



Qualitätsverhalten von Gleisen

Quality Behaviour of Track

Betriebsverfahren im Schienenverkehr – eine strukturelle und funktionale Analyse

Operating Procedures in Railway Traffic – a Structural and Functional Analysis

Fragen zum CHUO Shinkansen-Projekt in Japan

Questions concerning the CHUO Shinkansen-Project in Japan



Erfahrungen über das Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg im Hochgeschwindigkeitsverkehr bei der Deutschen Bahn AG

Experience of Deutsche Bahn AG in vehicle track interaction in high speed traffic

Systemtechnik für die Sicherheitsbeleuchtung in Eisenbahntunneln der Deutschen Bahn AG

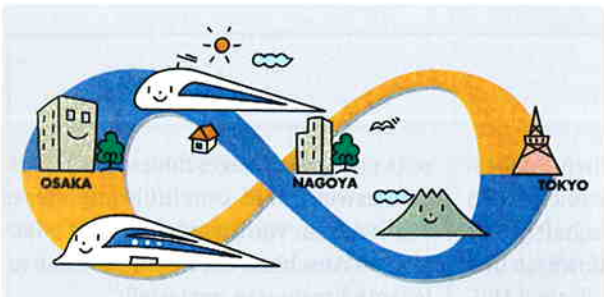
System equipment for emergency lighting in railway tunnels of Deutsche Bahn AG



Der TGV POS in Deutschland – eine Bestandsaufnahme

The TGV POS in Germany – a status

Entwicklung eines neuen Eisenbahnlärm-Berechnungsinstruments in der Schweiz – Projektmanagement sonRAIL



o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Torsten Dellmann

Editorial 209

Dipl.-Ing. Jochen Holzfeind, Dipl.-Ing. Robert Hummitzsch, Graz

Qualitätsverhalten von Gleisen 212

Quality Behaviour of Track

Dr.-Ing. Alexander Geistler, Mannheim, Prof. Dr.-Ing. Jörn Pacht, Braunschweig

Betriebsverfahren im Schienenverkehr – eine strukturelle und funktionale Analyse 225

Operating Procedures in Railway Traffic – a Structural and Functional Analysis

Dipl.-Ing. Sven Andersen, Düsseldorf

Fragen zum CHUO Shinkansen-Projekt in Japan 232

Questions concerning the CHUO Shinkansen-Project in Japan

Dr.-Ing. Manfred Zacher, München

Erfahrungen über das Zusammenwirken von Fahrzeug und Fahrweg im Hochgeschwindigkeitsverkehr bei der Deutschen Bahn AG 241

Experience of Deutsche Bahn AG in vehicle track interaction in high speed traffic

Dipl.-Ing. Arnd Konze, Dipl.-Ing. Jörg Benninghoff, Dinstlaken

Systemtechnik für die Sicherheitsbeleuchtung in Eisenbahntunneln der Deutschen Bahn AG 250

System equipment for emergency lighting in railway tunnels of Deutsche Bahn AG

Dipl.-Ing. Frank Feuchter, München

Der TGV POS in Deutschland – eine Bestandsaufnahme 256

The TGV POS in Germany – a status

Drangu Sehu, Bern, Thomas Thron, Berlin

Entwicklung eines neuen Eisenbahnlärm-Berechnungsinstruments in der Schweiz – Projektmanagement sonRAIL 261

Nachrichten und Termine 265

Qualitätsverhalten von Gleisen

Quality Behaviour of Track

Dipl.-Ing. Jochen Holzfeind, Dipl.-Ing. Robert Hummitsch, Graz

Zusammenfassung

Basis niedriger Lebenszykluskosten sind hohe Ausgangsqualität und entsprechende Instandhaltung, die eine spezifische Wahl der Eingriffsschwelle voraussetzt. Dazu muss das Verschlechterungsverhalten des Gleises bekannt sein. In Kooperation mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) wird am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz eine Forschungsarbeit zum „Qualitätsverhalten von Gleisen“ durchgeführt. Die Vorarbeiten wurden mit der Erstellung einer Datenbank, bestehend aus sämtlichen netzweit vorhandenen Randbedingungen der Gleise abgeschlossen. Aus den vorhandenen Messwagendaten wurden im Rahmen des Projekts Verschlechterungsfunktionen für das Netz von 3772 km bestimmt (ca. 2,6 Mio. Funktionen). Durch Verknüpfung des spezifischen Verschlechterungsverhaltens mit den vorliegenden Randbedingungen konnte z. B. die Wirksamkeit des Stabilisierungsstopfens nachgewiesen werden. Die Analysen zeigen weiterhin die Notwendigkeit, die Gleislagequalität mittels Statusziffer und zugehöriger Verschlechterungsrate zu beschreiben.

Abstract

High initial quality and adequate maintenance lead to low life-cycle-costs. Track quality behaviour is the basic knowledge to identify optimised maintenance strategies. In cooperation with the Austrian Federal Railways (ÖBB) and the Austrian Research Fund (FFG) a research program named "Quality Behaviour of Track" is executed at the Institute for Railway Engineering and Transport Economy at Graz University of Technology. The mathematical and statistical basis is already finished creating deterioration functions (2.6 mio. functions) of 3772 track-km and a multifunctional database. Combining specific deterioration functions with boundary conditions of track the efficiency of stabilising tamping could already be proofed. The analyses further show that quality of track must be described by a status figure and its specific deterioration value.

1 Einleitung und Zielsetzung

Bei der Entwicklung von Fahrwegstrategien auf der Basis von Lebenszykluskosten zeigt sich, dass die Wirtschaftlichkeit von einer hohen Gleisqualität abhängig ist [1]. Nur durch das richtige Zusammenspiel von Investition und Instandhaltung gelingt es, eine hohe Ausgangsqualität des Gleises tatsächlich in eine lange Lebensdauer umzusetzen. Die Festlegung eines Qualitätsgrenzwerts, welcher eine Instandhaltung erfordert, erlangt im Rahmen der Fahrwegoptimierung eine hohe Bedeutung. Um die damit beschriebene Eingriffsschwelle als „Optimierungsschraube“ anwenden zu können, muss allerdings das Verhalten des Gleises und vor allem seine Verschlechterung durch den Betrieb genau studiert werden. In Koope-

ration mit den Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) wird am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz (TUG) an einer Forschungsarbeit zur Thematik „Qualitätsverhalten von Gleisen“ gearbeitet. Das erste Ziel der Forschung ist die mathematische Abbildung des generellen Verschlechterungsverhaltens sowie die Bestimmung spezifischer Verschlechterungsfunktionen von Querschnitten des Schienennetzes der ÖBB, welche die Qualitätskennwerte mit einer ausreichend hohen Genauigkeit beschreiben. Im Anschluss daran werden Zusammenhänge zwischen den das Gleis beschreibenden Parametern und dem Verschlechterungsverhalten erforscht. Der erste Teil der Forschungsarbeit wurde be-

reits erfolgreich abgeschlossen. Die Vorgehensweise und Durchführung dieses Teils wird im vorliegenden Beitrag erläutert. Im Anschluss daran werden erste relevante Ergebnisse vorgestellt.

2 Vorgehensweise

Das Forschungsprojekt ist in folgende zwei Hauptteile gegliedert.

Teil 1: Mathematische Abbildung

- Eingangsdaten (Rohdaten, welche von Projektpartner ÖBB zur Verfügung gestellt wurden),
- TUG-Datenbank (Datenbasis für alle weiteren Untersuchungen),
- Verschlechterungsverhalten (theoretisches Modell und mathematische Um-

- setzung in Verschlechterungsfunktionen),
- Einbindung des Verschlechterungsverhaltens in das Modell der TUG für die Lebensdauer eines Gleises,
 - Analyseweg - Analysetools (Vorgehensweise und Tools zum Analysieren der Daten) und
 - erste Ergebnisse.

Teil 2: Zusammenhänge zwischen Parametern und Verschlechterungsverhalten

- Identifikation etwaiger zusätzlicher Parameter,
- funktionale Darstellung der Parameterinflüsse auf das Qualitätsverhalten,
- Verifizierung der Parameterzusammenhänge (lokal sowie netzweit-statistisch) und
- Implementierung der Erkenntnisse in ein Prognosemodell.

3 Eingangsdaten

Der Messwagen (EM250) der ÖBB befährt in regelmäßigen Abständen das österreichische Streckennetz [2]. Aus diesen Messfahrten resultieren unter anderem Informationen über die aktuelle Gleisla-

gequalität in Form der vertikalen Standardabweichung (SIGMA-h) und einer auf Beschleunigungsdifferenzen beruhenden Komfortziffer (MDZ-a).

Erst die Betrachtung dieser Informationen über einen Zeitraum ermöglicht es, das Qualitätsverhalten von Gleisen nachzuvollziehen. Da es aufgrund von Investitions- und Instandhaltungsmaßnahmen im Regelfall zu sprunghaften Verbesserungen der Gleislagequalität kommt, müssen auch Informationen über Zeitpunkt und Art der Maßnahmen betrachtet werden. Unter der Annahme, dass sich ein von Einbauten beeinflusstes Gleis nicht genau so verhält wie ein unbeeinflusstes, ist auch die Berücksichtigung von Bahnhöfen, Eisenbahnkreuzungen, Weichen, Brücken und Tunneln von Bedeutung.

Für die Suche nach „Zusammenhängen“ ist es außerdem notwendig, die das Gleis beschreibenden Randbedingungen zu kennen. Die derzeit betrachteten Randbedingungen betreffen die Streckenbelastung, Krümmung/Radius, Überhöhung, Geschwindigkeit, Längsneigung und den Oberbau (Art und Alter von Schienen und Schwellen). Diese für das Forschungsprojekt benötigten Basisdaten der letzten sie-

ben Jahre wurden von den ÖBB zur Verfügung gestellt.

4 TUG-Datenbank

Für eine optimale Nutzung der Vielzahl zur Verfügung gestellter Daten wurden diese in eine Datenbank überführt. Der Grundgedanke für die Struktur der TUG-Datenbank ist eine Zusammenfassung der ÖBB-Strecken in größtmögliche Abschnitte mit aufsteigender und vollständiger Kilometrierung (Bild 1). Bei der Zusammenfassung werden sämtliche Daten dieser Struktur unterworfen.

