

EBW



W

Der Einfluss von Unterbau, Untergrund und Wasserwegigkeit auf die Gleislagequalität

Masterarbeit

2011

B

Matthias Landgraf, BSc.
Matrikelnummer: 0530122

Betreuer:
Peter Veit
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.
Dipl.-Ing.
+43 316 873 6217
peter.veit@tugraz.at

E



Danksagung

Ich möchte mich auf diesem Weg herzlich bei all jenen bedanken, die einen Beitrag zur Realisierung dieser Arbeit geleistet haben.

Zu großem Dank bin ich Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Veit und Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Marschnig verpflichtet. Einerseits für ihr großes Vertrauen, welches sie mir im Rahmen der Erstellung dieser Arbeit entgegen gebracht haben, andererseits aber auch für ihren fachlichen Rat im Zuge der Ergebnisinterpretation. Nicht unerwähnt lassen möchte ich auch das gesamte Team des *Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft*, welches immer ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte.

Außerdem danke ich meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Magdalena und Adolf Landgraf, die mir das Studium ermöglicht und mich auf meinem bisherigen Lebensweg maßgebend geprägt, unterstützt und gefördert haben.

Meiner Freundin Marie und meiner Schwester Christina danke ich besonders für die wertvollen Gespräche und verständnisvollen Begegnungen.

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 26.08.2011

Matthias Langpro

Kurzfassung

Aufgrund diverser Beanspruchungen verschlechtert sich die geometrische Lage von Eisenbahngleisen im Laufe der Zeit. Diese sogenannte Gleislagequalität stellt einen der grundlegenden Parameter des Eisenbahnwesens dar, weswegen deren möglichst genaue Kenntnis einen dementsprechenden Stellenwert in der Forschung besitzt. Allerdings verhalten sich verschiedene Streckenabschnitte sehr unterschiedlich. Um diese Verhaltensformen der Gleislagequalität beschreiben zu können, ist es notwendig, sämtliche Rahmenbedingungen zu erforschen und funktionell darzustellen.

Vor allem den Einflussfaktoren Untergrund, Unterbau und Wasserwegigkeit wurde in diesem Zusammenhang bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Um dieses Problem zu beseitigen, gründeten die österreichischen Bundesbahnen im Jahr 2000 die Projektgruppe "Unterbaudiagnose". Diese sollte ein Verfahren entwickeln, welches eine Zustandsbewertung des Bahnkörpers ermöglicht. Mit Hilfe des daraus entstandenen geotechnischen Streckenbandes lässt sich die Dringlichkeit einer eventuell erforderlichen Instandhaltung bestimmen.

Diese Masterarbeit analysiert das geotechnische Streckenband hinsichtlich seiner Aussagekraft im Vergleich zur Gleislagedatenbank der TU Graz. Zusätzlich wird auch versucht, mögliche Auffälligkeiten und Zusammenhänge innerhalb der Datenstrukturen darzustellen.

Abstract

Track quality decreases due to the influence of different forces resulting from traffic load and its effects. Track quality represents one of the basic parameters of railway engineering. Hence, gaining knowledge about its characteristics is one of the research priorities in this field. Track quality on the other hand may vary for different sections of the line.

It is therefore crucial to investigate all the conditions influencing track quality and display them in a functional manner. This allows describing the different characteristics in each section.

In particular, soil, substructure and dewatering of railway constructions are parameters which ought to receive more attention in order to optimize track quality.

Hence, in 2000 the *Austrian Federal Railways* installed a project group to describe and classify the conditions of these parameters. This data source allows a more detailed evaluation of the permanent way. By using these classification data it is possible to determine the necessity and urgency of maintenance work.

The present master thesis explores this recently established system by comparing it with a data base on track quality, provided by the *Institute for Railway Engineering and Transport Economy* of the University of Technology in Graz (Austria).

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung, Zielsetzung, Aufbau der Arbeit	8
1.1	Einleitung	8
1.2	Zielsetzung	9
1.3	Aufbau der Masterarbeit	10
2	Allgemeines	11
2.1	System Gleis	11
2.1.1	Aufbau	11
2.1.2	Lasteinwirkung und -verteilung	13
2.1.3	Tragfähigkeit des Gleises	14
2.2	Gleiskomponenten	15
2.2.1	Gleisschotter	15
2.2.2	Die Planumsschutzschicht	18
2.2.3	Untergrund	22
2.3	Entwässerung des Bahnkörpers	25
2.3.1	Erscheinungsformen des Wassers	26
2.3.2	Oberflächenentwässerung	27
2.3.3	Tiefenentwässerung	29
2.4	Schäden am Bahnkörper	30
2.4.1	Bettungverschmutzung und dessen Folgen	30
2.4.2	Schotterzermahlung	34
2.4.3	Frosthebungen	35
2.5	Instandhaltung und Qualitätssicherung	35
2.5.1	Erfassung und Analyse des Gleiszustandes	37
2.5.2	Der Instandhaltungsplan	41
3	Beschreibung und Aufbereitung der Daten	42
3.1	Geotechnisches Streckenband	42
3.1.1	Geotechnische Begehung	42
3.1.2	Örtliche Erfahrung	43
3.1.3	Aufbau des Datensatzes	44
3.2	Gleislagedatenbank TU Graz	47
3.2.1	Inhalt der TUG-Datenbank	48
3.3	Auswertungsmethoden bzw. Verknüpfung der Datensätze	50
3.3.1	Aufbereitung der Datensätze	50
3.3.2	Statistische Grundlagen	52
4	Streckenbereiche und Datenstrukturen	56
4.1	Beschreibung der untersuchten Streckenbereiche	56
4.1.1	Streckenbereich 1 : Südbahn km 182,400 – 194,400	56
4.1.2	Streckenbereich 2 : Nordbahn km 64,920 bis 73,400	57
4.1.3	Streckenbereich 3 : Salzburg-Tirol Bahn km 172,000 bis 184,000	57
4.1.4	Streckenbereich 4 : Innere Westbahn km 36,800 bis 48,800	58
4.2	Analyse der beiden Datensätze und deren Strukturen	59
4.2.1	Vergleich der Datensätze	59
4.2.2	Herkunft der Datensätze	61
4.2.3	Analyse der GSB – Daten	62
5	Auswertungsergebnisse der Referenzabschnitte	63
5.1	Einfluss der Topographie auf Entwässerung und Gleislageverhalten	63
5.2	Entwässerungsverhalten der betrachteten Referenzabschnitte	65
5.3	Verhalten der einzelnen Parameter gegenüber der Gleislagequalität	68
5.4	Untersuchung der Schadensformen Sutteln, Spritzstöße und Frostaufzüge	70

5.5	Weitere Erkenntnisse	72
5.5.1	Zusammenfassung der Gleislagewerte in 100 Meter Abschnitte	72
5.5.2	Wasservorkommen im Bereich von alten Holzschwellen.....	73
5.5.3	Der Einfluss einer Tragschichte auf das Gleislageverhalten	73
5.6	Behandlung der formulierten Thesen	74
5.7	Vergleich Gleislage – GSB-Zustandszahl	74
6	Schlussfolgerung und Ausblick	77
	Tabellenverzeichnis.....	79
	Abbildungsverzeichnis	80
	Quellenverzeichnis.....	81
7	Anhang	82

1 Einleitung, Zielsetzung, Aufbau der Arbeit

1.1 Einleitung

Die Beanspruchung des Eisenbahngleises durch den Zugverkehr führt im Laufe der Zeit zu einer Verschlechterung der geometrischen Lage. Die Kenntnis der Gleislagequalität und deren Verlaufes ermöglicht eine verbesserte Planung von anstehenden Instandhaltungs- und Re-Investitionsmaßnahmen, weswegen diese Themen zentrale Themen der Forschung und Entwicklung in Österreich sind.

Gemessen wird sie aktuell durch den Oberbaumesswagen EM250, welcher das Hauptnetz der österreichischen Bundesbahnen bis zu viermal jährlich befährt. Aufgrund intensiver Forschungsarbeiten findet derzeit ein Umdenken von der reaktiven zur präventiven Instandhaltung statt. Während die reaktive ein Handeln nach dem Bewerten einzelner, isolierter Messschriebe bedeutet, steuert man mittels einer präventiven Instandhaltung das Qualitätsverhalten über die Zeit. Diese Methode ermöglicht es auch Prognosen über das zukünftige Gleisverhalten zu erstellen, wodurch eine notwendige Instandhaltung bereits im Vorfeld ersichtlich wird.

Allerdings verhalten sich verschiedene Querschnitte im Netz teilweise sehr unterschiedlich: In manchen Fällen werden sehr geringe Verschlechterungsraten festgestellt, während andere Querschnitte schon bald nach einer Instandhaltungsmaßnahme wieder große Lagefehler aufweisen. Um diese unterschiedlichen Verhaltensformen der Gleislagequalität beschreiben zu können, ist es notwendig, sämtliche Randbedingungen, die das Verschlechterungsverhalten beeinflussen, zu erforschen und funktional darstellen zu können. Derzeit existieren über die Ursachen und Auswirkungen dieses stark schwankenden Verhaltens lediglich auf Erfahrung basierte, qualitative Aussagen.

Vor allem den Parametern Untergrund, Unterbau und Wasserwegigkeit wurde hierbei bisher nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Die essentielle Bedeutung einer adäquaten Entwässerung und eines guten Unterbaus wird zwar allseits anerkannt, jedoch ist es bis heute nicht möglich, einen direkten Zusammenhang zur Gleislagequalität herzustellen.

Die österreichischen Bundesbahnen gründeten im Jahr 2000 die Projektgruppe ‚Unterbaudiagnose‘, die ein Verfahren entwickeln sollte, welches eine Ist-Zustand-Erhebung des Bahnkörpers ermöglicht. In diesem Sinne wurde die Grobdiagnose des erweiterten Fahrweges, d.h. des unmittelbaren Fahrweges inklusive all seiner beeinflussenden Faktoren wie Entwässerungsanlagen, Erdbauwerke, vorkommender Wasserarten etc., entwickelt. Mit Hilfe dieses Beurteilungsverfahrens wird der Ist-Zustand dieses erweiterten Fahrweges als sogenanntes geotechnisches Streckenband (GSB) erfasst. Dieses bietet die Möglichkeit, den erfassten Ist-Zustand einer von vier Qualitätsklassen zuzuordnen, wodurch die Dringlichkeit des erforderlichen Handlungsbedarfs bestimmt wird.

Die Vorgehensweise des geotechnischen Streckenbandes beruht jedoch weiterhin zu einem großen Teil auf subjektiver Einschätzung, da mit Gleislagequalität und Georadarinformationen nur wenige gemessene Werte in die Bewertung mit einfließen. Die anderen Zustandsbeschreibungen erfolgen durch geotechnische Begehungen und örtliche Erfahrungen durch den zuständigen ÖBB-Bauhof. Des Weiteren werden diese Parameter wie z.B. nasser Gleisschotter nicht abstuft bewertet, sondern lediglich mit "vorhanden" und "nicht vorhanden" bezeichnet. Zusätzlich führen die Abschnittunterteilung in 100 Meter Abschnitte und die subjektive Sicht der bewertenden Personen zu einem möglicherweise verfälschten Ergebnis, da eine Konstanz der Bewertungen nicht vorausgesetzt werden kann.

Nichtsdestotrotz ist der Ansatz des geotechnischen Streckenbandes der Richtige und ermöglicht die bis dato beste – weil auch einzige – Möglichkeit, die Einflüsse des Unterbaus und der Wasserwegigkeit zu beschreiben. In den nächsten Jahren wird es allerdings notwendig sein, die Ideen und Aussagen des geotechnischen Streckenbandes auf ein wissenschaftliches Niveau zu heben, um die erfassten Parameter mit der Prognostizierbarkeit des Gleises verknüpfen zu können.

Diese Masterarbeit soll hierbei als erster Schritt dienen, in dem das geotechnische Streckenband hinsichtlich seiner Aussagekraft – auch in Verbindung mit der Gleislagedatenbank der TU Graz – untersucht werden soll. Zusätzlich wird auch versucht, mögliche Auffälligkeiten und Zusammenhänge in den Datenstrukturen darzustellen.

1.2 Zielsetzung

Anhand statistischer Auswertungen sollte das geotechnische Streckenband in sich überprüft und auch eine Verknüpfung mit den Daten der Gleislagedatenbank vorgenommen werden. Die grundlegenden Fragen betreffen die Plausibilität und Aussagekraft des GSB, sowie dessen Auffälligkeiten im Vergleich mit der Gleislagequalität.

Um eine objektive Bewertung hinsichtlich der genannten Zielsetzungen zu erreichen, wurden vor Beginn der statistischen Arbeiten folgende Thesen formuliert, die verifiziert bzw. verworfen werden sollen:

1. Die Entwässerung eines Einschnittes ist problematischer als jene in Dammbereichen.
2. Im Anschnitt verfügt die im Einschnitt gelegene Seite sowohl über ein schlechteres Entwässerungs- als auch Gleislageverhalten.
3. Der Zustand der Entwässerung korreliert mit dem Wasservorkommen.
4. Unzureichende oder nicht vorhandene Entwässerung verursacht nassen Gleisschotter und feuchtes Gleisplanum.

5. Die Schadensformen Sutteln, Spritzstöße und Frostaufzüge besitzen einen direkten (negativen) Einfluss auf das Gleislageverhalten.
6. Mit Sutteln versehene Bereiche verfügen über feuchtes und unebenes Gleisplanum.
7. Nicht ausreichende Entwässerung verursacht kürzere Lebensdauern von Holzschwellengleisen.

1.3 Aufbau der Masterarbeit

Ein Teil dieser vorliegenden Masterarbeit umfasst die Beschreibung der theoretischen Hintergründe rund um die Thematik Unterbau, Untergrund und Wasserwegigkeit. Neben den Belastungen, welche die einzelnen Komponenten des Fahrweges erfahren, werden auch deren Materialien und geometrischen Ausführungen näher erläutert. Besonderes Augenmerk wird im weiteren Verlauf auch auf das Thema Wasser im Eisenbahnwesen gelegt. Hierbei werden die vorkommenden Arten des Wassers sowie die Möglichkeiten für deren Ableitung beschrieben. Zusätzlich wird veranschaulicht, welche Schäden aufgrund unzureichender Entwässerung entstehen können bzw. welche Auswirkungen diese auf die Gleislage besitzen können. Abgeschlossen wird dieser theoretische Teil mit dem Thema Instandhaltung und der Umsetzung des auf europäischen Standards basierenden Instandhaltungsplanes in Österreich.

Der zweite Teil der Arbeit beinhaltet die Vorbereitung bzw. die Durchführung der statistischen Auswertungen. Zuerst soll ein Überblick über die verwendeten Datenkörper geschaffen werden, welche einerseits vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz und andererseits von den österreichischen Bundesbahnen zur Verfügung gestellt werden. Im Anschluss daran werden die statistischen Grundlagen erläutert. Der dritte und letzte Teil beinhaltet die Auswertungen selbst sowie die daraus resultierenden Schlussfolgerungen.

2 Allgemeines

2.1 System Gleis

2.1.1 Aufbau

Der gesamte Aufbau einer Gleisanlage besteht aus dem Unterbau und dem darüber liegenden Oberbau. Der Aufbau des Ober- und Unterbaus beeinflusst maßgeblich die mögliche Höchstgeschwindigkeit und die möglichen Achslasten der verkehrenden Eisenbahnfahrzeuge. Der Oberbau enthält zunächst ein Gleisbett, das in der Regel aus Schotter besteht. Auf diesen Schotteroberbau werden in Querrichtung Schwellen gelegt, auf denen die Schienen befestigt werden. Abbildung 1 zeigt den Aufbau eines Gleises in Form eines Anschnittes, der bergseitig durch Abtrag und talseitig durch Auftrag charakterisiert ist. In dieser Darstellung ist insbesondere der Unterschied in der Ausführung der Entwässerungsanlagen (Kapitel 2.3) zwischen Damm und Einschnitt ersichtlich. Die in dieser Abbildung verwendeten Längen-, Höhen- und Verhältnisangaben entsprechen keiner Vorschrift oder Norm, sondern sind lediglich ungefähre Angaben. Diese Angaben beziehen sich auf den Abstand der Böschungskanten (6.000 mm), den Abstand der Bettungskanten (3.300 mm), die Schwellenlänge (2.600 mm), die Dicke des Schotterbettes bis zur Schwellenoberkante (520 mm) und die Neigungen der Bettung (1:1,25) und der Böschung (1:1,5). (Eitel - König GbR 2008)

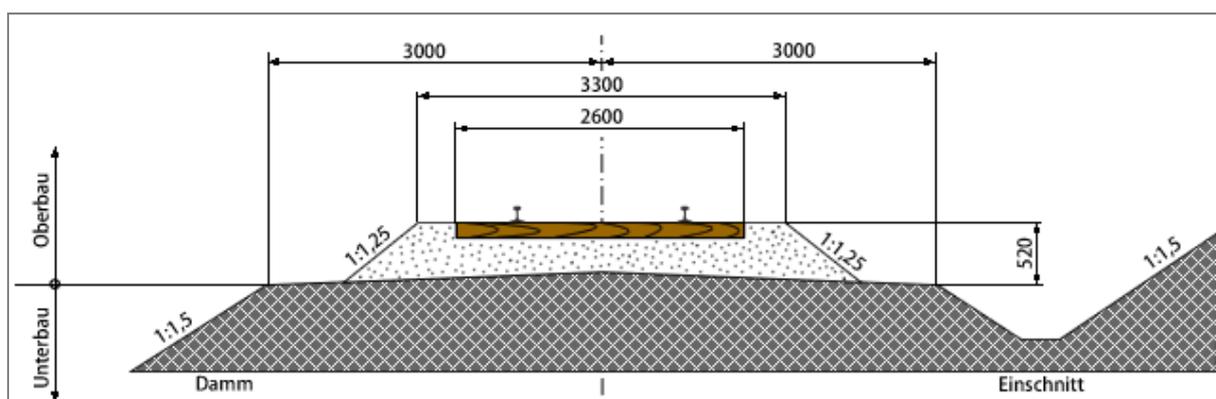


Abbildung 1 Aufbau Gleis (Eitel - König GbR 2008)

Das Eisenbahnrad überträgt vorrangig senkrechte aber auch horizontale und longitudinale Kräfte auf das Gleis. Zusätzlich wirken auf das lückenlose Gleis auch noch Längskräfte aufgrund der Temperaturänderung. Über die Schiene werden diese Kräfte, welche durch Masse, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Eisenbahnfahrzeuges entstehen, auf die Schwellen und weiter auf das Schotterbett übertragen. Die Schwellen bestehen heutzutage in der Regel aus Beton, jedoch sind auch Stahl- und vor allem Holzschwellen im Ein-

satz. Das Schotterbett ist mit einer gewissen Elastizität ausgestattet und überträgt sowohl statische als auch dynamische Belastungen gleichmäßig auf den Unterbau. Des Weiteren zeichnet sich der Schotteroberbau durch eine verhältnismäßig gute Geräuschdämmung sowie die Aufnahme von Schwingungen aus, welche durch den Sinuslauf¹ fahrender Züge entstehen. Außerdem lässt sich ein Schotterbett mit vergleichsweise einfachen Mitteln instandhalten und führt zudem übliche Niederschlagsmengen in den Boden ab. Als wirksame Dicke dieser Schotterbettung gelten in etwa 30 cm zwischen Schwellenunterkante und Planumsschutzschicht. Um eine optimale Haltbarkeit des Gleises zu gewährleisten, muss sichergestellt sein, dass das Schotterbett frei von organischen Stoffen ist und dem Oberwasser, also vorrangig den durch Regen verursachten Wassermengen, standhalten kann. Durch Verunreinigungen des Schotterbettes verringert sich die Reibung zwischen den Schotterkörnern, wodurch die Übernahme der auftretenden Kräfte beeinträchtigt wird.

Der Unterbau bezeichnet nun die Gesamtheit aller Konstruktionen, die Kräfte aus dem Oberbau übernehmen und in den anstehenden Untergrund weiterleiten. Diese Aufgabe können neben den klassischen Formen des Erdkörpers (Geländegleiche, Damm, Einschnitt und Anschnitt) auch eine Reihe von Kunstbauten (z.B. Stützmauern, Flügel- und Futtermauern, Brücken, Überführungsbauwerke) übernehmen. Die technisch bearbeitete und abschließende Fläche des Unterbaus, auf die der Oberbau angebracht wird, wird als Planum bezeichnet. Dieses ist dach- oder pultförmig geneigt, um die Ableitung des Wassers zu gewährleisten (Abbildung 2). Unter diesem Planum befinden sich die Planumsschutzschicht und die Frostschutzschicht, die je nach geotechnischen oder topologischen Erfordernissen vom Unterbau oder direkt vom Untergrund gefolgt werden.

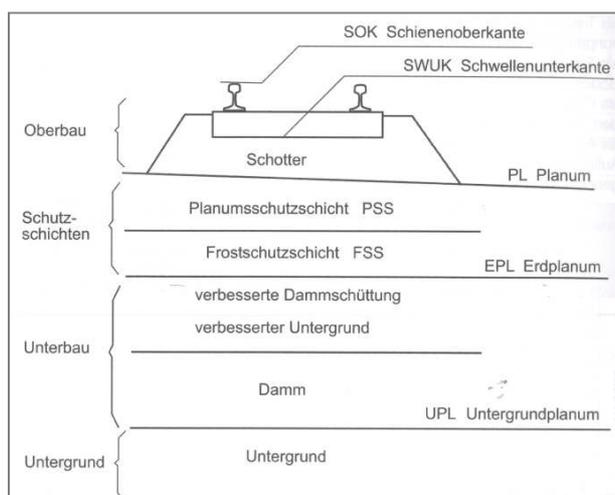


Abbildung 2 Definitionen des Gesamtaufbaus (Lichtberger 2010)

¹ Beschreibt die durch konische Laufflächen und Spurspiel bedingte wellenartige Bewegung der Fahrzeugachsen.

Der Übergang zwischen Unterbau und Untergrund wird zumeist als Übergangsschicht (ÜGS) in Verbindung mit einem Untergrundplanum ausgeführt. Der hier angeführte Untergrund beschreibt den anstehenden Boden oder Fels. (Göbel, Lieberenz 2004)

Die Gewährleistung einer bestmöglichen Qualität im Bereich des Gleisbaus setzt eine gesamtheitliche Betrachtung aller Komponenten des Systems Gleis voraus. Dies bedeutet ein möglichst optimales Zusammenwirken des Fahrzeuges mit seiner Belastung, der Trassierung, des Oberbaus, der Drainage und des Unterbaus zu gewährleisten.

2.1.2 Lasteinwirkung und -verteilung

Die Lastabtragung bei einem Bahnkörper verhält sich als Mehrkomponentensystem. Die auftretenden Radkräfte werden über die sogenannte Hertz'sche Fläche auf die Schiene gepresst und über Schienenfussaufstandsfläche und Schienenbefestigung in die Schwelle weitergeleitet (Abbildung 3, links). Die Druckübertragungsfläche (A_p) zwischen Schienenbefestigung und Schwelle ist bereits 170-mal größer als die Hertz'sche Fläche, wogegen die Flächenpressung (p) mit 170 N/cm^2 bereits lediglich ein Fünfundzwanzigstel beträgt. Bis zum Unterbauplanum wird die Flächenpressung bis auf 10 N/cm^2 vermindert, wodurch sich die auf den Untergrund einwirkende Kraft auf $0,24 \%$ der einwirkenden Radkraft von 125 kN reduzieren lässt. Um diese Kraftreduktion zu gewährleisten, müssen sich allerdings sämtliche Komponenten in einem intakten Zustand befinden. (Lichtberger 2010)

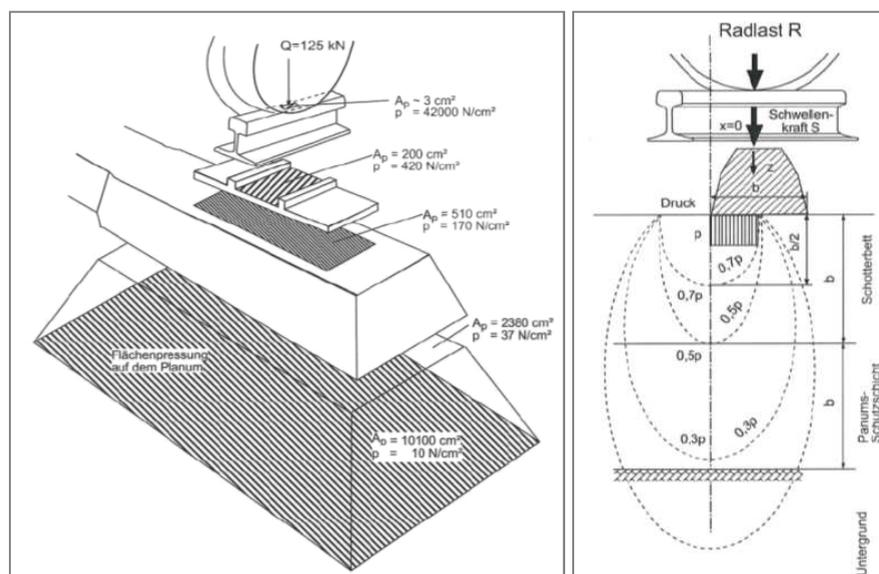


Abbildung 3 Druckverteilung der Radkraft Q (Lichtberger 2010)

Betrachtet man die Druckverteilung in den Untergrund, ausgehend vom Schwellendruck auf den Schotter, so erkennt man eine Abnahme des Druckes um die Hälfte bereits eine Schwellenbreite unter der Schwellenunterkante (Abbildung 3, rechts). Auf den Untergrund wirken demnach noch ungefähr 30% des Druckes auf das Schotterbett (Lichtber-

ger 2010). Die Dimensionierung des Schotterbettes und der Abstand der Schwellen sollte so gewählt werden, dass eine Überschneidung jener Druckverteilungslinien der benachbarten Schwellen über der Unterbaukrone gewährleistet werden kann. Anderenfalls könnte der Untergrund zwischen den Schwellen hochgepresst werden.

2.1.3 Tragfähigkeit des Gleises

Bezüglich der Tragfähigkeit des Gleises ist eine optimale Abstimmung des elasto-plastischen Verhaltens der einzelnen Tragschichtabschnitte (Gleisrost – Gleisschotter – Tragschichte) erforderlich. Da die Vertikalspannung, wie in Kapitel 2.1.2 bereits erläutert, mit zunehmender Tiefe stetig abnimmt, muss im Schichtenaufbau eine zunehmende Steifigkeit hin zum Gleisrost gegeben sein. Diese Steifigkeitszunahme sollte möglichst stetig, also ohne sprunghafte Wechsel, erfolgen. (Auer et al. 2007)

Um die Steifigkeit von Böden zu beschreiben, verwendet man die sogenannten Verformungsmoduli E_v , die einen wichtigen Kennwert für die Qualitätssicherung im Erdbau darstellen. Gewonnen werden diese aus dem Plattendruckversuch, wobei eine starre Lastplatte auf dem Prüfplanum aufgelegt und belastet wird. Die dabei auftretenden Setzungen werden gemessen und auf der Last-Setzungslinie den verwendeten Spannungen gegenübergestellt, wodurch der jeweilige Verformungsmodul E_v ermittelt werden kann. Je nach Art der Lasteintragung wird dabei zwischen dem statischen und dem dynamischen Plattendruckversuch unterschieden. Der statische Verformungsmodul E_{v1} wird nach dem erstmaligen Aufbringen der Last ermittelt, wobei am Prüfplanum irreversible plastische Setzungen zurückbleiben. Die Zweitbelastung liefert den E_{v2} , welcher größer ist, da während der Erstbelastung eine gewisse Nachverdichtung eintritt. Ist der Unterschied zwischen E_{v1} und E_{v2} zu groß, kann auf eine mangelnde Verdichtung beim Materialeinbau geschlossen werden, weshalb das Verhältnis E_{v2}/E_{v1} ebenfalls eine wichtige Kenngröße darstellt, die je nach Dichte des Bodens einen Wert von ungefähr 2,5 nicht überschreiten darf. (Göbel, Lieberenz 2004)

Der dynamische Plattendruckversuch wird mit dem sogenannten leichten Fallgewichtsgerät (LFG) durchgeführt und als dynamischer Verformungsmodul E_{vd} bezeichnet. Dabei wird eine kurzzeitige, genau definierte Stoßbelastung über eine starre Lastplatte auf das Prüfplanum ausgeübt. Diese Art der Qualitätskontrolle ist vor allem bei Verkehrswegebau äußerst beliebt, da sie eher der Verkehrsbelastung entspricht als der statische Plattendruckversuch. Außerdem beträgt der zeitliche Aufwand nur wenige Minuten, weshalb neben der Zeitersparnis auch der Vorteil einer Möglichkeit des direkten Eingriffes in den Bauablauf besteht. (Göbel, Lieberenz 2004)

Die folgende Abbildung 4 zeigt einen günstigen Verlauf dieses dynamischen Verformungsmoduls von der Schwellenunterkante bis zu einer Tiefe von 1,2 m – also bis in den Untergrund.

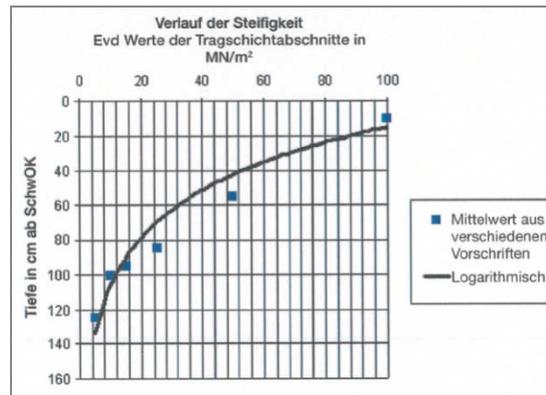


Abbildung 4 Günstiger Tragschichtenaufbau der Steifigkeit (Auer et al. 2007)

Die in Abbildung 4 ersichtlichen blauen, viereckigen Punkte beschreiben die Soll-Werte als Mittelwerte von verschiedenen Erdbau-Vorschriften. Die schwarze, logarithmische Kurve beschreibt eine optimale, stetige Zunahme des dynamischen Verformungsmoduls in Richtung des Gleisrostes.

2.2 Gleiskomponenten

In diesem Kapitel werden sämtliche für den weiteren Verlauf dieser Arbeit relevanten Komponenten des Gleisaufbaues näher erläutert. Es handelt sich dabei vordergründig um die physikalischen und mechanischen Eigenschaften und die möglichen baulichen Maßnahmen im Bezug auf den Gleisschotter, das Planum und den Untergrund.

2.2.1 Gleisschotter

Der Gleisrost ist schwimmend im Schotterbett gelagert, wodurch die statische und dynamische Belastung im Laufe der Zeit eine Verschlechterung der Gleislage bewirkt. Der Vorteil dieser schwimmenden Lagerung besteht allerdings in der Möglichkeit, die Gleislage mit geringen Kosten durch vollautomatisierte Oberbaumaschinen berichtigen zu können.

