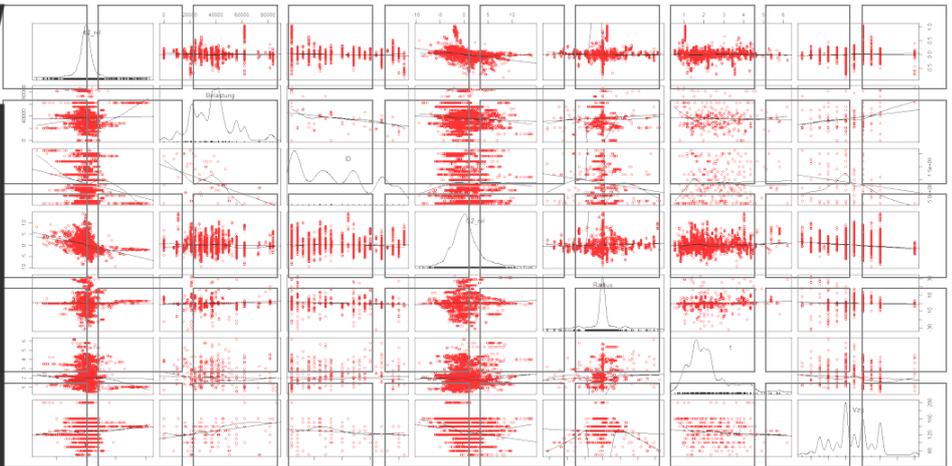


EBW  
EBW  
EBW



# Entwicklung eines Prognosemodells zur Planung von Stopfeinsätzen

Masterarbeit  
2011

Fabian Hansmann BSc  
Matrikelnummer: 0530456

Betreuer:  
Peter Veit  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.  
+43 873 6217  
peter.veit@tugraz.at



## Vorwort und Danksagung

In der Praxis lässt sich nach dem Durchführen von Instandsetzungsmaßnahmen oftmals ein stark divergierendes Qualitätsverhalten im nachfolgenden Messraum erkennen. Diese Masterarbeit soll sich somit im Wesentlichen mit der zentralen Beschreibung des Gleislageverhaltens nach einem Stopfeinsatz befassen und basierend auf dieser ein Prognosemodell erstellen, das eine Bestimmung des optimalen Eingriffszeitpunktes ermöglicht bzw. zumindest eine Beurteilung unterschiedlicher Stopfzyklen realisiert. Dabei gilt es eine parameter-treue Auswertung anzustreben, die den Einfluss der Parameter auf die mögliche Verbesserung der Gleislage nach einem Stopfeinsatz darlegt, um aus diesem mögliche Schlüsse ihrer Einwirkung auf das globale Gleisverhalten zu ziehen.

Zu großem Dank bin ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Veit und Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Marschnig für ihr großes Vertrauen, das sie mir im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit entgegen gebracht haben, sowie für ihren fachlichen Rat im Zuge der Ergebnisinterpretation. Ohne die wechselseitige Motivation meiner Kollegen nicht nur im Rahmen der alltäglichen Büroarbeiten wäre das Erreichen des vorliegenden Ergebnisses nicht möglich gewesen, wofür ich ihnen an dieser Stelle meinen Dank aussprechen möchte. Desweiteren möchte ich sie bitten, ihre gleiche Bereitschaft für eine offene Diskussion, Hilfestellung und gut gemeinte Kritik beizubehalten, da sie ein Arbeitsklima ergeben, das ich in seiner Form nicht mehr missen möchte.

Außerdem danke ich meiner Familie ins besonders meinen Eltern Christine und Gerhard Hansmann, die mir das Studium ermöglicht und mich auf meinem vergangenen Lebensweg maßgebend gefördert, unterstützt und geprägt haben. Der Unterstützung meines Bruders Mag. Daniel Hansmann und seinem brüderlicher Rat ist es zu verdanken, dass ich vor allem in der Eingangsphase vor so mancher bitterer studentischer Erfahrung bewahrt wurde, wofür ich ihm an dieser Stelle meine Verbundenheit ausdrücken möchte.

Bei der Ausgabe der Masterarbeit forderte Uni.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Veit bereits mit einem Lächeln meine vollste detektivische Begeisterung beim Aufspüren möglicher Indizien, die eine Verschlechterung der Gleislagequalität nach ziehen. Ich hoffe, ich bin dieser Aufforderung in dem von ihm geforderten Rahmen gerecht geworden und möchte in diesem Sinne an den Beginn der Arbeit ein Zitat von John W. Tukey stellen:

**„Exploratory data analysis is detective work“**

*John Wilder Tukey*

Statistiker und Begründer der explorativen Statistik

## Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, am 15.03.2011



## Kurzfassung

Das Durchführen von Instandsetzungsmaßnahmen, im Wesentlichen von Stopfarbeiten, ist notwendig, um die aus den einwirkenden Kräften resultierenden Gleislageveränderungen bestmöglich zu korrigieren und somit das Erreichen der angestrebten Nutzungsdauer zu ermöglichen. Die Planung der Stopfarbeiten stellt somit den schmalen Grat zwischen kostenintensiver, auswirkungsorientierter Instandsetzungsmaßnahme und kausalbegründeter Reaktion zur Erreichung der Nutzungsdauer dar. Die Analyse der Gleislageentwicklung nach dem Durchführen eines Stopfeinsatzes zeigt deutlich, dass sich die Wahl des optimalen Eingriffszeitpunkts als wesentliches Problem und als entscheidender Indikator für die resultierende Qualität darstellt.

Zahlreiche Einflussparameter wirken in direkter oder indirekter Form auf das Setzungsverhalten des Schotters und somit schlussendlich auf die Entwicklung der Gleislagequalität über die Nutzungsdauer. Da es zum momentanen Zeitpunkt unmöglich ist, einige von ihnen in der geforderten Genauigkeit anzugeben (z.B. Untergrund), ist es für die Erstellung eines Prognosemodells daher unumgänglich, die Gleislagequalität über die Kenngrößen des Istzustandes (diese ergeben sich aus der Regressionsberechnung zu:  $Q_n$ ,  $b_n$  und Gleisalter) zu beschreiben. Dabei erfolgt die Bewertung der Gleislageentwicklung über einen relativen Vergleich der zwei aus der Regressionsberechnung stammenden Verschlechterungsfunktionen vor und nach dem durchgeführten MDZ-Eingriff.

Diese relative Betrachtung verwirklicht somit eine prozentuelle Darstellung der Verbesserung oder Verschlechterung der Gleislagequalität. Basierend auf einer vorhandenen Korrelation zwischen dem Verhalten des Gleises zwischen zwei Maschineneinsätzen und seiner Evolution über die Nutzungsdauer ergibt sich somit die Möglichkeit, eine Gleislagequalität nach dem Durchführen einer Gleisdurcharbeitung zu prognostizieren und den Zusammenhang zwischen den Eingangs- und Bewertungsgrößen zu erklären.

## Abstract

Track quality decreases dramatically during the life cycle of track, caused by the influence of different forces resulting of traffic load and their effects. Thus maintenance, especially levelling, lining and tamping is necessary to guarantee a continuous level of quality for different track sections. A large amount of factors positively or negatively influences the resulting track quality after maintenance actions. At the moment it is impossible to describe scientifically all these parameters (e.g. subsoil quality) and their effects on the resulting track quality.

For a potential prognosis model it is essential to find a possibility to compare executed maintenance work and its effect on resulting track quality in order to optimise it. The already known correlation between actual track quality behaviour and its evolution during the service life justifies that the compilation of a prognosis model is based on the actual quality situation only. Therefore it seems necessary to create a prognosis model based on parameters which approximately exemplify the actual track quality. The scientifically substantiated regression model allows a specific technical description of the actual track condition described by  $Q$  (absolute track quality) and  $b$  (deterioration rate). Furthermore this master thesis shows an interrelation between the executed tamping cycles, the absolute track quality, the actual deterioration rate and the resulting track quality after the maintenance action. To maximize the positive effects of maintenance work the prognosis model tries to evaluate the best point of time to execute maintenance actions, based on the mentioned correlation and parameters.

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung .....	2
Eidesstattliche Erklärung .....	3
Kurzfassung .....	4
Abstract .....	5
1 Grundlagen.....	7
1.1 Allgemeine Anforderungen .....	7
1.2 Statische Kräfte am Gleis.....	7
1.2.1 Vertikalkräfte.....	7
1.2.2 Schienenlängskräfte .....	8
1.2.3 Querkräfte.....	9
1.3 Dynamische Kräfte am Gleis .....	9
1.4 Widerstände im Gesamtsystem [Lichtberger 2010] .....	11
1.5 Der Gleisschotter und seine Bedeutung für die Gleislage .....	14
1.6 Beschreibung der Gleislagequalität.....	18
1.7 Die Verschlechterung der Gleislage .....	19
2 Gleisinstandhaltung .....	23
2.1 Allgemein .....	23
2.2 Das Stopfen als notwendige Instandhaltungsmaßnahme .....	24
2.3 Gleisqualitätsverlauf über die Nutzungsdauer .....	25
2.4 TUG Datenbank .....	28
2.5 Grundlagen der Statistik.....	30
2.5.1 Explorative und deskriptive Statistik .....	30
2.5.2 Grundmerkmale einer Clusteranalyse.....	32
2.5.3 k-Means Verfahren .....	33
2.5.4 Clustering Large Applications- CLARA.....	34
3 Das Prognosemodell .....	36
3.1 Begriffsdefinition .....	36
3.2 Zielsetzung .....	39
3.3 Zusammenfassung der Abfragenergebnisse und der Datenstruktur .....	39
3.3.1 Festlegung der Gruppierungsgrenzen .....	40
3.3.2 Darstellung Gruppierungsparameter Q1, b1 und Gleisalter- Wahl der Gruppierungsgrenzen.....	42
3.4 Auswahl der Clusterzentrenanzahl.....	44
3.4.1 Ergebnisübersicht der Wahl der optimalen Clusteranzahl mit Hilfe statistischer Verfahren .....	44
3.4.2 Technische Analyse zu Wahl der optimalen Clusteranzahl .....	46
3.5 Globales Gleisverhalten GGV .....	53
3.6 Filterspezifische Auswertung .....	58
3.7 Detailanwendung des Prognosemodells.....	61
3.8 Schlussfolgerungen .....	64
3.9 Ausblick.....	65
4 Literaturverzeichnis .....	66
5 Anhang .....	68

# 1 Grundlagen

## 1.1 Allgemeine Anforderungen

Seit der Entwicklung der ersten Eisenbahn haben sich die Qualitätsansprüche an das System Eisenbahnrad-Fahrweg mit dem Aufkommen der Hochgeschwindigkeitsbahnen und Bahnen mit hohen Achslasten erhöht.

Dennoch werden auch in der heutigen Zeit die gleichen fünf Grundansprüche an das Gleis gestellt, wie sie bereits bei der Einführung der Eisenbahn definiert wurden [Lichtberger 2010]:

- entgleisungssicheres Führen von Fahrzeugen
- Aufnahme der vertikalen und horizontalen Kraftkomponenten des Fahrzeuges
- Ableitung der Kräfte über den Gleisrost und das Schotterbett in den Untergrund
- Gewährleistung eines guten Fahrkomforts
- Sicherstellung der Verfügbarkeit

## 1.2 Statische Kräfte am Gleis

Die am Gleis wirkenden Kräfte lassen sich in drei divergierende Gruppen unterscheiden:

- Vertikalkräfte,
- Schienenlängskräfte,
- Querkräfte.

Der Oberbau wirkt dabei als Mehrkomponentensystem, welches die auftretenden Kräfte zuerst in Längsrichtung auf mehrere Schwellen, anschließend in Querrichtung stufenweise verteilt und in den Untergrund abträgt. [Lichtberger 2010]

### 1.2.1 Vertikalkräfte

Die Vertikalkräfte resultieren in erster Linie aus dem Gewicht der Fahrzeuge und werden demzufolge auch als Radsatzkräfte bezeichnet [Rießberger 2006].

Etwaige Zuschläge zu den in Tabelle 1 angeführten Werten berücksichtigen auftretende dynamische Effekte abhängig von Fahrzeugfederung, Güte des Fahrweges, etc. bzw. stellen einen zusätzlichen Sicherheitspuffer dar [Lichtberger 2010].

Hochgeschwindigkeit	Max. 200 kN
Gemischter Verkehr	Max. 225 kN
Schwerverkehr	Max. 360 kN

Tabelle 1 Übliche Achslasten [Lichtberger 2010]

### 1.2.2 Schienenlängskräfte

[Rießberger 2006]

Schienenlängskräfte entstehen auf der einen Seite durch übertragene Traktionskräfte über den Rad-Schiene-Kontakt und auf der anderen Seite durch die verhinderte Längenänderung bzw. Längsverschiebung der Schiene, verursacht durch z.B. Temperaturveränderungen. In weiterer Folge ergibt sich somit die Spannung in der Schiene aufgrund einer Temperaturänderung von  $\Delta t$  zu:

$$\sigma_t = \alpha \times E \times \Delta t$$

$\sigma_t$  ... temperaturbedingte Spannungen

$\alpha$  ... Temperatureausdehnungskoeffizient [ $1/^\circ\text{K}$ ]

$E$  ... Elastizitätsmodul [ $\text{N}/\text{cm}^2$ ]

$\Delta t$  ... Änderung der Schienentemperatur [ $^\circ\text{K}$ ]

Witterungsbedingte Temperaturbeanspruchungen führen daher bei lückenlos verlegtem Gleis direkt zu Spannungen, während bei vorhandenen Lücken die resultierenden Spannungen zusätzlich eine Funktion der vorhandenen Reibungsverhältnisse darstellen.

An der Berührstelle zwischen Rad und Schiene werden die auftretenden Traktionskräfte über die Hertz'sche Fläche in die Schiene übertragen. Dabei entstehen im Schienenkopf Spannungen in x- und y- Richtung, sowie Schubspannungen. Aufgrund der über die Haftreibung in die Schiene eingebrachten Antriebskraft resultieren vor der Achse Zugspannungen und hinter dieser äquivalent dazu Druckspannungen. Diese sind dabei abhängig von der Radkraft  $Q$ , der Zugkraft und dem Haftreibungsbeiwert zwischen Schiene und Rad.

### 1.2.3 Querkräfte

Horizontalkräfte (Querkräfte) treten vor allem aus folgenden Gründen auf:

- Richtkräfte aus der Fahrzeugbewegung im Spurkanal,
- Fliehbeschleunigung im Bogen,
- Windkräfte,
- Temperaturkräfte im Bogen.

Die Seitenkräfte zwischen Rad und Schiene folgen somit in erster Linie aus der im Bogen entstehenden Führungskraft, oder der Reibung zwischen Rad und Schiene beim Sinuslauf (Wellenlauf). [Rießberger 2006]

### 1.3 Dynamische Kräfte am Gleis

In erster Linie führen Mängel in der Gleis- und Fahrwerksqualität, aber auch ungünstige Bogenläufe zu einer dynamischen Beanspruchung des Gleises, die quantitativ jene der statischen Krafteinwirkung um ein Vielfaches übersteigen kann. Für die Beurteilung der Oberbaubeanspruchung und der Auslegung der Gleiskomponenten wurde lange Zeit das Modell von Zimmermann angewandt, welches von der statischen Belastung eines elastischen Trägers ausgeht.

Die deutsche Bahn verwendet hingegen für die Oberbaudimensionierung das Modell von Eisenmann, welches die Abhängigkeit der eingebrachten Achskraft von der Gleisqualität berücksichtigt. Dabei werden die maximal auftretenden Kräfte auf der Grundlage statistischer Auswertungen unter Berücksichtigung von Geschwindigkeit und Gleislage ermittelt (siehe Abbildung 1). [Wenty 2010]

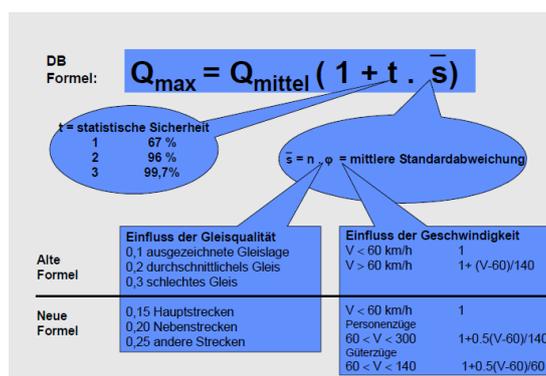


Abbildung 1 Formel der Deutschen Bahn für die Berechnung der maximalen Gleiskräfte [Wenty 2010]

Betrachtet man zusätzlich noch die Formel, die im Rahmen der Planung der Hochgeschwindigkeitsstrecken für den TGV (Train à grande vitesse) in Frankreich zur Abschätzung des Zusammenhangs zwischen Gleiskräften und Gleisqualitäten angewandt wurde, so lässt sich auch aus dieser eindeutig der Zusammenhang ableiten, dass eine gute Gleislage die Rad/ Schienenkräfte reduziert und damit den Verschleiß verringert.

[Wenty 2010]

Die in diesem Rahmen entwickelte Formel nach Alias ergibt sich zu:

$$\sigma\Delta q = k \times V \times (2 \times m \times h)^{0.5}$$

$\sigma\Delta q$  ... Standardabweichung der zusätzlichen dynamischen Kräfte

k ... Koeffizient für die geometrische Gleisqualität

V ... Fahrgeschwindigkeit [km/h]

m ... unabgefederte Massen [t]

h ... Gleissteifigkeiten [t/mm]

Schwingungsanregungen des Gesamtsystems und die dadurch entstehende zusätzliche dynamische Beanspruchung [Lichtberger 2010] können außerdem durch Schienenoberflächenfehler entstehen, wie z.B. durch:

- Riffel mit Wellenlänge bis 50 mm in den Geraden und flachen Bögen auf beiden Schienen,
- Schlupfwellen von 50-250 mm Wellenlänge am niederen Strang in Bögen mit kleinen Halbmessern,
- Wellen aus Walzwerkunrundheiten mittlerer Länge,
- lange Wellen infolge von Spurweitenfehlern und Setzungen des Untergrundes,
- durch Eigenschwingungen der Fahrzeuge.

Das Feder-Dämpfer-System der Laufwerke der einzelnen Fahrzeuge beeinflusst deren Eigenschwingungen und somit auch die Höhe der eingebrachten dynamischen Kräfte. Nicht verwunderlich ist es, dass auch die Qualität des Schwellenaufagers die Entwicklung der dynamischen Kräfte beeinflusst. So beaufschlagt die British Railway Track die Kontaktkräfte bei „soft spots“ mit einem Faktor bis zu 1,75 (siehe Abbildung 2) und berücksichtigt des Weiteren, dass bei entsprechendem Verhältnis V/L die Kontaktkräfte bei schneller fahrenden Zügen geringer sind als bei langsam fahrenden Zügen. Dies

widerspricht der üblichen Meinung, dass sich eine Verringerung der Geschwindigkeit reduzierend auf die dynamischen Kräfte auswirkt. [Wenty 2010]

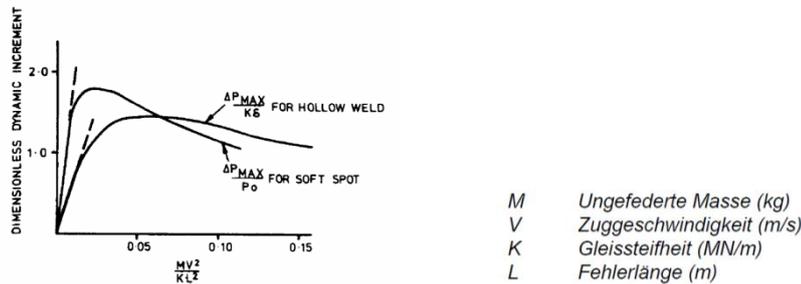


Abbildung 2 Dimensionsloser dynamischer Zuschlag für hohl liegende Schweißungen und Schwachstellen [Wenty 2010]

### 1.4 Widerstände im Gesamtsystem [Lichtberger 2010]

Die über den Rad- Schienenkontakt in das Gesamtsystem eingebrachten Kräfte werden über entsprechende Widerstände der einzelnen Systemkomponenten verteilt und in den Untergrund abgeleitet (siehe Abbildung 3). Das **Verformungsmodul**  $E_v$  [MN/m<sup>2</sup>], als Beurteilungskriterium für die aufnehmbare Last des Untergrunds, ermöglicht somit eine quantitative Einschätzung und Bewertung der Tragfähigkeit des Untergrunds.

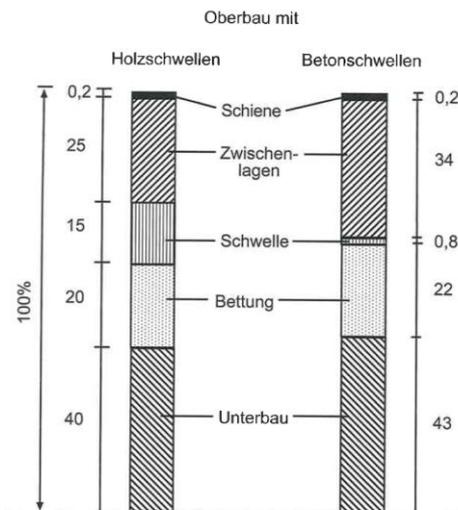


Abbildung 3 Durchschnittliche prozentuale Anteile der tragenden Oberbauelemente am gesamt- elastischen Verhalten des Gleises [Lichtberger 2010]

Ab dem Zeitpunkt, an dem man bei der Berechnung des Oberbaus von der Theorie der starren Schwellenlagerung, zu einer Berücksichtigung, der aus der Belastung resultierenden Schwelleneinsenkung überging, gewann die **Bettungsziffer** zusätzlich an Bedeutung.

Die Bettungsziffer zeigt deutlich die variierend auftretenden Setzungen im Gleiskörper, abhängig von der eingebrachten Belastung und der Art des Untergrunds. Schwellenart und Jahreszeiten wirken in weiterer Folge positiv bzw. negativ auf die Streuweiten der empirisch ermittelten Werte der Bettungszahl. Für eine mögliche Quantifizierung der vorhandenen Setzung und der Entwicklung der Gleislagequalität ist eine Betrachtung der vertikalen Gleissteifigkeit notwendig. Dieser Parameter  $k$  setzt sich aus der vertikalen Gleiskraft  $Q$  [kN] und der gemessenen Gleiseinsenkung  $z$  unter Last [mm] wie folgt zusammen:

$$k = \frac{Q}{z} \text{ [kN/mm]}$$

Geht man von einer rein statischen Beanspruchung des Gleises aus, so ergibt sich die vertikale Gleissteifigkeit als konstanter Wert. Dies führt in weiterer Folge zu einer linearen Abhängigkeit zwischen der Gleiseinsenkung und der eingebrachten Radlast. Wie jedoch in Kapitel 1.3 gezeigt, stellt der dynamische Anteil an der Gleisbeanspruchung in keiner Weise eine vernachlässigbare Größe dar. Untersucht man die Gleissteifigkeit hinsichtlich ihrer dynamischen Auswirkungen so zeigt sich, dass in diesem Falle eine Gleisrezeptanz oder auch eine dynamische Flexibilität des Schienenkörpers berücksichtigt werden muss. Diese Größe kann nur unter der Aufbringung einer dynamischen Kraft gemessen werden und zeigt deutlich die Abhängigkeit zwischen den eingebrachten Schwingungen und der resultierenden Gleiseinsenkung. So führt eine im Resonanzbereich des Gleiskörpers schwingende Kraft zu einer höheren Gleiseinsenkung, während jedoch eine resultierende Antiresonanz dämpfend auf die einwirkende Kraft und somit die resultierende Gleiseinsenkung wirkt.

Beruhend auf empirischen Erkenntnissen, bezüglich der Abhängigkeit zwischen dem Untergrund und der Gleisqualität auf die resultierende Gleissteifigkeit, ergibt sich diese zu:

$$k = \frac{8 \times E \times I}{L^3} = 2 \times \sqrt{2} \times \sqrt[4]{\left(\frac{C \times A}{a}\right)^3} \times E \times I$$

Gegen eine Längenänderung der Schiene infolge einer Kraft- oder Temperatureinwirkung agieren in erster Linie die Reibungswiderstände zwischen den Kontaktflächen der einzelnen Komponenten des Gleisoberbaus:

- Laschenreibungswiderstand (Lasche- Schiene),
- Längsverschiebewiderstand (Schwelle- Bettung),
- Durchschubwiderstand (Schiene- Schwelle).

Aus einer mögliche Querverschiebung der Gleislage resultiert ein entsprechender Widerstand, der abhängig ist von:

- Art, Gewicht, Abmessung und Abstand der Schwellen,
- Kornzusammensetzung der Bettung,
- Bettungsmenge zwischen und vor den Schwellen (Bettungsschulter),
- Verdichtung der Bettung.

Der Querverschiebewiderstand wirkt in erster Linie zwischen der Schwelle und dem angrenzenden Schotter. Er ist dabei abhängig von drei Teilwiderständen:

- Sohlreibung,
- Schwellenflankenwiderstand,
- Vorkopfwiderstand.

Man spricht von einem **stabilen Gleichgewichtszustand**, wenn die Summe, der im Gleis vorhandenen Widerstandskräfte größer ist, als die im Gleis auftretenden Kräfte, die eine Gleislageänderung hervorrufen würden. Störungen des Gleichgewichtszustandes führen zu ungewollten Gleislageveränderungen, die sich in drei unterschiedlichen Formen ausprägen können:

- Gleisverdückung
- Gleisverwerfung
- Gleisverschiebung

Resümierend erfolgt die Lastabtragung vom Rad in den Boden somit über das Mehrkomponentensystem Gleis. Die aufgenommenen Kräfte reduzieren sich dabei schrittweise über die einzelnen Komponenten bis sie in den Untergrund eingeleitet werden (siehe Abbildung 4). Dabei ist eine Kraftverteilung über den Gleisrost anzustreben, welche die maximale Schotterpressung unter der Schwelle und die zulässige Bodendruckspannung nicht überschreitet.