4.1 Struktur der TUG-Datenbank

Die höchste Ordnungsebene wird durch 20 Abschnitte gebildet. Jeder Abschnitt ist nach den durchgehenden Hauptgleisen unterteilt. In der darauf folgenden Ebene befinden sich nun sämtliche Daten der ÖBB, die der Kilometrierung nach stationiert sind. Mit dieser Struktur ist ein Erweitern der Datenbank in Hinblick auf das Hinzufügen von weiteren Abschnitten und/oder zusätzlichen, gleisbeschrei-

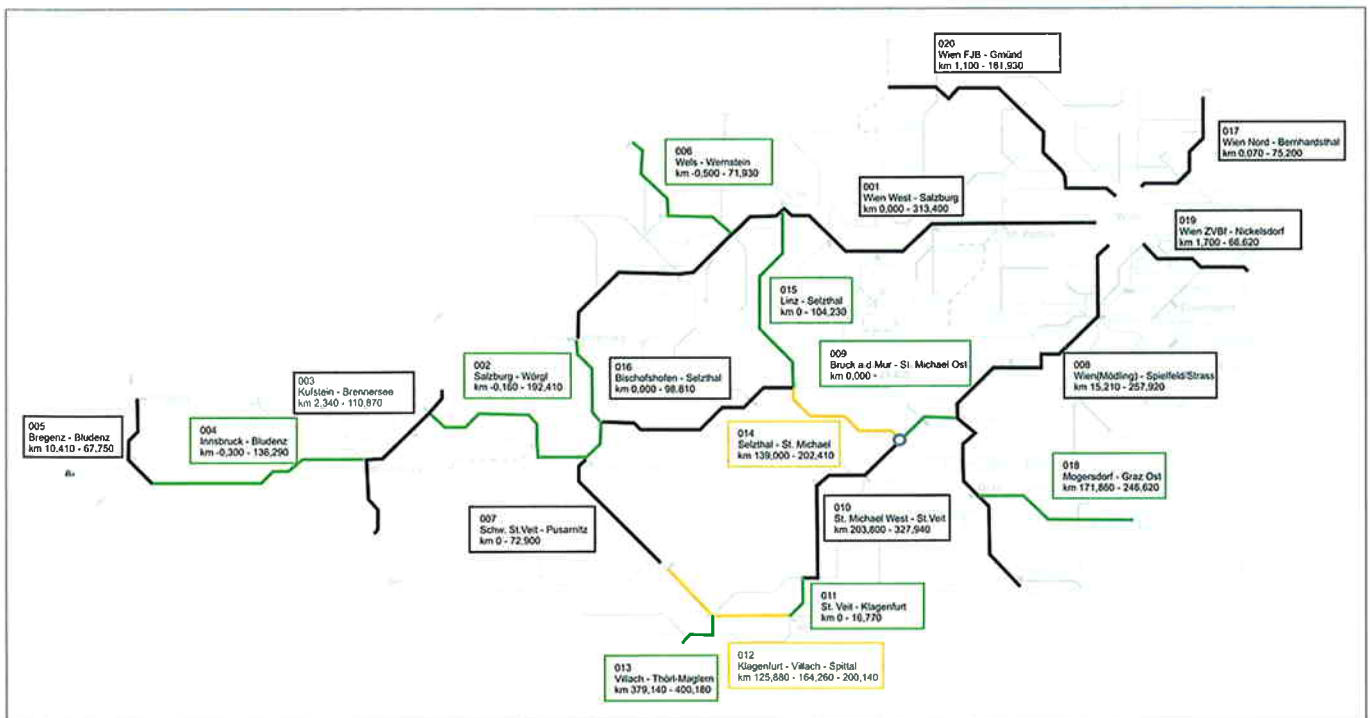


Bild 1: Übersicht der 20 Abschnitte der TUG-Datenbank

benden Informationen jederzeit problemlos möglich (Bild 2).

Auf Grundlage der TUG-Datenbank ist allein durch eine Angabe der Stationierung (Abschnitt, Gleis und Kilometer) jeder Punkt des Netzes eindeutig bestimmbar und es können sehr einfach und schnell Aussagen über jeden Streckenkilometer getroffen werden.

4.2 Inhalt der TUG-Datenbank

Mit den zur Verfügung gestellten ÖBB-Daten enthält die TUG-Datenbank Informationen über folgende Datengruppen:

- Einbauten (Bahnhöfe, Eisenbahnkreuzungen, Brücken, Tunnel, Weichen),
- Maschineneinsätze,
 - Gleisneulage (SUZ),
 - Unterbausanierung (AHM),
 - Schotterbettreinigung (RM),
 - Stopfen und Stabilisieren von Gleisen (MDZ),
 - Weichenstopfen (PLM) und
 - Schleifen,
- Messdaten,
 - Kennwerte der Gleislagequalität (MDZ-a und SIGMA-h) und
 - sonstige Zustandsdaten des Oberbaus wie Verwindung, Spurweite, usw.
- Krümmung, Radius, Überhöhung,

- Oberbau (Schienen, Schwellen),
- Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten (VzG) sowie
- Längsneigung.

Dem Forschungsprojekt liegen damit Daten für eine Gleislänge von 3 772 km zugrunde. Dieses Netz umfasst einerseits die wichtigsten Strecken der ÖBB und berücksichtigt andererseits relevante Variationsbreiten einzelner Parameter (Bild 1).

5 Gleislagequalität im Beobachtungszeitraum

Die vorliegenden Gleislageinformationen in Form von Messdaten der letzten sieben Jahre zeigen deutliche Veränderungen über den Betrachtungszeitraum. Während die Qualität durch Instandhaltungs- bzw. Investitionsmaßnahmen üblicherweise sprunghaft ansteigt, verringert sie sich zwischen diesen Maßnahmen von Messfahrt zu Messfahrt. Diese Maßnahmen sind in den vorhandenen Daten als Maschineneinsätze zu erkennen und unterteilen die beobachteten sieben Jahre in einzelne Zeiträume. Durch diese Trennung wird der Zeitraum eines Verschlechterungsastes eingegrenzt. Der Qualitätsverfall des Gleises durch den Betrieb definiert den Verschlechterungsast. Jeder Verschlechterungsast besitzt eine

individuelle Verschlechterungscharakteristik und eine Ausgangsqualität.

6 Verschlechterungsverhalten

Um in weiterer Folge Analysen des Verschlechterungsverhaltens durchführen zu können, ist es erforderlich, die Veränderung der Gleislagequalität mathematisch zu beschreiben. Nach [3] entwickelt sich die Gleislagequalität unter Verkehrsbelastung exponentiell. Diese Beobachtung wird in [4] anhand von realen Messwerten bestätigt. Aufgrund dieser Veröffentlichungen wird eine e-Funk-

tion als Verschlechterungsfunktion zwischen zwei Instandhaltungsarbeiten angesetzt. Die Anfangssetzungen nach einer durchgeführten Arbeit werden hier nicht berücksichtigt.

6.1 Verschlechterungsfunktion

Die Abnahme der Gleislagequalität erfolgt proportional zur aktuellen Qualität. Das heißt, dass sich ein gutes Gleis nur langsam verschlechtert, ein schlechtes Gleis jedoch schneller [5].

Diese bekannte Tatsache wird nach [3] mathematisch durch die folgende Differentialgleichung ausgedrückt:

$$\frac{dQ}{dt} = b \cdot Q, \tag{1}$$

$$\frac{dQ}{Q} = b \cdot dt, \tag{2}$$

$$\ln Q = b \cdot t + k \text{ und} \tag{3}$$

$$Q = k \cdot e^{bt}. \tag{4}$$

k entspricht hierbei der Qualität zum Zeitpunkt $t = 0$ und wird in weiterer Folge als Ausgangsqualität Q_0 eines Verschlechterungsastes bezeichnet:

$$Q_{(t=0)} = k \cdot e^{b \cdot 0} = k \cdot 1. \tag{5}$$

Daraus ergibt sich für den Verfall der Gleisgeometrie in Abhängigkeit von der Zeit die ausgangswertabhängige, exponentielle Verschlechterungsfunktion eines Verschlechterungsastes zu

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot e^{bt}. \tag{6}$$

Dabei sind

$Q_{(t)}$ Qualität zum Zeitpunkt t in MDZ-a oder SIGMA-h,

Q_0 Ausgangsqualität eines Verschlechterungsastes,

b Verschlechterungsrate und

t Zeit seit letzter Instandhaltung.

6.2 Basis der Berechnung

Das Verschlechterungsverhalten der Gleislagequalität wird an zwei unterschiedli-

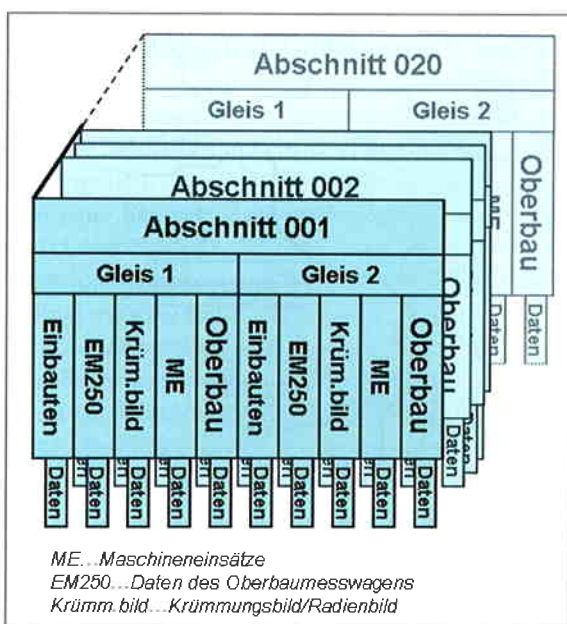


Bild 2: Struktur der TUG-Datenbank

chen Qualitätskennwerten untersucht, welche beide aus Messdaten über eine gewählte Länge von 100 m (Einflusslänge) ermittelt und in gleitenden Abständen von fünf Metern ausgegeben werden:

Gleisanalysesystem ADA II (MDZ-a)

Das ADA II-Verfahren beruht auf mit Ω^2 gewichteten Beschleunigungsdifferenzen am Wagenschwerpunkt, die über eine Einflusslänge gemittelt wurden. Dabei ist $\Omega/2\pi$ der Reziprokwert der Wellenlänge des Fehlers. Dem Berechnungsverfahren liegt ein einfaches Wagenmodell mit einer Schwerpunkthöhe von 1,5 m zu Grunde. Die in diesem Schwerpunkt auftretenden Beschleunigungen können direkt aus den Gleislagemessdaten mittlere Höhenlage, mittlere Seitenlage sowie gegenseitige Höhenlage ermittelt werden (Bild 3).