Anforderungen

Die Aufgaben des Schotterbettes liegen

- I in einer möglichst gleichmäßigen Übertragung des Schwellendruckes auf den Untergrund,
- I im großen Widerstand gegen Längs- und Querverschiebungen der Schwellen,
- I in der leichten Wiederherstellung der Gleislage nach deren Veränderung,
- I in der guten Luft- und Wasserdurchlässigkeit zwecks Erhaltung der Tragfähigkeit des Untergrundes,

- I in der Gewährleistung der Gleiselastizität zur Minimierung der dynamischen Kräfte und
- I in der Gewährleistung von Korrekturmaßnahmen am Gleis durch Stopf- und Richtarbeiten.

(Lichtberger 2010)

Verhalten im Betrieb

Der einzubauende Gleisschotter sollte außerdem frei von Beimengungen wie Lehm oder Erde sein und eine kantige Form besitzen, da Kantkorn eine bessere Scherfestigkeit gegenüber dem Rundkorn besitzt und somit eine höhere Druckfestigkeit und einen höheren Querverschiebewiderstand aufweist.

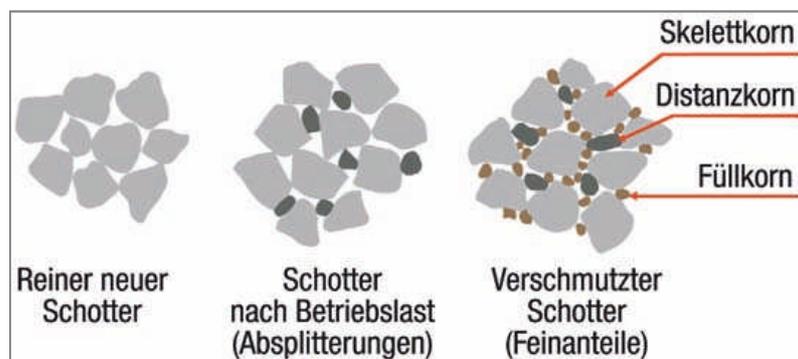


Abbildung 5 Schematische Darstellung Skelettkorn, Distanzkorn und Füllkorn (Klotzinger 2008)

Der Abrollvorgang des Rades auf der Schiene bewirkt vor dem Erreichen der Schwelle ein geringfügiges Anheben und beim Überrollen ein schlagartiges Aufsetzen der Schwelle auf den Schotter (Abhebewelle), wodurch es zu einer Absplitterung der Schotterkörnern an den Berührungspunkten kommt. Diese sogenannten Distanzkörner (Abbildung 5) setzen sich in den Hohlräumen zwischen den Schotterkörnern fest und sorgen anfangs durch die Vermehrung von Kontaktflächen noch für eine Erhöhung der Scherfestigkeit. Durch weitere Belastung nimmt die Menge der Distanzkörner allerdings zu und in weiterer Folge bildet sich feineres Material (Füllkorn), das schlussendlich die Skelettkörner umschließt. Dieser Vorgang bewirkt einen kleineren inneren Reibungswinkel des Materials und einen damit verbundenen Verlust der Scherfestigkeit und somit auch der Tragfestigkeit. (Klotzinger 2008)

Befindet sich das Schotterbett in einem derart fortgeschrittenen Stadium der Verschmutzung, sollte eine Schotterbettreinigung durchgeführt werden, um die Gefahr eines Grundbruchs zu vermeiden.

Bettungsquerschnitt

Die Neigung des Schotterbettes wird für gewöhnlich mit einem Höhen-Längen-Verhältnis von 1:1,25 ausgeführt (Abbildung 6). Die Breite des Schotterbettes ist insofern von Be-

deutung, da diese den Verschiebewiderstand der Schwellen in der Schwellenlängsachse wesentlich beeinflusst. Aus diesem Grund sollte der Vorkopf, der den Abstand zwischen dem Schwellenende – dem sogenannten Schwellenkopf – bis zum Beginn der Bettungsflanke beschreibt, mindestens 45 cm betragen. (Klotzinger 2008)

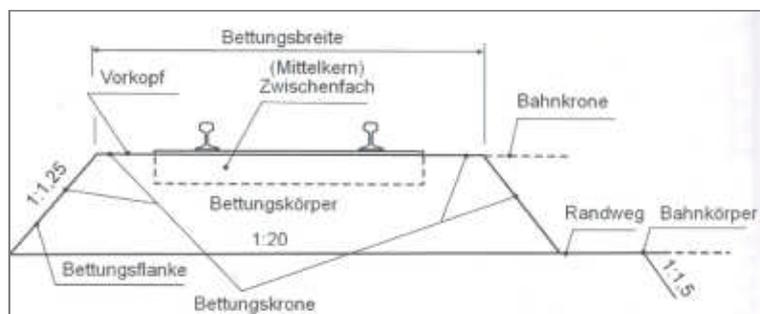


Abbildung 6 Bettungsquerschnitt (Lichtberger 2010)

Um eine möglichst günstige Übertragung der Betriebslasten zu erzielen, sollte eine möglichst große Bettungsstärke angestrebt werden. Deren Größe muss eine Überschneidung der Druckverteilungslinien der Schwellen über dem Planum gewährleisten (Abbildung 7), da ansonsten der Untergrund zwischen den Schwellen hochgepresst werden kann. Die folgende Abbildung zeigt außerdem, wie die aufgrund der Radlast erzeugte Schienendurchbiegung die auf die Schwellen auftretende Belastung verteilt. Ersichtlich wird dabei, dass die direkt belastete Schwelle weniger als die Hälfte der auftretenden Einzelkraft übernimmt, wodurch eine annähernd kontinuierliche Belastung für den Untergrund erreicht werden kann. Der in Europa übliche Schwellenabstand n beträgt 60 cm bei einer Schwellenbreite von 26 cm. (Klotzinger 2008)

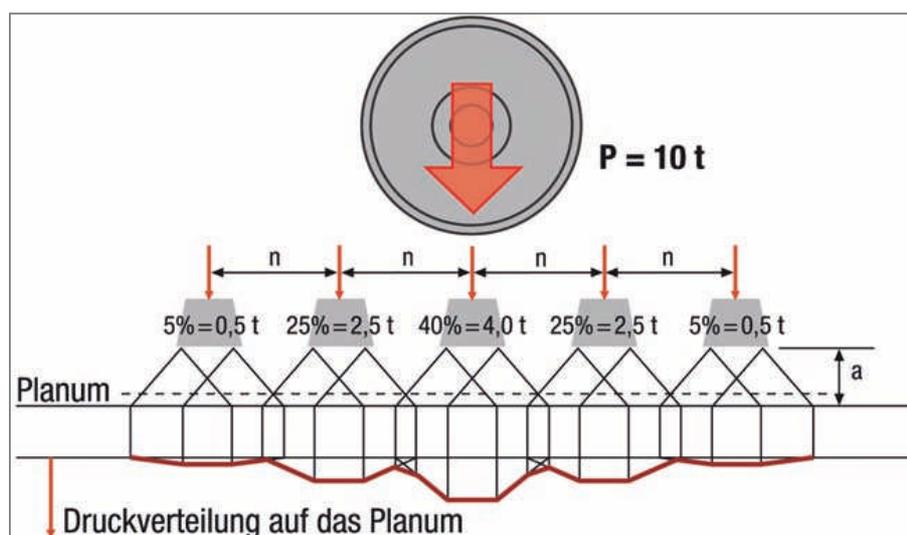


Abbildung 7 Druckverteilung unter einer Einzellast von 10 Tonnen (Klotzinger 2008)

Als mindeste geforderte Dicke a der Bettung kann laut (Lichtberger 2010) 30 cm für bestehende und 40 cm für Neubaustrecken angenommen werden. Diese Mindestanforde-

rungen beziehen sich auf die nicht überhöhte Schiene und liegen zwischen Schwellenunterkante und Planum. Schienen, die sich in Kurvenbereichen befinden und deswegen überhöht werden, benötigen eine größere Mächtigkeit und eine adäquate Verbreiterung des Schotterbettes.

2.2.2 Die Planumsschutzschicht

Das Planum ist die obere Begrenzungsfläche des Unterbaus und stellt als solche die direkte Kontaktfläche zum Oberbau dar. Es ist eine technisch bearbeitete Oberfläche und dient als Auflager der Bettung (bei Schotteroberbau) oder der Tragplatte, wenn der Oberbau als ‚Feste Fahrbahn‘ ausgeführt ist. Eine gleichmäßige Herstellung des Planums ist – wie beim Unterbau – unbedingt erforderlich, um ungleichmäßige Setzungen und somit punktuelle Gleislagefehler zu verhindern. Aus diesem Grund ist es notwendig, nachträgliche Störungen wie zum Beispiel den Einbau von Leitungen zu unterlassen, was vor allem im Stationsbereich bedacht werden sollte, da in diesem Bereich die Herstellung von Künetten u.ä. üblicherweise öfter benötigt wird als auf der freien Strecke. (Rießberger 2006)

Zwingend notwendig ist der Einbau einer Planumsschutzschicht (PSS) wenn entweder das Planum nicht ausreichend tragfähig ist, der Schotter nicht in ausreichender Qualität geliefert werden kann oder ein Schutz des Planums gegen Frost erforderlich ist (Göbel, Lieberenz 2004).

Bemessung

Die Dicke der Schutzschicht muss derart gewählt werden, dass einerseits die geforderte Tragfähigkeit erreicht und andererseits ein möglicher frostempfindlicher Boden geschützt wird. Die größere Dicke der Bemessung aus Planumsschutzschicht (PSS) und Frostschutzschicht (FSS) ist daher maßgebend, um beide Kriterien zu erfüllen. Neben dem geotechnischen Aspekt ist auch die vorgesehene Streckengeschwindigkeit und -belastung ein maßgebliches Kriterium der Bemessung einer Schutzschicht.

Die Bemessung auf Frost muss erfolgen, wenn ein frostempfindlicher Untergrund ansteht, da auch bei einer funktionsfähigen Entwässerung das Eindringen von Wasser nicht gänzlich unterbunden werden kann. Deshalb sind die Frostsicherungsmaßnahmen darauf ausgerichtet, die Temperaturen im frostempfindlichen Untergrund nicht unter die Gefriergrenze fallen zu lassen. Erreicht werden kann dies, wie gesagt, durch die Anordnung einer FSS aus frostsicherem, nicht bindigem Material oder einer Schotterbettungsdicke von mindestens 50 cm. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, zwischen der Schotterbettung und der Schutzschicht eine Wärmedämmschicht aus Materialien mit extrem niedriger Wärmeleitfähigkeit einzubauen. Prinzipiell wird zwischen einer teilweisen Frostsicherheit,

die eine begrenzte Frosteinwirkung in strengen Wintern zulässt, und einer vollständigen Frostsicherheit unterschieden. (Lichtberger 2010)

Die PSS begrenzt insbesondere elastische Verformungen und ermöglicht eine Ableitung und Verteilung der Spannung aus der Betriebslast ohne schädliche Verformungen des Planums. Die Dicke der Tragschichte d_{TS} hängt maßgeblich vom Verformungsmodul des Planums (E_{PL}) und des Erdplanums (E_{EPL}) ab (Abbildung 8). Eine weitere wichtige Kenngröße ist der Eigenverformungsmodul E_0 .

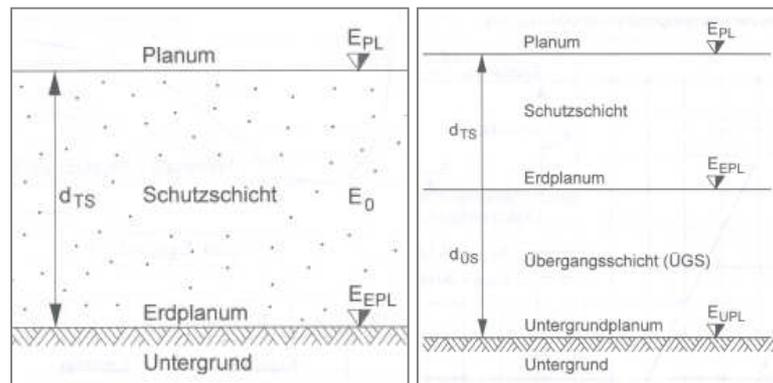


Abbildung 8 Bemessung der PSS (Göbel, Lieberenz 2004)

Die Mächtigkeit der Schutzschichte soll nun so gewählt werden, dass sowohl die Regelanforderung an die Steifigkeit des Planums als auch den in Kapitel 2.1.3 erläuterten stetigen Steifigkeitsanstieg gewährleistet ist. Herrscht ein tragfähiger Untergrund vor, so reicht die Bemessung einer solchen Schutzschicht aus (Abbildung 8, links). Sollte der Verformungsmodul der Erdplanums E_{EPL} allerdings weniger als 15 MN/m^2 betragen ist der Einbau einer Übergangsschicht (Abbildung 8, rechts) in Betracht zu ziehen um den geforderten Steifigkeitsverlauf zu erreichen. Für diese Übergangsschicht (ÜGS) können alle Materialien eingesetzt werden, die auch für FSS geeignet sind. Dadurch wird in diesem Fall eine Bemessung hinsichtlich Frostsicherheit nicht mehr benötigt. (Göbel, Lieberenz 2004)

Die PSS soll eine Mindestdicke von 20 cm aufweisen (Lichtberger 2010). Bei Dicken über 30 cm sind die Einbringung und Verdichtung in zwei Lagen auszuführen.

Tragfähigkeit, Verdichtung und Filterstabilität

Die Tragfähigkeit des Gleisplanums wird, wie bereits in Kapitel 2.1.3 beschrieben, durch die Verformungsmodule gemessen. Maßgebend für die Qualität und Leistungsfähigkeit einer Tragschichte ist die Art der Verdichtung, wodurch die optimale Lagerungsdichte erreicht werden kann. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die dichtest mögliche Lagerung der Körner gelegt, um eine gleichmäßige Lastübertragung (Korn-zu-Korn-Spannung) gewährleisten zu können. Der dynamische Verformungsmodul des Erdplanums (Abbildung 8) sollte zwischen 5 und 15 MN/m^2 betragen, wodurch das Gleisplanum zwei-

bis fünffach höhere Werte gegenüber dem Erdplanum erreicht. Andernfalls ist eine Bearbeitung bzw. Verstärkung des Untergrundes oder eine entsprechend dickere Planumschutzschicht zu berücksichtigen. Die bestehende Korrelation dieser beiden Verformungsmodule ist in Abbildung 9 an den hellblauen Punkten ersichtlich, welche die E_{vd} -Werte des Gleisplanums mit den dazugehörigen E_{vd} -Werten des Erdplanums veranschaulichen.

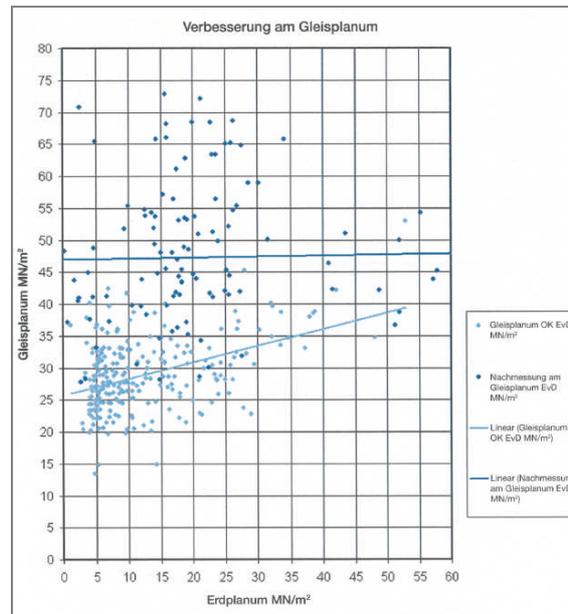


Abbildung 9 Verformungsmodul E_{vd} des Erd- und Gleisplanums (Auer et al. 2007)

Die dunkelblauen Werte der oben angeführten Abbildung 9 zeigen den Effekt der Nachverdichtung durch Messungen der Tragfähigkeit 2000 Tage nach dem Tragschichteinbau. Jene tritt auf, weil es anfangs zu einer Austrocknung des Planums kommt, welche zu einer Verdichtung der Staubteilchen in den Berührungspunkten und damit zu einer Vergrößerung der wirksamen Fläche der Lastübertragung führt, wodurch eine Steifigkeitserhöhung verursacht wird. Die Kornumlagerung unter Betriebslast bewirkt langfristig ebenfalls eine Steifigkeitszunahme, weswegen 2000 Tage nach dem Tragschichteinbau durchschnittliche E_{vd} -Werte des Gleisplanums von 45-50 MN/m^2 erreicht werden. (Auer et al. 2007)

Die erreichbare Tragfähigkeit von Erdbauwerken ist direkt von deren Dichte abhängig. Eine große Dichte des Bodens bewirkt dabei eine höhere Tragfähigkeit und damit geringere Verformungen, weswegen in den Vorschriften eindeutige Dichteanforderungen vorgegeben sind. Ausgedrückt wird die Dichte des Bodens durch den Verdichtungsgrad D_{pr} . Im Allgemeinen versteht man unter der Verdichtung eine Verringerung des Porenanteils und eine Erhöhung der Trockendichte ρ_d durch mechanische Einwirkung. Die erreichbare Dichte ist dabei für jeden Boden unterschiedlich und hängt hauptsächlich von der Kornzusammensetzung und dem Wassergehalt ab. Deswegen wird für das vorliegende Bodenmaterial mittels dem genau definierten und im Labor durchgeführten Proctorversuch,

der optimale Wassergehalt w_{opt} und die größtmöglich erreichbare Trockenrohdichte ρ_{pr} ermittelt. Das Verhältnis zwischen der auf der Baustelle bei optimalem Wassergehalt erreichten Trockendichte ρ_d und der laut Proctorversuch möglichen Trockenrohdichte ρ_{pr} beschreibt den Verdichtungsgrad.

$$D_{pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{pr}}$$

Dieser sollte bei Erdbauwerken üblicherweise zwischen $D_{pr} = 0,95$ bis $1,00$ liegen. Wenn sehr schwer verdichtbare Böden anstehen oder Zweifel an der Erfüllung der Verdichtungsanforderungen bestehen, dann wird eine Probeverdichtung an der Baustelle empfohlen. (Göbel, Lieberenz 2004)

Eine weitere wichtige Eigenschaft des PSS Materials ist die Filterstabilität, die verhindert, dass sich verschiedene Bodenschichten durch Einwandern von Bodenkörpern miteinander vermischen. Das PSS-Material soll so verdichtbar sein, dass weder Gleisschotter von oben noch aufgeweichter Untergrund von unten in die PSS eindringen kann, was durch die Einhaltung der Filterregeln von Terzaghi erreicht wird.

Verstärkung des Planums

In den letzten Jahrzehnten wurden mehrere Verfahren angewandt und getestet, um das Planum entweder in Verbindung mit einer PSS oder ohne einer PSS zu verstärken. Ein Versuch war der Einbau von Pflasterungen oder Betonplatten, wodurch allerdings weder das Setzungsverhalten noch die Frostsicherheit nachhaltig verbessert werden konnte. Der Einbau von luftdichten Folien war nur kurzzeitig ein Erfolg, denn langfristig gesehen weichte das Kondenswasser den unterhalb anstehenden Boden zunehmend auf. Auch die chemische Bodenumwandlung bringt im Eisenbahnwesen im Gegensatz zum Gebrauch auf wenig befahrenen Straßen lediglich vorübergehende Erfolge. Der mit Kalk vermischte Lehmboden nimmt zwar eine krümelige Struktur an, welche zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit führt, allerdings werden diese Krümel durch die Belastung im Bahnverkehr wieder zermahlen. (Lichtberger 2010)

Als optimale Lösungen kristallisierten sich der Einbau der bereits erläuterten Übergangsschichte (Abbildung 8) und die Verwendung von Geokunststoffen heraus. Letztere beschreiben alle aus Kunststoffen hergestellten Flächengebilde, welche in der Geotechnik Anwendung finden. Im Eisenbahnbau werden sie seit Beginn der 70er Jahre verwendet und finden sich aktuell im Aufbau der meisten Eisenbahnstrecken wieder. Geokunststoffe sind Vliese oder Gitter, die thermisch verbunden oder vernadelt werden. Hergestellt werden sie aus unverrottbaren Kunststoffen wie Polyester (PES), Polypropylen (PP) oder Polyethylen (PE-HD). Eingebaut werden diese auf dem Erdplanum (Abbildung 10), also zwischen der PSS und dem anstehenden Boden und wirken dabei meist als Trenn-, Filter-, und Dränelement. Die für diesen Zweck verwendeten Vliese verhindern Vermischungen der angrenzenden Bodenschichten und führen dem Quergefälle entsprechend das anfal-

lende Oberflächenwasser ab. Um diese Eigenschaften zu gewährleisten, besitzen jene Elemente eine Masse von mindestens 250 g/m². Geokunststoffe können allerdings auch als Bewehrungselement eingesetzt werden, wofür man gestreckte, gewebte oder gelegte Geogitter verwendet. Durch die Struktur dieser Geogitter wird eine starke Verzahnung des Korngemisches der PSS mit dem Gitter erreicht, wodurch die Verformungen des Gesamtsystems verringert werden können. Durch die offene Struktur besitzen sie allerdings keine Trenn- und Filterfunktion, was aber durch den Einbau von Verbundstoffen kompensiert werden kann. (Göbel, Lieberenz 2004)

Geometrische Ausführung

Laut den Anforderungen der österreichischen Bundesbahnen sollte die Schutzschicht zwischen 30 und 50 cm mächtig sein und an den Seiten mindestens 0,5 m über das Schotterbett hinausragen (Abbildung 10). Etwaige Geokunststoffe sind mit einer Überlappung von 50 cm herzustellen und müssen mindestens 10 cm über das Ende der Tragschichte reichen, während das Quergefälle des Planums mit einer Neigung von 5 % oder einem Verhältnis von 1:20 ausgeführt wird. Die Planumsflanken sind mit 1:1,5 herzustellen.

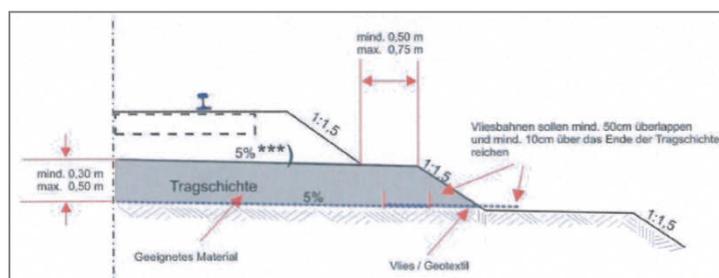


Abbildung 10 Ausführung PSS mit Geokunststoff (Vlies) (Auer et al. 2007)

Der Einbau der Schutzschicht soll über den Querschnitt und auch über längere Streckenabschnitte möglichst einheitlich ausgebildet sein, um möglichst homogene Tragfähigkeitsverhältnisse zu erreichen. Eine notwendige Dickenänderung von Schutzschichten ist durch keilförmige Verziehungen von wenigstens 10 m Länge auszugleichen (Göbel, Lieberenz 2004), was auch für den Beginn und das Ende eines Einbauabschnittes gilt.

2.2.3 Untergrund

Nicht ausreichende Tragfähigkeit des Untergrundes kann im Laufe der Zeit durch Kornumlagerungen von bindigen und nicht bindigen Böden, die aufgrund der Lastwechsel durch die Eisenbahnfahrzeuge herbeigeführt werden, zu plastischen Verformungen führen. Bindige Böden besitzen dabei zusätzlich die Eigenschaft ihr Volumen durch das Auspressen des Porenwassers zu vermindern, wodurch sich Mulden am Planum bzw. am Erdplanum (Abbildung 8) bilden, die sich direkt auf die Ebenheit der Gleislage auswirken können.

Bodenarten

Die grobe Unterscheidung der Bodenarten erfolgt in

- I grobkörnige Böden (engl.: coarse-grained soils)
- I feinkörnige Böden (fine-grained soils)
- I organische Böden (organic soils).

(Lichtberger 2010)

Als grobkörnig werden jene Böden bezeichnet, deren Teilchen mit bloßem Auge unterscheidbar sind. Dieses Kriterium beinhaltet Felsbrocken mit einem Korndurchmesser größer als 300 mm, runde oder eckige Pflastersteine (75-300 mm), Kies (5-75 mm) und Sand (0,06-5 mm). Im Gegensatz zu feinkörnigen Böden, wie z.B. Schluffen, bilden Kiese und Sande im trockenen Zustand ein Haufwerk von lose aufeinanderliegenden Körnern und werden daher als nicht bindig, rollig oder locker beschrieben. Grobkörnige Böden besitzen einen Feinkornanteil² von unter 5 %, während Böden mit einem Feinkornanteil zwischen 5 % und 40 % zu den gemischt-körnigen Böden gezählt werden.

Zu den feinkörnigen oder auch bindigen Böden zählen nun Schluff und Schlick sowie Ton und Lehm, die aufgrund ihrer Plastizität, Farbe, Struktur und ihres Geruches unterschieden werden. Feinkörnige Böden besitzen einen Anteil der Korngrößen unter 0,063 mm von über 40 %.

Organische Böden können z.B. aus Moor- oder Torfböden bestehen, wobei die organischen Bestandteile tierischen oder pflanzlichen Ursprungs sind. Da jene bei hohen Temperaturen verbrennen, werden sie durch den Glühverlust V_d bestimmt, welcher den prozentualen Massenverlust beschreibt, der beim Glühen auftritt. (Lichtberger 2010)

Tragfähigkeit und Verdichtung der Böden

Die Tragfähigkeit der Sande und Kiese, also von nicht bindigen Böden, beruht auf dem Reibungs- und Verzahnungswiderstand, der bei einwirkender Belastung an den Kornberührungsflächen vorherrscht. Diese Widerstände sollen so groß wie möglich sein, was durch eine möglichst dichte Lagerung und eine raue Oberfläche der Körner erreicht werden kann. Die Verdichtung erfolgt hierbei durch Umlagerung der Körner, wobei das Korngemisch so gewählt werden sollte, dass die Poren zwischen den großen Körnern jeweils durch die kleineren aufgefüllt werden. Aufgrund einer Verdichtung mittels eines hohen Flächendruckes (Walzen) oder durch starke kurze Schläge (Stampfgeräte) entsteht ein vielfach in sich abgestütztes Korngerüst. Eine weitere Möglichkeit der Verdichtung, die besonders im Gleisbau als Stopfen ausgeführt wird, besteht darin, den Boden in Schwingung zu versetzen. Durch den Einsatz von Rüttel- und Schwingungsgeräten wird die Rei-

² Anteil von Körner mit einem Korndurchmesser kleiner 0,063 mm

bung der Körner stark herabgesetzt, womit die Körner durch eine zusätzlich wirkende Auflast verdichtet werden. Der Wassergehalt spielt bei den mechanischen Eigenschaften nicht bindiger, lockerer Böden lediglich eine untergeordnete Rolle, da diese Bodenarten durch den Aufbau des Korngerüstes in der Lage sind, Wasser unter Belastung praktisch augenblicklich abzuführen. Dadurch stellt sich bei nicht bindigen Böden relativ rasch nach der Verdichtung bzw. unter Betriebslast die optimale Tragfähigkeit ein (Abbildung 11). Diese Eigenschaft der Wasserabführung, gepaart mit den vorhandenen Hohlräumen zwischen den Körnern, die eine etwaige Volumenänderung vorhandenen Wassers aufnehmen können, sorgen für eine geringe Anfälligkeit dieser Böden auf Frostschäden. Des Weiteren treten etwaige Setzungen bereits nach der ersten Verdichtung bzw. Belastung auf, wodurch weitere Setzungen im Betrieb nahezu ausgeschlossen werden können. (Göbel, Lieberenz 2004)

Die Tragfähigkeit der Schluffe und Tone hängt hingegen maßgeblich vom Wassergehalt ab. Aufgrund der feinen Einzelteilchen besitzen diese Bodenarten eine äußerst große spezifische Oberfläche³ und daher auch eine starke Bindung mit dem Wasser und den benachbarten Teilchen. Ihre Tragfähigkeit ist allerdings im trockenen, harten Zustand am größten und nimmt mit steigendem Wassergehalt bis hin zum flüssigen Zustand ab. Dennoch ist ein Wassergehalt von 2-6 % notwendig, um eine ausreichende Bindung benachbarter Teilchen sicherzustellen. Man kann beobachten, dass vor allem Schluffböden durch die äußerst langsame Abführung von Wasser unter Belastung anfangs ihre Tragfähigkeit verlieren und erst nach längerer konstanter Betriebslast ihre geforderten mechanischen Anforderungen erfüllen (Abbildung 11). Im Gegensatz dazu verhält sich die Tragfähigkeit von Tonböden einigermaßen konstant, ohne jedoch die nach dem Wasseraustritt erreichten Werte der schluffigen Böden annehmen zu können (Abbildung 11). (Lichtberger 2010)

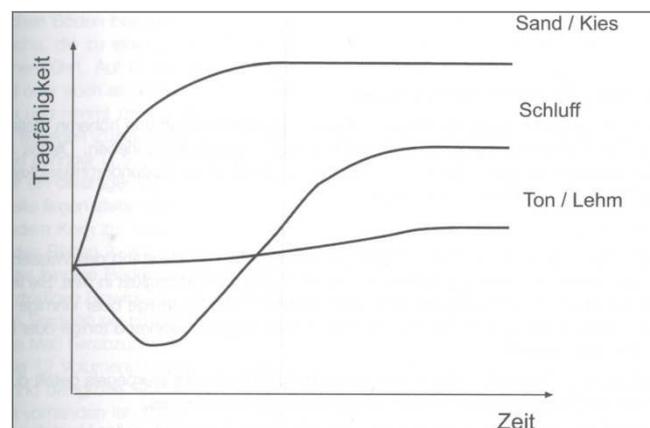


Abbildung 11 Veränderung der Tragfähigkeit unter andauernder Belastung (Lichtberger 2010)

³ Die spezifische Oberfläche beschreibt die Oberfläche eines Material bezogen auf Gewicht oder Volumen [m^2/kg oder m^2/m^3]

Bei Einbau und Verdichtung bindiger Böden ist auf einen möglichst geringen Luftgehalt (≤ 12 Volumenprozent) zu achten, welcher durch Klumpenbildung im Boden entstehen kann. Bei zu hohem Luftgehalt sammelt sich Wasser in diesen Hohlräumen an, wodurch einerseits die Standfestigkeit des Bodens herabgesetzt wird und andererseits in den Wintermonaten eine Hebung des Untergrundes verursacht wird. (Göbel, Lieberenz 2004)

Ist die Tragfähigkeit des anstehenden Bodens nicht gegeben, bedient man sich neben der Verdichtung auch anderer Ertüchtigungsverfahren. Dies kann sowohl die Bodenverfestigung durch die Blockierung der Verschieblichkeit der Körner mittels Bindemittel sein, als auch ein Bewehrungsverfahren, wobei die Scherfestigkeit des Bodens durch zugfeste künstliche Einlagen erhöht wird.