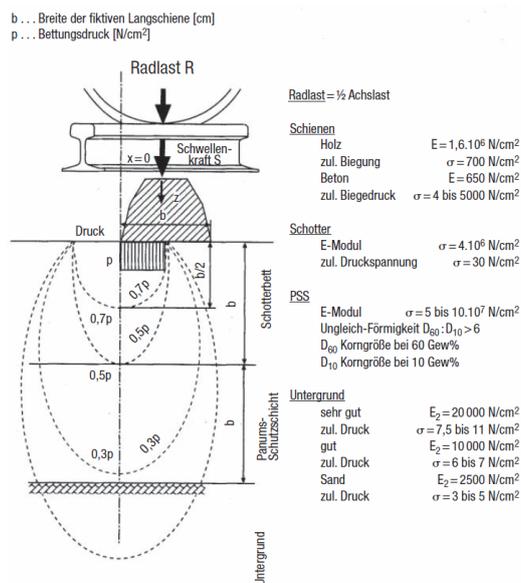


Abbildung 4 Kraftfluss vom Rad zum Untergrund [Wenty 2010]

## 1.5 Der Gleisschotter und seine Bedeutung für die Gleislage

[Lichtberger 2010]

Durch die stetige Weiterentwicklung der Schienen- und Schwellenqualität zeigte sich in den letzten Jahren immer deutlicher die Bedeutung des eingebauten Schotterguts hinsichtlich der Entwicklung möglicher Gleislagefehler [Röthlisberger et al. 2005b]. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Eigenschaften des Schotters genauer betrachtet, da diese in Verbindung mit Stopfeinsätzen einen direkten Einfluss auf die resultierende Qualität der Gleislage ausüben. Die Auswirkungen der anderen Systemkomponenten auf die Gleislagequalität seien an dieser Stelle als bekannt vorweggenommen und werden nicht näher behandelt, da sie keinen zentralen Bestandteil dieser Arbeit bilden.

Die eingebrachten Kräfte werden von der Schiene aufgenommen und anschließend von der Schwelle in das Schotterbauwerk eingeleitet (siehe Abbildung 4). Dabei verteilt sich die „Einzelkraft“ auf mehrere Schwellen und über das Lastprisma im Untergrund.

Um die Überschneidung der Druckverteilungslinien gewährleisten zu können, ist die Bettungsdicke abhängig von Schwellenabstand, Schwellenbreite und Reibungswinkel des Schottergutes zu wählen. Diese Überschneidung ist notwendig um das Hochpressen des Schotters zwischen den Schwellen weitgehend zu vermeiden. Ein entsprechend dimensionierter Schottervorkopf trägt wesentlich zum resultierenden Querverschiebewiderstand bei. Die angemessene Dimensionierung der Schotterhöhe gewährleistet einen gleichmäßigen Druckverlauf im Planum.

Der Schotteroberbau trägt die aufgenommenen Belastungen an den Kontaktflächen der Schotterkörner bzw. entlang der Körnerkanten in Richtung des Planums ab.

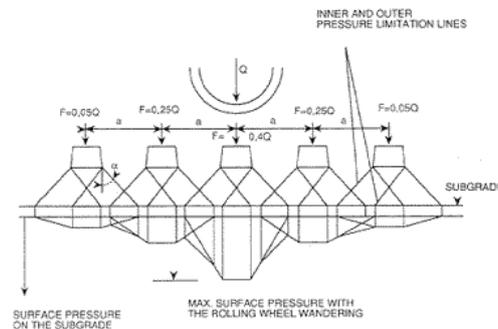


Abbildung 5 Darstellung des Kraftflusses im Schottergleis [Esveld 2001]

Im Wesentlichen soll das Schotterbett somit, basierend auf der Krafteinwirkung wie sie in den Kapiteln 1.2- 1.3 behandelt wurde, folgenden Ansprüchen gerecht werden:

- Gewährleistung einer möglichst gleichmäßigen Übertragung des Schwellendrucks in den Unterbau,
- Schaffung eines hohen Quer- und Längsverschiebungsbeiwertes,
- Sicherstellung einer guten Wasser- und Luftdurchlässigkeit,
- Gewährleistung der Gleiselastizität,
- Erleichterung möglicher Gleiswiederherstellungen.

Neben den bereits erwähnten Parametern Bettungshöhe und Bettungsquerschnitt (siehe Abbildung 6) tragen die Schotterqualität und der Verdichtungsgrad des Schotters zur Erreichung der oben angeführten Ziele bei.

Hinsichtlich der eingebauten Schotterqualität gilt es folgende Parameter des Schotters zu beachten:

- Hohe Witterungsbeständigkeit
- Hohe Zähigkeit
- Hohe Druckfestigkeit
- Keine Beimengungen, die die Luft- und Wasserdurchlässigkeit beeinträchtigen.
- Das Gestein soll würfelig und scharfkantig brechen.
- Der gebrochene Schotter soll schlag- und kantenfest sein.

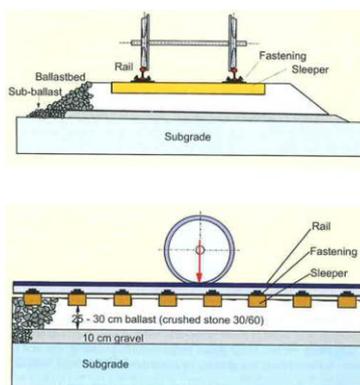


Abbildung 6 Schematischer Aufbau eines Schottergleises [Esveld 2001]

Der Schotter wird im Gleis in unterschiedlichen Arten eingebaut. Oftmals verwendet man gebrochenen Schotter, wobei neu hergestellte Oberbauten fast zur Gänze aus Skelettkorn bestehen. Dieses zerbricht unter Belastung und bildet anschließend das Distanzkorn, welches wiederum die Scherfestigkeit des Schotteroberbaus erhöht. Mit der Zeit erreicht jedoch das Distanzkorn einen so hohen Anteil an der Gesamtmasse, dass die Scherfestigkeit und folglich die Tragfähigkeit abnimmt.

Die Anwendung von Rundschotter, wie in Ländern mit geringem Gesteinsvorkommen, ist in Österreich nicht üblich. Da dieser nicht die Fähigkeit besitzt, sich ineinander zu verzahnen erreicht der Querverschiebewiderstand nur Werte, wie sie bei verunreinigtem Normalschotter üblich sind.

Aufgrund der Verschmutzung des Schotterbetts durch Feinteile kommt es durch zwei Aspekte nachhaltig zu einer Verschlechterung der Gleislage:

1. Der hohe Anteil der Feinteile verhindert die Drainagefähigkeit des Oberbaus und birgt somit das Problem der fehlenden Entwässerung mit all seinen Folgen für die Gleislage.
2. In weiterer Folge trägt die Zunahme der Feinteile zu einer Reduktion des Reibungswinkels bei, die zu einer Verminderung der Gesamttragfähigkeit des Gleiskörpers führt.

Die dramatischen Auswirkungen, die Feinteile auf die Tragfähigkeit des Gleiskörpers bergen, gelten als bekannter Umstand, während jedoch deren Herkunft bei Experten nach wie vor zu Diskussionen führt.

So beruft sich Lichtberger in seinem Handbuch Gleis [Lichtberger 2010] auf Forschungsergebnisse der Network Rail, die folgende Ursachen für die Verunreinigung von Schotter festgestellt haben:

1. Feinbestandteile nach dem Einbau,
2. Ablagerungen aus der Luft,
3. Ablagerungen aus Transport (Kohle, Erz, sonstige Verschmutzungen),
4. Aufsteigende Feinanteile aus dem Untergrund,
5. Vegetationsrückstände,
6. Entstehende Feinanteile durch Abrieb der Körner unter Verkehrslast,
7. Abrieb durch Stopfen.

Die Kornverteilung des eingebauten Schotters nähert sich durch die Belastung über die Nutzungsdauer der Fullerkurve an (siehe Abbildung 7). Die Verhärtung des Schotterbetts durch die entstehenden Feinteile und der beschleunigte Abriebvorgang durch das Zurückhalten von Meteorwasser erkennt Röthlisberger 2005 auch als maßgebenden Indikator für schotterbedingte Schadensfälle.

Im Gegensatz zu Lichtberger sieht er jedoch den Stopfprozess an sich als wesentliche Belastung an, der zusätzlich Feinteile in das Schotterbett einbringt. Messungen ergaben, dass vor allem der Stopfbereich und nicht der Bereich direkt unter der Schwelle von der Alterung des Gleisschotters hinsichtlich der Zerstörung des Skelettkorns betroffen ist. Die Einbringung von Verkehrslasten führt nur unter besonderen Umständen zu merklichen Schäden im Schotterbett. Dies tritt nämlich genau dann ein, wenn die Härte des Gesteins nicht den Anforderungen entspricht und der Schotter der Beanspruchung auf Schlag sowie Abrieb nicht standhalten kann. In weiterer Folge führt somit eine Verwendung von Betonschwellen aufgrund des geringfügigeren elastischen Verhaltens im Vergleich zu Holz- bzw. Stahlschwellen zu einer erhöhten Schlag- bzw. Abriebsbeanspruchung des Schotters.

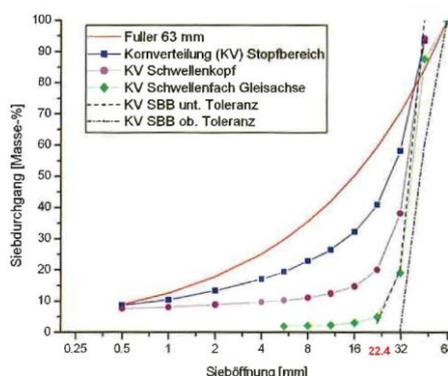


Abbildung 7 Kornverteilung am Beispiel eines Gleises [Röthlisberger et al. 2005a]

## 1.6 Beschreibung der Gleislagequalität

Um die Gleislage über ihre zeitliche Entwicklung beschreiben zu können, existieren in der Literatur unterschiedliche Ansätze, die sich zum Teil stark voneinander unterscheiden. Allein die bloße Definition der Gleislagequalität über entsprechende Kennziffern birgt bereits etliche Differenzen [Lichtberger 2010]:

- CEN Qualitätsstufe: Ermittlung der Höchstwerte der Messgrößen und anschließende Clusterung dieser basierend auf der Häufigkeitsverteilung,
- Gleis-Analyseverfahren: Wichtung der Standardabweichungen der Gleislageparameter und Aufsummierung zu einem Qualitätsindex,
- Beschreibung der Fahrzeugreaktionen: Beurteilung von Beschleunigungen und Beschleunigungsdifferenzen.

Zur Bestimmung der Gleislagequalität im österreichischen Hauptnetz werden die Ermittlung der Fahrzeugreaktionen (MDZ aus dem ADA II Verfahren) und die vertikale Standardabweichung ( $\sigma_H$ ) herangezogen. [Hummitzsch 2009]

Die Auswertungen der vorliegenden Arbeit beruhen auf den berechneten MDZ-a Werten der Strecken im österreichischen Hauptnetz (siehe Kapitel 2.4), welche anhand der Reaktionen des Fahrzeugs die Qualität des Fahrwegs bestimmen (siehe Abbildung 8).

Dies basiert in erster Linie auf der Tatsache, dass die MDZ-a sich für die Erstellung von Stopfmaschinen-Einsatzplänen eignet. [Hanreich 2004]

Durch die MDZ-Ziffer ist es möglich, die auftretenden Differenzen der Höhenlage- und Seitenlagefehler sowie die gegenseitige Höhenlage der Schienen, über die Einflusslänge in eine Qualitätsziffer zu überführen. Die gemessenen Beschleunigungen am Wagenkasten stehen dabei nicht nur als Synonym für das entstehende Komfortgefühl, sondern sind in weiterer Folge auch als Indiz für die Verlagerung von vertikalen Radaufstandsflächen und für die Entwicklung der Radführungskräfte zu sehen. Das Gleis-Analyse- System ADA II berücksichtigt die Beschleunigungsdifferenz im Fahrzeugschwerpunkt eines stark vereinfachten Fahrzeugmodells. [Rießberger 1997]

Dabei ergibt sich die MDZ unabhängig der tatsächlichen Messgeschwindigkeit über die gewählte Einflusslänge zu [Hummitzsch 2009]:

$$MDZ = c \times \frac{1}{L} \times V^{0,65} \times \sum_{i=1}^{\frac{L}{\Delta x}} \sqrt{(\Delta v')^2 + (\Delta h + \Delta \ddot{u})^2}$$

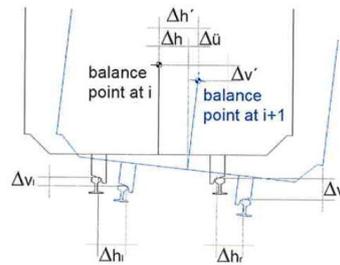


Abbildung 8 ADA II- schematische Darstellung der Ermittlung der MDZ-a [Hummitzsch 2009]

## 1.7 Die Verschlechterung der Gleislage

Mit der Verschlechterung der Gleislage beschäftigen sich unterschiedliche Studien und Forschungsarbeiten, deren Ergebnisse nicht selten divergieren. Das nachfolgende Kapitel stellt daher einen Versuch dar, die unterschiedlichen Ansätze reflektierend zusammenzufassen, ohne sie jedoch bewerten zu wollen.

Im Zuge der Beschreibung der Gleislagequalität sind drei Ansätze für die Berechnung der aktuellen Qualität  $Q$  zu unterscheiden [Lichtberger 2010]:

1. Exponentieller Ansatz:  $Q(t) = Q_0 \times e^{c \times t}$   
 $c$  ... Verschlechterungsrate [-]  
 $t$  ... Zeit [a]  
 $Q_0$  ... Ausgangsqualität [MDZ]
2. Lineare Ansatz:  $Q(M) = Q_0 + c \times M$   
 $M$  ... Betriebslast [Mio. Lasttonnen]
3. Halblogarithmischer Ansatz  $Q(M) = Q_0 + c \times \log\left(\frac{M}{M_0}\right)$   
 $M_0$  ... Bezugsbetriebslast= 2 Mio. t

Allgemein gilt, dass die dynamischen Kraftschwankungen unterschiedliche Setzungen des Gleiskörpers nach sich ziehen, die zu Fehlern in der Gleislage führen. Die zunehmende Unebenheit der Fahrbahn ergibt einen progressiven Anstieg des Verschlechterungsverhaltens des Gleises [Rießberger 2007] (Vgl. Seite 19).

Die Änderung der Gleislage beruht somit auf folgenden Ursachen [Esveld 2001]:

1. Zufällige Setzungen des Schotters,
2. Unterschiedliche Steifigkeiten des Gleiskörpers,
3. Unebenheit der Schienenoberfläche.

Äquivalent dazu beschreibt Lichtberger [Lichtberger 2010] die negativen Einflüsse auf die Verschlechterungsrate der Gleislagequalität wie folgt:

- **Dynamische Krafteinwirkung**  
Aufgrund der Bewegung der Fahrzeuge kommt es zu einer unterschiedlichen Krafteinwirkung auf die Schwellen, welche sich infolge unregelmäßig setzen.
- **Schienenoberflächenfehler und Schienenprofile**  
Die Laufeigenschaften eines Rads, abhängig von Schienenprofil und Wellenlängen möglicher Schienenfehler, bewirken eine dynamische Anregung des Gleisbaus und daher in Folge unterschiedliche Setzungen.
- **Unterschiedliche Schwellenteilung**
- **Unterschiedliche Schwellenaufleger**  
Ändern sich die Federkennziffern aufgrund unterschiedlicher Schwellenaufleger so bewirken diese eine unterschiedliche Krafteinbringung in den Untergrund und infolge unterschiedliche Setzungen.
- **Unregelmäßige Schottersetzungen durch variierende Steifigkeiten**
- **Unregelmäßige Setzungen des Untergrunds**

Signifikant hohe Gleislagenfehler treten lokal oftmals begrenzt auf und lassen sich auf folgende Aspekte reduzieren [Esveld 2001]:

- Einzelfehler (Brücken, Eisenbahnkreuzungen, Weichen, etc.),
- Lokale Fehler in der Gleisgeometrie,
- Schlechtes Tragverhalten des Untergrundes,
- Schweißstöße von schlechter Qualität.

Im Rahmen der qualitativen Betrachtung der Gleislage in der gegenständlichen Arbeit ist es notwendig einige Begriffe vorab zu definieren.

$Q_0$  ... Anfangsqualität der Gleislage.

Als solche wird im Rahmen dieser Arbeit, die sich einstellende Qualität nach den Anfangssetzungen bezeichnet, die jedoch auf den Zeitpunkt 0 rückgerechnet wird. Die Anfangsqualität beruht dabei auf der Regressionsberechnung über die Messpunkte in der TUG-Datenbank (siehe Kapitel 2.4).

Als Anfangssetzung definiert man die Veränderung der Gleislage, die kurz nach dem Einbau bei einer Betriebsbelastung von 0,5-2 Mio. t auftritt. Die Anfangssetzungen lassen sich durch den Einsatz eines dynamischen Gleisstabilisators zumindest zu einem Teil kontrolliert nach dem Einbau durchführen [Lichtberger 2010].

Die Anfangsqualität ist direkt oder indirekt beeinflussbar durch [Hecht et al. 2008]:

- Geeignetes Einbauverfahren,
- Umfang der aufgewendeten Finanzmittel,
- Entsprechender Bauüberwachung,
- Wahl der Maschinen und Materialien,
- Qualifikation und Leistungsfähigkeit der tätigen Firmen.

b ... Verschlechterungsrate

Die Verschlechterungsrate spiegelt die Änderung der Gleislage über den betrachteten Zyklus wider. Sie steht somit als Synonym für den entsprechenden Entwicklungstrend der Gleislage.

Die Verschlechterungsrate ist dabei abhängig von/m [Hecht et al. 2008]:

- Trägheitsmoment der Schiene,
- Verkleinerung des Schwellenabstands,
- Vergrößerung der Kurvenradien,
- Homogene Verdichtung des Untergrunds und der Schotterschicht,
- Streuweite der vertikalen Elastizitäten,
- Spektrum, der ins Gleis eingebrachten Kräfte.

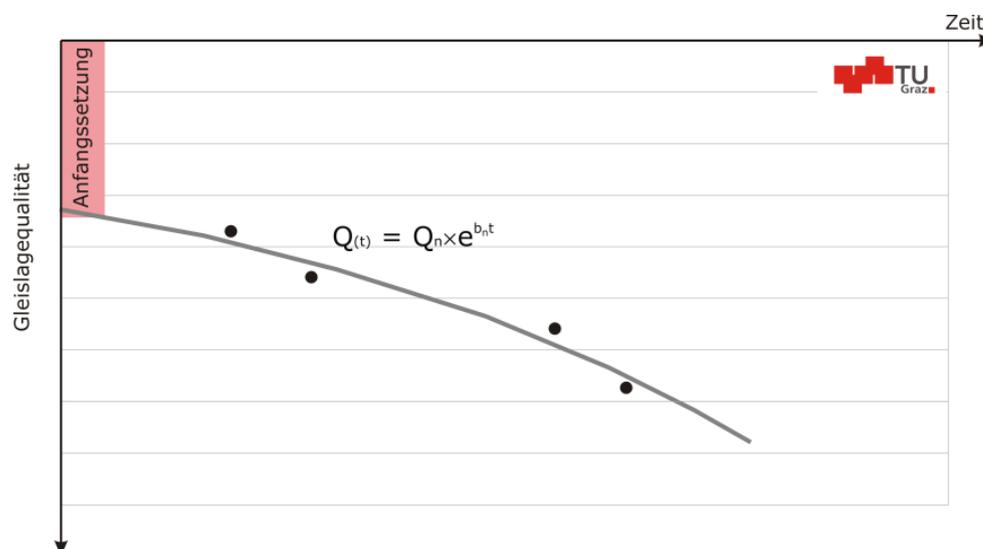


Abbildung 9 Exponentieller Ansatz zu Beschreibung der Verschlechterung der Gleislage

Die Qualität der Gleislage stellt somit analytisch betrachtet (Exponentieller Ansatz) eine Funktion der Anfangsqualität und der Verschlechterungsrate dar. Je schlechter sich der gleisgeometrische Zustand zeigt, desto intensivere Erhaltungsaufwände sind erforderlich um eine Mindestqualität zu garantieren. Durch Stopfen kann die innere Qualität der Gleislage nicht mehr verändert werden. Das Gleis zeigt somit das Bestreben in die jeweilige alte Fehlerlage zurückzukehren. [Lichtberger 2010]

Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass die unterschiedlichen Setzungen der Gleislage auf der einen Seite aus den dynamischen Beanspruchungen des Gleiskörpers und auf der anderen Seite aus der Verschmutzung des Schotteroberbaus resultieren, wenn man davon ausgeht, dass der Unterbau eine entsprechende Qualität aufweisen kann.

Die Belastung des Gleises führt zu einer Kornumlagerung und zum Kornverschleiß, welche die Gründe für die unerwünschte Änderung der Gleislage darstellen. Die eintretenden Setzungen sind dabei in erster Linie von der zufälligen Anordnung der Schotterkörner abhängig, was eine entsprechende Vorhersage des Gleislageverhaltens erschwert. Da somit die dynamische Beanspruchung des Gleisbaus mit dem Gleisfehler zunimmt, gilt daher der Umkehrschluss ebenfalls. Das bedeutet, dass sich ein bereits im Gleis vorhandener Fehler über die Zeit bei konstanter Belastung entsprechend der steigenden dynamischen Beanspruchung verschlechtert. Die Instandhaltungsmaßnahmen am Gleis (z.B. Korrektur des Längshöhenfehlers durch Stopfen) führen zu einer temporären Verbesserung der Gleislage. Tendenziell lässt sich dennoch beobachten, dass das Gleis nach einer gewissen Zeit wieder in die ursprüngliche Fehlerlage zurückbewegt (ausgenommen davon sind gezielte Überhebungen des Gleises). [Lichtberger 2010]

## 2 Gleisinstandhaltung

Da sich diese Arbeit in erster Linie mit der Optimierung von Stopfeinsätzen im Rahmen der planbaren Gleisinstandhaltung beschäftigt, wird im nachfolgenden Kapitel darauf verzichtet, die Gleisinstandhaltung in ihrer praktisch durchgeführten Gesamtheit zu beschreiben. Lediglich der Einsatz der Stopfmaschine soll dabei in groben Grundzügen erläutert werden.

### 2.1 Allgemein

Die Streckeninstandhaltung umfasst sämtliche Prozesse der Instandhaltung und Erneuerung, die auf bereits bestehenden Gleiskörpern durchgeführt werden. Die Streckeninstandhaltung unterscheidet hinsichtlich ihrer Aufgabenbereiche in:

1. Schienenverschleiß,
2. Gleislage,
3. Schotterbett,
4. Eisenbahnkreuzungen,
5. Fahrbahnstruktur,
6. Sonstige.

Außerdem kann man die Instandhaltungsmaßnahmen unterscheiden aufgrund der zeitlich planbaren Möglichkeiten und ihrer räumlichen Ausdehnungen. Auf der einen Seite lassen sich so die Ausbesserung von Einzelfehlern, die sich lokal beschränkt und deren Entwicklung kaum vorhersagbar ist, und auf der anderen Seite die geplante Streckeninstandhaltung langer Abschnitte im Gleis unterscheiden. [Esveld 2001] Im Rahmen dieser Arbeit wird in weiterer Folge jedoch die Definition der Instandhaltung gemäß DIN 31051 mit dem Stand 2001 verwendet.

- **Instandhaltung** [Meier 2007]:

*Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes oder der Rückführung in diesen, so dass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.*

Die Instandsetzung bildet dabei neben der Wartung, der Inspektion und der Schwachstellenbeseitigung einen Bestandteil des gesamten Instandhaltungsprozesses (siehe Abbildung 10). Als Instandsetzung sind dabei alle

Maßnahmen zur Erstellung der geforderten Abnutzungsvorräte einer Betrachtungseinheit ohne technische Verbesserung definiert.

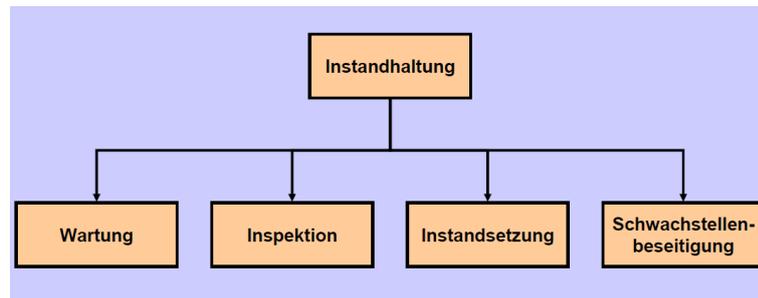


Abbildung 10 Unterteilung der Instandhaltung in die einzelnen Subaufgaben gem. DIN 31051

## 2.2 Das Stopfen als notwendige Instandhaltungsmaßnahme

[Lichtberger 2010]

Das Durchführen von Stopfarbeiten am Gleisschotter soll das Gleis wieder in seine ursprüngliche horizontale und vertikale Lage bringen bzw. die durch unterschiedliche Gleissetzungen und hohe Krafteinwirkungen im Gleis verursachten Gleislagefehler bestmöglich korrigieren. Ziel des Stopfvorgangs ist es in Hinblick auf die Lastverteilung und der Steifigkeit, ein kontinuierliches und homogenes Schwellenauflager zu schaffen. Bei den heute weitgehend eingesetzten asynchron-Gleichdruck-Stopfverfahren wird über die wirkende Vibration der Stopfpickel und der aufgebracht druckgesteuerten Beistellkraft der Schotter unter der Schwelle verdichtet. Die Stopfpickel vollenden den Stopfvorgang bei Auftreten des eingestellten Stopfdrucks und somit erst bei Erreichen der entsprechenden Schotterverdichtung. Die Qualität der Stopfung ist im Wesentlichen abhängig von:

- Stopffrequenz,
- Amplitude der Stopffrequenz,
- Beistellgeschwindigkeit,
- Beistellzeit,
- Stopfdruck.