Da das ADA II-Verfahren die Dynamik eines Eisenbahnwagens berücksichtigt, fließt die jeweilige Streckenhöchstgeschwindigkeit in das Berechnungsverfahren mit ein. Nach [2] ist dieser Einfluss aufgrund der Federsysteme mit $V^{0,65}$ unterlinear.

MDZ =

$$c \cdot \frac{1}{L} \cdot V^{0,65} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{L}{\Delta x}} \sqrt{(\Delta v')^2 + (\Delta h + \Delta \ddot{u})^2} \quad (7)$$

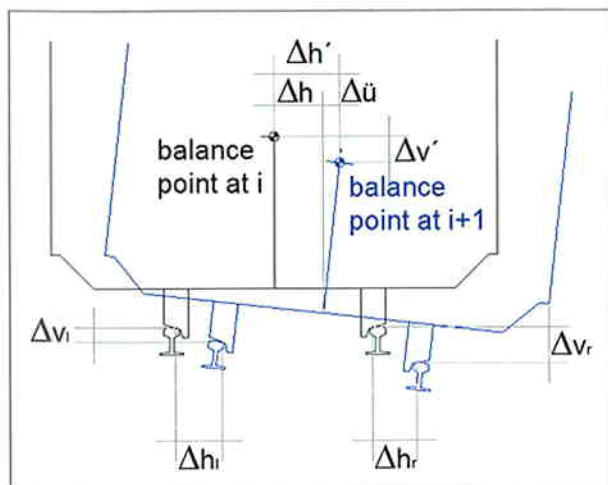


Bild 3: ADA II – Prinzipskizze zur Bewegung des Wagenschwerpunkts

Standardabweichung der Längshöhe (SIGMA-h)

Die Standardabweichung der Längshöhe beruht nur auf den mittleren Fehleramplituden der Höhenlage. Weder Wellenlänge der periodischen Gleisfehler noch Streckenhöchstgeschwindigkeit fließen in das Berechnungsschema ein. Da trotzdem Standardabweichungen der Gleislagefehler europaweit zur Qualitätsbewertung herangezogen werden, wird diese Kennziffer parallel zur MDZ-a in den folgenden Analysen berücksichtigt.

6.3 Mathematische Theorie – Regression

Für die Vergleichbarkeit des Verschlechterungsverhaltens unterschiedlicher Querschnitte ist die mathematische Beschreibung der gemessenen Qualitätskennwerte über den Verlauf der Zeit erforderlich. Unter Annahme einer beliebigen Funktion wird diese optimal an die Messwerte angepasst (Bild 4). Das Anpassen der Funktion an die jeweiligen Messpunkte eines Querschnitts erfolgt durch Regressionsrechnung mit der Methode der kleinsten Quadrate. „Zu einer Punktwolke (x_i, y_i) , $i = 1, \dots, n$, wird eine Näherungsfunktion $y = f(x)$ so gesucht, dass die Summe der Quadrate der vertikalen Abweichungen v_i (Approximationsfehler, Residuen) der Werte y_i von den Funktionswerten $f(x_i)$ der Näherungsfunktion ein Minimum gibt“. [6]

Das Ziel besteht darin, eine Funktion, beschrieben durch deren Unbekannte, zu finden, welche der Optimierungsaufgabe der kleinsten Quadrate genügt. Da im Fall der e -Funktion eine explizite Lösung der Fragestellung nicht möglich ist, wird ein Iterationsverfahren angewendet. Als Iterationsverfahren kommt die „Regula falsi“ (lat. Regel des falschen Ansatzes) zum Einsatz. Das Verfahren dient zum

Auffinden von Nullstellen einer Funktion. Bei der Anwendung wird an zwei Stellen (a_0 und b_0) in der Nähe der Nullstelle, deren Funktionswerte $f(a_0)$, $f(b_0)$ unterschiedliche Vorzeichen besitzen, begonnen. Nach dem Zwischenwertsatz für stetige Funktionen [6] nimmt f jeden Wert zwischen $f(a_0)$ und $f(b_0)$, und somit die gesuchte Nullstelle, mindestens einmal im Intervall (a_0, b_0) an.

In Schritt k wird eine neue Stelle c_k berechnet:

$$c_k = a_{k-1} - \frac{b_{k-1} - a_{k-1}}{f(b_{k-1}) - f(a_{k-1})} * f(a_{k-1}) \quad (8)$$

und es werden a_k, b_k folgendermaßen gewählt:

$a_k = c_k, b_k = b_{k-1}$, falls $f(a_{k-1})$ und $f(c_k)$ das gleiche Vorzeichen haben bzw.

$a_k = a_{k-1}, b_k = c_k$, falls $f(b_{k-1})$ und $f(c_k)$ das gleiche Vorzeichen haben.

6.4 Anwendung der Theorie auf die e-Funktion

Im vorliegenden Fall der e -Funktion, beschrieben durch die beiden Unbekannten Q_0 und b , gilt es jene Kombination aus Q_0 und b zu finden, welche der Optimierungsaufgabe der kleinsten Quadrate genügt (Bild 4).

Die Reduktion der zwei Unbekannten auf schlussendlich eine gelingt durch die Möglichkeit, die zweite Unbekannte unter der Voraussetzung der Optimierung zu berechnen. Zu jedem b lässt sich ein Q_0 explizit bestimmen durch

$$Q = \frac{\sum W_i \cdot e^{-bt_i}}{\sum e^{-2bt_i}} \dots \text{ mit } W_i = \text{Messwert.} \quad (9)$$

Die Funktion der Fehlerquadrate

$$\sum \Delta^2 = \sum_{i=1}^{i=k} (W_i - Q \cdot e^{-bt_i})^2 \quad (10)$$

lässt sich, wie in Bild 5 anhand der roten Kurve gezeigt, durch eine Variation von b grafisch darstellen.

Die kleinste Summe der Abstandquadrate tritt bei einem optimalen b und dem zu-

gehörigen Q_0 auf. Dieses optimale b wird durch das Minimum der Funktion der Fehlerquadrate definiert.

Für das Auffinden des Minimums werden die Nullstellen der ersten Ableitung der Funktion der Fehlerquadrate (Bild 5, blaue Kurve) gesucht.

Die erste Ableitung

$$\frac{d \sum \Delta^2}{db} = -2 \cdot (W_i - Q \cdot e^{-bt_i}) \cdot \left(\frac{dQ}{db} \cdot e^{-bt_i} - Q \cdot t_i \cdot e^{-bt_i} \right) \quad (11)$$

mit

$$\frac{dQ}{db} = \frac{\sum -t_i \cdot W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum e^{-2bt_i} - \sum W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum -2t_i \cdot e^{-2bt_i}}{\left(\sum e^{-2bt_i} \right)^2} \quad (12)$$

kann nicht explizit nach b aufgelöst werden.

Ein iterativer Lösungsweg ist die Folge. Hier kommt die oben beschriebene „Regula falsi“ zum Einsatz. Um mathematisch sicherzustellen, dass es sich bei dem gefundenen Extrempunkt tatsächlich um einen Tiefpunkt handelt, wird die zweite Ableitung (Bild 5, grüne Kurve) zur Überprüfung herangezogen. Dafür gelten folgende Gleichungen:

$$\frac{d^2 \sum \Delta^2}{db^2} = -2 \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left(-\frac{dQ}{db} \cdot e^{-bt_i} + Q \cdot t_i \cdot e^{-bt_i} \right) \left(\frac{dQ}{db} \cdot e^{-bt_i} - Q \cdot t_i \cdot e^{-bt_i} \right) + (W_i - Q \cdot e^{-bt_i}) \cdot \\ & \left(\frac{dQ}{db^2} \cdot e^{-bt_i} - \frac{dQ}{db} \cdot t_i \cdot e^{-bt_i} - \frac{dQ}{db} \cdot t_i \cdot e^{-bt_i} + Q \cdot t_i^2 \cdot e^{-bt_i} \right) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

mit

$$\frac{d^2 Q}{db^2} = \frac{d \left(\frac{u}{v} \right)}{db} = \frac{du/db \cdot v - u \cdot dv/db}{v^2} \quad (14)$$

und mit

$$\frac{du}{db} = \sum t_i^2 \cdot W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum e^{-2bt_i} + \sum -t_i \cdot W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum -2t_i \cdot e^{-2bt_i} - \left(\sum -t_i \cdot W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum -2 \cdot t_i \cdot e^{-2bt_i} + \sum W_i \cdot e^{-bt_i} \cdot \sum 4t_i^2 \cdot e^{-2bt_i} \right) \quad (15)$$

$$\frac{dv}{db} = 2 \cdot \sum e^{-2bt_i} \cdot \sum -2 \cdot t_i \cdot e^{-2bt_i} \quad (16)$$

Unter Berücksichtigung dieser mathematischen Zusammenhänge gelingt es, den Verlauf der Messwerte funktional mit bestmöglicher Anpassung zu beschreiben.

