

Ferdinand POSPISCHIL

LÄNGSVERSCHWEISSTES GLEIS IM ENGEN BOGEN

Eine Betrachtung der Gleislagestabilität

DISSERTATION

eingereicht an der

LEOPOLD-FRANZENS-UNIVERSITÄT INNSBRUCK
FAKULTÄT FÜR TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

zur Erlangung des akademischen Grades
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

Band 1

der Schriftenreihe des Arbeitsbereichs Intelligente Verkehrssysteme
an der Universität Innsbruck, Band 1

Hrsg.: Markus Mailer, Innsbruck, 2015

Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme
Technikerstraße 13, A – 6020 Innsbruck

Telefon: +43 512 507 – 62401 verkehrssysteme@uibk.ac.at
www.uibk.ac.at/verkehrssysteme/

Studia Universitätsverlag 2015

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung,
der Verbreitung, der Speicherung in elektronischen Datenanlagen
sowie der Übersetzung, sind vorbehalten.

Abdruckgenehmigungen

Wir bedanken uns für die Abdruckgenehmigungen der Graphiken bei:
Tetzlaff Verlag / Bernhard Lichtberger
Stephan Freudenstein, Dimitre Iliev, Walter Stahl
Bernhard Knoll, Andreas Osl, Norbert Ruef, ,
Garmisch Partenkirchner Tagblatt, Heinrich Krug, ZAMG
Günter Prager

Alle übrigen Bilder sind Privataufnahmen und unterliegen dem Copyright des Autors.

Es wurden sämtliche Anstrengungen unternommen, die Urheberrechtsinhaber vollständig ausfindig zu machen und zu nennen. Die Autoren entschuldigen sich für eventuell fehlende oder fehlerhafte Nennungen und sind gerne bereit, für zukünftige Auflagen entsprechende Korrekturen vorzunehmen.

Copyright © 2015
STUDIA Universitätsverlag,
Herzog-Siegfried-Ufer 15, A-6020 Innsbruck
Druck und Buchbinderei:
Sterndruck GmbH, 6263 Fügen
Printed in Austria 2015
ISBN 978-3-903030-20-6



Diese Publikation wurde mit finanzieller Unterstützung aus den Fördermitteln des
Vizerektorats für Forschung der Leopold-Franzens-Universität Innsbruck gedruckt

Prüfungskommission:

- Vorsitzender: ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Rudolf Stark
Institut für Grundlagen der Bauingenieurwissenschaften
Arbeitsbereich Festigkeitslehre und Baustatik
Fakultät für Technische Wissenschaften
Universität Innsbruck
- Erstprüfer: ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günter Prager
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme – Eisenbahnwesen
Fakultät für Technische Wissenschaften
Universität Innsbruck
- Zweitprüfer: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Norbert Ostermann
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswissenschaft u. Seilbahnen
Fakultät für Bauingenieurwesen
Technische Universität Wien

VORWORTE DES HERAUSGEBERS UND DES BETREUERS

Mit der Einrichtung des Arbeitsbereichs Intelligente Verkehrssysteme wurden in diesem die früheren Institute für Straßenbau und Verkehrsplanung sowie Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr zusammengefasst. Die große Themenbreite wird durch die Zielsetzung "Lösungen für nachhaltige Mobilität zu erforschen und weiterzugeben" zusammengefasst. Es freut mich, dass mit der Dissertation von Herrn Univ.-Ass. Ferdinand Pospischil M.Sc. nun auch der Grundstein für die neue Schriftenreihe des Arbeitsbereichs gelegt ist, die künftig diese gesamte Breite abdecken soll. Sie wird sich dabei in drei Bereiche untergliedern: Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Straßenbau und Straßenerhaltung sowie Eisenbahnwesen, jenem Bereich, dem der vorliegende Band 1 zuzuordnen ist.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Mailer, Herausgeber

Der Fahrweg der Eisenbahn besteht aus Untergrund, Unterbau und Oberbau. Der im Gleisschotter schwimmend gelagerte Gleisrost unterscheidet sich aufgrund der Trassierung in ein für hohe Geschwindigkeiten geeignetes Gleis mit durchgehend geschweißten Schienen und in Bergtrassen mit engen Bögen mit Stoßlückengleisen. Auch von den Fahrzeugen werden unterschiedliche Eigenschaften verlangt. Die Forderung nach Universallokomotiven und auch die Trennung der Eisenbahnunternehmen in Infrastrukturunternehmen (EIU) und Verkehrsunternehmen (EVU) führen zu Konflikten.

Der verständliche Wunsch nach immer leistungsstärkeren Lokomotiven der EVUs führt zu Problemen am Fahrweg der EIUs. Trotz dieses Interessensunterschiedes muss die Infrastruktur reagieren, da nicht zu erwarten ist, dass die EVUs zu ihrem Nachteil Rücksicht auf den Fahrweg nehmen.

Ein Schritt in Richtung eines instandhaltungsärmeren Oberbaues ist die Beseitigung der bis dato notwendigen Stoßlückengleise in engen Bögen. Enorme Erhaltungskosten, die bei der notwendigen häufigen Schienenstoßpflege entstehen, entfallen durch das durchgehende Verschweißen der Schienen. Allerdings entfällt auch der große Vorteil des Stoßlückengleises. Beim längsverschweißten Gleis dem sog. LV-Gleis müssen bedeutend höhere Kräfte aus Temperaturänderung sicher in den Oberbau abgeleitet werden. Der maßgebende Einflussfaktor dafür ist der Querverschiebewiderstand des Gleises. Da dieser auf Grund des inhomogenen und sich verändernden Schotterbetts nicht berechnet werden kann, waren Messungen im Gleis notwendig um diese entscheidende Einflussgröße zu bestimmen. In vielen Messkampagnen wurden Querverschiebewiderstände mit eigens dafür konstruierten Messvorrichtungen direkt im Gleis gemessen und in die Berechnungsverfahren eingearbeitet. Es ist gelungen, Bedingungen zu beschreiben, die ein LV-Gleis auch in engen Bögen möglich machen. Mein besonderer Dank gilt der ÖBB Infrastruktur AG für die Unterstützung und die Möglichkeit Messungen im Gleis durchführen zu können.

Herr Univ.-Ass. Ferdinand Pospischil M.Sc. hat mit der vorliegenden Arbeit promoviert.

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Günter Prager, Betreuer

INHALTSVERZEICHNIS

Vorworte des Herausgebers und des Betreuers	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Kurzfassung	XI
Abstract	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit.....	2
1.2 Vorgehensweise.....	3
2 Einwirkungen auf das Gleis	5
2.1 Normalkraft durch Temperatur	5
2.2 Gleislagefehler, Richtungsfehler	8
2.3 Brems-/ Beschleunigungskräfte	9
2.4 Freie Bogenatmung.....	9
2.5 Untergrundeinflüsse	11
2.6 Spannungen durch das Verschweißen und „rolling out“-Effekt	11
2.7 Fliehkraft/Querkraft	12
3 Widerstände im Gleis	13
3.1 Querverschiebewiderstand w_Q [N/mm].....	13
3.1.1 Abhängigkeit.....	13
3.1.2 Charakteristika.....	16
3.1.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes	18
3.1.4 Messmethoden	22
3.2 Längsverschiebewiderstand w_L [N/mm]	23
3.2.1 Abhängigkeit.....	23
3.2.2 Charakteristika.....	23
3.2.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes	23
3.2.4 Messmethoden	23
3.3 Verdrehwiderstand zwischen Schiene und Schwelle w_V [N/°].....	24
3.3.1 Abhängigkeit:.....	24

3.3.2	Charakteristika.....	24
3.3.3	Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes.....	24
3.3.4	Messmethoden	24
3.4	Durchschubwiderstand der Schienenbefestigung w_D [N/mm].....	25
3.4.1	Abhängigkeit.....	25
3.4.2	Charakteristika.....	25
3.4.3	Möglichkeit zur Optimierung des Wertes.....	25
3.4.4	Messmethoden	25
3.5	Biegesteifigkeit des Gleisrostes, Ersatzträgheitsmoment.....	26
3.5.1	Abhängigkeit.....	26
3.5.2	Charakteristika.....	26
3.5.3	Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes.....	27
3.5.4	Messmethoden	27
3.6	Weitere Einflussfaktoren	28
4	Methoden zu Stabilitätsbetrachtungen	30
4.1	Energiemethode nach MEIER	30
4.1.1	Theoretische Überlegungen	30
4.1.2	Einflüsse verschiedener Widerstände auf die Gleislagestabilität nach der Meier ⁺ Methode	35
4.2	FE- Methode (TU München)	37
4.3	FE- Methode CWERRI® (UIC / TU Delft)	38
5	Mindestradien und Verschweisstemperaturen im Vergleich der technischen Regelwerke bei ÖBB, DB und SBB.....	39
5.1	Mindestradien für das lückenlose Verschweißen von Gleisen.....	39
5.2	Risikobetrachtung des Klimas mit Grenz- und Verschweiß- Temperatur	41
6	Messungen im Gleis.....	45
6.1	Querverschiebewiderstandsmessungen.....	45
6.1.1	Messstellen und Auswertung der Querverschiebewiderstandsmessungen	48
6.1.2	Vergleich der QVW Messungen	60
6.2	Schientemperatur und Bogenatmung: Dauermessung im Brazer Bogen	64
6.2.1	Messperioden für die Dauermessung	65
6.2.2	Bestandteile und Aufbau der Messstation.....	65
6.2.3	Verschaltung der Messstation	69

6.2.4	Messverfahren und Messgrößen.....	71
6.2.5	Messablauf	71
6.2.6	Temperaturentwicklung	74
6.2.7	Schienen spannung und Schientemperatur	80
6.2.8	Schienenlängsspannungen vs. Tageszeit.....	87
6.2.9	Bewegung des Bogens vs. Schientemperatur	88
6.2.10	Genau es Einmessen des Bogens	98
6.2.11	Einfluss der Zug über fahrt	102
6.3	Erkenntnisse aus den Messkampagnen	109
7	Massnahmen zur Verbesserung der Gleislagestabilität in engen Bögen.....	111
7.1	Stahlg ü te ver ä ndern	111
7.2	Schienenprofil ver ä ndern	111
7.3	Schwellenform ver ä ndern	112
7.4	Optimierungen bei der Verwendung von Sicherungskappen	113
7.5	Besohlte Schwellen verwenden	114
7.6	Schotter verkleben	115
7.7	Ver ä nderung der Rippenplatten	115
7.7.1	M ö gliche Abmessungen f ü r Rippenplatten	118
7.7.2	Einbau der vergr ö ßerten Rippenplatten	123
7.8	Schienenfarbe ver ä ndern	126
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
8.1	Einwirkungen auf den Gleisrost sowie Widerst ä nde des Oberbaus gegen Lagever ä nderungen: Methoden zur Stabilit ä t sb erechnung des Eisenbahn g leises	137
8.2	Durchgef ü hrte Messungen im Gleis.....	138
8.3	M ö gliche Ma ß nahmen zur Verbesserung der Gleislage stabilität und weitere Forschungsfragen.....	141
9	Nachwort des Autors.....	143
	Literaturverzeichnis	145
	Abbildungsverzeichnis.....	151

Tabellenverzeichnis	157
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	158
Anhang	159

KURZFASSUNG

Für den Bau von Eisenbahnstrecken werden heute in aller Regel durchgehend verschweißte Schienen im Schotteroberbau oder auf fester Fahrbahn verwendet. Im Gegensatz dazu werden beim so genannten Stoßlückengleis die Schienen nicht durchgehend verschweißt, sondern mit einer Lasche zusammengeschrubt. Der hierbei entstehende Atmungsstoß in der Schiene kann sich bei hohen Temperaturen schließen und bei niedrigen dementsprechend öffnen. Dadurch können die in der Schiene entstehenden Zug- und Druckspannungen verringert werden und die Gefahr einer Gleisverwerfung bei hohen Temperaturen ebenso wie die eines Schienenbruchs bei niedrigen Temperaturen wird reduziert. Das Stoßlückengleis weist allerdings in Bezug auf Fahrkomfort und den Erhaltungsaufwand deutliche Nachteile gegenüber dem durchgehend verschweißten Gleis auf und kommt deswegen bei hoch belasteten Eisenbahnstrecken nur noch in Ausnahmefällen zur Anwendung. Derartige Anwendungsfälle sind neben Strecken in Bergsenkungsgebieten vor allem bei Abschnitten mit engen Gleisbögen zu finden, wie sie unter anderem bei den klassischen Gebirgsbahnen, etwa am Arlberg oder am Semmering anzutreffen sind.

Gerade in engen Gleisbögen steigt durch das Herstellen eines längsverschweißten Gleises im Schotteroberbau die Gefahr von Gleisverwerfungen. Aus diesem Grund werden hier besondere Sicherungsmaßnahmen notwendig, um die Gleislagestabilität weiterhin zu gewährleisten.

Die vorliegende Arbeit befasst sich zunächst mit den theoretischen Hintergründen der Gleislagestabilität, deren Berechnungsansätzen und den realen Auswirkungen im Streckengleis. Aufgrund der starken Streuung der vorhandenen Parameter und der bisherigen im Ergebnis nicht ausreichenden Untersuchungen wurde der Querverschiebewiderstand der Schwellen als Haupteingangsparameter der Gleislagestabilitätsberechnungen bei einer Reihe unterschiedlichster oberbautechnischer Ausführungen gemessen. Neben diesen Messungen wurden u.a. die Schienenlängsspannungen eines engen Bogens und die daraus resultierenden horizontalen, im rechten Winkel zur Schienenachse verlaufenden Bewegungen während vier verschiedener Oberbauzustände mittels einer fernüberwachten Langzeitmessung untersucht. Hierbei wurde nicht nur auf die tageszeitliche Bewegung, sondern auch auf einzelne Zugüberfahrten eingegangen. Ein bisheriges Stoßlückengleis auf der Arlberg-Westrampe konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit in einen durchgehend verschweißten Gleisbogen umgewandelt werden.

Mit weiteren Überlegungen zu möglichen Verbesserungsmaßnahmen des Schotteroberbaus auf Bergstrecken, wie vergrößerten Rippenplatten oder farblicher Behandlung der Schienen schließt die Arbeit.

ABSTRACT

Nowadays, continuously welded rails on ballasted tracks or slab tracks are regularly used in the construction of railway lines. Joint gap tracks on the other hand are not continuously welded but bolted together with fish-plates. By that means, the emerging breathing joints will be able to close the gap at high temperatures and to open it again at lower ones. Thereby, the occurring tensile and compressive stresses can be reduced and the risk of a buckling at high temperatures as well as that of a rail fracture at low temperatures is reduced. However, compared to continuously welded tracks, the joint gap tracks have a significant disadvantage with respect to the driving comfort and the maintenance costs and are therefore only exceptionally used within highly loaded railroads. Such exceptional applications are common to be found in mining subsidence areas and furthermore on routes with narrow track curves as to be found on the classical mountain railways like Arlberg or Semmering.

On the other hand, the setup of continuously welded rails in narrow curves of ballasted track particularly increases the risk of track buckling. For this reason special safety measures are necessary to assure the track stability.

The present thesis first of all deals with the theoretical background of track resistance, calculation methods and the occurring in situ impacts. Due to the strong scattering of the results gained so far by previous studies of the main input parameters of the track resistance calculations, the resistance to lateral displacements of sleepers needed to be measured within a variety of different technical superstructure versions. In addition to these measurements, inter alia, examinations of the longitudinal rail stresses and the resulting lateral movement of the bend have also been investigated within four different states of the superstructure. By the means of a permanent measuring with remote controlled data transmission, special attention was given not only to the movements during a 24 hours period, but also during train transitions, observing individual vehicle crossings. Based on the results gained in the context of these examinations, a so far existing joint gap track section on the Arlberg western ramp was transformed into a CWR track curve.

The thesis concludes with further possible measures for the improvement of the ballast superstructure on mountainous railways, like the enlargement of the ribbed base plate or possible color treatment of the rails.

1 EINLEITUNG

Das Verkehrsgeschehen wird durch das System Eisenbahn seit 1825 stark beeinflusst. Seit diesen Anfängen des schienengebundenen Transports von Waren und Menschen über große Entfernungen hat sich aber auch das System selbst stark verändert. Dies gilt nicht nur für die verwendeten Fahrzeuge, sondern - häufig weniger im Fokus des öffentlichen Interesses - auch für den namensgebenden Fahrweg, die eigentliche "eiserne Bahn" mit all seinen Bestandteilen. Nicht nur Ruß und Rauch oder vorbeiziehende Telegrafendrähte sind dem Blickfeld des Reisenden mittlerweile entschwunden, sondern auch das rhythmische "Klack-Klack" der Schienenstöße von einst ist heute in der Regel nur noch beim Vorliegen besonderer Randbedingungen vernehmbar.

Das Bestreben der Bahnen, durch geeignete Maßnahmen und Innovationen im Oberbau die Zahl der Stoßlücken im Gleis deutlich zu verringern, wurde unter anderem in Deutschland vor mehr als 60 Jahren deutlich, als im Oktober 1953 das lückenlos verschweißte Gleis auch auf der Nebenbahn von Murnau nach Oberammergau Einzug hielt und dabei, nur knapp 3 Jahre nach deren erstem Einbau, bereits die 2 Mio. Spannbetonschwelle im Netz der Deutschen Bundesbahn verlegt wurde.



Abbildung 1: Für die Verlegung der 2.000.000 Spannbetonschwelle bei der DB wurde am 9.10.1953 Carola Schranz, die Frau des schnitzenden Bahnhofswirtes von Murnau, zur Patin auserwählt. [1]

Aus dem Kreis der damals anwesenden Fachleute zitierte die örtliche Presse dazu wie folgt: „Die Betonschwelle ist das Fundament für den Gleisbau der „unendlichen Schiene“ mit zusammengeschweißten Stößen. Nur an starken Kurven wird noch der alte „Stoß“ verwendet mit Rücksicht auf die höhere Schubbeanspruchung. Sonst garantiert die Betonschwelle durch ihr höheres Eigengewicht die Möglichkeit, den Schub, der im Gleis durch Hitzeausdehnung entsteht in innere Spannung umzuwandeln und damit das Fahren ohne den lästigen „Stoß“.“ [1]

Als weitere Vorteile eines solchen lückenlos verlegten und verschweißten Gleises sind neben der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und der Erhöhung des Fahrkomforts auch Kriterien der Rückstromgewinnung, der Energieersparnis, der Lärmverminderung, der Schonung des Oberbaus und der Fahrzeuge, sowie der Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit zu nennen [2].

Im Gegensatz dazu sind Stoßlückengleise sehr wartungs- und damit kostenintensiv¹. Bei nicht genügender Wartung und Kontrolle der Schienenschrauben können sich diese lösen und die dadurch gelockerten Laschen können bei Achsüberrollungen gegen den Schienenkopf schlagen und dadurch über längere Zeit zu einem Abplatzen des selbigen führen.

Es darf neben den Vorteilen des durchgehend geschweißten Gleises aber nicht vergessen werden, dass damit² die Gefahr von Schienenbrüchen, sowie im Schotteroberbau vor allem auch die von Gleisverdrückungen und Gleisverwerfungen erhöht wird. Diese Phänomene können durch zu große Richtungsfehler des Oberbaus und örtliche Spannungsspitzen hervorgerufen werden. als deren Ursachen unter anderem Radienwechsel, Steifigkeitswechsel des Ober- und Unterbaus (z.B. Brücken oder Durchlässe) oder ein aus verschiedenen Gründen herabgesetzter Querverschiebewiderstand zu nennen sind. Letzt genannter kann durch eine verminderte Rahmensteifigkeit des Gleisrostes oder in Folge eines Eingriffs in die Schotterstruktur entstehen [3].

1.1 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in Zusammenhang mit dem Projekt „Instandhaltungsarmer Oberbau auf Bergstrecken“ der ÖBB-INFRA und des Arbeitsbereichs für Intelligente Verkehrssysteme – Eisenbahnwesen der Universität Innsbruck entstanden.

Gerade die Topographie bei Bergstrecken verlangt es oft, enge Bögen zu trassieren. In Verbindung mit den dort oftmals unzureichenden Schotterbettstärken und stark variierenden Querverschiebewiderständen ist die Gleislagestabilität in solchen Bereichen bisher unzureichend erforscht.

¹ Die Kosten der Stoßlückenpflege auf der Arlbergstrecke belaufen sich für die derzeit vorhandenen 30 km Stoßlückengleis auf über 1 Mio € / Jahr [42].

² Gleise ab 60 m Länge gelten bei der ÖBB ebenso wie bei der DB als durchgehend verschweißt [2]

Im Zuge dieses Projekts soll untersucht werden, ob und falls ja, unter welchen Voraussetzungen die engen Bögen im Netz der ÖBB durchgehend auf längsverschweißtes Gleis unter Beibehaltung des vorhandenen Schotteroberbaus umgebaut werden können, und welche Sicherungsmaßnahmen einzubauen sind, damit man, anders als man dies vor über 60 Jahren noch für erforderlich hielt, die *starken Kurven* künftig nicht mehr ausnehmen muss.

Die vorliegende Arbeit hat sich daher auf die Untersuchung der Bogenatmung in Zusammenhang mit den Querverschiebewiderständen konzentriert. Da der Querverschiebewiderstand als wichtigster Einflussfaktor in die Berechnungen eingeht, werden mehrere Feldversuche durchgeführt.

Um das Thema Bogenatmung gesamtheitlich zu betrachten, werden weiter auch Schienenlängsspannungs- und Temperaturmessungen durchgeführt. Es soll somit das Wissen über das Verhalten des Schotteroberbaus auf Bergstrecken erweitert werden.

Der Einsatz der festen Fahrbahn³, die Lagesicherheit des Schotteroberbaus für Radien über 700 m, sowie alle von der Normalspurweite abweichenden Eisenbahnsysteme sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit hingegen nicht weiter betrachtet werden.

1.2 Vorgehensweise

Um dieses Ziel zu erreichen, gliedert sich die Arbeit in einen ersten Teil, in welchem neben der Problemstellung die Einwirkungen auf das Gleis und den Oberbau beschrieben werden, im zweiten Teil werden die Widerstände des Gleises gegen diese Einwirkungen genannt. Nach einer theoretischen Abhandlung der vorhandenen Methoden zur Stabilitätsbetrachtung des Gleises folgen Messungen im Gleis und Langzeitbeobachtungen. Mögliche Maßnahmen, um die Lagestabilität des Gleises zu erhöhen, schließen die Arbeit mit einem Ausblick auf noch offene Fragen ab.

Um Verwerfungen oder Schienenbrüche zu verhindern, ist die Lagestabilität der Gleise von großer Bedeutung. Insbesondere die Übertragung der Kräfte von den Schienen in den Untergrund wird hier näher beleuchtet. Hierzu werden die einzelnen Einflussfaktoren getrennt voneinander untersucht und in Einwirkungen und Widerstände unterteilt.

³ welcher vor allem bei einem häufigen Wechsel von Tunneln, Brücken und Felsstrecken auch auf den klassischen Gebirgsbahnen eine interessante Perspektive darstellen kann

2 EINWIRKUNGEN AUF DAS GLEIS

In diesem Teil werden die bekannten unterschiedlichen Einwirkungen auf das Gleis genauer betrachtet. In der folgenden Abbildung sind die Einwirkungen (Rot) und die Widerstände (Blau) schematisch dargestellt, umgeben von den Einflussgrößen.

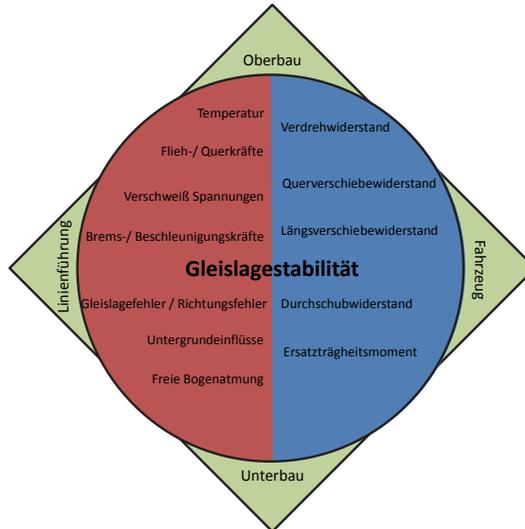


Abbildung 2: Verschiedene Einwirkungen auf das Gleis und die aus dessen Bauart resultierenden Widerstände sind bestimmend für die Gleislagestabilität

2.1 Normalkraft durch Temperatur

Durch den Einfluss der Temperatur entstehen in Abhängigkeit von der Länge Kräfte in der Schiene und somit ändert sich bei durchgehend verschweißten Gleisen deren Spannungszustand mehr als bei Stoßlückengleisen. Hierbei können sowohl Zug- als auch Druckkräfte auftreten. Die Temperatur hat somit einen direkten Einfluss auf die Gleislagestabilität. Um das Risiko einer Gleisverwerfung einzuschätzen, kann mit bestimmten Eingangsgrößen die kritische Temperaturerhöhung⁴ errechnet werden. Ist die reale Temperaturerhöhung der Schiene größer als die kritische Temperaturerhöhung, besteht die Gefahr einer Verwerfung. Ist die Temperaturerhöhung wie in Abbildung 3 gezeigt kleiner als $T_{b,min}$ gilt das Gleis als verwerfungssicher. Ist sie größer als $T_{b,min}$ kann sich eine Verwerfung einstellen, wobei bis zu einer Erhöhung von $T_{b,max}$ zwei Ausbildungsarten der Verschiebung möglich sind. Falls die Temperaturerhöhung größer wird als $T_{b,max}$, kann von einer Verwerfung ausgegangen werden.

⁴ Die kritische Temperaturerhöhung ΔT_{krit} ist die Differenz aus der jeweiligen Verspannttemperatur (Neutraltemperatur) des Gleises und derjenigen Schienentemperatur, ab welcher mit einer Gleisverdrückung (einer seitlichen Verschiebung) bzw. einer Gleisverwerfung (einem plötzlichen seitlichen Ausknicken des Gleises) zuzüglich aller Sicherheitsfaktoren zu rechnen ist. Verspannt wird bei den ÖBB derzeit zwischen 20 und 25 °C, wobei die Schienen bei geringeren Temperaturen mittels eines Ziehgeräts oder durch Erwärmung mit Gasflammen auf die geforderte Länge bzw. Temperatur gebracht werden.