Um eine optimale Verdichtung des Schotterguts zu erreichen ist ein Eindringen der Stopfpickel (Oberkante Stopfpickelplatte) bis 15 mm unter die Schwellenunterkante anzustreben. Ein zu tiefes Eindringen des Stopfpickels würde zu einer unvollständigen und vor allem ungleichmäßigen Verdichtung des Schottermaterials führen. Bei zu geringer Eindringtiefe kann es zu einer Berührung zwischen der Schwelle und den Stopfpickeln kommen, was wiederum zu einer Beschädigung der Schwelle führen kann. Dringen Stopfpickel in den Schotter ein, so verdrängen sie teilweise den dort befindlichen

Schotter. Daher führen zu geringe Hebewerte zum Bestreben des Gleises nach Abschluss des Stopfvorganges unweigerlich wieder in seine ursprüngliche Fehllage zurückzukehren. Nach Beendigung des Stopfprozesses vollziehen sich im Rahmen der Stabilisierungsphase besonders hohe Anfangssetzungen bis sich im Gleis ein Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen zeigt sich eine Korrelation zwischen der Höhe der Anfangssetzungen und der ausgebesserten Gleislage. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchung versucht man in weiterer Folge durch das gezielte Überheben des Gleises diesen Effekt zu kompensieren und somit das Gleis nach den Anfangssetzungen gezielt in seine Soll-Lage zu bringen. Der Einsatz des dynamischen Gleisstabilisators bewirkt zusätzlich eine kontinuierliche Anfangssetzung des Gleises und eine Erhöhung des Querverschiebewiderstandes nach der Durcharbeitung. Seit dem Beginn der automatisierten Gleisinstandhaltung entwickelten sich die Stopfmaschinen hinsichtlich ihrer Ausführungsqualität und Arbeitsgeschwindigkeit stetig weiter. An dieser Stelle sei beispielhaft der Stopfexpress 09-4x Dynamic der Fa. Plasser und Theurer als momentaner Stand der Technik angeführt. Diese Stopfmaschine ermöglicht das gleichzeitige Stopfen von vier Schwellen in einem Arbeitsgang, und das Aufbringen einer anschließend kontrollierten Anfangsbelastung des Gleises durch den integrierten dynamischen Gleisstabilisator.

## 2.3 Gleisqualitätsverlauf über die Nutzungsdauer

[Veit 2006]

Betrachtet man den Verlauf der Gleislagequalität über die Nutzungsdauer so stellt sich die Frage, welche Qualität als technisch gefordert und welche als wirtschaftlich gerechtfertigt bezeichnet werden kann. Es ist möglich die Anfangsqualität über die Investition bzw. Re-Investition zu schaffen und deren Entwicklung über die Nutzungsdauer durch die gesetzten Instandhaltungsmaßnahmen zu beeinflussen. Ein wesentliches Problem bei der Planung der geeigneten Instandhaltung des Gleiskörpers besteht in seinem schwer beschreibbaren Verhalten über eine entsprechend lange Nutzungsdauer von 25 bis zu 50 Jahren und der Irreversibilität verabsäumter Maßnahmen. Reduktionen auf dem Gebiet der Instandhaltung führen zwar kurzfristig zu Einsparungen, die sich jedoch progressiv auf die Reduktion der resultierenden Nutzungsdauer auswirken.

Demzufolge ist die Planung der geeigneten Instandhaltungsmaßnahmen als langfristiger Vorgang anzusehen, der eine Berücksichtigung der Lebenszykluskosten inkludiert. Aus der Erfahrung ist bekannt, dass sich Gleise mit hoher Anfangsqualität langsamer verschlechtern als Gleislagen mit niedriger Anfangsqualität, was dem exponentiellen Ansatz entspricht, der im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Beschreibung des

Gleisverhaltens herangezogen wird. Derzeitige Auswertungen belegen, dass es nicht möglich ist, durch Instandhaltungsmaßnahmen die Qualität des Gleises im Laufe der Nutzungsdauer über die eigentliche Ausgangsqualität zu heben (siehe Abbildung 11). Die Verschlechterung der Gleislage ist dabei neben der Ausgangsqualität zusätzlich über folgenden Parameter beeinflussbar:

- Unterbauzustand,
- Verkehrsbelastung,
- Oberbautyp,
- Radius etc.

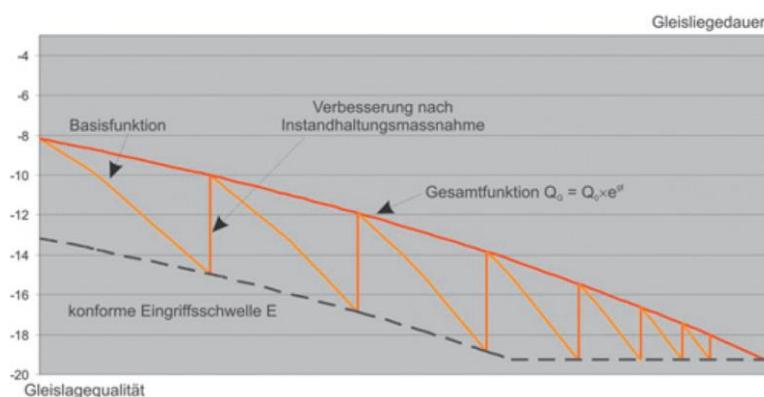


Abbildung 11 Entwicklung der Gleislagequalität über die Nutzungsdauer [Veit 2006]

Wie die Abbildung 12 zeigt, variiert die Gleislagequalität nach dem Durchführen der Instandhaltungsmaßnahme zwischen zwei Bereichen. Einerseits setzt sich die Verschlechterung der Gleislage mit dem Trend der Kurve aus dem vorhergehenden Zyklus zum Zeitpunkt  $t$  der vorhergehenden Instandhaltungszeitraums fort, und andererseits kann die Instandhaltung zu einer positiven Verschiebung der Regressionsgerade durch die Hebung der absoluten Gleislagequalität  $Q$  führen (der eigentliche Verlauf bleibt dabei unbeeinflusst).

Diese Auswertungen verifizieren die Aussagen, dass im Laufe der Nutzung die Qualität der Gleislage an die ursprüngliche Ausgangsqualität angenähert werden kann, ein Erreichen dieser oder sogar deren Überschreitung stellt nicht den Regelfall dar. Des Weiteren zeigt sich deutlich, dass längere Stopfintervalle und die damit resultierende geringere Anzahl von Stopfeinsätzen im Laufe der Nutzungsdauer des Gleises, einen direkten Einfluss auf diese nach sich ziehen. Aus dieser Schlussfolgerung lässt sich auch die Notwendigkeit ableiten, die definierte Eingriffsschwelle als Funktion über die Nutzungsdauer darzustellen.

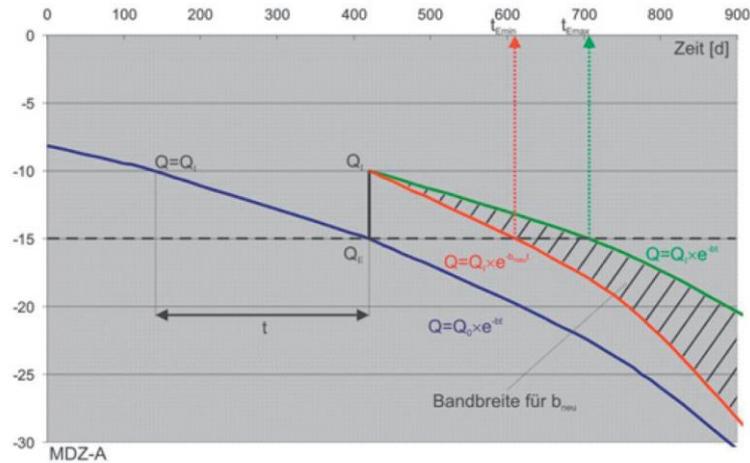


Abbildung 12 Gleisverhalten durch Instandhaltungsmaßnahmen [Veit 2006]

Statistische Analysen bestätigen somit den exponentiellen Ansatz als geeignetes Mittel, den Verlauf der Gleislagequalität über die die Nutzungsdauer zu beschreiben. Dabei wird als Ausgangsqualität  $Q_0$  jener Wert aus der Regressionsberechnung herangezogen, der sich aus den Messwerten ergibt, die sich nach der Anfangssetzung auf den Gleisabschnitten nach einer Gleisneulage einstellen.

Als absolut fehlerfreies Gleis bezeichnet man somit die theoretisch auftretende Anfangsqualität 0. Betrachtet man den Verlauf der absoluten Gleislagequalität über die Nutzungsdauer, so liegt die Vermutung nahe, dass diese ähnlich der Entwicklung der Gleislagequalität zwischen zwei Instandsetzungsmaßnahmen einer e- Funktion folgt. Wengleich für die Verifizierung dieser These noch weitere Auswertungen notwendig sind, so zeigt dieser Sachverhalt dennoch deutlich, dass zur Beschreibung der Auswirkungen einer Instandhaltungsmaßnahme immer die gemeinsame Betrachtung der erreichten Qualität und der sich einstellenden Verschlechterungsrate notwendig sind.

Unabhängig von möglichen streckenspezifischen Aussagen über das Verschlechterungsverhalten von Gleislagen lässt sich dennoch allgemein eine Beurteilung von unterschiedlichen Eingriffsschwellen vornehmen.

## 2.4 TUG Datenbank

Das Streckennetz der TUG- Datenbank setzt sich aus den in Abbildung 13 dargestellten Abschnitten des ÖBB Netzes der Teilkategorie A1 und Teilen von B1 zusammen.

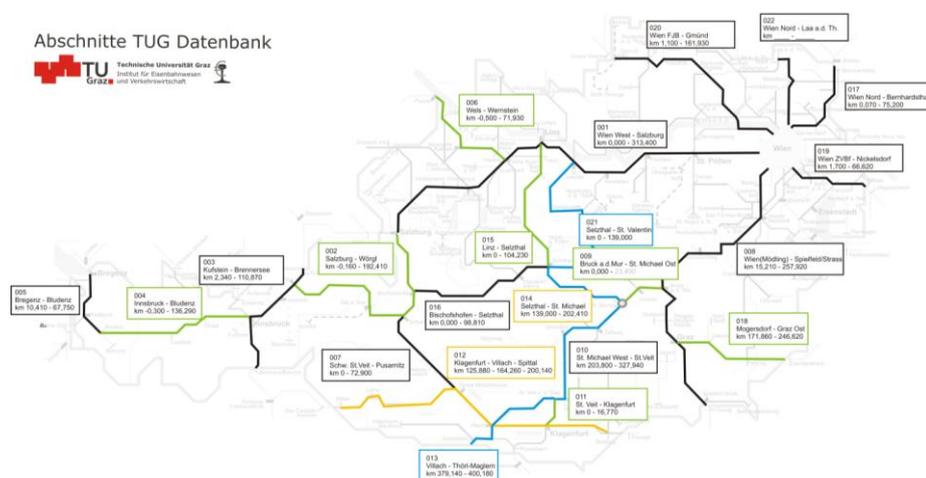


Abbildung 13 Übersicht über die in der TUG-Datenbank erfassten Streckenabschnitte

Die Datenbank enthält dabei unterschiedliche Informationen hinsichtlich der örtlichen Parameter des Gleises und Informationen der Gleislagequalität durch die regelmäßigen Messfahrten des Oberbaumesswagens. Es ist somit möglich Informationen über die Gleislage in regelmäßigen 5 m Abschnitten über das gesamte Streckennetz abzurufen, welches ca. 4000 Gleiskilometer umfasst. Dabei stehen folgenden Informationen zur Verfügung:

### Allgemeine Informationen:

- Streckennummer
- Streckenkilometer
- TUG- Streckennummer
- Gleisnummer
- Streckenname

### Einbauten:

- Bahnhof
- Brücke
- Weiche
- Eisenbahnkreuzung (EK)
- Tunnel

### Krümmung, Radius und Überhöhung

### **Abschnittsspezifische Parameter:**

- zulässige Geschwindigkeit
- Belastung
- gültige Länge

### **Oberbau:**

- Schienenprofil
- Schienengüte
- Schwellentyp
- Längsneigung
- Einbaujahr Schiene
- Einbaujahr Schwelle

### **Qualitätsparameter:**

- $Q_n$
- $b_n$
- T1\_1 und T1\_2
- Delta Schnitt

### **Maschineneinsätze:**

- Art:
  - Unterbausanierung (AHM... Aushubmaschine)
  - Schotterbettreinigung (RM... Reinigungsmaschine)
  - Gleisneulage (SUZ... Schwellenumbauzug)
  - Stopfen und Stabilisieren von Gleisen (MDZ... maschineller Durcharbeitungszug)
  - Schleifen
- Einsatzzeitpunkt

Zusätzlich zu den angeführten Parametern beinhaltet die Datenbank weitere Kennwerte (wie z.B. Nutzungsdauer), die im Rahmen der Forschungstätigkeit im Bereich der LCC-Betrachtung von Strecken erstellt wurden. Da diese Größen jedoch in weiterer Folge keinen Eingang in die Auswertungen dieser Arbeit finden, wurde auf eine entsprechende Auflistung dieser verzichtet. Die Beschreibung des Verschlechterungsverhaltens der Gleislage erfolgt über den exponentiellen Ansatz (siehe 1.7) mit Hilfe einer Regressionsberechnung, die es ermöglicht basierend auf den vorhandenen Messwerten die entsprechende Verschlechterungsfunktion zu berechnen. Die Bestimmung der Regressionskurve erfolgt dabei auf dem Prinzip der Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den einzelnen Messwerten ( $q_n$ ) und der resultierenden Regressionskurve ( $Q(t)$ ) (vgl. [Hummitzsch 2009]). Dabei wird die durchschnittliche Abweichung der Funktion von den Messwerten als Delta Schnitt für eine mögliche Beurteilung der Regressionsberechnung in der Datenbank ausgegeben.

## 2.5 Grundlagen der Statistik

### 2.5.1 Explorative und deskriptive Statistik

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit ist es möglich drei Grundaufgaben der Statistik zu unterscheiden:

1. Deskription - Beschreibung,
2. Exploration - Analyse,
3. Induktion - Schlussfolgerung.

Der Übergang zwischen deskriptiver und explorativer Statistik erfolgt fließend, während jedoch die Abgrenzung zur induktiven Statistik klar definiert werden kann. So befassen sich die explorative und deskriptive Statistik mit der Beschreibung, Darstellung und Analyse der Daten, während die induktive Statistik statistische Methoden zur Verfügung stellt, mit denen es möglich ist, statistische Schlüsse aus stochastischen Modellen zu ziehen. Die explorative Datenanalyse versteht sich nicht nur in der grundlegenden Datenanalyse, sondern beschäftigt sich vielmehr mit der Auffindung neuer Strukturen und Besonderheiten innerhalb der Daten, die in weiterer Folge zur Erstellung neuer Fragestellungen und Hypothesen führen können. [Paul 2002]

Im Rahmen dieser Arbeit werden statistische Methoden in erster Linie dazu verwendet, die momentane Ist-Situation zu beschreiben und mögliche Strukturen sowie Abhängigkeiten zu erkennen.

*Boxplot* [Stadlober 2010]

Der Boxplot entspricht einer Summationsdarstellung der Datenverteilung, und ermöglicht durch seinen Aufbau einen raschen Einblick in die Datengrundstruktur. Die Datendarstellung erfolgt dabei, wie in Abbildung 14 dargestellt, über die unten angeführten 5 Kennwerte der Datenverteilung:

1. unterer Whisker
2. unterer Quartilswert
3. Median
4. oberer Quartilswert
5. oberer Whisker

Vorteile des Boxplots gegenüber anderen Darstellungsmöglichkeiten der explorativen Statistik sind:

- ein schneller Überblick über die Daten,
- Erkennung des Symmetrieverhaltens der Daten,
- optimale Vergleichsgrundlage unterschiedlicher Stichproben,
- im Gegensatz zu Histogrammen oder Balkendiagrammen ist keine subjektive Wahl von Eingangsparametern der Darstellung erforderlich.

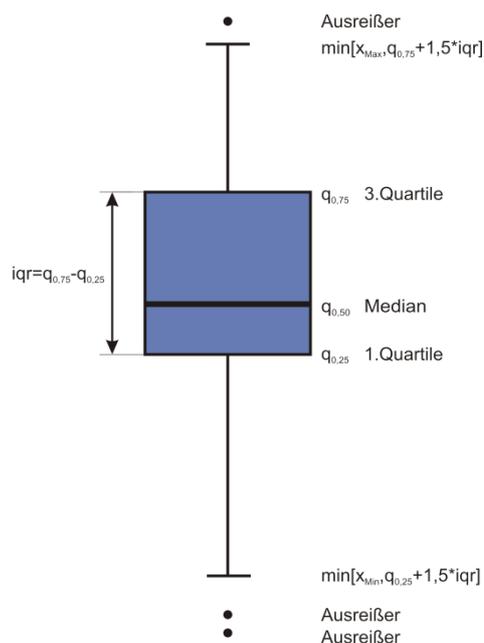


Abbildung 14 Aufbau eines Boxplots

### Histogramm- Barplot (Balkendiagramm) [Stadlober 2010]

Das Histogramm dient zur Visualisierung einer geordneten Stichprobe über die Darstellung der Häufigkeiten der einzelnen Daten, die vordefinierten Klassen zugeordnet werden. Durch die subjektive Wahl der Klassen und Klassenbreiten geht dabei der Bezug zu den Originaldaten verloren. Die Wahl der Klassenanzahl stellt dabei das zentrale Problem der Histogrammerstellung dar, für das es je nach vorliegender Verteilung der Ausgangsdaten entsprechende Lösungsansätze gibt. Histogramme ermöglichen es dabei jeder Klasse den entsprechenden Häufigkeitswert (absolute Häufigkeit, relative Häufigkeit, Dichteschätzer) zuzuordnen, während Balkendiagramme als Wert immer die Ausprägung des Parameters (absolute Häufigkeit) wiedergeben.

### *Scatterplot- Scatterplotmatrix*

Im Rahmen des Scatterplots ist es möglich, Abhängigkeiten zwischen zwei Parametern ( $x_i$  und  $y_i$ ) in einem Koordinatensystem darzustellen. Einzelne Scatterplots können sowohl zu Scatterplot-Matrizen, die mehrere Scatterplots zu einem Plot vereinen, oder auch zu dreidimensionalen Darstellungen (Abhängigkeiten zwischen drei Parametern) erweitert werden.

#### 2.5.2 Grundmerkmale einer Clusteranalyse

Die Clusteranalyse steht als Vertreter für ein statistisch strukturentdeckendes Verfahren, dessen Aufgabe es ist, die einzelnen Stichproben anhand der definierten Merkmale in möglichst homogene Gruppen zusammenzufassen, während jedoch die Heterogenität zwischen den einzelnen Gruppen ein Maximum annimmt. Dabei lassen sich die Verfahren hinsichtlich zweier Merkmale unterscheiden:

- Wahl des Proximitätsmaßes,
- Wahl des Gruppierungsverfahrens.

Unter dem Proximitätsmaß versteht man eine numerische Bestimmung der Ähnlichkeiten zwischen den Stichproben (bzw. der Gruppierungsparameter) durch einen zugeordneten Ähnlichkeits- oder Distanzwert. Nach dem Zusammenstellen der Distanzmatrix über die die Distanzwerte stehen unterschiedliche Gruppierungsalgorithmen zur Verfügung, die sich je nach Anwendung besser oder schlechter zur Clusterung der Stichprobe eignen.

Betrachtet man die Cluster-Algorithmen hinsichtlich ihrer Bedeutung in der Anwendung, so lassen sich zwei Hauptgruppen unterscheiden:

1. Partitionierende Algorithmen,
2. Hierarchische Algorithmen.

Die partitionierenden Algorithmen verwenden dabei eine festgelegte Anzahl von Clustern als Eingangsparameter und ordnen diesen die entsprechenden Messgrößen im Rahmen eines Austauschalgorithmus zu. Im Gegensatz dazu gehen die hierarchischen Algorithmen je nach Art von der feinsten oder auch größten Partition zur Erstellung einer Gruppierung aus und stellen diese im Anschluss als Dendogramm dar [Backhaus, Erichson & Weiber 2011].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dem Clusterungsverfahren, unter Berücksichtigung der technischen Umsetzbarkeit des Prognosemodells, eine gewisse Anzahl von Gruppen vorgegeben. Aus diesem Grund ist für die Durchführung der Clusterung der Messgrößen das partitionierende Verfahren gewählt worden, welches sich

hinsichtlich des Fusionierungsalgorithmus weiter unterscheiden lässt. Im folgenden Abschnitt werden zwei Algorithmen näher beschrieben, die für die Durchführung der Clusterung im Rahmen dieser Arbeit in Betracht gezogen wurden.

Dabei werden beide Algorithmen getrennt voneinander durchgeführt, beide wenden jedoch die euklidische Metrik im Rahmen der Berechnung des Distanzmaßes an. Da aber die Stichprobe in ihrem Umfang zu groß ist um im Rahmen des k-Means Algorithmus die Distanzmatrix, die für eine Validierung der Clusterwahl über die Silhlouettendarstellung notwendig ist, zu berechnen, werden für diese Prüfung die Vorteile des Clara- Algorithmus genutzt.

Die euklidische Metrik ergibt sich dabei zu:

$$d(x_{i,\cdot}, x_{j,\cdot}) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \text{ [Keller et al. 2007]}$$

### 2.5.3 k-Means Verfahren

Der k-Means Algorithmus zählt zu den Vertretern des Austauschverfahrens, bei denen die entsprechende Gruppenzugehörigkeit über das Varianzkriterium ermittelt wird. Dabei werden die je nach vorgegebener Anzahl von k-Clustern bestimmten Punkte, die im ersten Schritt als Clusterzentren (centroids) fungieren, zufällig aus der Stichprobengröße eruiert. Im Anschluss daran werden die Fehlerquadratsummen für die einzelnen Cluster eruiert und untersucht, ob durch die Veränderung der Aufteilung der einzelnen Punkte zu den Clustern, das Varianzkriterium innerhalb der Cluster minimiert werden kann (Suche nach einem lokalen Minimum). Die Mittelwerte der Cluster werden (neu) berechnet, ersetzen die zufällig gewählten k-Punkte als Clusterzentren (bzw. im Laufe der Iteration die vorhergehende berechneten Mittelwerte) und der Optimierungsvorgang startet von Neuem. Nach einer angegebenen Anzahl von Iterationen bzw. wenn sich das Varianzkriterium innerhalb der Gruppe nicht mehr minimieren lässt, beendet der Algorithmus den Gruppierungsvorgang und gibt das Ergebnis aus. [Zaki, Wagner 2010]

Die Wahl der optimalen Clusteranzahl erfolgt auf der einen Seite über das Ellbow-Kriterium im Rahmen der Entwicklung der Fehlerquadratsummen über die steigende Clusteranzahl und auf der anderen Seite über den Silhouettenplot (vgl. Abschnitt 2.5.4) der einzelnen Gruppierungsschritte im Rahmen des CLARA-Algorithmus.

### **Elbow-Kriterium- Cluster Validitätsproblem**

Die Bestimmung der „optimalen“ Clusteranzahl beruht auf dem Faktum, dass die resultierende Summe der Fehlerquadrate der einzelnen Cluster mit steigender Anzahl schnell abnimmt. Stellt man dieses Verhalten in einem Diagramm dar, auf dessen

Abszisse die Clusteranzahl und dessen Ordinate die Fehlerquadratsumme aufgetragen werden, so bildet sich die optimale Clusteranzahl genau an jenem Punkt aus, an dem die relative Veränderung der Gradienten ein Maximum annimmt. [Anderberg 1973]

#### 2.5.4 Clustering Large Applications- CLARA

Der von Kaufmann und Rousseeuw (1990) entwickelte Algorithmus wendet die Methode der K-Methode (PAM-Methode) auf eine große Anzahl von Daten an. Dabei zieht er vorab aus dem Rohdatensatz eine angegebene Stichprobe mit dem Umfang  $n$  und entwickelt entsprechend für diese die Clustereinteilung. Im Anschluss daran werden alle Dateneinträge basierend auf dem Prinzip der Minimierung der Fehlerquadratsummen den einzelnen Clustern zugeordnet. Nach der 5. Wiederholung des Gesamtprozesses wird jene Variante mit der geringsten durchschnittlichen Fehlerdistanz als Lösung ausgegeben. [Mercer 2003]

CLARA verwendet im Gegensatz zur PAM- Methoden („Partitioning around Medoids“) nur eine Stichprobe des Datensatzes zur Berechnung der Cluster. Dies ermöglicht den Umgang mit großen Datenmengen, verringert den Rechenaufwand erhöht jedoch auch die Fehleranfälligkeit des Verfahrens, da durch die zufällige Wahl der Stichproben Teile der Datenmenge überrepräsentiert werden können. Die PAM- Methode stellt dabei eine Verallgemeinerung des k-Means Algorithmus dar und ermöglicht unter anderem neben der Ermittlung der euklidischen Distanz auch das Anwenden anderer Distanzmaße. Im Gegensatz zum k-Means Algorithmus werden hierbei keine Mittelwerte als Centroiden berechnet, sondern diese Aufgabe wird von einer zufällig ausgewählten Stichproben übernommen.