6.5 Netzweite Umsetzung

Die netzweite Berechnung der Verschlechterungsfunktionen für die Qualitätskennwerte MDZ-a und SIGMA-h wurde mittels des oben beschriebenen Verfahrens bereits abgeschlossen. Die Netzlänge von 3772 km, die Querschnittsbetrachtung alle

fünf Meter sowie der Betrachtungszeitraum von sieben Jahren resultieren in einer sehr hohen Anzahl an Verschlechterungsfunktionen (2,6 Millionen) und erfordern damit eine Automatisierung der Regressionsrechnung. Diese wird durch das Programmieren eigener Sequenzen mit der Signalanalysesoftware FAMOS 5.0 realisiert. Zu den ermittelten Variablen Q_0 und b werden zusätzlich die Größen der durchschnittlichen Abweichung der Funktion von den Messwerten (Δ_{schnitt}) und die Anzahl der Messwerte für jede gerechnete Verschlechterungsfunktion gespeichert.

6.6 Nachweis der durchschnittlichen Anpassung

Nachdem die Verschlechterungsfunktionen netzweit errechnet wurden, kann nun die durchschnittliche Anpassung der gewählten Funktion $Q = Q_0 \cdot e^{bt}$ ermittelt werden.

Die vorliegenden Qualitätswerte unterliegen einer unvermeidbaren Streuung. Diese ergibt sich einerseits aus der Ungenauigkeit des Messsystems und andererseits aus einer örtlichen Nachjustierung (Stationierung) der Daten.

Der Medianwert der Anpassung aller Verschlechterungsfunktionen an die Messwerte eines Verschlechterungsastes beträgt 0,388 (MDZ-a)-Punkte. Das Histogramm in Bild 6 zeigt die hohe

Anzahl von Verschlechterungsfunktionen, welche eine besonders gute Anpassung an die Messwerte besitzen.

Die Genauigkeit der Anpassung der errechneten e -Funktionen mit 0,388 (MDZ-a)-Punkten entspricht einer Anpassung von 0,021 mm Standardabweichung der Längshöhe und ist damit als ausreichend genau zu betrachten.

6.7 Erweiterung der TUG-Datenbank

Die erhaltenen Ergebnisse der Verschlechterungsfunktionsberechnung werden in die TUG-Datenbank eingespielt und wie alle bisherigen Daten auch der Stationierung nach zugeordnet (Bild 7). Diese Vorgehensweise ermöglicht eine ständige Erweiterung der Datenbank und somit eine stetig anwachsende, strukturierte Informationsplattform zum netzweiten Gleiszustand. Neben der Ablage aller Rechenergebnisse ermöglicht ein zusätzliches Feature zur grafischen Darstellung einen einfachen und schnellen Überblick auf einen beliebig gewählten Querschnitt sowie dessen Umfeld (Bild 8). Diese Querschnittsinformationen werden ebenfalls der Stationierung entsprechend in der Datenbank abgelegt. Um einen schnellen Überblick über

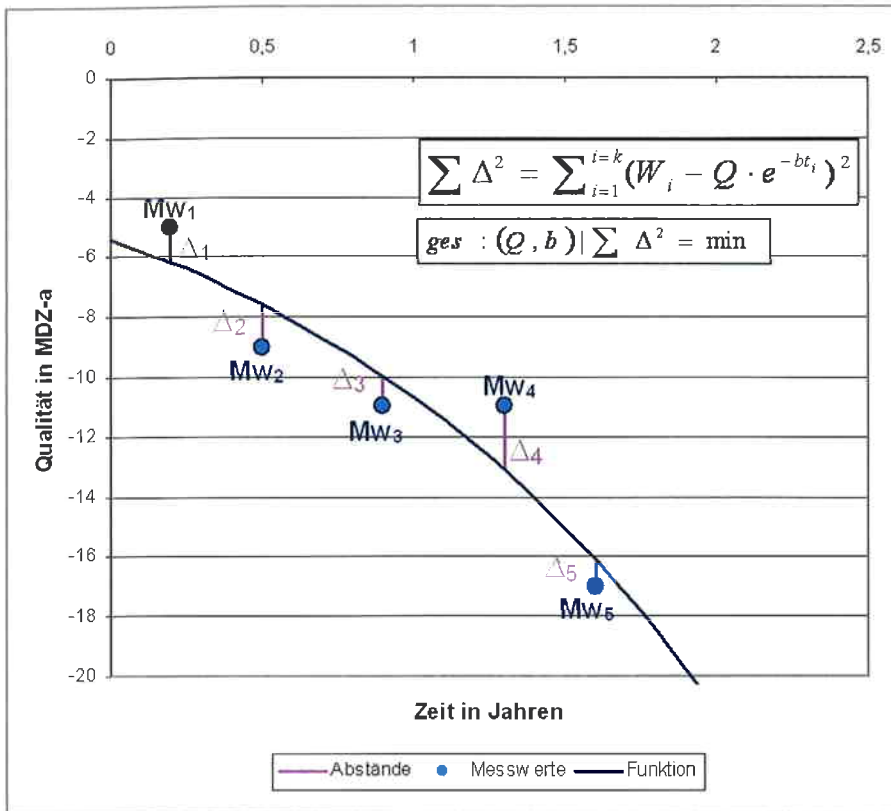


Bild 4: Regressionsrechnung mittels der Optimierungsaufgabe der kleinsten Quadrate

einen Abschnitt zu erhalten, wurden bereits Querschnittsinformationen in einem Abstand von 50 m erzeugt und abgelegt (~75 000 Seiten oder 40 Pdf-Dateien mit jeweils bis zu zwei Gigabyte). Es ist jederzeit möglich, im Zuge einer Detailbetrachtung diesen Abstand auf 5 m zu verringern.

Als Zwischenfazit lässt sich feststellen, dass erst mit dieser erweiterten Datenbank eine Grundlage für gezielte Aussagen über das Verschlechterungsverhalten von Eisenbahngleisen vorhanden ist. Das Qualitätsverhalten der Gleise in Form der Verschlechterungsfunktion $Q = Q_0 \cdot e^{bt}$ wird damit erstmals für das Hauptnetz

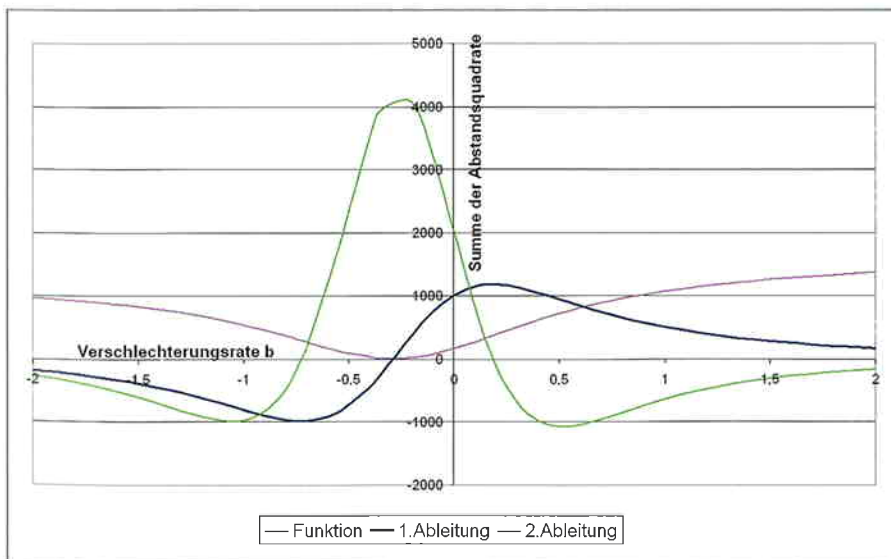


Bild 5: Beispiel für die Funktion der Fehlerquadrate und deren erste und zweite Ableitung

einer Eisenbahnverwaltung beschrieben. Konkret liegen in der TUG-Datenbank für das Hauptnetz der ÖBB Verschlechterungsfunktionen der letzten sieben Jahre für die Qualitätswerte MDZ-a und vertikale Standardabweichung netzweit vor.

7 Analyseweg und Analyse-tools

7.1 Analyseweg

Um eindeutige Trends aus der großen Datenmenge und -vielfalt erkennen zu können, ist es für Analysen notwendig, die Daten nach genau definierten Kriterien zu filtern. Die Filterung erfolgt in mehreren Schritten:

- „Homogener Bereich“,
- „Gültige Länge“,
- „Querschnittfolge“ und
- „Querschnitt“.

Ein „Homogener Bereich“ ist definiert als der längste zusammenhängende Bereich mit derzeit betrachteten, gleich bleibenden Parametern (Bild 9).

Die wichtigsten derzeit betrachteten Parameter sind:

- Radius,
- Belastung,
- Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten VzG,
- Schiene,
- Schwelle und
- Maschineneinsatz.

Innerhalb dieses Bereichs dürfen keine Störstellen (Einbauten wie Bahnhöfe, Weichen, Brücken, Eisenbahnkreuzungen, Tunnel) vorhanden sein. Den „Homogenen Bereichen“ sind noch keine bestimmten Parameterkombinationen zugehörig. Daher können mehrere „Homogene Bereiche“ durchaus unterschiedliche Parameter bzw. Parameterwerte haben.

„Gültige Längen“ sind im Gegensatz zu „Homogenen Bereichen“ genau einer Parameterkombination zugehörig und jeder Qualitätswert einer „Gültigen Länge“ ist unbeeinflusst von jeglicher Störstelle. Als Störstelle wird auch eine Veränderung eines betrachteten Parameters bezeichnet (Bild 10).

