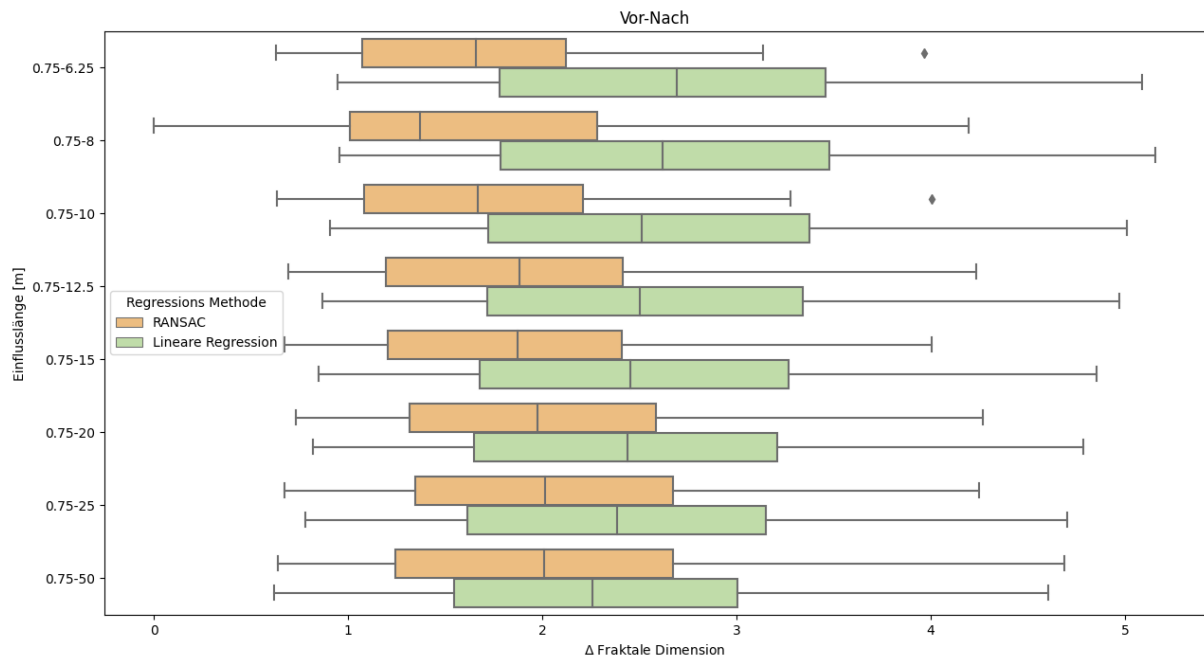


Abbildung 25: Szenario VN - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen vor und nach Durchführung der Schotterbetterneuerung

Analog zu Szenario VV, werden in Abbildung 25 Fraktaldifferenzen aller zu untersuchenden Einflusslängen gegenübergestellt und die jeweils verwendete Regressionsmethode farblich hervorgehoben. Da die Differenzen der Fraktalwerte vor und nach Durchführung der Schotterbetterneuerung berechnet werden, zeigt Abbildung 25 stets positive Fraktaldifferenzen. Der Median der berechneten Differenzen pro Einflusslänge, die mit RANSAC ermittelt wurden, liegt zwischen 1-2 und nimmt mit kleiner werdender Einflusslänge ab. Die mit der angepassten linearen Regression berechneten Fraktaldifferenzen zeigen im Median Differenzen zwischen 2-3 und nehmen mit steigender Einflusslänge ab.

### 6.2.3 Szenario NN

Bei den beiden Messfahrten, die unmittelbar nach der Schotterbetterneuerung durchgeführt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die Fraktaldimensionen in etwa gleichbleiben. Nach Bildung der Differenz der aufeinanderfolgenden Fraktalwerte der beiden Messfahrten ist aufgrund der annähernd konstanten fraktalen Dimensionen eine betragsmäßig kleine Differenz zu erwarten.

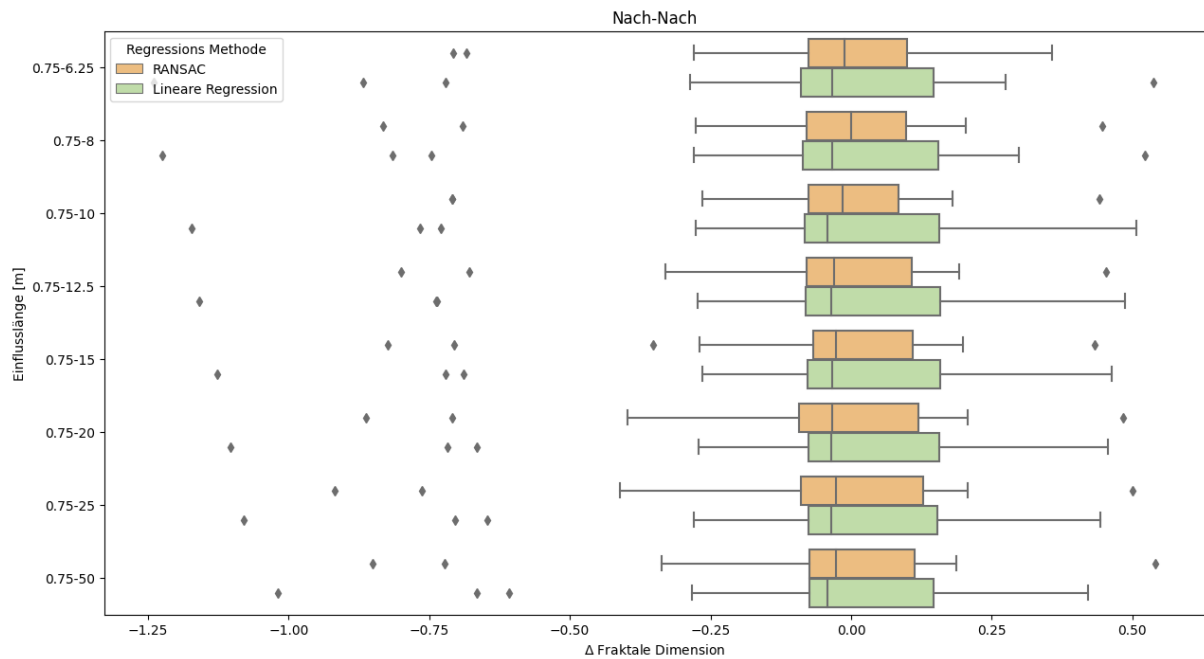


Abbildung 26: Szenario NN - Vergleich der zeitlichen Veränderung der Fraktaldimensionen nach Durchführung der Schotterbeterneuerung

In Abbildung 26 werden die Fraktaldifferenzen der beiden Messfahrten unmittelbar nach der Schotterbeterneuerung und die ermittelten Fraktaldimensionen mit den Regressionsmethoden RANSAC (in orange) und der adaptierten linearen Regression (in Grün) dargestellt. Bei beiden Regressionsmodellen und bei allen Einflusslängen liegt der Median nahe bei 0.

#### 6.2.4 Interpretation der Ergebnisse der Schotterbeterneuerungsabschnitte

Generell lässt sich feststellen, dass die Fraktalwerte, die anhand der Regressionsmethode RANSAC berechnet werden, in allen drei Szenarien im Durchschnitt geringere Werte aufweisen als bei Anwendung der adaptierten linearen Regression. Die fraktalen Dimensionen und die Unterschiede in den kleineren Fraktalwerten sind bei Anwendung von RANSAC kleiner als bei Verwendung der adaptierten linearen Regression. Grund hierfür ist die Erkennung von Ausreißern und die damit verbundene Nichtberücksichtigung bei der Ermittlung der fraktalen Dimensionen. Ebenso ist die geringere Streuung bei der Anwendung von RANSAC auf die Erkennung und Nichtberücksichtigung von Ausreißern im Richardson-Plot zurückzuführen. Die zunehmende Streuung der Differenzen der Fraktalwerte bei kleiner werdender Einflusslänge ergibt sich aus der festen Anzahl der Punkte, die in der angepassten linearen Regression verwendet werden, sowie der Bestimmung des maximal erreichbaren  $R^2$  im Richardson-Plot. Da bei abnehmender Einflusslänge auch die Anzahl der erzeugten Punkte im Richardson-Plot abnimmt (siehe Tabelle 3), kann die vorgegebene Anzahl der verwendeten Punkte nicht für alle Einflusslängen gleichgesetzt werden. Es ist daher notwendig, die Anzahl der verwendeten Punkte an die jeweilige Einflusslänge

anzupassen. Es wäre erforderlich, die Anzahl der zu verwendenden Punkte für jede zu untersuchende Einflusslänge zu ermitteln. Dies ist jedoch bei Verwendung von RANSAC nicht notwendig, was diesen Hyperparameter bei diesem Modell überflüssig werden lässt.

#### 6.2.4.1 Szenario VV

Das in Abbildung 24 dargestellte Szenario VV zeigt, dass sich die zu erwartende Schotterqualität tendenziell verschlechtert. Bei Anwendung der RANSAC ist zu erkennen, dass bei den Einflusslängen 50 m und 6.25 m mehr als 75 % der Abschnitte eine negative Differenz aufweisen und somit eine zeitliche Verschlechterung der Schotterqualität zeigen. Bei Anwendung der angepassten linearen Regression ist eine größere Streuung der Werte zu erkennen. Der Median aller Einflusslängen zeigt hier negative Differenzen, jedoch liegt der dritte Quartalswert bei allen Einflusslängen im positiven Bereich. Die sowohl bei RANSAC als auch bei der adaptierten linearen Regression auftretenden Ausreißer, die eine Verbesserung der Schotterbettqualität über die Zeit zeigen (positive Fraktal-Differenz), könnten auf Streckenabschnitte hinweisen, in denen trotz anstehender Schotterbeterneuerung punktuelle Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt wurden, die die Schotterbettqualität verbessert haben.

#### 6.2.4.2 Szenario VN

Die in Abbildung 25 gezeigten Fraktaldifferenzen ergeben erwartungsgemäß immer positive Differenzen und zeigen damit, dass bei allen Schotterbeterneuerungen eine Verbesserung der Schotterqualität erreicht wurde. Somit kann davon ausgegangen werden, dass alle Einflusslängen zur Beschreibung der Schotterqualität herangezogen werden können. Auffallend ist weiterhin, dass die mit RANSAC berechneten fraktalen Differenzen im Median sowie in den Interquartilsabständen und Spannweiten stets kleiner sind als bei Verwendung der adaptierten linearen Regression. Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass RANSAC die Ausreißer als solche detektiert und nicht zur Bestimmung der fraktalen Dimension heranzieht.