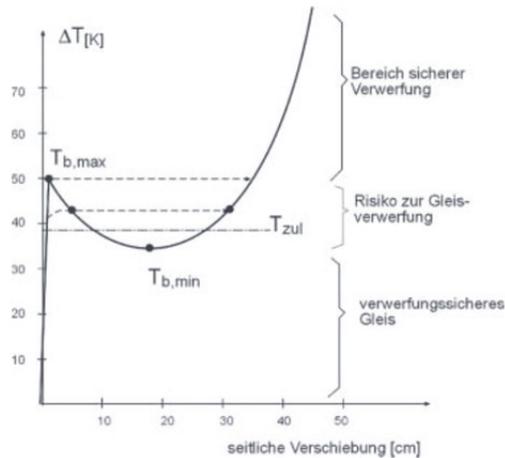


Abbildung 3: Temperatur über Neutraltemperatur versus seitlicher Verschiebung des Lvgleises (Typischer Verlauf eines Betonschwellengleises) [3] bei [4]

Die infolge einer Temperaturveränderung auftretenden Druck-, Zugkräfte und Spannungen in den durchgehend verschweißten Schienen können nach folgenden Formeln ermittelt werden:

$$P = E * A_{(2)} * \alpha_T * \Delta T \quad (2-1)$$

$$\sigma_T = E * \alpha_T * \Delta T \quad (2-2)$$

es gilt:

- P Normalkraft infolge ΔT [N]
- ΔT Temperaturdifferenz zwischen vorhandener Schienentemperatur und Neutraltemperatur [K]
- σ_T Längsspannung der Schiene infolge ΔT [N/mm²]
- $A_{(2)}$ die Querschnittsfläche beider Schienenstränge [mm²]
- α_T Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl [1/K]
- E E-Modul von Stahl [N/mm²]

Dabei ist die Temperatur der Schiene nicht gleich zu setzen mit der Lufttemperatur. Nach PRAGER [5] wurden bei einer Messstelle in Brixlegg innerhalb eines Jahres Schienentemperaturmaxima von +60 °C sowie Minima von -27 °C gemessen. Als Ergebnis konnten für diese Messung zwei Regressionsgeraden angegeben werden, welche das Verhältnis von Luft- zu Schienentemperatur in den jeweiligen Extremwerten darstellen:

1. MÄRZ 1993 bis 1. MÄRZ 1994
 MAXIMALWERT - HÜLLKURVE aus 2
 REGRESSIONSGERADEN
 Lufttemperatur zu Schienentemperatur (MP1 - Widerlager Ost)

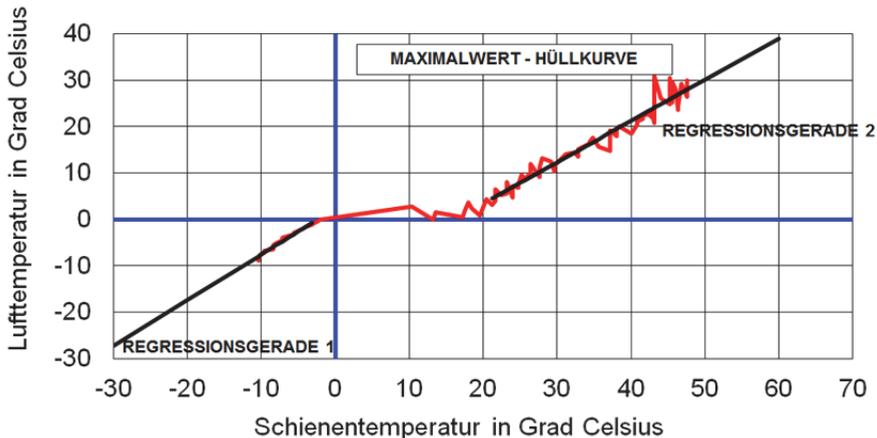


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Luft- und Schienentemperatur. Aus Jahressganglinie extrapolierte Maximal- und Minimalwerte; [5]

Es ist erkennbar, dass bereits bei geringen positiven Lufttemperaturen die Schienentemperatur weit über der Lufttemperatur liegen kann, umgekehrt jedoch selbst bei Frostgraden die Schiene kaum kälter (2 °C) als die Umgebungstemperatur wird.

Im Fall einer Schienentemperatur im Bereich über ca. 20 °C besteht die Möglichkeit, die Lufttemperatur in eine maximale Schienentemperatur umzurechnen⁵. Folgende Regressionsgerade gibt eine mögliche Umrechnung vor [5]:

$$T_{\text{Schiene}} = \frac{T_{\text{Luft}} + 15,75}{0,925} \quad (2-3)$$

Diese Umrechnung spiegelt allerdings nur die Verhältnisse in den Jahren 1993 bis 1994 auf einer Brücke in Brixlegg wieder, wobei diese eine Orientierung in annähernder Ost-West Richtung besitzt, und somit bezüglich der von der Sonne angestrahlten Fläche für deren Erhitzung eine hohe Empfänglichkeit aufweist. Andererseits kann aufgrund der Lage des Gleises auf einer Brücke von erhöhten Luftbewegungen ausgegangen werden - ein Hitzestau im Gleisbett, wie er an anderen Stellen durchaus auftreten könnte, war dort also nicht zu erwarten. Eine weiterführende Betrachtung zu diesem Effekt und ihr mögliches Potential wird in Kapitel 5.2 ausgeführt.

⁵ Da Gleisverwerfungen bei hohen Schienentemperaturen (meist über 50 °C) entstehen, ist diese Eingrenzung ausreichend.

2.2 Gleislagefehler, Richtungsfehler

Als zusätzliche Einflüsse auf die Gleislagestabilität sind neben den temperaturbedingten Spannungen die vorhandenen Gleislage- bzw. Richtungsfehler zu nennen. Wie schon KNOLL [6] beschrieben hat, ist ein streng gerades Gleis nicht herstellbar. Des Weiteren ist mit Verminderungen der Gleisstabilität durch Druckkräfte z.B. durch geometrische Zwänge zu rechnen, wobei sich der Oberbau mit der steigenden Anzahl der Lastwechsel versteift und sich gleichzeitig in die energetisch optimale Form bewegt. Im Großversuch der Technischen Universität München wurde einem abschnittsweise gestörten Querverschiebewiderstand entscheidende Bedeutung für eine Gleisverwerfung zugesprochen [7]. Auch gelten Zwangspunkte im Gleis wie Brücken, Durchlässe, Übergang von durchgearbeitetem Gleis zu nicht durchgearbeitetem Gleis usw. als Schwachstellen und können daher Gleisverwerfungen begünstigen [8]. In der nachfolgenden Abbildung ist eine Gleisverwerfung mit der typischen Sinuskurve zu sehen.

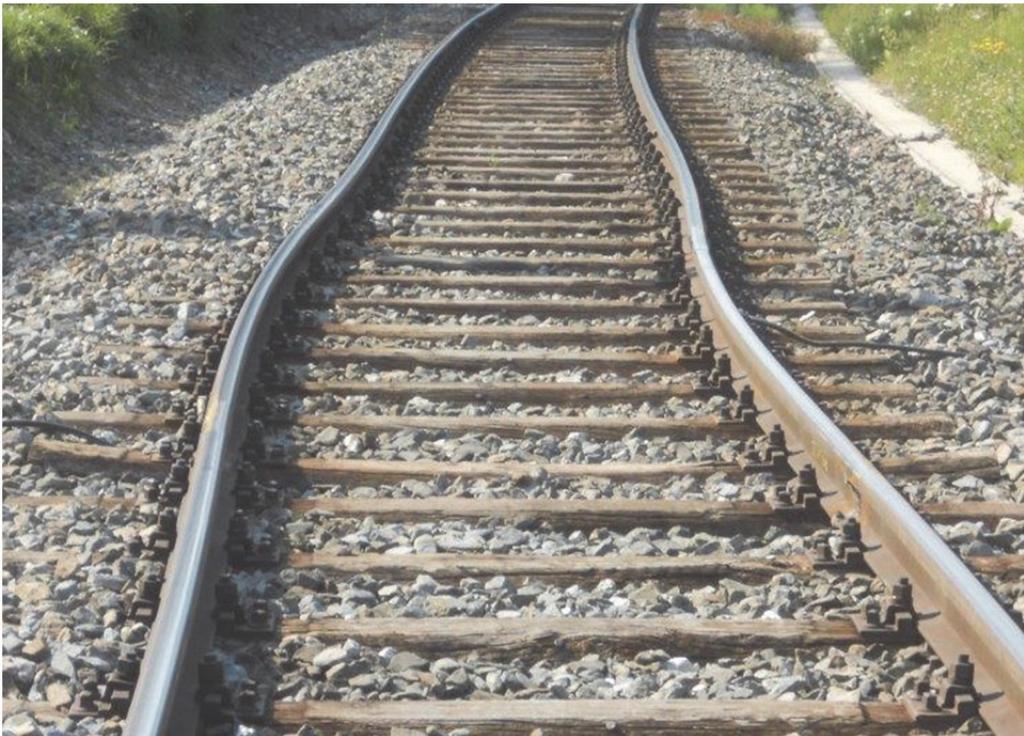


Abbildung 5: Gleisverwerfung im Außerfern, 2015 [9]

2.3 Brems-/ Beschleunigungskräfte

Wie in keinem anderen Bereich der Eisenbahn sind vor allem bei Bergstrecken lang andauernde und sich wiederholende Bremsvorgänge notwendig. Diese „schieben“ die Schiene talwärts, wobei die Schienenspannung vor Zwangspunkten stark zunimmt [8]. Im Zweirichtungsbetrieb - d.h. vor allem auf eingleisigen Strecken - entsteht durch das Beschleunigen der bergauf fahrenden Züge im selben Gleis zusätzlich eine Belastung. Diese Kraft ist im Wesentlichen von der Belastung und vom Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene abhängig, wobei dieser durch den Zustand der Schiene (nass – trocken siehe Abbildung 6) beeinflusst wird. Eine weitere Erhöhung kann durch den Einfluss von Magnetschienen- oder Wirbelstrombremsen⁶ hervorgerufen werden. [10]

$$F_r = \mu * Q \quad (2-4)$$

Es gilt:

F_r Reibungskraft [N]

μ Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene [-]

Q Radlast [N]

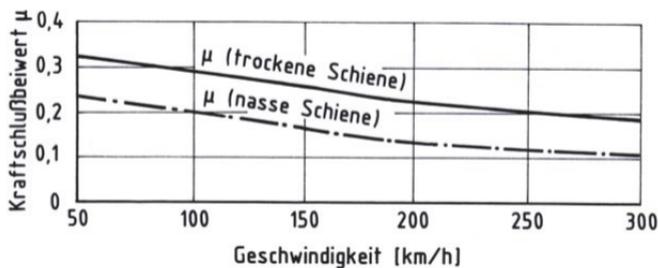


Abbildung 6: Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene, [11] bei [10]

2.4 Freie Bogenatmung

Der ursprünglich hergestellte Gleisbogen wird infolge der Temperaturspannungen eine Bewegung des Gleisrostes erfahren. Diese stellt keinen Verlust der Stabilität dar, ist allerdings als zyklische Bewegung anzusehen (vgl. Kapitel 6.2). Durch diese Bogenatmung kann ein Spalt zwischen der aktuellen Lage der Schwelle und dem Vorkopfschotter aufgrund der maximalen Verschiebung der Schwelle entstehen. Daher wird der volle Wert des Querverschiebewiderstands im Gleis erst bei größeren Ver-

⁶ Auch die zusätzliche thermische Belastung der Schiene durch die Wirbelstrombremse ist auf Strecken mit dichter Zugfolge zu beachten.

schiebungen, also erst nach Schließung der entstandenen Atmungslücke der Schwelle zum Schotterbett, aktiviert [6].

Die freie unbehinderte Bogenatmung Δf ist in Abbildung 7 für Radien ≤ 750 m in Abhängigkeit des Bogenwinkels und des Radius für eine Temperaturschwankung von ± 40 °C dargestellt. In situ sind Bogenatmungen im Bereich von 1-2 cm zu beobachten [12].

Sie berechnet sich nach RANGOSCH [13] zu:

$$\Delta f = R * \alpha_T * \Delta T * \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right) \quad (2-5)$$

$$\Delta t = \pm 40^\circ\text{C}$$

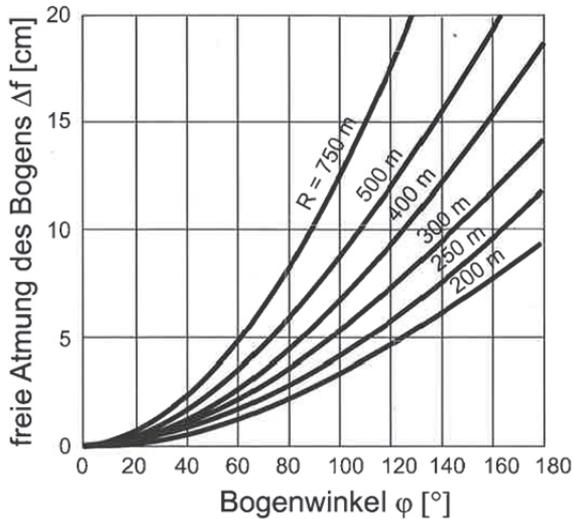


Abbildung 7: Freie Bogenatmung für Radien ≤ 750 m [12]

Durch die freie Bogenatmung wird die Schienenlängskraft verringert. Diese reduzierte Axialkraft P_0 ergibt sich zu:

$$P_0 = \left(\alpha_T * \Delta T - \frac{\Delta R}{R}\right) * E * A_{(2)} \quad (2-6)$$

Es kann weiter unter Zuhilfenahme der maximal auftretenden Temperaturen die Bogenatmung abgeschätzt werden. Hierzu wird die Umlenkraft der Schwelle über die Kesselformel bestimmt [14]:

$$L_{\Delta T, R} = \left(\frac{P_{max}}{R}\right) * a \quad (2-7)$$

Mit (2-1)

$$L_{\Delta T, R} = \left(\frac{E * A_{(2)} * \alpha_T * \Delta T_{max}}{R}\right) * a \quad (2-8)$$

Wobei:

$L_{\Delta T, R}$ laterale Umlenkraft [N] der Schiene bei einer Temperaturveränderung ΔT in Abhängigkeit des Radius R .

a Schwellenabstand des Gleises [mm]

Es wird damit beispielsweise für einen Radius von 250 m und einem Schwellenabstand a von 600 mm sowie einem Temperaturunterschied von maximal 50 K bei einer Schiene UIC 60 eine Umlenkraft von 4,65 kN errechnet. Tatsächlich ist die freie Bogenatmung jedoch ein relativ unerforschtes Gebiet. Die Gleislage verändert sich durch innere Zwänge laufend.

Sie ist nach [15] auch abhängig von

- dem Bogenradius
- dem QVW und dessen Verteilung
- den angrenzenden Bögen
- dem Spannungszustand der Schienen
- den vorhandenen Gleislagefehlern
- den vorhandenen Zwangspunkten
- den Untergrundbedingungen

2.5 Untergrundeinflüsse

Die Untergrundbedingungen haben nicht nur Einfluss auf die freie Bogenatmung, sondern auch auf die Gleislage. Unterschiedlich tragfähiger Untergrund hat somit auch einen Einfluss auf die Gleislagestabilität [8]. Untergrundeinflüsse auf den Oberbau sind nur mit erheblichem Aufwand zu beheben (z.B. der Übergang von bindigem Boden auf Fels oder setzungsreiche Abschnitte). Ihnen muss daher in aller Regel mithilfe von längerfristig geplanten Maßnahmen begegnet werden. Aus fehlender Sorgfalt bei einem Neubau resultiert hier ein großer Instandhaltungsaufwand.

2.6 Spannungen durch das Verschweißen und „rolling out“-Effekt

Die Verschweißtemperatur hat große Auswirkungen auf die Kräfte und Spannungen im durchgehend verschweißten Gleis (siehe Kapitel 2). Es sind daher die verschiedenen Lastzustände in engen Bögen zu berücksichtigen [16]. Eine Unstetigkeit in der Verschweißtemperatur führt zu lokalen Spannungsspitzen und erleichtert somit das Auftreten von Verdrückungen und Verwerfungen.

Die beim Herstellungsprozess der Schiene durch das Walzen hervorgerufenen Spannungen im Schienenkopf und in der Schienenmitte können im ersten Jahr nach dem Einbau mit einer Absenkung der Verschweißtemperatur um 6 °C gleichgesetzt werden [10]. Das Überrollen des Schienenkopfs durch die Fahrzeuge im Gleis - der so genannte "rolling out-Effekt" vermindert diese Spannungen in den obersten ~ 10 mm des Schienenkopfs [17].

2.7 Fliehkraft/Querkraft

Neben den oberbaubedingten Einflussfaktoren sind die Flieh- und Querkraft aus Zugüberfahrten von Relevanz und müssen in Betracht gezogen werden. Mithilfe des PRUD'HOMME- Kriteriums, welches eine fahrzeuggenerierte Gleisverwerfung beschreibt, ist die Gleislagestabilität (GLS) überprüfbar [12]:

$$H_{\max(2m)} \leq k * \left(10 + \frac{Q}{3}\right) \quad (2-9)$$

Hierbei gilt:

$H_{\max(2m)}$ maximal zulässige Querkraft [kN]

k Koeffizient, 0,85 für Holzschwellen und 1,0 für Betonschwellen [10]

Q Achslast [kN]

Für den Fall, dass die maximal zulässige Querkraft ($H_{\max(2m)}$), welche durch ein Fahrzeug auf 2 m Länge hervorgerufen wird größer ist als das PRUD'HOMME- Kriterium, ist die GLS nicht gesichert und eine seitliche Verschiebung der Schwellen im Schotterbett tritt auf [12], wobei nach LICHTBERGER der PRUD'HOMME-Wert eine sehr pessimistische Annahme darstellt .

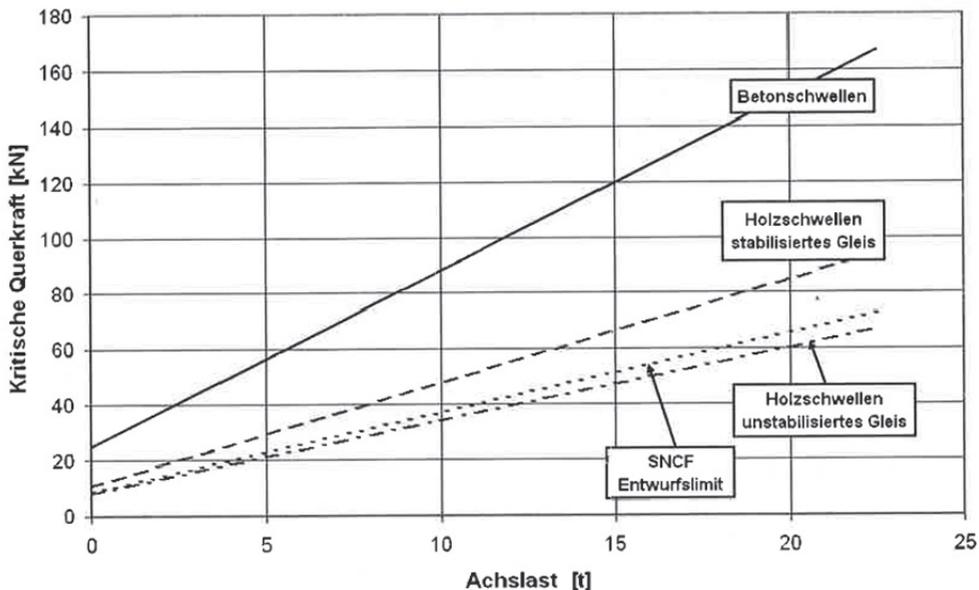


Abbildung 8: Kritische Querkraft, abhängig von der Achslast [12]

3 WIDERSTÄNDE IM GLEIS

Ebenso wie bei den Einwirkungen auf den Gleisrost, die im vorherigen Kapitel dargestellt wurden, gibt es auf der Widerstandsseite verschiedene Komponenten. Diese sollen nun näher betrachtet werden, unterteilt in die Kriterien: Abhängigkeit, Charakteristika, Maßnahmen zur Verbesserung und Messmethoden.

In dem Kriterium Abhängigkeit werden die einflussnehmenden Faktoren genannt und beschrieben, unter Charakteristika deren Zusammensetzung, unter Maßnahmen zur Verbesserung werden verbessernde Möglichkeiten genannt und zu guter Letzt werden die derzeit angewandten Messmethoden erläutert.

3.1 Querverschiebewiderstand w_Q [N/mm]

Der wichtigste Einflussfaktor der Gleislagestabilität ist der Querverschiebewiderstand. Da er alle Berechnungsmethoden (FEM, Energiemethode, ...) maßgebend beeinflusst wird er genauer betrachtet und, wie unter Kapitel 6.1 dargestellt, im Gleis gemessen.

3.1.1 Abhängigkeit

Der Querverschiebewiderstand (QVW) ist abhängig von

- der Schwellenart (Gewicht, Abmessungen, Material, Rauigkeit) [6],
 - (wobei der QVW der Holz und Stahlschwelle 50% bzw. 40% kleiner ist als jener der Betonschwelle B70; der QVW einer Y-Stahlschwelle ist um das 1,3-fache größer [18]. Bei Holzschwellen beläuft sich die Kontaktfläche zum Schotter lediglich auf 4-10%, bei Spannbetonschwellen auf 1-9% der Unterseite der Schwelle [12], bei beschlten Spannbetonschwellen auf 12-19% [19], abhängig von der Art der Beschulung).
- dem Schwellenabstand,
- dem Bettungsquerschnitt,
- den Eigenschaften des Schotters
 - - Rundkies ungebrochen – Reduktion des QVW um 30 – 35 % [19]
 - - Rundkies gebrochen – QVW entsprechend der Schotterkörnung 1 [19]
 - - Feinschotter (10 x 30 mm) – Reduktion des QVW um 5 – 10 % [18],
 - - Grobschotter (80 x 150 mm) – Erhöhung des QVW um 20 % [18],
 - - Überhöhte Schulter – Erhöhung des QVW um 40 – 60 % [18], (bezogen auf Normalschotter, Körnung 1)

Versuche an der TU München ergaben eine Rangfolge des Schotters (für die horizontale Gleislagestabilität) [18]:

1. Deutscher Granit Typ B
 2. Österreichischer Granit / Deutscher Granit Typ A
 3. Österr. Serpentin
- dem Einschotterungsgrad,
 - dem Verdichtungsgrad des Schotters,
 - der Konsolidierung des Schotterbetts mit einer Erhöhung des QVW um 29 – 49 % [17]. Nach einem Stopfvorgang des Schotterbetts entsteht ein Verlust von 50 % des QVW. Dagegen gehen nur 10 - 20 % des QVW durch einen Stopfvorgang mit Hebung der Schwelle um 2 cm incl. Anwendung eines dynamischen Gleisstabilisators (DGS) verloren [18]. Nach einer kumulierten Belastung entsprechend 1500 bis 2000 MN wird der Normalzustand wieder erreicht [20].
 - den mechanischen Verdichtungsverfahren beim Einbau des Schotters,
 - der Steifigkeit und der Schutzschicht einer Schwellenbesohlung [18],
 - dem angewandten Messverfahren,
 - der eingeleiteten Verdichtungsarbeit infolge der Betriebsbelastung und den Untergrundverhältnissen [18],
 - der dynamischen Anregung des Gleises,
 - den Umweltbedingungen [18], sowie
 - der Anwendung zusätzlicher Sicherheitsmaßnahmen (Sicherungskappen, Schwellenanker,...).

In der folgenden Tabelle sind die derzeit verwendeten Annahmen für die Größe des QVW nach [12] und [3] dargestellt:

Bauzustand des Gleises		Querverschiebewiderstand	
		Pro Schwelle [N]	Pro Gleislänge [N/mm]
frei aufliegendes, unverfülltes Gleis	Holzschwellen	< 800	1,3
	Betonschwellen	< 1200	2
locker verfülltes Gleis (nach Reinigung oder Soufflage)	Holzschwellen	< 1500	2,5
	Betonschwellen	< 2500	4,2
gestopftes und gerichtetes Gleis	Holzschwellen	< 2850	4,8
	Stahlschwelle (SBB)	3600	6
	Biblock	4500	7,5
	Betonschwelle B58	4400	7,3
	Betonschwelle B70	< 5100	8,5
dynamisch stabilisiertes Gleis (DGS)	Holzschwellen	> 3900	6,5
	Betonschwellen B70	> 7900	13,2
gut verfülltes und voll stabilisiertes Gleis	Holzschwellen	> 4800	8
	Stahlschwelle (SBB)	5600	9,3
	Biblock	10000	16,7
	Betonschwelle B70	9000	15
	Betonschwelle B58	7200	12
	Betonschwellen	> 9000	15

Tabelle 1: Werte des Querverschiebewiderstands bei verschiedenen Bauzuständen und Schwellenbauarten [12], [3]

3.1.2 Charakteristika

RANGOSCH schreibt:

Als massgebender Wert des Querverschiebewiderstandes w_Q [N/mm] fungiert definitionsgemäss das bei 2 mm Verschiebeweg erhaltene w_Q bezogen auf 1 mm Gleislänge. Verschiebewege über 2 mm bringen nur noch einen vernachlässigbar geringen Kraftanstieg. [13]

Der QVW setzt sich zusammen aus dem Sohlwiderstand (primär und sekundär), dem Flankenwiderstand und dem Vorkopfwiderstand.

1. Sohlwiderstand primär und sekundär
Der primäre Sohlwiderstand beschreibt die Reibung zwischen Schwellenunterseite und Schotter. Er ist damit von der Auflast und dem Reibbeiwert abhängig. Der primäre Sohlwiderstand nimmt infolge der Konsolidierung bei besohnten Schwellen bis zu 95 % zu (Zunahme bei unbesohnten Schwellen bis zu 26 %). Ab einer Verschiebung von über 1 mm wird die Haftreibung überschritten und die Gleitreibung aktiviert. Die maximale Verschiebung mit gleichzeitiger Laststeigerung (Ausnahme Besohlung G04V03) liegt bei 2 – 4 mm. Der sekundäre Sohlwiderstand wird durch den Widerstand gegen das „Aufklettern“ der Schwelle durch Umverteilung der Schottersteine aktiviert. [18]
2. Flankenwiderstand
Der Flankenwiderstand beschreibt den Anteil, welcher nach der aktiven Erddrucktheorie seitlich auf die Schwellenflanken wirkt. Er ist abhängig vom horizontalen Verschiebeweg der Schwelle, dem Verdichtungsgrad, dem spezifischen Gewicht des Schottergefüges sowie der Ausgestaltung der Seitenflächen der Schwelle. [18]
3. Vorkopfwiderstand
Der Vorkopfwiderstand entspricht dem Erddruck, welcher vom Schotterbett der horizontalen Querverschiebung der Schwelle entgegenwirkt. Er ist abhängig von dem Verdichtungsgrad des Vorkopfschotters, der Schütthöhe der evtl. überhöhten Schulter und dem Gewicht der Schwelle. Der Vorkopfwiderstand tritt erst in Kraft, nachdem eine Bogenatmungslücke aufgebraucht ist, und „neue“ Verschiebungen stattfinden. [18][21]

Anteilig setzt sich der QVW nach Tabelle 2, ILIEV [18] (*kursiv*) und LICHTBERGER [3] (unterstrichen) zusammen aus

- Sohlreibung: 45 – 50 %
- Vorkopfwiderstand: 35 – 40 %; 16 – 20 %
- Schwellenflankenwiderstand: 10 – 15 %; 21 – 30 %.