Als entsprechendes Gegenstück zum Ellbow-Kriterium, das im Rahmen der k-Means Clustering verwendet wurde, wird nach dem Durchführen des CLARA-Algorithmus für die Bestimmung der optimalen Clusteranzahl die entsprechende Interpretation der Si-Plots herangezogen. Es ist prinzipiell möglich auch für die k-Means Clustering die Distanzmatrix zu berechnen und im Anschluss daran die Ergebnisse zu plotten (Si-Plot). Aufgrund des aktuellen Umfangs des Datensatzes konnte durch das softwarespezifisch beschränkte Speichervolumen des Statistikprogrammes R© die Berechnung nicht durchgeführt werden. Um dennoch die Güte der Clustering beurteilen zu können, ist demnach die zweite Möglichkeit der Clustering über das Verfahren CLARA als ergänzendes Beurteilungskriterium herangezogen worden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Clustereinteilung durch die unterschiedlichen Algorithmen zwischen den beiden Verfahren geringfügig unterschiedlich sein kann.

Der **Silhouetten-Plot** stellt dabei die unterschiedlichen Silhouettenbreiten der einzelnen Cluster dar, die als Gütemaß für die entsprechende Clusterung angesehen werden können. Sie spiegeln dabei die Güte des Proximitätsmaßes innerhalb der einzelnen Cluster wider und definieren sich über:

$n_r$  ... Anzahl der Beobachtung innerhalb des Clusters

$C_r$  ... Cluster r

Für die i-te Beobachtung in einem Einzelcluster  $C_r$ , welcher  $n_r$  Beobachtungen enthält:

$$s(i)=0$$

Sonst:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad a(i) = \sum_{j \in \{C_r / i\}} \frac{d_{ij}}{n_r - 1} \quad b(i) = \min_{s \neq r} \sum_{j \in C_s} \frac{d_{ij}}{n_s}$$

Somit ergibt sich:

$a(i)$  *Mittlere Distanz zwischen der i-ten Beobachtung und Beobachtungen innerhalb des Clusters  $C_r$*

$b(i)$  *Die kleinste mittlere Distanz zwischen der i-ten Beobachtung und Beobachtungen aus einem anderen Cluster als  $C_r$*

$d_{i,j}$  *Die Dissimilarität zwischen der i-ten und der j-ten Beobachtung*

Somit schwankt der Wert für die Silhouettenbreite zwischen -1 und 1, wobei 1 als Optimum angesehen werden kann. Die Silhouettenbreite nimmt genau dann den Wert 1 an, wenn der Cluster mindestens zwei Punkte enthält, die beide die gleichen Koordinaten aufweisen. Negative Si-Werte zeigen an, dass der Cluster Daten enthält, die einem anderen Cluster ähnlicher sind als dem, dem sie eigentlich zugeordnet sind. Somit sind Clusterungen anzustreben, bei denen die Balken den Wert von 1 anstreben. [Greutert 2004]

### 3 Das Prognosemodell

#### 3.1 Begriffsdefinition

Um eine wissenschaftliche Datenauswertung überhaupt erst zu ermöglichen, ist es im Vorhinein notwendig eine einheitliche und in sich schlüssige Begriffsdefinition zu formulieren. Die nachstehende Grafik stellt somit den Versuch dar, die gewählte Begriffsfestlegung, zusätzlich zu den schriftlichen Erläuterung zu veranschaulichen.

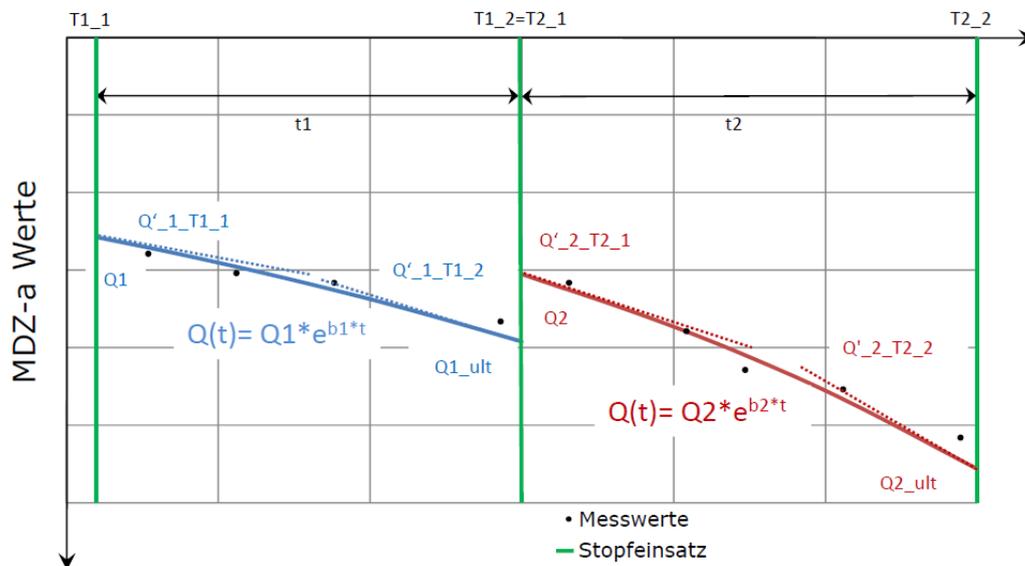


Abbildung 15 grafische Darstellung der Begriffsdefinition

Im Rahmen der Datenauswertung werden jeweils entsprechende Kombinationen aus zwei MDZ-Einsätzen betrachtet. Auf die Verwendung von hoch- bzw. niedergestellten Symbolen ist verzichtet worden, da eine universelle Kompatibilität mit anderen Softwareprogrammen angestrebt wurde. Folgende Symbolik wird im Rahmen der Datenauswertung verwendet:

- Q0 Gleislagequalität, die sich nach einer Gleisneulage und Abschluss der Anfangssetzungen einstellt - Gleisneulagequalität
- Q1 Gleislagequalität zum Zeitpunkt T1\_1 - Raumanfangsqualität
- Q2 Gleislagequalität zum Zeitpunkt T2\_1 - Raumanfangsqualität

Somit ist jede Gleisneulagequalität eine Raumanfangsqualität jedoch nicht jede Raumanfangsqualität eine Gleisneulagequalität. An dieser Stelle sei angemerkt, dass bei einer globalen Betrachtung der Gleislage desselben Querschnitts über die gesamte Nutzungsdauer eine durchgehende Nummerierung der Werte ausgehend von der Gleisneulage anzustreben ist. Um den Lesefluss zu erleichtern wurde jedoch in Folge darauf verzichtet die entsprechende Symbolik über die allgemeine mathematische Schreibweise  $n$  und  $n+1$  darzustellen. Stattdessen beziehen sich die Ziffern 1 und 2 immer auf zwei aufeinander folgende Räume, die über den gemeinsamen Querschnitt und Zeitpunkt  $T1\_2$  und  $T2\_1$  eindeutig miteinander verbunden sind.

Dabei resultieren Qualitätswerte, die mit einem Großbuchstaben abgekürzt werden aus der Regressionsberechnung des Qualitätsverlaufs der Gleislage. Im Gegensatz dazu bezeichnet man die eigentlichen Messpunkte über Kleinbuchstaben ( $q_{n,0}, q_{n,1}, q_{n,3}, \dots$ ).

Der zeitliche Abschnitt zwischen zwei Maschineneinsätzen, in dem auch die zugehörige Regressionskurve berechnet wurde, wird im Rahmen dieser Arbeit als Raum bezeichnet. Dieser Raum erstreckt sich über eine Zeitdauer von  $t_1$  und wird von den Zeitpunkten  $T1\_1$  und  $T1\_2$  begrenzt, wobei jedem dieser Zeitpunkte in eindeutiger Weise ein Maschineneinsatz zugeordnet ist. Generell gilt, dass Zeitpunkte jeweils mit Großbuchstaben und Zeiträume konträr dazu mit Kleinbuchstaben abgekürzt werden, ausgenommen davon sind Abkürzungen in mathematischen Gleichungen.

$T1\_1$	Anfangszeitpunkt des 1. Raums
$T1\_2$	Endzeitpunkt des 1. Raums
$T2\_1$	Anfangszeitpunkt des 2. Raums
$T2\_2$	Endzeitpunkt des 2. Raums
$ME[T]$	Maschineneinsatz zum Zeitpunkt $T$
$Q1\_ult$	Gleislagequalität zum Zeitpunkt $T1\_2$ - Raumendqualität
$Q2\_ult$	Gleislagequalität zum Zeitpunkt $T2\_2$ - Raumendqualität
$Q'_1_{T1\_1}$	Ableitung der Verschlechterungsfunktion der Gleislagequalität im 1. Raum zum Zeitpunkt $T1\_1$
$Q'_1_{T1\_2}$	Ableitung der Verschlechterungsfunktion der Gleislagequalität im 1. Raum zum Zeitpunkt $T1\_2$

## Kapitel Das Prognosemodell

$Q'_2_{T1\_1}$  Ableitung der Verschlechterungsfunktion der Gleislagequalität im 2. Raum zum Zeitpunkt  $T2\_1$

$Q'_2_{T2\_2}$  Ableitung der Verschlechterungsfunktion der Gleislagequalität im 2. Raum zum Zeitpunkt  $T2\_2$

$t1$  definiert den Zeitraum zwischen zwei Maschineneinsätzen, der durch  $T1\_1$  und  $T1\_2$  begrenzt wird.

$t2$  definiert den Zeitraum zwischen zwei Maschineneinsätzen, der durch  $T2\_1$  und  $T2\_2$  begrenzt wird.

$Q\_abs$   $Q2-Q1$

positive  $Q\_abs$ -Werte indizieren eine Erhöhung der Gleislagequalität nach der Durchführung eines Maschineneinsatzes, negative Werte das Gegenteil.

$b\_abs$   $b1-b2$

positive  $b\_abs$ -Werte indizieren eine Verringerung der Verschlechterungsrate nach der Durchführung eines Maschineneinsatzes, negative Werte das entsprechende Gegenteil.

Um die Änderung der Gleislagequalität nach einem Maschineneinsatz bewerten zu können ist es notwendig, die oben angeführten Parameter  $b\_abs$  und  $Q\_abs$  in eine relative Darstellung zu transformieren.

$Q\_rel$   $Q1/Q2$

$Q\_rel$  gibt somit Aufschluss über die prozentuelle Verschlechterung/ Verbesserung der Gleislagequalität nach einem durchgeführten Maschineneinsatz.

$b\_rel$   $b1/b2$

$b\_rel$  gibt somit Aufschluss über die prozentuelle Verschlechterung/ Verbesserung der Verschlechterungsrate nach einem durchgeführten Maschineneinsatz.

MDZ Mechanisierter-Durcharbeitungs-Zug

In weiterer Folge werden somit das Gleisalter (GA), Q1 und b1 als **Eingangsparameter** (Gruppierungsparameter) und Q\_rel, b\_rel, Q\_abs und b\_abs als **Bewertungsparameter** bezeichnet. Die relative Formulierung der Bewertung ermöglicht die Definition eines Grenzwertes von 1, der eine klare Trennung zwischen positiv wirkender und negativ wirkender Instandhaltung realisiert. So steht ein Bewertungswert über 1 für eine Verbesserung des betrachteten Kriteriums.

## 3.2 Zielsetzung

### 1. Darstellung der möglichen Veränderung der Gleislagequalität nach dem Durchführen der Instandsetzungsmaßnahme Stopfen

- Es gilt zu untersuchen, wie sich die Gleislage nach einem Stopfeinsatz im Vergleich zum vorhergehenden Raum entwickelt. Diese Untersuchung legt lediglich dar, welche Möglichkeiten des Gleisverhaltens statistisch gesehen auftreten können, ohne jedoch deren Ursachen genauer zu betrachten.

### 2. Visualisierung des momentan exekutierten Instandhaltungskonzepts

### 3. Formulierungsversuch eines global gültigen Ansatzes

- Definition einer Eingriffsschelle unter Berücksichtigung der momentanen Gleislage.
- Erstellung eines Prognosemodells, für die Vorhersage der Auswirkungen einer geplanten Instandsetzungsmaßnahme vor deren Durchführung.

## 3.3 Zusammenfassung der Abfrageergebnisse und der Datenstruktur

Ziel des nachfolgenden Kapitels ist es, dem Leser/ der Leserin einen Einblick in die Datengrundstruktur zu geben. Sämtliche nachstehenden Auswertungen beruhen dabei auf der **Masterabfrage qry\_001** aus der TUG Datenbank. Diese Abfrage wurde dabei so allgemein wie nötig formuliert, um den ausgelesenen Stichprobenumfang nicht bereits im Vorhinein stark zu reduzieren. Dennoch war es notwendig die Abfrage hinsichtlich einiger Parameter, wie folgend beschrieben zu präzisieren:

- Verschlechterungsraten b1 und b2 >0,
- Maschineneinsatztyp bei T1\_1 und T2\_1="MDZ",
- Einbaujahr Schwelle zwischen 100 und 2000 (100 steht in der Datenbank dabei für Messquerschnitte, deren Einbaujahr unbekannt ist),
- Einbaujahr Schiene zwischen 100 und 2000 (100 steht in der Datenbank dabei für Messquerschnitte, deren Einbaujahr unbekannt ist).

Die Einschränkung hinsichtlich des Einbaujahrs der Schwelle und der Schiene zielt vor allem darauf ab, mögliches Stabilisierungsstopfen nach einer Gleisneulage aufgrund des

bekanntlich stark unterschiedlichen Gleislageverhaltens von der Bewertung auszuschließen. Trotz der allgemein gehaltenen Abfrage kann, verglichen mit den eigentlich durchgeführten Stopfeinsätzen der ÖBB, nur ein kleiner Teil dieser über die TUG Datenbank mit zugehörigem Qualitätsverlauf abgebildet werden (siehe Abbildung 16). Dies lässt sich unter anderem auf die Tatsache zurückführen, dass nur ein Teil der durchgeführten Maschineneinsätze in die Datenbank eingetragen wurden, und eine Berechnung der Verschlechterungsfunktion aufgrund von Messfehlern nicht bei allen eingetragenen Einsätzen möglich ist.

Die ausgelesenen Daten wurden über eine Stichprobe mit dem Umfang von 75 Qualitätswerten und einer zufälligen Verteilung über das gesamte Streckennetz mit der Ausgangsdatenbank auf ihre Richtigkeit überprüft.

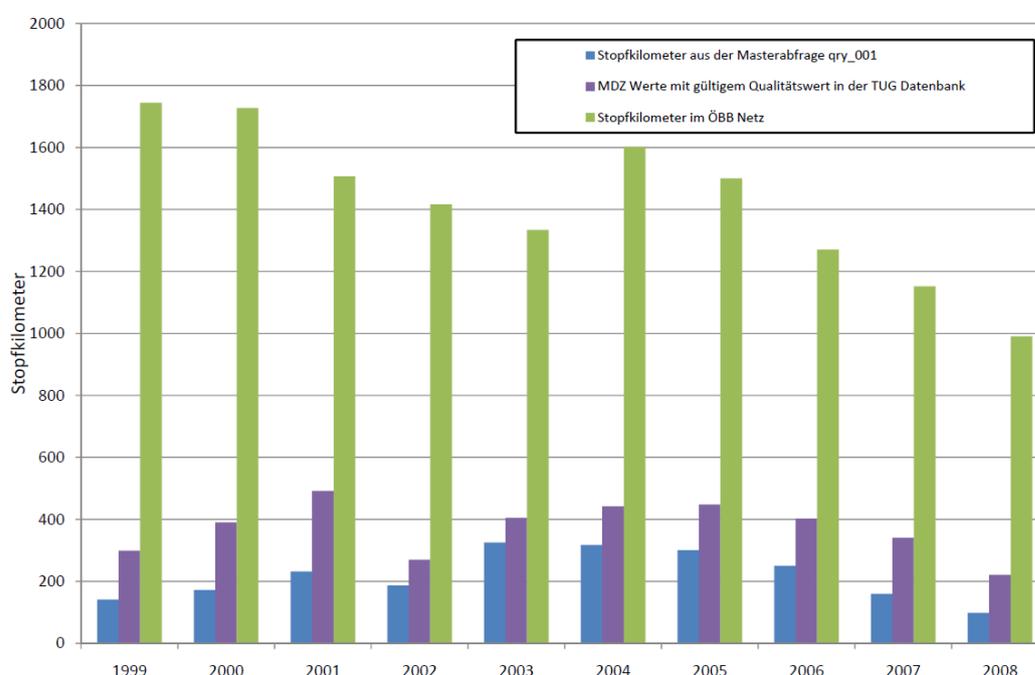


Abbildung 16 Vergleich zwischen den eigentlichen Stopfeinsätzen der ÖBB und der in der Datenbank vorhandenen Messdaten

### 3.3.1 Festlegung der Gruppierungsgrenzen

Betrachtet man die in Abbildung 17 dargestellten möglichen Einflussgrößen auf die Entwicklung der Gleislagequalität über die Nutzungsdauer (bedingt durch das Setzungsverhalten des Schotters), so lässt sich offensichtlich erkennen, dass mit den zur Verfügung stehenden Daten aus der TUG-Datenbank zum momentanen Zeitpunkt nur eine kausalbegründete Prognose der Gleislagequalität möglich ist.

Um dennoch ein entsprechendes Prognosemodell formulieren zu können, ist eine auswirkungsorientierte Verhaltensbeschreibung der Gleislage als Basis herangezogen worden. Dieser Ansatz beruht auf der **technisch vorausgesetzten Korrelation**

zwischen dem Verhalten der Gleislagequalität **in einem Raum** mit dem Verhalten der Gleislage **über die gesamte Nutzungsdauer** (Erinnerungsvermögen des Gleises).

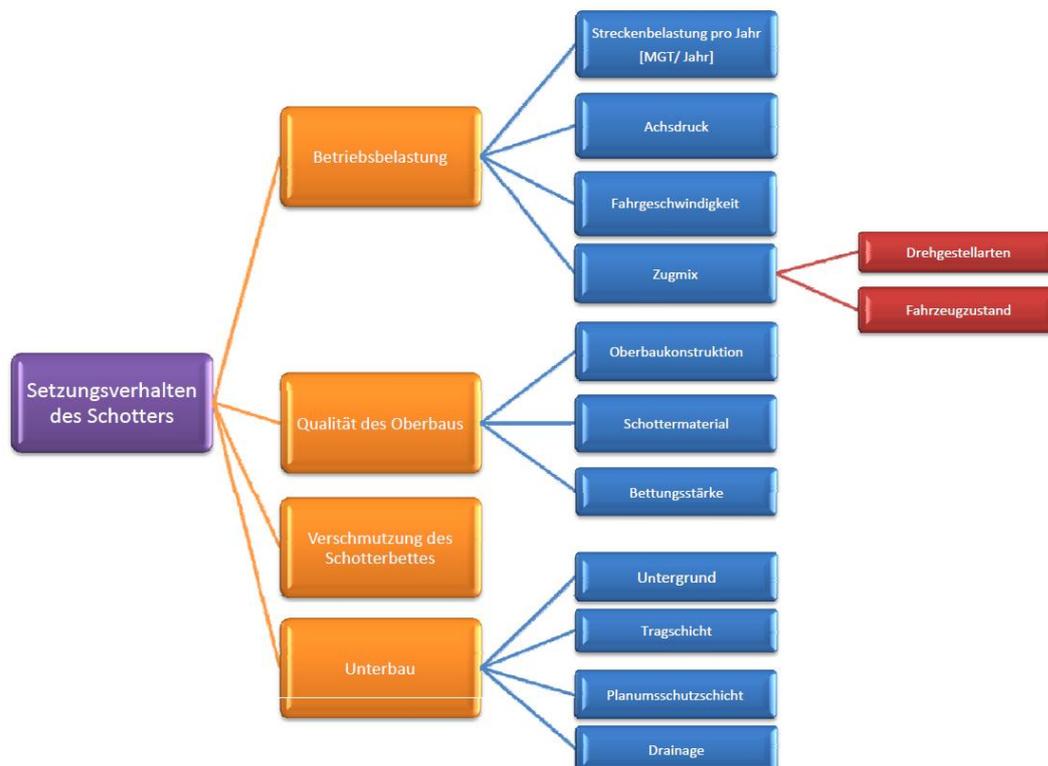


Abbildung 17 Darstellung möglicher Einflussgrößen auf das Setzungsverhalten des Schotters

Um im nächsten Schritt das Verhalten der Gleislagequalität im Untersuchungszeitraum bestmöglich beschreiben zu können, ist eine Clusterung des gesamten Stichprobenumfangs nach Q1 und b1 sowie dem berechneten Gleisalter durchgeführt worden. Das Gleisalter ist dabei als zusätzliches Gruppierungselement gewählt worden, um mögliche Änderungen der Gleislagequalität die zeit- aber nicht zustandsbedingt sind, abzubilden.

Die Clusterung soll eine klare Abgrenzung unterschiedlicher Gleisverhalten und somit die Definition situationsspezifischer Eingriffsschwellen ermöglichen. Dabei berechnet sich das zum Zeitpunkt des Eingriffs vorhandene Gleisalter aus der Differenz zwischen dem Eingriffszeitpunkt (T1\_2) und dem ausgelesenen Schwelleneinbauzeitpunkt.

Der gesamte Gruppierungsprozess gliedert sich dabei in vier aufeinanderfolgende Bearbeitungsschritte:

1. Deskriptive Statistik der Gruppierungsparameter  $Q_1$ ,  $b_1$  und Gleisalter und Wahl der Gruppierungsgrenzen
2. Partitionierte Clusteranalyse
3. Festsetzung der optimalen Clusteranzahl,
4. Zuweisung der Stichproben zu den einzelnen Gruppen.

### 3.3.2 Darstellung Gruppierungsparameter $Q_1$ , $b_1$ und Gleisalter- Wahl der Gruppierungsgrenzen

Zur Erstellung eines auswirkungsorientierten Prognosemodells ist es notwendig über definierte Filterkriterien ( $Q_1$ ,  $b_1$  und das Gleisalter) eine Gruppierungsmöglichkeit zu schaffen, die eine Beschreibung des Gleislageverhaltens über die Nutzungsdauer ermöglicht. Durch die „sinnvolle“ Rundung der Gruppierungsparameter ist eine Zusammenfassung der Werte über Summenbalken durchführbar, die zu einer Visualisierung und somit zu einer leichteren Nachvollziehbarkeit des darauf folgenden Gruppierungsvorgangs beiträgt. Dabei werden  $Q_1$  und das Gleisalter jeweils auf ganze Zahlen und  $b_1$  auf zwei Nachkommastellen gerundet.