#### 6.2.4.3 Szenario NN

In Abbildung 26 ist zu erkennen, dass die fraktalen Differenzen sowohl bei Anwendung von RANSAC, als auch bei Anwendung der angepassten linearen Regression, betragsmäßig geringe Unterschiede aufweisen. Dies zeigt, dass sich die Schotterqualität nach der Bettungs-erneuerung nur geringfügig ändert und deutet auf eine qualitativ hochwertige Bettungs-erneuerung hin.

### 6.3 Untersuchung von Einzelfehler mittels adaptierten Fraktalanalyse & SigmaH

Um auftretende Einzelfehler bestmöglich zu verifizieren, wird versucht, für jede zu untersuchende Einflusslänge, ein Schwellenwert für die fraktale Dimension festzulegen. Im Anschluss dazu soll eine Einflusslänge festgelegt werden, die es ermöglicht, Einzelfehler am besten zu verifizieren. Für die Festlegung eines Schwellenwertes zur Detektion von Einzelfehlern können 114 bekannte Einzelfehler aus insgesamt 19 Abschnitten herangezogen werden. Die Schwellenwerte werden für jede zu untersuchende Einflusslänge so bestimmt, dass die bekannten Einzelfehler möglichst gut erfasst werden. Um Schwellenwerte für die fraktalen Dimensionen je Einflusslänge bestimmen zu können, wird die adaptierte Fraktalanalyse auf die bereits stationierten Längshöhensignale angewendet. Die daraus berechneten Fraktaldimensionen werden für jede Einflusslänge getrennt gespeichert und untersucht. Weiters wird das Qualitätssignal SigmaH anhand des aufbereiteten Längshöhensignals bestimmt und für alle zu untersuchenden Einflusslängen berechnet. Es ergeben sich somit 24 (8 Einflusslängen · 3 Schwellenwerte) zu bewertende Modelle. Für diese sind folgende Schwellenwerte zu bestimmen:

- I SigmaH
- I fraktale Dimension
- I fraktale Dimension + durchschnittliche Summe der Fraktalwerte-Differenzen

#### 6.3.1 Methodik zur Evaluierung der Modelle

Für die Bestimmung des Schwellenwertes der gebildeten Modelle, wird das sogenannte  $F_1$ -Maß herangezogen. Mit dieser Metrik wird die Leistungsfähigkeit des zu bewertenden Modells beschrieben. Die in dieser Arbeit zu untersuchenden Einzelfehler entsprechen einem binären Klassifikationsmodell bei dem unterschieden werden muss, ob es sich bei der betrachteten Stelle um einen bekannten Einzelfehler handelt oder nicht. Das Maß  $F_1$  wird dann als Bewertungsmetrik angewandt, wenn das Verhältnis zwischen Precision und Recall (Erkennung) ausgeglichen sein soll. Der  $F_1$ -Wert beschreibt, wie gut Einzelfehler erkannt werden. Formel 10 zeigt, dass die Bewertungsmetrik  $F_1$  ein Harmonisches Mittel zwischen Recall und Precision ist und Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann [25].

Mit:

$$F_1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}$$

Formel 10: Bewertungsmetrik  $F_1$  Wert

Die Bewertungsmetrik *Precision* beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen positiven Ergebnisse, die das Modell korrekt vorhersagt. Die Frage lautet: "Die vom Modell

vorhergesagten Fehler sind tatsächlich bekannte Einzelfehler (d.h., wurden richtig vorhergesagt)?“ Dies kann wie folgt bestimmt werden (Formel 11):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}$$

Formel 11: Bewertungsmetrik Precision

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}$$

Formel 12: Bewertungsmetrik Recall

*TP* ... True Positives, d.h. Anzahl an detektierten Fehler die tatsächlich Einzelfehler entsprechen

*FP* ... False Positives, d.h. Anzahl an detektierten Fehler, die keinen bekannten Einzelfehlern zuordbar sind

*FN* ... False Negatives, d.h. Anzahl an nicht detektierten Fehlern, die jedoch bekannte Einzelfehler sind

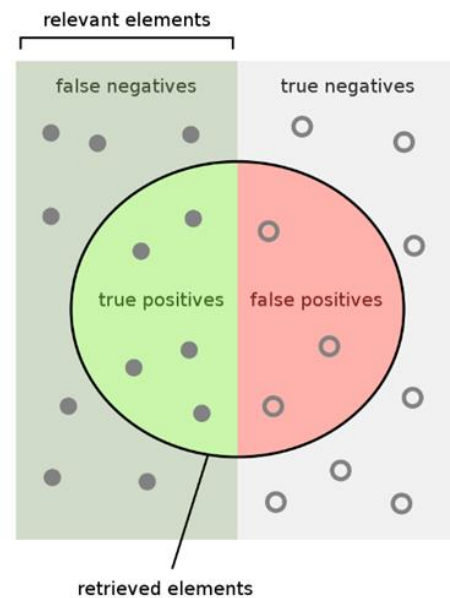


Abbildung 27: Precision & Recall [26]

*Precision* sollte vor allem dann als Bewertungsmetrik verwendet werden, wenn die positive Vorhersage eines Ereignisses mit Sicherheit bestimmt werden soll.

Die Bewertungsmetrik Recall, auch Sensitivität genannt, beschreibt, wie gut das gewählte Modell bei der Erkennung tatsächlicher positiver Ergebnisse ist. Hier stellt sich die Frage: "Wie viele der bekannten Einzelfehler wurden detektiert?". Formel 12 zeigt, wie die Sensitivität eines Modells bestimmt werden kann [25].

### 6.3.2 Schwellenwertbestimmung für Qualitätssignal SigmaH

Da die Fraktalanalyse als Ergänzung zur klassischen Art der Gleislageanalyse zu sehen ist [13], soll - wie bei der klassischen Fraktalanalyse - untersucht werden, ob die neu berechneten Qualitätswerte (fraktale Dimensionen) einen Informationsmehrwert liefern. Dazu wird im Rahmen dieser Arbeit versucht, bekannte Einzelfehler mit Hilfe von Modellen zu detektieren, die einerseits mit dem Qualitätssignal SigmaH und andererseits mit der fraktalen Dimension gefüttert werden. Um die fraktale Dimension mit SigmaH vergleichen zu können, wird die Standardabweichung des Längshöhensignals durch gleitende Mittelwertbildung mit Einflusslängen von 6.25 m, 8 m, 10 m, 12.5 m, 15 m, 20 m, 25 m und 50 m ermittelt und für jede Einflusslänge separat gespeichert. Aus diesen acht generierten Datensätzen soll für jede Einflusslänge ein Schwellenwert für SigmaH bestimmt werden, so dass der F<sub>1</sub>-Wert maximiert wird. Die resultierenden Schwellenwerte und die zugehörige Modellleistung pro Einflusslänge sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern  $\pm 7.5$  m pro EL für SigmaH

SigmaH			
EL [m]	SigmaH Schwellenwert	F <sub>1</sub> – Wert (Trainingsdatensatz)	F <sub>1</sub> – Wert (Validierungsdatensatz)
6.25	4.5	0.8571	0.6538
8	5.25	0.8514	0.6818
10	5.25	0.8378	0.6667
12.5	5	0.8322	0.6667
15	4.75	0.8322	0.6977
20	4	0.8101	0.7111
25	4.25	0.8108	0.6818
50	3.5	0.7568	0.6383

Tabelle 5 zeigt, dass das Modell mit einer Einflusslänge von 6.25 m und einem Schwellenwert von SigmaH von 4.5 bei Verwendung des Trainingssets einen F<sub>1</sub>-Wert von 0.86 erreicht und damit den höchsten F<sub>1</sub>-Wert aller untersuchten Modelle aufweist. Mit dem Validierungssatz werden maximale F<sub>1</sub>-Werte zwischen 0.63 und 0.71 erreicht.

### 6.3.3 Schwellenwertbestimmung für Qualitätswert Fraktal Dimension

Für die Erkennung von Einzelfehlern mithilfe der adaptierten Fraktalanalyse werden für die zu untersuchenden Einflusslängen Modelle erstellt und die entsprechenden Schwellenwerte der fraktalen Dimensionen, welche mittels RANSAC ermittelt wurden, bestimmt. In Tabelle 6 sind die berechneten Schwellenwerte und die zugehörigen F<sub>1</sub>-Werte aufgeführt.

Tabelle 6: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern  $\pm 7.5$  m pro EL für die fraktalen Dimension

Fraktale Dimensionen [-]			
EL [m]	Fraktal Dim. Schwellenwert	F <sub>1</sub> – Wert (Trainingsdatensatz)	F <sub>1</sub> – Wert (Validierungsdatensatz)
6.25	33	0.8645	0.7547
8	32	0.8742	0.7692
10	25	0.8442	0.7843
12.5	25	0.8533	0.7917
15	25	0.8400	0.7660
20	20	0.8400	0.7451
25	17	0.8289	0.7925
50	13	0.7516	0.7917

In Tabelle 6 ist zu erkennen, dass alle Einflusslängen im Trainingsset, bis auf die Einflusslänge von 50 m, einen F<sub>1</sub>-Wert von über 0.80 aufweisen. Hierdurch wird verdeutlicht, dass bei diesen Einflusslängen eine präzise Erkennung von Einzelfehlern erfolgen kann. Experimenten zufolge ist die Fraktalanalyse mit einer Einflusslänge von 8 m am besten geeignet,

um Einzelfehler mit einer Genauigkeit von  $\pm 7.5$  m zu erkennen. Der Schwellenwert der fraktalen Dimension beträgt 32, und der  $F_1$ -Wert, der durch das Trainingsset ermittelt wurde, liegt bei 0.77. Im Validierungsset konnte bei keiner der untersuchten Einflusslängen ein  $F_1$ -Wert von über 0.8 festgestellt werden, wenn die zuvor ermittelten Schwellenwerte angewendet wurden. Der höchste  $F_1$ -Wert wurde unter Berücksichtigung des Validierungssets mit dem Modell der Einflusslänge von 12.5 m erreicht und beträgt 0.79.