2.3 Entwässerung des Bahnkörpers

Der Bau einer Eisenbahnstrecke stellt immer einen Eingriff in das vorhandene Gelände dar und verändert durch Versiegelungen, Abflussbeschleunigungen etc. in jedem Fall den natürlichen Wasserhaushalt bzw. die natürlich vorherrschenden Abflussverhältnisse. Die auftretenden Wasserzuläufe sind stark schwankend und von den örtlichen Verhältnissen wie den Niederschlagsmengen, der Geländeform, dem Bewuchs, der Bodenart und den Grundwasserverhältnissen abhängig. Mit den technischen Entwässerungsmaßnahmen soll sowohl unter- als auch oberirdisches zuströmendes Wasser adäquat abgeführt werden. Dabei ist es notwendig weder eine Stauung noch eine zu schnell strömende Ableitung des Wassers zu verursachen, da in diesen Fällen schädliche Einwirkungen wie z.B. zu hoher Wasserdruck, Tragfähigkeitsverlust oder Erosionen herbeigeführt werden könnten. Das Wasser stellt im Erd- und Grundbau generell eine unerwünschte Größe dar. (Lichtberger 2010)

Entwässerungsanlagen von Bahnkörpern müssen folgende Aufgaben erfüllen (Göbel, Lieberenz 2004):

- I „Schnelle Fassung und Sammlung des dem Bahnkörper zuströmenden Wassers und dessen sichere Ableitung auf kürzestem Wege.“
- I „Weitgehende Verhinderung des Eindringens von Oberflächenwasser in den Unterbau und Untergrund, insbesondere bei wasserempfindlichen Böden.“
- I „Aufnahme und Ableitung des ungebundenen Bodenwassers und damit Verringerung des natürlichen Wassergehalts des anstehenden Bodens, so dass die infolge der Verkehrslasten im Erdplanum auftretenden Spannungen ohne schädliche Verformungen aufgenommen werden können.“
- I „Unterbindung des Wassernachschubs aus dem Unterbau und Untergrund zur Verhinderung von Frostschäden.“

Sämtliche Entwässerungsanlagen sind also derart zu gestalten, dass die Erfüllung dieser Forderung gewährleistet werden kann. Generell bildet eine funktionsfähige Entwässerung die Basis einer dauerhaften Gebrauchstauglichkeit einer Eisenbahnstrecke, weswegen bereits vor der Ausführung von Oberbauarbeiten ein trockener Bahnkörper geschaffen werden sollte. Um diesen herstellen zu können, sind die Beschaffenheit des Untergrundes und die Arten des Wasserandranges (Kapitel 2.3.1) zu eruieren. Diese Erkundungen können entweder durch Augenschein oder mittels Bodenerkundungen (z.B. Schürfe) durchgeführt werden. Wann immer die Möglichkeit besteht, sollte das gewählte Entwässerungssystem auf dem Prinzip der Gravitation beruhen, um eine möglichst natürliche Wasserableitung zu schaffen. Die schädigenden Auswirkungen einer unzureichenden oder nicht funktionierenden Entwässerungsanlage werden in Kapitel 2.4 erläutert.

2.3.1 Erscheinungsformen des Wassers

Laut Regelwerk der ÖBB (ÖBB Dienstbehelf 2009) kann im Boden auftretendes Wasser in folgende Erscheinungsformen unterteilt werden:

I Oberflächenwasser

Oberflächenwasser stammt aus den Niederschlägen und kann entweder unmittelbar auf den Bahnkörper gelangen oder vom angrenzenden Gelände zufließen.

I Sickerwasser

Sickerwasser ist jener Teil des Oberflächenwassers, der dem Gesetz der Schwerkraft folgend in das Erdreich einsickert und dabei die Hohlräume des Bodens ausfüllt. Es wird bei gewissen Bodenarten länger gebunden oder kann direkt bis zum Grundwasser durchsickern.

I Stauwasser

Sickerwasser, das aufgrund geringer Durchlässigkeit oder einer undurchlässigen Schicht staut, die Bodenporen füllt und somit zu Vernässungen führt.

I Schichtwasser

Stauwasser, das auf einer geneigten undurchlässigen Schicht abfließt. Es tritt als Hangwasser aus sobald die Geländeneigung größer als die Schichtneigung ist.

I Grundwasser

Grundwasser füllt den zusammenhängenden Porenraum aus. Es unterliegt dabei lediglich der Schwerkraft und dem hydrostatischen Druck⁴.

I Kapillarwasser

Grundwasser, das infolge von Oberflächenspannungen der Bodenkörper in engen zusammenhängenden Poren entgegen der Schwerkraft aufsteigt (Kapillarwirkung).

⁴ Stellt sich innerhalb einer ruhenden Flüssigkeit unter dem Einfluss der Gravitation ein. Ist eine statische Größe, welche lediglich von der Flüssigkeitsdichte, der Gravitation und der Höhe des Flüssigkeitsspiegels über dem Messpunkt abhängt.

I Haftwasser

Wasser, das anstatt zu versickern aufgrund der Oberflächenkräfte an den Körnern haften bleibt.

Der Andrang der verschiedenen Erscheinungsformen des Wassers auf den Bahnkörper ist in Abbildung 12 ersichtlich.

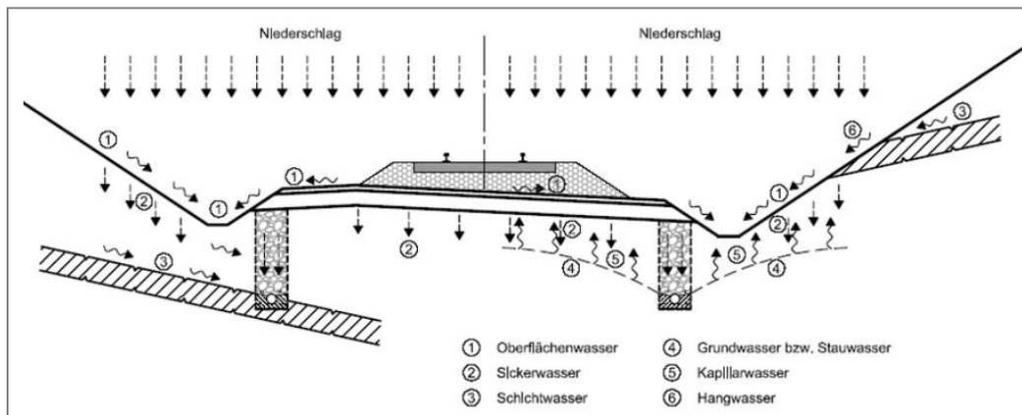


Abbildung 12 Wasserandrang zum Bahnkörper (ÖBB Dienstbehelf 2009)

2.3.2 Oberflächenentwässerung

Um eine naturnahe Oberflächenwasserbewirtschaftung zu erreichen, sollte ein möglichst kurzer Weg des Wassers vom Ort des Auftretens bis in den Untergrund bzw. in natürliche Wasserläufe angestrebt werden. Dieser Grundsatz beinhaltet eine Sammlung und sofortige Versickerung des Oberflächenwassers oder eine Zuführung in natürliche Vorfluter, was allerdings meist nur in unbebauten Gebieten erreicht werden kann. Bebaute Gebiete hingegen weisen einen hohen Grad an versiegelten Flächen auf, weswegen eine Versickerung von Niederschlagswasser nur äußerst eingeschränkt möglich ist. In diesen Gebieten bedient man sich künstlich angelegter Vorfluter oder Regen- und Mischwasserkanäle. Prinzipiell erfolgt die Wasserableitung von Oberflächenwasser über das Gleisplanum und durch die Bahngräben, bei hohen Einschnitts- bzw. Anschnittsböschungen gegebenenfalls auch durch Fanggräben. (Wesoly 2002)

Der Bahngraben ist die hauptsächlich eingesetzte und auch einfachste Lösung der Entwässerung. Sowohl das von den Böschungen seitlich zufließende Wasser als auch das aufgrund des geneigten Gleisplanums aus dem Bahnkörper austretende Wasser soll dabei gesammelt werden. Diese Art der Entwässerung wird nicht nur wie in der folgenden Abbildung 13 im Einschnitt verwendet, sondern auch bei als Damm ausgeführten Anlagen, wenn eine zusätzliche Wasserbelastung der umgebenden Gebiete verhindert werden sollte.

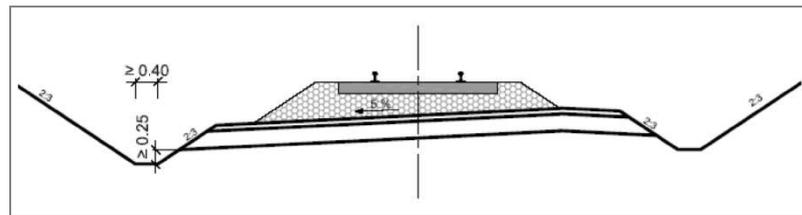


Abbildung 13 Ausführung eines Bahngrabens im Einschnitt (ÖBB Dienstbehelf 2009)

Bei dem Bau eines Bahngrabens soll die Sohle dessen mindestens 25 cm unter dem Unterbauplanum zum Liegen kommen, während eine minimale Breite von 40 cm vorgeschrieben ist. Des Weiteren ist eine Längsneigung von drei Promille und eine Böschungsneigung mit einem Höhen-Längen Verhältnis von 2:3 vorzusehen. Bei Platzmangel wird häufig auf Drainverrohrungen zurückgegriffen, um das Wasser zu sammeln und abzuleiten. Man sollte jedoch auch vermehrt auf den Einsatz offener Fertigteile zurückgreifen (Wesoly 2002). Diese sind meist Halbschalen aus Beton, versehen mit Perforierungen, um eine Versickerung zu fördern, und werden Dränagesohlschalen genannt. Gegenüber einer geschlossenen Entwässerung zeichnen sie sich durch eine ständige Zugänglichkeit aus und beanspruchen des Weiteren einen geringeren Platzbedarf und ein geringeres Mindestgefälle als Verrohrungen. Wahlweise können sie durch trittfeste Abdeckungen geschützt werden, um als Randweg zu dienen und somit das Eindringen von z.B. Müll oder Pflanzenblätter zu verhindern.

Wird ein äußerst großer seitlicher Wasserandrang erwartet, so kann ein Fanggraben ausgestaltet werden um den Wasserzufluss einzudämmen. Dies ist meist bei sehr steilen oder hohen Einschnitten der Fall. Durch Errichten eines Dammes zwischen dem Bahnkörper und der Böschung kann das Wasser, wie in Abbildung 14 ersichtlich, gestaut, gesammelt und abgeführt werden.

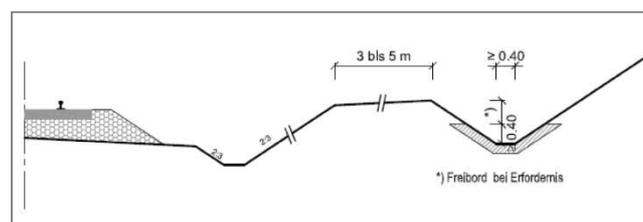


Abbildung 14 Ausführung eines Fanggrabens (ÖBB Dienstbehelf 2009)

Die Breite und Höhe des Fanggrabens sollte dabei je 40 cm betragen, während der Damm eine Kronenbreite von drei bis fünf Meter erreichen sollte. Da diese Konstruktionen nur bei hohen Wassermengen Anwendung findet, ist der Fanggraben unbedingt mittels Betonfertigteilen zu befestigen.

2.3.3 Tiefenentwässerung

Geschlossene unterirdische Entwässerungsanlagen werden dann ausgeführt, wenn der den Bahnkörper umgebende Boden entwässert werden soll. Dies betrifft ungebundenes Porenwasser, welches als Grund-, Stau- oder Kapillarwasser auftritt und zumindest bis 1,50 Meter unter die Schienenoberkante abgesenkt werden soll. Außer dieser Ableitung unterirdischer Gewässer darf diese Ausführung auch zur Planumsentwässerung herangezogen werden, allerdings ausschließlich dann, wenn eine Querschnittsgestaltung mit Bahngräben nicht möglich ist (z.B. Bahnhöfe). Bei der Notwendigkeit einer Absenkung des Grundwasserspiegels werden Vollsickerrohre empfohlen, während Sicker- und Schichtwasser am besten mittels Teilsickerrohren abgeführt werden (Lichtberger 2010). Teilsickerrohre sind nur im oberen Bereich perforiert (Abbildung 15) und bewirken somit eine dauernde Wasserableitung. Vollsickerrohre führen hingegen nur dann Wasser ab, wenn ein Wasserandrang vorhanden ist. Andernfalls wird die Versickerungsfähigkeit des Untergrundes kaum stört.

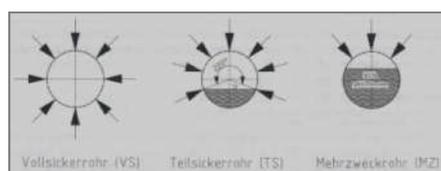


Abbildung 15 Perforation von Sickerrohren (Göbel, Lieberenz 2004)

Die von den österreichischen Bundesbahnen angewandte Ausführung einer Tiefenentwässerung ist in Abbildung 16 ersichtlich. Rechts sieht man detailliert eine solche Wasserfassung mit einem bis zur Perforierung in Magerbeton eingebetteten Rohr und einer bis in die frostfreie Tiefe reichende Schicht aus Filterkies. Außerdem ist es notwendig, diese Konstruktion mit einem Geotextil zu umhüllen, da andernfalls eine Verschmutzung und zunehmende Verstopfung der Filterkiesschicht nicht verhindert werden kann. Die Breite dieses Filterelementes sollte insgesamt 40 cm größer sein als der Rohrdurchmesser, während das Rohr selbst eine Längsneigung von mindestens 2,5 ‰ erreichen muss.

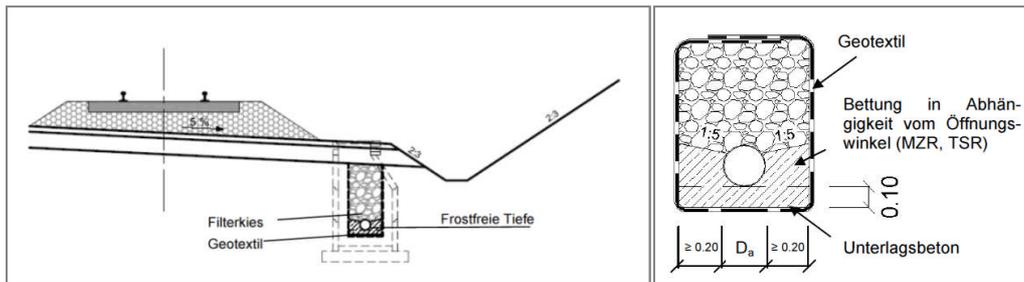


Abbildung 16 Ausführung einer Tiefenentwässerung (ÖBB Dienstbehelf 2009)

Die linke Darstellung von Abbildung 16 zeigt den Querschnitt eines tiefenentwässerten Bahnkörpers. Dabei wird ersichtlich, dass eine Tiefenentwässerung zwar weitaus aufwendiger auszuführen ist als eine Oberflächenentwässerung, eine solche aber keinesfalls ersetzen kann, denn das zuströmende Oberflächenwasser würde die Filterkiesschicht zu langsam passieren, was einen Bahngraben im Einschnitt unerlässlich macht.

2.4 Schäden am Bahnkörper

Schäden am Bahnkörper treten zu einem Großteil aufgrund verschiedenster vermeidbarer Fehler während der Herstellung und Instandhaltung der bisher in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Bereiche auf. Die Schwierigkeit hierbei ist die oftmals späte Offensichtlichkeit der Beschädigungen, deren Ursache meist kleine Unregelmäßigkeiten im Inneren des Bahnkörpers sind, welche oberflächlich anfangs nahezu kaum bemerkbar sind. Die häufigsten Ursachen für Beschädigungen sind eine nicht funktionierende Entwässerung, eine unzureichende Tragfähigkeit sowie eine Vermischung der Korngemische verschiedener Schichten. In diesem Kapitel werden jene Schadensbilder des Bahnkörpers erläutert, welche das Eisenbahnwesen immer wieder vor Herausforderungen stellen und somit besonderer Aufmerksamkeit bedürfen.

2.4.1 Bettungsverschmutzung und dessen Folgen

Eines der üblichen Schadensbilder stellt die Bettungsverschmutzung inklusive deren Folgen dar. Hierbei werden die durch den Kornaufbau vorgegebenen erwünschten Eigenschaften des Schotters durch einen steigenden Feinanteil erheblich gestört und im schlimmsten Fall sogar verhindert. Daher ist der Feinanteil eines Schotters eine maßgebende Größe und darf bei einem Neuschotter maximal zwischen drei und fünf Prozent des Gesamtgewichtes der Probe in Anspruch nehmen. Jener Anteil wird somit als Verschmutzung angesehen und stellt auch die bestimmende Größe über die Möglichkeit einer Wiederverwendung von Altschotter dar. Ist der Feinanteil eines Schotters zu groß ist die Wasserdurchlässigkeit nicht mehr gewährleistet und die Verschmutzung nimmt weiter zu. (Klotzinger 2007)

Ursachen der Verschmutzung

Die Ursachen einer Verschmutzung des Schotterbettes können sehr vielfältig sein und in folgende Punkte unterteilt werden (Klotzinger 2007):

- I Neuschotter mit einem zu hohen Feinanteil
- I fehlende oder nicht ausreichende Schutzschicht
- I Überbeanspruchung des Untergrundes infolge ungünstiger Druckverteilung
- I Aufweichung des Untergrundes infolge fehlender Querneigung des Planums
- I Aufsteigende Feinanteile infolge Überbeanspruchung des Untergrundes
- I fehlende oder schlecht funktionierende Entwässerung
- I Feinbestandteile aus Transport
- I Feinbestandteile durch Ablagerungen aus der Luft
- I Instandhaltungsarbeiten – Feinteile durch Abrieb beim Stopfen

Im in Abbildung 17 gezeigten Fall liegt die Begründung in einer fehlenden Planumschutzschicht und einer dadurch fehlenden Filterstabilität, weswegen sich die aufsteigenden Feinteile ungehindert in den Hohlräumen des Schotters festsetzen können.



Abbildung 17 Bettungsverschmutzung (Nemetz 2010)

Eine weitere, häufig auftretende Ursache stellt die ungünstige Druckverteilung auf dem Planum (Abbildung 18) dar, die sich z.B. durch eine zu geringe Mächtigkeit der Schotterbettung einstellen kann. Außerdem kann eine nicht funktionierende Entwässerung oder eine bereits vorherrschende Verschmutzung zu einer Änderung der Lastverteilung im negativen Sinne führen. Diese ungünstige Druckverteilung stellt sich ein, wenn die in Kapitel 2.2.1 geforderte Überschneidung der Druckverteilungslinien am Planum nicht gegeben ist. Dadurch werden die Feinteile des Planums in die Schotterbettung gedrückt und es findet eine Vermischung der beiden Körnungen statt.

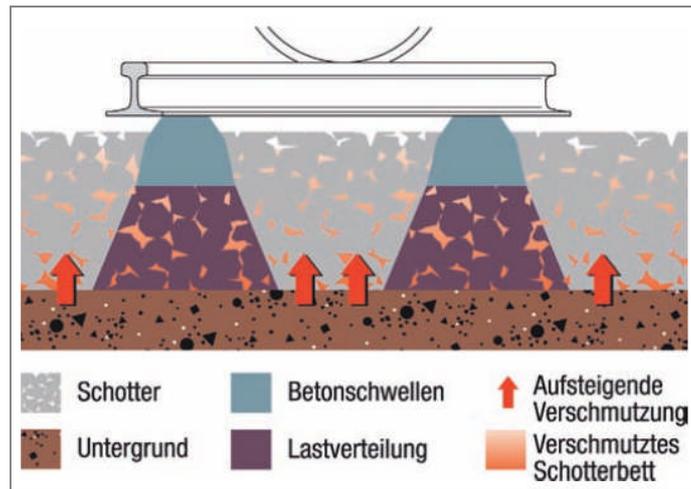


Abbildung 18 Ungünstige Druckverteilung auf dem Planum (Klotzinger 2007)

Eine Bildung von Wassersäcken (Abbildung 19), auch Suttan genannt, entsteht durch eine fehlende Querneigung des Planums, weswegen durch das Schotterbett sickern Wasser nicht nach außen abfließen kann und sich am Planum anlagert. Durch die Belastung entsteht eine Pumpwirkung und in weiterer Folge eine Verschmutzung des Schotters. In weiterer Folge kommt es durch die Entstehung zusätzlicher Verformungen am Erdplanum zu einer progressiven Verschlechterung der Gleislage.

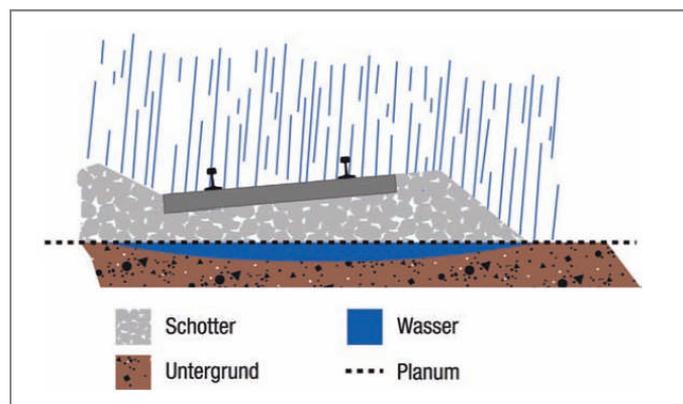


Abbildung 19 Bildung von Wassersäcken infolge fehlender Querneigung des Planums (Klotzinger 2007)

Auch durch Überbeanspruchung des Untergrundes aufgrund schlechter Tragfähigkeit des anstehenden Bodens kann eine Verschmutzung hervorgerufen werden. Vor allem organische Bodenarten wie Lehm und Ton in Verbindung mit einer fehlenden oder nicht ausreichenden Entwässerung quellen auf und durchdringen die Schotterschicht. Um eine derartige Situation zu beseitigen, bedarf es in jedem Fall einer adäquaten Entwässerung und entweder einer Bodenauswechslung des Untergrundes oder dem Einbau einer entsprechend starken Schutzschicht. Als Lösung kann bei organischem Boden auch eine Stabilisation durch Kalk Abhilfe schaffen, jedoch ist diese Variante von kurzfristiger Dauer und kann eine der vorher genannten nachhaltigen Methoden keinesfalls ersetzen.

Schadensbilder

Die Verschmutzung des Schotterbettes ist in den seltensten Fällen augenscheinlich zu erkennen, jedoch gibt es mehrere Auffälligkeiten, die eindeutig auf eine Verunreinigung schließen lassen.

Eines der ersten Schadensbilder sind Spritzstellen (Abbildung 20), oder auch Spritzstöße genannt. Diese ergeben sich durch die Ansammlung der Feinbestandteile direkt unter den Schwellen. Aus diesem Grund kann das Wasser an diesen Stellen nicht mehr abfließen, wodurch jede Belastung in Form einer Zugfahrt ein Wegspritzen des unter den Schwellen befindlichen Wassers verursacht. (Selig, Waters 2007)



Abbildung 20 Spritzstoß unter Schwellen (Skriptum TU Graz, Veit 2010)

In weiterer Folge können Spritzstellen, vor allem in Verbindung mit unzureichender Entwässerung, zu Schlammstellen (Abbildung 21) ausarten. Hierbei sind bereits mehrere aufeinander folgende Schwellen von Schlamm umgeben, wodurch der gesamte Bahnkörper äußerst labile Tragfähigkeitsverhältnisse aufweist.



Abbildung 21 Schlammstellen (Selig, Waters 2007)

Im weiteren Verlauf senken sich die betroffenen Schwellen in den Schlamm ein, was im darauffolgenden, nicht von der Schlammstelle betroffenen Bereich eine Gleishebung ver-

ursacht. Gleislagefehler dieser Art können bis zur Entgleisung eines Eisenbahnfahrzeuges führen.

Ein weiterer möglicher Hinweis auf eine Verschmutzung des Schotterbettes ist ein Bewuchs der Bettungsflanken, der lediglich durch feuchten, organischen Boden zwischen den Schotterkörnern zustande kommen kann.

2.4.2 Schotterzermahlung

Unstetigkeiten im Bereich der Lasteinbringung wie z.B. Schienenstöße, Schienenoberflächenfehler oder Schwellenhohllagen führen als Einzelfehler zu dynamischen Zusatzbelastungen, die erheblich höhere Spannungen im Tragsystem zur Folge haben. Dadurch kommt es zur Überbeanspruchung des Schotters, welcher zermahlen wird, wodurch sich die in Abbildung 22 ersichtlichen weißen Stellen in Fahrtrichtung fortpflanzen. Werden diese Stellen erkannt sollte die Schadensursache umgehend beseitigt werden, um eine Überbeanspruchung des Unterbaus und daraus entstehende Tragfähigkeitsschäden zu verhindern. (Lieberenz, Kipper 2009)



Abbildung 22 Schotterzermahlung durch Schwellen (Skriptum TU Graz, Veit 2010)

Dieses Problem tritt in England vermehrt in Verbindung mit Kalkstein-Schotter und Betonschwellen auf (Selig, Waters 2007). Ein Betonschwellengleis ist aus diesem Grunde anfälliger auf Schotterzermahlung, da diese eine bei weitem geringere Elastizität besitzen als Holzschwellen, wodurch die durch das Eisenbahnrad erfolgte Belastung ungedämpft auf das Schotterbett weitergegeben wird. Das Problem mit Kalkstein ist einerseits die geringe Abnutzungsfestigkeit, aber andererseits auch, dass die zermahlene Partikel an den benachbarten Schotterkörnern haften bleiben und Wasser binden. Diese Vermischung der feuchten Feinteile mit dem Schotterkorn verursacht einen Tragfähigkeitsverlust der Schotterbettung und eine Störung des Steifigkeitsverlaufes.

2.4.3 Frosthebungen

Frosthebungen entstehen vor allem in den Schutzschichten und der Schotterbettung, während der Untergrund idealerweise ab der frostfreien Tiefe beginnt. Besonders feinkörnige Böden und verschmutzte Schotterbettungen neigen zu Hebungen von bis zu 20 cm (Lichtberger 2010). Spezielle Ursachen sind die bereits in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Schottersäcke oder Spritzstöße.

Prinzipiell ist eine nicht gegebene Ableitung des Wassers aufgrund einer Versickerungsunfähigkeit des Bodens in Verbindung mit einer nicht ausreichenden Entwässerungsanlage die Ursache für Frosthebungen. Bei Böden mit Kapillarwirkung wird das Wasser zusätzlich von unten nach oben gezogen. Durch das Frieren des in den Porenräumen angereicherten bzw. gestauten Wassers dehnt sich dessen Volumen um bis zu zehn Prozent aus, wodurch der gesamte Gleisbereich angehoben wird. Beim Auftauen im Frühjahr werden große Mengen an Wasser freigesetzt, die die Tragfähigkeit stark herabsetzen. Aufgrund des Schmelzens der Eislinsen von oben nach unten kann das freiwerdende Wasser infolge der darunter noch anstehenden Eislinsen nur schwer versickern. Die Folge ist eine rasche, über das Porenvolumen hinausgehende Wasseranreicherung der oberen Bodenschichten, wodurch die Tragfähigkeit stark vermindert wird. (Lichtberger 2010)

2.5 Instandhaltung und Qualitätssicherung

Wie jede industrielle Anlage muss auch das Gleis in regelmäßigen Abständen gewartet werden. Aufgrund der dynamischen Betriebsbelastung, aber auch der externen Belastungen wie Witterungseinflüsse und chemischen und vegetativen Einflüssen unterliegt das Gleis gewissen Verschleißerscheinungen. Die einzelnen Komponenten und deren nötige Instandhaltungsmaßnahmen sind in Abbildung 23 ersichtlich.

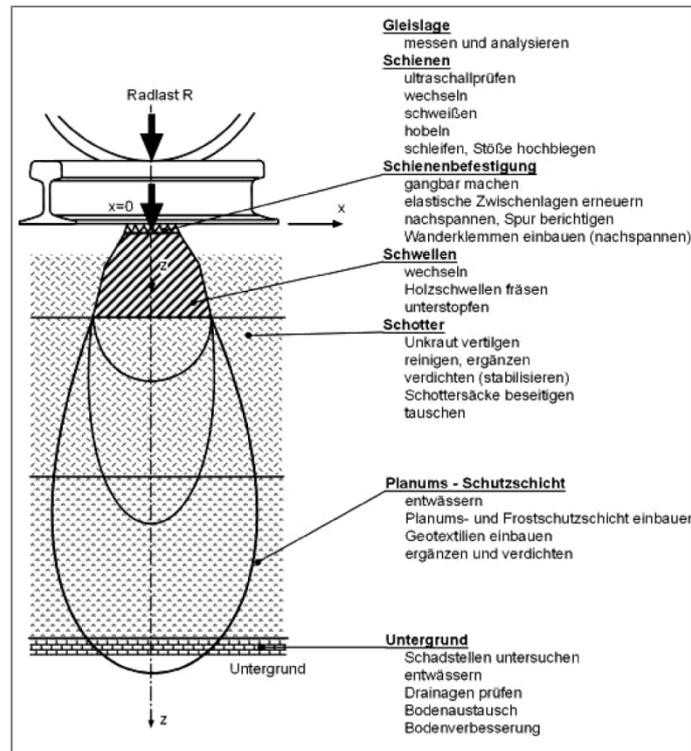
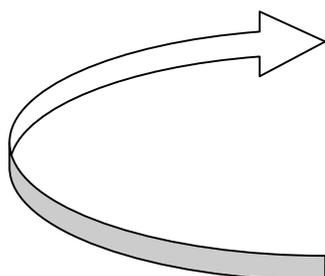


Abbildung 23 Übersicht Instandhaltungsmaßnahmen (Lichtberger 2007)

Die einzelnen Bauteile verfügen dabei über eine bestimmte Lebensdauer nach der sie ersetzt oder erneuert werden müssen.