Da die Qualitätswerte (Standardabweichung der Längshöhe und MDZ-a-Wert)

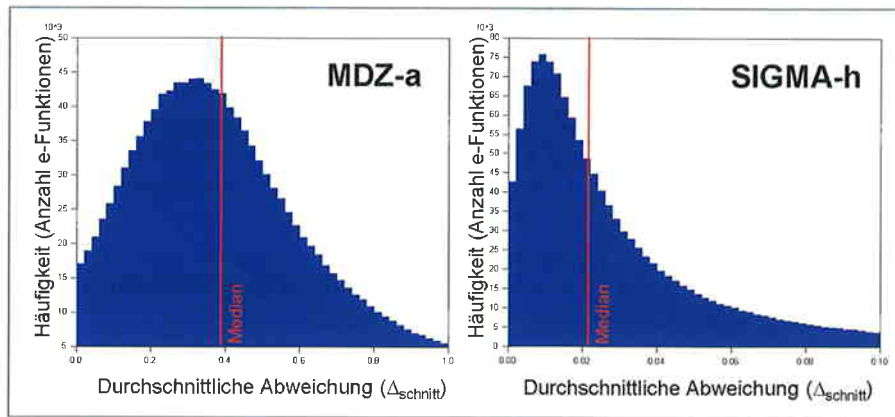


Bild 6: Netzweites Histogramm der durchschnittlichen Abweichung der e-Funktion von den Messwerten eines Verschlechterungstastes in MDZ-a und SIGMA-h

einen Einflussbereich von exakt 100 m haben (Bild 11), muss garantiert werden, dass sich im Abstand von 50 m vor dem Betrachtungspunkt und 50 m nach dem Betrachtungspunkt keine Störstelle befindet.

„Querschnittsfolgen“ werden gezielt aus „Gültigen Längen“ einer Parameterkombination ausgewählt. Die Länge einer „Querschnittsfolge“ ist variabel und richtet sich nach der Stabilität der aufeinander-

7.2 Analysetools

Die Gliederung in „Homogene Bereiche“, „Gültige Längen“, „Querschnittsfolgen“ und „Querschnitte“ erfolgt netzweit automatisiert. Wie die Berechnung der Verschlechterungsfunktionen wurde auch hier die Automatisierung mit der Signalanalysesoftware Famos 5.0 realisiert. Dies ermöglicht die rasche und lückenlose Bereitstellung von Gleisinformationen, welche einer bestimmten Parameterkombi-

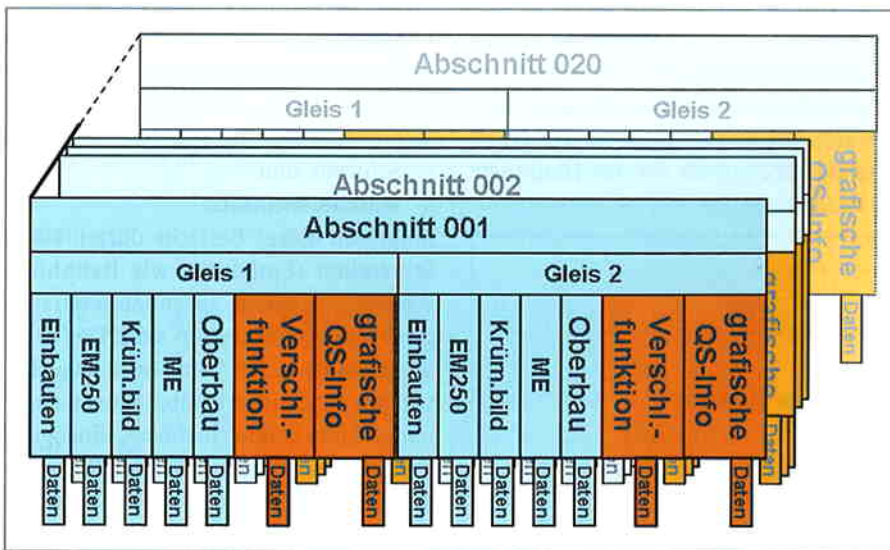


Bild 7: Erweiterung der TUG-Datenbank

der folgenden Werte. Um die Unabhängigkeit zweier aufeinander folgender „Querschnittsfolgen“ zu gewährleisten, müssen diese wegen des gegenseitigen Einflusses einen Mindestabstand von 100 m aufweisen (Bilder 11 und 12).

nation entsprechen. Die bereitgestellten Gleisinformationen werden als Eingangsdaten für die weitere Analyse verwendet. Die Detailanalysen finden an manuell ausgewählten Querschnittsfolgen in MS-EXCEL statt. Statistische, netzweite Aus-

wertungen werden unter Anwendung des Statistikprogramms SPSS durchgeführt. Zusätzlich zu den oben beschriebenen Möglichkeiten der Bereitstellung von Eingangsdaten können netzweite Auswertungsergebnisse wie

- durchschnittliche Maschineneinsätze (km-Leistung/Jahr, Einsatzlängen/Jahr, Einsatzabstände/Jahr bzw. Stopfintervalle, Einsatz in % auf TUG-Netz, usw.),
 - Einsatz unterschiedlicher Oberbaukomponenten (Alter, Art, usw.),
 - durchschnittliche Gleislagequalität (Anfangsqualität Q_0 , Verschlechterungsrate b , Gleislage Q) im Verlauf über sieben Jahre und andere
- direkt mit Hilfe diverser Analysetools ermittelt werden.

8 Erste Ergebnisse

8.1 Kritisches Hinterfragen ermittelter Ergebnisse

Bereits die ersten Analysen haben gezeigt, dass manche Einzelergebnisse fragwürdig sind und daher nicht einfach nur übernommen und akzeptiert werden dürfen, sondern kritisch zu hinterfragen sind. In dem in Bild 13 dargestellten Beispiel zeigen die ermittelten Werte, dass ein Maschineneinsatz (Schotterbettreinigung) zu einem extremen Anstieg der Verschlechterungsrate führt und ein Halten der Gleislagequalität nicht mehr möglich ist. Erst nach gründlicher Recherche konnte der wahre Grund für den raschen Qualitätsverfall nach der Instandhaltungsmaßnahme ermittelt werden. Nicht der Einsatz der Reinigungsmaschine selbst war, wie aus den Daten fälschlich interpretiert werden könnte, der Auslöser für den raschen Qualitätsabfall, sondern die Schotterbettreinigung erfolgte bereits als Reaktion auf einen Murenabgang, welcher das gesamte Gleis beeinträchtigt hat.

8.2 Optimaler Zeitpunkt für Stabilisierungsstopfen

Als Stabilisierungsstopfen wird der erste Stopfgang nach fertig gestellter Neulage

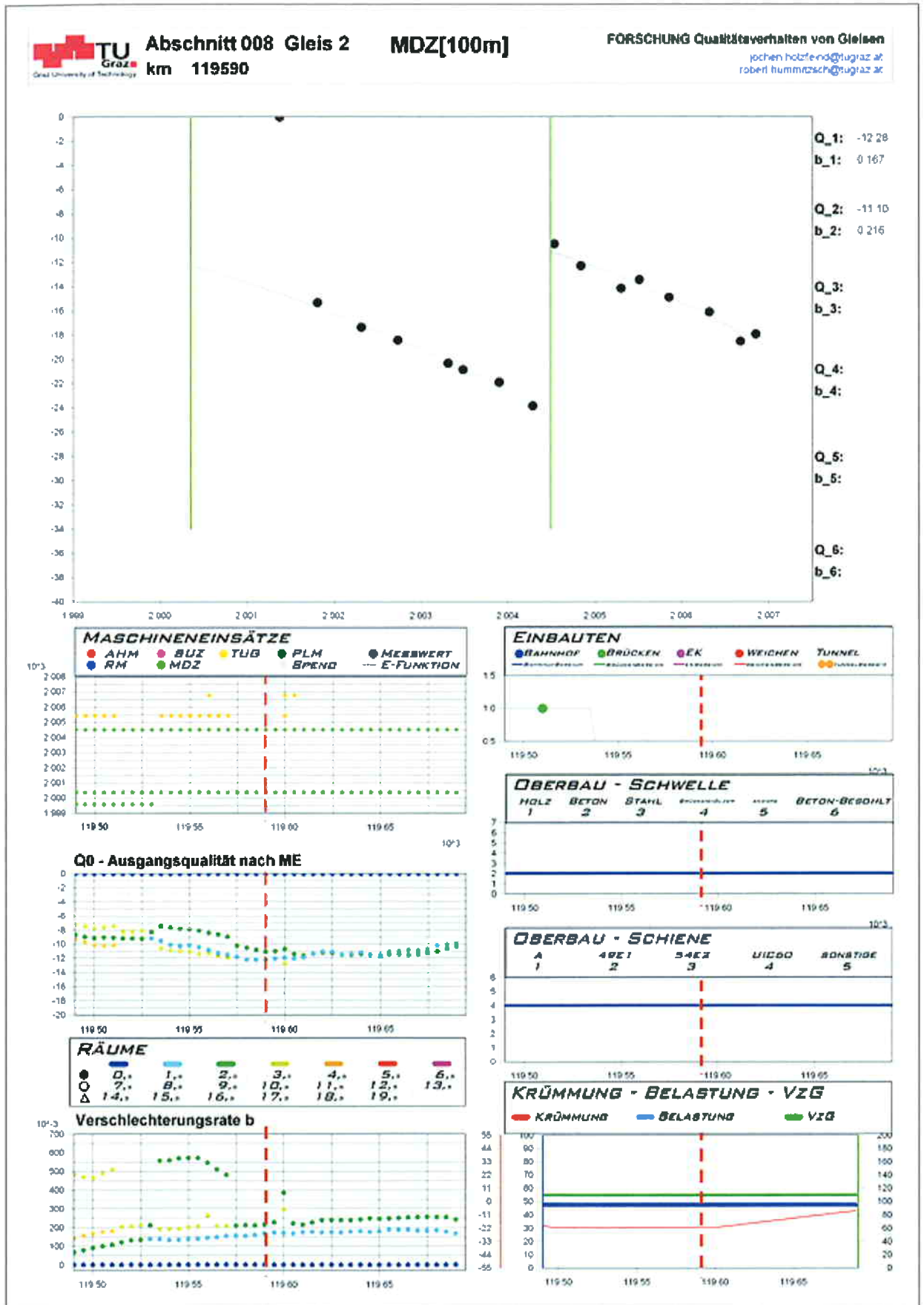


Bild 8: Grafische Darstellung sämtlicher Informationen eines gewählten Querschnitts und dessen Umfeld