#### 6.3.4 Schwellenwertbestimmung für Qualitätswert Fraktal Dimension & akkumulierte Summe der Differenzen der aufeinanderfolgenden Fraktal Dimensionen

Bei der Untersuchung der vorhandenen Daten wurde festgestellt, dass die fraktalen Dimensionen an den Stellen der vorhandenen Einzelfehler einen starken zeitlichen Zuwachs aufweisen. Aus diesem Grund wird versucht, die Einzelfehler in den gebildeten Modellen nicht nur anhand der Fraktal Dimension zu erkennen, sondern auch die zeitliche Veränderung der Fraktaldimension zu berücksichtigen. Dazu werden die Differenzen zwischen den aufeinanderfolgenden Fraktaldimensionen berechnet, der Betrag der berechneten Differenzen aufsummiert und durch die Anzahl der Messreihen dividiert. Basierend darauf werden Modelle erstellt, bei denen zwei Schwellenwerte bestimmt werden müssen, um den besten  $F_1$ -Wert zu erreichen. In Tabelle 7 sind die berechneten Schwellenwerte und der entsprechende  $F_1$ -Wert pro Einflusslänge aufgeführt.

Tabelle 7: Schwellenwertbestimmung zur Erkennung von Einzelfehlern  $\pm 7.5$  m pro EL für Fraktal Dimension und akkumulierte Differenz

Fraktal u. $\Sigma$ Differenzen				
EL [m]	Fraktal Dim. Schwellenwert	$\Sigma$ Differenz Schwellenwert	$F_1$ – Wert (Trainingsdatensatz)	$F_1$ – Wert (Validierungsdatensatz)
6.25	33	0	0.8645	0.7547
8	32	0	0.8742	0.7692
10	5	2.5	0.8519	0.7170
12.5	25	1.5	0.8591	0.7917
15	7	1.75	0.8690	0.7170
20	18	2	0.8552	0.6939
25	16	1.75	0.8378	0.7234
50	6	0.75	0.7889	0.7119

Tabelle 7 zeigt, dass sechs von acht untersuchten Modellen die zeitliche Veränderung der Fraktal Dimensionen zur Erkennung von Einzelfehlern berücksichtigen. Die Modelle mit einer Einflusslänge von 6.25 m und 8 m berücksichtigen die zeitliche Veränderung nicht, da dadurch keine Verbesserung des  $F_1$ -Wertes erzielt wird. Die durch das Validierungsset bestimmten  $F_1$ -Werte zeigen, dass alle Modelle einen  $F_1$ -Wert  $< 0.8$  erreichen. Der beste  $F_1$ -Wert erreicht 0.79 und wurde mit einer Einflusslänge von 12.5 m, einem Schwellenwert

für die Fraktal Dimension von 25 und einem Schwellenwert für die Summe der Differenz von 1.5 erzielt.

### 6.3.5 Interpretation der bestimmten Schwellenwerte und Festlegung der Einflusslänge

Vorangegangene Untersuchungen zur klassischen Fraktalanalyse hatten bereits Ähnlichkeiten berechneter fraktaler Dimensionen mit SigmaH zum Thema. In dieser Arbeit wird versucht, diese Frage mit Hilfe der Modelle, die in den Kapiteln 6.3.2, 6.3.3 und 6.3.4 beschrieben sind, zu beantworten. Dabei wurden die zu untersuchenden Einflusslängen verwendet und sowohl SigmaH als auch die fraktalen Dimensionen ermittelt.

Tabelle 8: Zusammenfassung errechneter  $F_1$ -Werte (Trainingsset u. Validierungsset)

Modelle SigmaH, Fraktal u. $\Sigma$ Differenzen								
EL [m]	$F_1$ – Wert (SigmaH)		$F_1$ – Wert (Frak. Dim.)		$F_1$ – Wert (Frak + Summe)		$F_1$ – Wert Verbesserung zwischen Frak + Summe & SigmaH	
	TS	VS	TS.	VS.	TS.	VS.	TS.	VS.
6.25	0.85714	0.65385	0.86452	0.75472	0.86452	0.75472	0.00737	0.10087
8	0.85135	0.68182	0.87417	0.76923	0.87417	0.76923	0.02282	0.08741
10	0.83784	0.66667	0.84416	0.78431	0.85185	0.71698	0.01401	0.11765
12.5	0.83221	0.66667	0.85333	0.79167	0.85906	0.79167	0.02685	0.12500
15	0.83221	0.69767	0.84000	0.76596	0.86905	0.71698	0.03683	0.06828
20	0.81013	0.71111	0.84000	0.74510	0.85517	0.69388	0.04505	0.03399
25	0.81081	0.68182	0.82895	0.79245	0.83784	0.72340	0.02703	0.11063
50	0.75676	0.63830	0.75159	0.79167	0.78889	0.71186	0.03213	0.15337

In Tabelle 8 sind die bestimmten  $F_1$ -Werte zusammengefasst dargestellt. Um das Qualitätssignal SigmaH mit dem aus der adaptierten Fraktalanalyse resultierenden Qualitätswert zu vergleichen, können die ermittelten  $F_1$ -Werte herangezogen werden. Demnach kann festgestellt werden, dass jene Modelle, die die fraktale Dimension zur Erkennung von Einzelfehlern verwenden, einen besseren  $F_1$ -Wert erzielen konnten, als die Modelle, die auf SigmaH basieren.

Die Unterschiede zwischen den Modellen SigmaH und der fraktalen Dimension, einschließlich ihrer zeitlichen Veränderung, sind in der letzten Spalte als " $F_1$ -Wert-Verbesserung" ersichtlich. Es ist zu beachten, dass das Modell mit einer Einflusslänge von 8 m, unter Berücksichtigung des Trainingssets (TS) und eines Schwellenwerts der fraktalen Dimension von 32, den höchsten  $F_1$ -Wert (0.87) erzielt hat. Bei Betrachtung des Validierungssets wird festgestellt, dass das Modell mit einer Einflusslänge von 12.5 m den höchsten  $F_1$ -Wert (0.79) erreicht hat. Bei sechs der untersuchten acht Einflusslängen konnte der höchste  $F_1$ -Wert durch Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung der aufeinanderfolgenden Fraktaldimensionen erzielt werden, jedoch nicht bei den Modellen mit EL von 6.25 m und EL von 8 m. Da keine signifikante Verbesserung der Modellleistung durch die Berücksichtigung

der zeitlichen Änderung der Fraktaldimensionen erkennbar ist, werden diese bei der Detektion von Einzelfehlern nicht weiter berücksichtigt.

Aus diesem Grund wird die Detektion von Einzelfehlern mit einer Einflusslänge von 12.5 m bevorzugt, da dies den höchsten  $F_1$ -Wert im Validierungsset erzielt. Die Untersuchungen zeigen, dass lokale Schwachstellen im Schotterbett am präzisesten durch den Einsatz der Fraktalanalyse mit einer Einflusslänge von 12.5 m und einem Schwellenwert von 25 [-] detektiert werden können.

## 7 Adaptierte Fraktalanalyse anhand eines ausgewählten Abschnittes

Ziel dieses Kapitels ist es, die Funktionsweise und den zusätzlichen Informationsgewinn der adaptierten Fraktalanalyse sowie die Unterschiede zwischen der herkömmlichen Fraktalanalyse und der adaptierten Fraktalanalyse aufzuzeigen. Zur Veranschaulichung der in Kapitel 6 gewonnenen Erkenntnisse wird im Folgenden ein zufällig ausgewählter Abschnitt aus den 22 untersuchten Querschnitten herausgegriffen und untersucht.

### 7.1 Auswertung der Mess- bzw. Qualitätssignale und Qualitätswerte

Zur Detektion möglicher Einzelfehler werden das aufbereitete Längshöhensignal, die Standardabweichung des Längshöhensignals, die adaptierte Fraktalanalyse, (mit einer Einflusslänge von 12.5 m) sowie die konventionelle Fraktalanalyse über den betrachteten Streckenabschnitt ausgewertet. Zusätzlich stehen Streckenbilder zur Verfügung, die ebenfalls zur Verifizierung und Veranschaulichung der detektierten Einzelfehler herangezogen werden können. Für den betrachteten Abschnitt werden 20 Messdatensätze in den Visualisierungen dargestellt (dies dient einer besseren Visualisierung). Bei der Betrachtung der zeitlichen Veränderung der fraktalen Dimensionen werden alle verfügbaren Messdatenreihen verwendet. Die zu untersuchenden Messdaten erstrecken sich über eine Länge von 700 m und umfassen Messfahrten von 2008 bis 2018.

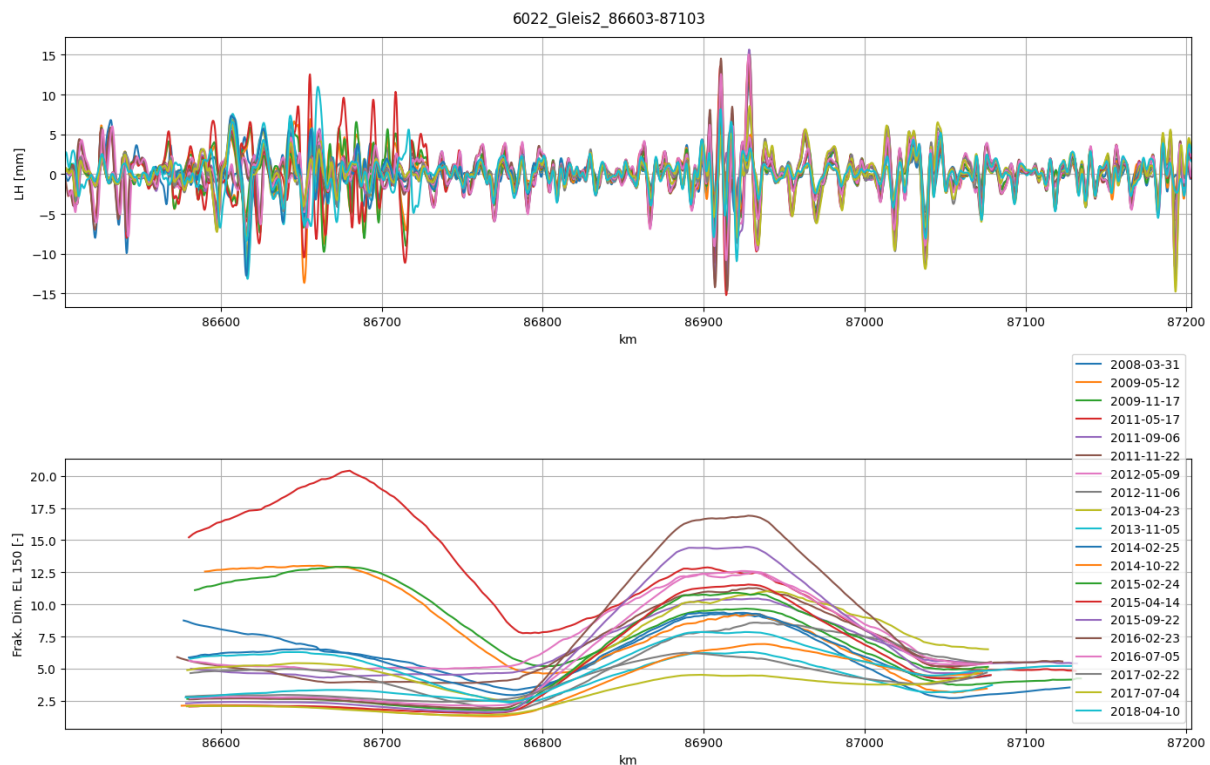


Abbildung 28: Längshöhensignal (3-25 m) und herkömmliche mittelwellige Fraktalanalyse