Gemittelte Anteile des QVW (2 mm) in Abhängigkeit von der Sohlenart, Schotterqualität und Messort, konsolidierter Oberbauzustand											
Versuchs-ort	Versuchsrandbedingungen	statische Querverschiebewiderstandsanteile									
		Sohlwiderstand				Flankenwiderstand		Vorkopfwiderstand		Gesamtwiderstand	
		primär		sekundär							
		[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]	[N/mm]	[%]
Labor	Schotter Typ A, unbesohlte Schwellen B 70	2,9	31%	1,6	18%	3,0	32%	1,8	19%	9,3	100%
	Schotter Typ A, B 70 mit Sohle G04 V05	3,7	33%	2,6	23%	3,0	27%	2,0	17%	11,2	100%
	Schotter Typ B, unbesohlte Schwellen B 70	3,3	29%	3,0	27%	3,0	27%	2,0	17%	11,3	100%
	Schotter Typ B, B 70 mit Sohle Paul Müller	3,3	26%	-	-	3,0	24%	-	-	12,4	100%
	Schotter Typ B, B 70 mit Sohle G04 V05	4,1	30%	3,7	27%	3,0	23%	2,6	20%	13,4	100%
	Schotter Typ B, B 70 mit Sohle G04 V03	4,3	30%	4,3	30%	3,0	21%	2,6	19%	14,2	100%
Labor, Lasteinleitung wie auf der freien Strecke	Schotter Typ B, B 70 mit Sohle G04 V03	-	-	-	-	-	-	-	-	14,8	100%
Betriebsgleis	DB: Schotter wie Schotter Typ B, unbesohlte Schwellen B 70	-	-	-	-	-	-	-	-	12,7	100%
	Schottertyp - undefiniert, unbesohlte Schwellen B 70, (Be-1983)	5,9	42%	1,7	12%	4,3	30%	2,3	16%	14,2	100%
	DB: Schotter wie Schotter Typ B, B 70 mit Sohle G04 V05	-	-	-	-	-	-	-	-	14,4	100%
	Schottertyp - undefiniert, unbesohlte Schwellen B 70, (Be-2069)	10,6	41%	5,1	20%	5,6	22%	4,4	17%	25,7	100%

Tabelle 2: Absoluter und prozentualer Vergleich der gemittelten Anteile des QVW (2 mm) [18]

Der QVW wird neben den ständig wirksamen Abhängigkeiten noch beeinflusst von

- der Abhebewelle des Zuges. Diese bewirkt eine Sohlreibungsreduktion um 20 – 40 % [18], wobei die Abhebewelle von der Geschwindigkeit unabhängig ist. [13]
- der Frage nach der dynamischen Beanspruchung, hierbei ist der statische QVW um 50 % (Labor) bzw. 38 % (in situ) größer als der dynamische QVW [18],
- der Durchfeuchtung des Oberbaus, welche eine Verringerung des QVW um 16 bis 26 % (Labor, unbesohlt) und 15 – 19 % (Labor, besohlt), sowie 11 % (in situ) hervorruft [18],
- der Stopfung des Gleisschotters, welche einen kurzzeitigen Verlust von rund 40 % - 50 % des QVW [3] bewirkt,
- einer Reinigung des Gleisschotters, welche den QVW um bis zu 50 % verringert [3],
- der Soufflage (dem Stein- / Schotterblasen), welche den QVW um 50 – 65 % verringert [3].

Zur Sicherstellung der GLS wird nach Eingriffen die Anwendung von dynamischen Stabilisatoren und die Beimischung von 15 % des Oberbauschotters Körnung 2 emp-

fohlen [19]. Auch sollen nicht auf größeren Gleisabschnitten, bei höheren Temperaturen, die Schwellen gewechselt oder die Schienenbefestigung geöffnet werden.

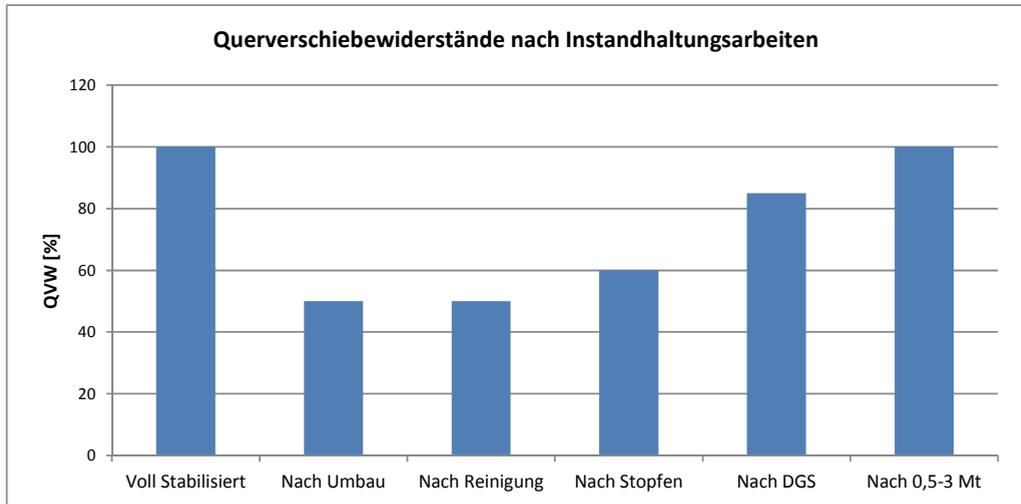


Abbildung 9: Beeinflussung des QVW durch Instandhaltungsarbeiten [12]

3.1.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes

Um den QVW langfristig zu verbessern, sind folgende Vorschläge in der Fachliteratur zu finden:

- Den Schwellenabstand verändern
mit der Vergrößerung des Schwellenabstands geht eine Verschlechterung des QVW um 0,8 % pro 10 mm einher [20].
Bei einer Verringerung des Abstandes von 600 mm auf 550 mm steigt der QVW entsprechend um 4 % an [20].
- Das Schotterbett verbreitern
durch die Erweiterung des Schotterbetts wird eine Zunahme um 6 % (von 400 mm auf 500 mm Vorkopfschotter) bzw. 5 % (von 500 mm auf 600 mm) des QVW erreicht [20]. Es ist hierbei jedoch während der Planung auf die Wirtschaftlichkeit und Durchführbarkeit zu achten.
- Eine Vergrößerung des Vorkopfschotters
bei einer Vergrößerung des Vorkopfschotters nimmt der QVW um 10 % - 15 % zu [20]. Hierbei ist ebenfalls auf die Wirtschaftlichkeit und Durchführbarkeit zu achten, auch sollte die Möglichkeit des Aufwirbelns des angehäuften Schotters (Schotterflug) bei hohen Geschwindigkeiten berücksichtigt werden.
- Ein homogenes Schotterbett erstellen
Durch ein ungleichmäßig hergestelltes Schotterbett können Schwachstellen in der Bettung des Gleisrostes entstehen und somit bereits kleine Richtungs-

- und Lagefehler in die Gleislage eingebracht werden. Im Zuge der Überfahrten können diese zu größeren Problemen in der Lagequalität des Gleises führen. [6]
- Sicherungskappen (SIK) einbauen
durch den Einbau von Sicherungskappen (z.B. SIK 9) an jeder Schwelle wird der QVW um 30 % (Labor) erhöht [18]. Es ist jedoch auf den Aufwand des Einbaus sowie der Wartung zu achten. Die damit verbundenen Kosten können die des vergleichbaren Wartungsaufwandes der Stoßlücken übersteigen. [22]
 - Kontrovers dazu wird bei der Richtlinie der DB Netz AG bei Einbau einer SIK an jeder Holzschwelle von einer Erhöhung des QVW um 90 % ausgegangen, bei Einbau an jeder zweiten um 40 % und an jeder dritten um 20 %. [23]
 - Schwellenanker einbauen
bei Einbau von Schwellenankern an jeder Schwelle innen, mittig bzw. außen (bei Betonschwellen) kann generell eine Erhöhung des QVW um 26 % (mittig) bzw. um 18 % (außen) erreicht werden [12].
 - Raue Schwellenoberflächen
raue Schwellenoberflächen oder so genannte 'Sofort-Entschaler' (bei den Betonschwellen) heben den QVW nur minimal an. [18]
 - Eine Profilierung der Schwellenflanken
die Ausgestaltung der Schwellenflanken mit Profilierungen z.B. Be19ae kann eine Zunahme des QVW um 24 % bewirken [12], wobei hierbei auf die hohen Schalungskosten zu achten ist [18].
 - Die Verklebung des Schotterbetts
durch eine Verklebung des Schotterbetts oder ausgewählter Bereiche des Vorkopfschotters wird eine Verbesserung des QVW erwartet [18].
 - Eine Zwischenfachverdichtung
eine Zwischenfachverdichtung des Schotters hebt den QVW um 7 % an. [3]
 - Die Vorkopfverdichtung
eine Verdichtung des Vorkopfschotters würde den QVW um 4 % anheben. [3]
 - Der Einsatz eines dynamischen Gleisstabilisators
durch den Einsatz eines DGS kann der QVW nach einer Stopfung um 30 – 40 % angehoben werden (ausgehend von den abgeminderten Stopfwerten). Der DGS entspricht mind. 100.000 t Lastwechsel und einer räumlich umfassenden Verdichtung. [3]

Die verschiedenen Einflüsse können nach LICHTBERGER in der folgenden Tabelle 3 zusammengefasst werden.

	Sehr gut	Gut	Geringer Einfluss	Schlecht	Sehr Schlecht
Schwellengewicht		*			
Schwellenbreite		*			
Schwellenhöhe	*				
Schwellenlänge		*			
Biblockschwellen	*				
Reibung an der Schwellenunterseite	* belastet	*			
Sicherungskappen	*				
Schotterkorn vergrößern		*			
Schotterbeimengungen		*			
Seitliche Erhöhung der Bettungsschulter	*				
Verbreiterung der Bettungsschulter		*			
Schotterhöhe unter Schwelle			*		
Schottererhöhung im Zwischenfach	*				
Engere Schwellenteilung		*			
Trägheitsmoment der Schienen		*			
Verdrehsteifigkeit Gleisrost			*		
Gleishebung					*
Schotterblasen (Shovel packing)					*
Stopfen				*	
Dynamische Gleisstabilisation	*				
Zuggeschwindigkeiten			*		
Höhere Achslasten		*			
Temperatur			*		

Tabelle 3: Einflussfaktoren auf den QVW [12]

Die hier und in anderen Quellen gesammelten Informationen sind nochmals in der folgenden Abbildung 10 dargestellt, welche sich auf eine Betonschwelle B70 (100 %) bezieht.

Es ist erkennbar, dass die größten QVW mit einem gut verfüllten, voll stabilisierten Gleis mit einer Betonschwelle sowie durch überhöhte Schotterschultern und SIK an jeder bzw. jeder 2. Schwelle erreicht werden können. Diese Informationen sollten als Übersicht dienen, die Angaben der Literatur unterscheiden sich jedoch teilweise bzw. geben Schwankungsbereiche an. Deshalb wurde in der Zusammenstellung darauf geachtet, hier stets den geringeren Wert zu nehmen. Für manche Maßnahmen wie die Verklebung des Schotterbetts sind derzeit keine vergleichbaren Werte vorhanden.

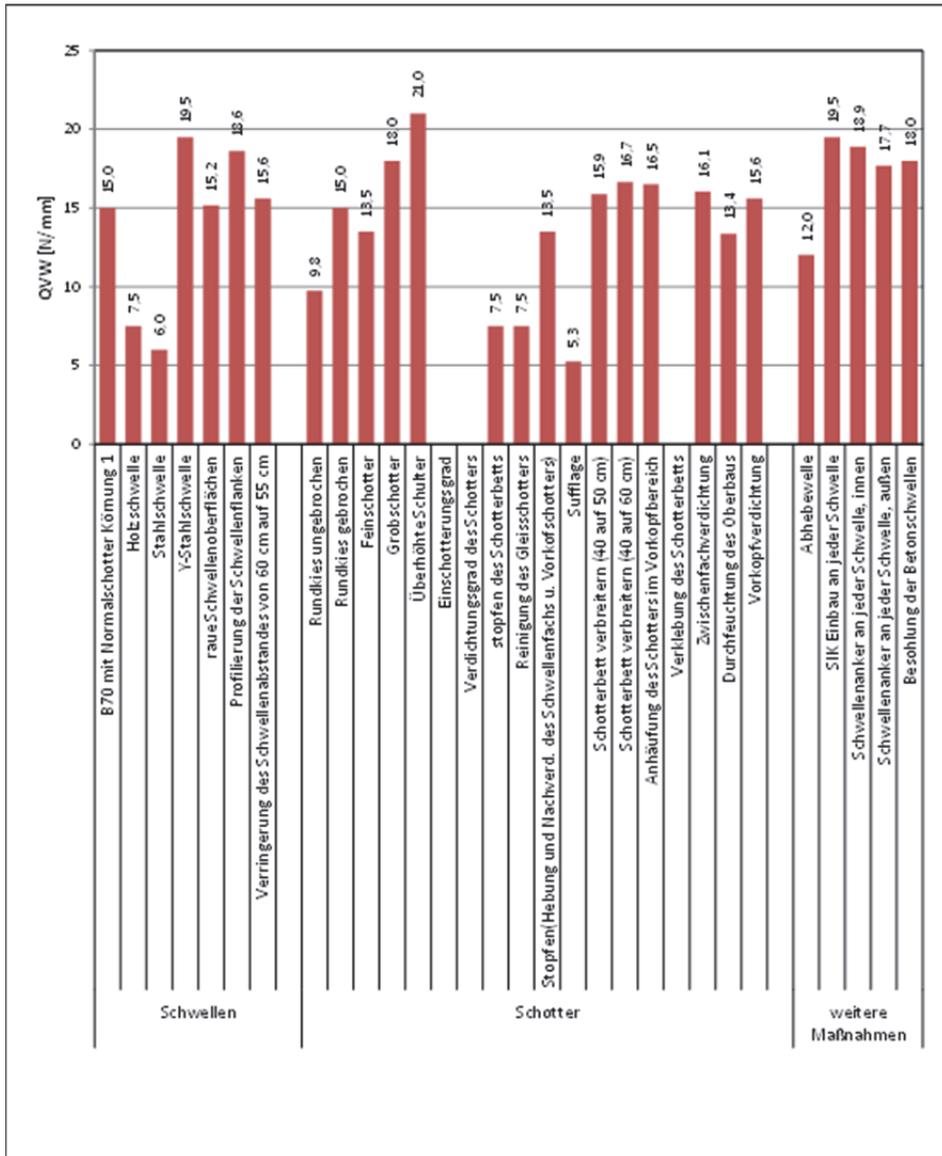


Abbildung 10: Zusammenstellung der Einflüsse auf den QVW (in Relation zur Schwelle B70 mit Schotterkörnung 1, gut verfüllt und vollständig stabilisiert, 15 N/mm)

3.1.4 Messmethoden

- Um den QVW experimentell (im Labor und in situ) zu bestimmen, sind verschiedene Verfahren üblich, welche teils unterschiedliche Ergebnisse aufweisen. Der QVW ist derjenige Wert, welcher nach Umrechnung des Schwellenabstandes (meist 600 mm) bei einer Verschiebung der Schwelle um 2 mm erreicht wird. [18] Folgende Verfahren sind dazu üblich:
- Einzelschwellenmethode:
Die Verschiebung der Einzelschwelle wird auch als Referenzmethode bezeichnet. Dabei werden die Schienenbefestigungen gelockert und mit hydraulischen Pressen die Schwelle horizontal verdrückt (die Schiene wird hierbei als Widerlager verwendet). Es können verschiedene Aufbauten zum Einsatz kommen. Kennwerte der Methode sind die max. Verschiebung, der Neigungskoeffizient des zurückgehenden Teils des Kraft-Weg-Diagramms, und die Kraft, welche mit einer Verschiebung von 2 mm übereinstimmt. Die Einzelschwellenmethode verlangt kein erneutes Stopfen oder Richten des Gleises nach der Messung. Dieses Verfahren wurde auch für die Messungen in Kapitel 6.1 angewendet.
- Jochverschiebemethode:
Die Verdrückung eines 4 – 6 m langen Gleisjoches wird mithilfe von eingebauten oder angrenzenden Fundamenten als Widerlager durchgeführt. Sie erfordert ein Auftrennen des Gleises, größere angreifende Kräfte sowie einen erhöhten Aufwand an Vor- und Nachbereitung der Messstelle im Vergleich zur Einzelschwellenmethode.
- maschinelle Gleisverschiebemethode:
Bei dieser Methode werden Stopfmaschinen mit Zusatzausrüstung verwendet. Hierbei bringt der Gleisrichtzylinder eine Seitenkraft auf, der Verschiebeweg wird mit dem Richtwertgeber gemessen wobei die Hebezylinder das Gleis mit einer Vertikalkraft belasten.
(Plasser & Theurer) [12] [24]
(Umrechnung für ein Betonschwellengleis unter voller Auflast:
 $QVW_{\text{Einzelschwelle}} = 0,1216 * QVW_{DGS62N}$ [25], [3])
- Methode mit Entgleisungswaggon:
Diese Methode erfordert ein speziell konzipiertes dreiachsiges Versuchsfahrzeug. Diese Methode kommt der realen Beanspruchung am nächsten, wird aber durch den großen Aufwand selten angewandt. [12], [10]
- kontinuierliche und dynamische Messung:
Es werden Echtzeitergebnisse direkt nach der Durcharbeitung verwendet.

3.2 Längsverschiebewiderstand w_L [N/mm]

Der Längsverschiebewiderstand (LVW) ist jener Widerstand, den die Schotterbettung entgegen einer entlang der Gleislängsachse auftretenden Verschiebung der Schwellen aufbringt.

3.2.1 Abhängigkeit

Der LVW wird maßgeblich beeinflusst von [6]:

- den Eigenschaften der Schwellen abhängig von Form, Abmessung, Baustoff und Rauigkeit der Schwelle
- dem Schwellenabstand
- den Bettungsstoffen und dem Verdichtungsgrad
- der Größe der Belastung
- der Länge und Häufigkeit des Lasteintrags

3.2.2 Charakteristika

- Maßgebende Größe beim LVW ist der Flankenwiderstand. [18]
- Der LVW ist ca. der 1,7 fache Wert des QVW. [18]
- Bei einem Betonschwellengleis B70 wurde der LVW im unverdichteten Gleis mit $w_L = 5$ N/mm bestimmt. [12]
- Für Kräfte bis zu einer Verschiebung von 2 mm (Durchrutschgrenze) zeigt sich ein linearer Verlauf, darüber ein konstanter. [12]
- Der LVW verdoppelt sich infolge einer andauernden Betriebsbelastung. [12]

3.2.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes

- Bei einer Durcharbeitung mit einem dynamischen Gleisstabilisator erhöht sich der LVW um 30 – 50 %. [12]

3.2.4 Messmethoden

Der LVW wurde bisher nur selten messtechnisch erfasst. Daher hat ILIEV ein Verfahren entwickelt, um den LVW aus Geometrie und Gewicht verschiedener Schwellen zu ermitteln. Als Basis diente eine Messung des LVW einer unbesohlenen B75 Schwelle im unkonsolidierten Schotterbett [18]. Bei einem maximalen Verschiebungsweg von 10 mm wurde ein LVW von 18,0 N/mm gemessen [26].

3.3 Verdrehwiderstand zwischen Schiene und Schwelle w_V [N/°]

Der VDW ist der Widerstand welcher einer potenziellen Verdrehung der Schiene über die Schienenbefestigungen gegenüber der Schwelle⁷ entgegenwirkt.

3.3.1 Abhängigkeit:

Der VDW ist nach [6] abhängig von:

- der Art der Befestigung (Form, Material, Abmessungen)
- dem Verspannungsgrad der Spannmittel
- der Art der Zwischenlage (Kunststoff, Holz)
- der Schienenart (Form und Abmessungen des Schienenfußes)
- der Rauigkeit der Schienenfußoberfläche
- der Stellung der Schiene in der Schienenbefestigung
- der Temperatur

3.3.2 Charakteristika

- Der Verdrehwiderstand beeinflusst die Gleisroststabilität (Ersatzträgheitsmoment)
- Der Einfluss des Verdrehwiderstands auf die GLS ist nach KNOLL gering, daher ist die Schienenbefestigung diesbezüglich frei wählbar [6]

3.3.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes

Es können größere Rippenplatten (Rph XL und Rph XXL, siehe Kapitel 7.7) eingesetzt werden, diese erhöhen den VDW in geringem Maße, können aber einem Einarbeiten der Rippenplatten in die Schwelle entgegenwirken und somit Unstetigkeiten in der Gleisroststabilität vermindern.

3.3.4 Messmethoden

Die Bestimmung des VDW wird bisher nur im Labor nach [27] durchgeführt.

⁷ Die senkrechte Drehachse geht hierbei durch die Mitte der Schwellenbefestigung.

3.4 Durchschubwiderstand der Schienenbefestigung w_D [N/mm]

Der Durchschubwiderstand ist der durch die Schienenbefestigung hervorgerufene Widerstand, der einer Schienenlängsbewegung relativ zur Schwelle entgegenwirkt. Mittels K- oder Ski-Befestigungen der Schiene auf der Schwelle kann solchen unerwünschten Bewegungen am Wirksamsten begegnet werden, um bei einem auftretenden Schienenbruch die Größe der Bruchlücke (30 – 50 mm [13]) oder ein auf Bergstrecken auftretendes Schienenwandern begrenzen zu können.

3.4.1 Abhängigkeit

Der Durchschubwiderstand ist abhängig von:

- der Art der Schienenunterlage
- der Breite des Schienenfußes
- der Anpresskraft der Schienenbefestigung
- dem Verschleiß der Stoßverbindung von Stoßlückengleisen durch Betriebs- und Witterungseinflüsse

3.4.2 Charakteristika

- Der Durchschubwiderstand soll mindestens doppelt so groß wie der Längsschiebewiderstand sein (außer bei gefrorenem Boden) [12]
- Die Längsschubenergie ist gering und kann daher in den Betrachtungen zur GLS vernachlässigt werden [6]
- Der erforderliche Durchschubwiderstand kann aus der Lückenweite und der zulässigen Schlupflänge der Schienen ermittelt werden [8]:

$$w_D = \frac{\Delta l * E * A}{l^2} \quad (3-1)$$

- Δl Lückenweite [mm]
- l zulässige Schlupflänge der Schienen [mm]
- Der Durchschubwiderstand tritt in Größen zwischen $15 \text{ kN} < w_D < 30 \text{ kN}$ pro Schienenaufleger auf [12], [28].

3.4.3 Möglichkeit zur Optimierung des Wertes

Nach derzeitigem Stand der Technik sind keine Verbesserungen zwingend nötig.

3.4.4 Messmethoden

Messungen werden im Labor wie bei STEINER [29] geschehen nach DIN EN 13146 [27] zur Erprobung neuer Systeme durchgeführt.

3.5 Biegesteifigkeit des Gleisrostes, Ersatzträgheitsmoment

Die Summe der horizontalen Biegesteifigkeiten der beiden Schienen in Kombination mit den Schwellen und den Schienenbefestigungsmitteln ergeben die Biegesteifigkeit des Gleisrostes welche für die GLS einen nicht zu unterschätzenden Beitrag liefert. Das Ersatzträgheitsmoment ist der Widerstand des Gleisrostes für eine konstante Länge unter einer konstanten Neigung (siehe Abbildung 11).

3.5.1 Abhängigkeit

Die Biegesteifigkeit des Gleisrostes ist abhängig von

- der Torsionssteifigkeit der Schiene.
Es treten zusätzliche Biegezug- und Biegedruckspannungen am Schienenkopf und Schienenfußrand auf. Hierbei ist die Elastizitätsgrenze der Schiene zu beachten. Ansonsten kann es zu einem höheren Verschleiß der Schienenbefestigungsmittel kommen.
- der Art der Schienen, Schwellen und Befestigungsmittel sowie deren Spannungszustand.
- dem jeweiligen Schienenfahrzeug (Beschleunigung/ Bremsen/ Achslast)
- Spannungshäufungen (Wandern der Schienen, Zwangspunkte, plötzliche Krümmungsänderungen, usw.)
- der Schientemperatur (Sonneneinstrahlung und Bremstemperatur) [6]
- dem Spannungszustand der Schiene beim Verschweißen

3.5.2 Charakteristika

KNOLL [6] schreibt zu den Charakteristika:

- Die Biegung der Schiene und Schwelle als Gleisrost wirkt als Verbundtragwerk
- Der Einfluss der sekundären Biegung ist sehr gering
- der Einfluss der Krümmung der Schiene infolge Temperatur ist bisher weitgehend unerforscht.

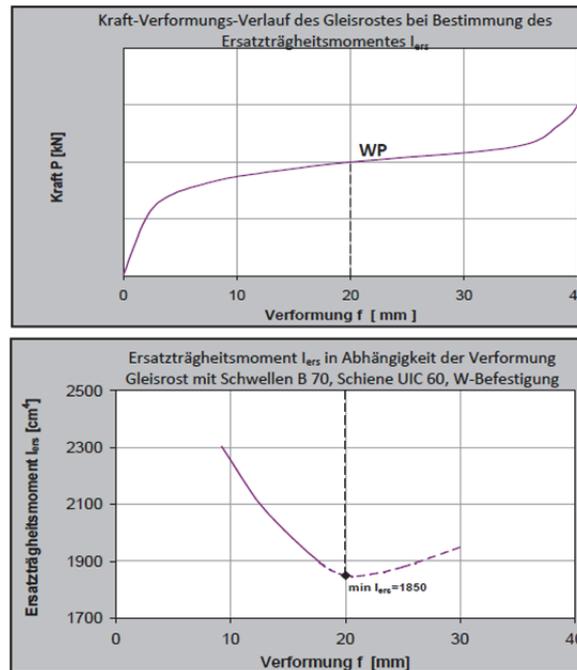


Abbildung 11: Kraft- Verformungs-Verlauf des Gleisrostes bzw. Ersatzträgheitsmoment I_{ers} in Abhängigkeit der Verformung [18]

ILIEV schreibt dazu:

Am Anfang der Belastung wird ein steiler Anstieg der Kraft registriert (Haftreibung in der Schienenbefestigung), gefolgt von einem flacheren Abschnitt (Gleitreibung). Bei größeren Verformungen wird infolge des Anliegens des Schienenfußes an der Winkelführungsplatte wiederum ein höherer Widerstand im Gleisrost aufgebaut. Im Wendepunkt des Kraft-Verformungs-Verlaufs wird das Minimum des Kraft-Verformungs-Verlaufs des Ersatzträgheitsmomentes registriert. [18]

3.5.3 Möglichkeiten zur Optimierung des Wertes

Die derzeit wichtigste Maßnahme ist die vorschriftsmäßige Wartung des Oberbaus und der Schienenbefestigungsmittel sowie die korrekte Auswahl selbiger.

3.5.4 Messmethoden

Das Ersatzträgheitsmoment kann nicht einfach im Gleis gemessen werden, sondern hierfür sind aufwändige Versuche im Labor nötig. Aus diesem Grund werden diese selten durchgeführt und es wird entweder auf bereits bekannte Werte zurückgegriffen oder eine Simulation über FEM-Programme durchgeführt.

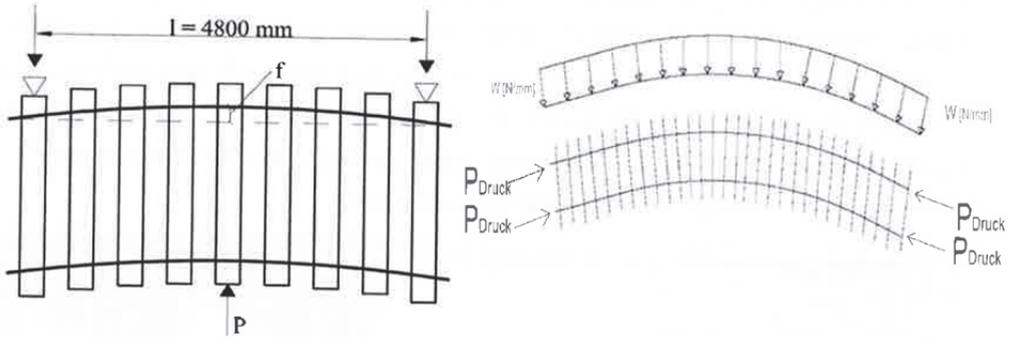


Abbildung 12: Ersatzträgheitsmoment (hier auf 9 Schwellen) [18]

Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes I_{ers} :

$$I_{ers} = \frac{P}{f} * \frac{l^3}{48 * E} \quad [mm^4] \quad (3-2)$$

I _{ers} [mm ⁴]	Schiene		49 E5	60 E2
	Verpannung	gелockert	638*10 ⁴	1026*10 ⁴
		fest und halbverspannt	1100*10 ⁴	
	Schwelle / Befestigung		Holzschwelle - K	Beton W70

Tabelle 4: Ersatzträgheitsmomente einiger Gleisrostformen der Normalspur nach CHATKEO [30]

3.6 Weitere Einflussfaktoren

Neben den bisher genannten Einflussfaktoren auf die GLS sind noch weitere zu nennen:

- Größe des Schienenprofils – Eine erhöhte GLS ist grundsätzlich durch Verwendung kleinerer Profile erreichbar (49E1) gegenüber (S54 und 60E1), da durch die kleinere Querschnittsfläche geringere temperaturinduzierte Spannungen auftreten.
- Gleisrichtungsfehler und Fehlerlänge – Der QVW schwindet proportional zum kritischen Gleisrichtungsfehler und umgekehrt proportional zur Fehlerlänge. [18]
- Drehgestellabstand der eingesetzten Fahrzeuge - Gleisverwerfungen treten wahrscheinlicher unter Fahrzeugen mit großem Drehgestellabstand auf, da hier die Abhebewelle stärker ausgeprägt ist.
- Mängel im Oberbau, wie gelockerte Schrauben, ein mit Humus, Wurzeln, Aufpflügen aus dem Untergrund verunreinigtes Schotterbett, eingearbeitete Rippenplatten in die Holzschwellen,

Die nachfolgenden beiden Abbildungen können nur beispielhaft einige derartige Oberbaumängel im Gleis verdeutlichen.