Die so durchgeführte Gruppierung der Werte wird nach der Analyse der Datengrundstruktur wieder verworfen und beeinflusst so die nachfolgende statistische Clusteranalyse nur in indirekter Weise über die Einschränkung des Gruppierungsbereichs. Da die einzelnen Gruppierungsparameter jedoch einer mehr oder weniger stark ausgeprägten Streuung unterliegen, ist es notwendig diese zu reduzieren um die Berücksichtigung mögliche Ausreißer bereits im Vorhinein auszuschließen. Ausreißer führen nämlich auf der einen Seite zu einer unnötigen Erhöhung der notwendigen Clusteranzahl und auf der anderen Seite, aus technischer Sicht, zu einer Verzerrung des Prognosemodells. Diese Argumente führten zu einer Begrenzung des Gruppierungsbereichs auf ein Spektrum das **mindestens** den Bereich zwischen den 5% und 95% Quantil liegt. Diese ergibt sich aus der deskriptiven Statistik wie folgt:

	<b>Q1</b>	<b>b1</b>	<b>Gleisalter</b>
$Q_{0,05}$	-17,75	0,037	6
$Q_{0,25}$	-12,84	0,085	11
$Q_{0,50}$	-10,32	0,132	15
$Q_{0,75}$	-8,36	0,206	23
$Q_{0,95}$	-6,10	0,398	32

Tabelle 2 Datenstruktur  $Q_1$ ,  $b_1$  und Gleisalter

Aus Tabelle 2 folgen die Gruppierungsgrenzen:

$Q1_{\text{Oben}} = -6$                        $Q1_{\text{Unten}} = -18$                       (siehe Abbildung 18)

$b1_{\text{Oben}} = 0,03$                        $b1_{\text{Unten}} = 0,40$                       (siehe Abbildung 19)

$t_{\text{Gleisalter\_Oben}} = 6 \text{ a}$                        $t_{\text{Gleisalter\_Unten}} = 32 \text{ a}$                       (siehe Abbildung 20)

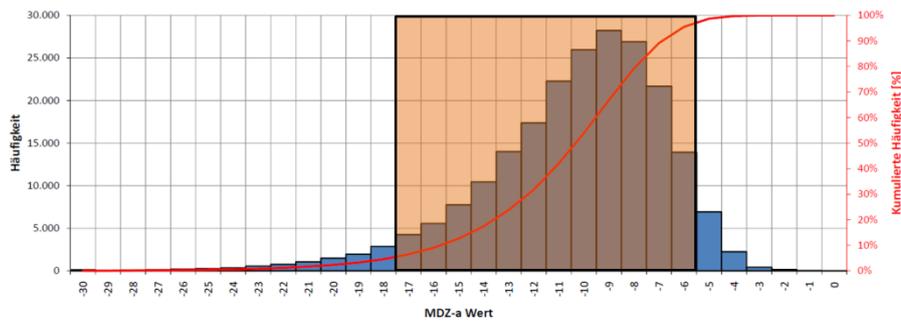


Abbildung 18 Häufigkeitsverteilung der Q1-Werte und Darstellung der Gruppierungsgrenzen

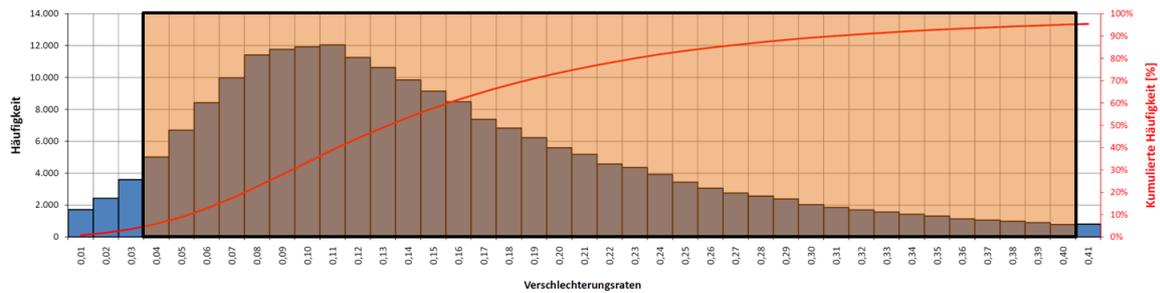


Abbildung 19 Häufigkeitsverteilung der b1-Werte und Darstellung der Gruppierungsgrenzen

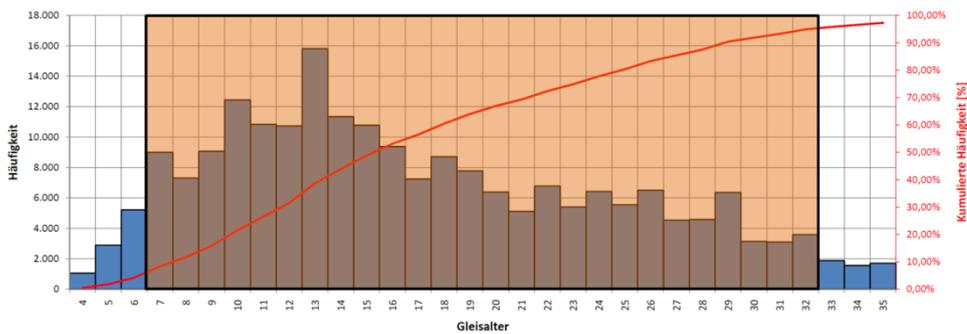


Abbildung 20 Häufigkeitsverteilung des Gleisalters und Darstellung der Gruppierungsgrenzen

Setzt man die Gruppierungsgrenzen nach der oben beschriebenen Reihenfolge, so erhält man eine schrittweise Verringerung des Stichprobenumfangs (siehe Abbildung 21)

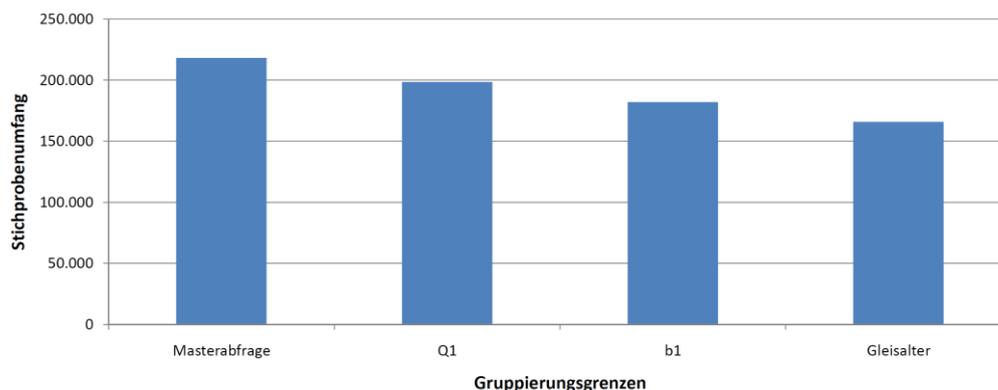


Abbildung 21 Abnahme des Stichprobenumfangs durch das Setzen der Gruppierungsgrenzen

### 3.4 Auswahl der Clusterzentrenanzahl

Die Wahl der geeigneten Anzahl von Clusterzentren erfolgt wie in Kapitel 2.5 beschrieben, basierend auf der Betrachtung der Fehlerquadratsummen, der Silhouettenplots und additiv über eine subjektive Beurteilung der möglichen Umsetzbarkeit der Clusterung im Prognosemodell (siehe Annex 1). Im Rahmen dieser Optimierungsaufgabe wird dabei die Anzahl der Cluster iterativ von 2 bis 8 erhöht und in der oben beschriebenen Art ausgewertet.

#### 3.4.1 Ergebnisübersicht der Wahl der optimalen Clusteranzahl mit Hilfe statistischer Verfahren

Die Untersuchung der Fehlerquadratsummenentwicklung mit wachsender Clusteranzahl, bzw. die relative Veränderung der zugehörigen Gradienten aus den Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 ergibt somit die optimale Clusteranzahl zu:

$$k_n = \frac{y_n - y_{n+1}}{x_n - x_{n+1}} \quad \dots \quad \text{Berechnung des Gradienten für die Clusteranzahl } n$$

Wobei gilt:

$$x_n - x_{n+1} = \text{const.}$$

Daraus folgt:

$$k_{rel} = \frac{k_n}{k_{n+1}} = \frac{\Delta y_n}{\Delta y_{n+1}}$$

Clusteranzahl	Fehlerquadratsumme	rel.Gradient
2	394505	
3	186504	<b>2,66</b>
4	108352	2,03
5	69820	1,85
6	48969	1,63
7	36173	1,50
8	27617	

Tabelle 3 Entwicklung des Gradienten bei der Q1-Clusterung

Clusteranzahl	Fehlerquadratsumme	rel.Gradient
2	328	
3	157	<b>2,60</b>
4	91	2,06
5	59	1,80
6	41	1,67
7	31	1,49
8	23	

Tabelle 4 Entwicklung des Gradienten bei der b1-Clusterung

Clusteranzahl	Fehlerquadratsumme	rel.Gradient
2	1998853	
3	970236	<b>2,42</b>
4	545937	2,05
5	339050	2,20
6	245021	1,40
7	177978	1,63
8	136912	

Tabelle 5 Entwicklung des Gradienten bei der GA-Clusterung

Die oben stehenden Tabellen ergeben somit als optimale Clusteranzahl für Q1, b1 und das Gleisalter drei Gruppen. Die durchgeführte eindimensionale Clusterung der Parameter, die erst im Anschluss daran zu einer **multidimensionalen Gruppierung** zusammengeführt werden soll, ergibt hinsichtlich der Silhouettenbreite kein eindeutiges Ergebnis. Sie zeigt lediglich, dass unabhängig von der gewählten Anzahl der Cluster, ein ungefähr gleichbleibendes Niveau der durchschnittlichen Silhouettenbreite erreicht werden kann.

Die statistische Ermittlung der optimalen Clusteranzahl ergibt mit der Angabe von drei Partitionen als optimale Clusteranzahl eine aus technischer Hinsicht nicht zulässige, zu allgemeine Unterteilung der Gesamtdaten, was eine Überarbeitung der Ergebnisse hinsichtlich anderer Beurteilungskriterien erforderlich macht. Die nachstehende

technische Analyse soll somit die Möglichkeit schaffen die optimale Clusteranzahl des Prognosemodells zu ermitteln.

### 3.4.2 Technische Analyse zur Wahl der optimalen Clusteranzahl

Da sowohl der k-Means als auch der CLARA-Algorithmus zu einer annähernd gleichwertigen Clustereinteilung führen, ist in weiterer Folge ohne Beschränkung der Allgemeinheit die technische Bestimmung der optimalen Clusteranzahl basierend auf den Clusterzentreneinteilung des k-Means-Verfahren durchgeführt worden. In Anbetracht der weiteren Auswertungsmethoden wurde eine annähernde **Gleichverteilung** der Messdaten auf die unterschiedlichen Partitionen als **erste Bedingung** für die Wahl der Cluster vorausgesetzt.

Um eine Beurteilung der Clusteranzahl hinsichtlich dieses Kriteriums durchführen zu können wurde die Aufteilung der Messdaten zu den einzelnen Gruppen über deren steigende Anzahl in den nachstehenden Abbildungen dargestellt.

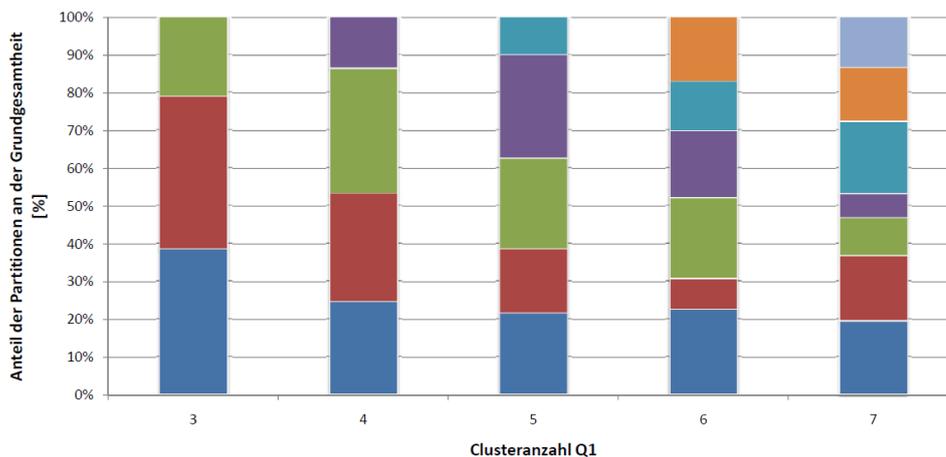


Abbildung 22 Anteil der Q1 Partitionen an der Grundgesamtheit bei steigender Clusteranzahl

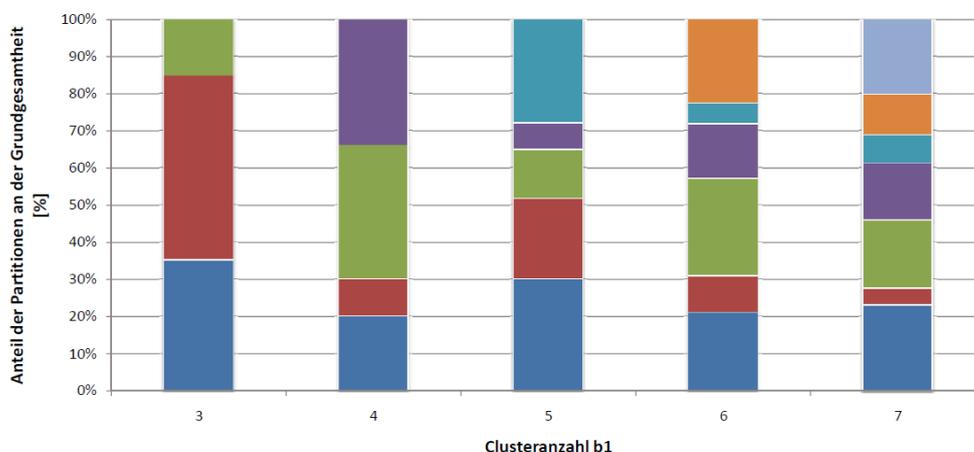


Abbildung 23 Anteil der b1 Partitionen an der Grundgesamtheit bei steigender Clusteranzahl

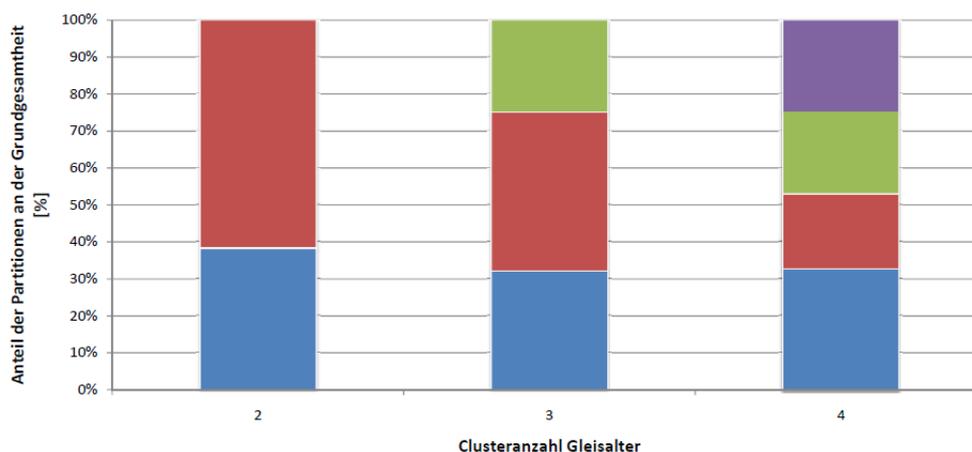


Abbildung 24 Anteil der GA Partitionen an der Grundgesamtheit bei steigender Clusteranzahl

Vor allem die Partitionsentwicklung von  $b_1$  (siehe Abbildung 24) zeigt deutlich, dass eine gleichmäßige Zuteilung der Messdaten zu den einzelnen Clustern nicht realisiert werden kann, was sich in erster Linie auf die starke Streuung der  $b_1$ -Werte (siehe Abbildung 19) zurückführen lässt. Im Gegensatz zeigt die Partitionsentwicklung bei  $Q_1$  und dem Gleislager eine annähernde Gleichverteilung der Daten im Raum von 4 und 5 Clustern.

Als zweite Bedingung für die technische Wahl der optimalen Clusteranzahl ist die stetige Reduktion des Interquartilsbereichs der eigentlich in der Auswertung betrachteten Bewertungsparameter  $Q_{rel}$  und  $b_{rel}$  innerhalb der Partition festgesetzt worden. Diese Reduktion steht in weiterer Folge auch als Indiz für den angenommenen Zusammenhang zwischen der Verbesserung der Gleislagequalität in Abhängigkeit des Ist-Zustandes.

Für die Bewertung wurde der über die Anzahl der zu den Clustern zugeordneten Werten (Anzahl der Werte  $n_i$  des Cluster  $C_j$ ) gewichtete Durchschnitt des Interquartilsbereichs der jeweiligen Clusteranzahl gebildet, und dessen Entwicklung mit steigender Gruppenanzahl betrachtet. Aufgrund des größeren Wertebereichs von  $b_1$  wurde die Untersuchung hinsichtlich der Gruppierung nach diesem Parameter auf 2 bis 8 Cluster ausgeweitet (siehe Abbildung 25).

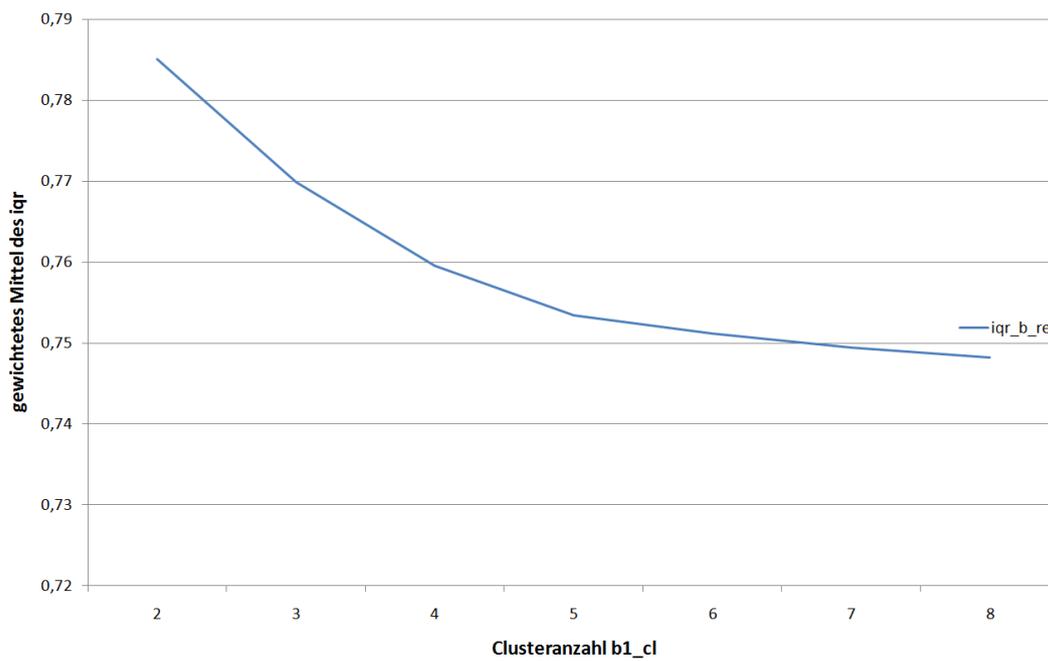
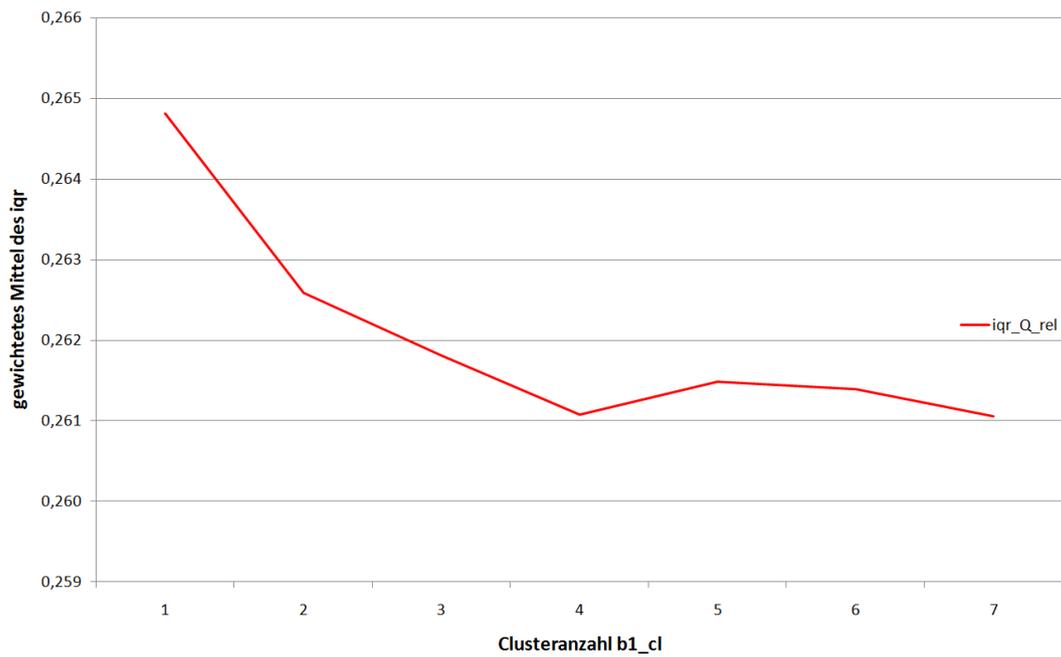


Abbildung 25 Entwicklung des gewichteten mittleren Interquartilsrange über die steigende Clusteranzahl von b1\_cl

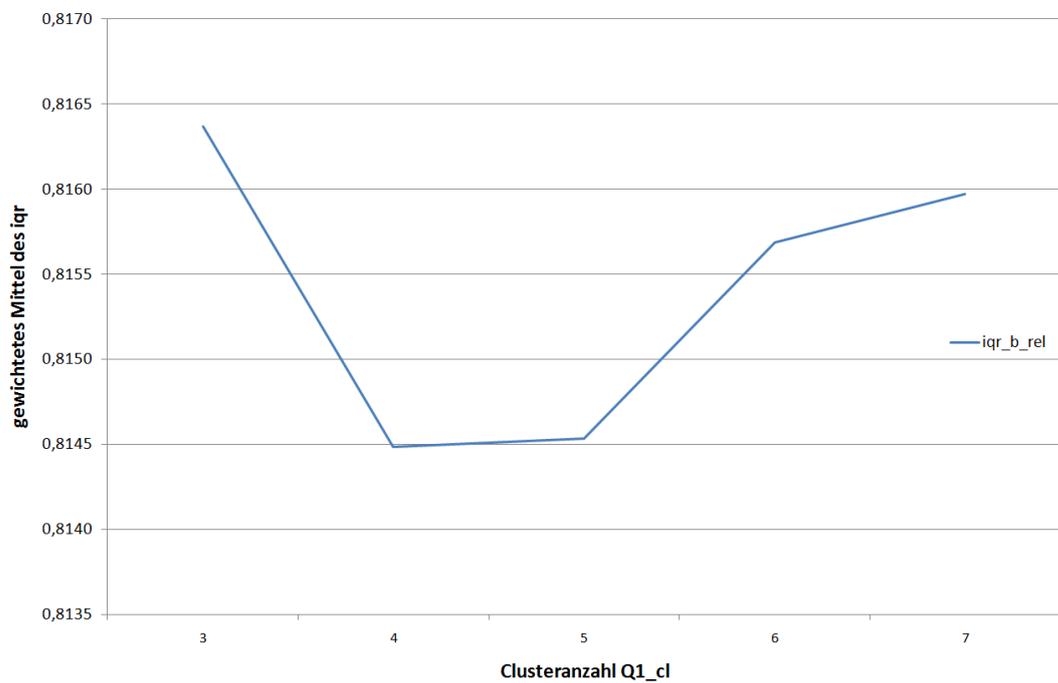
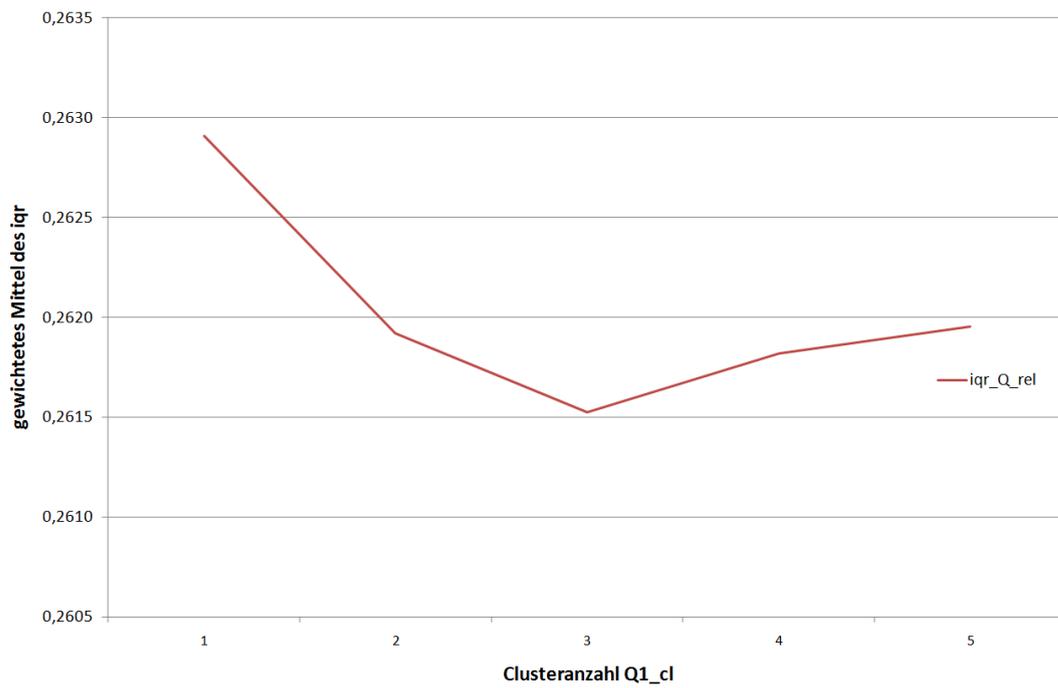


Abbildung 26 Entwicklung des gewichteten mittleren Interquartilsrange über die steigende Clusteranzahl von Q1\_cl

Abbildung 25 und Abbildung 26 zeigen deutlich den vorhandenen wenngleich geringen Einfluss der Clusterung auf den gewichteten mittleren Interquartilsrange. Dies legt den Schluss nahe, dass die vorhandene Streuung der einzelnen Partitionen zusätzlich zu den bereits betrachtete Gruppierungsparametern von einem oder mehreren Parameter(n) abhängt.

Auffallend ist jedoch der Einfluss der angesetzten b-Clusterung auf den Interquartilsrange von  $b_{rel}$ , welcher einen möglichen Zusammenhang zwischen diesen Parametern nahe legt. Der dargestellte Trend der Entwicklung der Interquartilsranges über die steigende Partitionsanzahl ermöglicht zumindest eine erstmalige Eingrenzung der „optimalen“ Clusteranzahl durch die Bestimmung der lokalen Minima der Interquartilsrangeverläufe. Auf die Anführung der Entwicklung der Interquartilsranges über das Gleisalter sei an dieser Stelle auf Grund ihrer Geringfügigkeit verzichtet.

Um weitere Erkenntnisse für die Wahl einer optimalen Gruppierung der Eingangparameter zu erhalten ist im nächsten Bearbeitungsschritt die eindimensionale Clusterung der Merkmale  $Q1$ ,  $b1$  und  $GA$  in unterschiedlichen Variationsmöglichkeiten zu einer multidimensionalen Clusterung zusammengeführt worden.