Prinzipiell kann bei der Instandhaltung periodisch, zustandsabhängig oder präventiv vorgegangen werden. Periodisch erfolgen etwa Gleisinspektion, Grünschnitt oder Pflege diverser Entwässerungsanlagen. Präventiv wird vorgegangen, wenn Schäden vermieden werden sollen, die den Betrieb stören oder verunmöglichen. Ein Beispiel hierfür ist das präventive Head Check Schleifen. Zustandsabhängiges Vorgehen wiederum umfasst Eingriffe, die auf Basis gemessener oder anders festgestellter Verhaltenszustände gesetzt werden. Das betrifft die Korrektur von sicherheitskritischen Zuständen (SES) ebenso wie MDZ-Einsätze, die aufgrund eines gewissen Qualitätslevels durchgeführt werden. Zustandsabhängiges Vorgehen setzt jedoch die ständige Kenntnis über den Gleiszustand voraus, der berechnet werden kann, aber auch mittels Erkundungen überprüft werden muss. Die Instandhaltung und Aufrechterhaltung eines adäquaten Gleiszustandes kann daher als Kreislauf angesehen werden, der folgende Punkte beinhaltet (Nemetz 2010):

- Erfassung des Gleiszustandes
- Analyse des Gleiszustandes und Auswahl der zusetzenden Maßnahmen
 - Planung der Maßnahmen
 - Durchführung der Maßnahmen
 - Erfolgskontrolle



Der Kreislauf in diesem System entsteht, weil der Erfolgskontrolle und damit der gelungenen Umsetzung einer Instandhaltungsmaßnahme wieder die Erfassung des Gleiszustandes folgen muss. Sämtliche angeführte Punkte werden in den folgenden Kapitel eingehend erläutert.

Die gesammelten Datenmengen über das österreichische Hauptnetz, das sich über rund 11.000 Kilometer erstreckt, werden in der Infrastruktur Datenbank „iGleis“ gespeichert. Diese Datenbank beinhaltet neben den Erfassungen des Gleiszustandes, der Sollgeometrie und den gesetzten Maßnahmen auch Analysewerkzeuge, wodurch sich Optimierungspotential und Trends erkennen lassen. (Nemetz 2010)

2.5.1 Erfassung und Analyse des Gleiszustandes

Die Zustandsbewertung des Fahrwegs teilt sich in zwei grundlegende Bereiche. Einerseits können mittels Oberbaumesswagen verschiedenste Gleisparameter ermittelt werden, wobei das Signal ‚Längshöhe‘ negative Einflüsse aus dem Untergrund am besten widerspiegelt. Andererseits ermöglichen 2D-Georadarauswertungen eine einfache Darstellung des Gleis-Längsschnittes bezüglich Feuchtigkeitsgehalt des Schotters und des Untergrundes, der Schienenverschmutzung und der eingebauten Tragschichten. Zur Grobdiagnose des erweiterten Fahrweges, welche die Kombination der beiden Informationssätze beschreibt, wird bei den Österreichischen Bundesbahnen das sogenannte geotechnische Streckenband eingesetzt. Außerdem ergänzen Inspektionsdaten diese Zustandsbeschreibung.

Zustandserfassung mittels Oberbaumesswagen

Die Sicherstellung einer ausreichenden Gleislagequalität und Oberflächenbeschaffenheit der Schienen sind die Hauptaufgaben der Gleisinstandhaltung. Dies erreichen die Österreichischen Bundesbahnen mit dem Oberbaumesswagen *EM Sat 250*, der neben der Gleisgeometrie (Messabstände von 0,25 m) auch die Schienenabnutzung (alle 2,5 m) und die Beschaffenheit der Schienenoberfläche (alle 5 mm) erkundet (Nemetz 2010). Die exakte Ortung des Messwagens erfolgt dabei über GPS-Satelliten und den Korrekturdienst *Omnistar*, wodurch eine Genauigkeit der Messdatenpositionierung von ungefähr 0,5 m erreicht werden kann. Außerdem verfügt das österreichische Schienennetz über 2.893 GPS-Synchronisationspunkte, die in einem maximalen Abstand von zehn Kilometer situiert sind (Nemetz 2010). Die wichtigsten Datensätze der Gleislageerfassung sind die Spurweite, die Längshöhenlage, die Richtungslage⁵ und die Überhöhung⁵. Für das Setzungsverhalten des Gleises ist das Längshöhensignal der wichtigste Parameter, da dieses die Relativ-Setzungen des Gleises widerspiegelt (Abbildung 24).

⁵ Höhenunterschied der Schienen infolge der Querneigung einer Fahrbahn zum Kurveninneren, gemessen in Millimeter oder Grad

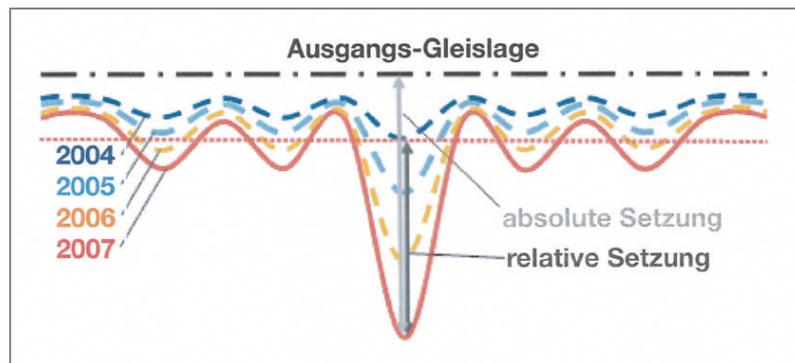


Abbildung 24 Das Längshöhensignal spiegelt die relative Setzung des Gleises wider (Auer et al. 2007)

Primär veranschaulicht das Längshöhensignal Einzelfehler der Gleislage. Mit Hilfe von gleitend berechneten Standardabweichungen der Längshöhe ist es jedoch möglich, Veränderungstendenzen der Gleislage in einfacher Weise abzubilden (Abbildung 25).

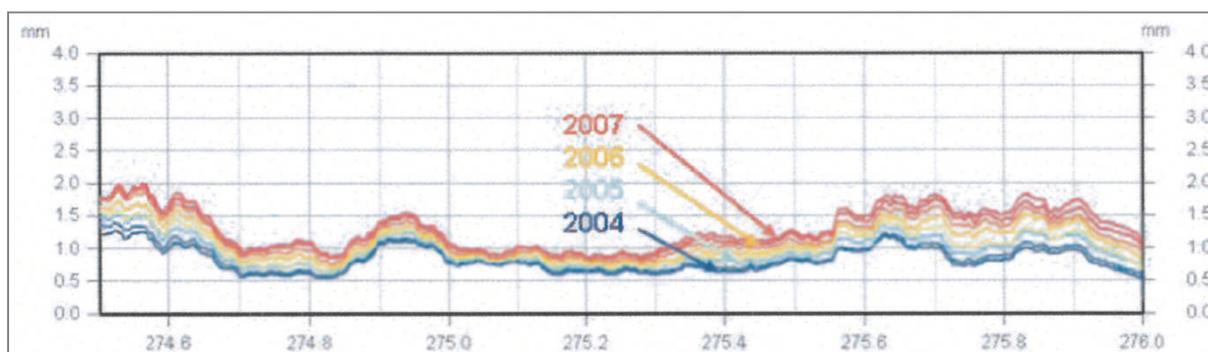


Abbildung 25 Darstellung der Gleislageveränderungen (Auer et al. 2007)

Die zeitliche Veränderung der Relativsetzungen wird in der NATAS-Methodik als Verschlechterungsrate in mm/Jahr angegeben und dient zur objektiven Bestimmung der vertikalen Gleislagestabilität (Auer et al. 2007). Bei der Betrachtung der Gleislage als e-Funktion steht die Verschlechterungsrate b dimensionslos im Exponenten.

Als zusammenfassendes Ergebnis einer Gleisüberprüfung mittels Oberbaumesswagen kann die sogenannte MDZ-Ziffer angesehen werden. Diese beschreibt die Differenz der Beschleunigungen im Schwerpunkt eines virtuellen Fahrzeugs und somit die Fahrzeugreaktion auf die vorhandenen Gleislagefehler. Dadurch werden die Anteile der Höhenfehler, Lagefehler und Verwindungsfehler auf physikalischer Basis zu einer Auswirkung, nämlich der räumlichen Änderung der Beschleunigung, zusammengefasst. Aus diesem Grund ist eine Gewichtung verschiedener Gleislagefehler nicht erforderlich. Da die Möglichkeit besteht, diese Ziffer in verschiedenste Geschwindigkeitsniveaus umzurechnen, kann sie auch dazu verwendet werden mögliche Änderungen der Höchstgeschwindigkeit hinsichtlich der Gleislagequalität zu untersuchen. Die MDZ-Ziffer nimmt negative Werte an, wobei ‚Null‘ das ideale Gleis ohne Beschleunigungsdifferenzen beschreibt. Die Werte einer exzellenten Gleisneulage liegen in etwa zwischen -5 und -7. (Fendrich 2007)

2D-Georadarinformation

Ein Georadar, auch Bodenradar genannt, misst Störungen in den oberen Schichten des Erdbodens durch Reflexion elektromagnetischer Strahlung. Mit dieser Methode ist es durch Befahren eines Streckenabschnittes mit einem speziellen Messwagen möglich, die oberflächennahen Schichten des Fahrweges hinsichtlich Feuchtigkeitsansammlungen und Verschmutzung bzw. Ebenheit der Tragschichte zu erkunden. Die vormals für Oberbau-techniker schwer lesbaren Radargramme werden nun direkt als 2D-Format dargestellt (Abbildung 26).

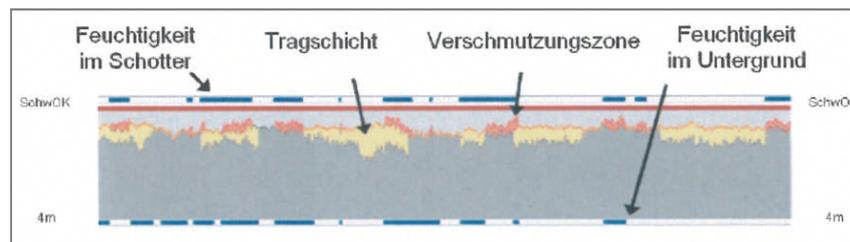


Abbildung 26 Beispiel eines 2D - Georadarbildes (Auer et al. 2007)

Parallel zu dieser Darstellung wird auch ein Streckenvideo aufgezeichnet, welches jederzeit einen Abgleich der Georadarinformationen mit möglicherweise bestehenden, oberflächlich sichtbaren Mängeln ermöglicht. Desweiteren verfügt die verwendete Software über acht weitere Kanäle, anhand derer weitere Streckenmerkmale fortlaufend oder stationierungsbezogen abgerufen werden können. (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

Geotechnisches Streckenband

Das geotechnische Streckenband wird bei den ÖBB zur Grobdiagnose des erweiterten Fahrweges herangezogen und enthält gemeinsam in einer Matrix kombinierte Informationen bezüglich der Oberbauqualität, über äußerliche Erscheinungsbilder bis hin zur Unterbauqualität. Es beruht dabei neben den bereits erwähnten Datensätzen Oberbaumessung und Georadar auch auf örtliche Erfahrung und geotechnische Begehungen. Die örtliche Erfahrung besteht aus Daten hinsichtlich Auffälligkeiten bei der Wartung und Inspektion durch den für diesen Abschnitt zuständigen ÖBB-Mitarbeiters, während die geotechnische Begehung eine Bewertung von Experten aufgrund visuellen Augenscheines darstellt. Eine Übersicht der einzelnen Komponenten und deren Erkundungsart liefert Tabelle 1.

Oberbau	schlechte Gleislage	Örtliche Erfahrung
	hoher Wartungsaufwand	
	nasser Gleisschotter	
	verunreinigter Gleisschotter	
	schlechte Belüftung	
	nasser Gleisschotter	
	verunreinigter Gleisschotter	Georadar
Verschlechterungsrate	Messdaten: MDZ-Ziffer	Oberbaumesswagen
Unterbau	Tragschicht	örtliche Erfahrung
	kurzes Stopfintervall	
	Sutten	
	Spritzstellen	
	Frostaufzüge	
	Damm	geotechnische Begehung
Untergrund	Dammaufstandsfläche	geotechnische Begehung
	geländegleich	
	Einschnitt	
Wassersituation	Damm	geotechnische Begehung
	geländegleich	
	Einschnitt	
	Entwässerungsanlage	
	Grundwasser	
	Sickerwasser	
	Schicht- bzw. Stauwasser	
	Hangwasser	
	Kapillarwasser	

Tabelle 1 Einflussfaktoren geotechnisches Streckenband (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

Das Endprodukt des geotechnischen Streckenbandes ist die Zustandsziffer, eine Zahl zwischen 0 und 100 %, die durch eine Kombination der gesammelten Bewertungen der einzelnen Komponenten zustande kommt. Die Qualitätsziffern für die einzelnen Beurteilungsgruppen werden dabei wie folgt gewichtet:

Oberbau	100
Verschlechterungsrate	80
Unterbau	50
Untergrund	10
Wassersituation	90

Die aus diesem Verfahren ermittelte Zustandszahl entspricht Streckenabschnitten von 100 Metern und bildet die Grundlage der Zuteilung eines Abschnittes in eine der vier vorhandenen Qualitätsklassen (Tabelle 2).

Zustandszahl	Klasse	Handlungsbedarf
0% bis 29%	I	kein
30% bis 44%	II	langfristig
45% bis 59%	III	mittelfristig
60% bis 100%	IV	unmittelbar

Tabelle 2 Ergebnis geotechnisches Streckenband

2.5.2 Der Instandhaltungsplan

Die europäisch einheitlichen technischen Standards für Infrastrukturbetreiber werden in den sogenannten TSI (technische Spezifikationen für Interoperabilität) festgesetzt. Diese dienen zur Gewährleistung eines Mindeststandards der technischen Einrichtungen, welche natürlich auch höherer Qualität entsprechen dürfen bzw. sollen, um sich am Markt durchzusetzen. Diese Regelungen beinhalten auch die Forderung zur Erstellung eines Instandhaltungsplanes durch die Infrastrukturbetreiber. Dieser Instandhaltungsplan muss die erforderlichen Inspektionen und deren Häufigkeit, die Qualifikation der Mitarbeiter sowie die Messmethoden regeln. Des Weiteren müssen Soforteingriffsschwellen für sicherheitsrelevante Parameter und die anschließenden Maßnahmen bei deren Überschreitung definiert sein. Der Instandhaltungsplan der ÖBB wurde TSI-konform im Jahre 2007 in Kraft gesetzt. Der größte Unterschied zu den davor verwendeten Inspektionsvorschriften besteht im Wechsel der Grenzwerte gegen die nun vorgeschriebenen Eingriffsschwellen. Die Grenzwerte waren durch einen Wert definiert, bis zu dem ein ungestörter Betrieb möglich ist. Bei einer Überschreitung waren sofortige Sanierungsmaßnahmen in die Wege zu leiten. Diese Werte waren für händische Messungen im unbelasteten Zustand angegeben, was dem heutigen Stand der Technik nicht mehr entspricht. Die aktuelle Ausführung beruht auf einem dreistufigen System, wodurch die zeitliche Entwicklung des Fehlers beobachtet und somit Instandhaltungsmaßnahmen besser geplant werden können. Diese Stufen unterscheiden sich in:

- Die Aufmerksamkeitsschwelle (AS)
- Die Eingriffsschwelle (ES)
- Die Soforteingriffsschwelle (SES)

Wie bereits den Bezeichnungen dieser Schwellen zu entnehmen ist, wird dem Bereich zuerst eine besondere Beobachtung zuteil. Danach sollte, soweit möglich, reagiert werden und schlussendlich müssen sofortige Maßnahmen getroffen werden, um den sicheren Verkehr gewährleisten zu können. Sämtliche Werte im aktuellen Instandhaltungsplan der ÖBB gelten für den belasteten Zustand bei einer Messung mittels Oberbaumesswagen (Kapitel 2.5.1). (Hanreich, Datler & Wogowitsch 2008)

3 Beschreibung und Aufbereitung der Daten

Die im weiteren Verlauf dieser Arbeit präsentierten Auswertungen beruhen auf Daten, die im nun folgenden Kapitel eingehend erläutert werden. Dies sind einerseits Daten der Gleislagendatenbank, die vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz zur Verfügung gestellt werden. Diese betreffen die Qualität der Gleislage, die Oberbaukomponenten und getätigte Instandhaltungsmaßnahmen am Ober- sowie Unterbau. Andererseits werden die Daten des geotechnischen Streckenbandes, das bereits in Kapitel 2.5.1 beschrieben wurde, verwendet, um die maßgebenden Komponenten des Unterbaus zu eruieren, die potentiell eine Verschlechterung der Gleislage verursachen.

3.1 Geotechnisches Streckenband

Weil das Prinzip des geotechnischen Streckenbandes bereits im vorangegangenen Kapitel beschrieben wurde, werden an dieser Stelle lediglich spezifische Erläuterungen und der Aufbau der Datenstruktur angeführt. Neben Messwerten hinsichtlich des Oberbaus, sind die markantesten Eigenschaften des geotechnischen Streckenbandes die Ergebnisse der geotechnischen Begehung durch Experten und die sogenannte örtliche Erfahrung des zuständigen ÖBB-Mitarbeiters.

3.1.1 Geotechnische Begehung

Die Besonderheit des Systems der geotechnischen Begehung sind Bewertungen, die aufgrund visuellen Augenscheins getroffen werden. Daher sind diese aus vielerlei Gründen sehr stark von der subjektiven Einschätzung der handelnden Person und dem aktuellen Zustand des Fahrweges in Zusammenhang mit den vorherrschenden äußeren Bedingungen abhängig.

Beurteilt werden im Rahmen dieser Maßnahme die Beurteilungsgruppen ‚Untergrund‘ und ‚Wassersituation‘. Die Beurteilung basiert auf einer Einschätzung des Bodenzustandes bzw. der Stabilität der Erdbauwerke. Die Wassersituation wird hinsichtlich hydrogeologischer Kriterien und der Entwässerungsfähigkeit des Gleiskörpers bewertet. Die einzelnen Beurteilungskriterien können Tabelle 1 entnommen werden. Die Auswirkungen hinsichtlich des vorgefundenen Bodenzustandes sind in Tabelle 3 erfasst. (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

Punktezahl	Auswirkung
2	von wesentlicher Bedeutung
1	von Bedeutung
0	ohne Bedeutung

Tabelle 3 Bodenzustand, hydrologische und hydrogeologische Merkmale (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

Ergänzend wird in der Beurteilungsgruppe ‚Wassersituation‘ der Zustand der Entwässerungsanlagen nach vier Kriterien bewertet und mit Punktezahlen von 0 bis 3 belegt (Tabelle 4). Hierbei wird der Idealzustand immer mit 0, der schlechteste Zustand mit 3 bewertet. Tritt somit z.B. im Dammbereich der Fall ein, dass keine Entwässerung vorhanden, eine solche jedoch auch nicht notwendig ist, so ist dies mit der Ziffer 0 beurteilt.

Punktezahl	Zustand
3	nicht vorhanden
2	nicht ausreichend
1	vorhanden, nicht gewartet
0	vorhanden, gewartet

Tabelle 4 Entwässerungsanlagen bzw. Entwässerungsfunktion des Gleisplanums (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

Sämtliche Bewertungen werden während der Begehung in eine dafür konzipierte Maske eingetragen und anschließend ins digitale Format des geotechnischen Streckenbandes überführt.

3.1.2 Örtliche Erfahrung

Beurteilungskriterien der Gruppen Oberbau und Unterbau (Tabelle 1) werden mit Hilfe der örtlichen Erfahrung des zuständigen ÖBB-Mitarbeiters bestimmt. Es handelt sich dabei um Informationen hinsichtlich Wartungsintensität, Ergebnisse von Gleisbegehungen und Aufzeichnungen über Ausbauten bzw. Instandhaltungsmaßnahmen. Hierbei handelt es sich allerdings um eine indirekte Beurteilung, da keine aktuelle Messung oder Begehung veranlasst, sondern lediglich basierend auf vorhandenen Informationen eine Beurteilung erstellt wird. Analog zur geotechnischen Begehung entspricht auch in diesem Fall die Bewertung zu einem markanten Teil der subjektiven Einschätzung der handelnden Personen. Man sollte daher bedenken, dass die Konstanz und Objektivität dieser Auswertungen nicht mit maschinell gemessenen Werten verglichen werden kann. Andererseits beinhaltet das geotechnische Streckenband damit die jahrelangen Erfahrungen der zuständigen Techniker.

Trifft nun aufgrund der vorhandenen Informationen eines dieser Kriterien zu, so wird die im geotechnischen Streckenband mit der Punktezahl 1 eingetragen. Die Punktezahl 0

wiederum beschreibt einen guten bzw. zumindest ordnungsgemäßen Zustand des Fahrweges hinsichtlich des jeweiligen Kriteriums. Ergänzend dazu wird auch eine eventuell vorhandene Tragschichte eigens erfasst. Dies geschieht über den Eintrag folgender Beurteilungsmöglichkeiten in die Maske des geotechnischen Streckenbandes (Tabelle 5).

Punktezahl	Tragschichte
3	nicht vorhanden
2	vorhanden, entspricht nicht der momentanen Belastung
1	vorhanden, entspricht der momentanen Belastung
0	vorhanden, entspricht zukünftiger Belastung

Tabelle 5 Bewertung der Tragschichte (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005)

3.1.3 Aufbau des Datensatzes

Das geotechnische Streckenband liegt in Form eines Excel-Sheets vor. Unterteilt wird diese Datei in drei Hauptkomponenten, genannt Regulativum, Tabelle und Diagramm. Das Regulativum (Abbildung 27) bietet eine Übersicht über das Zustandekommen des eigentlichen Ergebnisses, der Zustandszahl. Zu allererst werden die Übergruppen ‚Oberbau‘, ‚Oberbaumesswagen‘ (MDZ-Ziffer), ‚Unterbau‘, ‚Untergrund‘ und ‚Wassersituation‘ in ihre Komponenten unterteilt. Über den fixierten Gewichtungsfaktor, das Zutreffen der jeweiligen Komponente und die eigentliche Bewertung wird für jede dieser Gruppen die mögliche Maximalpunktezahl ermittelt. Trifft beispielsweise für den Oberbau die Komponente verunreinigter Gleisschotter nicht zu, so ist die dafür vorgesehene Spalte ‚Verfügbarkeit‘ mit der Zahl 0 zu füllen. Aufgrund der Multiplikation der soeben genannten Werte wird diese Komponente im weiteren Verlauf des geotechnischen Streckenbandes nicht mehr berücksichtigt. Wird also die maximal mögliche Punktezahl für eine Gruppe erreicht, entspricht dies dem schlechtestmöglichen Zustand des Fahrweges hinsichtlich dieser Komponente. Am unteren Ende des Regulativums ist die Gewichtung der für die jeweiligen Komponenten ermittelten Qualitätsziffern angeführt, die schlussendlich die Zustandszahl ergibt. Betrachtet man diese Gewichtung, so kann man erkennen, dass das Ergebnis massiv vom Oberbau (inkl. MDZ-Ziffer) beeinflusst wird, der mit rund 54 % den Hauptparameter der Zustandszahl darstellt. Dem stehen die Wassersituation mit 27 % und der Unterbau mit lediglich 15 % gegenüber. Das geotechnische Streckenband, vor allem die Zustandszahl als Endprodukt, kann somit nur bedingt als Beschreibung des Unterbaus angesehen werden.

GRUPPE	BEURTEILUNGSKRITERIEN		GEWICHTUNG bzw. FAKTOR	VERFÜGBARKEIT BEURTEILUNGSKRITERIEN?		SCHLECHTEST MÖGLICHE WERTUNG		
				JA = 1	NEIN = 0	Wertung	Wertung x Gewicht x Verfügbarkeit	Max. mögliche Pkt.- Summe
Gleis 1	OBERBAU	schlechte Gleislage	2	1	1	2	13	
		hoher Wartungsaufwand	1	1	1	1		
		nasser Gleisschotter	2	1	1	2		
		verunreinigter Gleisschotter	2	1	1	2		
		schlechte Belüftung	2	1	1	2		
		nasser Gleisschotter (Georadar)	2	1	1	2		
		verunreinigter Gleisschotter (Georadar)	2	1	1	2		
	MDZ-ZIFFER	Oberbaumesswagen	1	1	40	40	40	
	UNTERBAU	Tragschichte	1	1	3	3	16	
		kurzes Stopintervall	2	1	1	2		
		Sutten	1	1	1	1		
		Spritzstellen	2	1	1	2		
		Frostaufzüge	2	1	1	2		
		feuchtes Gleisplanum (Georadar)	1	1	1	1		
unebenes Gleisplanum (Georadar)		1	1	1	1			
TOPOGRAPHIE (Bodenzustand)	Damm	links	2	1	2	4		
	UNTERGRUND	TOPOGRAPHIE (Bodenzustand)	Damm- aufstandsfläche	links	3	1	2	6
rechts			1	2	6			
geländegleich		links	1,5	1	0	0		
		rechts	1	1	0	0		
Einschnitt		links	1	1	0	0	rechts 6	
		rechts	1	1	0	0		
WASSERSITUATION	TOPOGRAPHIE (Entwässerung)	Damm	links	0	1	0	links 24	
			rechts	1	0	0		
		geländegleich	links	1	1	0		0
			rechts	1	1	0		0
		Einschnitt	links	2	1	2		4
			rechts	1	1	2		4
	Entwässerungsanlage Gleisplanum	links	5	1	3	15		
		rechts	1	1	3	15		
	WASSER	Grundwasser	links	0,5	1	2	1	rechts 24
			rechts	1	1	2	1	
		Sickerwasser	links	0,5	1	2	1	
			rechts	1	1	2	1	
		Schicht- bzw. Stauwasser	links	0,5	1	2	1	
			rechts	1	1	2	1	
Hangwasser		links	0,5	1	2	1		
		rechts	1	1	2	1		
Kapillarwasser	links	0,5	1	2	1			
	rechts	1	1	2	1			
QUALITÄTSZIFFER (QZ)	Oberbau Gleis 1		100	100				
	MDZ-Ziffer Gleis 1		80	80				
	Unterbau Gleis 1		50	50				
	Untergrund links		10	10				
	Wassersituation links		90	90				

Abbildung 27 Geotechnisches Streckenband, Regulatorium

Der zweite Teil des geotechnischen Streckenbandes ist die Tabelle, welche die Berechnungsgrundlage der ermittelten Ergebnisse bildet. Hierbei werden sämtliche erhaltenen Werte in hundert Meter Abschnitten eingetragen und mit den im Regulativ ersichtlichen Gewichtungen versehen. Es werden dabei Qualitätsziffern für jede der beschriebenen Gruppen eruiert. Die Qualitätsziffern Untergrund, Wassersituation und Unterbau werden für den gesamten Fahrweg ermittelt, während die Gleislagequalitätsmessung durch den Oberbaumesswagen von der Gleisanzahl abhängen. Aus diesen Qualitätsziffern werden die gleisspezifischen Zustandszahlen errechnet, die durch das System der Mittelwertbildung auf eine gesamte Zustandszahl für den Fahrweg zusammengefasst werden kann. Diese Zustandszahl gibt durch Zuteilung in eine der in Tabelle 2 angeführten Qualitätsklassen Aufschluss über die notwendigen Maßnahmen in diesem Streckenabschnitt. Der dritte maßgebliche Inhalt des GSB ist die Veranschaulichung der Ergebnisse in Diagrammform (Abbildung 28). In den Diagrammen sind sämtliche Werte enthalten und können in Abhängigkeit der Kilometrierung eingesehen werden. Als Zusatzinformation wird fallweise auch die durch den Oberbaumesswagen ermittelte MDZ-Ziffer diesem Diagramm zugefügt.

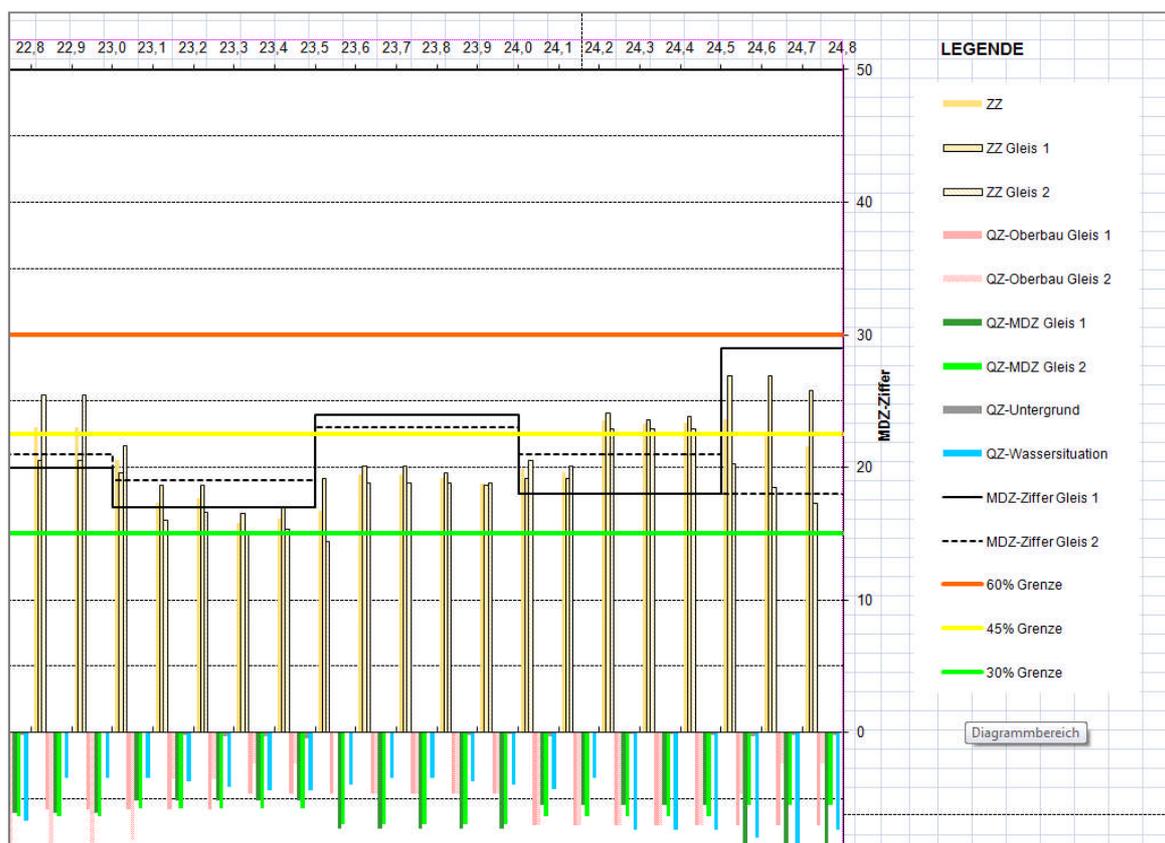


Abbildung 28 Geotechnisches Streckenband, Zustandsdiagramm

3.2 Gleisagedatenbank TU Graz

(Hummitzsch 2009)

Die Eingangsdaten resultieren aus Erkundungen mit Hilfe des Messwagens EM 250 der ÖBB, der in regelmäßigen Abständen (ca. zwei- bis viermal jährlich) das österreichische Streckennetz befährt. Aus diesen Messfahrten lassen sich unter anderem die aktuelle MDZ-Ziffer (Kapitel 2.5.1) und Informationen über die aktuelle Gleislagequalität in Form der vertikalen Standardabweichung (SIGMA-h) eruieren. Um eine optimale Nutzung der Vielzahl an zur Verfügung gestellten Daten zu gewährleisten, wurden und werden diese in eine Datenbank überführt. Die Gleisagedatenbank der TU Graz verfolgt hierbei das Ziel einer Zusammenfassung der ÖBB-Strecken in größtmögliche Abschnitte mit aufsteigender und vollständiger Kilometrierung. Die folgende Abbildung 29 zeigt das österreichische Streckennetz, das mit Stand Mai 2010 in der TUG-Datenbank enthalten ist.