Abbildung 13: Oberbaumangel - Sicherungskappe mit lockeren bzw. fehlenden Schrauben

In Abbildung 13 ist zu sehen, dass sich zwei der vier Schrauben der SIK gelöst haben und fehlen. Diesem Phänomen ist nur durch regelmäßige Wartung oder dem Einbau von selbsthemmenden Schraubenmuttern zu begegnen, welche hohe Kosten nach sich zieht.

In der nächsten Abbildung sind auf einer Doppelschwelle verschiedene Stoßplatten zum Einsatz gekommen. Unter der einen Schiene eine durchgehende Stoßplatte und auf der dem Betrachter näheren Seite zwei einzelne Standardrippenplatten. Es ist zu erkennen dass die Stoßplatte, die über zwei Schwellen reicht, als zusätzliche Unterstützung wirkt wohingegen die zwei einzelnen Rippenplatten sich in unterschiedlichem Maße in das Holz der Schwelle einarbeiten. Hierdurch kann infolge einer sich lockern- den Laschenschraube eine Hebelwirkung zustande kommen, welche nach oftmaliger Überfahrt die Schiene schwächt und bis zu einer Abspregung des Schienenkopfes führen kann. Der letztgenannte Effekt kann allerdings durch längere Laschen, durchgezogene Stoßplatten oder einer regelmäßig durchgeführten Wartung verhindert werden. Des Weiteren kann jedoch durch den ungleichmäßigen Einbau der Platten ein Lagefehler der Schwelle entstehen da diese einseitig größere Lasten erfährt. Weitere Probleme mit Rippenplatten werden in Kapitel 7.7 diskutiert.



Abbildung 14: Oberbaumangel - Stoßlückengleis mit zwei verschiedenen Rippenplatten

4 METHODEN ZU STABILITÄTSBETRACHTUNGEN

Das Verhalten eines Bogengleises unter Druckspannung kann mit einem EULER'SCHEN Knickstab (4. Fall) verglichen werden [31]. Hierbei treten die im vorherigen Kapitel beschriebenen nicht linearen Widerstände im Gleis auf, welche das Ausknicken verhindern sollen [6]. Um dieses Ausknicken bzw. die GLS von Bogengleisen zu berechnen, gibt es verschiedene Ansätze. Einerseits die Energiemethode nach MEIER und des weiteren mehrere Finite Elemente Methoden (FEM).

4.1 Energiemethode nach MEIER

4.1.1 Theoretische Überlegungen

Die Methode, nach welcher u.a. die DB Netz AG ihre Stabilitätsbetrachtungen aufbaut ist gegründet auf den Überlegungen von MEIER [31], welche dann von CHATKEO [20] verfeinert und verifiziert wurden und unter dem Namen MEIER⁺ bekannt sind. Dieses auf dem Prinzip der virtuellen Verrückungen basierende Verfahren geht von einem Vergleich der potentiellen Energien aus. Die Annahmen von MEIER sind:

- Die Verformungslinie ist sinusförmig und vorgegeben.
- Die Länge der Biegelinie l bleibt beim Ausknicken konstant.
- Die Druckkraft P bleibt beim Ausknicken konstant.
- Das Ersatzträgheitsmoment I_{Ers} ist konstant.
- Der Querverschiebewiderstand w_Q ist konstant.

MEIER unterteilt die Gesamtarbeit des Gleises in eine Biegearbeit A_b , eine Verschiebearbeit A_v und eine Druckarbeit A_p . Die Summe dieser Arbeiten ergibt sodann die Gesamtarbeit:

$$A = \sum A_i = A_b + A_v + A_p \quad (4-1)$$

Hierbei muss die Summe aus Biege- und Verschiebearbeit größer sein als die Druckarbeit:

$$A_b + A_v > A_p \quad (4-2)$$

Die Länge der Verwerfungswelle im Bogengleis, welche sich am wahrscheinlichsten in Form einer Sinuskurve ausbildet, wird nach MEIER wie folgt bestimmt:

$$l_v = 2 * \pi * \sqrt{\frac{2 * E * I_{ers}}{P_{krit}}} \quad (4-3)$$

Weiter gilt für Radien < 700 m [31]:

$$\Delta T_{krit} = -\frac{8 * I_{ers}}{\alpha_T * A_{(2)} * R * f} + \sqrt{\left(\frac{8 * I_{ers}}{\alpha_T * A_{(2)} * R * f}\right)^2 + \frac{16 * I_{ers} * w_Q}{\alpha_T^2 * A_{(2)}^2 * E * f}} \quad (4-4)$$

$$P_{krit} = E * A_{(2)} * \alpha_T * \Delta T_{krit} \quad (4-5)$$

$$l = 2 * \pi * \sqrt{\frac{2 * E * I_{ers}}{P_{krit}}} \quad (4-6)$$

Wobei:

$$f = f_0 + 7mm \quad (4-7)$$

$$f^* = \left(w_Q - \frac{P_{krit}}{R}\right) * \frac{16 * E * I_{ers}}{P_{krit}^2} \quad (4-8)$$

Hierbei sind:

$A_{(2)}$	=	Fläche der beiden Schienen	[mm ²]
E	=	Elastizitätsmodul des Schienenstahls = 2,1·10 ⁵	[N/mm ²]
f	=	angenommener fiktiver Gleisrichtungsfehler	[mm]
f_0	=	tatsächlicher Gleisrichtungsfehler	[mm]
f^*	=	kritischer Gleisrichtungsfehler	[mm]
I_{ers}	=	Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes	[mm ⁴]
l	=	Verwerfungslänge	[mm]
P_{krit}	=	kritische Gleisdruckkraft	[N]
R	=	Gleishalbmesser	[mm]
R_{min}	=	kleinster „verwerfungssicherer“ Gleishalbmesser	[mm]
ΔT_{krit}	=	kritische Temperaturerhöhung	[K]
ΔT	=	Temperaturerhöhung im Gleis	[K]
w_Q	=	Querverschiebewiderstand	[N/mm]
α_T	=	Temperaturdehnzahl der Schiene	[1/K]

Die Verwerfungssicherheit und auch die kritische Temperaturerhöhung sind daher direkt vom Bogenradius abhängig. Vereinfacht kann die Sicherheit gegen Gleisverwerfungen nach MEIER durch

$$\frac{\Delta T_{krit}}{\Delta T} \geq 2 \quad (4-9)$$

berechnet werden⁸.

Da die Berechnungen von MEIER für Radien über 200 m als zu optimistisch gesehen werden, wurden von CHATKEO umfangreiche Versuche durchgeführt, um das Ersatzträgheitsmoment durch das Trägheitsmoment beider Schienen sowie den Verdrehwiderstand zu ersetzen. Weiters wurden in seinem Rechenprogramm (FORTRAN) auch der QVW nicht mehr als konstant angenommen und stattdessen folgende Ansätze gewählt [20]:

- Die Verformungslinie ist [...] sinusförmig.
- Die Länge der Biegelinie l beim Ausknicken ist veränderlich.
- Die Druckkraft P wird durch Radialatmung reduziert.
- Die Trägheitsmomente I_{yy} beider Schienen und der Verdrehwiderstand w_D Schiene-Schwelle sind veränderlich.
- Der Querverschiebewiderstand w_Q ist abschnittsweise gestört.
- Die Streuung der GLS-Parameter (w_Q , f^* , ΔT , $[w_v]$) wird stochastisch erfasst und bezüglich Wirkung auf ΔT_{krit} ergänzend betrachtet.

Unter diesen Annahmen kann sodann ein kritischer Gleislagefehler errechnet werden, welcher zusammen mit dem Querverschiebewiderstand die kritische Temperaturdifferenz bis zu einer Gleisverwerfung angibt [12].

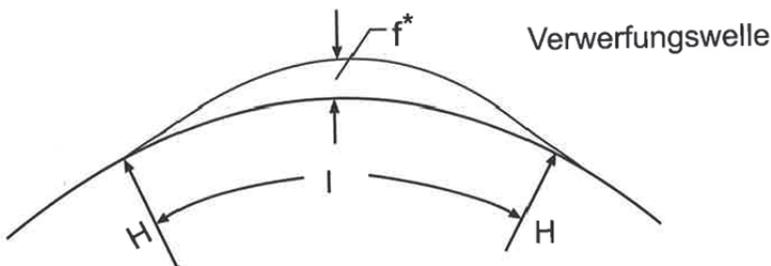


Abbildung 15: Kritischer Gleislagefehler im Bogen [12]

⁸Diese Vereinfachung ist in der Praxis aufgrund ihrer zu hohen Sicherheitsreserven nicht anwendbar und dient daher als erste grobe Abschätzung.

Um auf der sicheren Seite zu liegen, werden zur errechneten Temperaturerhöhung im Gleis noch einige Zuschläge hinzugerechnet, und zwar

- auf Bergstrecken, am Ende von Gefällestrecken und vor Weichen oder anderen Zwangspunkten im Gleis ≈ 10 K, aktiviert durch abbremsende und beschleunigende Züge,
- aufgrund von plastischen Verformungen während der Überfahrt ≈ 3 K,
- aufgrund der Änderung des Eigenspannungszustandes der Schiene ≈ 8 K [17] und
- bis zu 50 K aufgrund von Sicherheitsreserven beim Schotteroberbau im Hochgeschwindigkeitsverkehr [30].

Die Sicherheitsreserve wurde für enge Radien von 200 m auf 15 K und für Radien von 700 m mit 25 K festgelegt. Zwischen diesen Werten kann linear interpoliert werden [20]. Es wird hierbei für Betonschwellen B70 ein Ersatzträgheitsmoment von $14.000.000 \text{ mm}^4$ und für Holzschwellen ein Ersatzträgheitsmoment von $11.000.000 \text{ mm}^4$ auf der sicheren Seite angenommen [30]. Aus diesem Grund und da der LVW in den Berechnungen nicht gesondert betrachtet und der QVW für die Rechnungen nach Formel (4-4) als konstant angenommen wird, werden dem tatsächlichen Gleisrichtungsfehler f_0 noch 7 mm hinzugefügt (4-7). Falls der tatsächliche Gleisrichtungsfehler f_0 nicht bekannt ist, kann nach RANGOSCH *diese fiktive Rechengrösse [welche] vom Gleiszustand [abhängt] [...] als Toleranzbereich betrachtet werden, innerhalb dessen sich keine bleibende Gleislageverschlechterung einstellt*: [13] Es werden Werte für die kritische Temperaturerhöhung angegeben und somit die verbleibende Sicherheit berechnet. Solange die kritische Temperaturerhöhung größer ist als die Differenz zwischen maximal zu erwartender Schienentemperatur und Verschweißtemperatur gilt ein Gleis als verwerfungssicher.

Als Anhaltswerte können für verschiedene Gleislagen folgende Annahme getroffen werden: [13]

- *Guter Gleiszustand:*
- $f \approx 15 - 20 \text{ mm}$
- *Schlechter Gleiszustand:*
- $f \approx 20 - 25 \text{ mm}$

Weiter schreibt RANGOSCH:

Ist der kritische Gleislagefehler [f] grösser als der angenommene vorhandene Lagefehler f, so kann das Gleis als verwerfungssicher betrachtet werden. Im umgekehrten Fall besteht akute Verwerfungsgefahr, da ein Ausknicken bereits innerhalb des Toleranzbereiches von f eintreten kann.*
[13]

Für den Bogen gilt daher nach Formel (4-8):

- $f^* > f$: Das Gleis ist verwerfungssicher
- $f^* < f$: Die Verwerfungsgefahr ist akut

Es kann demnach zusammenfassend für Bergstrecken mindestens eine kritische Temperaturerhöhung angenommen werden, welche sich zusammensetzt aus:

- 3 K aufgrund der plastischen Verformung des Schienenstahls unter dem Fahrspiegel entstehende Schienenverlängerung (kann in engen Bögen aufgrund der sich einstellenden Bogenatmung unberücksichtigt bleiben [32])
- 10 K vor Zwangspunkten und am Ende von Gefällestrecken aufgrund des sich einstellenden Längskräfteausgleichs durch abbremsende und beschleunigende Züge auf Bergstrecken
- < 8 K aufgrund von Eigenspannungen in den Schienen
- 10 – 50 K als Sicherheitszulage je nach Radius
- 41 K unter Annahme von $T_{max} 58 \text{ °C}$ und $T_{neutral} 17 \text{ °C}$.

Unter Zugrundelegung dieser Annahmen ergibt sich somit ein Ermessensspielraum für Bergstrecken von $61 \text{ K} < \Delta T_{krit} < 109 \text{ K}$ ⁹

⁹ Die Grundlage zum Regelwerk 820.2010 der DB Netz AG variiert zwischen Annahmen für $\Delta T_{krit} = 40 \text{ K}$ und 59 K

4.1.2 Einflüsse verschiedener Widerstände auf die Gleislagestabilität nach der Meier⁺ Methode

Um die Einflüsse der verschiedenen Eingangsparameter besser beurteilen zu können, werden nun verschiedene Berechnungen angeführt.

Hierzu werden folgende Annahmen getroffen:

Name	Symbol	Einheit	Wert
alpha Schiene	α_r	-	1,20E-05
E-Modul Stahl	E	N/mm ²	2,10E+05
Wärmeausdehnungskoeff. Stahl	α_r	1/K	1,20E-05
Schiene	Schiennenname	-	49E1
Neutrale Temperatur Schiene	To	[°C]	25
max Temperatur Schiene	TSmax	[°C]	60
Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes	I_{ers}	mm ⁴	1,10E+07
tatsächlicher Gleisrichtungsfehler	f_0	mm	12,50
Ungenauigkeitszusatz	Zusatz zu f^*	mm	7,0
Bogenradius	R	m	300,00
Querverschiebewiderstand	w_Q	N/mm	8,00

Tabelle 5: Annahmen zur Berechnung der Einflussfaktoren

Eine Variation des Ungenauigkeitszusatzes f^* und des Querverschiebewiderstands führt zu folgenden Abweichungen bei der kritischen Temperaturerhöhung:

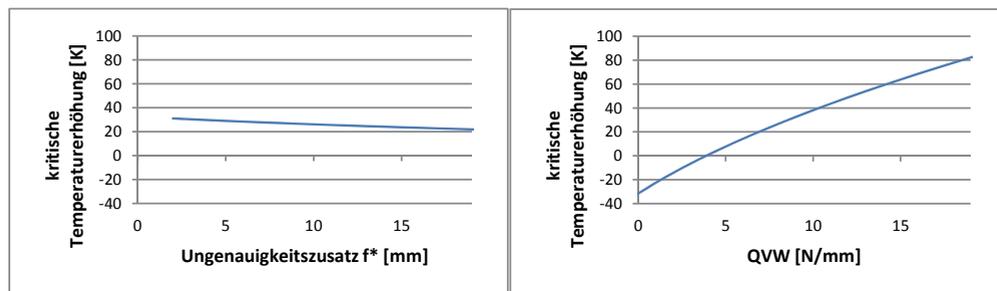


Abbildung 16: kritische Temperaturerhöhung unter Veränderung des Ungenauigkeitszusatzes (links) und des QVW (rechts)

Der Ungenauigkeitszusatz hat demnach keinen großen Einfluss und es kann der verifizierte Zusatz von 7 mm beibehalten werden. Im Gegensatz dazu hat der QVW einen großen Einfluss auf die kritische Temperaturerhöhung. Die Veränderung des Ersatzträgheitsmoments nach KNOLL ist hingegen, wie auch der Einfluss von Längsschubenergie und Verdrehenergie [...], vernachlässigbar klein. [6]

Ebenso stellt ILIEV in seiner Arbeit fest, dass der Verdrehwiderstand nur einen geringen Einfluss auf die GLS hat:

Bei einer Änderung der Verspannung von 100 % auf 50 % und 0 % werden nach seinem Rechenmodell lediglich Rückgänge der kritischen Temperatur um 2 K bzw. 4 K verzeichnet, was einem Verlust der Sicherheit gegen Gleisverwerfungen um 6 % für unbesohlte Schwellen, bzw. 5 % für besohlte Schwellen bedeuten würde (im Vergleich zum voll verspannten Schienenbefestigungssystem mit der Betonschwelle B70). [18]

Wenn es allerdings gelingt, den QVW des Gleiskörpers zu erhöhen, so steigt die Temperaturreserve (QVW von 8 N/mm auf 10 N/mm) von 26 K auf 38 K an.

Durch die Veränderung der Verspanntemperatur verschiebt sich nicht die kritische Temperatur, sondern die Summe aus Verspanntemperatur und kritischer Temperaturerhöhung welche größer sein muss, als die maximale zu erwartende Schienentemperatur. Hier ist anzumerken, dass die Verspanntemperatur und die damit erzielte Schienenlängsspannung in der Schiene nicht konstant bzw. stationär bleibt, sondern sich besonders bei Bergstrecken verflüchtigt und zu Stellen mit unstetiger Lagequalität (Weichen, Durchlässe usw.) wandert. [33]

Als weitere Eingangsgröße in die Berechnungsformeln von MEIER⁺ geht die Schienenform ein. Wie auch ILIEV schreibt, haben kleinere Schienenquerschnittsflächen positive Auswirkungen auf die Verwerfungssicherheit. [18]

In Österreich werden die Schienen 49E1, 54E2 und 60E1 verbaut. Es wird in der folgenden Abbildung 17 die kritische Temperaturerhöhung den Schienenformen mit deren Schienenflächen gegenübergestellt.

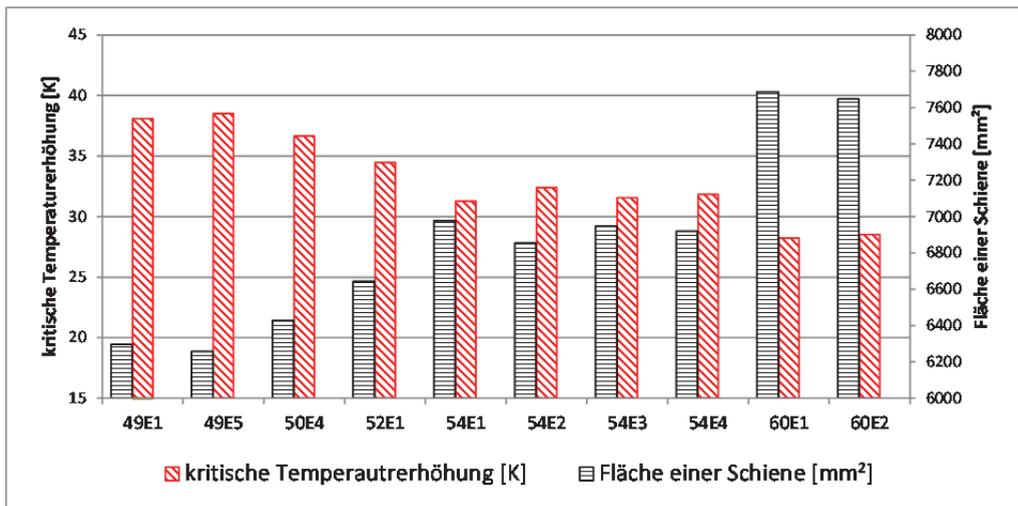


Abbildung 17: kritische Temperaturerhöhung unter Veränderung der Schienenform

Je größer die Fläche einer Schiene wird, desto kleiner wird die kritische Temperaturerhöhung.

Als letzte Einflussgröße geht die Lagegenauigkeit in die Berechnungen nach MEIER⁺ ein. Da diese aber nicht von vornherein bekannt ist und von vielen äußeren Umständen abhängt, kann ihr Wert nicht verändert und nur durch erheblichen Aufwand verkleinert werden. Die Lagegenauigkeit des in situ verlegten Gleises ist nicht nur vom Einbauzustand abhängig, sondern auch von örtlichen Gegebenheiten wie Durchlässen, Weichen oder Brücken. Es ist daher anzuraten, die tatsächliche Gleislage vor Ort den technischen Möglichkeiten entsprechend genau zu bestimmen, um keine zusätzlichen Fehler zu erhalten.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in Bezug auf die laterale Gleislagestabilität der Einfluss des QVW am größten ist. Daher wird in Kapitel 6.1 der QVW noch genauer untersucht.

4.2 FE- Methode (TU München)

Neben den oben genannten Methoden hat ILIEV [18] ein FE-Modell (mittels *SOFISTIK*) erstellt welches veränderliche Widerstände berücksichtigen kann und das Ersatzträgheitsmoment des Gleisrostes in dessen einzelnen Teile (VDW, I_{yy} der Schiene,...) aufteilt. Dieses Modell wurde mithilfe der oben angeführten Methode Meier⁺ validiert und hat sehr ähnliche Ergebnisse erzielt. Eingangsdaten dieses Modells sind:

- der Querverschiebewiderstand,
- der Längsverschiebewiderstand,
- der Verdrehwiderstand,
- das horizontale Flächenträgheitsmoment des Schienenprofils und
- die Gleisrichtungsfehler.

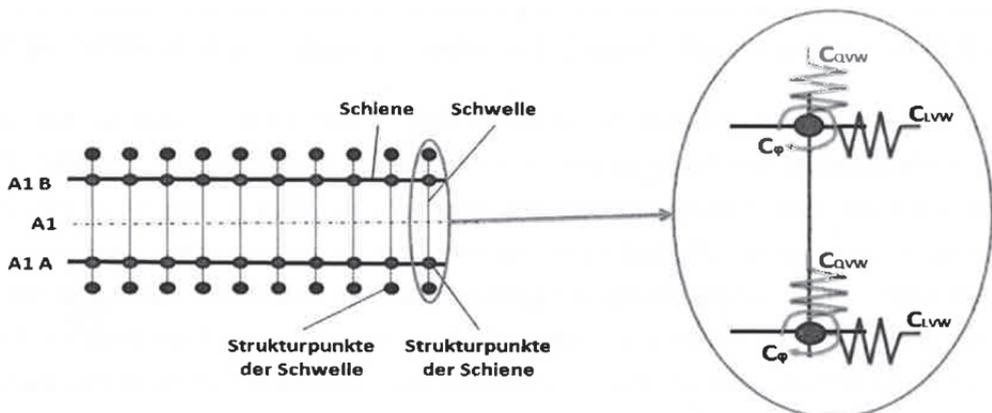


Abbildung 18: Vereinfachtes Struktur- und Federmodell des Gleisrostes [18]

4.3 FE- Methode CWERRI® (UIC / TU Delft)

Das an der TU Delft bzw. am European Railway Research Institute (ERRI) entwickelte FEM-Programm CWERRI®, mit welchem die Schweizer Bundesbahnen ihr Regelwerk erstellen, geht von einer sinusförmigen Anfangsstörung aus [4]. Das Modell ist mit dem von ILIEV vergleichbar. Es wird allerdings nicht mit dem genauen Verlauf der Widerstandsgrößen gerechnet, sondern eine Dreiteilung (elastische Phase, plastische Phase und elastische Entspannungsphase) vorgenommen. Die Federelemente sind über den gesamten Bereich konstant [4], es können daher keine Unstetigkeiten innerhalb der untersuchten Strecke modelliert werden.

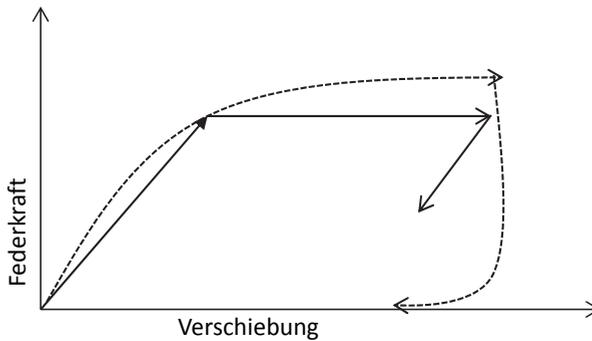


Abbildung 19: realer Verlauf des QWV (gestrichelt) und angenommener Verlauf der Methode CWERRI®

5 MINDESTRADIEN UND VERSCHWEISSTEMPERATUREN IM VERGLEICH DER TECHNISCHEN REGELWERKE BEI ÖBB, DB UND SBB

Das folgende Kapitel zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung der Thematik in den derzeit maßgebenden Normen für den Oberbau bei den drei großen Eisenbahninfrastrukturbetreibern in Österreich, Deutschland und der Schweiz nach Stand 2015. Es werden nur Normalspurgleise betrachtet.

Die untersuchten Regelwerke sind

- bei den ÖBB in Österreich die ZOV 55 [2]
- bei der DB in Deutschland die Richtlinie 820.2010 [23] und
- bei den SBB in der Schweiz die Richtlinie R 220.41 [34]

In Deutschland wie in Österreich sind zusammenhängende Gleise ab einer Länge von mehr als 60 m als lückenlos verschweißt zu betrachten. In der Schweiz wird dies bereits ab 36 m so gesehen.

Die Neutraltemperaturen liegen in Österreich zwischen +20 °C und +25 °C, in Deutschland bei +20 °C (+/- 3 °C) und in der Schweiz zwischen +22 °C und +28 °C, wobei der Regelwert bei +25°C liegt.

5.1 Mindeststradien für das lückenlose Verschweißen von Gleisen

Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der derzeit jeweils zulässigen Mindeststradien für das lückenlose Verschweißen bei verschiedenen Schwellenarten.