Abbildung 28 zeigt das Längshöhensignal, das Wellenlängen zwischen 3 und 25 m abdeckt. Das unter dem Längshöhensignal dargestellte Diagramm zeigt die resultierenden mittelwelligen Fraktalwerte mit einer gleitenden Einflusslänge von 150 m. Die Fraktalanalyse zeigt zwei Bereiche mit stark ausgeprägten Fraktalwerten. Sowohl der Bereich  $\text{km } 86,685 \pm 100 \text{ m}$  als auch der Bereich  $\text{km } 86,900 \pm 100 \text{ m}$  weisen auf eine Verschlechterung des Qualitätszustandes des Schotterbettes hin. Zur Überprüfung des Gleiszustandes in den Bereichen  $\text{km } 86,685$  und  $\text{km } 86,900$  wird die jeweilige Messfahrt mit den höchsten Fraktalwerten herangezogen und die Stelle ausgewählt, an der das Streckenbild Verunreinigungen im Schotterbett aufweist (siehe Abbildung 29 und Abbildung 30).

Das in Abbildung 29 rechts dargestellte Streckenbild zeigt einen Übergang von der freien Strecke auf ein Kunstbauwerk (Brücke). Links ist das bei dieser Messfahrt erfasste Längshöhensignal zu sehen. Das Längshöhensignal weist zwischen  $\text{km } 86,520$  und  $\text{km } 86,720$  hohe Amplituden auf. Aus dem dargestellten Streckenbild kann geschlossen werden, dass es sich hierbei um eine lokale Verunreinigung des Schotterbettes handeln könnte.

#### Längshöhe

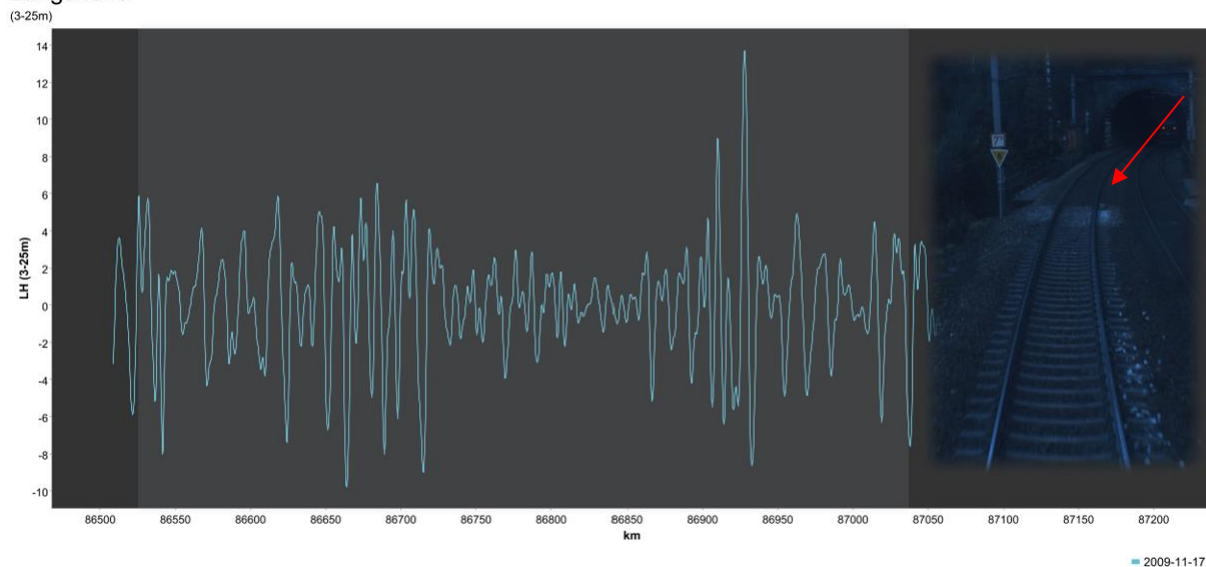


Abbildung 29: Streckenbild und LH -  $\text{km } 86,660 \pm 10 \text{ m}$

Das in Abbildung 30 links dargestellte Streckenbild zeigt einen Übergangsbereich zwischen Tunnel und freier Strecke. Rechts befindet sich das Längshöhensignal des betrachteten Bereichs zum Zeitpunkt der Aufnahme des Streckenbildes. Der betrachtete Bereich befindet sich hier kurz nach dem Tunnelende und zeigt deutlich, dass in diesem Bereich starke Verunreinigungen im Schotterbett vorliegen.

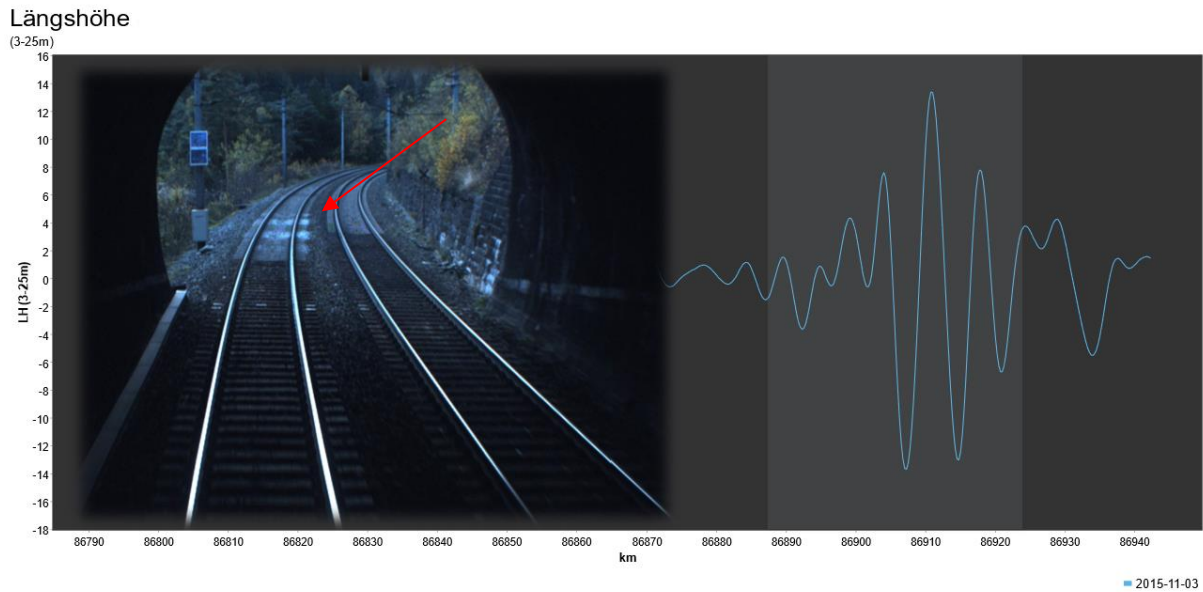


Abbildung 30: Streckenbild und LH - km 86,900 ± 10 m

Die in Abbildung 29 und Abbildung 30 erkennbaren weißen Stellen im Schotterbett deuten darauf hin, dass die dort vorhandene Schotterkörnung zermahlen wird. Es ist jedoch fraglich, ob sich die vorliegende verminderte Schotterqualität tatsächlich, wie in der Fraktalanalyse mit einer Einflusslänge von 150 m ermittelt, auf einen Bereich von ca. 200 m auswirkt oder ob dieser Bereich eingegrenzt werden kann.

Um dies festzustellen, wird der zuvor untersuchte Abschnitt mit der adaptierten Fraktalanalyse mit einer gleitenden Einflusslänge von 12.5 m untersucht. Zusätzlich wird die Standardabweichung des Längshöhensignals mit einer Einflusslänge von 12.5 angegeben und gemeinsam in Abbildung 31 dargestellt. Die Darstellung von SigmaH soll den Informationsgewinn durch die adaptierte Fraktalanalyse verdeutlichen. Die im Diagramm der Fraktal Dimensionen vertikal gestrichelte Linie stellt den zuvor in Kapitel 6.3.5 ermittelten Schwellenwert der Fraktal Dimension dar. Dieser Schwellenwert soll helfen, lokal auftretende Schwachstellen im Schotterbett erkennen zu können.

Der in Abbildung 31 grün eingefärbte Bereich im Diagramm der fraktalen Dimension zeigt die Kilometer, bei denen der festgelegte Schwellenwert von 25 [-] überschritten wurde. Der Algorithmus weist darauf hin, dass es sich in diesem Bereich um eine Verunreinigung des Schotterbettes bzw. um eine Verschlechterung der Qualität des Schotterbettes handelt. Die farblich markierten Bereiche in der fraktalen Dimension zeigen 5 klar abgegrenzte Bereiche, bei denen das darüber dargestellte SigmaH hingegen zeigt nicht eindeutig, wo genau der Fehler auftritt und wie weit sich dieser ausdehnt.