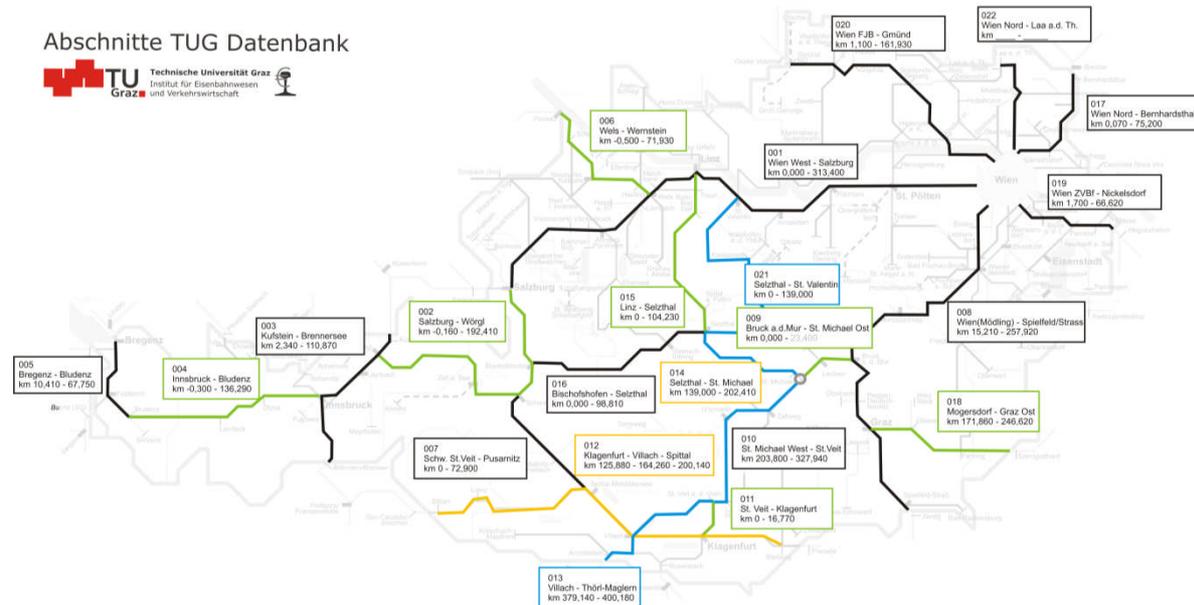


Abbildung 29 Netz der TUG-Datenbank

3.2.1 Inhalt der TUG-Datenbank

Die Datenbank enthält auf Basis der von den ÖBB zu Verfügung gestellten Daten Informationen über folgende Datengruppen:

I Allgemeine Informationen

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

I Einbauten

- Bahnhöfe, Eisenbahnkreuzungen, Brücke, Tunnel, Weichen

I Maschineneinsätze inklusive deren Zeitpunkt

- Unterbausanierung (AHM)
- Schotterbettreinigung (RM)
- Gleisneulage (SUZ)
- Stopfen und Stabilisieren von Gleisen (MDZ)
- Weichenstopfen (PLM)
- Schleifen (Speno)

I Messdaten

- Kennwerte der Gleislagequalität (MDZ - Ziffer, SIGMA-h)
- Sonstige Zustandsdaten des Oberbaus (Verwindung, Spurweite)

I Krümmung, Radius, Überhöhung

I Oberbau

- Schienen
- Schwellen

I Abschnittsspezifische Parameter

- Maximale Betriebsgeschwindigkeit
- Längsneigung
- Belastungsklasse

I Qualitätsparameter:

- Q_n (Raumanfangsqualität nach dem n-ten Maschinensatz)
- b_n (Verschlechterungsrate nach dem n-ten Maschinensatz)
- T_{n_1} (Anfangszeitpunkt des n-ten Raumes)
- T_{n_2} (Endzeitpunkt des n-ten Raumes)

Die Erweiterung der Datenbank um die angeführten Qualitätsparameter erfolgte aufgrund intensiver Forschungsarbeiten des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft hinsichtlich einer „Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen“. Dies beinhaltet die Parameter b , Delta-Schnitt und Q_n sowie die dazugehörigen zeitlichen Angaben. Aufgrund dieser Berechnungen ist es möglich die Gleislage hinsichtlich ihres Qualitätsverhaltens zu prognostizieren, was mit Hilfe folgenden mathematischen Ansatzes erreicht werden kann:

$$Q_t = Q_n \times e^{b \times t}$$

- $Q_{(t)}$ Qualität zum Zeitpunkt t in MDZ-a oder SIGMA-h. Je höher dieser betragsmäßige Wert, desto schlechter ist die Lagequalität.
- Q_n Ausgangsqualität eines Verschlechterungsastes
- b Verschlechterungsrate (je größer der Wert, desto schneller verschlechtert sich die Gleislage)
- t Zeit seit der letzten Instandhaltung

Die Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen bezieht sich dabei immer auf einen Querschnitt, der in Zeiträume unterteilt wird. Die TUG-Datenbank verfügt dabei über Querschnitte im Abstand von fünf Metern auf einem erfassten Streckennetz von derzeit ungefähr 4000 Gleiskilometer. Abbildung 30 zeigt hierbei einen dieser Querschnitte, welcher in diesem Beispiel in drei zeitliche Abschnitte getrennt ist. Die Trennung zweier Abschnitte erfolgt dabei durch einen Maschineneinsatz, in diesem Fall eines mechanisierten Durcharbeitungszuges (MDZ). Durch schwarze Punkte gekennzeichnete Einzelwerte beschreiben die aus den Messergebnissen des Oberbaumesswagens bestimmte Qualitätsziffer. Durch die mathematische Vorgehensweise der Regressionsrechnung mit der Methode der kleinsten Quadrate ist es möglich, die e-Funktion mit ihren Größen Verschlechterungsrate und Ausgangsqualität zu bestimmen.

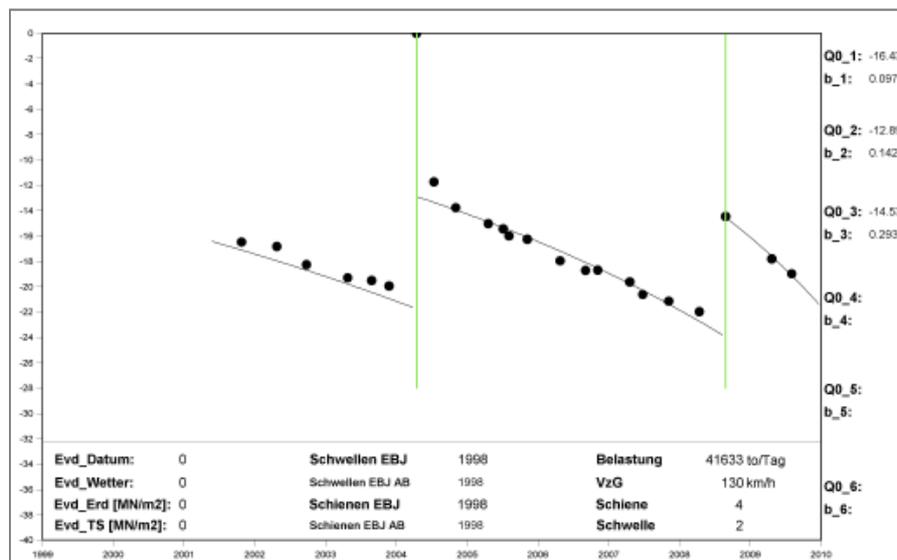


Abbildung 30 Qualitätsverhalten von Gleisen

Die Bestimmung der Regressionskurve erfolgt dabei auf dem Prinzip der Minimierung der Fehlerquadrate zwischen den einzelnen Messwerten (q_n) und der resultierenden Regressionskurve ($Q(t)$). Der dritte dieser in der Gleislagedatenbank enthaltenen Parameter ist Delta-Schnitt, der die durchschnittliche Abweichung der in diesem Raum befindlichen Messwertes von der Regressionskurve beschreibt.

3.3 Auswertungsmethoden bzw. Verknüpfung der Datensätze

In diesem Kapitel soll einerseits ein Überblick über die verwendeten statistischen Mittel zur Auswertung gegeben werden und andererseits erläutert werden, in welcher Art und Weise die Datensätze aufbereitet wurden, um deren Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Sämtliche in diesem Kapitel angeführten Werte wurden dem ersten auszuwertenden Abschnitt zwischen Bruck und Graz entnommen.

3.3.1 Aufbereitung der Datensätze

Zuerst wird eruiert, welche Informationen für die weiteren Auswertungen tatsächlich verwendet werden, um die Datenmenge zu verringern. Des Weiteren muss das Problem der Querschnittsabstände gelöst werden. Dieses Problem tritt auf, da die TUG-Datenbank, wie bereits erläutert, Querschnitte in Abständen von fünf Meter aufweist, während das geotechnische Streckenband lediglich in Abschnitten zu je 100 Meter unterteilt ist. Aus diesem Grund sind die Daten der TUG-Datenbank ebenfalls auf solche Abschnitte zu überführen. Außerdem beschreibt das geotechnische Streckenband einzelner Abschnitte einen Zeitpunkt, während die Gleislagedatenbank in verschiedene Zeiträume unterteilt ist. Es muss auch hier die Kompatibilität geschaffen werden.

TUG-Datenbank

Da die Daten des geotechnischen Streckenbandes eine Momentaufnahme sind, ist es notwendig, auch die Gleislage der TUG-Datenbank zu genau diesem definierten Zeitpunkt zu kennen, um eine Vergleichbarkeit der Datensätze gewährleisten zu können. Dieser Vorgang wird hier anhand eines Auswertungsabschnittes gezeigt, der im November 2003 veröffentlicht wurde. Es ist notwendig, den mit diesem Monat übereinstimmenden Zeitraum der TUG-Datenbank zu eruieren. Nun kann über das Verhalten der Gleislagequalität die MDZ-Ziffer zu diesem Zeitpunkt berechnet werden.

Dieser Vorgang soll mittels folgenden Beispiels für den Zeitraum n verdeutlicht werden:

t_{n1}	Q_{n1}	b	t_{n2}	$Q_{(T=Nov\ 2003)}$
2002,4447	-12,5166	0,1737	2004,0903	-16,1632
Berechnungsgrundlage	$Q_t = Q_n \times e^{bxt}$			

Die zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnete Gleislagequalität wird in weiterer Folge als $Q(T1)$ bezeichnet, wobei sich die Qualitätsziffer immer auf den jeweiligen Streckenbereich von eins bis vier bezieht. Des Weiteren wird auf das Tiefstellen der verschiedenen Indices verzichtet, da dies im verwendeten Statistikprogramm nicht möglich ist.

Die MDZ-a Werte der Gleislagedatenbank liegen damit sowie die Verschlechterungsraten b für alle in der Datenbank erfassten Querschnitte vor. Diese werden im nächsten Schritt über Mittelwerte zu Abschnitten von je 100 Meter zusammengefasst. Damit ist bereits eine Vergleichbarkeit mit den Daten des geotechnischen Streckenbandes gegeben. Um jedoch die Aussagekraft der MDZ-Ziffer zu unterstreichen bzw. mögliche Ausreißer eventuell erklären zu können, wird nicht ausschließlich der $Q(T)$ -Wert, sondern auch immer die Verschlechterungsrate b in die verschiedenen Auswertungen mit einbezogen. Des Weiteren werden die relative Verschlechterungsrate (b_{rel}) und die relative Gleislagequalität (Q_{rel}) ermittelt, um die verschiedenen Referenzabschnitte in ihrer Gesamtheit mit den Werten des GSB vergleichen zu können. Aufgrund der Bildung dieser Relativwerte sollten Effekte wie unterschiedliche Häufigkeit der Instandsetzung, verschiedene Belastungsklassen oder umgebungsspezifische Besonderheiten der einzelnen Referenzabschnitte aus dem Datensatz entfernt werden.

Abschließend steht an dieser Stelle eine Zusammenfassung der Nomenklatur hinsichtlich der verwendeten Werte der TUG-Datenbank bezogen auf den Streckenbereich 1:

$Q(T1)$	Gleislagequalität eines fünf Meter Abschnittes laut TUG-Datenbank zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des geotechnischen Streckenbandes für Streckenbereich 1 (November 2003)
$Q(T1_{100})$	Per Mittelwert zusammengefasste Gleislagequalität für einen 100 Meter Abschnitt im Streckenbereich 1
b	Verschlechterungsrate eines fünf Meter Abschnittes laut TUG-Datenbank
b_{100}	Per Mittelwert zusammengefasste Verschlechterungsrate für einen 100 Meter Abschnitt
Q_{rel}	$Q(T_{100})$ -Werte bezogen auf den Median der Gleislagequalität des jeweiligen Streckenbereiches
b_{rel}	b_{100} -Werte bezogen auf Median der Verschlechterungsrate des jeweiligen Streckenbereiches

Geotechnisches Streckenband

Aus dem geotechnischen Streckenband werden die Parameter ‚schlechte Gleislage‘, ‚hoher Wartungsaufwand‘ und ‚kurzes Stopfintervall‘ eliminiert, da diese in der TUG-Datenbank ebenfalls erhoben werden. Sofern anhand der grafischen Ausgabe der Zustandszahlen ersichtlich ist, dass Gleis 1 und ein mögliches Gleis 2 keine signifikanten Unterschiede aufweisen, können auch die Daten des zweiten Gleises entfernt werden. Zusätzlich werden die visuell erfassten Parameter ‚nasser Gleisschotter‘ und ‚verunreinigter Gleisschotter‘ in weiterer Folge nicht mehr benötigt, da diese Parameter ebenfalls als Georadar-Messdaten in diesem Datensatz verfügbar sind. Im nächsten Schritt werden sämtliche Gewichtungen und Berechnungen der Qualitäts- und Zustandszahlen beseitigt, da in dieser Arbeit alle Vergleiche lediglich mit den Eingangsdaten des geotechnischen Streckenbandes durchgeführt werden. Dass hier ausschließlich Rohdaten behandelt werden, liegt daran, dass in der gegenständlichen Arbeit weder eine Überprüfung noch eine Bestätigungen der Berechnungen und Gewichtungen des geotechnischen Streckenbandes als Gesamtes erfolgen soll. Vielmehr beschäftigen sich die Auswertungen mit den einzelnen Eingangsparametern und deren eventuellen Zusammenhang mit der Gleislage, weswegen es nicht zielführend ist, mit dem Endprodukt (Zustandszahl) des geotechnischen Streckenbandes zu arbeiten.

3.3.2 Statistische Grundlagen

Die zu durchlaufenden Schritte einer statistischen Auswertung können in folgende Bestandteile gegliedert werden (Sachs, Hedderich 2006):

- I Deskriptive Statistik
- I Explorative Datenanalyse (EDA)
- I Konfirmative Statistik

Hierbei dient die deskriptive Statistik der Datenbeschreibung einschließlich einer systematischen Suche nach aufschlussreichen Informationen über die Struktur des Datenkörpers. Das Ziel besteht darin, Strukturen in den Datenkörpern zu erkennen und bedeutende Abweichungen dieser aufzuzeigen. Der Übergang zur explorativen Datenanalyse ist dabei fließend, da sich diese mit der eindringlichen Analyse der Datenkörper beschäftigt. Das Ziel der EDA besteht in der Darstellung der Daten, dem Auffinden von Strukturen und dem Erkennen von Besonderheiten. Zusätzlich sollte die EDA die Filterung der möglichen Auswertungsmethoden bewerkstelligen. Anhand der konfirmativen Statistik können anschließend mit den ausgewählten Auswertungsmethoden Schlussfolgerungen gezogen und Hypothesen erstellt werden (Sachs, Hedderich 2006).

Im Rahmen dieser Arbeit dienen diese statistischen Methoden dem Beschreiben des Ist-Zustandes und dem Erkennen möglicher Abhängigkeiten.

Der Boxplot

Der Boxplot ist ein Diagramm, das verwendet wird, um die Verteilung statistischer Daten grafisch darzustellen. Er vermittelt einen Eindruck darüber, in welchem Bereich die Daten liegen und wie sie sich über diesen verteilen. Das System beruht hierbei auf der sogenannten Fünf-Punkte-Zusammenfassung, also der Darstellung des Medianwertes, der beiden Quartile und den Extremwerten (Abbildung 31). Im Quartilsabstand bzw. in der Box befinden sich 50 % der betrachteten Werte, während je 25 % über dem oberen und 25 % über dem unteren Quartil angesiedelt sind. Der Boxplot wird auch als Box-Whisker-Plot bezeichnet, weswegen die Extremwerte in einigen Literaturen auch oberer und unterer Whisker genannt werden. Der Abstand zwischen den Quartilswerten und den Extremwerten wird mit dem 1,5-fachen des Interquartilsabstandes (IQR) begrenzt. Werte außerhalb dieser Spannweite werden als Ausreißer bezeichnet, wobei diese im Bereich von $1,5 \times \text{IQR}$ und $3 \times \text{IQR}$ als „milde“ Ausreißer angesehen werden (Sachs, Hedderich 2006). Der Median bezeichnet jenen Wert, bei dem 50 % der Werte gleich groß oder größer sind und halbiert somit eine Stichprobe. Der Median ist jedoch ein Wert aus dem Datenkörper und unterscheidet sich somit maßgeblich vom arithmetischen Mittel, das aus der Summe aller Werte geteilt durch die Anzahl der Werte ermittelt wird. Der Median hat dadurch den Vorteil, robuster gegenüber Ausreißern zu sein und sich auch auf ordinal skalierte Variablen anwenden zu lassen.

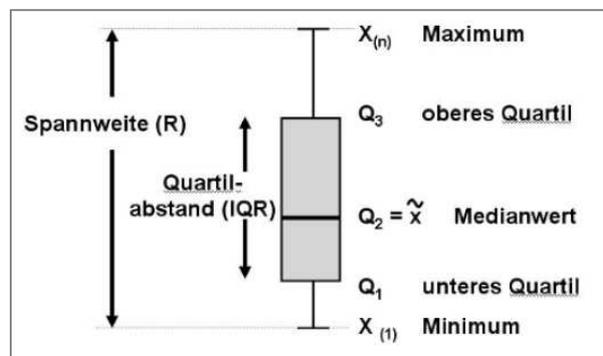


Abbildung 31 Beschreibung Boxplot (Sachs, Hedderich 2006)

Sollte nun der Boxplot nicht nur zur Veranschaulichung eines, sondern zum Vergleich zweier Datensätze verwendet werden, so bedient man sich dem gekerbten Boxplot (Abbildung 32). Dieser bietet die Möglichkeit, signifikante Unterschiede von Datensätzen herauszufiltern. Dabei handelt es sich um die Frage, ob die Lage der beiden Verteilungen statistisch signifikant verschieden ist oder ob Zufallsschwankungen nicht ausgeschlossen werden können. Gekerbte Boxplots geben durch ihre Kerblängen Aufschluss darüber, wie sehr der Median einer Verteilung schwanken kann. Abhängig sind diese Kerblängen von der Anzahl der Beobachtungen und der Streuung der Werte. Demnach sind die Einkerbungen geringer und somit die Lage des Medians sicherer, je mehr Beobachtungen vorhanden sind bzw. je weniger diese streuen.

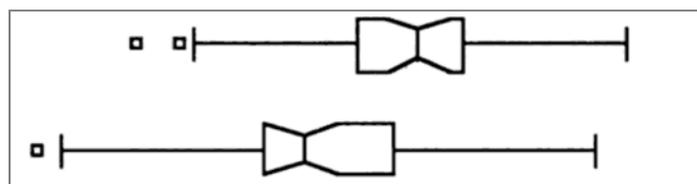


Abbildung 32 Gekerbte Boxplots (Polasek 1994)

Interpretiert werden diese gekerbten Plots folgendermaßen: Überlappen sich die beiden Einkerbungen nicht, so kann der Schluss gezogen werden, dass sich diese beiden Verteilung statistisch signifikant voneinander unterscheiden. Befindet sich der Median eines Boxplots im Einkerbungsbereich des anderen, so sind die beiden Verteilungen als statistisch gleich zu beurteilen. Handelt es sich um einen Grenzfall, in dem sich die beiden Einkerbungsbereiche gerade überschneiden, kann zwar von einem Unterschied gesprochen werden, der jedoch keine statistische Signifikanz aufweist. (Polasek 1994)

Histogramm

Ein Histogramm ist die grafische Darstellung der Häufigkeitsverteilung von Messwerten. Um eine Form der Stichgrößenverteilung zu erhalten und die Kenngrößen leichter interpretieren zu können, werden die Beobachtungen n in Klassen k unterteilt. Gleiche Klassenbreiten b sind nicht unbedingt notwendig, erleichtern die Interpretation des Histogramms aber ungemein und sollten daher angestrebt werden. Die Häufigkeiten werden durch Rechtecke der Höhe n und der Breite b in einem Koordinatensystem dargestellt. (Sachs, Hedderich 2006)

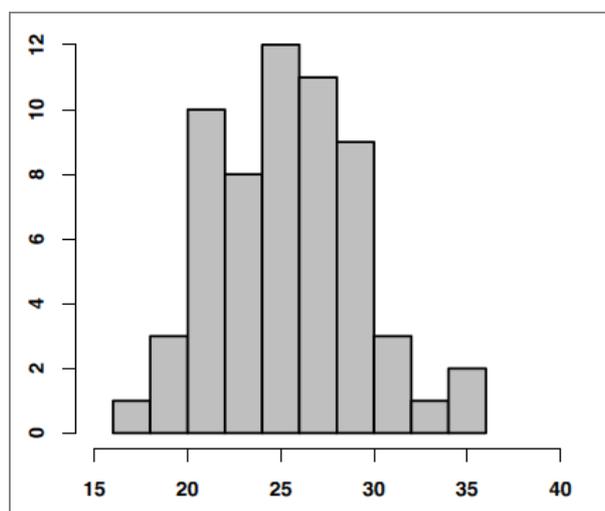


Abbildung 33 Beschreibung Histogramm (Sachs, Hedderich 2006)

Das Tiefendiagramm

Ein Tiefendiagramm beschreibt die einfache Aneinanderreihung mehrerer Werte ordinal skaliertes Datensätze über einen gewissen Zeitraum, Bereich oder Ähnliches, welcher vertikal aufgetragen wird. Die folgende Abbildung 34 stellt die Entwässerung über einen Bereich von 120 Abschnitten dar.

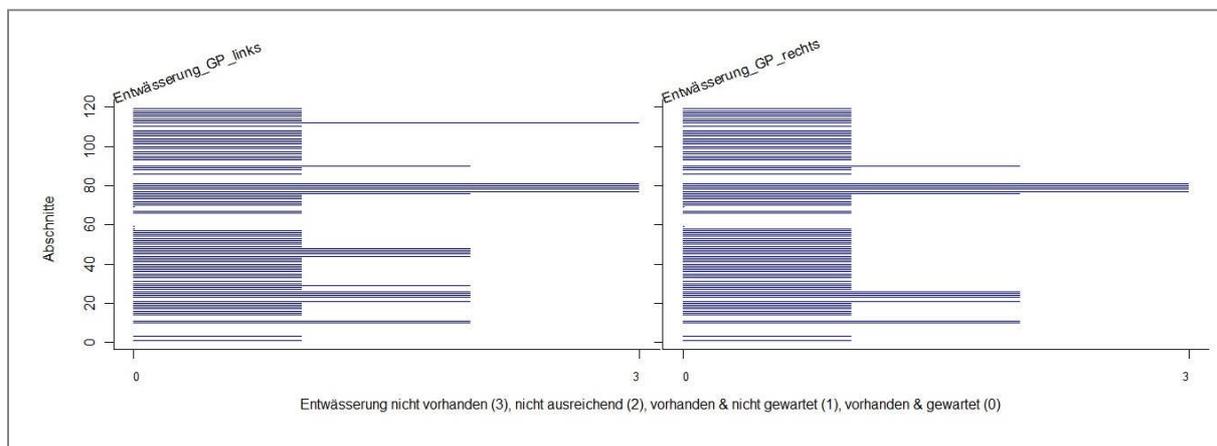


Abbildung 34 Beispiel eines Tiefendiagramms

Aufgrund dieser grafischen Darstellung ist es möglich den Verlauf der Entwässerung sowie die Unterschiede zwischen rechter und linker Seite zu erkennen. Die Qualität der Entwässerung in diesem Abschnitt wird hierbei durch die Länge der horizontalen Linie beschrieben. Ist für einen Abschnitt keine horizontale Linie vorhanden, so wurde dieser mit 0, also mit ‚vorhanden und gewartet‘, beurteilt.

4 Streckenbereiche und Datenstrukturen

4.1 Beschreibung der untersuchten Streckenbereiche

In diesem Kapitel werden die vier auszuwertenden Streckenbereiche erläutert, die jeweils eine Länge von bis zu zwölf Kilometer besitzen. Diese Bereiche wurden in Absprache mit dem Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der TU Graz als repräsentative Referenzabschnitte ausgewählt. Die Beschreibungen beinhalten neben den technischen Rahmenbedingungen wie Schwellenart und den vorhandenen Radienklassen auch eine erste Veranschaulichung der Gleislagequalität der einzelnen Bereiche. Am Ende dieses Kapitels steht der Vergleich der Gleislagequalitäten laut TUG und GSB aller Streckenbereiche, um deren Verhalten zueinander zu charakterisieren.

4.1.1 Streckenbereich 1 : Südbahn km 182,400 – 194,400

Der erste auszuwertende Streckenbereich befindet sich im zweigleisig ausgebauten Abschnitt Bruck/Mur – Graz, der der österreichischen Südbahn zugeordnet wird. Diese erstreckt sich vom Wiener Südbahnhof bis an die österreichisch/slowenische Grenze bei Spielfeld-Straß und war durch die Fertigstellung der Semmeringbahn im Jahre 1854 erstmals durchgängig befahrbar. Der in dieser Masterarbeit betrachtete Abschnitt führt vom Bahnhof Frohnleiten bis zur Haltestelle in Stübing und misst eine Länge von zwölf Kilometern. Nach Betrachtung der laut GSB ermittelten Zustandszahlen kann von einem ähnlichen Verhalten der beiden Gleise zueinander ausgegangen werden, weswegen in weiterer Folge lediglich Gleis 1 untersucht wird. Dieses weist folgende technische Rahmenbedingungen auf:

- I Belastung 2010
 - 44.000 GesBt/Tag⁶
- I Schwellenart
 - 62 % Holz- und 29 % Betonschwellen
- I Radiusklassen
 - 98 % Radius > 600 m
- I Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank
 - Median der Gleislagequalität : -12,7
 - Median der Verschlechterungsrate : 0,13

⁶ Belastung pro Gleis und Tag in Gesamtbruttotonnen

Diese Rahmenbedingungen deuten auf einen relativ stark belasteten Abschnitt hin (Klassifizierung laut TUG von <15.000 bis >70.000). Des Weiteren kann die Streckenführung als gestreckt bezeichnet werden, da Radien über 600 m überwiegen.

Das Veröffentlichungsdatum des geotechnischen Streckenbandes ist November 2003, weswegen sich auch die Gleislagequalitätswerte der TUG-Datenbank laut 3.3.1 auf dieses Datum bezieht.

4.1.2 Streckenbereich 2 : Nordbahn km 64,920 bis 73,400

Der zweite Streckenbereich befindet sich auf der österreichischen Nordbahn, die von Wien in Richtung Bernhardsthal führt, wo sie auch die tschechische Staatsgrenze passiert. Der in dieser Arbeit untersuchte Abschnitt erstreckt sich von der Haltestelle Hohe-
nau bis zum Frachtenbahnhof Bernhardsthal über eine Länge von 8,5 Kilometer. Im Weiteren wird in dieser Arbeit lediglich Gleis 2 untersucht, das sich laut GSB-Zustandszahl als marginal schlechter als Gleis 1 herausstellt. Gleis 2 verfügt über folgende Charakteristik:

- I Belastung 2010
 - 32.000 GesBt/Tag
- I Schwellenart
 - 78 % Holz- und 18 % Betonschwellen
- I Radiusklassen
 - 100 % Radius > 600 m
- I Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank
 - Median der Gleislagequalität : -14,4
 - Median der Verschlechterungsrate : 0,13

Dieser Bereich kann somit als gerade und mit einer mittlere Belastung charakterisiert werden. Zudem dominieren Holzschwellen.

Das geotechnische Streckenband wurde im Juli 2004 veröffentlicht.

4.1.3 Streckenbereich 3 : Salzburg-Tirol Bahn km 172,000 bis 184,000

Dieser Streckenbereich befindet sich zwischen Kitzbühel und Wörgl. Es handelt sich um eine zweigleisig ausgebaute Bahnstrecke, die heute oftmals als Teil der österreichischen Westbahn angesehen wird. Der zu untersuchende Bereich beinhaltet eine Länge von zwölf Kilometer und führt vom Bahnhof Westendorf bis zum Bahnhof Hopfgarten. Die technischen Rahmenbedingungen dieses Bereiches lauten wie folgt:

I Belastung 2010

- 22.000 GesBt/ Tag

I Schwellenart

- 44 % Holz- und 48 % Betonschwellen

I Radiusklassen

- 55 % $R > 600$ m
- 17 % $400 \text{ m} < R < 600$ m
- 22 % $250 \text{ m} < R < 400$ m
- 6 % $R < 250$ m

I Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank

- Gleis 1
 - Median der Gleislagequalität : -11,6
 - Median der Verschlechterungsrate : 0,08
- Gleis 2
 - Median der Gleislagequalität : -12,9
 - Median der Verschlechterungsrate : 0,09

Demzufolge kann dieser Streckenbereich als äußerst kurvig, jedoch mit relativ geringer Belastung charakterisiert werden. Des Weiteren weist er aufgrund von häufigen Anschnittbereichen und mehreren Tunnel ein insgesamt sehr inhomogenes Verhalten auf. Aus diesem Grund divergiert die Gleislagequalität der einzelnen Gleise sehr stark, weswegen in diesem Bereich beide Gleise untersucht werden. Die Werte der Gleislagequalität beziehen sich aufgrund der Veröffentlichung des geotechnischen Streckenbandes auf September 2004.