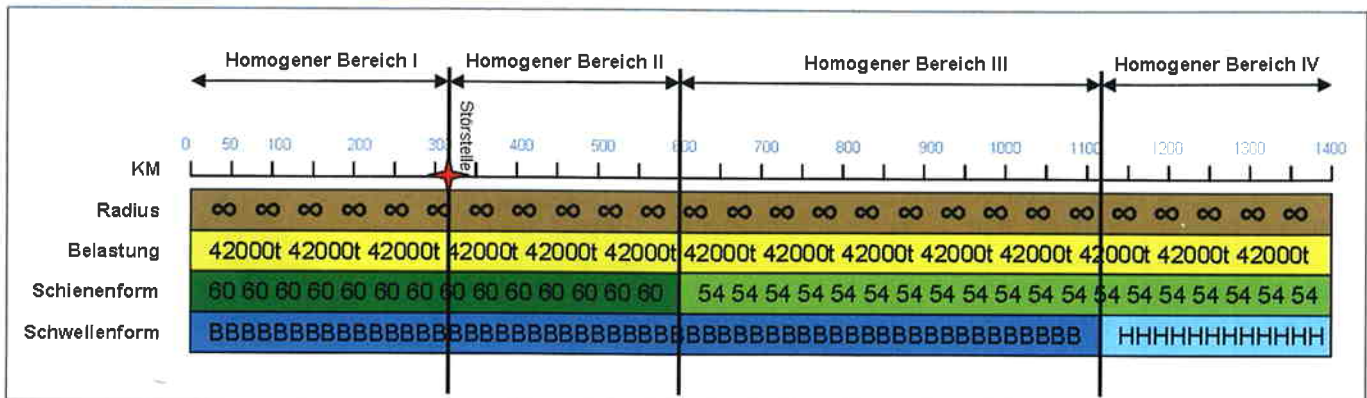


Bild 9: Beschreibung eines „Homogenen Bereichs“

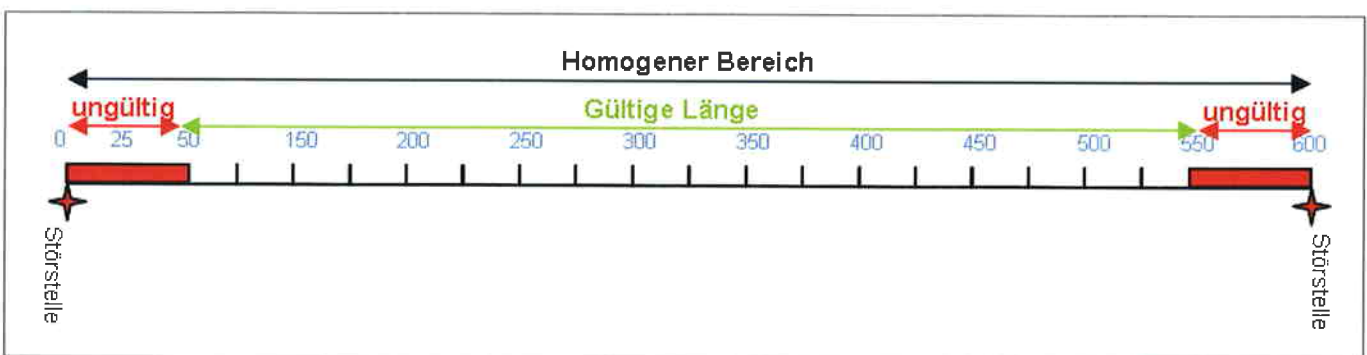


Bild 10: Beschreibung der „Gültigen Länge“

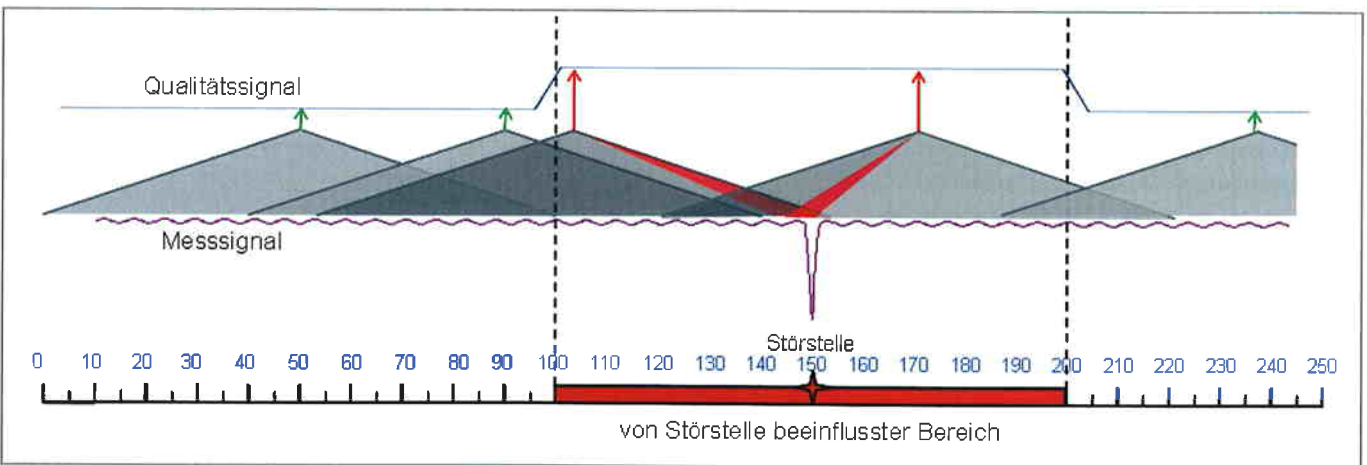


Bild 11: Einflussbereich einer Störstelle bezüglich der Qualitätswerte

und bereits aufgenommenem Regelbetrieb definiert. Als hinlänglich bekannt gilt, dass dieser erste Stopfgang oft zu einem langsameren Verfall der Gleisqualität führt. Jedoch gelingt es erst mittels der errechneten Verschlechterungsfunktionen, dieses Verhalten zu quantifizieren, in einen zeitlichen Zusammenhang zu bringen und als nachvollziehbares Wissen zur Verfügung zu stellen.

Um eine statistische Aussage über den Erfolg des Stabilisierungsstopfens treffen zu können, müssen bestimmte Randbedingungen erfüllt werden:

- Es werden nur Querschnitte mit einer Neulage herangezogen.
- Die Neulage muss nach denselben Kriterien hergestellt werden (maschinelle Herstellung (SUZ) mit Unterbausanierung (AHM)).

- Nach der Neulage muss ein Stopfeinsatz erfolgen.
- Sowohl vor als auch nach diesem Stopfeinsatz muss ein gültiger Verschlechterungsast (mindestens drei Messwerte) vorliegen.

Mithilfe der Analysetools werden die den vorgenannten Kriterien entsprechenden Querschnitte gefiltert und alle Gleisinformationen als Basis für die weitere statis-

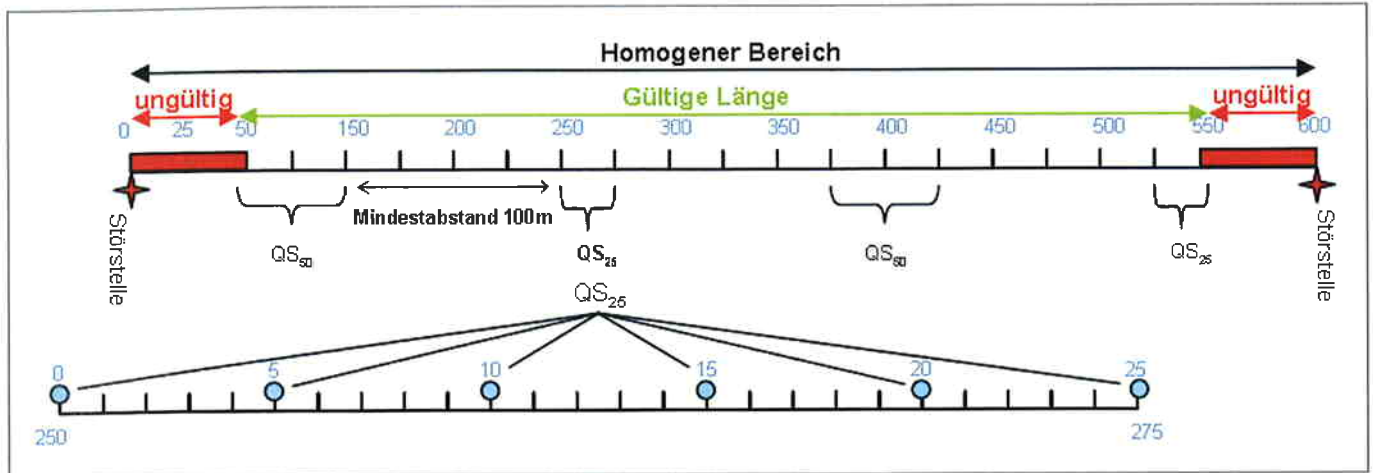


Bild 12: Homogener Bereich, Gültige Länge und Querschnittsfolgen (QS)

tische Betrachtung bereitgestellt. Um die beschriebene Erfahrung zu überprüfen und vor allem einen optimalen Zeitpunkt für das Stabilisierungsstopfen zu finden, wird die Verschlechterungsrate b der beiden direkt aufeinander folgenden, durch den ersten Stopfeinsatz getrennten, Ver-

schlechterungsäste eines Querschnitts gegenübergestellt.