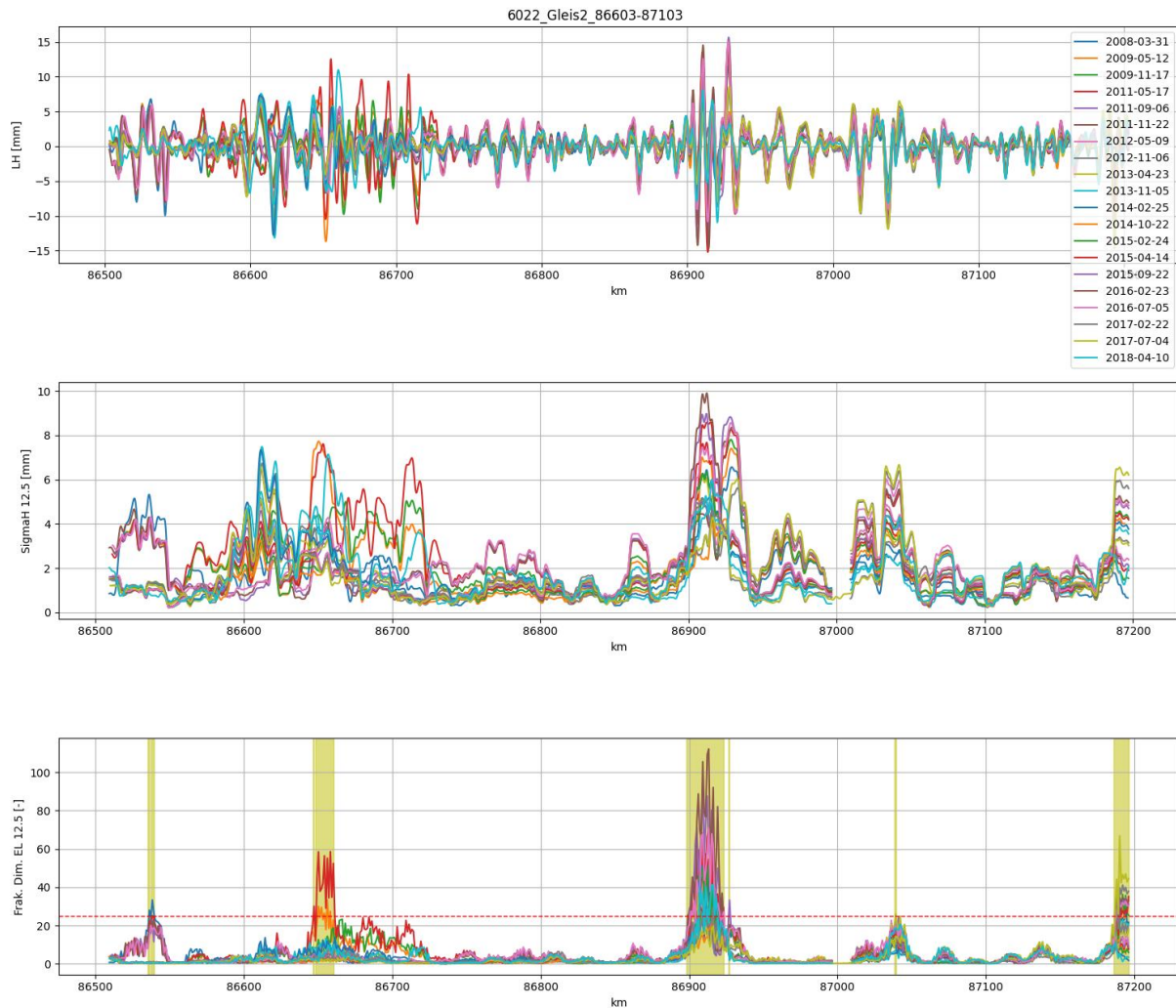


Abbildung 31: Längshöhensignal (3-25 m), SigmaH und adaptierte Fraktal Dimension mit EL 12.5 des untersuchten Abschnittes

Um die in Abbildung 31 identifizierten Schwachstellen zu verifizieren, werden die Messfahrten, bei denen der Schwellenwert der fraktalen Dimension überschritten wurde, ermittelt und anhand des zugehörigen Streckenbildes überprüft. Obwohl die fraktalen Dimensionen der Position km 86,615 den Schwellenwert von 25 [-] nicht überschreiten, wird diese Position gesondert angeführt und auf mögliche Einzelfehler untersucht, da diese Position Auffälligkeiten in SigmaH zeigt. In den folgenden Kapiteln werden die folgenden Streckenpositionen näher betrachtet:

- ┆ Position km 86,536
- ┆ Position km 86,615
- ┆ Position km 86,650
- ┆ Position km 86,910
- ┆ Position km 87,036
- ┆ Position km 87,188

### 7.1.1 Position km 86,536

Die Fraktalanalyse zeigt im Bereich km 86,536 im Jahr 2008 Fraktalwerte  $> 25$  [-] (siehe Abbildung 32). Bei dieser Stelle handelt es sich um eine unbekannte Stelle eines möglichen Einzelfehlers, weshalb eine Überprüfung dieser Stelle anhand des Streckenbildes erforderlich ist. Auffallend ist hier die steile Abnahme der Fraktalwerte im Jahr 2012 von 14 [-] auf nahezu 0 [-]. In diesem Jahr wurden laut Protokoll auf der gesamten Strecke Stopfarbeiten durchgeführt. Die gelb markierten Bereiche zeigen Qualitätsverbesserungen des Schotterbettes (Reduktion der fraktalen Dimension). Es wurden jedoch keine protokollierten/bekannten Instandhaltungs- oder Verbesserungsmaßnahmen durchgeführt.

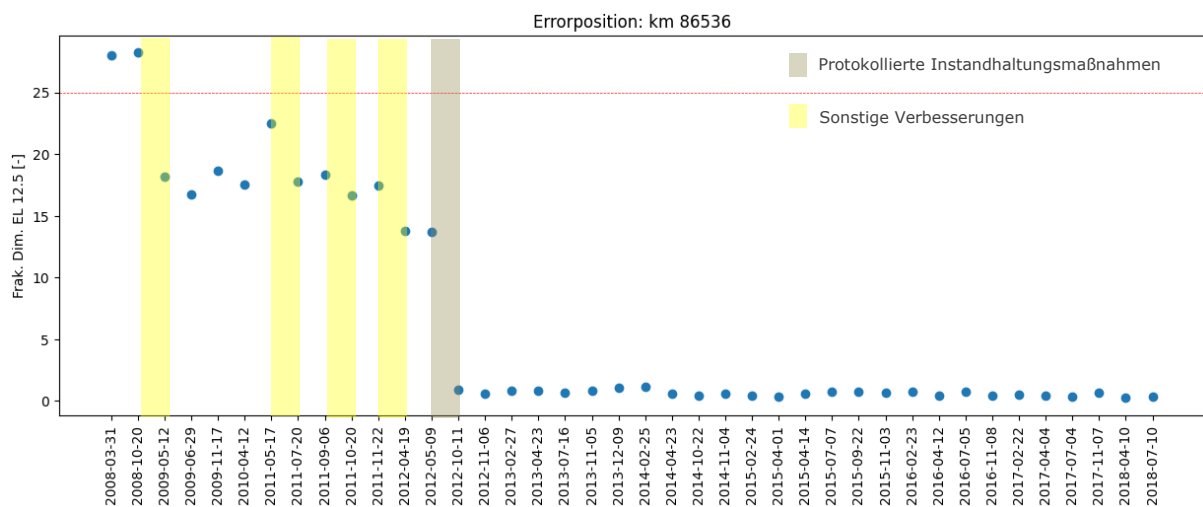


Abbildung 32: Position km 86,536 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Das Streckenbild in Abbildung 33 zeigt, dass sich die detektierte Stelle in einem Tunnel befindet. Da das Bildmaterial aus dem Jahr 2008 sowie das nachfolgende Bild keine Informationen über den Zustand des Schotterbettes liefert, kann hier keine Aussage getroffen werden, ob es sich bei dieser Stelle um einen vorhandenen Einzelfehler handelt oder nicht.



Abbildung 33: Streckenbild km 86,536 - Messfahrt 2018

### 7.1.2 Position km 86,615

Die hier aufgeführte Position km 86,615 wird näher betrachtet, da diese hohe Werte im Qualitätssignal SigmaH aufweist, jedoch in der Fraktalanalyse unauffällig ist (siehe Abbildung 34). Der Maximalwert der erreichten Fraktal Dimension liegt hier bei 10 [-]. Die Abnahmen der fraktalen Dimensionen im Juli 2011, November 2012 und April 2014 sind auf die durchgeführten Stopfarbeiten zurückzuführen. Nach Durchführung der Stopfarbeiten im Jahr 2014 nehmen die fraktalen Dimensionen nur noch geringfügig zu und überschreiten den Fraktal Wert 5 [-] nicht mehr. Es sind jedoch keine durchgeführten Instandhaltungsmaßnahmen bekannt bzw. protokolliert, die zu einer Verbesserung der Schotterbettqualität in den Jahren 2009/10 und 2013 geführt haben könnten.

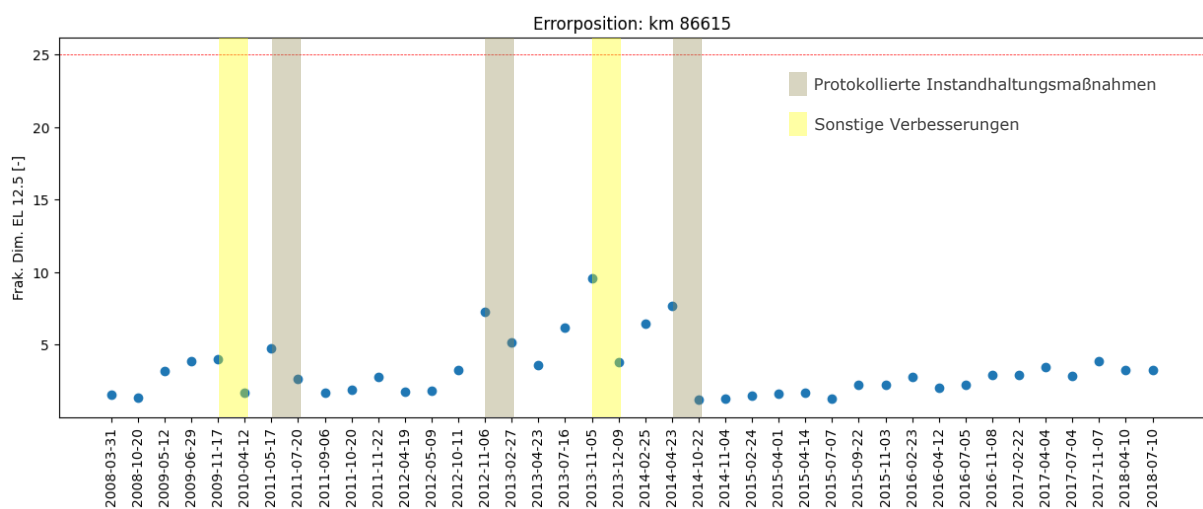


Abbildung 34: Position km 86,615 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Die in Abbildung 35 dargestellten Streckenbilder zeigen die zeitlich nächstgelegene Messfahrt, bei der die Standardabweichung des Längshöhensignals den höchsten Wert aufweist. Die hohen SigmaH-Werte sind vermutlich auf die unterschiedlichen Steifigkeiten des Untergrundes und die verschiedenen Schwellentypen zurückzuführen.