Dabei wurden nachstehende Fälle, hinsichtlich der Verteilung der Grundgesamtheit in die einzelnen Partitionen genauer untersucht:

	$Q1$	$b1$	$GA$
<b>Kombination 1</b>	4	4	3
<b>Kombination 2</b>	5	5	3
<b>Kombination 3</b>	4	4	4
<b>Kombination 4</b>	5	5	4
<b>Kombination 5</b>	4	5	4
<b>Kombination 6</b>	5	4	4
<b>Kombination 7</b>	5	5	-

Abbildung 27 Übersicht über die geprüften Kombinationsmöglichkeiten mit der zugehörigen Clusteranzahl

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	4107	4562	4011	2787	1494
	<0,14	4993	6265	4542	2987	1715
	<0,21	4308	4748	3683	2378	1215
	<0,29	2663	2850	2451	1871	1117
	<0,40	1522	1612	1537	1100	796

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	3188	4847	3981	2583	1288
	<0,14	2807	4121	4296	3197	1670
	<0,21	1875	2611	2923	2359	1469
	<0,29	1179	1433	1392	1481	1123
	<0,40	583	762	645	558	490

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	2418	4086	3750	2127	1232
	<0,14	2770	3960	3328	2095	1307
	<0,21	1888	2205	1840	1341	934
	<0,29	929	1036	896	938	696
	<0,40	430	360	452	395	214

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	2706	2450	1981	1124	590
	<0,14	3295	3824	2625	1352	711
	<0,21	3050	2971	2119	1180	585
	<0,29	1994	1927	1417	971	533
	<0,40	1145	1082	859	608	376

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	2519	4219	3694	2267	1545
	<0,14	2735	4391	4012	3026	1920
	<0,21	2036	2945	3041	2409	1291
	<0,29	1201	1544	1737	1178	1170
	<0,40	686	860	963	664	607

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	2528	3567	2961	1750	882
	<0,14	2377	3002	2689	2027	937
	<0,21	1471	1865	1787	1419	1016
	<0,29	842	1057	925	659	688
	<0,40	351	509	507	366	328

Q1		-8,3	-10,2	-12,3	-14,8	-18,0
b1	<0,09	1960	3259	3106	1706	997
	<0,14	2163	3129	2840	1324	1124
	<0,21	1514	1783	1499	1070	726
	<0,29	734	791	660	432	545
	<0,40	353	283	305	225	189

Abbildung 28 Aufteilung der Messwerte auf die Partitionen der zusammengeführten multidimensionalen Clusterung (oben: Kombination 2 unten: Kombination 4)

Der exemplarisch angeführte Übergang von drei auf vier Gruppen im Rahmen der Unterteilung des Gleisalters (siehe Abbildung 28) zeigt deutlich eine Anhäufung besonders schlechter Q1 Werte im zweiten GA Cluster im Zuge einer vierstufigen Unterteilung. Ein derartiges Phänomen lässt sich bei einer Unterteilung in drei Cluster nicht mehr erkennen. Es liegt daher nahe, eine **vier stufige Gleisalter Partition** für das Prognose Modell zu wählen (siehe Abbildung 29).

Mögliche Begründungen für die Anhäufung der besonders schlechten Q1 Werte im zweiten Cluster der 4 stufigen GA Partition liegen entweder im höheren

Stichprobenumfang im Vergleich zu den anderen Gruppen oder beruhen auf unbekanntem, technischen Ursachen. Die Argumentation der Anhäufung der schlechten Q1 Werte über den höheren Stichprobenumfang, wurde durch einen Vergleich mit der Werteverteilung bei einer drei stufigen Partition überprüft, und als nicht zulässig bewertet, da sich die Werte bei vier Clustern regelmäßiger auf die einzelnen Gruppen aufteilen, als dies bei einer Unterteilung mit drei Clustern der Fall ist.

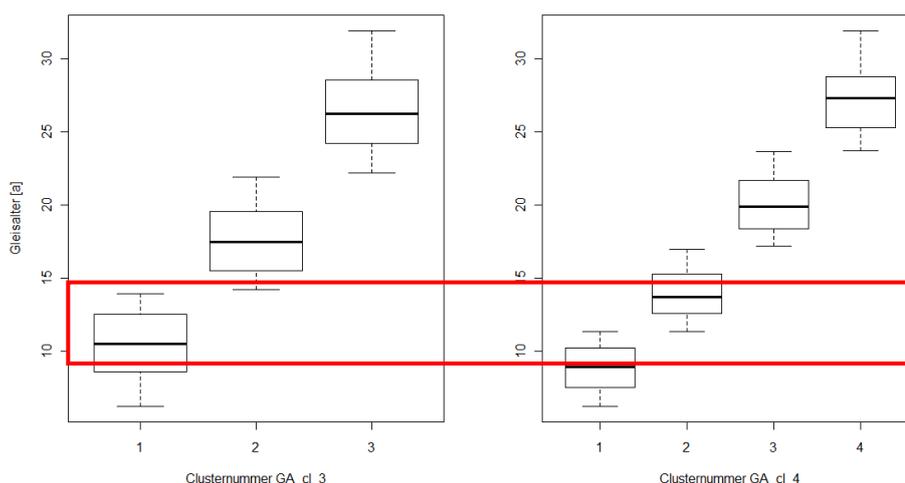


Abbildung 29 Vergleich zwischen der Gleisalterclustering mit 3 (links) und 4 (rechts) Gruppen

Die genauen Analysen der Wertezusammensetzung der einzelnen Cluster ergeben, dass vor allem in den ersten beiden Clustern vermehrt Betonschwellen in der Kombination mit dem Schienenprofil 60E1 und 54E2, sowie höhere Belastungsklassen, in die Bewertung des Qualitätsverhaltens Eingang finden.

Aus dieser Erkenntnis jedoch weitere Schlüsse über die Begründung der Häufung besonders schlechter Q1 Werte im zweiten Cluster des Gleisalters zu ziehen ist nicht zulässig.

Sehr wohl lässt sich daraus jedoch erkennen, dass eine einseitige Clusterung hinsichtlich des Gleisalters ohne Berücksichtigung von Q1 und b1 als nicht zulässig bezeichnet werden kann (siehe Annex 5 und Annex 6).

Weiters zeigt die Auswertung der Kombinationen, dass bei einer Erhöhung der Clusteranzahl von Q1 und b1 auf 5, sich immer mehr Gruppen einem kritischen Wert von minimal 500 Messdaten innerhalb des Clusters nähern, der für eine Vorhersage eines Trends als Minimum subjektiv festgelegt wurde. Unter Berücksichtigung der Streuungen der Parameter Q1 und b1 ist somit eine Clusteranzahl von 4 für Q1 und 5 für b1 (aufgrund der höheren Streuung) festgesetzt worden.

Dieser Unterschied begründet sich in erster Linie auf den im Vergleich zu Q größeren Wertebereich, den die einzelnen b Werte einnehmen, wodurch eine detailliertere Unterteilung der b1 Werte als sinnvoll erachtet wurde. Somit ergeben sich die Gruppierungsgrenzen der gewählten Kombination 5 aus dem statistischen Clusteralgorithmus (k-Means) unter Vorgabe der Anzahl der Partitionen wie folgt:

GA	1	2	3	4
Min	6,2	11,3	17,2	23,7
0,25	7,5	12,6	18,4	25,3
Median	8,9	13,7	19,9	27,3
0,50	10,2	15,3	21,7	28,8
Max	11,3	17,0	23,7	32,0

Q1	1	2	3	4
Min	-8,8	-11,2	-14,1	-18,0
0,25	-8,3	-10,6	-13,2	-16,5
Median	-7,7	-10,0	-12,4	-15,5
0,50	-7,0	-9,4	-11,8	-14,7
Max	-6,0	-8,8	-11,2	-14,1

b1	1	2	3	4	5
Min	0,030	0,091	0,145	0,208	0,289
0,25	0,052	0,103	0,157	0,223	0,308
Median	0,067	0,116	0,171	0,241	0,331
0,50	0,079	0,129	0,188	0,262	0,359
Max	0,091	0,145	0,208	0,289	0,400

Abbildung 30 Resultierende Gruppierungsgrenzen der Kombination 5

Um in weiterer Folge eine eindeutige Identifizierung der einzelnen Gruppierungselemente in der Clusterung zu ermöglichen ist folgende Nomenklatur festgelegt worden:

- Gp           ...       Gruppierungsparameter
- Gp\_cl\_n       ....       n-fache Clusterung des angegebenen Gruppierungsparameters
- C<sub>Gp</sub>           ...       Clusternummer des angegebenen Gruppierungsparameters
- C<sub>Q1\_Cb1\_CGA</sub> ...       Multidimensionale Clusternummer

### 3.5 Globales Gleisverhalten GGV

Zentraler Bestandteil des nachfolgenden Kapitels ist die Beschreibung der Gleislagequalitätsentwicklung nach dem Durchführen eines MDZ-Einsatzes. Dies ist der Versuch, eine allgemeine Zustandsentwicklung zu formulieren, welche sich im Gegensatz zu einer filterspezifischen Auswertung auf eine netzweite bzw. abschnittsgetreue Analyse stützt und somit das Gleisverhalten lediglich in seiner globalen Auswirkungen berücksichtigt. Das GGV ermöglicht das Erkennen möglicher Zusammenhänge zwischen

einzelnen Parametern und schafft einen raschen Überblick über die vorhandene Bandbreite der Bewertungsparameter.

Die Darstellung des Zusammenhangs zwischen  $Q_{abs}$  und  $b_{abs}$  im Rahmen eines Scatterplots lässt unvermeidlich erkennen, dass sowohl Verschlechterung als auch Verbesserung beider Bewertungsparameter in allen Kombinationen zueinander möglich ist (siehe Abbildung 31).

Das Diagramm teilt sich somit in vier unterschiedliche Quadranten, die über die Bewertung des entsprechenden Gleislageverhaltens der einzelnen zugeordneten Messdaten definiert werden. Dabei stellen jeweils die obere (für  $Q_{abs}$ ) und rechte (für  $b_{abs}$ ) Koordinatenhälfte jenen Bereich dar, in dem es zu einer **absoluten Hebung** des Bewertungsparameters (Verbesserung) kommt. Über die Messdaten in den einzelnen Koordinatenhälften bzw. den daraus resultierten Boxplotdarstellungen soll ein Einblick in die vorliegende Datenstruktur und durch die Farbkodierung eine schnellere Interpretation dieser ermöglicht werden.

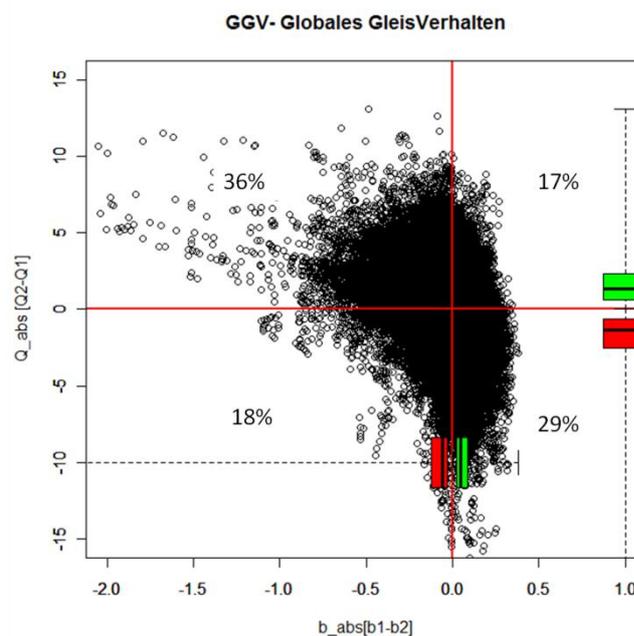


Abbildung 31 GGV- Zusammenhang zwischen  $Q_{abs}$  und  $b_{abs}$

Übergeführt in ein entsprechendes Balkendiagramm, das die prozentuelle Häufigkeit der vier Kombinationsmöglichkeiten der Bewertungsparameter zeigt, lässt sich somit darstellen, dass in 83% der Fälle die Instandhaltung unter Inkaufnahme der Verschlechterung von zumindest einem der Bewertungsparameter exekutiert wird (siehe Abbildung 32).

Eine Überprüfung der Stopfarbeiten hinsichtlich des Umfangs ihrer Auswirkungen macht es notwendig, die vorab absolut ermittelte Änderung der Bewertungsparameter in eine, wie im Kapitel 3.1 beschriebene, relative Darstellung überzuführen (siehe Annex 10). Eine nicht quadrantenspezifische Betrachtung der Werte ergibt somit bei der Berechnung der Interquartilsbereiche einen dreimal höheren Wert des  $b\_rel$  im direkten Vergleich mit  $Q\_rel$ . Diese Auswertung verdeutlicht den signifikanten Einfluss der Stopfarbeiten auf die aktuell im Gleis vorliegende Verschlechterungsrate, zusätzlich zu dem bereits bekannten Einfluss auf die entsprechende Gleislagequalität. Der Vergleich zwischen den beiden Boxplots von  $Q\_rel$  und  $b\_rel$  zeigt diesen Umstand deutlich (siehe Abbildung 33) und legt dar, dass  $b\_rel$  mit einem Median von 0,94 und  $Q\_rel$  mit einem Median von 1,01 um den angestrebten Grenzwert von 1 (ergibt sich aus der relativen Betrachtung der Bewertungsfaktoren) streuen.

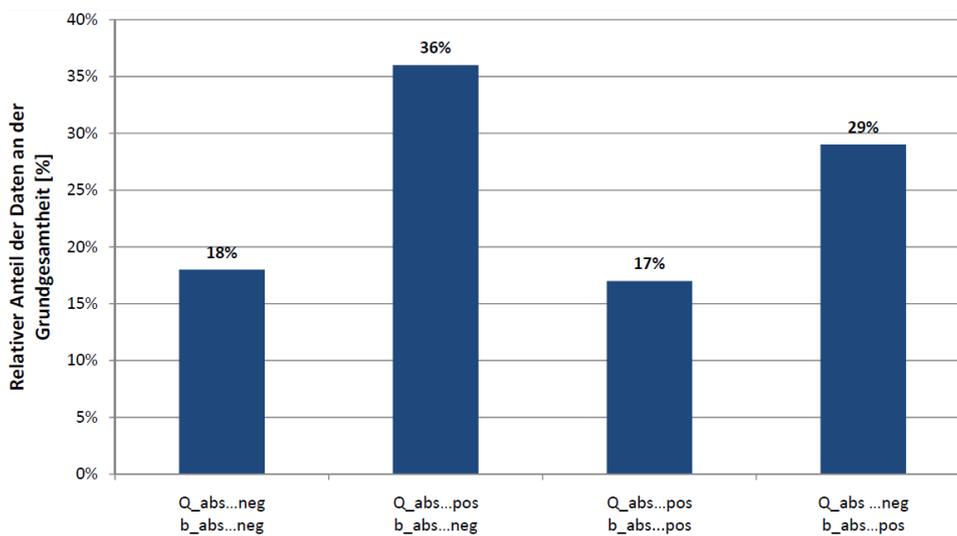


Abbildung 32 Prozentuelle Häufigkeit der Kombinationsmöglichkeiten an der Grundgesamtheit

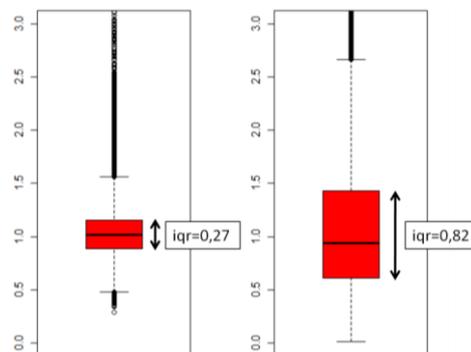


Abbildung 33 globaler Vergleich zwischen  $Q\_rel$  (links) und  $b\_rel$  (rechts)

Im zweiten Teil der Analyse des GGV gilt es zu untersuchen wie sich der Einfluss der Gruppierungsparameter  $Q_1$  und  $b_1$  auf die Bewertungsparameter darstellt, nachdem eine einseitige Betrachtung über das GA bereits als nicht zielführend beurteilt wurde.

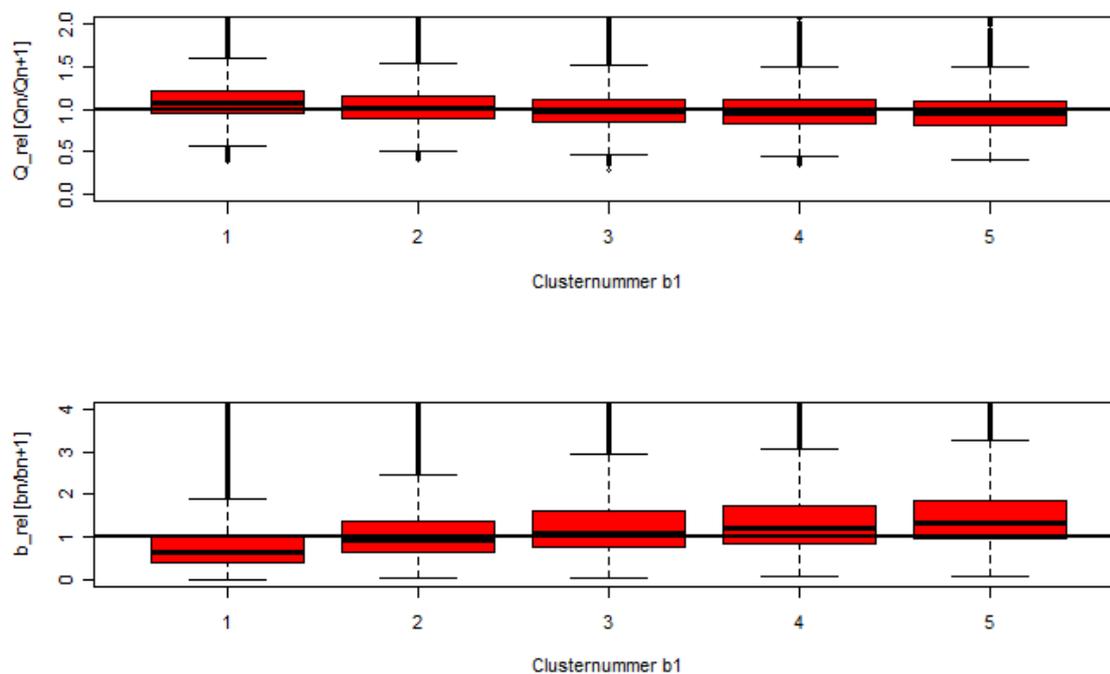


Abbildung 34 Entwicklung der Bewertungsparameter über die gesetzte Clusterung  $b_1$

Aus der Entwicklung der Bewertungsparameter über die  $b_1$  Gruppierungen (1 bis 5) lassen sich folgende Schlussfolgerungen aus Abbildung 34 ableiten:

1. Die beiden Bewertungskriterien folgen mit schlechter werdendem  $b_1$  gegenläufigen Trends. Während bei gutem  $b_1$  (Gruppe 1) eine Verbesserung der absoluten Gleislagequalität (gegenüber der Raumanfangsqualität des vorhergehenden Zyklus) erzielt werden kann, ist dies in äquivalenter Art für die Verschlechterungsrate nur in seltenen Fällen möglich.
2. Während sich  $Q_1$  tendenziell dem Grenzwert von 1 annähert erreicht  $b_{rel}$  bei schlechten  $b_1$  Werten Größen, die mit einem Median von 1,31 weitaus höher liegen.
3. Bei einem  $b_1$  zwischen 0,15 und 0,21 (Clusternummer 3) erreichen beide Bewertungsparameter mit ihrem Median annähernd den Grenzwert von 1.

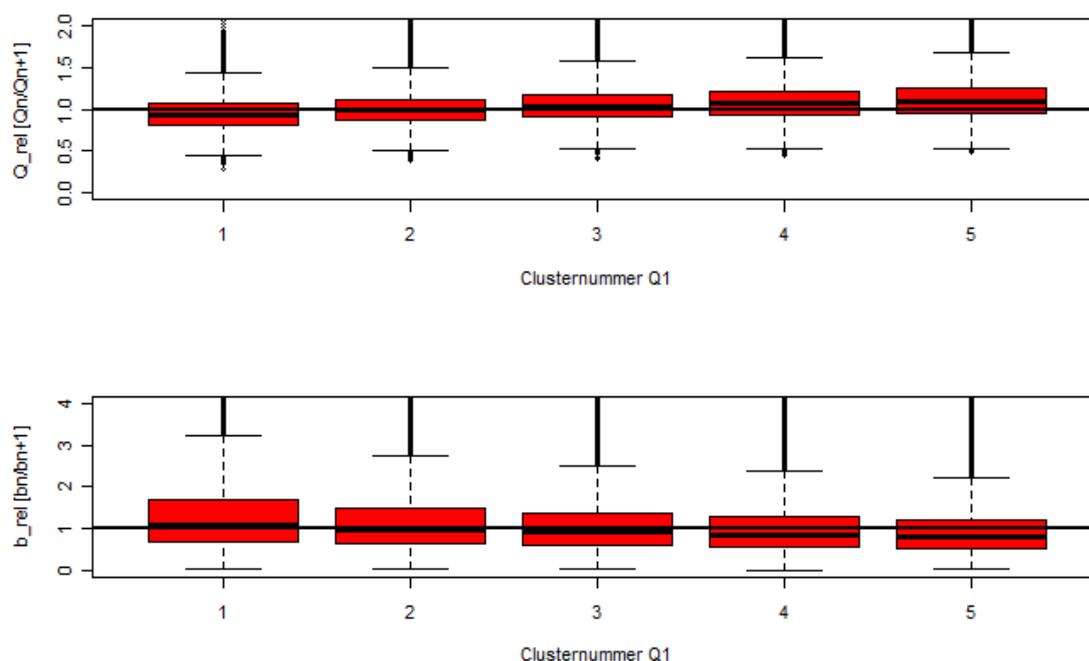


Abbildung 35 Entwicklung der Bewertungsparameter über die Clusterung Q1\_cl\_5

Äquivalent folgt aus der Entwicklung der Bewertungsparameter über die Q1 Gruppierung (Gruppe 1 bis 5):

1. Der gegenläufige Trend der beiden Bewertungsparameter, der bereits bei der Clusterung nach  $b_1$  festgestellt wurde, lässt sich auch in der Q1 Gruppierung in ähnlicher Form wiedererkennen.
2. Im zweiten Cluster von Q1 ( $-8,3 > Q_1 > -10,2$ ) erreichen beide Bewertungsparameter annähernd den Grenzwert von 1.
3. Je schlechter der Q1-Wert ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit der Verbesserung der Gleislagequalität, während hingegen das Verbesserungspotential der Verschlechterungsrate mit sinkendem Q abnimmt.

Diese Auswertungen spiegeln einzig und allein einen globalen Trend wider. Um Erkenntnisse für das Prognosemodell zu erlangen ist es jedoch unabdingbar die Filterbedingungen in ihrer Kombination zu betrachten. Resümierend kann jedoch festgehalten werden, dass die Existenz eines **Zusammenhangs** zwischen den Gruppierungs- und Beurteilungsparametern als **augenscheinlich** bezeichnet werden kann.

### 3.6 Filterspezifische Auswertung

Nachdem im vorhergehenden Kapitel der Versuch angestellt wurde das Gleisverhalten global zu beschreiben, stellt sich nun die Aufgabe das Gleisverhalten über die einzelnen Filterkriterien aus dem Gruppierungsprozess zu analysieren. Dabei wird in erster Linie die Entwicklung der Bewertungsparameter clusterspezifisch über den angewandten Stopfzyklus betrachtet (siehe Abbildung 36).

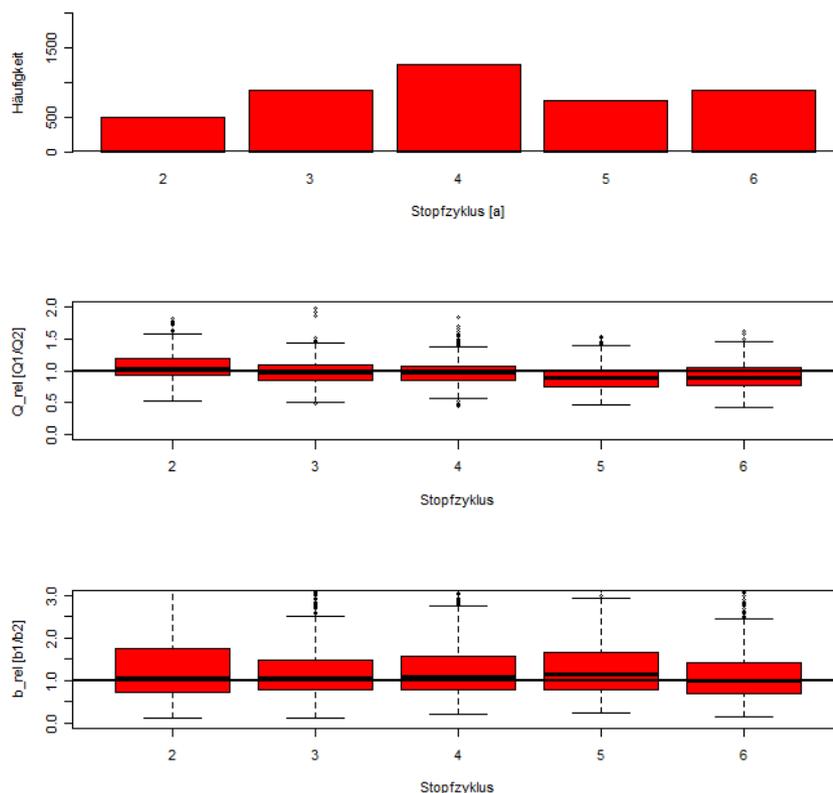


Abbildung 36 Beispielhafte Auswertung der Entwicklung der Bewertungsparameter über den Stopfzyklus

Der Stopfzyklus definiert sich dabei jeweils über den exekutierten Raumabstand  $t_1$ , der auf den nächsten ganzzahligen Jahreswert aufgerundet wird. Beispielhaft ergibt sich somit aus einem Raumabstand  $t_1=3,2$  Jahre ein Messwert der dem Stopfzyklus vier Jahren zugeordnet wird. Dieser Wert beschreibt eindeutig das 4. Jahr nach der vorhergehenden Instandsetzungsmaßnahme, für den sich die entsprechenden Bewertungsparameter definieren lassen. Diese Intervallskala unterteilt sich jeweils in Abstände von einem Jahr und ist nach unten von Werten kleiner zwei Jahren und nach oben von Werten  $> 6$  Jahren begrenzt (dies ergibt sich aus der Werteverteilung der Instandhaltungszyklen). Die oben beschriebene Einteilung folgt aus der Verteilung der praktizierten Stopfzyklen basierend auf den vorhandenen Messdaten (siehe Abbildung 37).