Der in Bild 14 gezeigte Boxplot (Darstellung von Median, 25 %-Quantil, 75 %-Quantil, sowie Minima und Maxima) verdeutlicht, dass ein klarer Zusammenhang zwischen der potenziellen Verbesserung

der Verschlechterungsrate b und der Zeit zwischen Neulage und erstem Stopfgang besteht. Das Hinauszögern dieses Stopfvorgangs über einen Zeitraum von drei Jahren hat keine Verbesserung der Verschlechterungsrate b zur Folge. Im Gegensatz dazu tritt eine maßgebliche Ver-

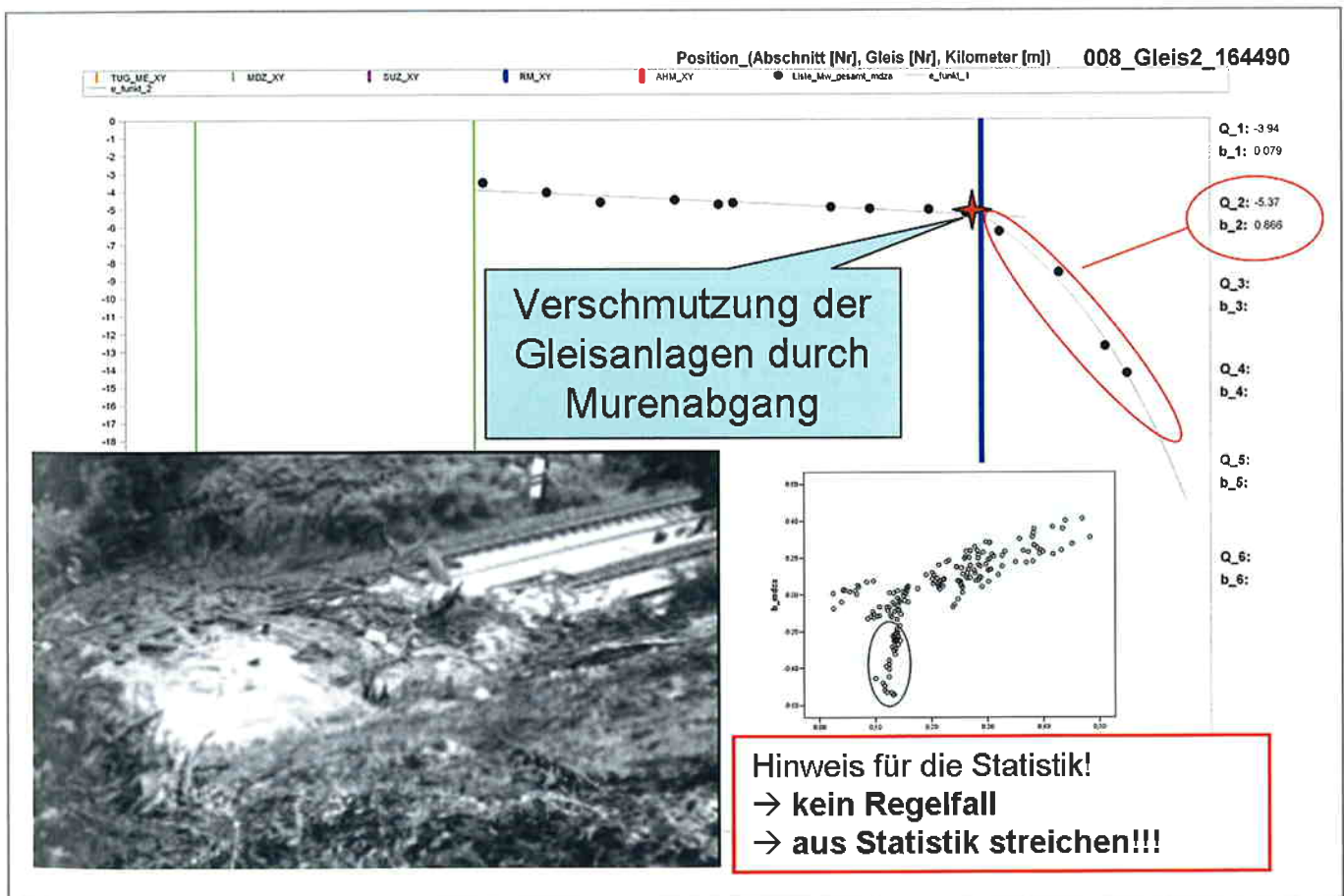


Bild 13: Beispiel für mögliche Fehlinterpretation von Daten

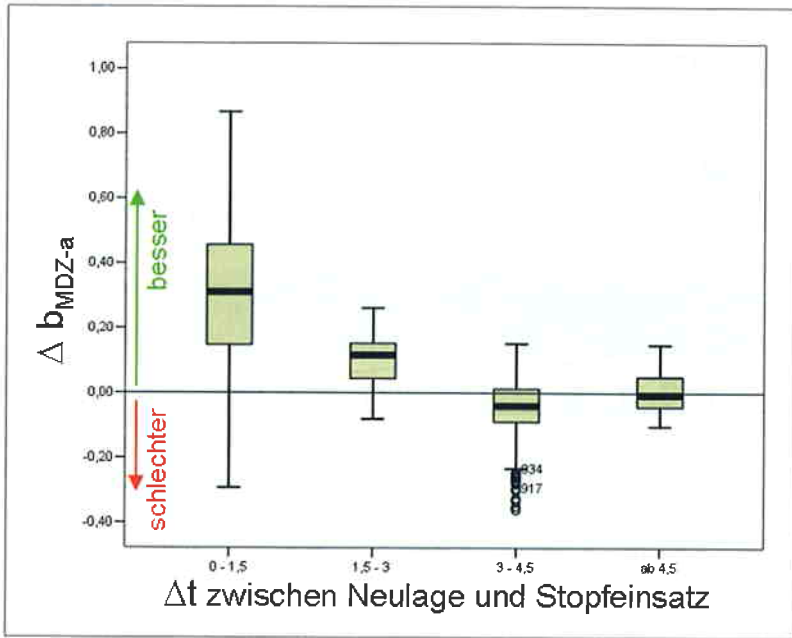


Bild 14: Einfluss des Stabilisierungsstopfens auf die Verschlechterungsrate b (MDZ-a) in Abhängigkeit von der Zeit zwischen Neulage und erstem Stopfeinsatz

besserung der Verschlechterungsrate b innerhalb der ersten eineinhalb Jahre nach Neulage ein. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein sehr gutes Gleisver-

halten durch eine Verschlechterungsrate b von kleiner 0,1 beschrieben wird, gewinnt die Verbesserung um ca. 0,2 bis 0,4, die allein durch die richtige Wahl des

Zeitpunktes für das Stabilisierungsstopfen erreicht wird, enorm an Bedeutung.

8.3 Wechselwirkung Gleislagequalität und Instandhaltung

Nach [7] gelingt es über mehrere Stopfzyklen hinweg, die Gleislagequalität graduell zu verbessern. Dieses Verhalten konnte an mehreren Querschnitten nachgewiesen werden. Bild 15 zeigt einen typischen Fall, wo durch Verdichtung der Instandhaltungsarbeiten (Stopfeinsätze) eine kontinuierliche Verbesserung der Gleislagequalität erreicht wird.

Das Bild 15 zeigt jedoch auch, dass die alleinige Betrachtung der durch einen Maschineneinsatz erreichten Ausgangsqualität des folgenden Verschlechterungsastes für die Beurteilung des Qualitätsverhaltens eines Gleises nicht ausreichend ist. Mit einer beispielsweise durch SIGMA-h oder MDZ-a angegebenen Qualitätsziffer kann nur die Qualität eines bestimmten Zeitpunkts dargestellt werden. Wie das Beispiel realer Mess- und

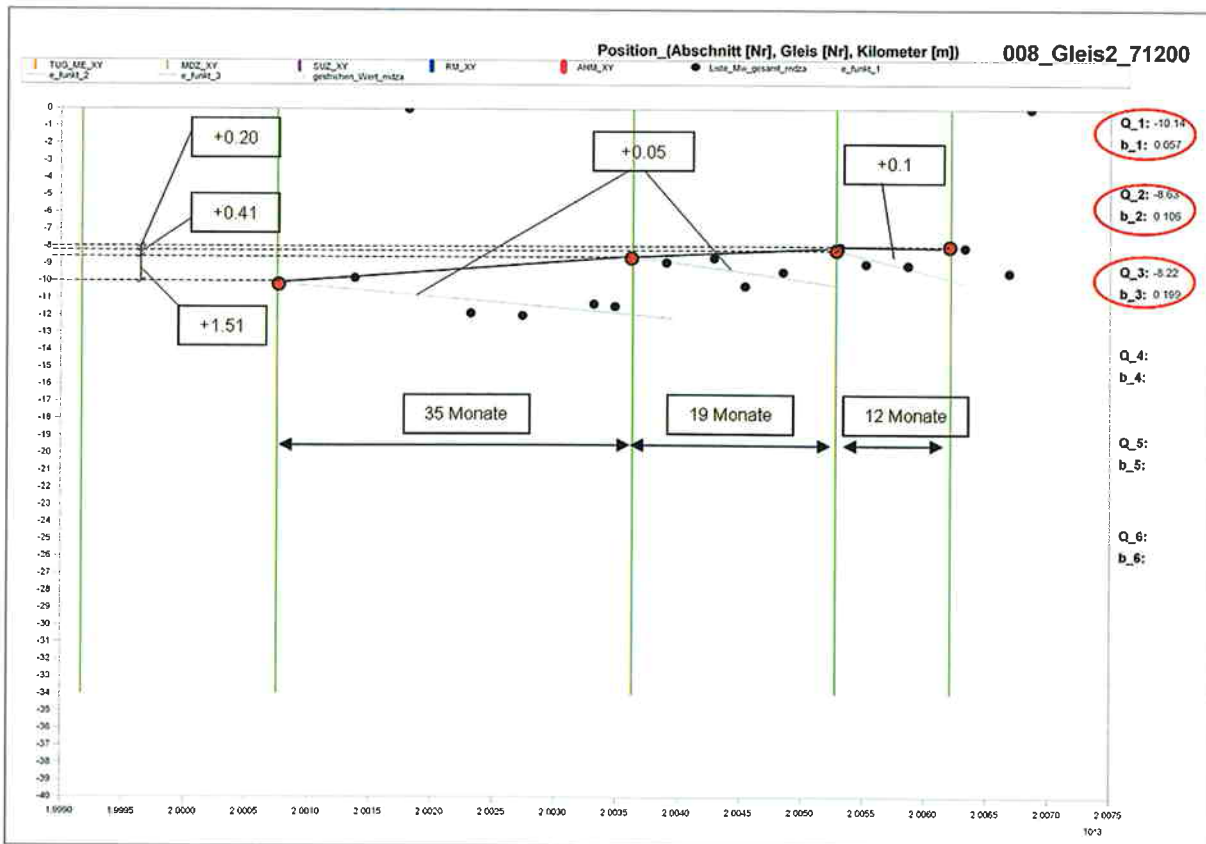


Bild 15: Verbesserung der Gleislagequalität zu Lasten einer höheren Verschlechterungsrate und einem kürzerem Instandhaltungsintervall

Instandhaltungsdaten in *Bild 15* zeigt, kann die Verbesserung der Ausgangsqualität nur unter Inkaufnahme schnellerer Verschlechterung und kürzerer Intervallzeiten der Instandhaltungsarbeiten erreicht werden.