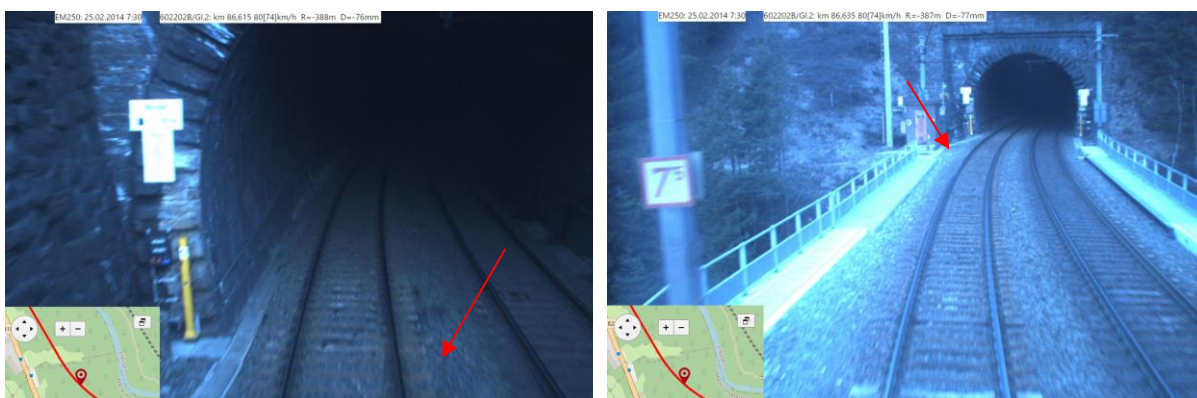


Abbildung 35: Streckenbild km 86,615 - Messfahrt 2014

### 7.1.3 Position km 86,650

Bei der betrachteten Position km 86,650 handelt es sich um einen bereits bekannten/protokollierten Einzelfehler. Die Position km 86,650 weist sowohl von SigmaH als auch durch hohe fraktale Dimensionen auf einen auftretenden Einzelfehler hin. Der Fraktalwert liegt im Jahr 2009 bei 31 [-] und im Jahr 2011 bei 59 [-]. Es wird somit der festgelegte Schwellenwert von 25 [-] überschritten. Auffällig ist, dass der Fraktalwert nach Mai 2011 deutlich abnimmt und sich dann um den Fraktal Wert 5 [-] einpendelt.

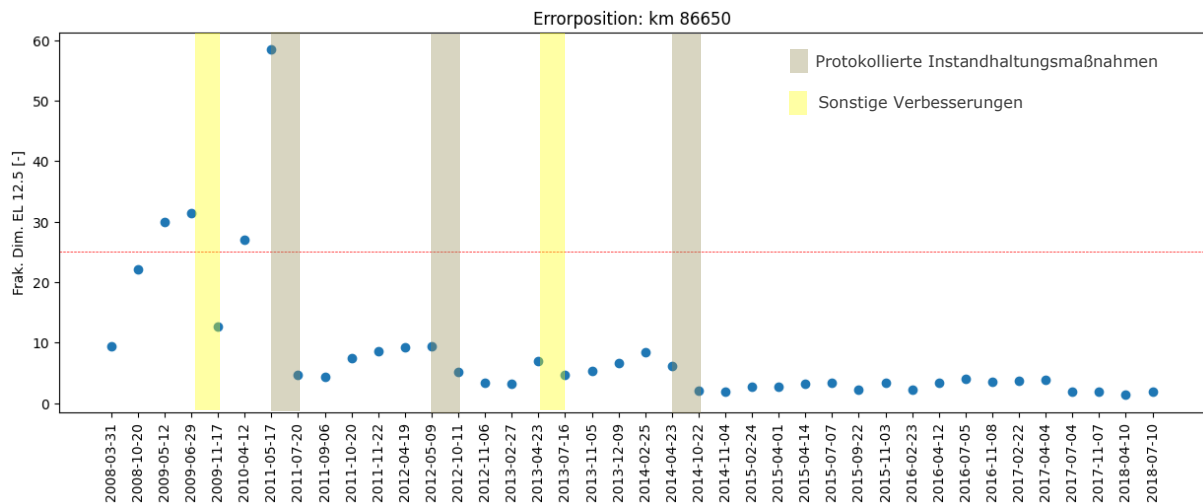


Abbildung 36: Position km 86,650 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Die in Abbildung 37 dargestellten Streckenbilder zeigen die im Jahr 2009 aufgetretenen Einzelfehler, wobei das linke Bild den Einzelfehler vom Gleis 2 und das rechte Bild den Einzelfehler vom gegenüberliegenden Gleis 1 zeigt. Beide Gleisbilder zeigen den gleichen Einzelfehler. Der rote Pfeil zeigt die Position des aufgetretenen Einzelfehlers an.



Abbildung 37: Streckenbild km 86,650 – Messfahrt 2009

#### 7.1.4 Position km 86,910

Die Position km 86,910 stellt einen bereits bekannten Einzelfehler dar. Dieser ist sowohl durch die hohen fraktalen Dimensionen, als auch durch die hohe Ausprägung der Standardabweichung des Längshöhensignals gekennzeichnet. Auch hier wirken sich die protokollierten Instandhaltungsmaßnahmen (Stopfarbeiten) auf die Ausprägungen der fraktalen Dimensionen aus. Es stellt sich jedoch die Frage, woher die Abnahmen der Fraktalwerte in den Jahren 2009, 2011, 2013, 2014, 2015, 2016 und 2017 (gelb eingefärbt) stammen, da in diesen Jahren keine Instandhaltungsmaßnahmen verzeichnet sind.

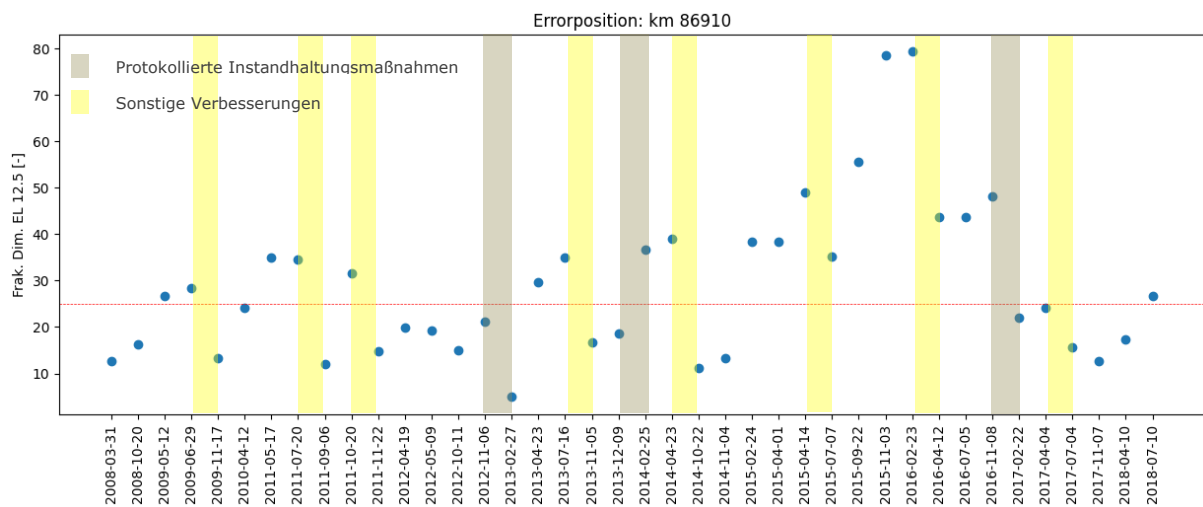


Abbildung 38: Position km 86,910 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Die in Abbildung 39 dargestellten Streckenbilder zeigen die betrachtete Einzelfehlerposition. Das linke Streckenbild zeigt die Messfahrt 2015, bei der der Fraktalwert bereits über dem Schwellenwert von 25 [-] liegt. Das rechte Streckenbild zeigt die nachfolgende Messfahrt im Jahr 2016 und zeigt den Schotterzustand, der bei einem Fraktal Wert von 80 [-] zu erwarten ist.

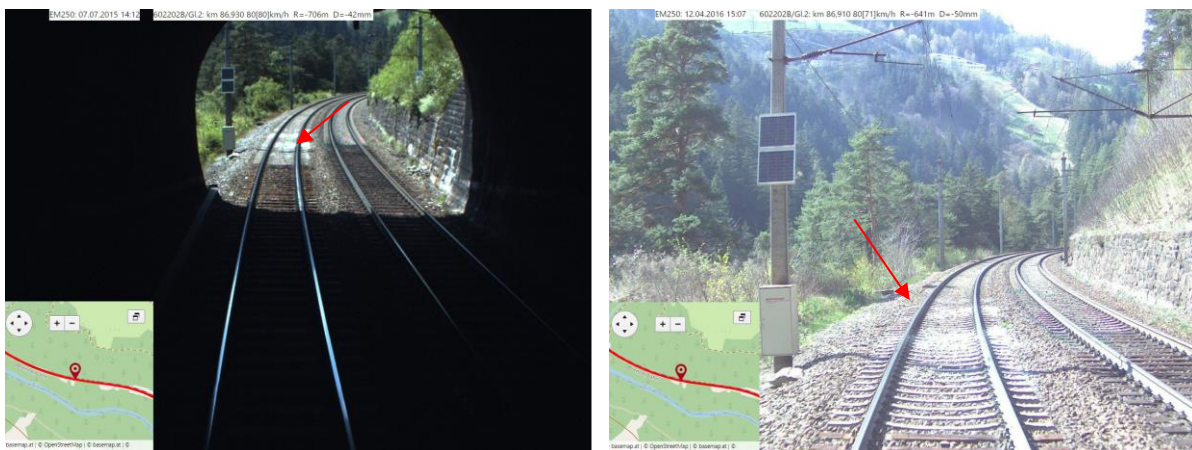


Abbildung 39: Streckenbild km 86,910 - Messfahrt 2015 (links) und 2016 (rechts)

### 7.1.5 Position km 87,036

Bei der der Position km 87,036 handelt es sich um eine noch nicht bekannte mögliche Einzelfehlerstelle. Der in Abbildung 40 dargestellte zeitliche Verlauf der fraktalen Dimensionen im betrachteten Gleisquerschnitt zeigt, dass der Schwellenwert der fraktalen Dimension von 25 [-] im Jahr 2013 überschritten wird. In diesem Bereich wurden in den Jahren 2012/13, 2013/14 und 2016/17 Stopfarbeiten durchgeführt. Die Verbesserung der Schotterqualität in den Jahren 2009, 2009/10, 2011, 2012, 2013 und 2015/16 können keinen protokollierten Instandhaltungsmaßnahmen zugeordnet werden.