40 5 - Mindestradien und Verschweisstemperaturen im Vergleich der technischen Regelwerke bei ÖBB, DB und SBB

Mindestradien für das lückenlose Verschweißen von Gleisen nach ÖBB, ZOV 55 (2001); SBB, R 220.41 (2003); und DB, 820.2010 (2012)							
Oberbau			Bogenhalbmesser [m] / Voraussetzungen				
Schwellenart	Schienenart	Verlegeart	Regelbettungsquerschnitt ($d=1,70\text{ m}$, $d=1,45\text{ m}$)	Verbreiterung auf $d = 1,80\text{ m}$; $1,65\text{ m}$; $1,80\text{ m}$			Genehmigung im Einzelfall
				SIK jede 3. Schwelle	SIK jede 2. Schwelle	SIK jede Schwelle	
Betonschwellengleis Be 19, Be 19a, L1, L2, K1			≥ 500	$500 > R \geq 250$	-	-	$250 > R$
Betonschwellengleis Be 11, Be 12, Be 14, Be 17			≥ 1000	-	-	-	-
Beton B70, B91	IV	W, Ws	≥ 350	$350 > R \geq 300$	-	-	-
Beton B70, B91	VI	W, Ws	≥ 450	$450 > R \geq 350$	-	-	-
Betonschwelle $l < 2,60\text{ m}$	49 E 5		≥ 300	$300 > R \geq 280$	$280 > R \geq 190$	$190 > R \geq 180$	$180 > R \geq 170$
Betonschwelle $l < 2,60\text{ m}$	54 E 4		≥ 340	$340 > R \geq 320$	$320 > R \geq 230$	$230 > R \geq 190$	$190 > R \geq 180$
Betonschwelle $l < 2,60\text{ m}$	60 E 2, R65		≥ 370	$370 > R \geq 350$	$350 > R \geq 260$	$260 > R \geq 210$	$210 > R \geq 180$
Betonschwelle $l \geq 2,60\text{ m}$	54 E 4		≥ 260	$260 > R \geq 240$	$240 > R \geq 190$	$190 > R \geq 180$	$180 > R \geq 170$
Betonschwelle $l \geq 2,60\text{ m}$	60 E 2, R65		≥ 290	$290 > R \geq 270$	$270 > R \geq 190$	$190 > R \geq 180$	$180 > R \geq 170$
2-Block	I	W, Ws, B, Bi	≥ 350	$350 > R \geq 280$	-	-	-
2-Block	IV	W, Ws, B, Bi	≥ 400	$400 > R \geq 300$	-	-	-
Stahl	I	Aek, Aeki ³	≥ 500	$500 > R \geq 350$	$350 > R \geq 300$	$300 > R \geq 250$	-
Stahl	IV	Aek, Aeki ³	≥ 550	$550 > R \geq 400$	$400 > R \geq 350$	$350 > R \geq 300$	$300 > R \geq 290$
Stahltragschwelle Kappenhöhe $h \geq 135\text{ mm}$	49 E 5		≥ 260	$260 > R \geq 220$	$220 > R \geq 190$	$190 > R \geq 185$	$185 > R \geq 180$
Stahltragschwelle Kappenhöhe $h \geq 135\text{ mm}$	54 E 4		≥ 300	$300 > R \geq 260$	$260 > R \geq 190$	$190 > R \geq 185$	$185 > R \geq 180$
Stahltragschwelle Kappenhöhe $h \geq 135\text{ mm}$	60 E 2, R65		≥ 320	$320 > R \geq 280$	$280 > R \geq 220$	$220 > R \geq 190$	$190 > R \geq 185$
Y-Stahlschwellen	49 E 5		≥ 320	-	-	-	-
Y-Stahlschwellen	54 E 4		≥ 350	-	-	-	-
Y-Stahlschwellen	60 E 2, R65		≥ 380	-	-	-	-
Holzschellen mit Rp- Befestigung			≥ 550	-	$550 > R \geq 425$	$425 > R \geq 350$	$350 > R \geq 300$
Holzschellen mit Rp- Befestigung in Übergangsbögen			-	-	$2000 > R \geq 425$	$425 > R \geq 350$	$350 > R$
Holz	I	K, Ke	≥ 500	$500 > R \geq 350$	$350 > R \geq 300$	$300 > R \geq 250$	$250 > R \geq 200$
Holz	IV	K, Ke	≥ 550	$550 > R \geq 400$	$400 > R \geq 350$	$350 > R \geq 300$	$300 > R \geq 250$
Holz	VI	K, Ke	≥ 600	$600 > R \geq 450$	$450 > R \geq 400$	$400 > R \geq 350$	-
Holzschwelle $l = 260$	49 E 5		≥ 380	$380 > R \geq 350$	$350 > R \geq 250$	$250 > R \geq 190$	$190 > R \geq 180$
Holzschwelle $l = 260$	54 E 4		≥ 430	$430 > R \geq 400$	$400 > R \geq 300$	$300 > R \geq 230$	$230 > R \geq 190$
Holzschwelle $l = 260$	60 E 2, R65		≥ 460	$460 > R \geq 430$	$430 > R \geq 330$	$330 > R \geq 250$	$250 > R \geq 190$

Tabelle 6: Mindestradien im Vergleich [2], [34], [35]

5.2 Risikobetrachtung des Klimas mit Grenz- und Verschweiß- Temperatur

Beim Vergleich der unterschiedlichen Regelwerke drängt sich auch die Überlegung auf, in wie weit es sinnvoll sein könnte, durch eine Anpassung der Verschweißtemperaturen an die jeweiligen örtlichen Gegebenheiten die auftretenden temperaturinduzierten Spannungen in der Schiene zu reduzieren. Daher wurden nun im Folgenden die meteorologischen Gegebenheiten im Streckennetz der ÖBB näher betrachtet.. Weiters wurde untersucht, ob auch in Österreich regional unterschiedliche Verspanntemperaturen definierbar wären, um (wie in der Schweiz, Tessin [34]) eine lokale Anpassung, evtl. auch meereshöhenabhängig, zu erzielen.

Hierzu wurden Messdaten der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik ZAMG, (des staatlichen meteorologischen und geophysikalischen Dienstes für Österreich) an einigen für die Thematik maßgebenden Standorten ausgewertet (Wetterstationen an Bergstrecken und einigen Eisenbahnknotenpunkten: Bludenz, Langen, St. Anton am Arlberg, Landeck, Reutte, Innsbruck – Universitätsdach., Brenner, Mürtzschlag, Semmering, Wiener Neustadt, siehe Abbildung 154 im Anhang).

Die Neutraltemperaturen der Schiene werden wie folgt berechnet [12]:

$$T_{neutral,Schiene} = T_{min,Schiene} + \left[\frac{T_{max,Schiene} - T_{min,Schiene}}{2} \right] + 5^{\circ}C \quad (5-1)$$

Hierbei wird die Neutraltemperatur der Schienen bei den ÖBB in offenen Strecken (nicht Tunnel) bei Beton und Holzschwellen, unabhängig von der Schienenform mit +20°C bis + 25°C, angegeben [2]. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang auch, dass der Kleinstwert der Verschweißtemperatur bei der DB Netz AG von 17 °C (bis 1997) auf 20°C (ab 1998) angehoben wurde [32]. In Tabelle 7 ist die Auswertung der Temperaturmessdaten für die verschiedenen Messstationen der ZAMG aufgezeigt, wobei jeweils auf die Minimal- und Maximalwerte Rücksicht genommen wurde. Diese Werte wurden zur theoretischen Überprüfung der Maximalwerte der Schiene eingesetzt und daraus die Neutraltemperatur nach Formel (2-3) ermittelt. Die Extremwerte der Lufttemperatur sind in Abbildung 20 dargestellt.

42 5 - Mindeststradien und Verschweisstemperaturen im Vergleich der technischen Regelwerke bei ÖBB, DB und SBB

Ort:	Stationsnummer:	T _{max,Luft} [°C]	T _{min,Luft} [°C]	T _{max,Luft} [°C]	T _{min,Luft} [°C]	ΔT _{Luft}	T _{max,Schiene} [°C]	T _{min,Schiene} [°C]	T _{Neutral} [°C]																																																																																																																																				
Bludenz	14104	35,4	-12,6	36,4	-20,0	56,4	56,4	-22,0	22,2																																																																																																																																				
Bludenz	14105	36,4	-20,0							Langen	14310	32,0	-20,0	32,0	-20,0	52,0	51,6	-22,0	19,8	Langen	14311	30,2	-16,4	St. Anton	14300	32,0	-24,5	32,0	-24,5	56,5	51,6	-26,5	17,6	St. Anton	14301	31,5	-20,2	St. Anton	14302	31,0	-18,6	Landeck	14401	35,5	-15,8	36,1	-18,6	54,7	56,1	-20,6	22,7	Landeck	14302	31,0	-18,6	Landeck	14403	36,1	-17,1	Reutte	11500	33,8	-18,9	33,8	-23,7	57,5	53,6	-25,7	18,9	Reutte	11505	32,8	-23,7	Reutte	11506	-	-	Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7	Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2	Brenner	14801	30,1	-21,2	Brenner	14802	29,6	-18,2	Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2
Langen	14310	32,0	-20,0	32,0	-20,0	52,0	51,6	-22,0	19,8																																																																																																																																				
Langen	14311	30,2	-16,4							St. Anton	14300	32,0	-24,5	32,0	-24,5	56,5	51,6	-26,5	17,6	St. Anton	14301	31,5	-20,2	St. Anton	14302	31,0	-18,6							Landeck	14401	35,5	-15,8	36,1	-18,6	54,7	56,1	-20,6	22,7	Landeck	14302							31,0	-18,6	Landeck	14403	36,1	-17,1	Reutte	11500	33,8	-18,9	33,8	-23,7							57,5	53,6	-25,7	18,9	Reutte	11505	32,8	-23,7	Reutte	11506	-	-	Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7							Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2	Brenner	14801	30,1	-21,2	Brenner	14802	29,6	-18,2	Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415
St. Anton	14300	32,0	-24,5	32,0	-24,5	56,5	51,6	-26,5	17,6																																																																																																																																				
St. Anton	14301	31,5	-20,2																																																																																																																																										
St. Anton	14302	31,0	-18,6							Landeck	14401	35,5	-15,8	36,1	-18,6	54,7	56,1	-20,6	22,7	Landeck	14302	31,0	-18,6	Landeck	14403	36,1	-17,1	Reutte	11500	33,8	-18,9	33,8	-23,7	57,5	53,6	-25,7	18,9	Reutte	11505	32,8	-23,7	Reutte	11506	-	-	Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7	Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2	Brenner	14801	30,1	-21,2	Brenner	14802	29,6	-18,2	Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																										
Landeck	14401	35,5	-15,8	36,1	-18,6	54,7	56,1	-20,6	22,7																																																																																																																																				
Landeck	14302	31,0	-18,6																																																																																																																																										
Landeck	14403	36,1	-17,1							Reutte	11500	33,8	-18,9	33,8	-23,7	57,5	53,6	-25,7	18,9	Reutte	11505	32,8	-23,7	Reutte	11506	-	-	Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7	Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2	Brenner	14801	30,1	-21,2	Brenner	14802	29,6	-18,2	Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																												
Reutte	11500	33,8	-18,9	33,8	-23,7	57,5	53,6	-25,7	18,9																																																																																																																																				
Reutte	11505	32,8	-23,7																																																																																																																																										
Reutte	11506	-	-							Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7	Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2	Brenner	14801	30,1	-21,2	Brenner	14802	29,6	-18,2	Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																																														
Innsbruck-Uni	11803	37,4	-16,1	37,4	-16,1	53,5	57,5	-18,1	24,7																																																																																																																																				
Brenner	14800	27,0	-18,8	30,1	-21,2	51,3	49,6	-23,2	18,2																																																																																																																																				
Brenner	14801	30,1	-21,2																																																																																																																																										
Brenner	14802	29,6	-18,2							Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6	Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6	Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																																																																										
Mürzzuschlag	10400	33,8	-22,4	33,8	-22,4	56,2	53,6	-24,4	19,6																																																																																																																																				
Mürzzuschlag	10401	32,6	-19,6							Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4	Semmering	10415	33,0	-19,5	Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																																																																																								
Semmering	10410	29,6	-21,9	33,0	-21,9	54,9	52,7	-23,9	19,4																																																																																																																																				
Semmering	10415	33,0	-19,5							Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0	Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																																																																																																						
Wiener Neustadt	7603	-	-	38,1	-22,3	60,4	58,2	-24,3	22,0																																																																																																																																				
Wiener Neustadt	7604	38,1	-22,3																																																																																																																																										

Tabelle 7: Meteorologische Daten, Auswertung für 1990 – 2010 nach [36] und eigener Auswertung¹⁰

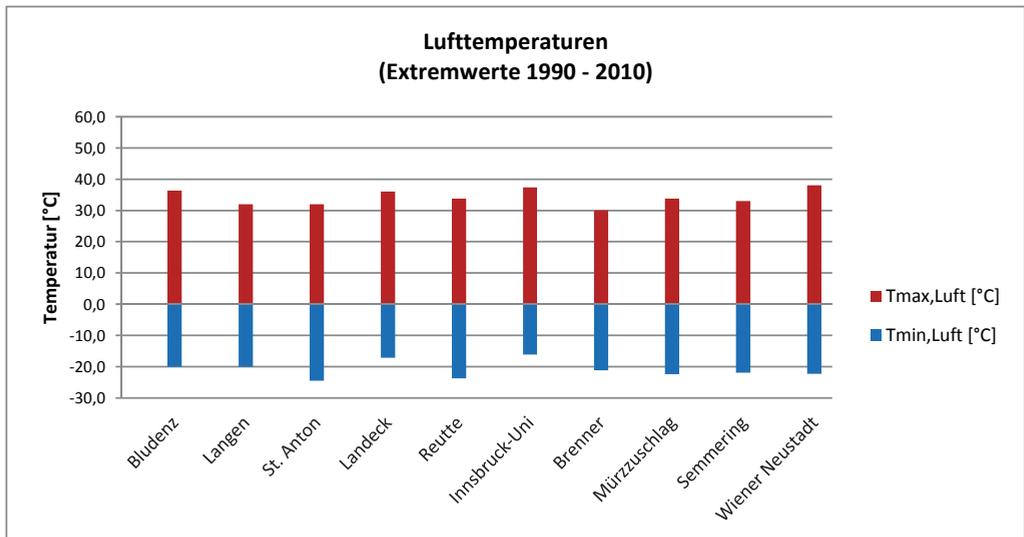


Abbildung 20: Temperatur-Extremwerte 1990 – 2010 nach [36] und eigener Auswertung

¹⁰ Hier sind in Rosa und Blau die höchsten bzw. niedrigsten Temperaturen der jeweiligen Kategorie dargestellt.

Unabhängig von der tatsächlichen Höhenlage der Messstation zeigt sich in voranstehender Abbildung sowie in Tabelle 7, dass über der gesamten Fläche Österreichs in den Jahren 1990 bis 2010 keine gravierenden maximalen Lufttemperaturunterschiede zu erkennen sind.

Des Weiteren ist die Temperatur der Schiene nicht nur von der Lufttemperatur abhängig, sondern auch von der Sonnenscheindauer, der Lage der Schiene zur Sonne (Ausrichtung, Anstrahlwinkel und Verschattung), der Schienenfarbe und der Verdunstung an der Schienenoberfläche (Windchillfaktor, usw.). Damit erklärt sich, dass die angegebenen Minimaltemperaturen im zu erwartenden Bereich liegen. Allerdings können die Maximaltemperaturen - wie bereits gezeigt wurde - höher liegen als die Lufttemperatur.

Mithilfe von Formel (2-3) können die gemessenen maximalen und minimalen Lufttemperaturen in die extremen Schienentemperaturen umgerechnet werden, wie in folgendem Diagramm dargestellt.

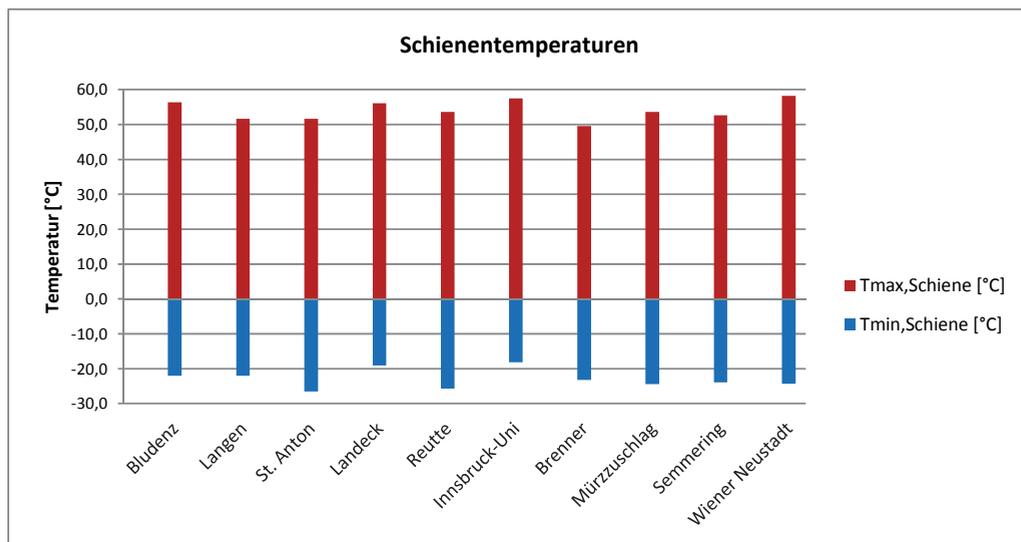


Abbildung 21: Schienenextremtemperaturen nach Formel (2-3)

Bisher wurde nach [2] in Österreich die Minimaltemperatur der Schiene mit -30 °C angenommen. Den Aufzeichnungen der ZAMG zufolge, (siehe Tabelle 7), wurde in den ausgewählten Messstationen als kleinste Temperatur nur $-24,5\text{ °C}$ gemessen. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Messstationen nicht die Extremwerte auf der Strecke wiedergeben. Außerdem muss ein Sicherheitsaufschlag zur gemessenen Temperatur hinzukommen.

Es kann somit derzeit keine Verschiebung der Verspann- und Verschweißtemperaturen nach oben oder unten empfohlen werden. Auch die Einflüsse der Klimaerwärmung

sind nach Abbildung 153 (Anhang) derzeit zu gering, um eine belastbare Aussage über die mögliche Verschiebung der Verspanntemperaturen für die Zukunft zu treffen.

An Meterspurbahnen in der Schweiz wurde anhand von Messungen festgestellt, dass die Neutraltemperatur nur 19 °C statt 28 °C betrug [33]. Auch am Brazer Bogen konnte, wie in Kapitel 6.2.7 gezeigt, ein Abwandern der Schienenlängsspannungen beobachtet werden. Die Neutraltemperaturen sind daher mit großer Vorsicht zu verwenden.

Der Vergleich der Neutraltemperaturen zeigt, dass mit zunehmend höher liegender Schiene die verwendete neutrale Temperatur näher an der tatsächlichen Temperatur liegt. Da für die Lagesicherheit und Verwerfungssicherheit die Druckspannungen ausschlaggebend sind, ist somit eine größere Sicherheit vorhanden.

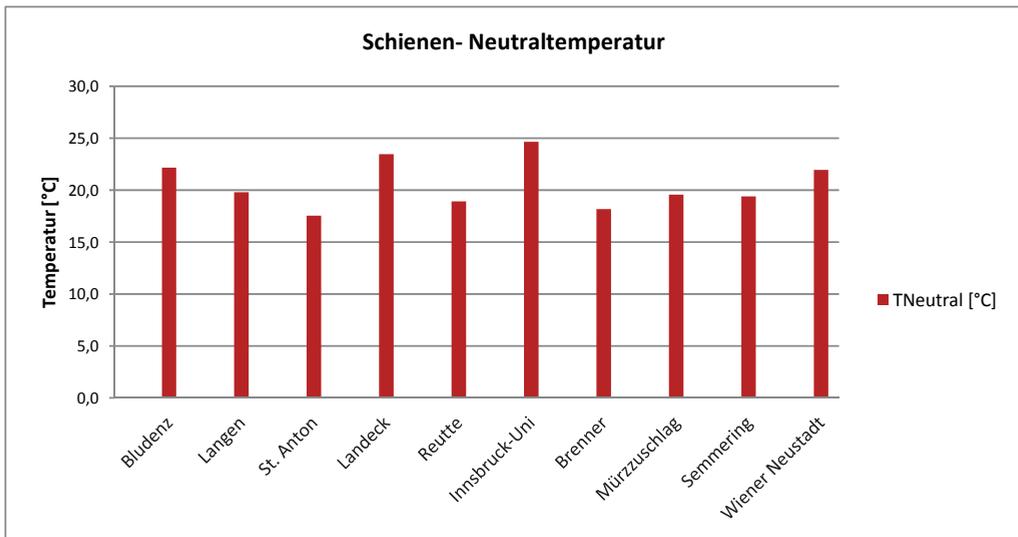


Abbildung 22: Neutraltemperaturen der Schienen, berechnet nach Formel (5-1)

6 MESSUNGEN IM GLEIS

Als wesentliche Ergänzung zu den bisher vorgestellten, überwiegend theoretischen Betrachtungen wurden im Rahmen dieser Arbeit mehrere Messkampagnen in Betriebsgleisen der ÖBB durchgeführt. Dabei wurden Querverschiebewiderstandsmessungen (QVW) und Bogenatmungs- sowie Temperaturmessungen durchgeführt.

Es folgt zuerst die allg. Beschreibung der QVW-Messungen sowie deren Auswertung und im Anschluss daran die Beschreibung und Auswertung der Bogenatmungs-messungen am so genannten 'Brazier Bogen' auf der westlichen Arlberg-Strecke.

6.1 Querverschiebewiderstandsmessungen

Um die Messungen des Querverschiebewiderstands durchführen zu können, wurden die derzeit bekannten Versuchssysteme begutachtet und hieraus das System der DB Systemtechnik sowie der TU München als die sinnvollste Messtechnik erachtet und nachempfunden. Durch die Wahl dieses Mess-Equipments ist es möglich, die Ergebnisse zu vergleichen. Um die Vergleichbarkeit zu erhalten ist es außerdem notwendig, die Geschichte und die vorangegangenen Belastungen des Gleises zu kennen. Diese (NATAS-) Daten, bereitgestellt von der ÖBB-Infrastruktur, sind in die Auswertung und den Vergleich der Messdaten eingeflossen, darüber hinaus wurde die Messeinrichtung zunächst in einem Betriebsgleis bei Innsbruck getestet (siehe dazu im Kapitel 6.1.1.1).

Um die Daten zu erfassen, wurde der Verschiebungsweg der Schwelle mittels eines Wegaufnehmers WA 20 und der hierfür notwendige Druck von einer Druckmessdose U 93 gemessen. Der Druck für den Zylinder wurde mit einer Handpumpe bzw. mit einem elektrischen Kompressor erzeugt, wobei die Geschwindigkeit des Verschiebens einen Einfluss hat. Die Belastungsgeschwindigkeit wurde daher möglichst konstant gehalten und betrug zwischen 5 s und 10 s. Die Auswertung wurde mit den Programmen Catman Easy, Excel 2010 und Matlab durchgeführt.

Es wurden jeweils, wie in Abbildung 24 zu sehen, die Schwellen von der Bogeninnenschiene nach außen gedrückt. Um die Schwelle von der Schiene zu entkoppeln, wurden die Schwellenschrauben gelöst und die Rippenplatten seitlich verschoben. Hierzu ist es notwendig, auch die benachbarten Schienenbefestigungen von den Schwellen zu lockern, jedoch wurden diese vor Durchführung der Messung wieder fest angeschraubt, sodass die Schiene, welche als Widerlager dient, nicht zu große Verformungen erfährt. Es wurden sodann mittels der Schwellenschrauben Stahlwinkel an den Schwellen beidseitig montiert. Bei Betonschwellen wurden die WFP, SKL und Zwischenlagen entfernt und die Stahlwinkel mit hierfür gefertigten Stahl-WFP montiert. Hierdurch wurde sichergestellt, dass für diese Messungen an der unbelasteten Schwelle keine Verbindung zwischen Schwelle und Schiene vorhanden ist, sodass von einer „unbehinderten“ Bewegung gesprochen werden kann und die Schwelle

selbst bei Umlagerung der Schottersteine noch einige Millimeter ohne Berührung der Schiene „aufklettern“ kann¹¹. Die Richtigkeit dieses Ansatzes einer unbelasteten Schwelle konnte mithilfe der in Kapitel 6.2.11 beschriebenen Auswertungen der horizontalen Bewegung des Gleisrostes aufgrund einer Zugüberfahrt bestätigt werden. Dort wird gezeigt, dass die laterale Bewegung des Bogens stets in den Abhebewellen des ersten Drehgestells stattfindet, demnach unter einer unbelasteten (sogar leicht abgehobenen) Schwelle.



Abbildung 23: Messzylinder und Winkelführungsplatte mit Versuchswinkel (beides Eigenbau, Universität Innsbruck)

Da der QVW-Wert, wie bereits beschrieben, als Widerstandswert pro mm Gleislänge bei einer seitlichen Verschiebung von 2 mm definiert ist, wurde der maximale Verschiebungsweg mit 20 mm begrenzt. Alternativ wurden die Messungen abgebrochen, falls keine weitere Laststeigerung notwendig war, um die Schwelle zu verschieben. Damit wurde sichergestellt, dass in jedem Fall ein Verschiebungsweg von ca. 7 – 8 mm abgedeckt ist, der im Gleisbett bei ungelösten Schwellen genügt hätte, um eine Gleisverwerfung zu erhalten. [37]

Nach den Messungen wurden die Schwellen mithilfe eines gegenüberliegend montierten Winkels in die Ausgangslage zurückgedrückt. Nach den Verschiebungsversuchen verfügen die untersuchten Schwellen durch das aufgelockerte Schotterbett nur mehr über Widerstandskräfte aus Reibung an Sohle und Seitenwand. Es verbleiben dabei jedoch immer noch ca. 80% [18] des QVW wirksam (vgl. Kapitel 3.1).

Um Hohllagen der Schwellen oder andere punktuellen Fehlerquellen ausgleichen zu können, wurden pro Versuchsabschnitt mindestens 5 Schwellen¹² verschoben, wobei jeweils jede dritte Schwelle verschoben wurde, um einen gegenseitigen Einfluss der Schwellen auszuschließen. Somit wurde auch sichergestellt, dass nicht mehrere direkt hintereinander liegende Schwellen aufgelockert wurden. Mithilfe von Messfahrten des EM 250 konnte festgestellt werden, dass durch die QVW-Messungen keine Verschlechterung der Gleislage eingetreten ist. Da diese Messungen auch im Bereich des

¹¹ Dieser Einfluss wurde bereits bei mehreren Messkampagnen der TU München untersucht [17] und wird daher hier nicht nochmals betrachtet.

¹² AUER geht davon aus, dass 3/4 aller unbesohlenen Betonschwellen eine Hohllage des Schwellenkopfes aufweisen. [64]

Brazer Bogens stattfanden, wurde hier gleichzeitig überprüft, ob der Bogenradius einen Einfluss auf den gemessenen QVW hat (siehe Kapitel 6.2.9).

Um die Versuche durchführen zu können, wurden Mitarbeiter der jeweiligen Anlagen Service Centers (ASC) der ÖBB-Infrastruktur zur Verfügung gestellt. Mit deren Hilfe war es möglich, die QVW-Versuche in geringer Zeit unter Ausnutzung auch kleinster Intervalle, wie Zugpausen à 20 Minuten, durchzuführen.

Der gesamte Versuchsaufbau für Holz- und Betonschwellen ist im Folgenden dargestellt:

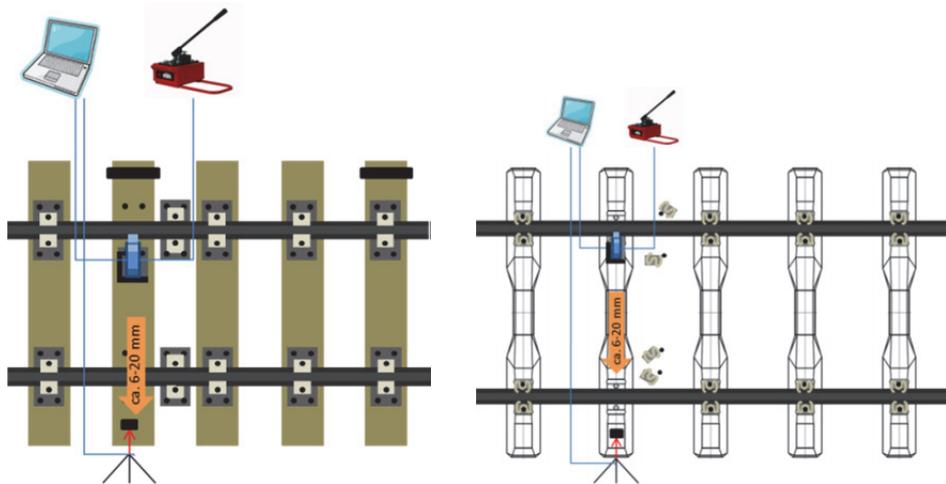


Abbildung 24: QVW-Versuch, Holzschwelle mit Rippenplatte, K-Befestigung oder Spannklammer mit oder ohne SIK bzw. für Betonschwellen



Abbildung 25: QVW Verschiebungsvorrichtung für Holzschwellen, Messung Ötztaler Ache

6.1.1 Messstellen und Auswertung der Querverschiebewiderstandsmessungen

6.1.1.1 Kalibrierungsmessung in Völs, Gleis 5, km 7,0

Am 10.06.2014 fanden in Völs auf der Strecke 5014 der ÖBB die Test- und Kalibrierungsmessungen statt. Das in der Geraden liegende Versuchsgleis (Gleis 5) war sehr stark eingefahren und wurde seit mehreren Jahren nicht bewegt. Zuletzt wurde das Gleis selten befahren. Es befindet sich Schotter der Körnung 2 durchgehend bis knapp unter die Schwellenoberkante im Gleis, wobei auch seitlich direkt Erdreich bzw. Schotter der Körnung 1 des benachbarten durchgehenden Hauptgleises ohne Mulde anschließt. Der Schwellenabstand beträgt 700 mm. Als Widerlager wurde die verbaute Schiene 49E1 verwendet. Zur Zeit der Messung war es trocken.