Trotz seiner Inhomogenität zeichnet sich dieser Abschnitt durch außergewöhnlich niedrige Verschlechterungsraten aus, die Gleislagequalität liegt im verhältnismäßig guten Durchschnitt. Der Grund hierfür liegt neben der geringen Belastung einerseits in der häufigen Instandsetzung dieses Streckenbereichs und andererseits an der vergleichsweise neuen Gleislage. Während der Einbau der Schienen und Schwellen bei den restlichen Referenzabschnitten teilweise 20 Jahre und länger zurückliegt, weist dieser Bereich keinen Einbau vor 1999 auf.

4.1.4 Streckenbereich 4 : Innere Westbahn km 36,800 bis 48,800

Die innere Westbahn bezeichnet den zweigleisigen Bereich der alten Westbahn zwischen Wien und St. Pölten. Der hier behandelte Abschnitt verläuft von Neulengbach über das Tullnerfeld nach Böheimkirchen und besitzt eine Länge von zwölf Kilometer. In dieser Masterarbeit wird aufgrund des ähnlichen Gleislageverhaltens der beiden Gleise lediglich Gleis 2 untersucht, welches folgende technischen Besonderheiten aufweist:

- I Belastung 2010
 - 74.000 GesBt/ Tag
- I Schwellenart
 - 58 % Holz- und 40 % Betonschwellen
- I Radiusklassen
 - 100 % $R > 600\text{m}$
- I Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank
 - Median der Gleislagequalität : -16,0
 - Median der Verschlechterungsrate : 0,20

Das geotechnische Streckenband für diesen sehr stark belasteten Bereich wurde im September 2003 veröffentlicht. Die Qualität der Gleislage in diesem Abschnitt erweist sich sowohl im Fall der Verschlechterungsrate als auch der Gleislagequalität als schlechter, verglichen mit den bisherigen Streckenbereichen. Vor allem der hohe Median der Verschlechterungsrate (0,20) kann zumindest zu einem Teil auf die hohe Belastung in diesem Abschnitt zurückgeführt werden.

4.2 Analyse der beiden Datensätze und deren Strukturen

Trotz der vorhandenen Vergleichbarkeit der Daten auf Grund der gemeinsamen Abschnittslänge bleiben jedoch gewisse Unterschiede zwischen den beiden verglichenen Datensätzen vorhanden. Diese beziehen sich vor allem auf deren Objektivität, Messzeitpunkt und Berechnungsmethode. Durch den Vergleich und die Analyse der Datensätze werden in diesem Kapitel diese offenen Fragen beantwortet, um eine korrekte Interpretation der nachfolgenden Erkenntnisse zu gewährleisten.

4.2.1 Vergleich der Datensätze

Um einen Vergleich der Gleislagequalität der einzelnen Streckenbereiche anstellen zu können, werden die in 100 Meter Abschnitte zusammengefassten Werte der TUG-Datenbank für sämtliche Streckenbereiche gegenübergestellt (Abbildung 35).

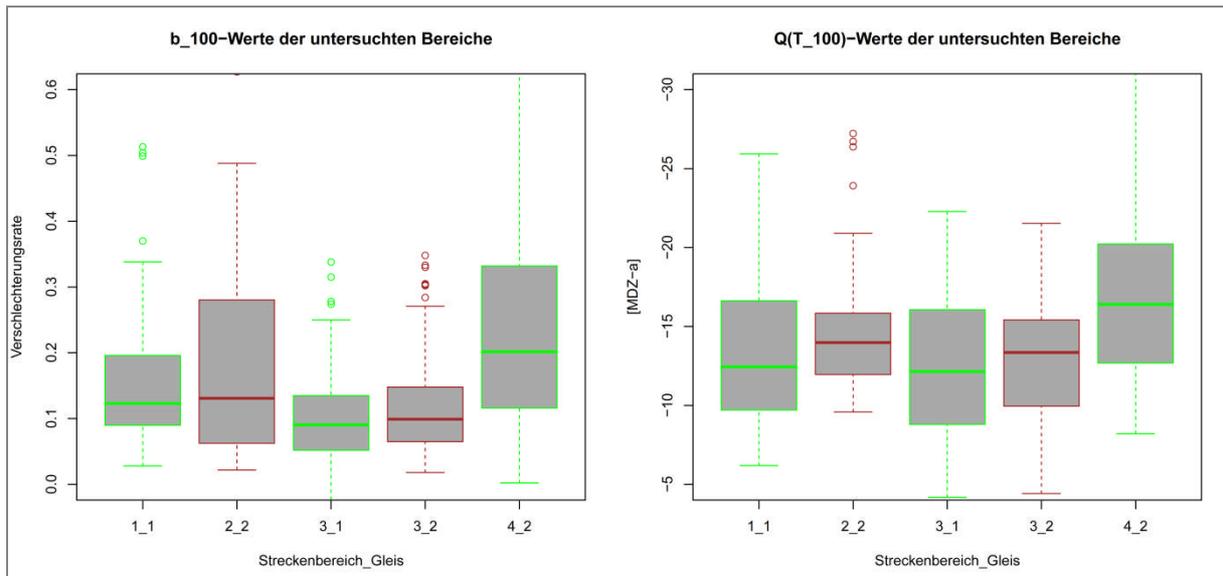


Abbildung 35 Vergleich der Streckenbereiche hinsichtlich Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank

Beim Vergleich der einzelnen Streckenbereich fällt auf, dass der Streckenbereich 4 nicht nur die schlechteste Gleislagequalität, sondern aufgrund des großen Interquartilsabstandes der Boxen auch die größte Wertestreuung besitzt. Des Weiteren wird eine außergewöhnlich große Streuung der Verschlechterungsrate im zweiten Streckenbereich offensichtlich, während sich jedoch in diesem Fall die Gleislagequalität durch eine äußerst geringe Wertestreuung auszeichnet.

Betrachtet man die $Q(T_{100})$ -Werte im Verhältnis zu den MDZ-Werten des geotechnischen Streckenbandes, so fällt eine durchgehend schlechtere Gleislage laut GSB auf (Abbildung 36). Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die $Q(T_{100})$ -Werte lediglich auf den Zeitpunkt der Veröffentlichung des geotechnischen Streckenbandes bezogen werden können. Der Zeitpunkt der tatsächlich gemessenen Werte innerhalb des GSB ist jedoch nicht eruierbar und wird vermutlich deutlich vor der Veröffentlichung liegen. Dementsprechend befinden sich die Werte laut TUG-Datenbank an einem späteren Punkt des Verschlechterungsastes wodurch Instandsetzungen zwischen den beiden Zeitpunkten liegen könnten.

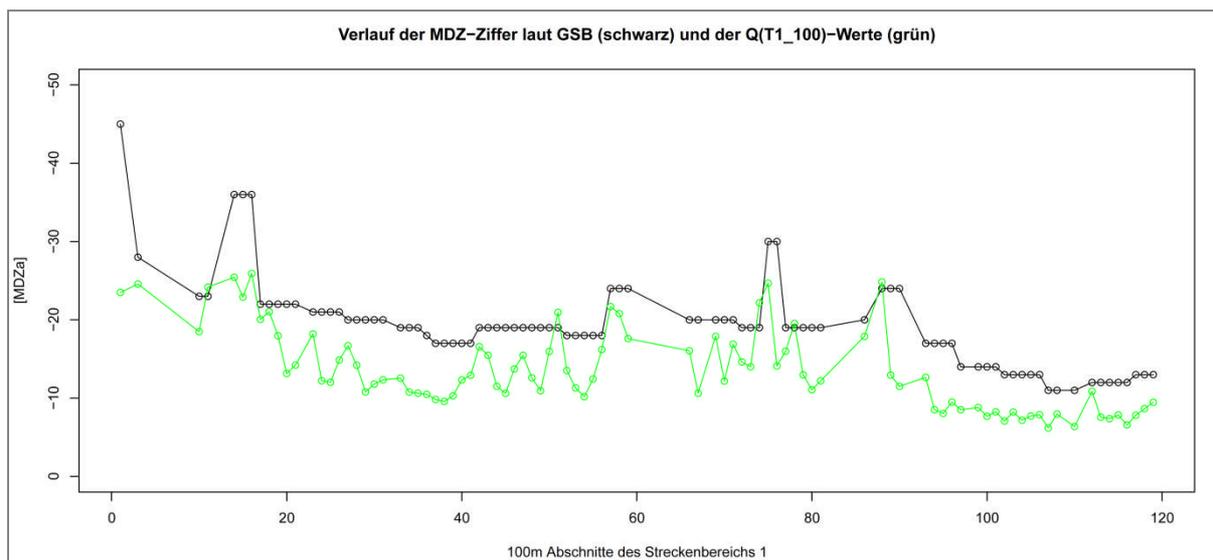


Abbildung 36 Verlauf der Gleislagequalität laut TUG-Datenbank und GSB

Die in den TUG-Daten stärker vorhandenen Schwankungen lassen sich mit der Berechnungsmethode der MDZ-Ziffer erklären. Während die MDZ-Ziffer des GSB einen Einflussbereich von 200 Meter⁷ besitzt, beläuft sich dieser bei den Daten der TUG-Datenbank auf 100 Meter, weswegen hier weit größere Schwankungen die Folge sind. Tendenziell lässt sich jedoch ein ähnlicher Verlauf der beiden Gleislagequalitäten erkennen.

4.2.2 Herkunft der Datensätze

Die Werte, die der TUG-Datenbank zugrunde liegen, basieren auf Messwerten durch den Oberbaumesswagen und darauf aufgebauten Berechnungen wie der Verschlechterungsrate. Sämtliche Randbedingungen wie das Vorhandensein von Brücken, das Einbaujahr der Schwellen, die Radiusklasse, Zeitpunkte der Instandsetzung etc. sind eindeutig definierbare und objektiv getroffene Aussagen. Mit den Werten des geotechnischen Streckenbandes verhält es sich indes anders. Während auch hier die MDZ-Ziffer vom Oberbaumesswagen geliefert wird, setzen sich die restlichen Werte aus subjektiven Beobachtungen zusammen.

In diesem Zusammenhang entstehen mehrere Unsicherheitsfaktoren. Eine davon betrifft die handelnden Experten der geotechnischen Begehung, die möglicherweise an verschiedenen Tagen ähnliche Situationen unterschiedlich bewerten. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass österreichweit mehrere Experten geotechnische Begehungen im Rahmen des GSB vornehmen. Hierbei kann es ebenfalls zu subjektiven und somit divergierenden Beurteilungen kommen, auch da sinnvollerweise in der Bewertung die Anforderungen an die Strecke (Zugzahlen, Geschwindigkeiten) mit einfließen.

⁷ Mittelung mit den Werten 100 Meter vor und nach dem betrachteten Querschnitt

4.2.3 Analyse der GSB – Daten

Auffälligkeiten betreffen einzelne Parameter des geotechnischen Streckenbandes. So wurde beispielsweise der Gleisschotter in 75 % der Abschnitte als verunreinigt bewertet. Betrachtet man allerdings den Parameter ‚Belüftung des Gleisschotters‘, so bezeichnet dieser Wert 79 % des Gleisschotters als gut belüftet. Da sich die gute Belüftung des Gleisschotters und dessen Verunreinigung jedoch im Normalfall ausschließen, müssen die Angaben als fragwürdig eingestuft werden.

Ein anderes Bild zeigt sich hinsichtlich des Wasservorkommens der Streckenbereiche. Die am häufigsten auftretenden Wasserarten Schicht- und Sickerwasser wurden zu rund 8 % mit ‚ohne Bedeutung‘ und 4 % mit ‚von besonderer Bedeutung‘ beurteilt. Die restlichen 88% entfallen auf den Mittelwert ‚von Bedeutung‘. Dies erscheint nachvollziehbar, da im Eisenbahnwesen Wasser keinesfalls ohne Bedeutung ist, und die Grenze zwischen ‚von Bedeutung‘ und ‚von besonderer Bedeutung‘ schwer gezogen werden kann. Aus diesem Grund würde sich in diesem Fall möglicherweise ein Dualsystem anbieten, welches lediglich in problematisch und unproblematisch unterscheidet. Die in dieser Arbeit getätigten Auswertungen bezüglich Wasservorkommen gestalten sich daher als schwierig, da vor allem bei diesen beiden Arten des Wassers nur sehr wenige Schwankungen aufscheinen, welche eindeutige Vergleiche zulassen.

5 Auswertungsergebnisse der Referenzabschnitte

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse, der in dieser Masterarbeit durchgeführten Auswertungen erläutert. Der Anspruch auf Vollständigkeit aller Auswertungen kann hierbei nicht geltend gemacht werden, da aus Gründen der Übersichtlichkeit lediglich die erwähnenswertesten und bedeutsamsten Erkenntnisse angeführt werden.

5.1 Einfluss der Topographie auf Entwässerung und Gleislageverhalten

Die topographischen Verhältnisse einer Bahnanlage sind jedenfalls von besonderer Bedeutung. Der Zusammenhang eines funktionierenden Bahnkörpers und der Topographie ergibt sich aus dem Parameter der Entwässerung. Diese gestaltet sich im Dammbereich um ein Vielfaches einfacher als im Einschnitt. Vor allem kann das Schichtwasser im Dammbereich leichter entweichen und in den dafür vorgesehenen Entwässerungsgraben abgeführt werden. Im Einschnitt muss hingegen eine weitaus aufwendigere Tiefenentwässerung errichtet werden, deren Wartung sich ebenfalls schwieriger gestaltet (vgl. 2.3). Die unterschiedlichen Geländebeziehungen der betrachteten Referenzabschnitte gliedern sich in ‚Damm‘, ‚geländegleich‘ und ‚Einschnitt‘. Abbildung 37 zeigt den Zustand der Entwässerungsanlagen der jeweiligen Topographien.

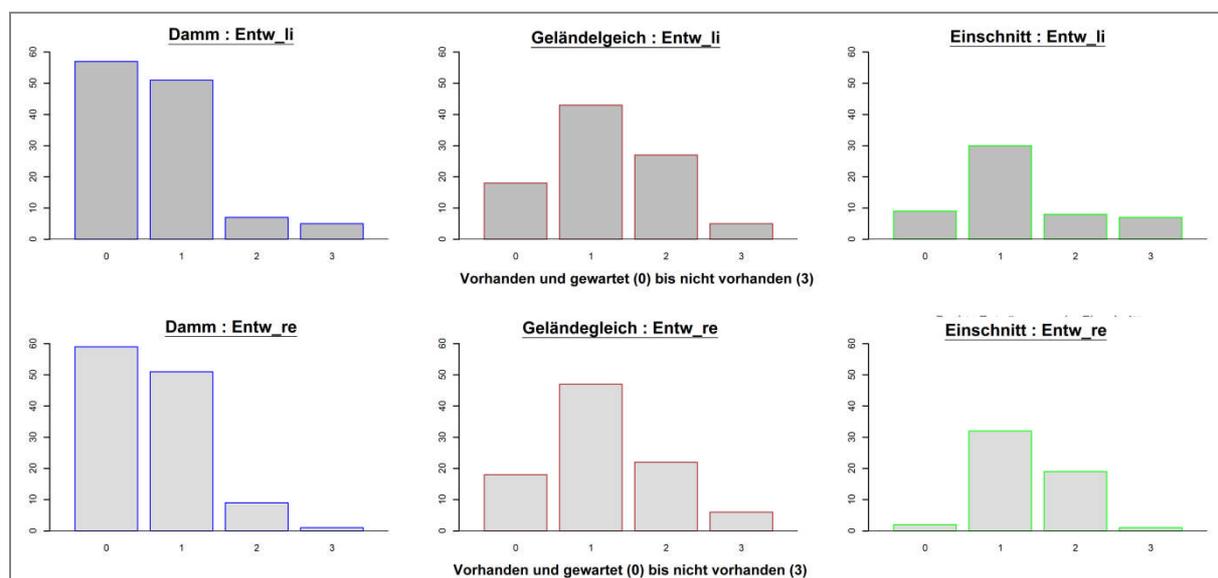


Abbildung 37 Entwässerung im Vergleich mit der topographischen Situation

Wie erwartet sind die Entwässerungsanlagen in den Dammbereichen im besten Zustand. Dies wird durch den überwiegenden Anteil an ‚vorhandenen und gewarteten‘ Entwässerungsanlagen sichtbar. Dies bestätigt auch den Ansatz, dass die Beurteilung ‚nicht vorhanden‘ im Zusammenhang mit ‚nicht vorhanden – jedoch notwendig‘ gesehen werden

muss. Dies erschließt sich, da im Dammbereich oft keine Entwässerung vorhanden, jedoch auch nicht notwendig ist. Diese Zustände wurden hier eindeutig mit 0 bewertet, weswegen das Beurteilungskriterium ‚nicht vorhanden‘ auch der Bewertung einer nicht notwendigen Entwässerung entspricht. Ein weiterer Beweis dafür liegt in der Berechnung der Zustandszahl (vgl. 0), welche sich verschlechtert je höher der Wert einer Beurteilung ausfällt.

Der Anteil der Beurteilung ‚vorhanden und gewartet‘ wird im geländegleichen Bereich etwas geringer, um anschließend im Einschnitt – vor allem rechtsseitig - nahezu zu verschwinden. Während die Beurteilungen ‚nicht ausreichend‘ und ‚nicht vorhanden‘ im Dammbereich beidseitig keine Rolle spielen, wachsen sie im geländegleichen sowie im Einschnitt zu einer bedeutsamen Größe heran. Im Allgemeinen stellt sich der Einschnitt nur als geringfügig schlechter entwässert dar als der geländegleiche Bereich. Es kann jedoch eindeutig bewiesen werden, dass in den hier vorliegenden Referenzabschnitten die Dammbereiche am wenigsten Probleme hinsichtlich Entwässerung darstellen.

Eine weitere Möglichkeit des Geländeverhaltens rund um eine Bahnanlage ist der sogenannte Anschnitt (Abbildung 1). Dieser zeichnet sich durch einen Damm auf der einen, und einen Einschnitt auf der anderen Seite dieser Gleisanlage aus. Im ausgewerteten Streckenbereich 3 befinden sich zwei Bereiche, die eine derartige Charakterisierung aufweisen. In diesem Fall interessiert natürlich im Besonderen das Verhalten der beiden vorhandenen Gleise zueinander. In der hier gezeigten Abbildung 38 wurden die Entwässerungsfähigkeit und das Gleislageverhalten der Abschnitte 19 bis 33 untersucht. Dieser 1,4 Kilometer lange Streckenabschnitt zeichnet sich durch einen Damm auf der linken und einen Einschnitt auf der rechten Seite aus.

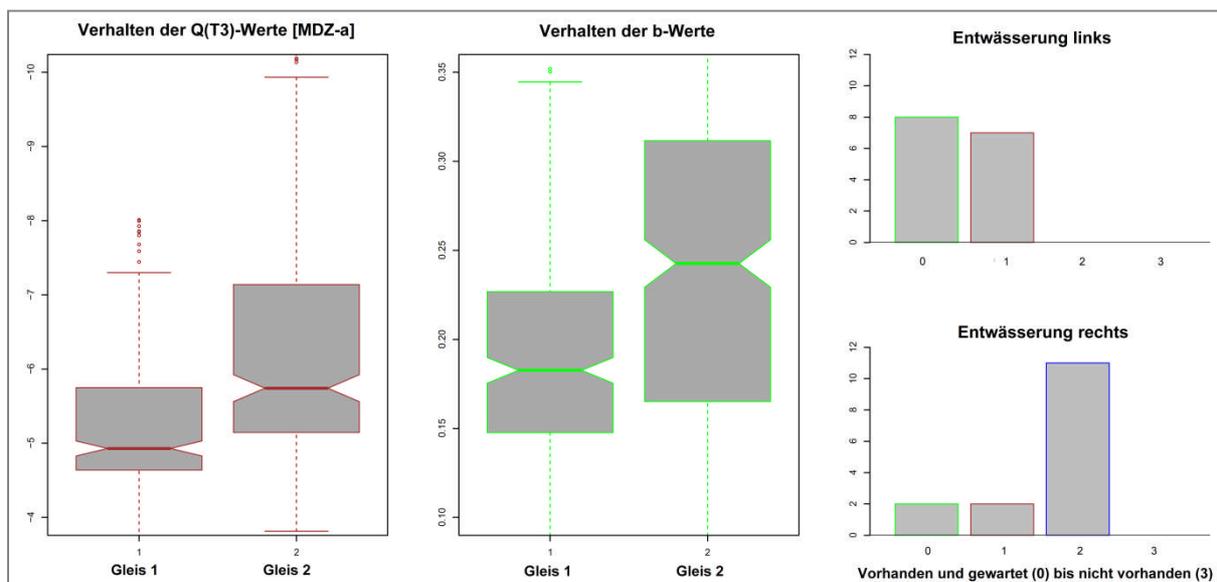


Abbildung 38 Verhalten der Gleislage im Anschnitt (Gleis 1 und 2 im Vergleich)

Das Gleislageverhalten im Anschnitt bestätigt die getroffene Annahme, dass sich - in diesem Fall - Gleis 2 in einem bedeutend schlechteren Zustand befindet als Gleis 1. Dies beweisen nicht nur die Mediane, welche sich statistisch signifikant voneinander unterscheiden, sondern auch die größeren Interquartilsabstände und die dadurch größere Streuung der Werte in Gleis 2. Desweiteren spiegelt auch die Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums dasselbe Ergebnis wider. Während das linksseitige Gleis 1 überwiegend als ‚vorhanden und gewartet‘ beurteilt wurde, ist der Großteil der Bewertungen hinsichtlich der rechten Entwässerungsfähigkeit ‚nicht ausreichend‘.

5.2 Entwässerungsverhalten der betrachteten Referenzabschnitte

Die Beurteilung der Entwässerung ist laut geotechnischem Streckenband in vier verschiedene Kriterien unterteilt, welche von ‚vorhanden und gewartet‘ bis ‚nicht vorhanden‘ reichen (vgl. Tabelle 4). Trotz dieser Auswahlmöglichkeiten wurde die Entwässerungsfähigkeit über sämtliche Referenzabschnitte zu 60 % mit der Ziffer 1 bewertet, die den Zustand ‚vorhanden und nicht gewartet‘ beschreibt. Dies spiegelt einerseits den allgemeinen Zustand der Entwässerungsanlagen im österreichischen Streckennetz wider, kann aber andererseits auch an der oberflächlichen Betrachtung dieser im Rahmen der geotechnischen Begehung liegen. Aus diesem Grund werden für weitere Interpretationen die Bewertungsziffern null und eins als gute und zwei und drei als schlechte bzw. verbesserungswürdige Entwässerung angesehen. Außerdem wird die Auswertung hinsichtlich einer Korrelation der Entwässerungsfähigkeit mit dem Gleislageverhalten zusätzlich mit eben dieser, in lediglich zwei Kategorien unterteilten Klassifizierung durchgeführt (vgl. 5.3).

Da die Parameter hinsichtlich Wasservorkommen im Unterbau fast ausschließlich mit dem Mittelweg ‚von Bedeutung‘ beurteilt wurden (vgl. 4.2.3), ist hier ein Zusammenhang mit der Entwässerungsfähigkeit nur bedingt herbeizuführen. In Abbildung 39 wurde dies mittels eines Tiefendiagrammes (vgl. 3.3.2) versucht, wodurch sich der Verlauf der Entwässerung und des Wasservorkommens über sämtliche Abschnitte miteinander vergleichen lässt.

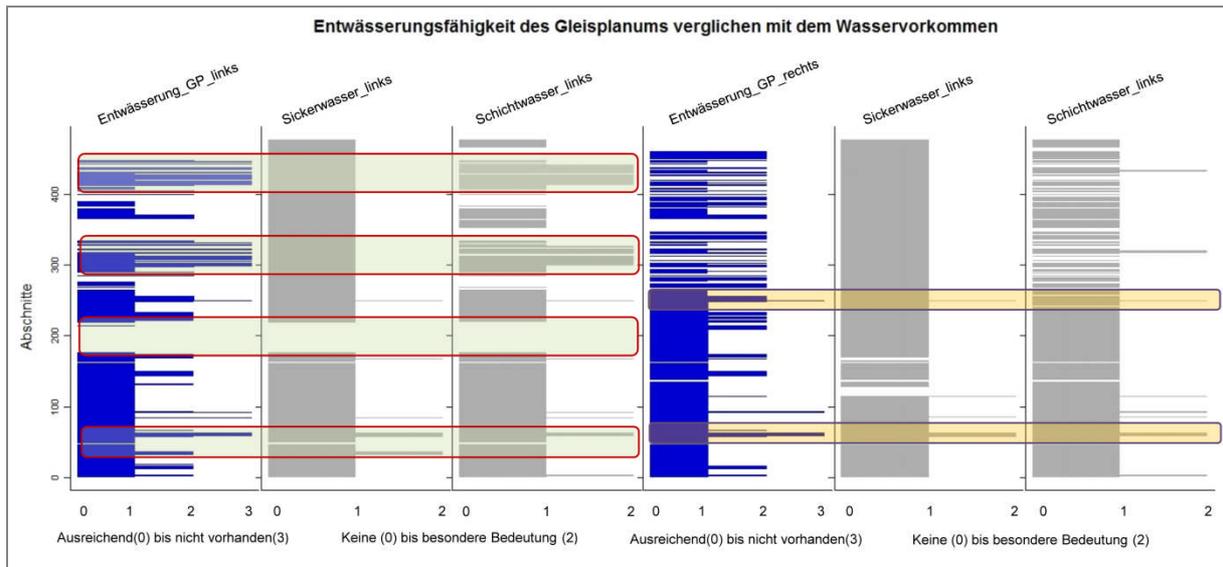


Abbildung 39 Entwässerungsfähigkeit verglichen mit dem Wasservorkommen

Die hervorgehobenen Bereiche zeigen hierbei Abschnitte, die ein ähnliches Verhalten der Entwässerungsfähigkeit und des Wasservorkommens zeigen. So lässt sich feststellen, dass eine nicht ausreichende oder vorhandene Entwässerung zumeist auch ein erhöhtes Wasservorkommen nach sich zieht. Außerdem zeigt sich linksseitig rund um Abschnitt 200 ein Bereich, der sich durch eine intakte Entwässerung und dementsprechend auch kein Wasservorkommen auszeichnet.

Um eine weiterführende Beurteilung hinsichtlich des Entwässerungsverhaltens gewährleisten zu können, werden die Bereiche untersucht, die laut GSB als unzulässig oder nicht entwässert eingestuft wurden. Dabei werden die restlichen Parameter des geotechnischen Streckenbandes mit diesen Abschnitten verglichen, die mit nicht ausreichender oder nicht vorhandener Entwässerung bewertet wurden. Die bemerkenswerten Ergebnisse dieser Auswertungen sind in den beiden folgenden Abbildungen ersichtlich.

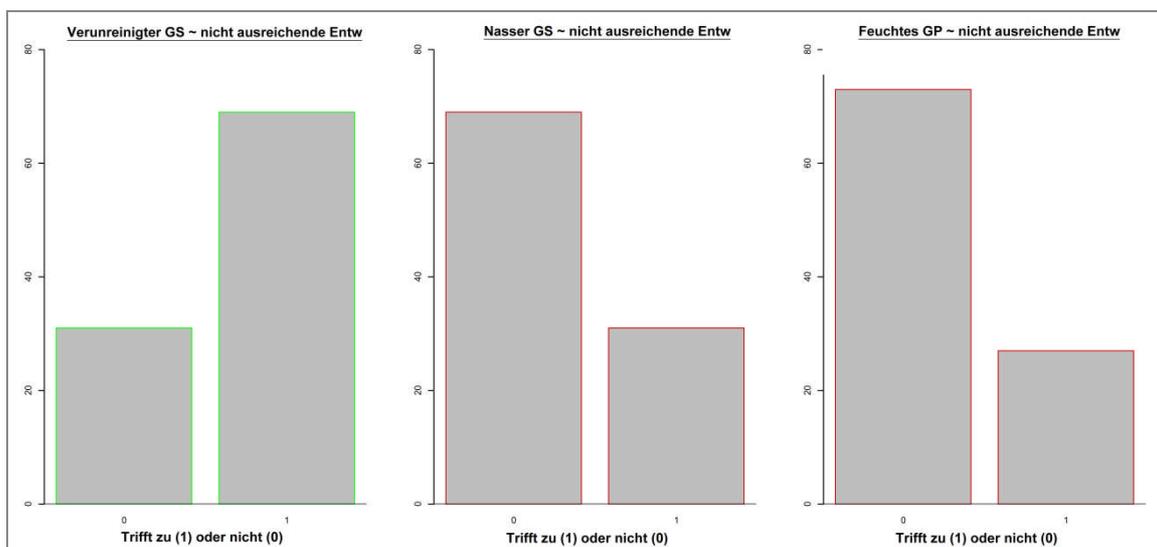


Abbildung 40 Verhalten einzelner Parameter in Bereichen nicht ausreichender Entwässerung

Auffällig im Bezug auf nicht ausreichende Entwässerung ist hierbei das häufige Auftreten von verunreinigtem Gleisschotter. Da dieser jedoch über sämtliche ausgewertete Bereiche in drei von vier Abschnitten auftritt, ist es wenig verwunderlich, dass sich diese Quote auch in Abschnitten nicht ausreichender Entwässerung bestätigt (Abbildung 40). Weit bemerkenswerter ist allerdings das äußerst seltene Eintreffen von nassem Gleisschotter und feuchtem Gleisplanum in diesen Bereichen. Dieser Umstand setzt sich auch bei nicht vorhandener Entwässerung fort (Abbildung 41). Ein möglicher Grund für derartige Bewertungen hinsichtlich feuchtem Gleisplanum und nassem Gleisschotter kann womöglich im Zeitpunkt des Befahrens dieser Streckenabschnitte durch das Georadar liegen. Ein nicht ausreichend entwässerter Streckenbereich muss nicht zwangsläufig ganzjährig über nassem Gleisschotter und ein feuchtes Gleisplanum verfügen. Sollte die Erkundung mittels Georadar nun in einer trockenen Periode stattfinden, so ist es nicht verwunderlich, wenn selbst in schlecht entwässerten Bereichen trockener Gleisschotter sowie ein trockenes Gleisplanum vorgefunden werden können.