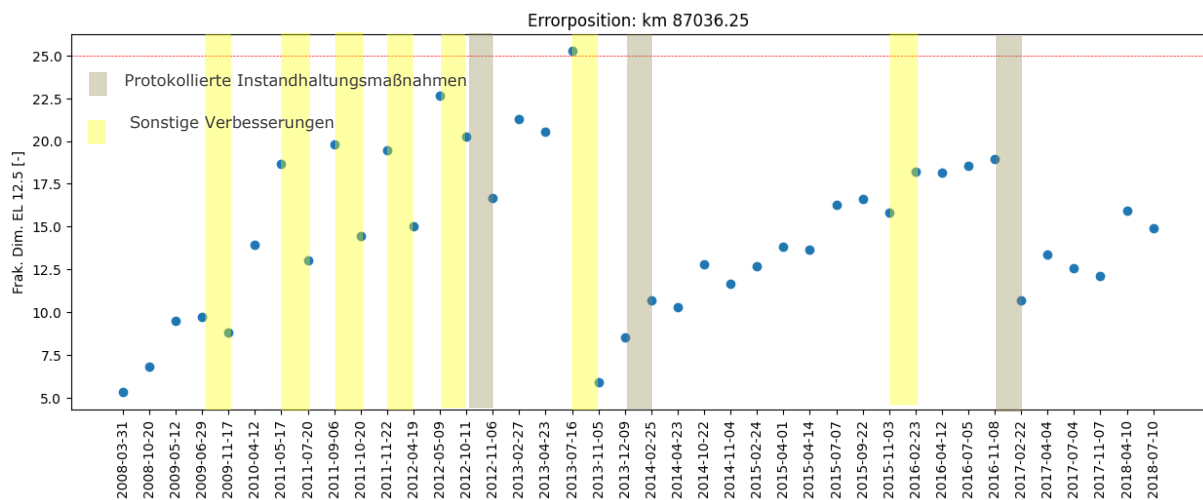


Abbildung 40: Position km 87,040 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Die Streckenbilder in Abbildung 41 zeigen links die Messfahrt aus dem Jahr 2013, bei der die Fraktale stark reduziert wurden. Es sind keine erkennbaren Schotterverunreinigungen zu erkennen. Das rechte Streckenbild zeigt eine Messfahrt aus dem Jahr 2018, bei der ein Einzelfehler auftritt.

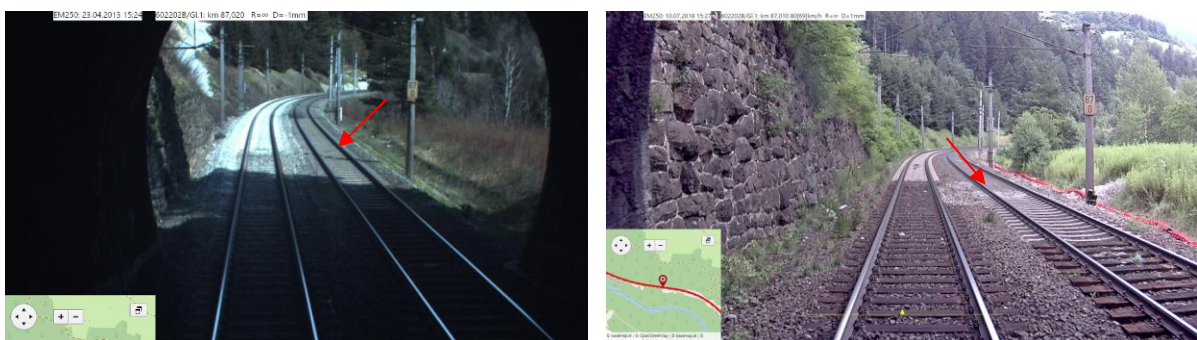


Abbildung 41: Streckenbild km 87,036 Messfahrt 2013 (links) und 2018 (rechts)

### 7.1.6 Position km 87,188

Bei km 87,188 handelt es sich um einen bekannten Einzelfehler. Die Ausprägung der fraktalen Dimension (siehe Abbildung 42) erreicht im Jahr 2017 ihr Maximum und liegt bei 70 [-]. Wie bereits bei den zuvor genannten Einzelfehlern sind auch in diesem Bereich die durchgeführten Stopfarbeiten erkennbar. Die Verbesserung des Schotterzustands in den Jahren 2009, 2013, 2014, 2015, 2016 und von 2017/18 kann keiner verzeichneten Instandhaltungsmaßnahme zugeordnet werden. Weiters ist festzustellen, dass in den Jahren 2013, 2014, 2015, 2016 und 2017 der Schwellenwert der Fraktal Dimension von 25 [-] überschritten wurde.

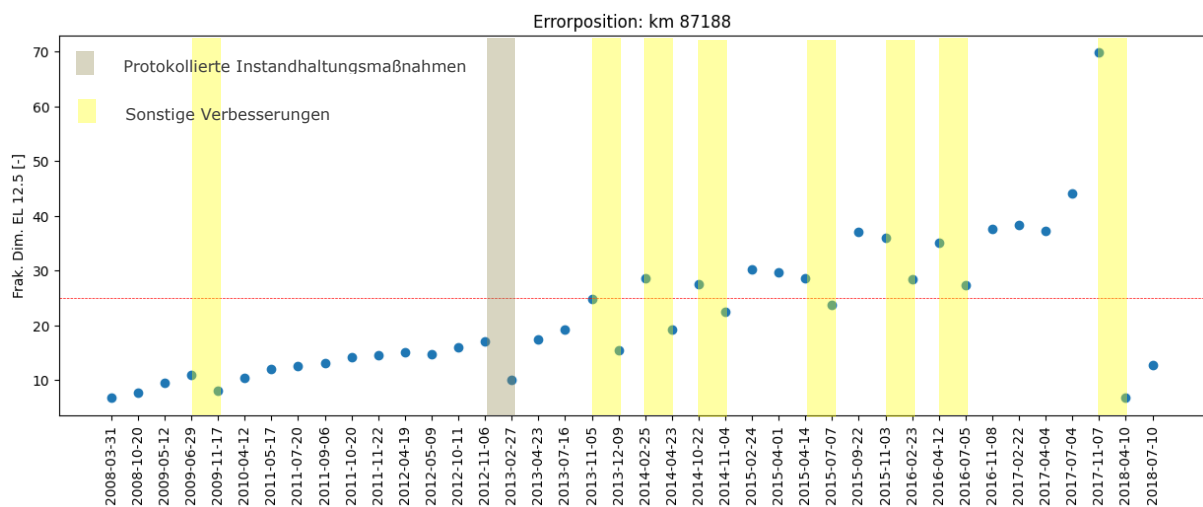


Abbildung 42: Position km 87,188 - zeitliches Verhalten der Fraktaldimensionen

Die Streckenbilder in Abbildung 43 zeigen den Einzelfehler in den Jahren 2015 (links) mit dem zugehörigen Fraktalwert 30 [-] und 2017 (rechts) mit dem Fraktalwert 45 [-].



Abbildung 43: Streckenbild km 87,188 Messfahrt 2015 (links) und 2017 (rechts)

## 7.2 Interpretation der Qualitätswerte

Bei den zuvor beschriebenen Positionen im Gleis handelt es sich um vier tatsächlich vorliegende Einzelfehler, einen nicht eindeutig zuzuordnenden Einzelfehler und einen nicht vorhandenen Einzelfehler. Die jeweils vorliegenden Besonderheiten, die Anzahl der durchgeführten Stopfarbeiten im betrachteten Zeitraum, sowie die festgestellten Verbesserungen der Schotterbettqualität sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Zusammenfassung der potentiellen Einzelfehler

Position [km]	Einzelfehler	Bemerkung	maximale Fraktal Dim. [-]	Detektion durch Fraktal Dim.	durchgeführte Stopfarbeiten	Verbesserungen der Schotterbettqualität ohne bekannten Instandhaltungsmaßnahmen
86.536	-	Tunnel	24	ja	1	4
86.615	Nein	Übergang zwischen Freie Strecke und Tunnel	11	Nein	3	2
86.650	ja	-	59	ja	3	2
86.910	ja	-	80	ja	3	8
87.040	ja	zuvor nicht bekannt	25	ja	3	7
87.188	ja	-	70	ja	1	8

Es kann festgestellt werden, dass die im Streckenbild verifizierten und auch aus den Aufzeichnungen bekannten Verunreinigungen des Schotterbettes mit Hilfe der Fraktalanalyse erkannt werden können. Von den sechs genannten Positionen konnten vier als Einzelfehler bestätigt werden. Bei der Position km 86,536 konnte jedoch nicht mit Sicherheit festgestellt werden, ob es sich um einen Einzelfehler handelt, da zum Zeitpunkt des Überschreitens des Schwellenwertes von 25 [-] kein Streckenbild vorhanden ist. Bei km 86,615 handelt es sich um einen Übergangsbereich zwischen freier Strecke und Tunnel. Die Standardabweichung des Längshöhensignals weist hier hohe Werte auf, die aus Unstetigkeiten der Steifigkeiten resultieren können. Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass die Qualität des Schotterbettes in diesem Bereich mangelhaft ist. Die Streckenbilder zeigen keine offensichtlichen Verunreinigungen des Schotterbettes. Die fraktalen Dimensionen zeigen in diesem Bereich keine Auffälligkeiten.

Betrachtet man jedoch die festgestellten, verifizierten Einzelfehler, so fällt auf, dass neben den dokumentierten Instandhaltungsmaßnahmen, die in der Regel durch die Zugabe von Neuschotter bei Stopfarbeiten zu einer Verbesserung der Schotterqualität führen, weitere Verbesserungen der Schotterqualität festzustellen sind. Es liegt die Vermutung nahe, dass möglicherweise lokale Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt worden sein könnten. Andernfalls würde sich die Schotterqualität ohne Eingriffe verbessern, wovon jedoch nicht ausgegangen werden kann.