Die zwei verschobenen Buchenschwellen stammen aus dem Jahr 1959 und weisen eine gewisse Altersschwäche durch Zersetzung auf. Die Schwellen wurden jeweils zuerst in eine Richtung verschoben und danach in Ausgangslage zurückgedrückt. Im Anschluss daran wurden dieselben Schwellen in die entgegen gesetzte Richtung verschoben und danach ebenfalls wieder zurückgedrückt.

Es wurden somit 8 Verschiebungen durchgeführt, welche messtechnisch aufgezeichnet wurden. Die 4 erstmaligen Verdrückungen wurden ausgewertet, außerdem trat eine Fehlmessung durch Einstellungsprobleme auf.



Abbildung 26: Lage der Messstellen für die QVW Kalibrierungsmessung in Völs [38]

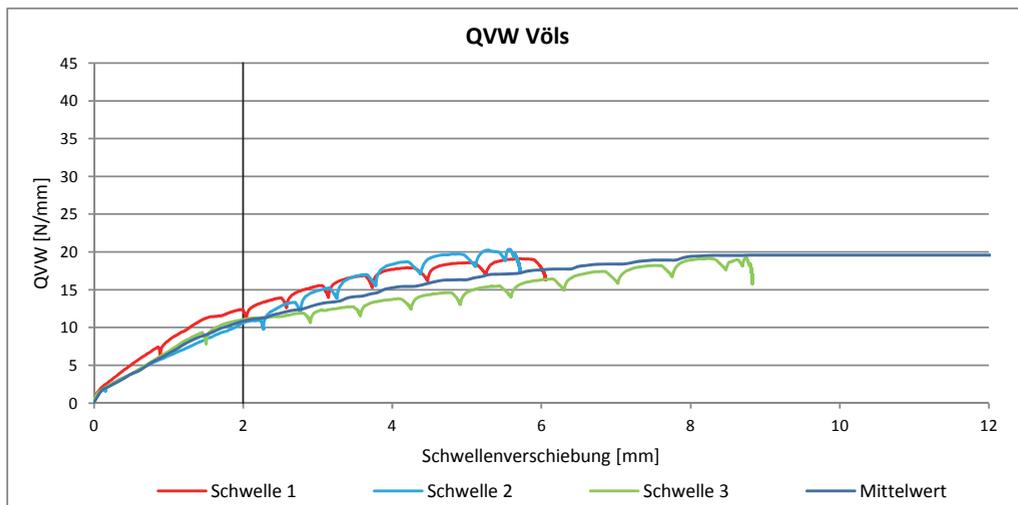


Abbildung 27: Querverschiebewiderstandsmessungen Völs, Buche 1, 700 mm Schwellenabstand

Wie unter Kapitel 3.1 beschrieben wurde, ist der Querverschiebewiderstand als diejenige Kraft definiert, welche für eine Verschiebung der Schwelle um 2 mm benötigt wird. In Abbildung 27 ist erkennbar, dass der QVW nach diesem „2 mm- Wert“ weiter ansteigt, wenn auch langsamer. Wie auch LIÉV [18] festgestellt hat, bleibt der QVW ab ca. 8 mm nahezu konstant. Daher wurde, wie oben beschrieben, spätestens bei Erreichen dieses Verschiebeweges die jeweilige Messung beendet. Anschließend wurde, wie in Abbildung 27 gezeigt, für die vergleichenden Auswertungen der einzelnen Messreihen jeweils der Mittelwert der Messungen ermittelt. Wenn starke Ausreißer (nach oben, also zur sicheren Seite) vorhanden waren, wurden diese in der Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Für die Holzschwellen in Völs, welche in einem Kofferprofil liegen und sehr gut eingefahren sind, konnte somit ein QVW von 10,9 N/mm bestimmt werden. Dieser Wert ist höher als der nach Tabelle 1 erwartete Wert von 8,5 N/mm (Kofferprofil und Schotter 2). Dies kann auf die örtlichen Gegebenheiten zurückgeführt werden, da das Versuchsgleis selten gereinigt wurde und daher ein festeres Schotterbett aufweist.

Weiterhin ist erkennbar, dass aufgrund des angewendeten Versuchsaufbaus mit einer Handpumpe nach jedem Pumpenhub ein Abfall des QVW zu verzeichnen ist. Dieser wirkt sich jedoch nicht auf die Ergebnisse aus, da bei Interpolation eine stetige Kurve entsteht. Die Messreihe in Völs weist eine geringe Streuung auf, die zwei gewählten Schwellen sind ähnlich gebettet.

6.1.1.2 Öztaler Ache, Gleis 1, km 47,13

Am 10.10.2014 fanden die QVW Messungen an der Öztaler Ache bei km 47,13 der Strecke 5014 der ÖBB statt. Hierbei wurden gut eingefahrene Buchenschwellen (Einbaudatum 2002) mit einer Schiene 49E1 sowie besohlte Betonschwellen K1 (Einbaudatum 2011) mit der Schiene 60E1 gemessen. In diesem Bereich befanden sich zur Zeit der Messung laut den Aufzeichnungen der ÖBB (NATAS) keine Gleisfehler. Der letzte Maschineneinsatz mit einem Mechanisierten Durcharbeitungszug (MDZ) fand Ende 2011 statt.

Es wurden pro Versuchsabschnitt 5 Schwellen gemessen, wobei vom Wechsel der Oberbauform jeweils 15 Meter Abstand gelassen wurde. Somit konnte ein Einfluss des Oberbauwechsels ausgeschlossen werden. Der Schwellenabstand betrug 600 mm in einem Radius des Gleisbogens von 330 m. Die Messstelle war trocken und lag im Schatten.



Abbildung 28: QVW Messstelle Öztaler Ache 1 [38]

Die Messungen der Buchenschwellen (siehe Abbildung 29) wiesen hier eine starke Streuung auf. Der gemessene QVW bei 2 mm reicht von 8 N/mm bis zu 14 N/mm. Nach Entlastung entspannten sich die Schwellen jeweils um 3 – 4 mm. Dies entspricht dem Rückstellen der Schotterkörner in deren Ausgangslage (geht einher mit dem vertikalen Zurücksinken in die Ursprungslage). Die maximale Kraft wurde bei diesen Messungen allerdings nicht bei einem Verschiebeweg von 2 mm erreicht, sondern erst

zwischen 3 und 4 mm. Daraus kann geschlossen werden, dass bei Zugrundelegung des 2 mm Wertes immer noch große Sicherheitsreserven im System verbleiben. (Messung 4 musste abgebrochen werden.)

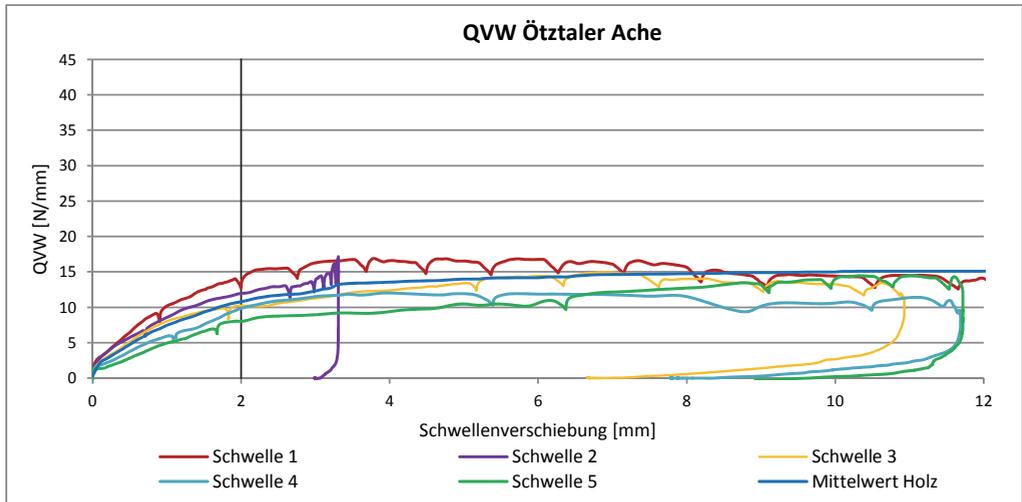


Abbildung 29: QVW Messung Ötztaler Ache, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand

Im Gegensatz hierzu zeigen die Messungen der Betonschwelle K1 (Abbildung 30) mit Ausnahme der hohl liegenden Schwelle 8 und der satt liegenden Schwelle 10 geringere Schwankungen.

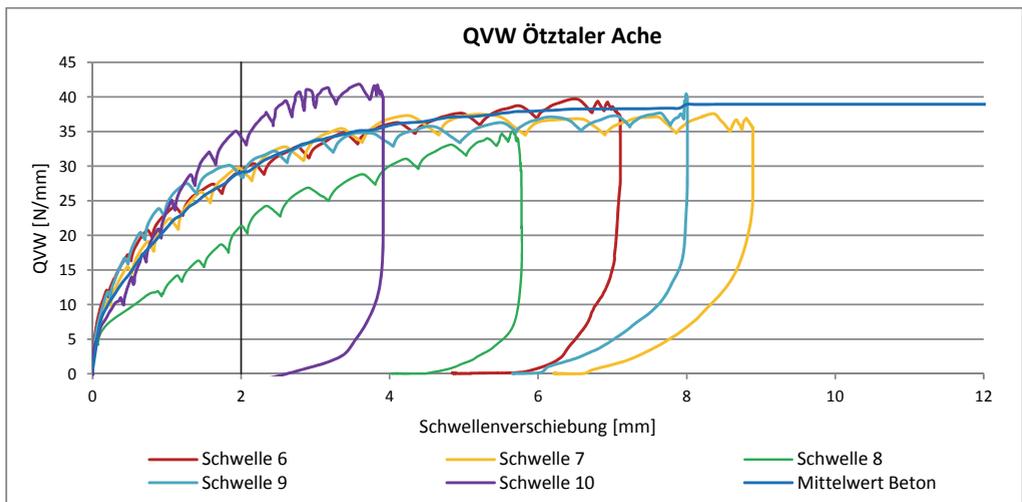


Abbildung 30: QVW Messung Ötztaler Ache, Betonschwelle K1, besohlt, 600 mm Schwellenabstand

Es kann daher der Mittelwert der Messungen als gutes Ergebnis betrachtet werden. Die Rückstellung der Schotterkörner fällt bei den besohnten Betonschwellen mit 1,5 bis 2 mm geringer aus als bei der Messreihe mit den Holzschwellen. Die beiden Messreihen können gut miteinander verglichen werden, da die Messorte direkt hintereinander liegen und daher die gleichen Einwirkungen durch Zugüberfahrten seit 2011 erfahren haben. Die Buchenschwellen wurden 2002 eingebaut, die K1 Schwellen im Zuge des Neubaus der Achbrücke 2011. Beide Bereiche wurden Ende 2011 gestopft, gerichtet und stabilisiert.

6.1.1.3 Brazer Bogen, Gleis 1, km 128,49

Der sogenannte 'Brazer Bogen', ein Gleisabschnitt auf der westlichen Arlberg-Rampe (Strecke 5016 der ÖBB) mit starkem Gefälle und einem relativ engen Gleisbogenhalbmesser (Radius 249,5 m), hatte 2010 durch das spektakuläre Unglück eines Güterzuges einigen Bekanntheitsgrad erreicht [39]. Dieser Gleisabschnitt wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch hinsichtlich der Bogenatmung untersucht (siehe Kapitel 6.2) und stand daher auch bei den vorausgehenden QVW-Messungen in besonderem Interesse.

Im Bereich der späteren Bogenatmungsmessung wurden drei Messbereiche ausgewählt. Einer am Beginn (beim Oberleitungs-Masten 11), einer in Bogenmitte in km 128,5 (beim Masten 13) und einer am Ende der Dauermessstelle (beim Masten 15). Die genaue Lage der verschobenen Schwellen ist in Abbildung 49, Abbildung 50 und Abbildung 51 auf Seite 68 dargestellt.

Der Oberbau, Holzschwellen Buche 1 und Schiene 49E1 bei einem Schwellenabstand von 600 mm wurde nach dem Zugunglück vom 16.06.2010 komplett erneuert. Die letzte Durcharbeitung vor den Messungen fand Mitte 2013 statt. Durch den engen Radius, die hohe Längsneigung (30 ‰), und die unterschiedlichen Fahrzeuggattungen besitzt der Bogen eine hohe Verschlechterungsrate pro Jahr und muss intensiv gewartet werden. Aufgrund der vorherrschenden Mängel wurde an dieser Stelle bis zur Arlbergssperre 2014 für den Railjet eine Langsamfahrstelle (60 km/h) eingerichtet.

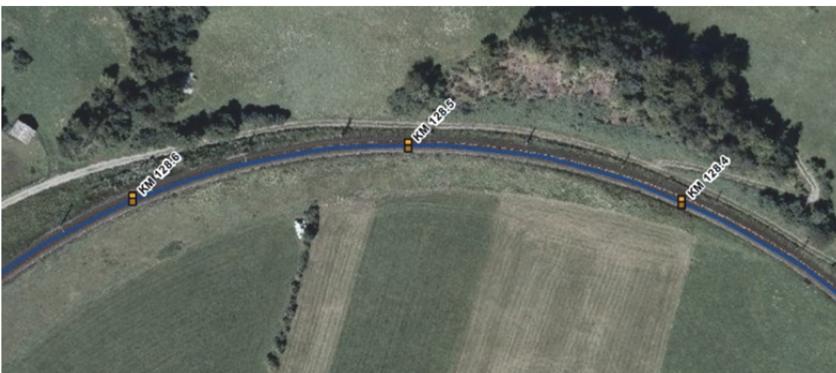


Abbildung 31: Lage der Messstellen für den QVW und Bogenatmungsversuch im Brazer Bogen [38]

Die erste Messung der Querverschiebewiderstände fand nachts am 05.09.2014 statt. Der Oberbau war aufgrund starken Regens komplett durchfeuchtet.

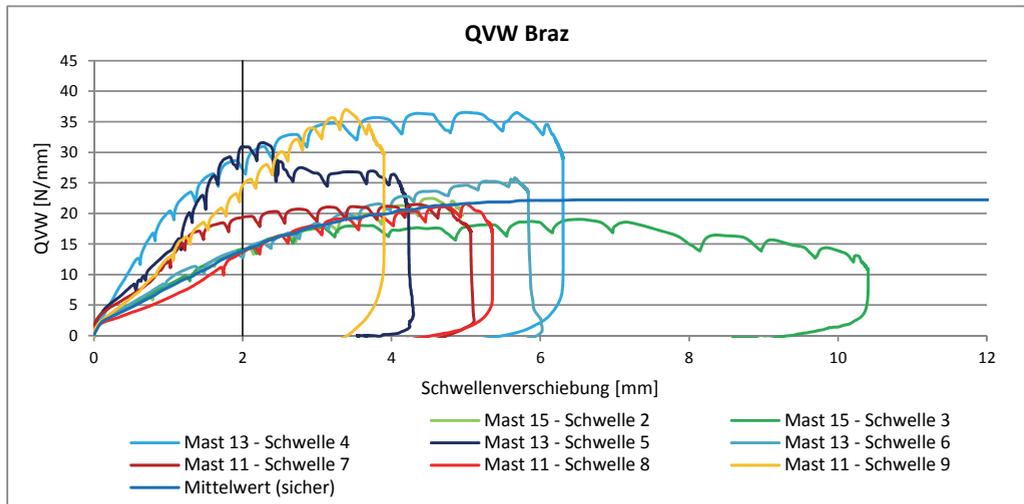


Abbildung 32: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, konsolidiert, Nass

Es ist erkennbar, dass der QVW der ersten Messung einer großen Streuung unterliegt. Jede Teilmessstelle hat eine bis zwei Schwellen mit einem niedrigeren QVW und ein bis zwei Schwellen mit hohem QVW. Die niedrigen QVW können aufgrund von Hohllagen entstanden sein, wobei der QVW bei 2 mm innerhalb der niedrigen Werte mit einer sehr geringen Streuung bei 14 N/mm liegt. Dies wäre für ein eingefahrenes Holzschwellengleis (siehe Abbildung 33 einer umgedrehten ausgebauten Holzschwelle im Bereich Bahnhof Braz) dennoch ein sehr gutes Ergebnis. Alternativ könnten die höheren QVW-Werte aufgrund von Durchwurzelung und Schotterabrieb oder anderen Einflüssen entstanden sein, auch ist die Streuung der höheren Werte deutlich größer. Im Weiteren wurde aus dieser Messung auf der sicheren Seite liegend der Mittelwert der Messungen Mast 15 – Schwelle 2, Mast 15 – Schwelle 3, Mast 13 – Schwelle 6, Mast 11 – Schwelle 8 gebildet. Im Anschluss an diese erste Messreihe wurde der gesamte Bogen mit SIK 6 an jeder Schwelle bogeninnenseitig ausgestattet. Danach wurde er einmalig gestopft und dynamisch stabilisiert.



Abbildung 33: Unterseite einer ausgebauten ehemals sehr gut eingefahrenen Holzschwelle im Bereich Braz

Am 10.10.2014 fand die zweite Messreihe in diesem Bereich statt. Es wurden dieselben Schwellen für den Versuch ausgewählt.

Die Messung fand nach dem Einbau der SIK 6 an den letzten Tagen der Arlbergsperre statt, sodass nach der anschließenden Stopfung und dynamischen Stabilisierung des Gleises noch kein Regelzugverkehr stattgefunden hatte. Das Gleis befand sich somit in einem nicht vollständig konsolidierten Zustand. Es handelte sich hier allerdings nicht um eine Schwellen-Neulage sondern lediglich um den Einbau von SIK 6 und einer Stopfung und Stabilisierung des Gleises.

Die Messung „Masten 11 – Schwelle 8“ ist weiter nicht auswertbar, da die Aufnahmeplattform für den Wegaufnehmer ab ca. 2 mm verrutschte. Sie wird für die weitere Auswertung und Interpretation nicht herangezogen. Es ist deutlich erkennbar, dass durch die Stopfung die Lagerungen der Schwellen im Schotterbett, bis auf Mast 13 – Schwelle 6, sehr ähnlich sind.

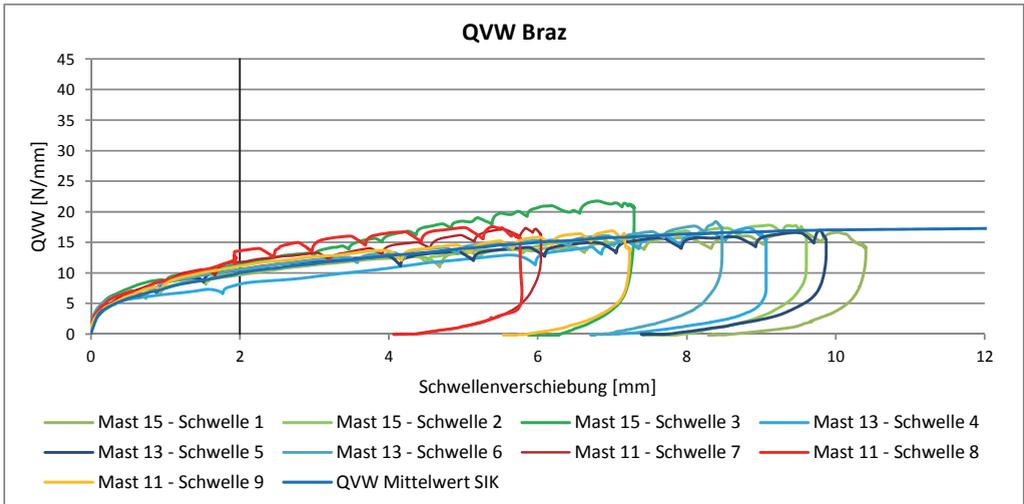


Abbildung 34: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, gestopft gerichtet und dynamisch stabilisiertes Gleis ohne Regelbetrieb

Nach 9 Monaten Regelzugbetrieb wurde am 09.07.2015 erneut eine QVW Messung des Brazer Bogens durchgeführt. Es wurden wiederum dieselben Schwellen wie bei den Versuchen zuvor verschoben. Die Lage der Schwellen war nun konsolidiert. Wie in Abbildung 35 zu sehen ist, streuen die gemessenen Werte stark. Das Gleis liegt aber in einer sehr gefestigten Lage.

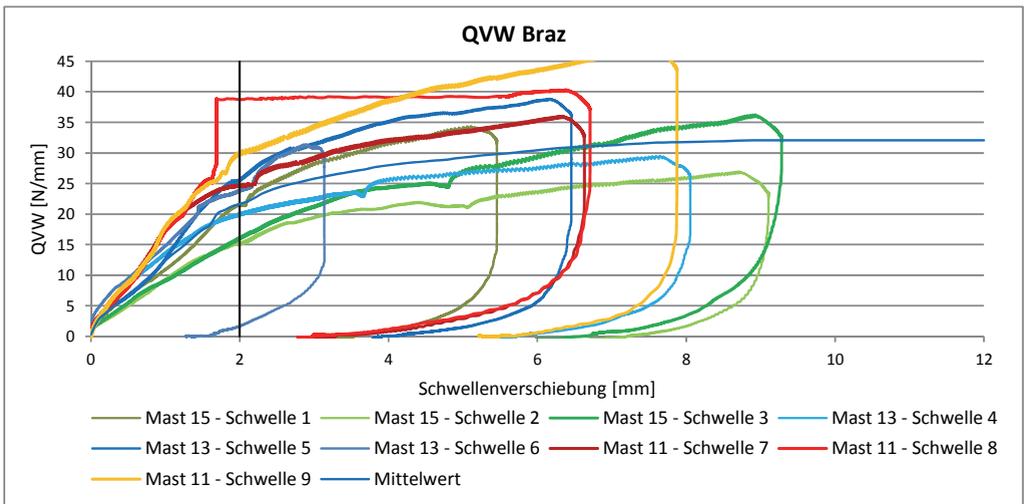


Abbildung 35: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, konsolidiert

6.1.1.4 Westendorf, Gleis 1, km 175,9

Im Bereich Westendorf bei km 175,9 Gleis 1 der Strecke 6011 der ÖBB fanden am 21.07.2014 QVW-Messungen statt. Es wurden unbesohlte¹³ K1 Schwellen aus dem Jahr 2005 verschoben und der Versuch gestartet, HD-Schwellen zu messen. Die Messstelle befindet sich in einem Übergangsbogen in einem Bereich mit 299 m – 317 m Radius, 600 mm Schwellenabstand und 60E1 Schienen. Die Messung fand am bogeninnenseitigen Gleis der zweigleisigen Strecke statt, wodurch ein Einfluss des Nachbargleises aufgrund des großen Vorkopfschotters nicht ausgeschlossen werden kann. Die letzte Durcharbeitung des Gleises hatte hier im Jahr 2006 stattgefunden.



Abbildung 36: QVW Messstelle Westendorf [38]

Wie in der folgenden Abbildung 37 zu erkennen ist, ist bei der unbesohnten Betonschwelle K1 kein ausgeprägt asymptotisches Verhalten für den QVW vorhanden. Die Ergebnisse schwanken stark im Vergleich zu den besohnten Betonschwellen im Ötztal (Abbildung 30). Dies wird auf die vergrößerte Kontaktfläche der besohnten Schwellen und die daher minimierten Hohllagen zurückgeführt. [40]

¹³ Seit 2006 ist der Einbau von unbesohnten Betonschwellen im Netz der ÖBB nicht mehr gestattet [2]

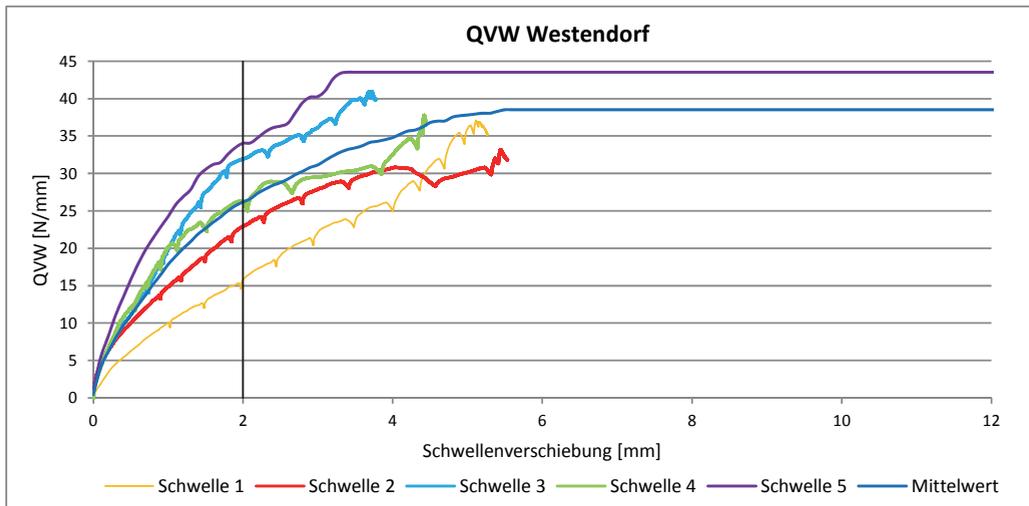


Abbildung 37: QVW Westendorf, Betonschwelle K1, unbesohlt, 600 mm Schwellenabstand

Der Versuch, auch bei den benachbarten HD Schwellen in Westendorf den QVW zu messen ist hingegen fehlgeschlagen, da aufgrund der nicht vorhandenen mittigen Bohrlöcher in der HD-Schwelle die vorgesehene Anbringung der Stahlwinkel nicht möglich war. Das schräge Anbringen der Messvorrichtung war möglich, führte allerdings zu keinen brauchbaren Ergebnissen.



Abbildung 38: HD Schwelle, Versuchsaufbau, Westendorf

6.1.1.5 Landeck, Gleis 1, km 75,8

Am 19.06.2015 und 21.06.2015 fanden in Landeck–Pians Messungen an einem Holzschwellenoberbau mit Bu1 und 49E1 Schienen bei km 75,8 der Strecke 5015 statt. Die Messungen fanden in einem Übergangsbogen im Zuge eines Hilfsbrückenausbaus statt und konnten zuvor im eingefahrenen Gleis sowie anschließend im frisch gestopften und stabilisierten (DGS) aber komplett durchfeuchteten Gleis durchgeführt werden.