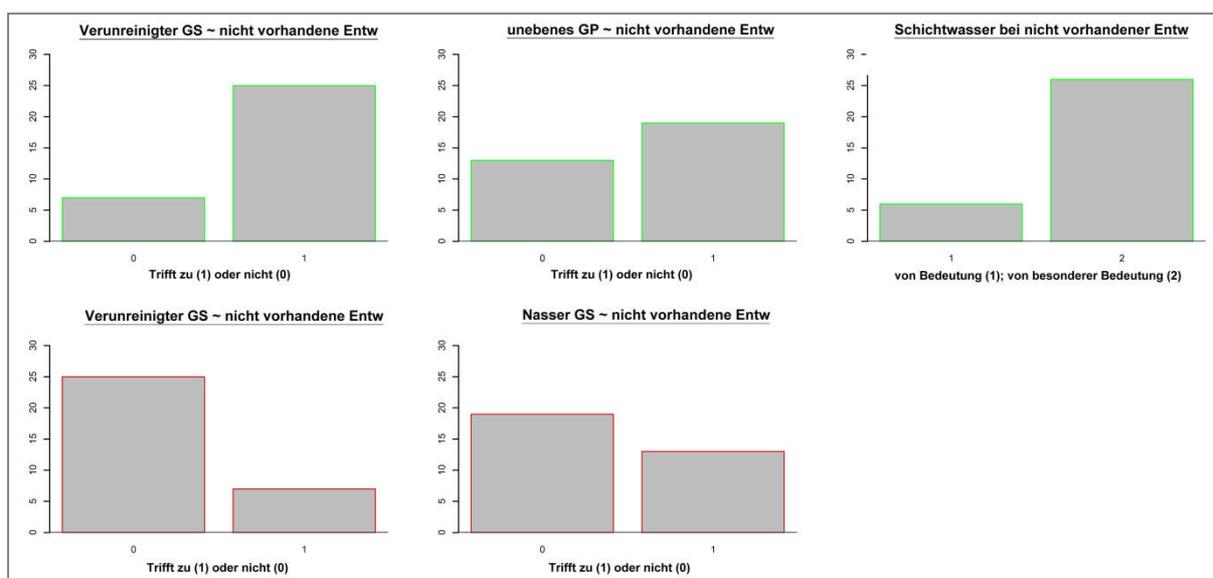


Abbildung 41 Verhalten einzelner Parameter in Bereichen nicht vorhandener Entwässerung

In Bereichen nicht vorhandener Entwässerung können des Weiteren unebenes Gleisplanum und Abschnitte mit Schichtwasser von besonderer Bedeutung vermehrt beobachtet werden. Dies kann damit zusammenhängen, dass sich am Gleisplanum sogenannte Wassersäcke ansammeln (vgl. 2.4.1), die die Unebenheit der Planumschichte verursachen. Diese Wasseransammlungen im Bereich des Gleisplanums werden in weiterer Folge noch speziell behandelt werden (vgl. 5.4). Das außerordentlich hohe Vorkommen von Schichtwasser in Bereichen unebenen Gleisplanums lässt auf den bereits erläuterten Umstand schließen, dass ‚nicht vorhandene‘ Entwässerung in dem laut GSB erstellten Bewertungsverfahren mit der Beurteilung ‚nicht vorhanden und notwendig‘ gleichzusetzen ist.

5.3 Verhalten der einzelnen Parameter gegenüber der Gleislagequalität

Der Zusammenhang eines einzelnen Parameters des geotechnischen Streckenbandes und des Gleislageverhaltens laut TUG-Datenbank kann am leichtesten über Abbildung 42 hergestellt werden. Hierbei kann anhand der Boxplots untersucht werden, ob sich die Gleislagequalität signifikant verschlechtert, wenn der gewählte Parameter eintrifft. Diese grafische Auswertungsmethode wurde für sämtliche Bewertungskriterien durchgeführt und ist hier am Beispiel des unebenen Gleisplanums ersichtlich.

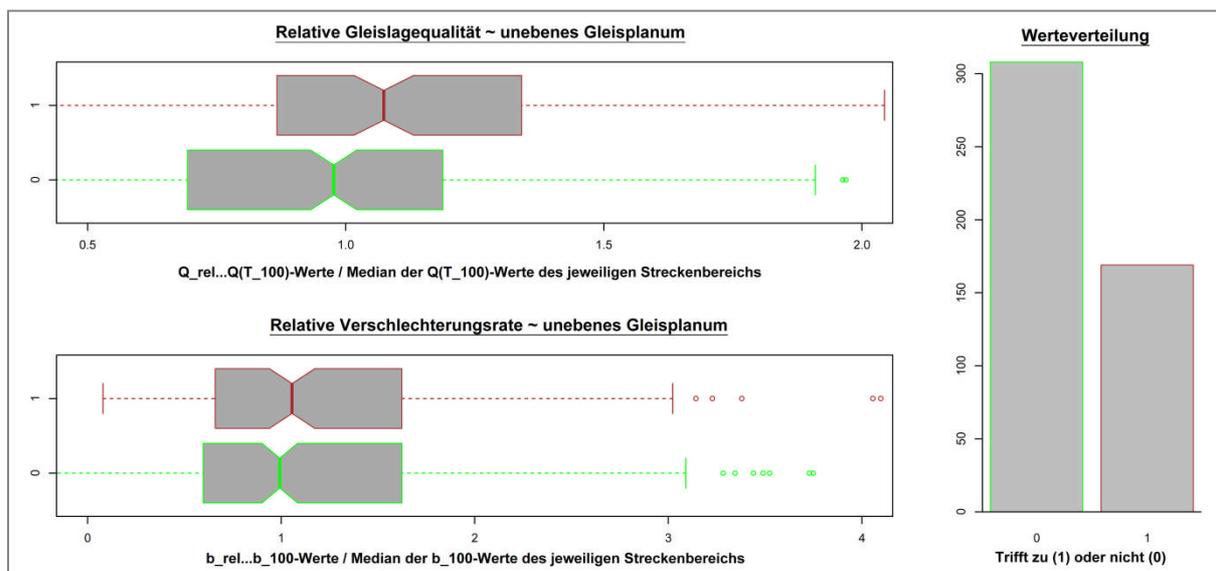


Abbildung 42 Korrelationen zwischen der Gleislagequalität und unebenem Gleisplanum

Das Gleisplanum wurde über alle vier Streckenbereiche in rund 60 % der Abschnitte mit eben beurteilt. Der Umstand, dass der Median des einen Boxplots im Einschnürungsbereich des anderen liegt, bedeutet eine statistische Gleichheit der Verschlechterungsraten in Fällen ebenen sowie unebenen Gleisplanums. Die Gleislagequalität ist allerdings statistisch signifikant schlechter, wenn anhand der geotechnischen Begehung ein unebenes Gleisplanum erkundet wurde.

Die vorhandenen Korrelationen der übrigen Parameter mit dem Gleislageverhalten können Tabelle 6 entnommen werden. Die Abbildungen sämtlicher grafischer Darstellungen befinden sich im Anhang.

Parameter	Korrelation mit Q _{rel}	Korrelation mit b _{rel}
Unebenes Gleisplanum	Statistisch signifikant	Keine
Feuchtes Gleisplanum	Tendenziell ⁸	Tendenziell
Belüftung des Gleisschotter	Statistisch signifikant	Keine
Nasser Gleisschotter	Tendenziell	Tendenziell
Verunreinigter Gleisschotter	Tendenziell	Keine
Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums	Keine	Keine
Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums - in 2 Kategorien unterteilt (vgl. 5.2)	Tendenziell	Keine
Schichtwasservorkommen	Keine	Keine

Tabelle 6 Korrelationen der GSB-Parameter mit dem Gleislageverhalten

Wie bereits in Kapitel 4.2.3 erläutert, beziehen sich Korrelationen zwischen dem Gleislageverhalten und den Parametern des GSB vorwiegend auf die Gleislagequalität. Zusammenhänge mit der Verschlechterungsrate erscheinen eher auf Zufall zu basieren. Die Gleislagequalität hingegen weist zu den meisten gegenübergestellten Parametern eine Korrelation auf, auch wenn diese teilweise nur von tendenzieller Natur ist. Dies bedeutet, dass aufgrund der Mediane ein eindeutiger Unterschied der beiden Boxplots erkennbar ist, sich der Einschnürungsbereich der beiden jedoch leicht überschneidet, wodurch keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden kann (vgl. 3.3.2). Einer besonderen Beachtung bedarf hierbei der Vergleich des Gleislageverhaltens mit der Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums. Wie bereits in Kapitel 5.2 erläutert, wurde diese Auswertung ebenfalls für die zusammengefassten Beurteilungen ‚gut‘ (Beurteilungsziffer 0 und 1) und ‚schlecht‘ (Beurteilungsziffer 2 und 3) durchgeführt (Annex 6). Während anhand der ursprünglichen Beurteilungsklassen keine durchgehende Korrelation entdeckt werden konnte, ist in diesem Fall zumindest ein tendenzieller Zusammenhang erkennbar. Dieser kann allerdings auf die außerordentlich schlechte Gleislagequalität bei nicht vorhandener Entwässerung zurückgeführt werden.

⁸ Feuchtes Gleisplanum bewirkt eine eindeutige Verschlechterung der Gleislagequalität, welche jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

5.4 Untersuchung der Schadensformen Sutten, Spritzstöße und Frostaufzüge

Im geotechnischem Streckenband werden die Schadensformen Sutten, Spritzstöße und Frostaufzüge (vgl. 2.4) behandelt. Da jedoch lediglich elf Prozent der behandelten Abschnitte einen jener Zustände aufweist, ist eine dahingehende Korrelation mit dem Gleislageverhalten nur schwer nachweisbar. Dies bestätigt sich auch in nachfolgender Abbildung 43, in welcher aufgrund mangelnder Vergleichswerte sehr flache und lange Einschnürungsbereiche an den Boxplots erkennbar sind, welche die Gleislage der zutreffenden Abschnitte repräsentieren.

Es wird angemerkt, dass es sich bei den genannten Phänomenen um lokale Schadensformen handelt, die zwar die Gleislagequalität des Gesamtabschnitts durch die Einflusslänge 100 m beeinflusst (verschlechtert), jedoch grundsätzlich nur lokal behandelt werden sollten.

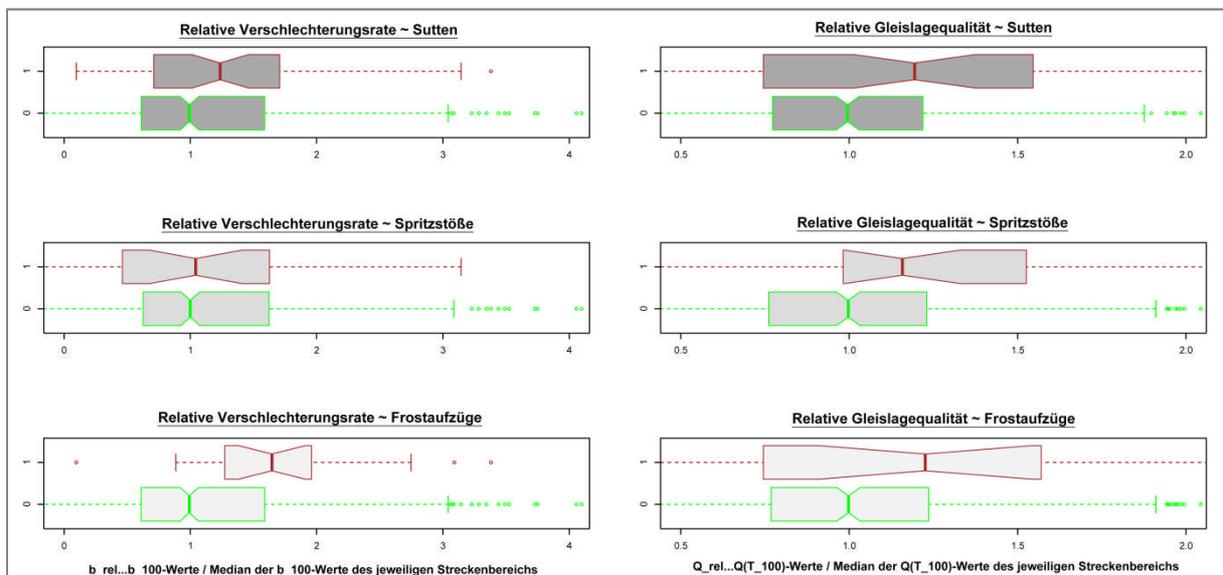


Abbildung 43 Verhalten der Gleislagequalität in Bereichen mit Sutten, Spritzstößen oder Frostaufzügen

Hinsichtlich der Gleislagequalität zeigt sich jedoch durchgehend ein eindeutig schlechterer Median in Bereichen, die mit einer der drei Schadensformen versehen sind. Bei Sutten konnte auch eine statistische Signifikanz nachgewiesen werden, da diese Störung in 43 Abschnitten und somit am häufigsten auftritt. Die Verschlechterungsrate wird durch das Eintreffen von Sutten und Frostaufzügen erhöht. Dies ist auf den Umstand zurückzuführen, dass diese beiden Schadensformen definitiv dem Unterbau zurechenbar sind und nur aufwendig entfernt werden können, weswegen sie die Gleislage über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen. Spritzstöße hingegen können neben Unstetigkeiten im Unterbau auch z.B. durch nicht ebene Schweißungen oder Schwellenhohllagen hervorgerufen werden. Da letztere in kürzeren Abständen Instand gehalten werden, hält sich hierbei der langfristige Einfluss auf das Gleislageverhalten in Grenzen. Zusätzlich zeigt

sich der Spritzstoß als die offensichtlichste aller Schadensformen, wodurch eine Beseitigung im Vergleich zu Suttten möglicherweise früher passiert.

In Abbildung 44 werden auffällige Parameter im Zusammenhang mit Suttten und Spritzstößen untersucht. Auf eine Auswertung hinsichtlich Frostaufzüge wurde hierbei verzichtet, da keine ausreichende Anzahl an Referenzabschnitten für eine derartige Untersuchung vorliegen.

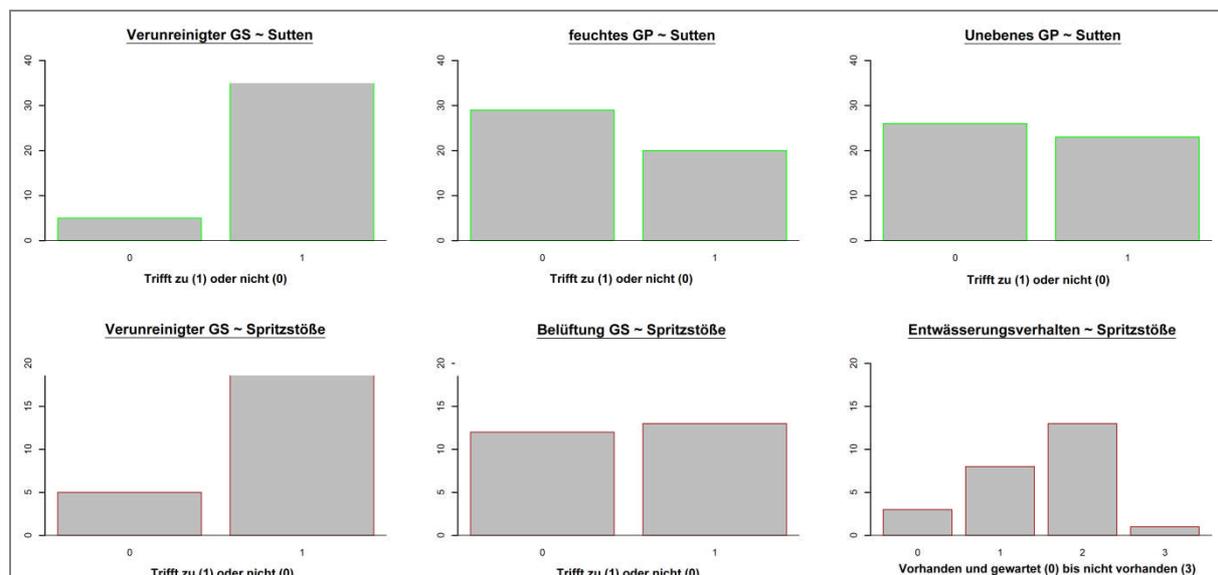


Abbildung 44 Auffällige Parameter in mit Suttten und Spritzstößen versehenen Bereichen

Der Parameter ‚verunreinigter Gleisschotter‘ spielt auch im Zusammenhang mit Suttten und Spritzstößen eine große Rolle, auch wenn sich dessen Aussagekraft in Grenzen hält (vgl. 4.2.3). Eine äußerst verwunderliche Erkenntnis zeigt sich allerdings hinsichtlich der nur selten bewerteten Parameter ‚unebenes und feuchtes Gleisplanum‘ im Bereich von Suttten. Aus diesem Grund muss man die Bewertung von Suttten durch die geotechnische Begehung in Frage stellen, da diese beide – vom Georadar gemessenen – Parameter voraussetzen.

In Bereichen von Spritzstößen kann eine außergewöhnlich schlechte Entwässerungsfähigkeit und eine schlechte Belüftung des Gleisschotters beobachtet werden. Vor allem Letztere erscheint plausibel, da die oft in Verbindung mit Spritzstößen auftretende Schotterzermahlung die Durchlüftung des Gleisschotters definitiv beeinflusst.

5.5 Weitere Erkenntnisse

5.5.1 Zusammenfassung der Gleislagewerte in 100 Meter Abschnitte

Im Rahmen der Zusammenfassung der Gleislagewerte der TUG-Datenbank in 100 Meter Abschnitte wurde deren Streuung innerhalb dieser Abschnitte untersucht. Aus diesem Grund wurde je Abschnitt, der 20 Werte beinhaltet, ein Boxplot gebildet. Diese Plots wurden entsprechend den Abschnitten aneinandergereiht um einerseits den Gleislageverlauf, und andererseits die Wertestreuung anhand des Interquartilsabstandes ablesen zu können. Hierbei fällt auf, dass die Streuung innerhalb der Abschnitte tendenziell zunimmt je geringer deren Median bzw. je schlechter deren Gleislage ist. Die folgende Abbildung 45 zeigt den hier stellvertretend ausgewählten Streckenbereich 1. Derselbe Effekt ist jedoch auch in den drei übrigen Referenzabschnitten zu beobachten.

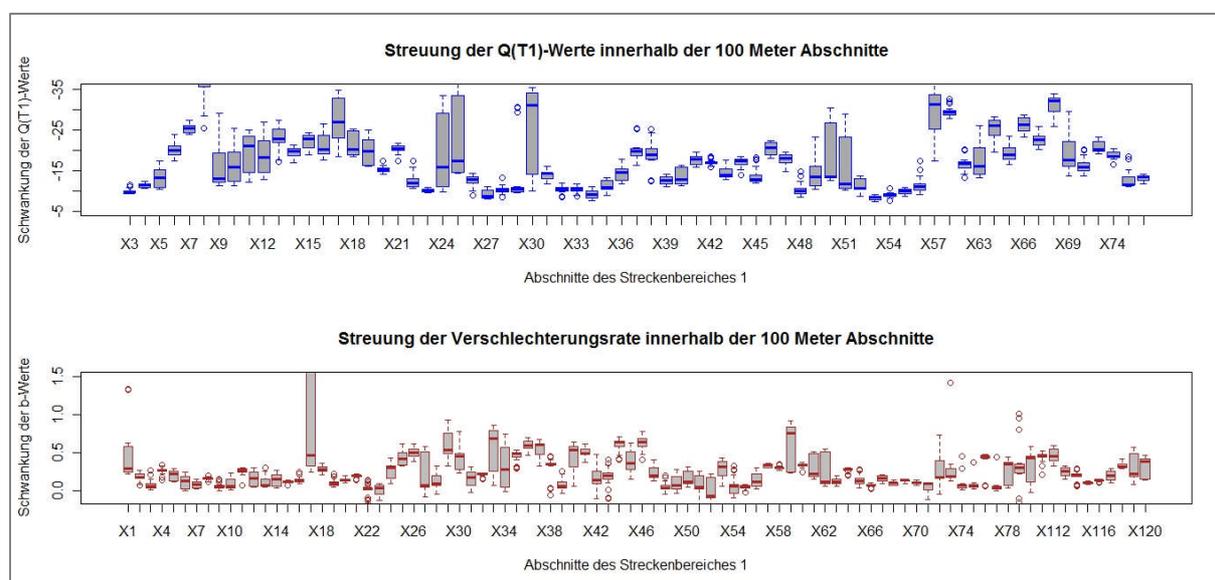


Abbildung 45 Streuung der Q(T)- und b-Werte innerhalb der 100m Abschnitte

Obwohl die Unterteilung in diese 100 Meter Abschnitte in dieser Masterarbeit hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Datensätze unerlässlich ist, so kann im Allgemeinen aufgrund dieser Erfahrung jedoch eher davon abgeraten werden. Dies liegt daran, dass gerade Bereiche schlechterer Gleislage, die eine intensivere Betrachtung verlangen, nicht repräsentativ genug erfasst werden können. Der Beweis eines solchen Verhaltens im Gesamten, laut GSB betrachteten Streckennetz kann allerdings aufgrund des in dieser Masterarbeit vorhandenen Datenumfangs nicht erbracht werden.

Daher sollten auch die erfassten Daten im GSB zum Teil detaillierter erhoben werden, etwa durch eine explizite Angabe des betroffenen Bereichs (Entwässerung schlecht von km bis km, Spritzstoß bei km)

5.5.2 Wasservorkommen im Bereich von alten Holzschwellen

Die Lebensdauer einer Holzschwelle von bis zu 35 Jahren verringert sich natürlich merklich, wenn diese andauernder Feuchtigkeit ausgesetzt ist. Um nun die Plausibilität des geotechnischen Streckenbandes in einer weiteren Form zu testen, wurde das bewertete Wasserverhalten in Bereichen überprüft, die Holzschwellen mit einer Liegedauer über 20 Jahren enthalten (Abbildung 46). Dies betrifft 35 Abschnitte, in denen Schwellen zwischen 1968 und 1978 eingebaut wurden. Hierbei wurde besonderer Wert auf die Parameter ‚Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums‘ und ‚nasser Gleisschotter‘ gelegt, die die Umgebungsbedingungen einer Schwelle hinsichtlich Feuchtigkeit am besten beschreiben.

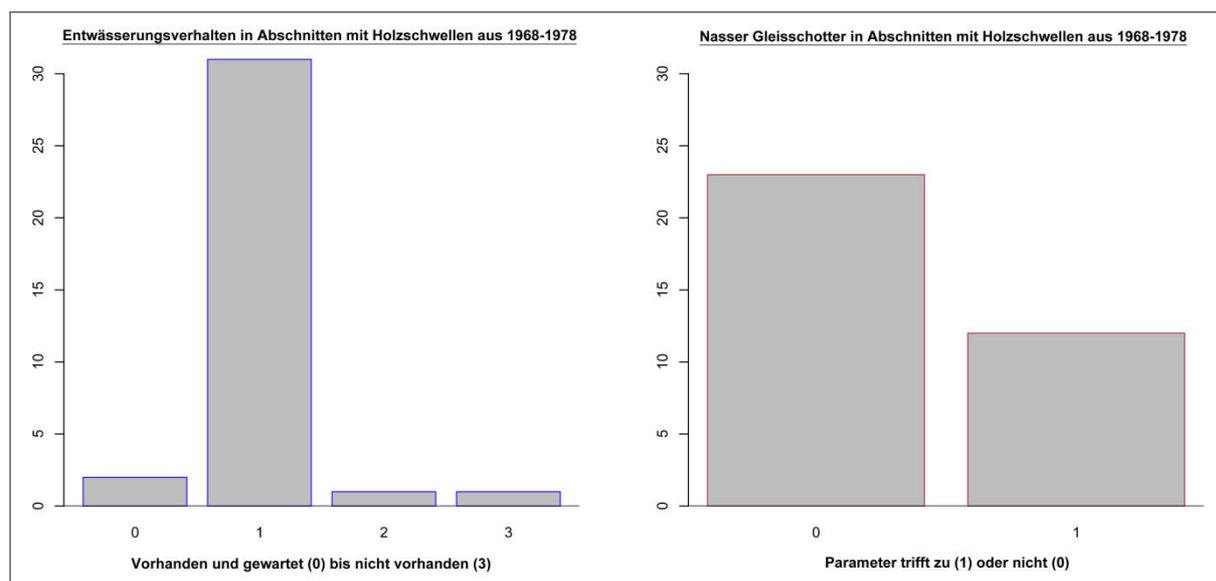


Abbildung 46 Entwässerung und nasser Gleisschotter in Bereichen alter Holzschwellen

Wie erwartet ist in diesen Bereichen eine gute Entwässerung ersichtlich, da diese – wenn auch nicht gewartet – in den überwiegenden Abschnitten zumindest vorhanden ist. Der Gleisschotter stellt sich in zwei Drittel der betroffenen Abschnitte als trocken dar. Aufgrund dieser Beobachtungen liegt der Umkehrschluss nahe, dass Holzschwellen in schlecht entwässerten Bereichen keine Liegedauer von mehr als 20 Jahren erreichen.

5.5.3 Der Einfluss einer Tragschichte auf das Gleislageverhalten

Bis auf den Streckenbereich 4 verfügen sämtliche Referenzabschnitte über eine eingebaute Tragschichte. Im Rahmen der Untersuchungen der Streckenbereiche im Bezug auf deren Gleislageverhalten, konnte dieser Bereich der inneren Westbahn als jener identifiziert werden, der sich im schlechtesten Zustand befindet. Ein dahingehender Zusammenhang mit der nicht vorhandenen Tragschichte konnte mit Hilfe des Datenumfanges dieser Masterarbeit jedoch nicht hergestellt werden, da dieser Streckenabschnitt zugleich die höchste Belastung aufweist.

5.6 Behandlung der formulierten Thesen

Nach der anfänglichen Begutachtung des geotechnischen Streckenbandes und dem Verschaffen eines Überblicks der behandelten Parameter, wurden zu Beginn dieser Masterarbeit Thesen aufgestellt (vgl. 1.2). Diese sollten eine Art Leitfaden hinsichtlich der Auswertungen im Rahmen dieser Arbeit darstellen und am Ende verifiziert bzw. falsifiziert werden. Die Behandlung der getroffenen Aussagen ist in diesem Kapitel zwar bereits hinlänglich erfolgt, jedoch soll Tabelle 7 diese noch einmal komprimiert zusammenfassen.

These	Bestätigt?		
	Ja	Nein	Bedingt
Als Damm ausgeführte Streckenbereiche verfügen über ein besseres Entwässerungsverhalten (vgl. 5.1).	✓		
Im Anschnitt verfügt die im Einschnitt gelegene Seite sowohl über ein schlechteres Entwässerungs- als auch Gleislageverhalten (vgl. 5.1).	✓		
Der Zustand der Entwässerung korreliert mit dem Wasservorkommen (vgl. 5.2).			✓
Unzureichende oder nicht vorhandene Entwässerung verursacht nassen Gleis-schotter und feuchtes Gleisplanum (vgl. 5.2).		✓	
Die Schadensformen Suttten, Spritzstöße und Frostaufzüge besitzen einen direkten (negativen) Einfluss auf das Gleislageverhalten (vgl. 5.4).			✓
Mit Suttten versehene Bereiche verfügen über feuchtes und unebenes Gleisplanum (vgl. 5.4).		✓	
In schlecht entwässerten Bereichen sind keine Holzschwellen anzutreffen, welche eine Liegedauer > 20 Jahren aufweisen (vgl. 5.5.2).	✓		

Tabelle 7 Abhandlung der in Kapitel 1.2 formulierten Thesen :

Es können somit fünf der sieben Thesen zumindest bedingt bestätigt werden. Weiterführende Interpretationen und Erläuterung zu den einzelnen Thesen sind den jeweiligen Kapiteln zu entnehmen.

5.7 Vergleich Gleislage – GSB-Zustandszahl

Zum Abschluss der Arbeit wurde trotz der eingangs beschriebenen Probleme das Endprodukt des GSB, die errechneten Zustandszahlen, mit der Gleislagequalität laut TUG-Datenbank verglichen (Abbildung 47). Dazu ist notwendig, die Zustandszahlen in die laut GSB definierten Klassen (vgl. Tabelle 2) zu unterteilen. Des Weiteren werden die relative Verschlechterungsrate und die relative Gleislagequalität ermittelt, um die verschiedenen Referenzabschnitte in ihrer Gesamtheit mit den Werten des GSB vergleichen zu können. Aufgrund der Bildung der Relativwerte sollten Effekte wie z.B. unterschiedliche Häufigkeit der Instandsetzung, verschiedene Belastungsklassen oder umgebungsspezifische Besonderheiten der einzelnen Referenzabschnitte aus dem Datensatz entfernt werden. Dadurch wird beispielsweise die Gleislagequalität der Nordbahn mit jener der Salzburg-Tirolbahn vergleichbar.

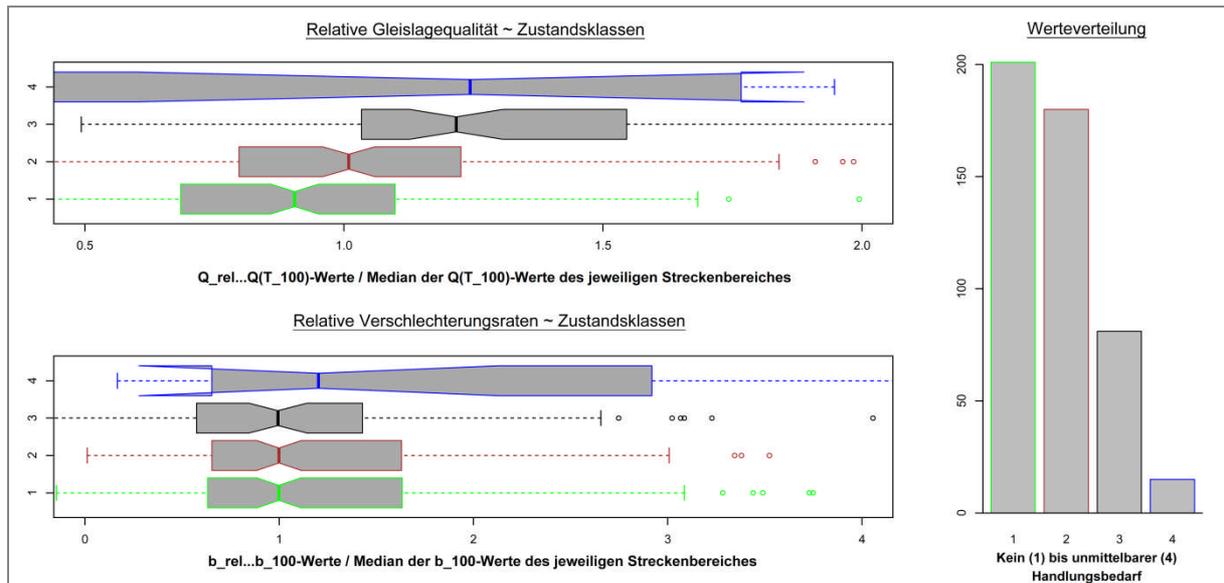


Abbildung 47 Einfluss der Zustandsklassen auf die Gleislage

Die Bewertung der vierten Zustandsklasse kann in diesem Fall nicht erfolgen, da mit lediglich 15 vorhandenen Werten keine statistische Signifikanz nachgewiesen werden kann. Dies zeigt sich auch durch den großen Interquartilsabstand der Box und den darüber hinausgehenden Einschnürungsbereich. Es kann allerdings eine statistisch signifikante Korrelation zwischen den Klassen eins bis drei und der Gleislagequalität nachgewiesen werden. Dies bedeutet, dass schlechter bewertete Abschnitte des geotechnischen Streckenbandes auch eine schlechtere Gleislagequalität laut TUG-Datenbank besitzen, womit eine Plausibilität des GSB in seiner Gesamtheit gezeigt werden kann. Allerdings sollte man bedenken, dass die Zustandszahl zu 24 % (vgl. 0) von der MDZ-Ziffer beeinflusst wird, die wiederum mit der Gleislagequalität der TUG-Datenbank korreliert.