## 8 Fazit

Um örtliche Schwachstellen im Schotterbett zu erkennen, wurde in dieser Arbeit die bereits angewandte Fraktalanalyse mit einer Einflusslänge von 150 m aufgegriffen und weiterentwickelt. Aufgrund der großen Einflusslänge der derzeit verwendete Fraktalanalyse ist es nicht möglich, lokal auftretende Einzelfehler zu bestimmen. Aus diesem Grund wurden acht ausgewählte, kleinere Einflusslängen untersucht und der Versuch unternommen, die im Schotterbett auftretenden Einzelfehler genauer zu lokalisieren. Dabei wurden Einflusslängen von 6.25 m, 8 m, 10 m, 12.5 m, 15 m, 20 m, 25 m und 50 m untersucht. Das im Algorithmus der Fraktalanalyse verwendete lineare Regressionsverfahren wurde aufgrund der veränderten Einflusslänge angepasst. In der Fraktalanalyse mit reduzierter Einflusslänge kommt der RANSAC-Algorithmus zur Bestimmung der fraktalen Dimensionen zum Einsatz (siehe Kapitel 5.3.2).

Zur Bestimmung der idealen Einflusslänge der Fraktalanalyse, für die Detektion von Einzelfehlern, wurden Längshöhensignale von 39 Streckenabschnitten anhand der adaptierten Fraktalanalyse untersucht. Dabei wurde darauf geachtet, dass die ermittelten fraktalen Dimensionen den Zustand der Schotterbettung in allen acht untersuchten Einflusslängen beschreiben. Dazu wurden 20 Streckenabschnitte ausgewählt, in denen eine Erneuerung des Schotterbetts stattgefunden hat. Kapitel 6.2 analysiert, inwieweit die untersuchten Einflusslängen der Fraktalanalyse den Zustand der Schotterbettung beschreiben können. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die mit der adaptierten Fraktalanalyse ermittelten fraktalen Dimensionen der acht Einflusslängen den Schotterbettzustand im Gleis zutreffend erfassen.

Um Schwachstellen im Schotterbett detektieren zu können, stehen zur Bestimmung der zu wählenden Einflusslänge der Fraktalanalyse 19 Streckenabschnitte mit insgesamt 114 bekannten Einzelfehlern im Schotterbett zur Verfügung. Die mit der adaptierten Fraktalanalyse berechneten fraktalen Dimensionen werden genutzt, um pro zu untersuchender Einflusslänge Klassifizierungsmodelle zu erstellen. Das Ziel besteht darin, bekannte Einzelfehler durch Festlegung eines Schwellenwertes der fraktalen Dimensionen bestmöglich zu detektieren. Zur Bestimmung der Leistung des Klassifizierungsmodells wird der  $F_1$ -Wert verwendet (siehe Kapitel 6.3.1). Um sicherzustellen, dass die fraktalen Dimensionen neben der herkömmlichen Gleislage-Analyse einen Informationsgewinn bringen, wurden auch acht Modelle gebildet, die die Standardabweichung des Längshöhensignals als Eingangsgröße enthalten. Dabei wurden die gleichen gleitenden Einflusslängen verwendet, wie sie bei der angepassten Fraktalanalyse untersucht werden. Die Bewertungsmetrik  $F_1$  aller acht untersuchten Modelle zeigt, dass die Detektion von Einzelfehlern anhand der fraktalen Dimension in allen Einflusslängen besser funktioniert als bei Modellen, die die

Standardabweichung des Längshöhensignals verwenden. Es konnte somit gezeigt werden, dass die Fraktaldimension einen informativen Mehrwert bringt.

Für die Veranschaulichung des modifizierten Fraktalanalyse Algorithmus wird in Kapitel 7 ein Streckenabschnitt genutzt, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. Mit Hilfe dieses Streckenabschnitts wird die Detektion von Einzelfehlern gezeigt. Zusätzlich werden die fraktalen Dimensionen der Fraktalanalyse mit EL von 150 m dargelegt, um zu zeigen, dass diese nicht für eine genaue Positionsbestimmung der auftretenden Einzelfehler herangezogen werden kann. Zudem wird der Unterschied zwischen der Standardabweichung des Längshöhensignals und der angepassten Fraktalanalyse mit EL von 12.5 m gezeigt. Anhand des genannten Beispiels kann beobachtet werden, dass die detektierten Einzelfehler in Bezug auf die zeitlichen fraktalen Dimensionen unerklärliche Sprünge aufweisen, die auf eine Verbesserung des Zustands des Schotterbetts hindeuten. Es scheint demnach, dass bei auftretenden Einzelfehlern lokale Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden, jedoch nicht immer protokolliert oder vermerkt werden. Dies führt einerseits zu hohen Kosten für die Infrastrukturbetreiber und verfälscht andererseits den zu vermutenden Zustand des Gleiskörpers, da diese Arbeiten nicht aufgezeichnet werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die lokal vorhandenen Schwachstellen im Schotterbett am genauesten durch die adaptierte Fraktalanalyse mit einer gleitenden Einflusslänge von 12.5 m und einem festgelegten Schwellenwert von 25 [-] erfasst werden können.

Im Hinblick auf zukünftige Forschungsperspektiven könnte es von besonderem Interesse sein, die Anwendbarkeit der Yardstick-Methode zur Bestimmung der fraktalen Dimension zu untersuchen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die vorliegenden Erkenntnisse zu beleuchten. Die Analyse der zeitlichen Veränderungen der fraktalen Dimensionen bietet ebenfalls ein interessantes Forschungsfeld, um die Dynamik und Stabilität fraktaler Strukturen besser zu verstehen und eventuelle Erkenntnisse in Bezug auf getätigte Instandhaltungsmaßnahmen gewinnen zu können. Diese Aspekte stellen wichtige Schritte zur Weiterentwicklung und Verfeinerung der entwickelten Ansätze dar und bieten reichhaltiges Potential für zukünftige Untersuchungen.

## Literaturverzeichnis

- [1] ÖBB Infrastruktur, *Zahlen Daten Fakten - ÖBB Kompakt 2019/2020*, URL: [https://presse.oebb.at/dam/jcr:b17c14a2-d8a3-4d3c-8a40-912cbeefa6ab/OEBB\\_Zahlen\\_2020\\_de.pdf](https://presse.oebb.at/dam/jcr:b17c14a2-d8a3-4d3c-8a40-912cbeefa6ab/OEBB_Zahlen_2020_de.pdf), entnommen am 2023 January 25,
- [2] Landgraf Matthias, *Zustandsbeschreibung des Fahrwegs der Eisenbahn - Von der Messdatenanalyse zum Anlagenmanagement*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz.
- [3] Bernhard Lichtberger, *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*, 3., komplett überarb. Neuaufl., 2010, Hamburg: Eurailpress.
- [4] Stefan Marschnig, Matthias Landgraf, *Gleiskomponenten, Gleisbau und Instandhaltung*: Technische Universität Graz, 2021.
- [5] Erwin Klotzinger, *Der Oberbauschotter Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung*. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, 2008; (01+02).
- [6] Holtzendorff Kira, *Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen*, Dissertation, 2002 Aug 3, Dissertation, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme, Technische Universität Berlin.
- [7] Bernhard Lichtberger, *Schottergleisverhalten und Einflußparameter – der Versuch eines Überblicks –*: Teil 1: Die Suche nach der optimalen Schottergleiskonstruktion, 2020.
- [8] Erwin Klotzinger, *Der Oberbauschotter Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen*. ETR-Eisenbahntechnische Rundschau, 2007; (03).
- [9] Landgraf Matthias, *Der Einfluss von Unterbau, Untergrund und Wasserwegigkeit auf die Gleislagequalität*, Masterarbeit, 2011, Masterarbeit, Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz.
- [10] Stefan Marschnig, Matthias Landgraf, *Inspektion, Gleisbau und Instandhaltung*: Technische Universität Graz, 2021.
- [11] Florian Auer, *Berührungslos arbeitende Gleismessfahrzeuge und Auswertung der Messdaten*. Eisenbahn Ingenieur Kalender EIK, 2014.
- [12] Sandner Christopher, *Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau aus Messfahrten der Regelinspektion und dem Fahrwegmonitoring mit Regelzügen*, Dissertation, 2021, Dissertation Technische Universität München.

- [13] Hansmann Fabian, *Innovative Messdatenanalyse – ein Beitrag für ein nachhaltiges Anlagenmanagement Gleis*, 2015 Jan 16, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Technische Universität Graz.
- [14] Rene Kipper, Ulf Gerber, *Gleislagefehler Ursachen, Messung und Bewertung*. ETR--Eisenbahntechnische Rundschau, 2013; (12).
- [15] Leon Zaayman, *Gleiszustandsmonitoring und Analyse für eine effiziente Wartungsplanung: Relevanz und Möglichkeiten von Wartungsarbeiten am Beispiel Südafrika*. EI-Eisenbahningenieur, 2013: 36–40.
- [16] Stefan Marschnig, Michael Fellingner, *et al.*, *Zum Verhalten von Einzelfehlern der Gleislage*. ZEV-Zeitschrift fuer Eisenbahnwesen und Verkehrstechnik - Journal for Railway and Transport; 2022(3): 91–7.
- [17] Stefan Marschnig, Michael Fellingner, *et al.*, *Twin PEAKS: Physikale Evaluierung trifft Analyse Kompetenz – Synchronisation zweier digital Twins*,
- [18] Jun Kigami, *Analysis on Fractals*, 2001, Cambridge University Press.
- [19] Andreas Filler, *Fraktale*, Sommerschule: Humboldt-Universität zu Berlin, 2019.
- [20] Brian Klinkenberg, *A Review of Methods Used to Determine the Fractal Dimension of Linear Features*. Mathematical Geology, 1994; (26).
- [21] Prokofiev, *Fractal dimension: Covering of a fractal curve (here the coast of Great Britain) by grids of decreasing sizes. To measure the Box-counting dimension, we count how many squares contain parts of the curve.*; 2010 URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great\\_Britain\\_Box.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Great_Britain_Box.svg).
- [22] Norbert Lillin, Sebastian Rapp, *et al.*, *Frühzeitige Detektion von punktuellen Instabilitäten am Bahnkörper*. Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Universität Stuttgart, 2018.
- [23] Serkan Dusmez, Mehrdad Heydarzadeh, *et al.*, *Remaining Useful Lifetime Estimation for Power MOSFETs Under Thermal Stress With RANSAC Outlier Removal*. IEEE Trans. Ind. Inf., 2017; 13(3): 1271–9.
- [24] Christian Lindner, Christoph Lackhove, *et al.*, *Prognoseverfahren zur Gleislageabweichung bei Einzelfehlern*. EI-Eisenbahningenieur, 2014.

[25] Oppermann Artem, *Accuracy, Precision, Recall, F1-Score und Specificity*; 2021 URL: <https://artemoppermann.com/de/accuracy-precision-recall-f1-score-und-specificity/>, entnommen am 2023 September 15,

[26] Walber, *Diagram representation of Precision and Recall*; 2014 URL: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Precisionrecall.svg>.