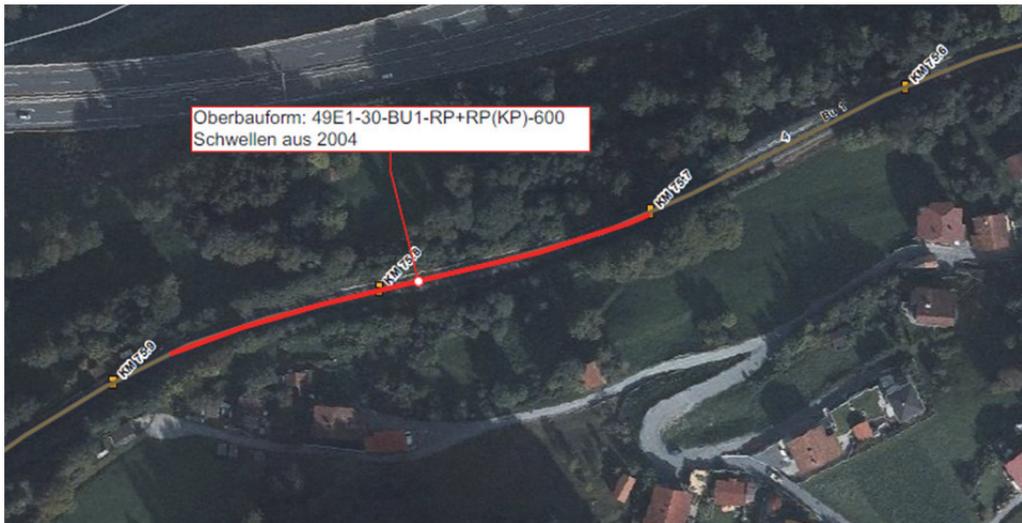


Abbildung 39: QVW Messstelle Landeck [38]

Im Rahmen dieser Messung wurde auch das bisher angewendete Verfahren der Handpumpe mit dem Einsatz eines elektrischen Kompressors verglichen, welcher kontinuierlich den Druck aufbringen kann. Hierbei wurden jeweils 5 Schwellen unter gleichen Bedingungen verschoben. Es zeigt sich in Abbildung 41, dass der Mittelwert der Verschiebungsmessungen bei dem charakteristischen Wert von 2 mm gleich ist. Es kann daher kein Einfluss der nicht kontinuierlichen Verschiebung unter Anwendung der Handpumpe nachgewiesen werden. Ein Absetzen oder neu Ansetzen des Messzylinders hat somit keinen Einfluss auf die Qualität und das Ergebnis der Messung.

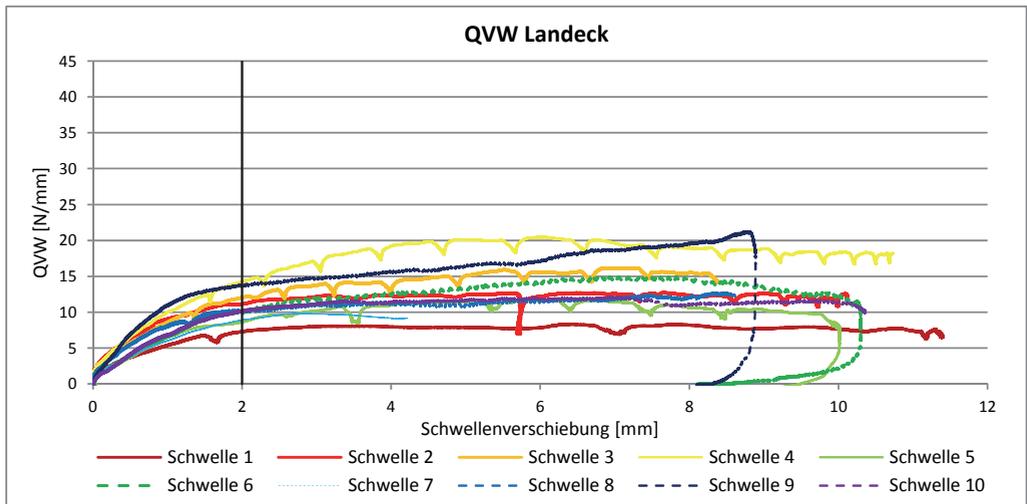


Abbildung 40: QVW Landeck, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, eingefahren

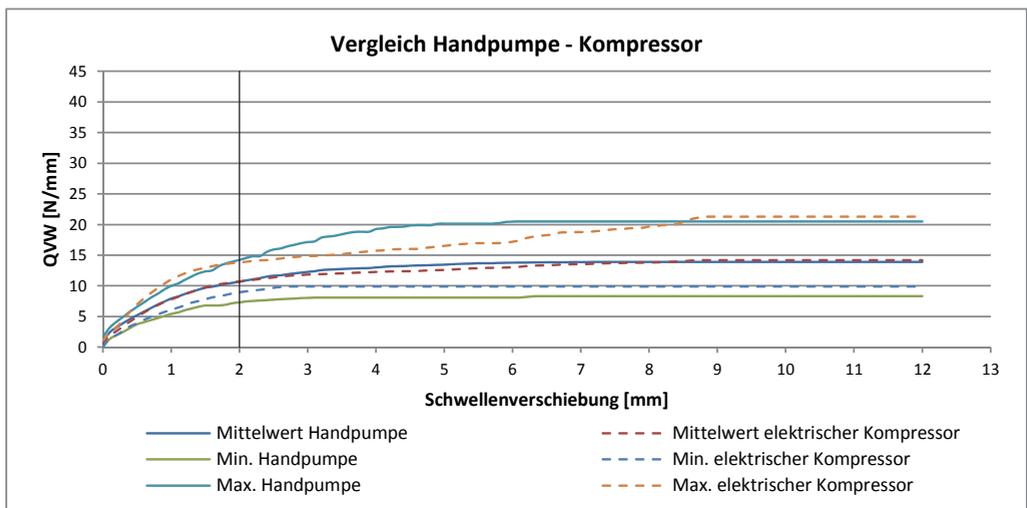


Abbildung 41: Vergleich Handpumpe / elektrischer Kompressor bei den QVW Messungen in Landeck

Der zweite Teil der Messung am 21.06.2015 wurde unmittelbar nach dem Stopfen und dynamischen Stabilisieren des Gleises durchgeführt, bevor der Regelbetrieb aufgenommen wurde.

Die Oberbauform wurde nicht verändert. Die Schwellen 6 – 10 der vorherigen Messung (Abbildung 40) wurden wiederum mit Hilfe des elektrischen Kompressors verschoben. Der QVW wurde durch das Stopfen mit DGS und die Durchfeuchtung des Oberbaus im Mittel von 10,7 N/mm auf 5,0 N/mm verringert. Die Streuung des QVW bei 2 mm Verschiebung ist leicht zurückgegangen, jedoch nicht mit dem Rückgang in Braz vergleichbar (Abbildung 34).

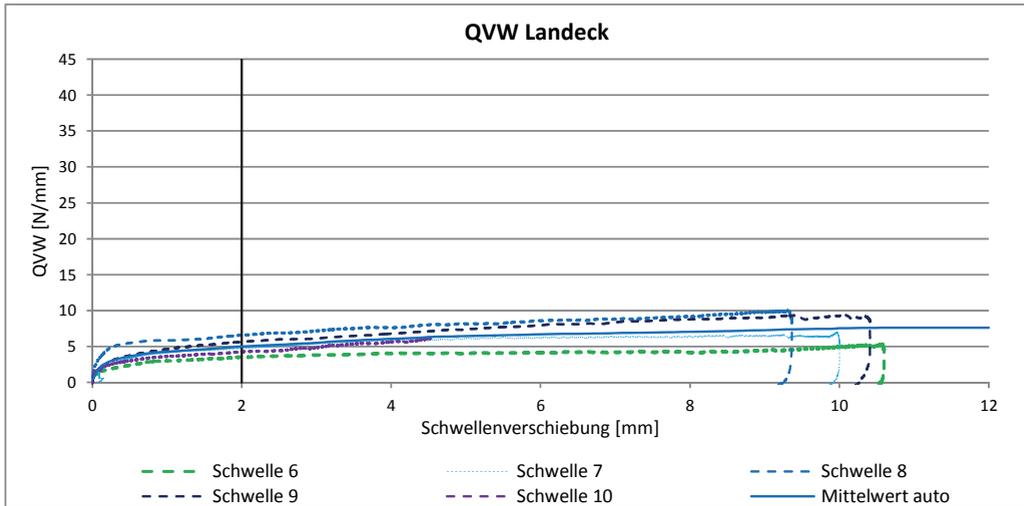


Abbildung 42: QVW Messung Landeck, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, gestopft gerichtet und dynamisch stabilisiertes Gleis ohne Regelbetrieb, nass

6.1.2 Vergleich der QVW Messungen

Insgesamt wurden im Rahmen dieser Untersuchungen über 60 verschiedene QVW-Messungen durchgeführt. Bei einer Gegenüberstellung der gemessenen Werte mit den erwarteten Werten aus der Theorie ist anzumerken, dass die Werte aus der Literatur zum Teil nur abgeleitet werden können, da für deren Zusammensetzung selbst keine Erfahrung vorhanden ist. Die getätigten Messungen ergaben bis auf die Messung in Landeck (gestopft und DGS) höhere Werte für den QVW, als nach der Theorie zu erwarten gewesen war. Dies kann daran liegen, dass die Werte in der Literatur teilweise auf Labormessungen beruhen und Veränderungen des Gleisbetts oder der Schwelle nur grob erfasst wurden.

Der Brazer Bogen im vollständig konsolidierten feuchten Zustand wies einen QVW von 13,9 N/mm auf. Dieser Wert ist hoch, verglichen mit den zu erwartenden 7,1 N/mm (unter Annahme dass sich ein nasser Holzschwellenoberbau ähnlich auf den QVW auswirkt wie ein nasser Betonschwellenoberbau). Nach dem Stopfen betrug die Abweichung vom erwarteten Wert statt 95 % nur noch 19 %. Dies lässt darauf schließen, dass die Holzschwellen sich in diesem Bogenbereich besonders gut mit dem Schotterbett verzahnt hatten.

Der Einbau der SIK 6 im Brazer Bogen auf Holzschwellen verringerte den gemessenen QVW um 28 %, wobei die Literatur von 19 % ausgeht. Theoretisch sollte sich der QVW hier von dem gemessenen Mittelwert 13,9 N/mm um 19 % verringern (Stopfen und DGS) um dann um 30 %¹⁴ verbessert zu werden (SIK). Statt den erhaltenen

¹⁴ Die Verbesserung des QVW durch das Anbringen von SIK auf Holzschwellen wurde bisher nur im Labor [17] nachgewiesen. Hierbei wurde allerdings keine Vergleichsmessung mit Holz-

10,0 N/mm sollten demzufolge 14,6 N/mm gemessen werden. Wird der Wert von 10,0 N/mm allerdings mit den vollständig konsolidierten QVW der Holzschwellen in Völs und im Ötztal verglichen, so ist der Nutzen der SIK direkt erkennbar. Somit konnte im Brazer Bogen mithilfe der SIK der trotz Einsatz des DGS noch vorhandene vorübergehende Verlust der Stabilität durch das Stopfen weitgehend ausgeglichen werden. Nach erfolgter Konsolidierung der Schwellen liegt der Bogen mit 21,6 N/mm in einer sehr stabilen Lage.

Die Messungen der Buchenschwellen in Völs und im Bereich der Ötztaler Ache zeigen eine gute Übereinstimmung. Die weniger befahrenen, dafür aber im Kofferprofil mit Schotterkörnung 2 liegenden Schwellen in Völs zeigen einen gering höheren QVW als die auch vollständig eingefahrenen Schwellen im Ötztal.

QVW bei 2mm Verschiebung [N/mm], gemessen		Soll nach Literatur [N/mm]	Abweichung [%]
QVW Braz Bogen, Bu1, vollständig konsolidiert, feucht	13,9	7,1	+95%
QVW Braz Bogen, Bu1, SIK nach Stopfen und DGS	10,0	8,5	+19%
QVW Braz Bogen, Bu1, SIK, vollständig konsolidiert	21,6	10,4	+207%
QVW Völs, Bu1, vollständig konsolidiert, Kofferprofil, Schotter 1	10,9	8,5	+28%
QVW Ötztaler Ache, Bu1, vollständig konsolidiert	10,8	8,0	+35%
QVW Landeck, Bu1, vollständig konsolidiert	10,7	8,0	+34%
QVW Landeck, Bu1, nach Stopfen und DGS	5,0	5,7	-12%
QVW Ötztaler Ache, K1, besohlt, vollständig konsolidiert	29,1	18,0	+62%
QVW Westendorf, K1 unbesohlt, vollständig konsolidiert	26,2	15,0	+75%
Literaturwert Bu1, vollständig konsolidiert		8,0	
Stopfen (-50%)		4,0	
Literaturwert Bu1, gestopft, DGS		6,5	
Einbau von SIK (Labor +30%)		10,4	
Literaturwert K1, vollständig konsolidiert		15,0	
Besohlung bei Betonschwellen (+9% bis +17%)		18,0	
feuchter Oberbau (-11%) bei Betonschwellen		9,2	
QVW Messungen im Bogen (-4%, besohlt; 0%, unbesohlt)			

Tabelle 8: Vergleich der gemessenen Werte mit der Literatur (siehe Kapitel 3.1)

schwellen ohne SIK durchgeführt, sondern man hat sich auf die aus der Literatur bekannten Werte bezogen.

Beim Vergleich der beiden Betonschwellenmessungen ist erkennbar, dass auch hier die Werte für den QVW aus der Literatur deutlich geringer sind, als die im Betriebsgleis gemessenen Werte und insoweit, bezogen auf die Beurteilung der Gleislagestabilität, stark auf der sicheren Seite liegen. Der Einfluss der Besohlung ist mit 11 % ähnlich dem von Iliev im Labor ermittelten 9 – 17 %¹⁵ [18]. Die vorhandene Besohlung der Betonschwellen erhöht nicht nur den QVW, sondern verringert auch die Streuung der gemessenen Werte und vorhandene Hohllagen aufgrund der besseren Verzahnung der Schwellensole mit dem Schotterbett. Abbildung 44 verdeutlicht nochmals die starke Streuung der vorhandenen konsolidierten Messungen und die geringe Streuung direkt nach dem Stopfen.

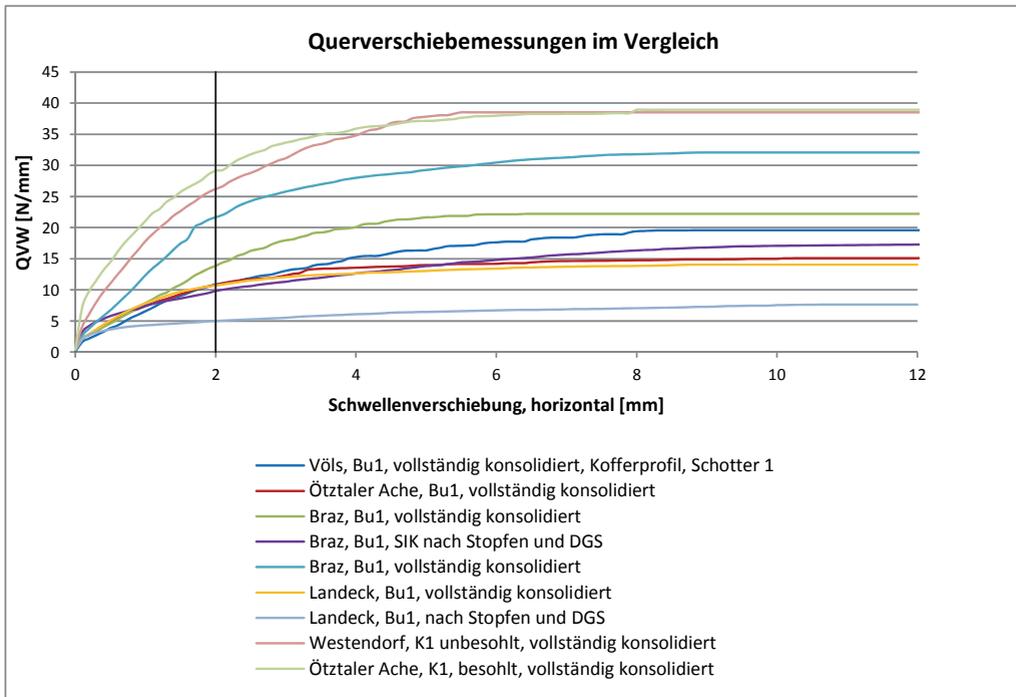


Abbildung 43: Querverschiebewiderstandsmessungen, Vergleich der Mittelwerte

¹⁵ Abhängig von der gewählten Besohlung

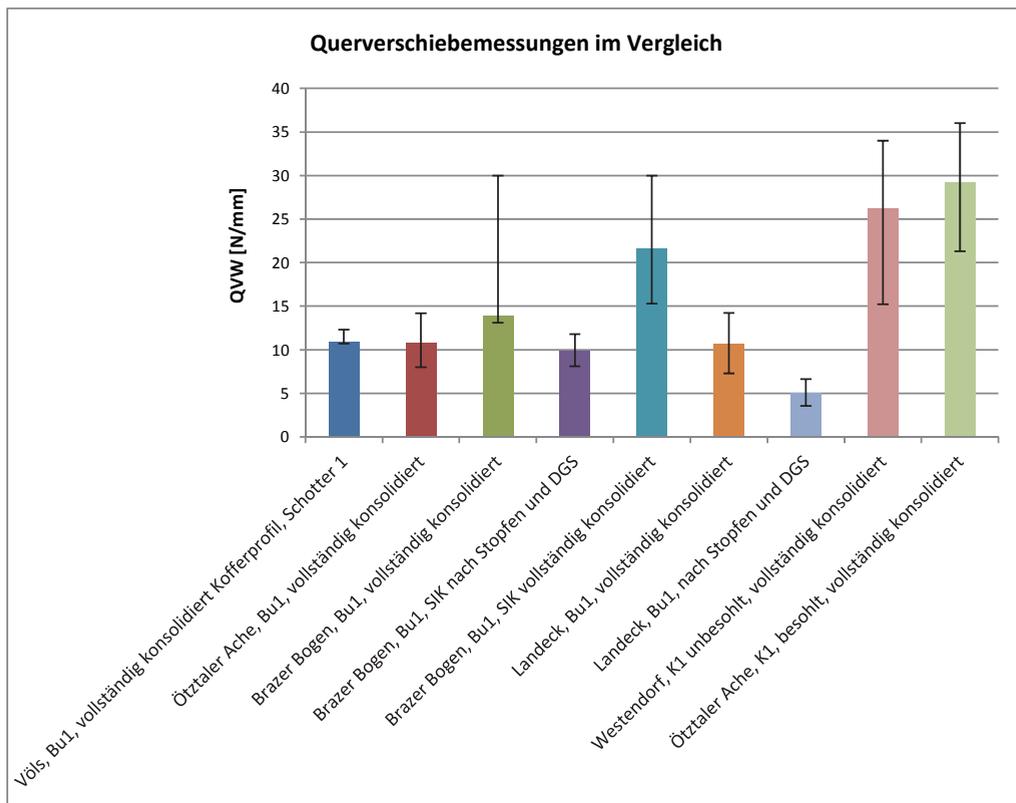


Abbildung 44: QVW-Messungen, Vergleich der Mittelwerte (bei 2 mm Verschiebung) mit den maximalen gemessenen Abweichungen¹⁶

¹⁶ Zum besseren Verständnis der hier dargestellten Boxplots sei auf die entsprechenden Erläuterungen im Anhang verwiesen

6.2 Schientemperatur und Bogenatmung: Dauermessung im Brazer Bogen

In den Jahren zwischen 2007 und 2014 hatte der Arbeitsbereich intelligente Verkehrssysteme - Eisenbahnwesen (ehemals Institut für Eisenbahnwesen und Öffentlichen Verkehr) bereits mehrere Bogenatmungsmessungen durchgeführt, welche im Forschungsbericht QL – Gleis und anderen Berichten mündeten [41], [5], [42], [43]. Hierbei wurden die so genannte Konzertkurve und die Kurve an der Rauchmühle in Innsbruck, sowie der Windauer Bogen und der Grieser Bogen genauer untersucht.

Neben den bereits beschriebenen Messungen des Querverschiebewiderstands wurde ab Sommer 2014 nun auch im Bereich Braz an der Messstelle bei km 128 der Arlbergstrecke die Bogenatmung untersucht. In diesem Zusammenhang wurden bei den Messungen auch die Luft- und Schientemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit erfasst.

Da hier kein Nachbargleis vorhanden ist, der Bogen nicht verschattet auf einem Damm liegt, die Steigung mit 30 ‰ gleichbleibend ist und keine Durchlässe, Weichen oder andere Unstetigkeiten vorhanden sind, herrschen bezüglich der Örtlichkeit gute Messbedingungen vor.



Abbildung 45: Luftbild des Brazer Bogens - Quelle: Google Maps

Der Oberbau des eingleisigen Brazer Bogens (Gleisbogen mit $R = 249,5$ m und einer durchgehenden Überhöhung von 120 mm bei einer Länge von 380 m) bestand bis zum Herbst 2014 aus Schienen der Güte R 260, 49E1 (2010) alle 30 m verlascht, mit Buchenschwellen 1 aus dem Jahr 2000 bei einem Schwellenabstand von 600 mm und dem Einsatz von Rippenplatten (Rph) mit Spannklemmen (SKL). Im Herbst 2014 (am 05.09.2014) wurden - wie bereits erwähnt - zur Kompensation eines zu erwartenden vorübergehenden Rückgangs bei den Werten des QVW in Folge der Durcharbeitung des Gleises zusätzlich Sicherungskappen (SIK 6) an jeder Schwelle auf der Bogeninnenseite angebracht. Während der Arlbergsperrung vom 29.09.2014 – 10.10.2014 wurde schließlich das bisherige Stoßlückengleis im Bogen ohne ein Tauschen der Schienen durchgehend verschweißt.

Der Gleisabschnitt wurde bis zum Umbau von Zügen des Typs 'RailJet' mit einer verringerten Geschwindigkeit von 60 km/h, von allen übrigen Zügen mit 70 km/h befahren. Nach dem Umbau auf LV-Gleis wurde die Geschwindigkeit generell mit $V_{ZG} = 70$ km/h festgelegt. Die Belastung durch den Zugverkehr betrug gut 13 Mio GBT im Jahr 2013 und wird bis 2025 mit 20,2 Mio GBT/Jahr prognostiziert. [44]

6.2.1 Messperioden für die Dauermessung

Die Messungen an der Dauermessstelle im Brazer Bogen wurden entsprechend der Art der Auswertung und des veränderten Oberbaus in vier Messperioden unterteilt:

- 1 Messung vom 17.07.2014 – 05.09.2014 (gut eingefahrenes Holzschwellengleis, Stoßlücken, stark streuender QVW mit einem auf der sicheren Seite liegenden Wert von 13,9 N/mm)
- 2 Messung vom 08.09.2014 – 29.09.2014 (teilweise aufgelockertes Holzschwellengleis mit SIK und Stoßlücken, QVW bei 10,0 N/mm)
- 3 Messung vom 10.10.2014 – 28.04.2015 (gestopftes und stabilisiertes Holzschwellengleis mit SIK, durchgehend verschweißt, Wintermonate)
- 4 Messung vom 29.04.2015 – 15.07.2015 (über den Winter gefestigtes Holzschwellengleis mit SIK, durchgehend verschweißt, Sommermonate)

Die Messeinrichtung wurde bis zum 17.07.2014 aufgebaut. Am 05.09.2014 wurden die Holzschwellen des noch verlaschten Bogens mit SIK auf der Innenseite ausgestattet. Zu diesem Zeitpunkt fanden auch die ersten QVW Messungen im Bogen statt (siehe Kapitel 6.1). Am 29.09.2014 wurde die Messstation für die Dauer des durchgehenden Verschweißens und Stopfens außer Betrieb genommen und bis zum 10.10.2014 vorübergehend ausgebaut. Seit dem erneuten Einbau am 10.10.2014 erhebt die Messstation bis zum Ausbau wieder Daten.

Aufgrund des ungewöhnlich nassen und verregneten Sommers 2014 und anfänglichen Problemen in der Steuerung konnten anfangs nur wenige signifikante Daten erhoben werden. Gewünscht gewesen wären einzelne, sehr trockene und heiße Tage mit hohen Schienentemperaturen.

6.2.2 Bestandteile und Aufbau der Messstation

Für die Erfassung der Bogenatmung wurde jeweils die Relativbewegung des Gleisrostes (bzw. einer Schwelle) zu den benachbarten Oberleitungsmasten gemessen. Fünf Oberleitungsmasten im Bereich der Bogenmitte wurden als Widerlager genutzt und einer davon diente auch zur Befestigung der Photovoltaik-Paneele sowie der Wetterstation. Die autarke Stromversorgung mittels Solarenergie wurde durch die abgechiedene Lage von der nächsten verfügbaren dauerhaften Stromquelle notwendig, da sonst Kabellängen über 2 km erforderlich gewesen wären.

Da die Stromversorgung durch die Photovoltaik mit zwei Puffer-Akkus in den Wintermonaten für durchgehende Messungen nicht ausreicht (im November trifft durch die Tallage auch bei Sonnenschein nur ca. 1,5 h Sonnenlicht pro Tag auf die Messstelle), wurden hier bestimmte Zeitabschnitte ausgewählt. Es wurde auf eine Aufzeichnung

der Schienenspannungen verzichtet, da die hierfür nötigen Spannungswandler die Akkus zusätzlich belastet hätten (zu hoher Stromverbrauch).

Die Wahl der Oberleitungsmasten als Widerlager für die Messungen erwies sich als ausreichend genau, da die tatsächlich auftretenden Mastschwingungen im Bereich der Messungenauigkeiten liegen und die Überfahrten der Züge keine störenden Erschütterungen hervorrufen¹⁷.



Abbildung 46: Messbasis mit Messkiste, Stromversorgung und Wetterstation für Verschiebemessung

Die Messstäbe wurden nicht aus Carbon oder anderen nahezu temperaturunempfindlichen Baustoffen, sondern aus Stahl gewählt. Da deren Materialeigenschaften bekannt sind und die Temperaturendehnungen bei den hier vorliegenden Längen von 1,5 m bei einer maximalen Temperatur (Schiene $\Delta T \approx 50$ K) lediglich bei 0,9 mm liegen, konnten die aus anderen Messungen vorhandenen Messstangen genutzt und deren Ausdehnung in den Auswertungen berücksichtigt werden. Die Messstangen wurden in der verlängerten Achse der Schwellen angebracht, sodass eine Verfälschung des Ergebnisses durch Vertikaleinsenkungen der Schwelle minimalisiert wurde (bei einer vertikalen Einsenkung von 10 mm entspräche dies einem theoretisch gemessenen horizontalen Weg von 0,03 mm).

¹⁷ vgl. dazu Abbildung 109 auf S. 123



Abbildung 47: Messstange für Verschiebemessung



Abbildung 48: Messbasis für Verschiebemessung

Da durch die im Schotterbett liegenden Schwellen eine Längsdehnung der (verschraubten) Schienen behindert wird (LVW), entstehen Schienenlängsspannungen. Um diese zu ermitteln, wird die Querdehnung der Schiene gemessen und mit deren Hilfe auf die behinderte Schienenlängsspannung zurück geschlossen. Die aktiven DMS der DMS-Vollbrücken messen diese Querdehnung der Schiene.