Diese Analysen bestätigen, dass zur Beschreibung einer Gleislagequalität eine aktuelle Statusziffer alleine nicht ausreichend ist, sondern nur durch Angabe der Statusziffer und ihrer zugehörigen Verschlechterungsrate eine ausreichende Beschreibung der Gleislagequalität gelingt. Durch die anschließende netzweite Überprüfung der an wenigen Querschnitten aufgestellten Definition des Qualitätsverhaltens konnte gezeigt werden, dass sich bei verbessernder Gleislagequalität Q die Verschlechterungsrate b in 77 % der Fälle deutlich erhöht.

Durch Fortführung der Verschlechterungskurven aus *Bild 15* zeigt sich in

Bild 16, dass die durch vermehrte Instandhaltung gewonnene Ausgangsqualität in keiner Relation zur Beschleunigung der Verschlechterung steht. Im Fall der Annahme einer konstanten Eingriffsschwelle von $Q = -17$ (MDZ-a) würde der erste Verschlechterungsast (blau) des hier betrachteten Querschnitts ohne eine Instandhaltung diese später erreichen als der dritte mit höherer Ausgangsqualität und um 54 Monate später startende Verschlechterungsast (gelb). Damit sind in diesem Fall die beiden durchgeführten Stopfeinsätze als kontraproduktiv und unwirtschaftlich identifiziert. Bei einer Eingriffsschwelle von $Q = -12$ (MDZ-a) wären die hier durchgeführten Maschineneinsätze jedoch gerechtfertigt.

Daraus zeigt sich deutlich der hohe Stellenwert der Eingriffsschwelle zur Optimierung der Instandhaltung. Das Nutzen dieser Optimierungsmöglichkeit setzt je-

doch voraus, dass maßgebende Zusammenhänge zwischen dem Qualitätsverhalten von Gleisen und vorhandenen Randbedingungen erkannt und explizit ausgedrückt werden. Weitere Zusammenhänge werden derzeit am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TUG mit Hilfe der hier beschriebenen Methodik untersucht.

9 Ausblick

Im Zuge der aktuellen Forschungsarbeiten werden die bereits in der TUG-Datenbank vorhandenen Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf das Verschlechterungsverhalten untersucht. Dabei zeigte sich, dass weitere, derzeit noch nicht betrachtete Parameter maßgebenden Einfluss auf das Verschlechterungsverhalten haben. Diese müssen Schritt für Schritt



Wie Sie jetzt Ihr Geld optimal veranlagen.

Ganz einfach:
Mit voestalpine Schienen.



Investieren Sie in Premium-Schienen von voestalpine und rechnen Sie mit einem unschlagbaren Kostenvorteil auf Jahrzehnte.

RAMS- und LCC-Analysen für kopfgehärtete HSH®-Schienen zeigen

- Einsparung von 35 % und mehr bei den gesamten Lebenszykluskosten • Erhöhung der Schieneneinsatzdauer von 200 % und mehr
- Verringerung der instandhaltungsbedingten Stillstandzeiten um 50 % und mehr

voestalpine Schienen GmbH

www.voestalpine.com/schienen

voestalpine

EINEN SCHRITT VORAUSS.

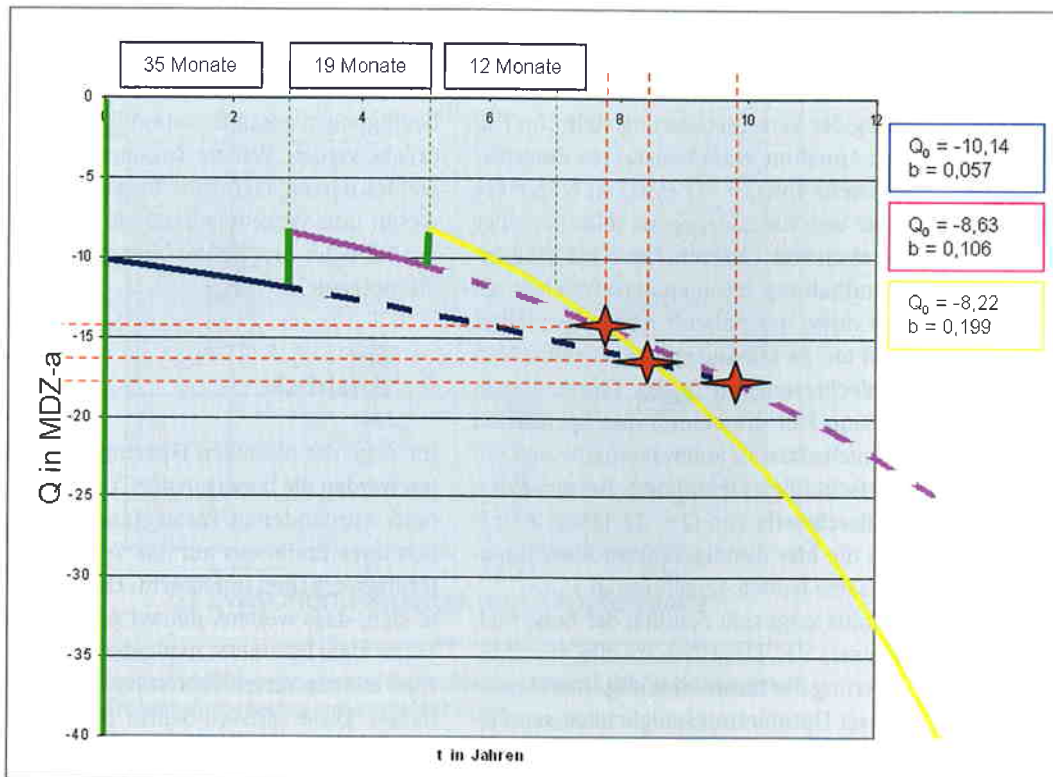


Bild 16: Fortführung realer Verschlechterungskurven eines Querschnitts

identifiziert und in die Datenbank integriert werden.

Die Suche nach neuen Parametern erfolgt an wenigen Einzelquerschnitten. Die dort erkannten Zusammenhänge werden anschließend durch netzweite, statistische Untersuchungen verifiziert. Damit gelingt

es, die Genauigkeit des Prognosemodells zur Beschreibung des Qualitätsverhaltens von Gleisen schrittweise zu erhöhen. Abschließend soll noch der Hinweis auf die Grundlage der Forschungsförderung gegeben werden: Programmlinie „ISB – Innovatives System Bahn“ – eine Initia-

tive des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT).

- A 342 -

(Indexstichworte: Infrastruktur, Eisenbahn-Oberbau, Instandhaltung)

(Bildnachweis: 1 bis 16, Verfasser)



Dipl.-Ing. Jochen Holzfeind (33). Studium des Bauingenieurwesens, Vertiefung Verkehr, an der Technischen Universität in Graz und dem Politecnico di Bari, Italien, bis 2003; Diplomarbeit bei Prof. Rießberger TUG in Zusammenarbeit mit TÜV-Süd-

deutschland/Rail „Schutzzielorientierte Statusanalyse des Systemverbundes Schienenfahrzeug – Tunnelbauwerk – Eisenbahnbetrieb in Bezug auf Brandschutz und Evakuierungssicherheit“. 2003 bis 2004 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TUG, 2004 bis 2005 Projektmitarbeiter Hochleistungsstrecken AG (Zentralraum Kärnten), seit 2005 Projektmitarbeiter ÖBB Bau AG (Zentralraum Kärnten, Koralmbahn), seit 2006 auch Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TUG.

E-Mail: jochen.holzfeind@tugraz.at



Dipl.-Ing. Robert Hummitzsch (28). Studium des Bauingenieurwesens, Vertiefung Verkehr, an der Technischen Universität in Graz und der Universidad Politécnica de Valencia, Spanien, bis 2004; Diplomarbeit bei Prof. Rießberger in Kooperation mit

Jernbaneverket und Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet in Trondheim, Norwegen, "Approaches to Optimising Asset Management of Permanent Way – Economic optimisation of Track Maintenance at Jernbaneverket and ÖBB". Seit 2005 Wissenschaftlicher Projektmitarbeiter am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TUG.

E-Mail: robert.hummitzsch@tugraz.at

Anschrift der Verfasser: Technische Universität Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Rechbauerstraße 12, 8010 Graz, Österreich.

Literatur

- [1] Fendrich, L.: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. Springer, Berlin 2007.
- [2] Hanreich, W.: Moderne Fahrweginspektion mit dem Oberbautechnischen Messwagen EM250. ZEVrail Glas. Ann. Sonderheft ÖVG. 128 (2004) S.18–27.
- [3] Rießberger, K.: Gleisgeometrie und Wirtschaftlichkeit – oder – wie gut muss ein Gleis sein? ÖVG Spezial Band. 41(1998) S.64ff.
- [4] Mlinaric, T.: Long-term Assessment of Track Geometry Quality with the Aim of Maintenance Demand Identification. Dissertation an der Universität Zagreb in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Graz, 2001.
- [5] Veit, P.: Forschungen zur Prognose der Qualitätsentwicklung des Oberbaus. ZEV-rail Glas. Ann. Sonderheft ÖVG. 128 (2004) S. 35–39.
- [6] Bartsch, H.-J.: Taschenbuch mathematischer Formeln. Fachbuchverlag, Leipzig, München 1998.
- [7] Sato, Y.: Analysis on System Behaviour of Railway Track. The 5th World Conference on Transport Research, Yokohama, Japan, 1989.