Aus diesem Grund wurde an dieser Stelle eine weitere Auswertung für eine abgeänderte Zustandszahl durchgeführt. Aus dieser Zustandszahl wurden die Parameter MDZ-Ziffer und schlechte Gleislage entfernt, wodurch deren großer Einfluss verloren geht und die Werte der Zustandszahl erheblich verringert werden. Diese Werte wurden in zwei Klassen ($x < 20$ und $x \geq 20$) unterteilt und danach ein weiteres Mal mit dem Qualitätsverhalten der Gleislage verglichen (Abbildung 48). Hierbei lässt sich abermals ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Gleislagequalität und der kreierte 'Zustandszahl_neu' erkennen. Somit kann die Annahme widerlegt werden, wonach ausschließlich der Einfluss der MDZ-Ziffer für einen solchen Zusammenhang verantwortlich ist.

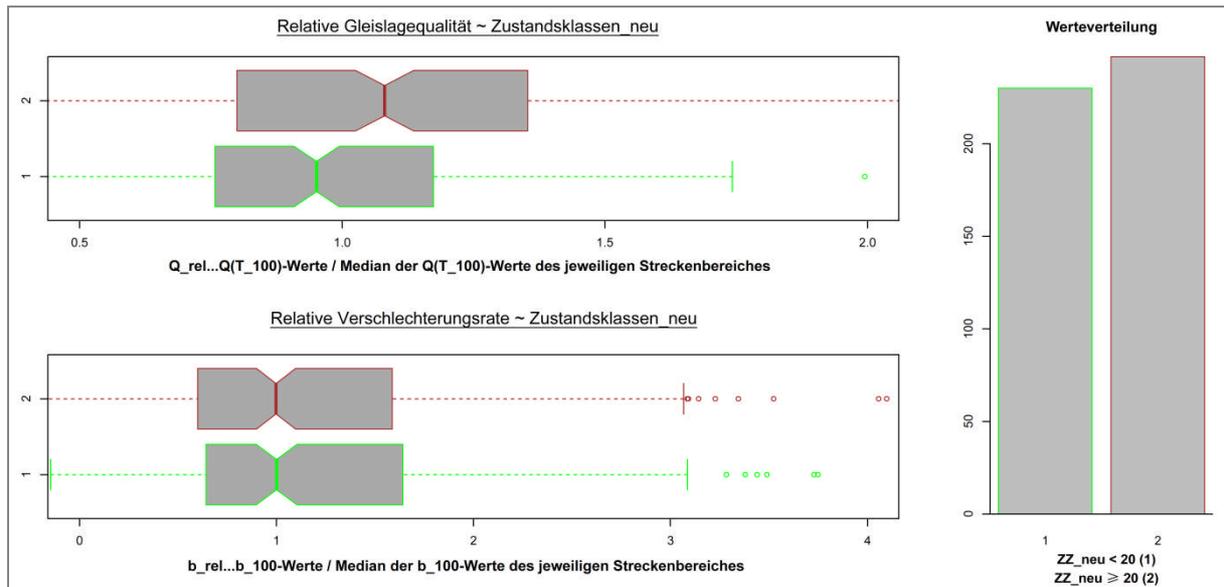


Abbildung 48 Zustandszahl_neu im Vergleich mit dem Gleislageverhalten

Für die Verschlechterungsrate kann eine derartige Korrelation in beiden Fällen nicht nachgewiesen werden. Dieser Umstand verwundert nicht besonders, da das GSB im Gegensatz zur Verschlechterungsrate eine Momentaufnahme des Gleiszustandes bedeutet und keinerlei Aussagen über die Entwicklung der Gleislagequalität beinhaltet. Aus diesem Grund treten Korrelationen zwischen dem GSB und der TUG-Datenbank vorwiegend im Rahmen der Gleislagequalität auf.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Das geotechnische Streckenband der Österreichischen Bundesbahnen ermöglicht eine Grobdiagnose des erweiterten Fahrweges⁹. Durch Unterteilung der berechneten Zustandszahl in verschiedene Zustandsklassen kann der Handlungsbedarf an Wartung und Maßnahmenplanung im Bereich dieses erweiterten Fahrweges bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wird hierbei eine grundsätzliche Korrelation der Zustandsklassen mit dem Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank, die aufgrund ihrer absoluten Objektivität als Vergleichswert herangezogen wurde, nachgewiesen. Durch weiterführende Untersuchungen werden jedoch einzelne Inhalte des GSB erkannt, die sowohl die Plausibilität des geotechnischen Streckenbandes in sich, als auch im Vergleich zur Gleislagequalität in Frage stellen. Die möglichen Gründe dieser Unregelmäßigkeiten in der Bewertung einzelner Parameter erfahren im Zuge der Schlussfolgerung besondere Bedeutung. Das Hervorheben einzelner, verbesserungswürdiger Punkte, soll jedoch keinesfalls den Eindruck erwecken, dass sich die gesamte Systematik des geotechnischen Streckenbandes als nicht funktionsfähig erweist.

Die maßgebenden Schwierigkeiten der Zustandsbeschreibung mit Hilfe des geotechnischen Streckenbandes liegen im Bereich der Eingangsdaten, die unterschiedlicher Herkunft entstammen. Die Beurteilung der Gleislage erfolgt durch Befahren des Streckenabschnittes mit dem Oberbaumesswagen, wodurch in diesem Fall eine objektiv gemessene Bewertung vorliegt. Dasselbe gilt für den Feuchtigkeitsgehalt des Schotters und Untergrundes, der Schotterverschmutzung und der eingebauten Tragschichten, welche aufgrund von 2D-Georadarauswertungen ermittelt werden. Die übrigen Parameter werden jedoch anhand einer geotechnischen Begehung durch Experten bewertet, wodurch eine Objektivität dieser Kenngrößen nur bedingt gegeben ist. Ohne das Fachwissen oder den Eifer der geotechnischen Experten in Frage stellen zu wollen, kann hierbei eine durchgehende und einheitliche Bewertung nicht gewährleistet werden. Dieser Umstand kann einerseits vom Einsatz verschiedener Personen, aber auch von unterschiedlichen Bewertungen ein und desselben Begutachters zu verschiedenen Zeitpunkten abhängen. Zudem können oberflächliche Merkmale irreführend sein, wobei hier vor allem die Wassersituation eines Gleises nach außergewöhnlich trockenen oder regenreichen Perioden hervorzuheben ist.

Diese, möglicherweise erschwerenden Rahmenbedingungen einer visuellen Beurteilung, spiegeln sich insbesondere hinsichtlich des Kriteriums ‚Entwässerungsfähigkeit des Gleisplanums‘ wider. Dieses weist keine Korrelation mit dem Gleislageverhalten laut TUG-

⁹ Überbegriff für die Summe der Oberbau- und Unterbauanlagen mit Einfluss auf die Gleislage.

Datenbank auf. Da die Entwässerungsfähigkeit aufgrund ihres hohen Gewichtungsfaktors allerdings eine maßgebliche Eingangsgröße der Zustandszahl darstellt, wird diese zukünftig besonderer Aufmerksamkeit bedürfen, um die Aussagekraft des geotechnischen Streckenbandes weiter zu verbessern.

Weiteres Optimierungspotential hinsichtlich des geotechnischen Streckenbandes und dessen Vergleichbarkeit mit dem Gleislageverhalten liegt in der Kenntnis der zeitlichen Abläufe innerhalb des GSB. Als einzige Information wird hierbei das Veröffentlichungsdatum des GSB für den jeweiligen Streckenbereich angegeben. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die nötigen Messfahrten sowie die geotechnische Begehung zumindest mehrere Wochen zuvor durchgeführt wurden. Der Vergleich der beiden Datensätze kann somit lediglich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des geotechnischen Streckenbandes angestellt werden. Es besteht jedoch die Möglichkeit, dass in dieser Zeitspanne zwischen der Herausgabe des GSB und dessen tatsächlicher Beurteilung der Parameter eine Instandhaltungsmaßnahme durchgeführt worden ist. In diesem Fall würden dadurch Werte miteinander verglichen, denen eine völlig unterschiedliche Beschaffenheit des Bahnkörpers zu Grunde liegt. Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde jedoch darauf geachtet, dass lediglich Referenzabschnitte gewählt werden, in denen diese Problematik nicht zum Tragen kommt.

Im Allgemeinen sollen sowohl die Idee des geotechnischen Streckenbandes als auch die damit verfolgten Ziele als absolute Notwendigkeit im Eisenbahnwesen angesehen werden. Dies ergibt sich vor allem durch den Umstand, dass die reaktive Instandhaltung zunehmend durch eine präventive Planung der Maßnahmen abgelöst wird. Um die Umsetzung dieser Methode gewährleisten zu können, wird nicht nur eine exakte Kenntnis der Gleislagequalität, sondern idealerweise auch des „erweiterten Fahrweges“ vorausgesetzt. Die Erfassung dieses Zustandes erfordert eine Weiterentwicklung des GSB in den folgenden Jahren, das lediglich zum Zweck einer Grobdiagnose entwickelt wurde.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Einflussfaktoren geotechnisches Streckenband (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005).....	40
Tabelle 2 Ergebnis geotechnisches Streckenband.....	41
Tabelle 3 Bodenzustand, hydrologische und hydrogeologische Merkmale (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005).....	43
Tabelle 4 Entwässerungsanlagen bzw. Entwässerungsfunktion des Gleisplanums (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005).....	43
Tabelle 5 Bewertung der Tragschichte (Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005).....	44
Tabelle 6 Korrelationen der GSB-Parameter mit dem Gleislageverhalten.....	69
Tabelle 7 Abhandlung der in Kapitel 1.2 formulierten Thesen :	74

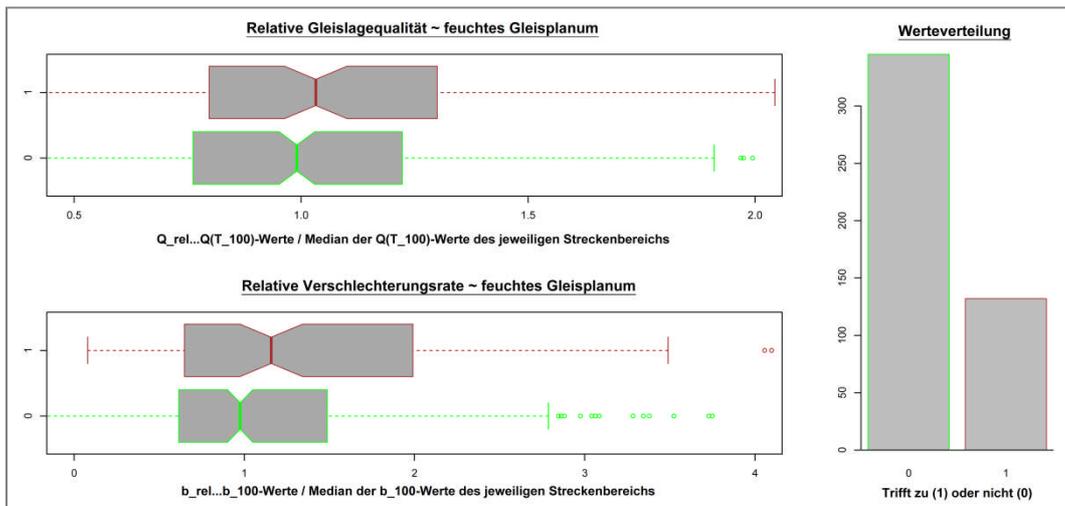
Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Aufbau Gleis (Eitel - König GbR 2008)	11
Abbildung 2 Definitionen des Gesamtaufbaus (Lichtberger 2010).....	12
Abbildung 3 Druckverteilung der Radkraft Q (Lichtberger 2010)	13
Abbildung 4 Günstiger Tragschichtenaufbau der Steifigkeit (Auer et al. 2007)	15
Abbildung 5 Schematische Darstellung Skelettkorn, Distanzkorn und Füllkorn (Klotzinger 2008).....	16
Abbildung 6 Bettungsquerschnitt (Lichtberger 2010).....	17
Abbildung 7 Druckverteilung unter einer Einzellast von 10 Tonnen (Klotzinger 2008)	17
Abbildung 8 Bemessung der PSS (Göbel, Lieberenz 2004)	19
Abbildung 9 Verformungsmodul E_{vd} des Erd- und Gleisplanums (Auer et al. 2007)	20
Abbildung 10 Ausführung PSS mit Geokunststoff (Vlies) (Auer et al. 2007)	22
Abbildung 11 Veränderung der Tragfähigkeit unter andauernder Belastung (Lichtberger 2010).....	24
Abbildung 12 Wasserandrang zum Bahnkörper (ÖBB Dienstbehelf 2009)	27
Abbildung 13 Ausführung eines Bahngrabens im Einschnitt (ÖBB Dienstbehelf 2009)	28
Abbildung 14 Ausführung eines Fanggrabens (ÖBB Dienstbehelf 2009).....	28
Abbildung 15 Perforation von Sickerrohren (Göbel, Lieberenz 2004)	29
Abbildung 16 Ausführung einer Tiefenentwässerung (ÖBB Dienstbehelf 2009).....	30
Abbildung 17 Bettungsverschmutzung (Nemetz 2010).....	31
Abbildung 18 Ungünstige Druckverteilung auf dem Planum (Klotzinger 2007)	32
Abbildung 19 Bildung von Wassersäcken infolge fehlender Querneigung des Planums (Klotzinger 2007).....	32
Abbildung 20 Spritzstoß unter Schwellen (Veit 2010)	33
Abbildung 21 Schlammstellen (Selig, Waters 2007)	33
Abbildung 22 Schotterzermahlung durch Schwellen (Veit 2010).....	34
Abbildung 23 Übersicht Instandhaltungsmaßnahmen (Lichtberger 2007)	36
Abbildung 24 Das Längshöhensignal spiegelt die relative Setzung des Gleises wider (Auer et al. 2007)	38
Abbildung 25 Darstellung der Gleislageveränderungen (Auer et al. 2007)	38
Abbildung 26 Beispiel eines 2D - Georadarbildes (Auer et al. 2007)	39
Abbildung 27 Geotechnisches Streckenband, Regulativum	45
Abbildung 28 Geotechnisches Streckenband, Zustandsdiagramm.....	46
Abbildung 29 Netz der TUG-Datenbank.....	47
Abbildung 30 Qualitätsverhalten von Gleisen.....	49
Abbildung 31 Beschreibung Boxplot (Sachs, Hedderich 2006).....	53
Abbildung 32 Gekerbte Boxplots (Polasek 1994).....	54
Abbildung 33 Beschreibung Histogramm (Sachs, Hedderich 2006)	54
Abbildung 34 Beispiel eines Tiefendiagramms.....	55
Abbildung 35 Vergleich der Streckenbereiche hinsichtlich Gleislageverhalten laut TUG-Datenbank	60
Abbildung 36 Verlauf der Gleislagequalität laut TUG-Datenbank und GSB	61
Abbildung 37 Entwässerung im Vergleich mit der topographischen Situation	63
Abbildung 38 Verhalten der Gleislage im Anschnitt (Gleis 1 und 2 im Vergleich)	64
Abbildung 39 Entwässerungsfähigkeit verglichen mit dem Wasservorkommen	66
Abbildung 40 Verhalten einzelner Parameter in Bereichen nicht ausreichender Entwässerung	66
Abbildung 41 Verhalten einzelner Parameter in Bereichen nicht vorhandener Entwässerung	67
Abbildung 42 Korrelationen zwischen der Gleislagequalität und unebenem Gleisplanum.....	68
Abbildung 43 Verhalten der Gleislagequalität in Bereichen mit Suttten, Spritzstößen oder Frostaufzügen	70
Abbildung 44 Auffällige Parameter in mit Suttten und Spritzstößen versehenen Bereichen	71
Abbildung 45 Streuung der Q(T)- und b-Werte innerhalb der 100m Abschnitte	72
Abbildung 46 Entwässerung und nasser Gleisschotter in Bereichen alter Holzschwellen	73
Abbildung 47 Einfluss der Zustandsklassen auf die Gleislage	75
Abbildung 48 Zustandszahl_neu im Vergleich mit dem Gleislageverhalten.....	76

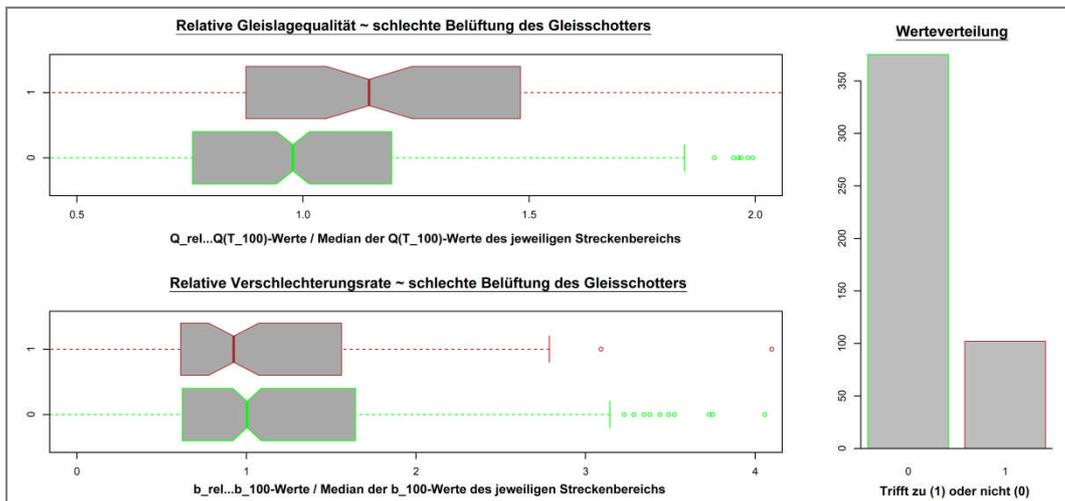
Quellenverzeichnis

- Auer, F., Zuzic, M., Schilder, R. & Breymann, H. 2007, "13 Jahre Erfahrung mit gleisgebundener Untergrundsanierung im Netz der ÖBB", *Eisenbahntechnische Rundschau*, , no. 12, pp. 817-827.
- Bautechnische Versuchs- und Forschungsanstalt Salzburg 2005, "Leistungsbeschreibung Geotechnisches Streckenband Phase II", *ÖBB Infrastruktur AG*, .
- [Homepage of Eitel - König GbR;], [Online], *Ttfiligran - Gleisbau wie beim Vorbild*. Available: <http://www.ttfiligran.de/vorbildinfo-oberbau.asp> [2011, 02/21].
- Fendrich, L. 2007, *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, Springer Verlag, Berlin - Heidelberg.
- Göbel, C. & Lieberenz, K. 2004, *Handbuch Erdbauwerke der Bahnen*, 1 Aufl. Eurailpress Tetzlaff-Hestra.
- Hanreich, W., Datler, M. & Wogowitsch, M. 2008, "Umsetzung des Instandhaltungsplanes bei ÖBB Infrastruktur nach internationalen Normen", *Eisenbahntechnische Rundschau*, , no. 9, pp. 548-551.
- Hummitzsch, R. 2009, *Zur Prognostizierbarkeit des Qualitätsverhaltens von Gleisen*, Dissertation, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz.
- Klotzinger, E. 2008, "Der Oberbauschotter", *Eisenbahntechnische Rundschau*, , no. 1/2, pp. 34-41.
- Klotzinger, E. 2007, "Oberbauschotter, Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen", *Eisenbahntechnische Rundschau*, , pp. 120-125.
- Lichtberger, B. 2010, *Handbuch Gleis; Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*, 3, komplett überarb Neuaufl. .
- Lichtberger, B. 2007, "Das System Gleis und seine Instandhaltung", *Eisenbahningenieur*, , no. 1, pp. 10-19.
- Lieberenz, K. & Kipper, R. 2009, "Zum Einfluss des Unterbaues und des Tragsystems auf die Gleislage", *Eisenbahningenieur*, , no. 8, pp. 18-24.
- Nemetz, W. 2010, "Gleiserhaltung und Erneuerung bei den österreichischen Bundesbahnen", *ÖBB Infrastruktur AG*, , 04.
- ÖBB Dienstbehelf 2009, "DB 740 - Teil 4, Dienstbehelf zur Gestaltung und Dimensionierung von Entwässerungsanlagen", *ÖBB Infrastruktur*, .
- Polasek, W. 1994, "Explorative Datenanalyse - Einführung in die deskriptive Statistik" in Springer, Berlin - Heidelberg, pp. 58-60.
- Rießberger, K. 2006, *Vorlesungsskriptum Eisenbahnwesen*, TU Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Graz.
- Sachs, L. & Hedderich, J. 2006, *Angewandte Statistik; Methodensammlung mit R*, 12.Auflage , Berlin.
- Selig, E.T. & Waters, J.M. 2007, *Track geotechnology and substructure management*, Repr. .
- Veit, P. 2010, "Vorlesungsskriptum Gleisbau VO", TU Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft
- Veit, P. & Marschnig, S. 2005, *LCC Fahrweg - Strategie Komponenten*, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz.
- Wesoly, T. 2002, "Entwässerung von Bahnanlagen", *Eisenbahningenieur*, , no. 4, pp. 26-31.

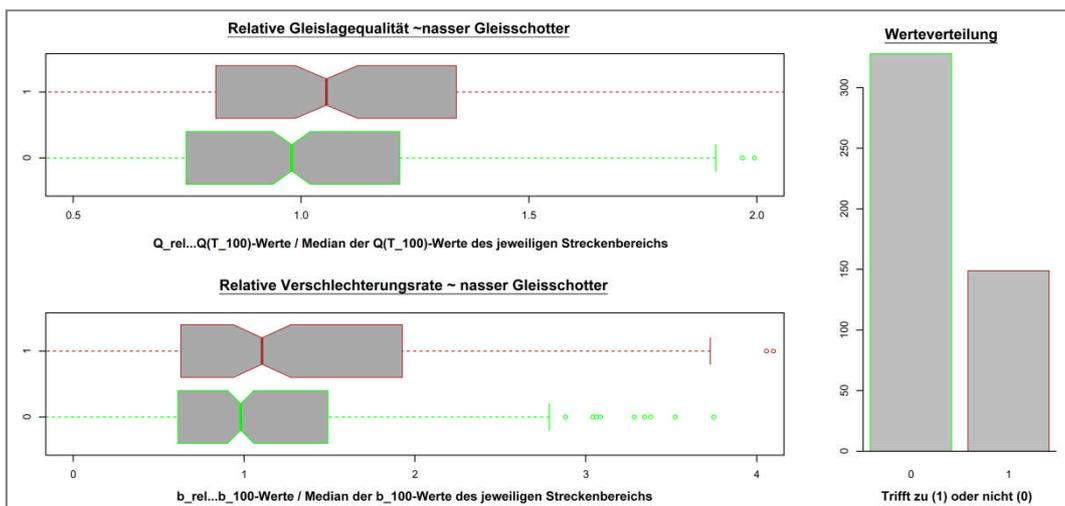
7 Anhang



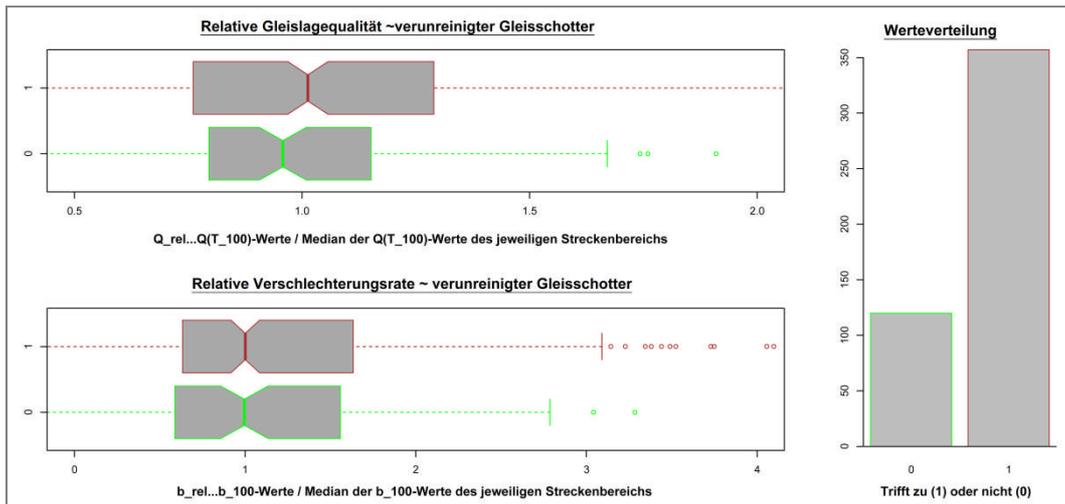
Annex 1 Korrelation zwischen Gleislageverhalten und feuchtem Gleisplanum



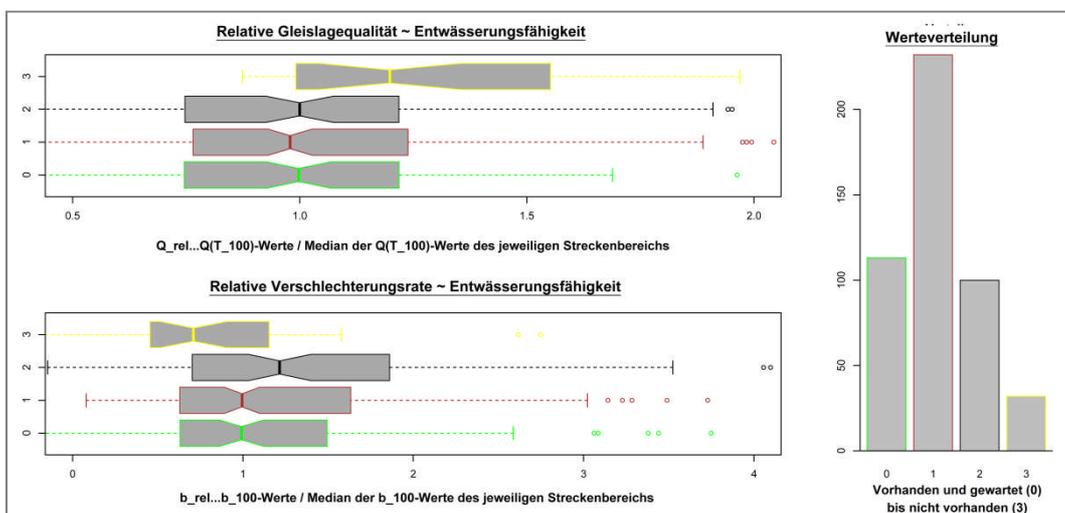
Annex 2 Korrelation zwischen Gleislageverhalten und schlechter Belüftung des Gleisschotters



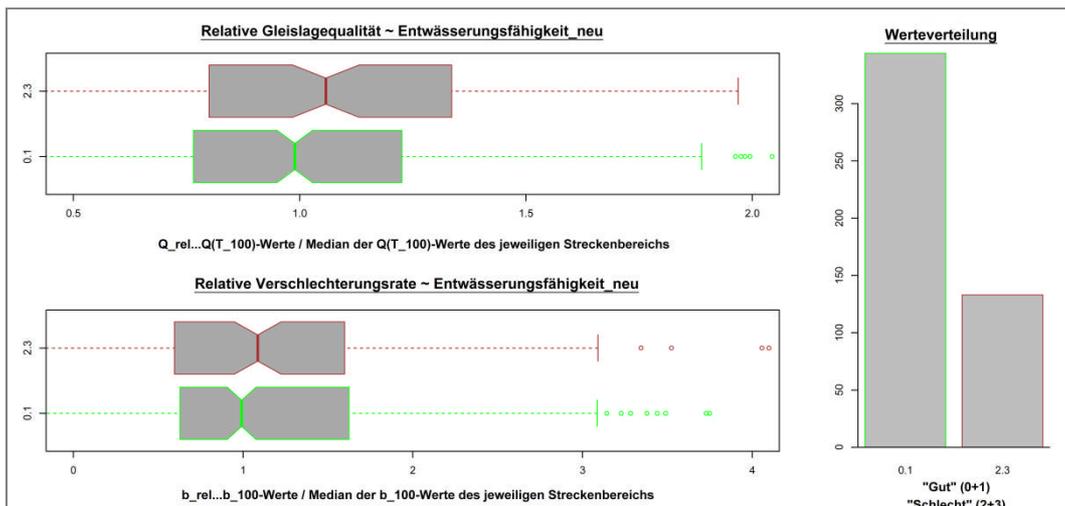
Annex 3 Korrelation zwischen Gleislageverhalten und nassem Gleisschotter



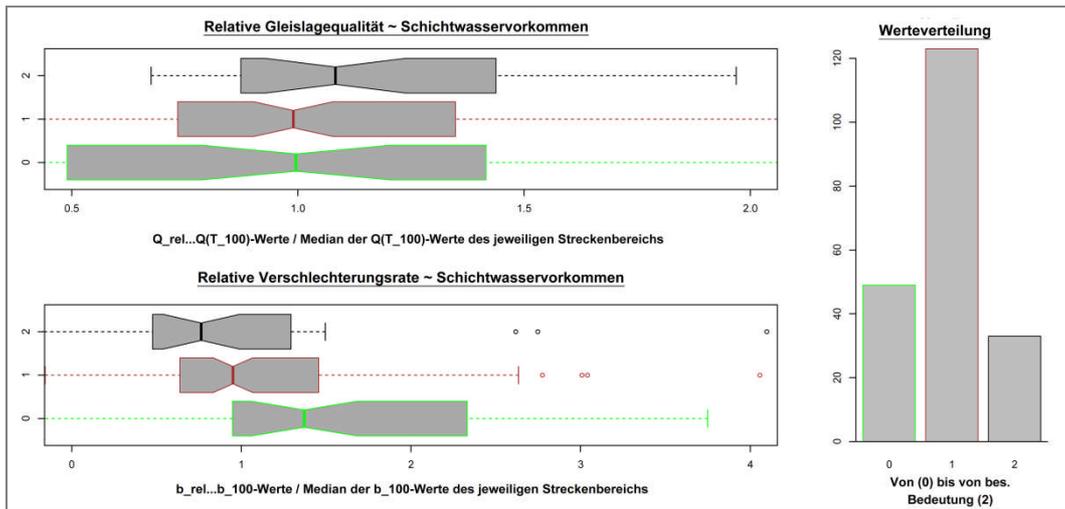
Annex 4 Korrelation zwischen Gleislageverhalten und verunreinigtem Gleisschotter



Annex 5 Korrelation zwischen Gleislage- und Entwässerungsverhalten



Annex 6 Korrelation zwischen Gleislage- und Entwässerungsverhalten der neuen Klassifizierung



Annex 7 Korrelation zwischen Gleislageverhalten und Schichtwasservorkommen

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at