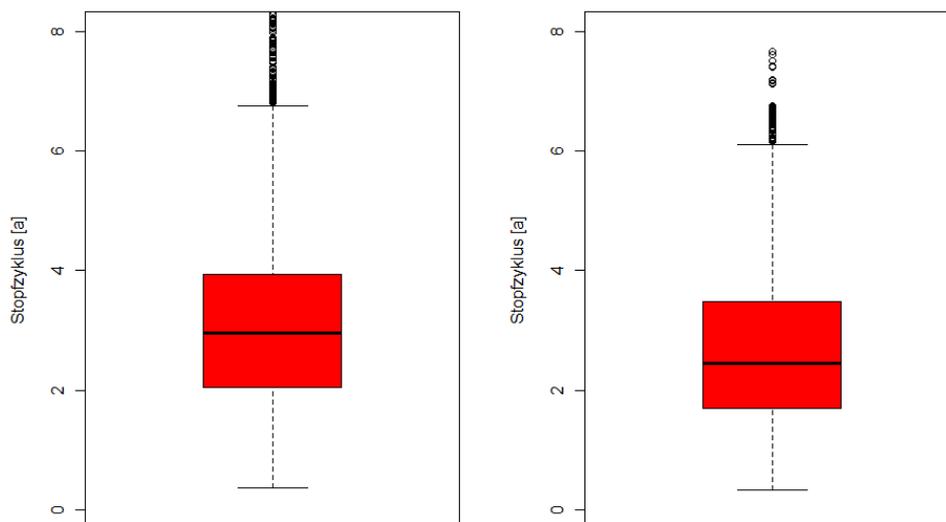


Abbildung 37 Verteilung der Stopfzyklen t1 (links) und t2 (rechts)

Im Rahmen der Auswertung der einzelnen Clusterkombinationen stellt sich sehr bald nachfolgende Problemstellung. Solange sich die Bewertungsparameter eindeutig oberhalb und unterhalb des Grenzwertes bewegen ist eine Definition des optimalen Stopfzykluses bzw. eine Bewertung der Maßnahme möglich. Probleme entstehen jedoch bei Kombinationen, die beide Bewertungsparameter (abhängig vom jeweiligen Stopfzyklus) oberhalb bzw. um den Grenzwert besitzen und somit eine Bewertung zwischen zwei positiv-wirkenden Instandhaltungsmaßnahmen notwendig machen. Besitzt so z.B. ein Stopfzyklus nach 3 und 4 Jahren Bewertungsparameter, die oberhalb des Grenzwertes liegen, ist ein Eruiieren des optimalen Eingriffszeitpunktes nur im Zuge einer näheren Betrachtung möglich. Im Zuge dieser Betrachtung ist es somit erforderlich anhand der genauen Eingangsdaten  $Q_1$  und  $b_1$  ein mögliches Gleisverhalten für unterschiedliche Stopfzyklen zu simulieren, um im Anschluss daran die geeignete Variante zu ermitteln.

Trotz der beschriebenen Problematik ist versucht worden entsprechende Standardzyklen abzuleiten (siehe Abbildung 38). Dabei sind folgende subjektive Kriterien für deren optische Ermittlung festgelegt worden:

1. Weist einer der beiden Gruppierungsparameter ( $Q_1$  und  $b_1$ ) ein besonders schlechtes Niveau auf, so ist der Stopfzyklus unter Beachtung einer maximalen Verbesserung desselbigen gewählt worden.
2. Nehmen beide Bewertungsparameter über zwei Stopfzyklen annähernd den gleichen Medianwert an, so wurde in erster Linie jener gewählt, dessen iqr kleiner ausgeprägt ist, bzw. dessen Quartilswert über dem Grenzwert liegt. Ähneln sich die Bewertungsparameter auch hinsichtlich ihres iqr, so erhält jener den Vorzug, dem ein größerer Stichprobenumfang zugeordnet ist.

3. Erreichen nicht zumindest 2 unterschiedliche Stopfzyklen einen Stichprobenumfang von über 500, ist keine Aussage über das Gleisverhalten getroffen worden.
4. Für sämtliche b-Werte ( $b_1 < 0,09$ ), existiert keine Möglichkeit das  $b_2$  gegenüber dem  $b_1$  zu heben. Die angegebenen Werte für den Stopfzyklus stehen somit nur für Werte, an denen die Verschlechterung ein Minimum annimmt.

Die „optimalen“ Stopfzyklen, stellen somit nur einen Versuch dar die Ergebnisse der Auswertungen kompakt zusammenzufassen. Vor einer pauschalen Anwendung in der Praxis ohne vorhergehende Detailanalyse sei an dieser Stelle noch einmal ausdrücklich gewarnt. Außerdem umfassen die Daten in der TUG-Datenbank lediglich Messdaten zwischen 1999 und 2010, weshalb allein auf Grund der angewendeten Abfragestruktur (siehe 3.3) es nicht möglich ist Stopfzyklen >6 Jahre jahresgetreu fundiert zu beurteilen.

Gleisalter_1 6,2-11,3				
b1 \ Q1	>-8,8	>-11,2	>-14,1	>-18
<0.09	3	5	3	kA
<0.14	4,5	4,5	4,5	kA
<0.21	2,5	2	3	kA
<0.29	2	2	3	kA
<0.40	2	2	kA	kA

Gleisalter_2 11,3-17,2				
b1 \ Q1	>-8,8	>-11,2	>-14,1	>-18
<0.09	3	5	5	3
<0.14	3	4,5	2	3
<0.21	3	2	2	3
<0.29	3	2,5	3	2,5
<0.40	kA	kA	2	kA

Gleisalter_3 17,2-23,7				
b1 \ Q1	>-8,8	>-11,2	>-14,1	>-18
<0.09	4	3	4	kA
<0.14	2	2	4	kA
<0.21	2	2	4	kA
<0.29	2	2	kA	kA
<0.40	kA	kA	kA	kA

Gleisalter_4 23,7-32,0				
b1 \ Q1	>-8,8	>-11,2	>-14,1	>-18
<0.09	4	5	5	kA
<0.14	5	4	4	kA
<0.21	4	2	2,5	kA
<0.29	kA	kA	kA	kA
<0.40	kA	kA	kA	kA

Abbildung 38 Aus der filterspezifischen Auswertung abgeleitete Standardzyklen

### 3.7 Detailanwendung des Prognosemodells

Anhand eines aus der Datenbank bezogenen realen Beispiels, wird im nachfolgenden Kapitel der Versuch angestellt, die in 3.6 angedeutete Detailanalyse zu verdeutlichen. Da entsprechende Daten vor und nach der durchgeführten Instandhaltung existieren, ist somit eine stichprobenartige Validierung des Prognosemodells möglich. Der gesamte Prognoseprozess verläuft dabei anhand eines vordefinierten Schemas ab, das sich aus folgenden Schritten zusammensetzt:

#### **Schritt 1:** *Erhebung der momentan im Gleis vorliegenden Situation*

Dies schließt die Erhebung der für die Ermittlung der vorliegenden Gruppierungsparameter notwendigen Eingangsgrößen ( $Q_{1,b1}$  und GA) genauso ein, wie zusätzliche Informationen, die im Rahmen der Instandhaltungsplanung als notwendig erscheinen könnten (Alter der Komponenten, VzG, mögliche Geschwindigkeitsreduktionen, Belastung, Zugzahlen, etc.). Dabei wird der ausgesuchte Streckenabschnitt über seine ganze Länge geprüft, wodurch eine gesamtheitliche Klassifizierung der Qualität ermöglicht werden soll. Bei vorhandenen Anomalien der Gleislagequalität (z.B. Einzelfehler), die im betrachteten Querschnitt auftreten, ist deren Herkunft vorab zu untersuchen. Sie werden bei der Beschreibung der mittleren Gleislagequalität vernachlässigt.

#### **Schritt 2:** *Zuordnung der vorliegenden Situation zu den entsprechenden Klassifizierungsmerkmalen.*

#### **Schritt 3:** *Prognose der resultierenden Gleislagequalität für unterschiedliche Stopfzyklen.*

#### **Schritt 4:** *Bewertung der einzelnen Prognose- Eruiierung des optimalen Stopfzykluses.*

Der oben vorgestellte Prozessablauf wird nun anhand eines zufällig ausgewählten Querschnitts aus der TUG-Datenbank (betrachtet wird dabei im Rahmen dieser Arbeit in idealisierter Form ein 5 Meter Abschnitt, und nicht wie oben beschrieben die einheitliche Bewertung über den gesamten Stopfabschnitt).

Abschnitt	008
Gleis	1
Kilometer	149.090
Lokation	Marein St. Lorenzen- Kapfenberg
Schwelleneinbaudatum	1994
Schieneneinbaudatum	1994
Schwellenart	Beton
Schienenprofil	60 E1
Verkehrsbelastung	47.482 to/t
VzG	150 km/h
<hr/>	
Q1	-9,8
b1	0,093
T1_1	2000,644
geplanter Eingriffszeitpunkt	2005
Gleisalter	11
<hr/>	
Q1_cl	2
b1_cl	2
GA_cl	1
Clustername	2_2_1
<hr/>	

Abbildung 39 Eingangsdaten für das Prognosemodell

Aus den entsprechenden Entwicklungen der Bewertungsparameter über die Stopfzyklen (Siehe Abbildung 36) ergeben sich folgende Werte der einzelnen Boxplots des Clusters 2\_2\_1:

Stopfzyklus [a]	3	4	5	Stopfzyklus [a]	3	4	5
3. Quartile	0,687	0,653	0,721	3. Quartile	0,920	0,978	0,874
<b>Median</b>	<b>0,918</b>	<b>0,936</b>	<b>0,976</b>	<b>Median</b>	<b>1,039</b>	<b>1,086</b>	<b>0,999</b>
1. Quartile	1,373	1,304	1,438	1. Quartile	1,166	1,215	1,116
Anzahl Messwerte	1394	1202	697	Anzahl Messwerte	1394	1202	697

Abbildung 40 Resultierende Bewertungsparameter  $b_{rel}$  (links) und  $Q_{rel}$  (rechts) für die Stopfzyklen 3;4 und 5 Jahre

Aus Abbildung 41 ergibt sich bei näherer Betrachtung als bestmögliche Variante für die Durchführung der Instandsetzung das vierte Jahr nach der zuletzt getroffenen Maßnahme (T1\_1). Dabei werden die einzelnen Quartilswerte der Bewertungsparameter (z. B.  $Q_{rel,0,25}$  und  $b_{rel,0,25}$ ) miteinander kombiniert und im Anschluss daran über einen virtuellen Betrachtungszeitraum aufgetragen.

Überlagert man nun den bereits durchgeführten Instandhaltungsprozess aus der TUG Datenbank mit dem prognostizierten Verhalten, so erkennt man, dass die sich tatsächlich eingestellte Gleislage im Interquartilsbereich der Vorhersage zu liegen kommt (siehe Abbildung 42). Des Weiteren erlaubt das Prognosemodell die Vorhersage, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 75% die Gleislagequalität einen Wert über der unteren punktierten Linie annimmt.

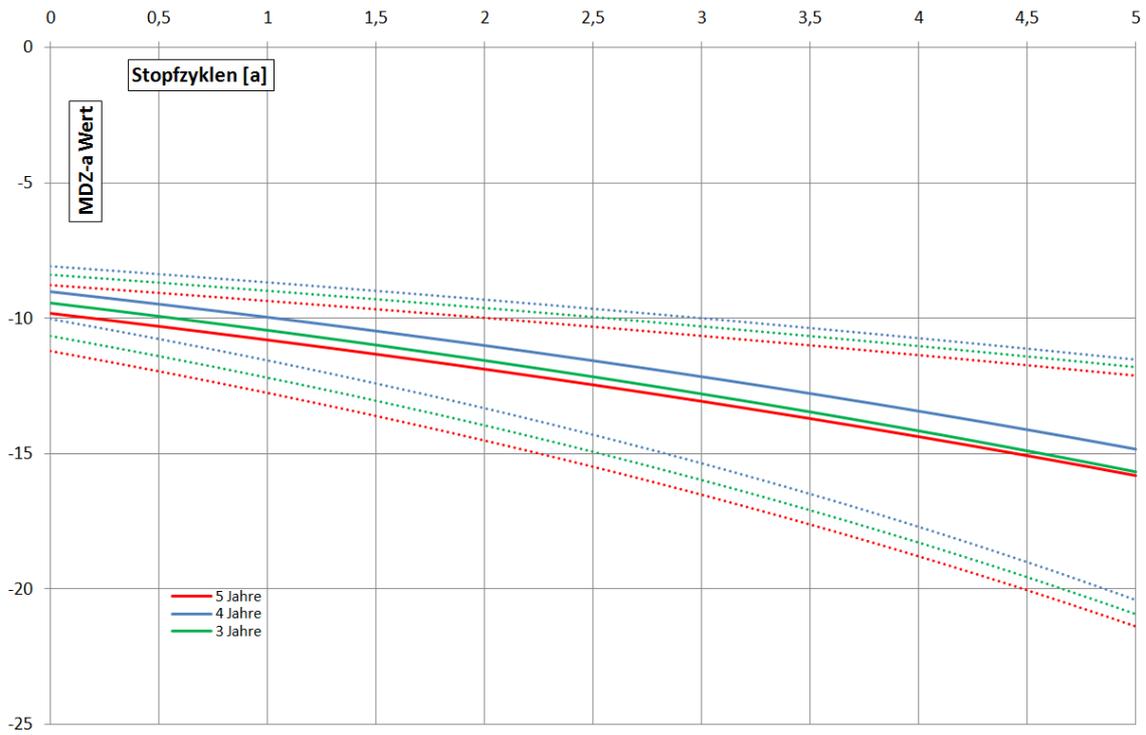


Abbildung 41 prognostizierte Gleislageentwicklung mit zugehörigem iqr für die unterschiedlichen Stopfzyklen

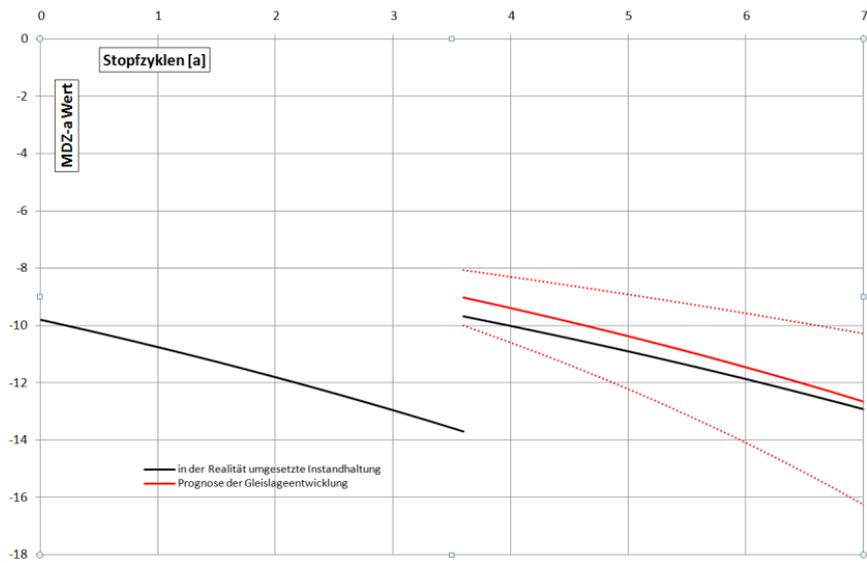


Abbildung 42 Vergleich zwischen dem prognostizierten und real eingestellten Gleislagezustand

### 3.8 Schlussfolgerungen

1. Es **existiert** ein **Zusammenhang** zwischen der resultierenden Gleislagequalität nach einer Instandhaltungsmaßnahme und den Gruppierungsparametern  $Q_1$ ,  $b_1$  und GA.
2. In 83% der Fälle wirkt sich die Instandhaltung **negativ** auf zumindest einen der Bewertungsparameter aus.
3. Durch die Wahl des **richtigen Stopfzykluses** ist es möglich, die Gleislagequalität in gewissen Qualitätsbereichen nach dem Durchführen der Instandhaltungsarbeit **annähernd gleichzuhalten** und in einigen Fällen sogar zu **verbessern**.
4. Ein dreimal größerer Interquartilsbereich des **b\_rels** im Vergleich zum  $Q_{rel}$ , legt den Schluss nahe, dass der **Einfluss des Instandsetzungsstopfens** auf die Verschlechterungsrate quantitativ **höher zu bewerten** ist. Die Verschlechterungsrate ist über die gesamte Nutzungsdauer als instabile Größe zu sehen, deren Betrachtung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Eine einseitige **Beurteilung** der Instandsetzung über das **auf tretende Q** ist daher als **nicht zulässig** zu bezeichnen.
5. Betrachtet man  $b_{rel}$  als **Funktion** von  $b_{1\_cl\_5}$  so lässt sich bei gutem  $b_1$  nur in seltenen Fällen eine Verbesserung beobachten, während jedoch bei schlechtem  $b_1$  der Bewertungsfaktor einen Wert über 1 annimmt (Verbesserung des  $b_2$  gegenüber  $b_1$ ). Dieser Trend gestaltet sich bei  $Q_{rel}$  in genau gegenteiliger Form aus und nähert sich dem **Grenzwert** von 1.
6. Betrachtet man äquivalent zu Punkt 5  $Q_{rel}$  als Funktion von  $Q_{1\_cl\_5}$  so lässt sich bei guten  $Q_1$  zwar eine Verbesserung der b-Rate erreichen, während jedoch das  $Q_2$  in 75% der Fälle unter dem  $Q_1$  zu liegen kommen wird. Bei steigender Clusterzugehörigkeit stellt sich dieser Effekt in genau gegenteiliger Wirkungsweise dar.
7. Gute  $Q_1$  und  $b_1$  Werte führen zu einem stabilen Verbesserungspotential der absoluten Gleislage ( $Q_{rel} \approx 1$ ), während jedoch die Durchführung einer Stopfmaßnahme zu einer durchschnittlichen Reduktion der Verschlechterungsrate um 35% führt. Diese Tendenz steigt mit zunehmend schlechter werdenden  $Q_1$  und gleichbleibenden  $b_1$  rapide an und erreicht sogar Werte von einer Verschlechterung um 95%. Bei schlechtem  $b_1$  jedoch gutem  $Q_1$  lässt sich dieser

Effekt in ähnlicher jedoch genau gegenteiliger Richtung wirkender Form feststellen. So nimmt nun das  $b_2$  nach dem Stopfen bessere Werte als die vorhergehende Verschlechterungsrate an, während die erreichbare absolute Gleislagequalität ( $Q_2$ ) sinkt.

8. Das Stopfen ist prinzipiell als eine **Störung eines sich eingestellten Gleichgewichts** zu interpretieren, welches bei entsprechend **guter** Gleislagequalität zu **vermeiden**, bei **schlechter** Gleislagequalität absolut **notwendig** ist.

### 3.9 Ausblick

1. Um bereits im Vorhinein eine statistisch multidimensionale Clusterung der Parameter durchführen zu können, ist die ausgelesene Grundgesamtheit der Daten über die zufällige Auswahl einer Stichprobe zu reduzieren. Die dadurch ausgelesenen Daten sind hinsichtlich ihrer vorliegenden Verteilung zu untersuchen und wenn möglich über eine geeignete Transformation in eine Normalverteilung oder äquivalente bekannte Verteilung überzuführen. Die so erhaltenen Daten sind einem entsprechenden Klassifizierungsprozess zu unterziehen und das dadurch entstehende neue Prognosemodell ist mit dem bereits vorhanden auf etwaige Abweichungen zu untersuchen. Dabei ist eine Gruppierung über die Parameter  $Q_1$ ,  $b_1$  und GA genauso wie eine rückwirkende Partitionierung über  $Q_{rel}$  und  $b_{rel}$  anzustreben, die einen Zusammenhang zwischen den Gruppierungs- und Bewertungsparametern statistisch beweisen soll.
2. Es ist eine statistische Überprüfung anzustreben, die feststellt in welchem Ausmaß die einzelnen Parameter auf die Gleislagequalität einwirken (Regressionsanalyse=>ANOVA).
3. Validierung des Prognosemodells in der Praxis
4. Überarbeitung der Datenbank in Hinsicht ihrer Genauigkeit und Eingangsgrößen für eine mögliche Begründung eines kausalwirkenden Prognosemodells

Es ist ersichtlich, dass es noch zahlreiche Effekte zu klären gilt. Dennoch ist die vorliegende Arbeit als erster Schritt in Richtung einer Prognose der Gleislagequalität nach Instandsetzungsmaßnahmen zu sehen.

**„Exploratory data analysis can never be the whole story, but nothing else can serve as the foundation stone - as the first step“**

*John Wilder Tukey*

Statistiker und Begründer der explorativen Statistik

## 4 Literaturverzeichnis

- Anderberg, M.R. 1973, *Cluster analysis for applications*, Academic Press, New York.
- Backhaus, K., Erichson, B. & Weiber, R. 2011, *Multivariate Analysemethoden- Eine anwendungsorientierte Einführung*, 13th edn, Springer Verlag Berlin Heidelberg, Berlin.
- Esveld, C. 2001, *Modern Railway Track*, 1st edn, MRT- Productions, Delft.
- Greutert, A. 2004, *Methoden zur Schätzung der Clusteranzahl*, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- Hanreich, W. 2004, "Modern Fahrweginspektion mit dem oberbautechnischen Messwagen EM 250", *ZEV Rail Zeitschrift für das gesamte System Bahn*, vol. 128, no. 9, pp. 18-27.
- Hecht, M., Jänisch, E., Lang, H.P., Lübke, D., Mayer, J., Mittmann, W., Pacht, J., Siegmann, J. & Weigand, W. 2008, *Das System Bahn*, 1st edn, DVV Media Group, Hamburg.
- Hummitzsch, R. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen- Statistische Analyse des Gleisverhaltens zur Erstellung eines Prognosemodells*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft.
- Keller, C., Stahel, W., Jaggi, B., Invernizzi, R., Locher, R., Ferster, M., Meili, R. & Frisullo, R. 2007, *Einführung in die Statistik-Umgebung R*, Seminar für Statistik ETH Zürich.
- Lichtberger, B. 2010, *Handbuch Gleis*, 3. edn, DVV Media Group, Hamburg.
- Meier, B. 2007, 27.08.2007-last update, *Grundmaßnahmen der Instandhaltung* [Homepage of Ingenieur-Bureau Oscar Kihm AG], [Online]. Available: [http://www.okag.ch/Daten/DIN31051\\_EN13306%20OKAG%20Oscar%20Kihm%20AG.pdf](http://www.okag.ch/Daten/DIN31051_EN13306%20OKAG%20Oscar%20Kihm%20AG.pdf) [2010, 12.2010] .
- Mercer, D.P. 2003, *Clustering large datasets*, Linacre College.
- Paul, M. 2002, 26.05.2002-last update, *Beschreibende Statistik und explorative Datenanalyse mit dem TI-83 und der Stats/List-Applikation für TI-92plus/TI-89* [Homepage of ACDCA - Austrian Center for Didactics of Computer Algebra], [Online]. Available: <http://www.acdca.ac.at/material/t3/t3deskstat.pdf> [2011, 02/2011] .
- Rießberger, K. 2007, "Schottergleise für hohe Geschwindigkeiten", *Eisenbahntechnische Rundschau*, vol. 57, no. 10, pp. 620-627.
- Rießberger, K. 2006, *Eisenbahnwesen Grundlagen*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Graz.
- Rießberger, K. 1997, "Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit- oder: wie gut muss ein Gleis sein?", *Österreichische Verkehrs Gesellschaft- Spezial*, vol. 41, pp. 64-94.

Röthlisberger, F., Däppen, J., Kurzen, E. & Würsch, E. 2005a, "Los Angeles Prüfung für Gleisschotter - Aussagekraft und Folgerung", *Eisenbahntechnische Rundschau*, vol. 54, no. 6, pp. 355-361.

Röthlisberger, F., Schmutz, G., Däppen, J., Kurzen, E. & Würsch, E. 2005b, "Alterungsphänomene von Gleisschotter - Zusammenhänge mit Prüfverfahren", *Eisenbahningenieur*, vol. 56, no. 6, pp. 56-59.

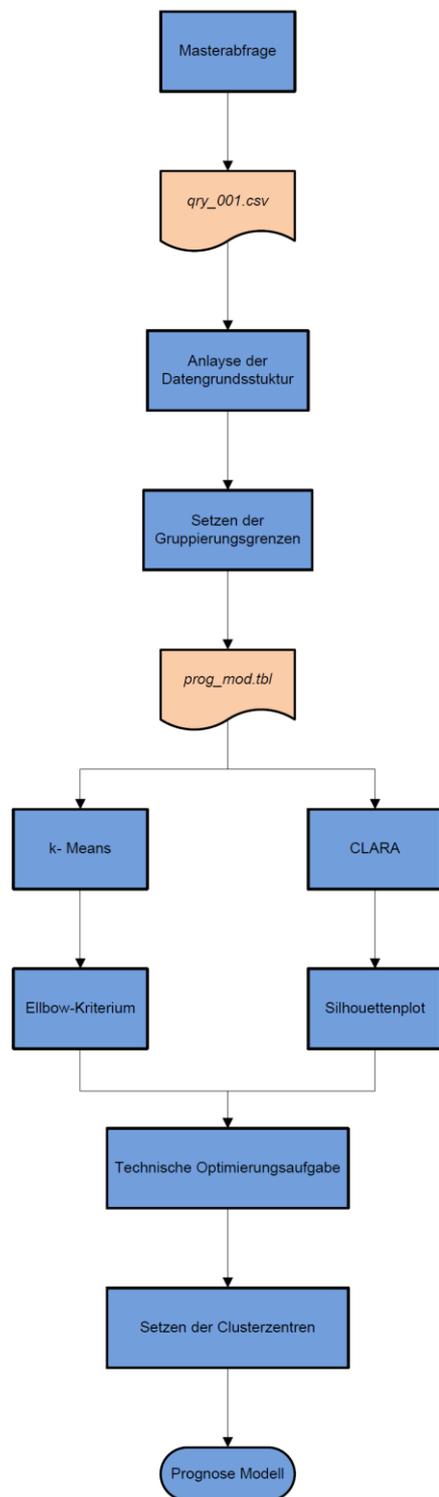
Stadlober, E. 2010, *Angewandte Statistik*, Institut für Statistik, Graz.

Veit, P. 2006, "Qualität im Gleis- Luxus oder Notwendigkeit", *Eisenbahningenieur*, , no. 12, pp. 32-35.

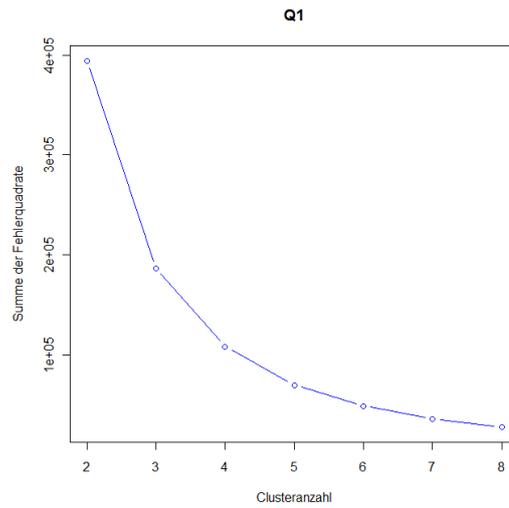
Wenty, R. 2010, , *Reduktion der Beanspruchung von Gleis- und Zugmaterial* [Homepage of Plasser & Theurer], [Online]. Available: [http://www.plassertheurer.at/pdfs/papers/pecs\\_04.pdf](http://www.plassertheurer.at/pdfs/papers/pecs_04.pdf) [2010, 12/2010] .

Zaki, M.J. & Wagner, M.J. 2010, *Fundamentals of Data Mining Algorithms*, Cambridge University Press.

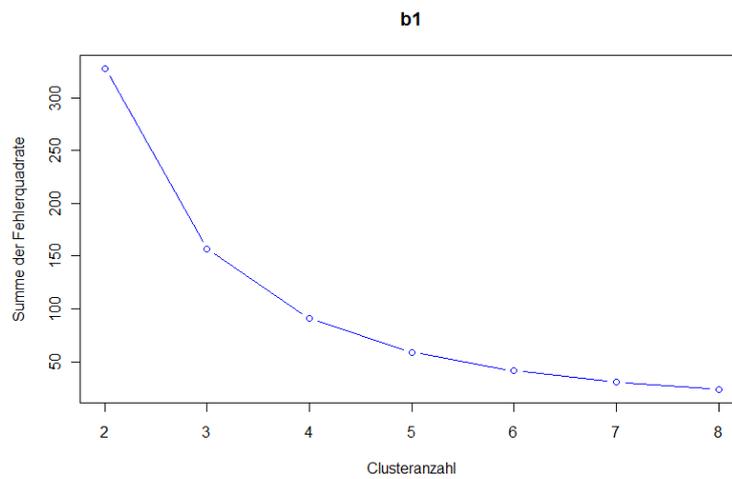
## 5 Anhang



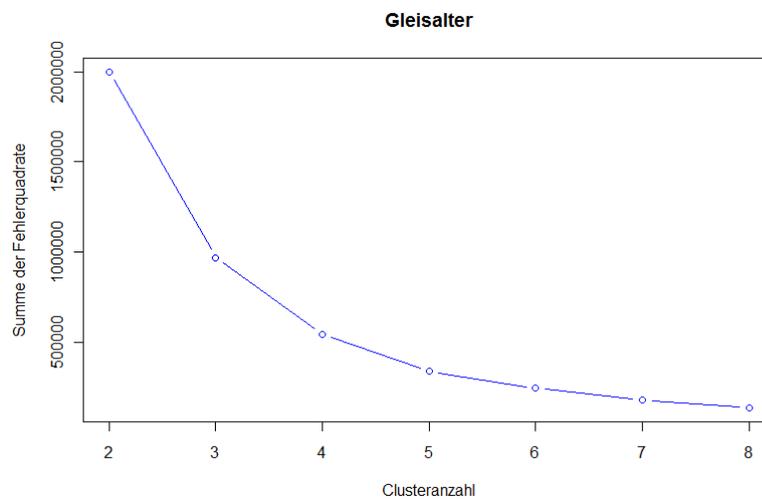
Annex 1 Ablaufschema zur Erstellung des Prognosemodells



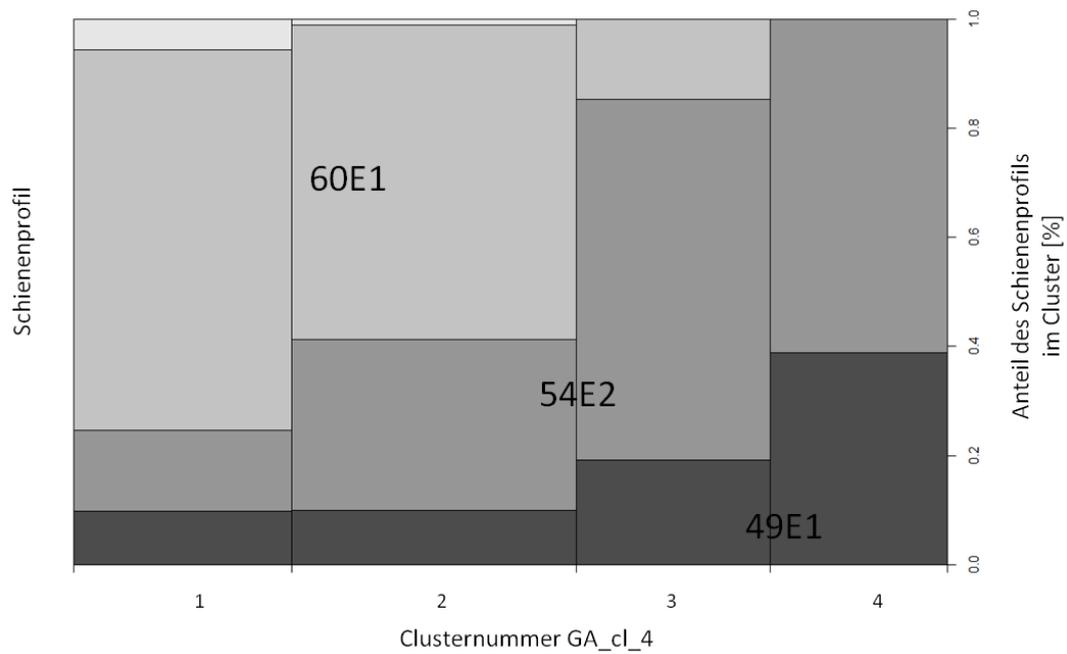
Annex 2 Entwicklung der Fehlerquadratsummen im Rahmen der Q1-Clustering



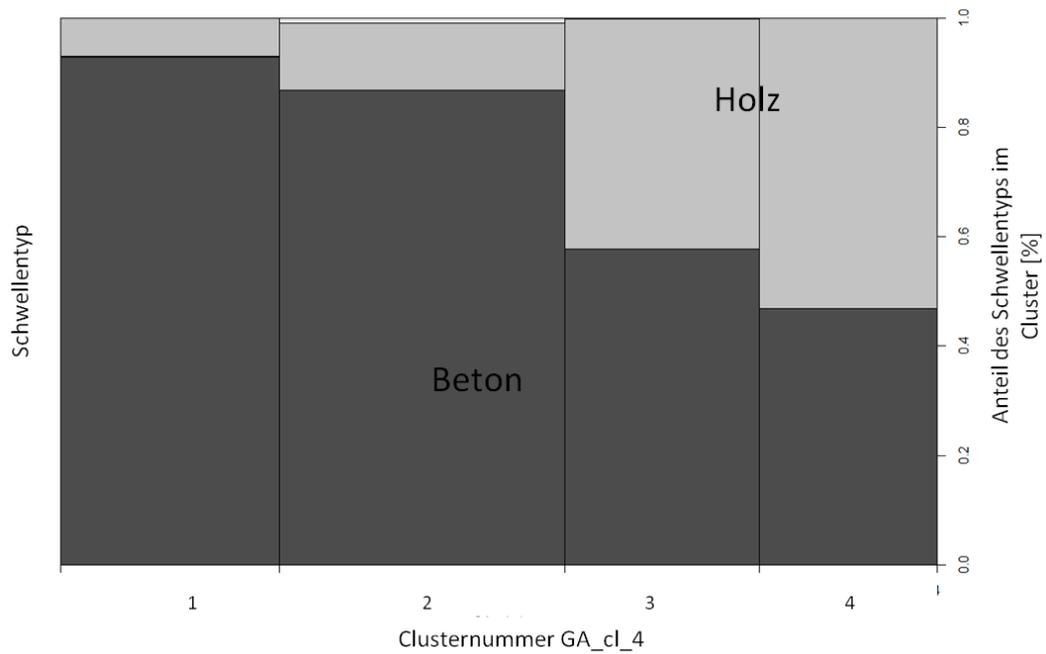
Annex 3 Entwicklung der Fehlerquadratsummen im Rahmen der b1-Clustering



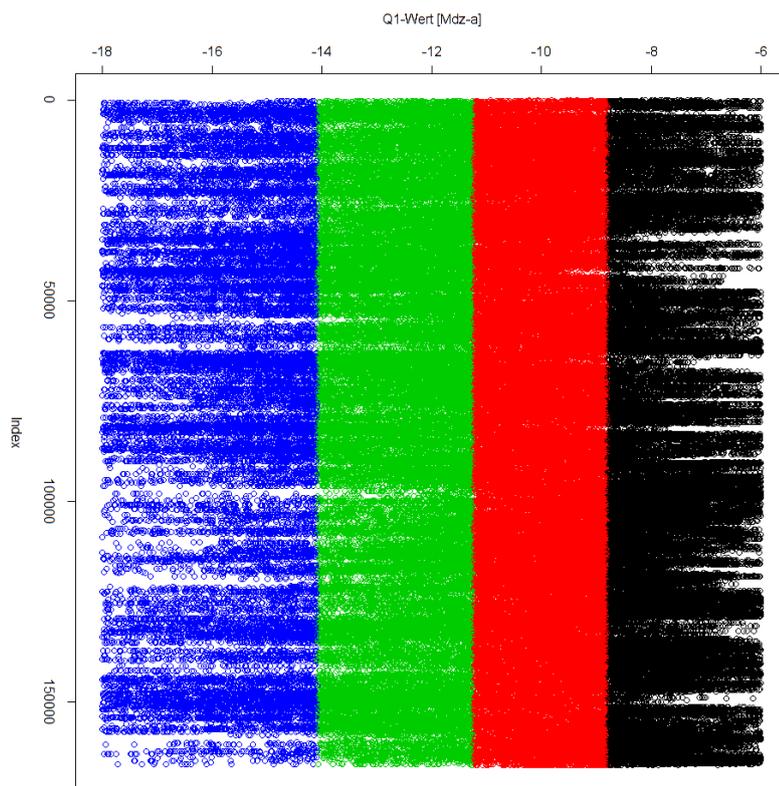
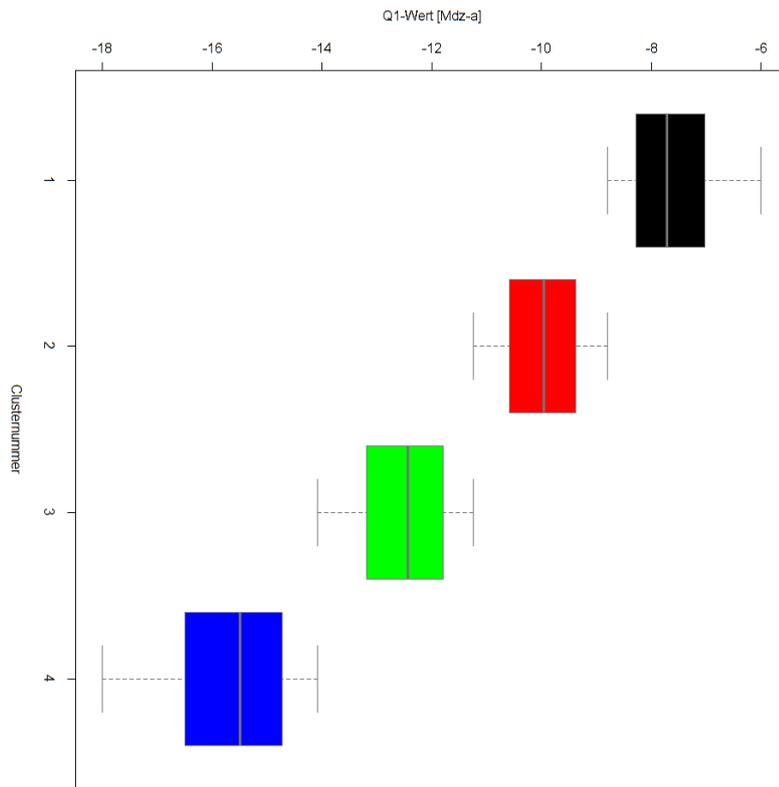
Annex 4 Entwicklung der Fehlerquadratsummen im Rahmen der Gleisalter-Clustering



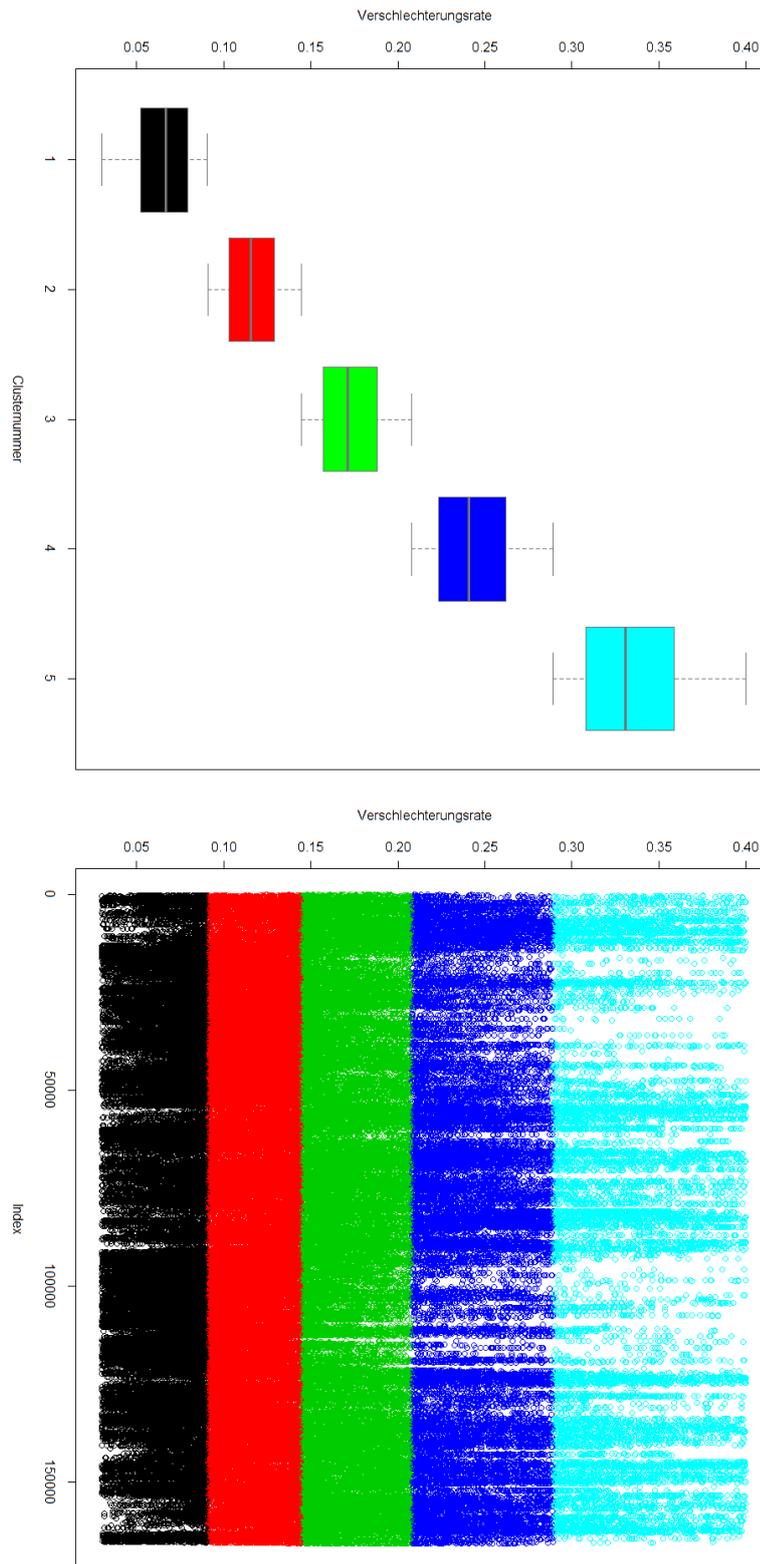
Annex 5 Clusterspezifische Wertezuteilung zu den einzelnen Schienenprofilen



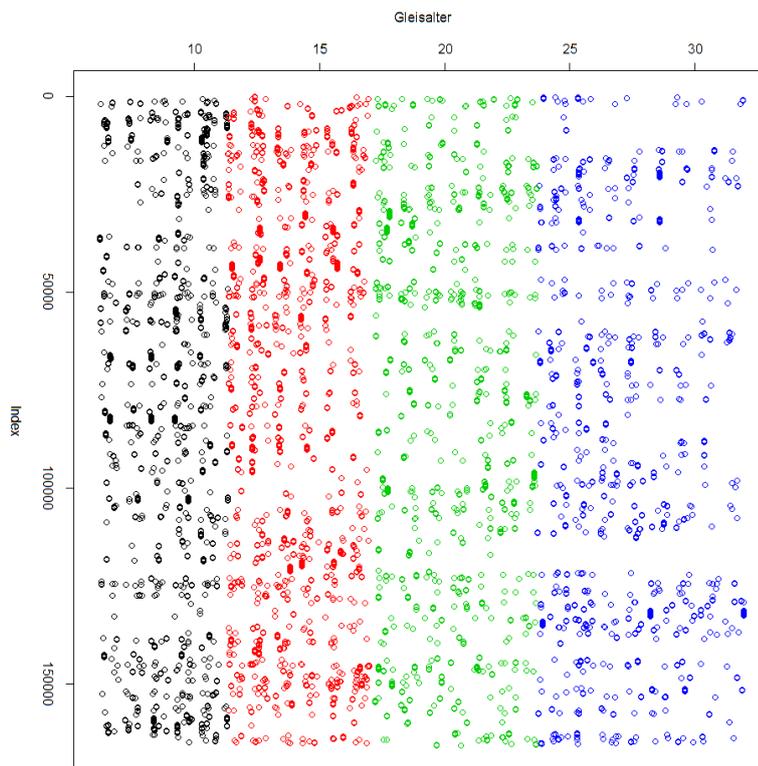
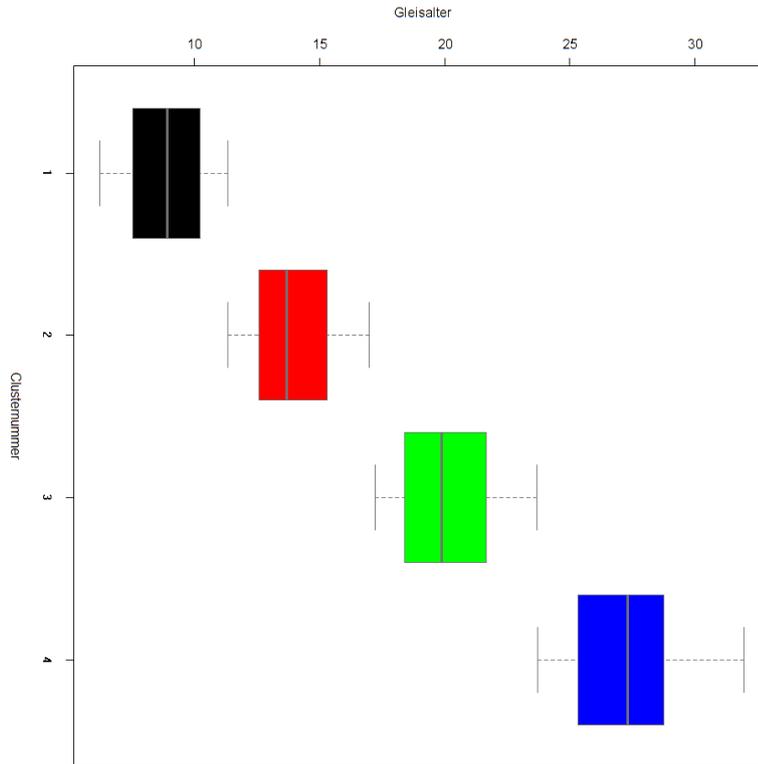
Annex 6 Clusterspezifische Wertezuteilung zu den einzelnen Schwellentypen



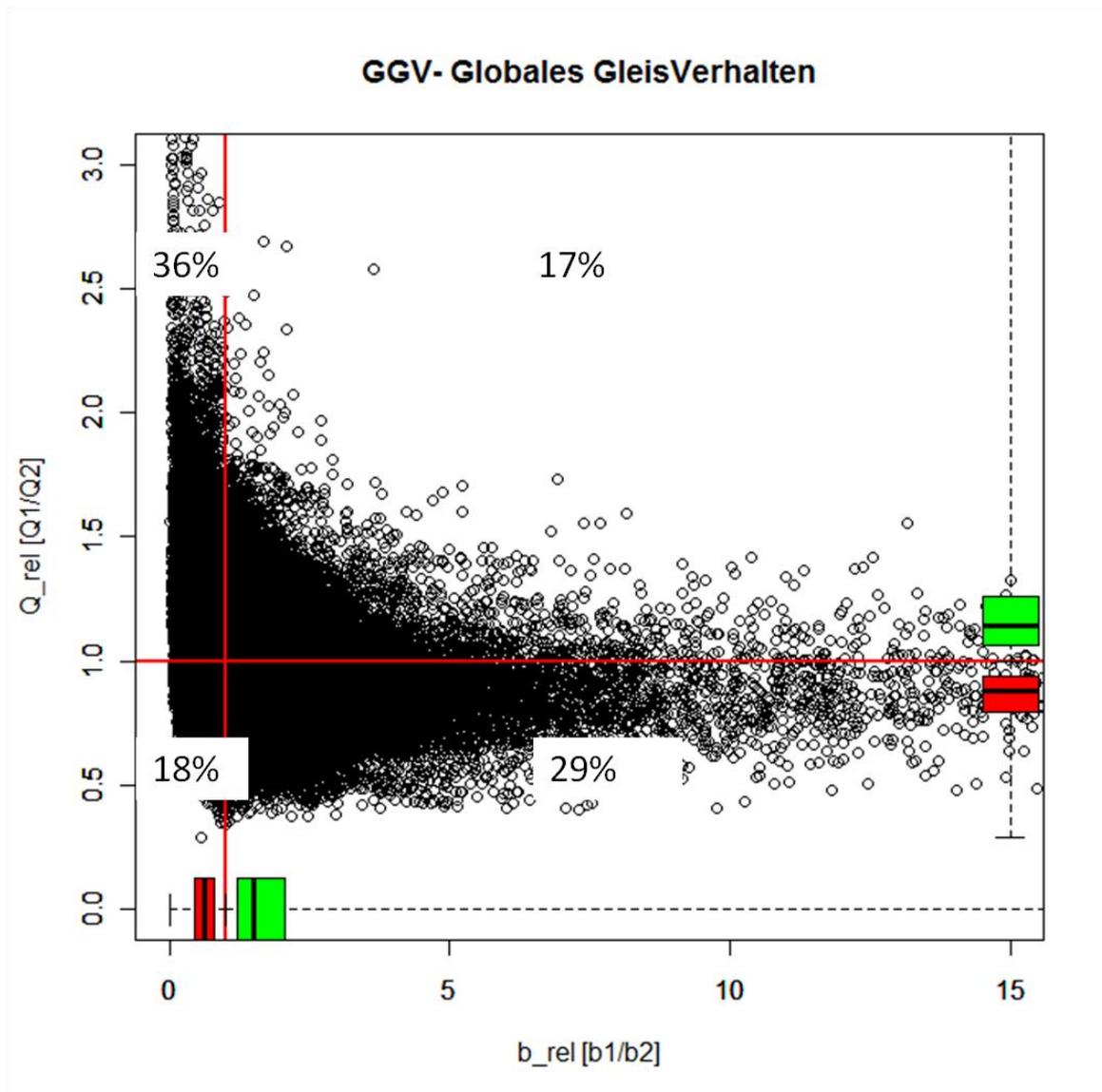
Annex 7 Visualisierung der angewendeten Partitionierung der Q1- Werte



Annex 8 Visualisierung der angewendeten Partitionierung der b1- Werte



Annex 9 Visualisierung der angewendeten Partitionierung der GA- Werte



Annex 10 GGV- Scatterplot zwischen b\_rel und Q\_rel