Im ersten Teil der Messungen wurden zwei DMS- Messstellen eingerichtet. Eine Vollbrücke wurde im Schwellenfach (DMS 1) neben einem Schienenstoß angebracht (siehe Abbildung 52 und folgende), die andere (DMS 2) 10 Schwellenfächer davon entfernt, ein Schwellenfach neben dem Wegaufnehmer 13 und der Schienentemperaturmessung. (vgl. Abbildung 50)

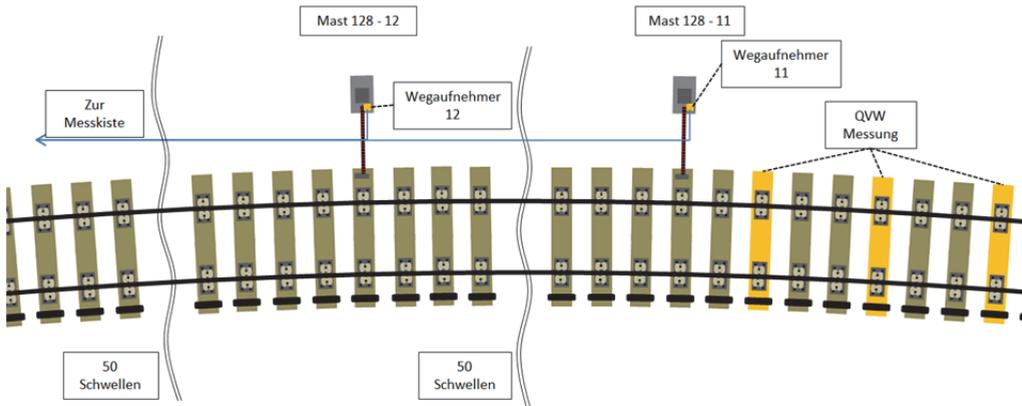


Abbildung 49: Skizze Bogenatmungsmesstelle Mast 11 und Mast 12 (Situation am 05.09.2014)

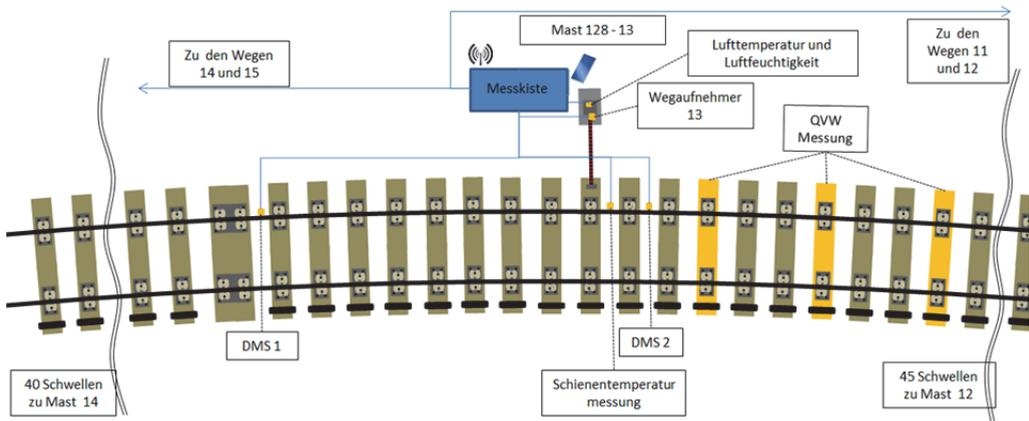


Abbildung 50: Skizze Bogenatmungsmesstelle Mast 13 (Situation am 05.09.2014)

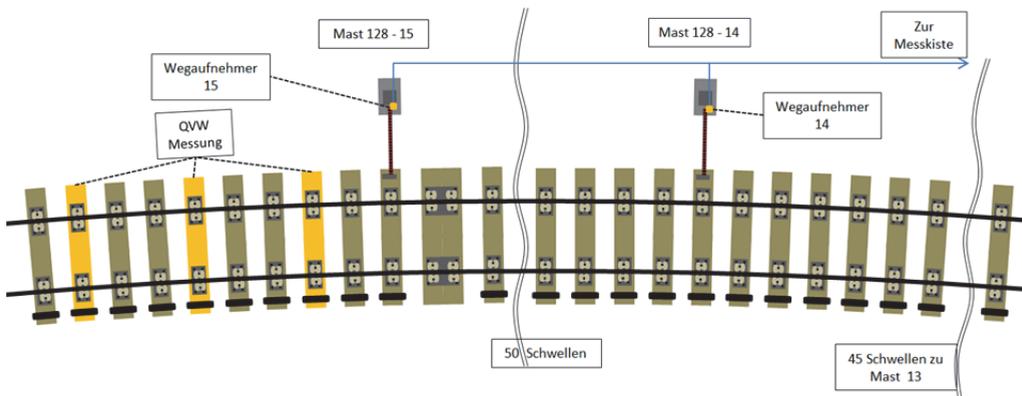


Abbildung 51: Skizze Bogenatmungsmesstelle Mast 14 und Mast 15 (Situation am 05.09.2014)

Nach dem Umbau und dem durchgehenden Verschweißen wurde der DMS 1 nicht mehr benötigt. Die Lagen sowohl des DMS 2 als auch der Schientemperaturmessung sind durch ein Verziehen der Schienen an eine andere Stelle (8 Schwellenfächer entfernt von der Wegmessung 13) gerückt.

Die Dehnmessstreifen des Typs 1-LY61-6/120 (Firma HBM) wurden als Vollbrücken in der Nulllinie der Schiene appliziert und vor Witterungseinflüssen (z.B. Feuchtigkeit) geschützt. Um die temperaturinduzierten Spannungen zu kompensieren, wurden zwei DMS auf einer separaten Platte am Schienensteg appliziert. Diese messen nur die unbehinderten Dehnungen aus der Temperatur der Schiene und deren Signale werden sodann herausgerechnet.



Abbildung 52: Applikation der DMS mit Temperaturkompensationsplatte

6.2.3 Verschaltung der Messstation

Als zentrales Element der (außer zu Wartungszwecken personell nicht besetzten) Dauermessstation wurde eine Messkiste installiert (vgl. Abbildung 46). In dieser wurde ein midi LOGGER GL820 der Firma Graphtec verbaut, sowie ein GSM-Modem. Mit Letzterem ist das Abrufen der Daten und die Steuerung der Station über das Handy-Netz/Internet jederzeit möglich, solange es mit Strom versorgt wird. Für bestimmte Ereignisse (Versorgungstromabfall, Temperaturüberschreitungen) wurde ein Alarm eingestellt, welcher eine E-Mail mit der nötigen Information generiert, damit auf Störungen rasch reagiert werden kann. Zusätzlich wurde darauf geachtet, dass die Messvorrichtung ohne großen Umbau auch an Orten mit dauerhafter Stromversorgung einsetzbar ist. Die Messkiste wurde versperrt und gesichert. Ihre Öffnungen wurden mit Gittern versehen, um das Eindringen von Nagetieren zu verhindern. Des Weiteren wurde ein Lüfter in die Messkiste eingebaut, um bei zu hohen Temperaturen die Gerätschaft etwas abkühlen zu können.

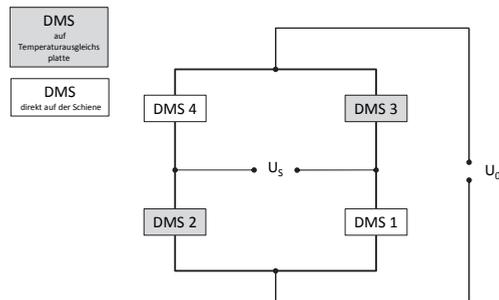


Abbildung 53: Blick in die Messkiste der Bogenatmungsmessstelle und Schaltung der DMS

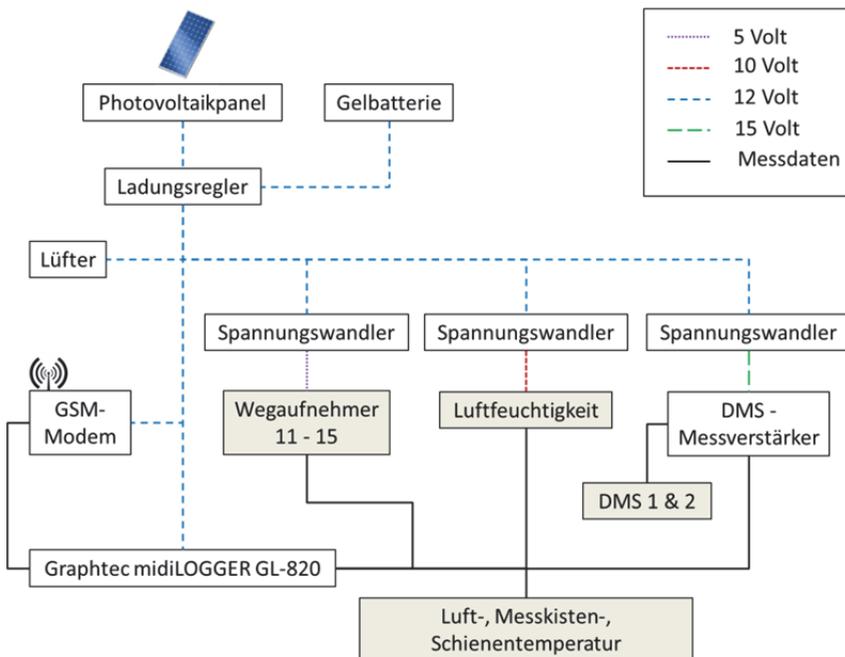


Abbildung 54: Skizze des Messaufbaus (Brazer Bogen)

Durch den Einsatz verschiedener Messgeräte wurden drei Spannungswandler benötigt. Als Grundversorgungsspannung wurde 12 Volt gewählt, da sowohl der Lüfter als auch das Modem und der Datenlogger sowie die Temperatursensoren (Pt 100, Messgenauigkeit 0,03 °C bei 0 °C) hiermit versorgt werden konnten. Die potentiometrischen Wegtaster des Typs 8712 (Firma burster) benötigten eine separate Versorgung mit 5 Volt, der Luftfeuchtheitsmesser der HMP 35 A (Firma Vasila) benötigte 10 Volt. Die Signale der DMS wurden über Messverstärker Clip AE 101 (Firma HBM) an den Datenlogger geliefert. Diese Messverstärker benötigten 15 Volt.

6.2.4 Messverfahren und Messgrößen

Um einen gleichmäßigen Messablauf zu erhalten und Reserven zu sichern, wurden folgende Kanäle des GL 820 vergeben:

- Kanal 1: DMS 1 (im Bereich der Stoßlücke, Abschnitt 1 & 2) [N/mm²]
- Kanal 2: DMS 2 (im Bereich der Schienentemperaturmessung) [N/mm²]
- Kanal 3: DMS 3 (Reserve Kanal für mögliche Erweiterungen) [N/mm²]
- Kanal 4: Reserve
- Kanal 5: Reserve
- Kanal 6: Weg 11 [mm]
- Kanal 7: Weg 12 [mm]
- Kanal 8: Weg 13 [mm]
- Kanal 9: Weg 14 [mm]
- Kanal 10: Weg 15 [mm]
- Kanal 11: Lufttemperatur [°C]
- Kanal 12: Luftfeuchtigkeit [%]
- Kanal 13: Schienentemperatur [°C]
- Kanal 14: Reserve
- Kanal 15: Messkistentemperatur [°C] (Alarm 1)
- Kanal 16: Stromversorgung [V] (Alarm 2)

Die Daten wurden kontinuierlich im 10 Minuten Raster aufgenommen. An bestimmten Tagen wurde das Raster zur Überprüfung des Einflusses von Zugüberfahrten auf 200 ms verdichtet.

6.2.5 Messablauf

6.2.5.1 Messung vom 17.07.2014 – 05.09.2014

Diese Messreihe ist in Zusammenhang mit der QVW-Messung im Brazer Bogen am 05.09.2014 zu interpretieren (QVW 13,9 N/mm, siehe 6.1.1.3).

Im ersten Abschnitt der Messungen mussten, einerseits aufgrund der Kalibrierung der Messstelle, andererseits aufgrund des verregneten Wetters, viele Ausfälle der Messstation verkraftet werden. Diese Ausfälle der Messstation waren allerdings nicht von großer Bedeutung, da die interessanten und kritischen Bereiche der Bogenatmung stets bei hohen Temperaturen und Sonnenschein (d.h. guter Stromversorgung) eintre-

ten. Leider kann jedoch, wie zu sehen ist, keine hinreichend valide Aussage bezüglich der Schienenspannung nahe der Stoßlücke (DMS 1) erfolgen.

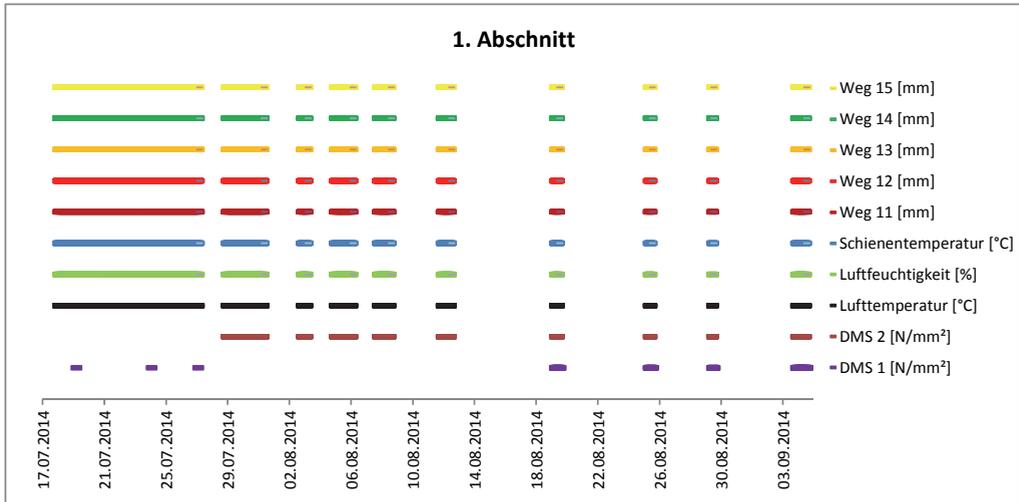


Abbildung 55: Messdaten 1. Abschnitt

6.2.5.2 Messung vom 08.09.2014 – 29.09.2014

Wie weiter oben erwähnt, wurden vor Beginn des zweiten Abschnitts der Messungen die Holzschwellen mit SIK 6 ausgerüstet und das Gleis durchgearbeitet. Die Stoßlücken blieben noch erhalten. Der gemessene QVW war bei 10,0 N/mm (siehe 0). In diesem Messabschnitt gab es keine Ausfälle der Messstation.

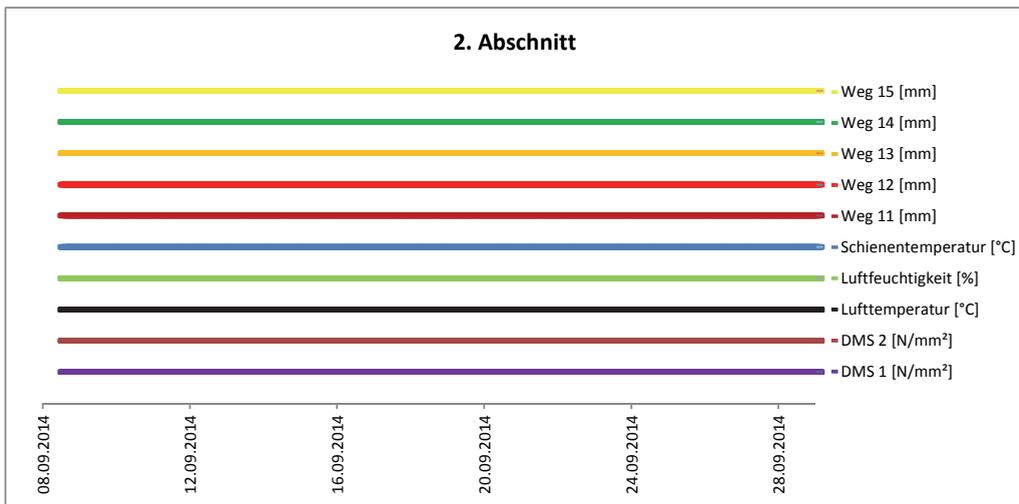


Abbildung 56: Messdaten 2. Abschnitt

6.2.5.3 Messung vom 10.10.2014 – 28.04.2015

Im Anschluss an die Arlbergsperrung wurde die Messstation am 10.10.2014 wieder in Betrieb genommen (dem nunmehr lückenlos verschweißten Gleis geschuldet, ohne DMS 1, welcher sich zuvor neben der Stoßlücke befunden hatte). Auch die Lage des DMS 2 und des Temperaturfühlers hatte sich durch das Verziehen der Schienen im Zuge der Schweißarbeiten um 8 Schwellen in Richtung Braz verschoben. Durch den im Winter tiefen Sonnenstand treffen, wie bereits erwähnt, in der kalten Jahreszeit teilweise nur 1-1,5 h Sonne zur Mittagszeit auf die Messstation, daher sind längere Ausfälle vorhanden. Zusätzlich wurde in den dunklen Wintermonaten aus Stromspargründen der DMS deaktiviert.

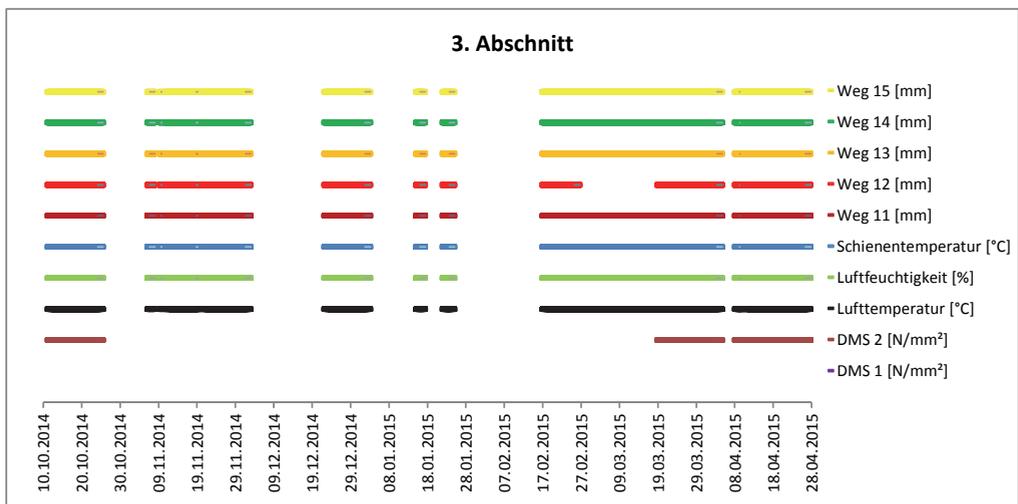


Abbildung 57: Messdaten 3. Abschnitt

6.2.5.4 Messung vom 29.04.2015 – 15.07.2015

Der vierte Abschnitt zeichnete sich durch sehr hohe Temperaturen über einen längeren Zeitraum aus. Da die QVW-Messungen im Brazer Bogen erst am 09.07.2015 stattfanden (21,6 N/mm²) und in diesem heißen Sommer europaweit viele Gleisverwerfungen auftraten (vgl. Abbildung 5 im Außerfern) wurde die Bogenatmung zur Mittagszeit in den Tagen zuvor genau beobachtet, um die Sicherheit zu gewährleisten. In diesem Zeitraum wurde die höchste Schientemperatur am Brazer Bogen mit max. 54,5 °C am 05.07.2015 um 15:00 Uhr gemessen.

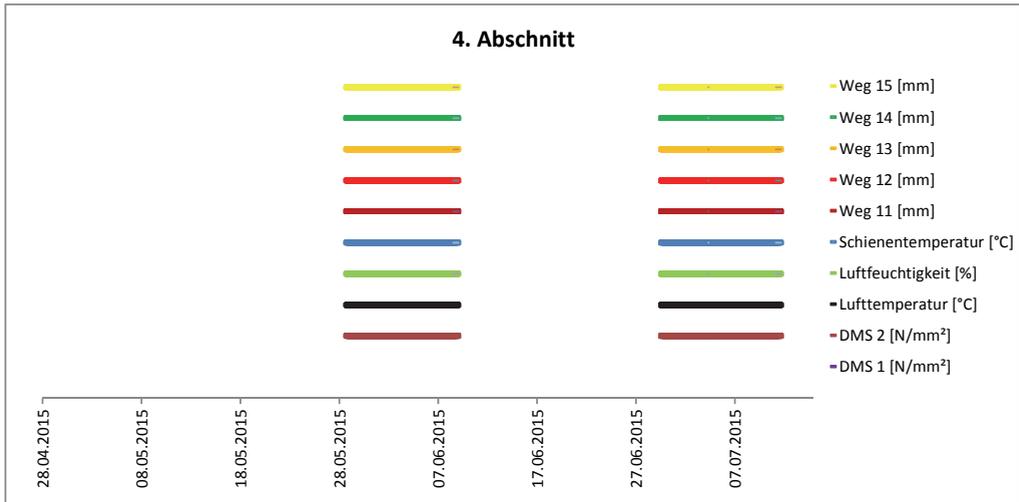


Abbildung 58: Messdaten 4. Abschnitt

6.2.6 Temperaturentwicklung

In den folgenden Abbildungen ist der Temperaturverlauf dargestellt. Hierbei wird in Abbildung 62 genauer auf das Temperaturverhalten des wärmsten Tages im ersten Abschnitt eingegangen. An diesem Tag lagen die höchsten gemessenen Schienentemperaturen um 15:10 Uhr bei 53,9 °C und die niedrigsten Temperaturen um 04:10 Uhr bei 15,2 °C. Die Schienentemperatur verhielt sich ähnlich den in Kapitel 5.2 erhaltenen Ergebnissen. In den Nachtstunden zwischen 01:00 Uhr und den ersten Sonnenstrahlen auf der Messstelle (ca. 09:00 Uhr) ist die Schienentemperatur durch vorhandenen Windchill etwas geringer als die umgebende Lufttemperatur (gemessen in ca. 2 m Höhe). Die Erwärmung der Schiene am Vormittag geschieht deutlich schneller als deren Abkühlung am Nachmittag. An diesem Messtag war die Luftfeuchtigkeit fast dauerhaft unter 50 %, was auf einen trockenen Sommertag hinweist, gerade auch im Vergleich zu Abbildung 61, in welcher im weiteren Messverlauf deutlich erkennbar ist, dass es sich um meist feuchte Tage handelte. Auf den Verlauf und die Abhängigkeit der Schienentemperatur zur Lufttemperatur wurde in Kapitel 5.2 eingegangen.

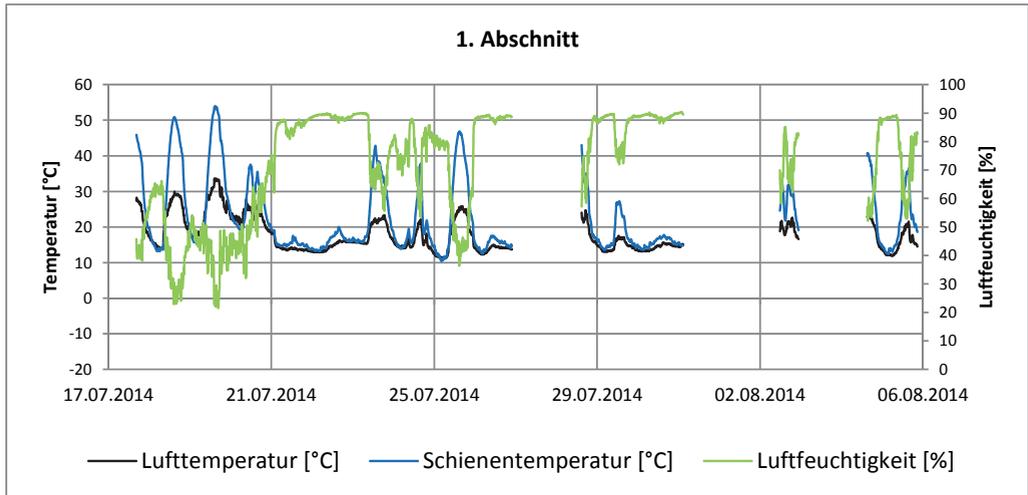


Abbildung 59: Wettersituation 17.07.2014 - 06.08.2014 (1. Abschnitt)

In voranstehender Abbildung ist erkennbar, dass die Messstation nicht dauerhaft Daten aufgezeichnet hat. Der 19.07.2014 sticht durch seine niedrige Luftfeuchte und gleichzeitig hohen Temperaturen hervor. Die Tage vom 21.07.2014 bis 23.07.2014 waren verregnet und weisen daher keinen merklichen Temperaturanstieg auf.

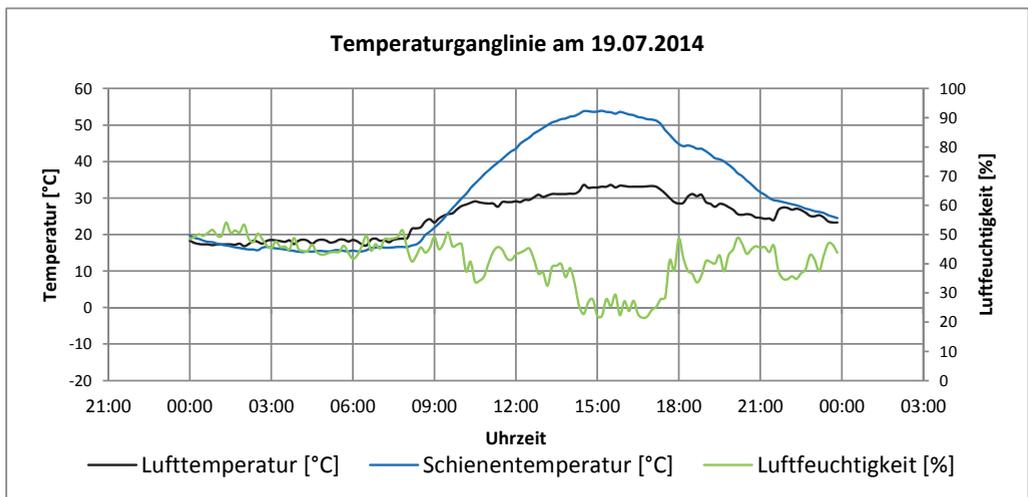


Abbildung 60: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 19.07.2014

Im zweiten Betrachtungszeitraum war die Luftfeuchtigkeit stets hoch und die Schientemperaturen erreichten an nur zwei Tagen knapp die 50 °C, hiervon wird der 17.09.2014 genauer betrachtet.

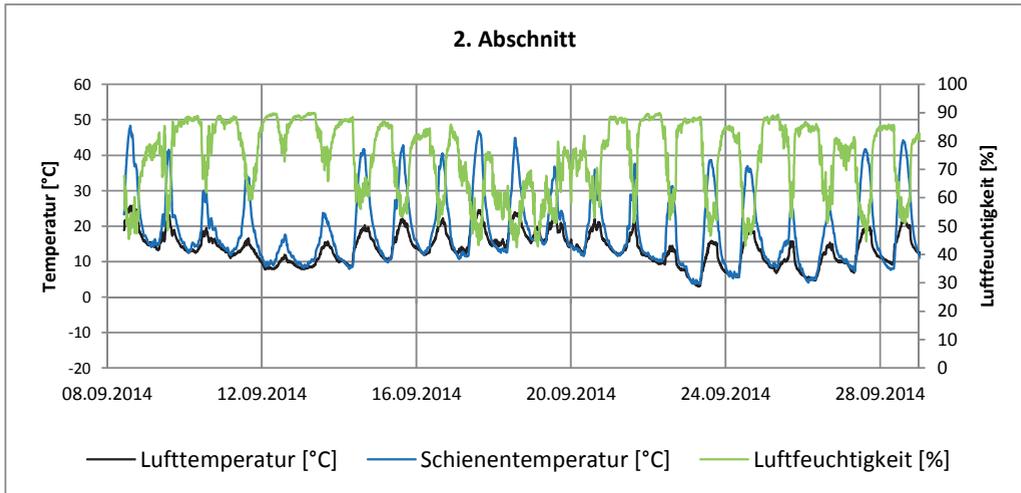


Abbildung 61: Wettersituation 2. Abschnitt

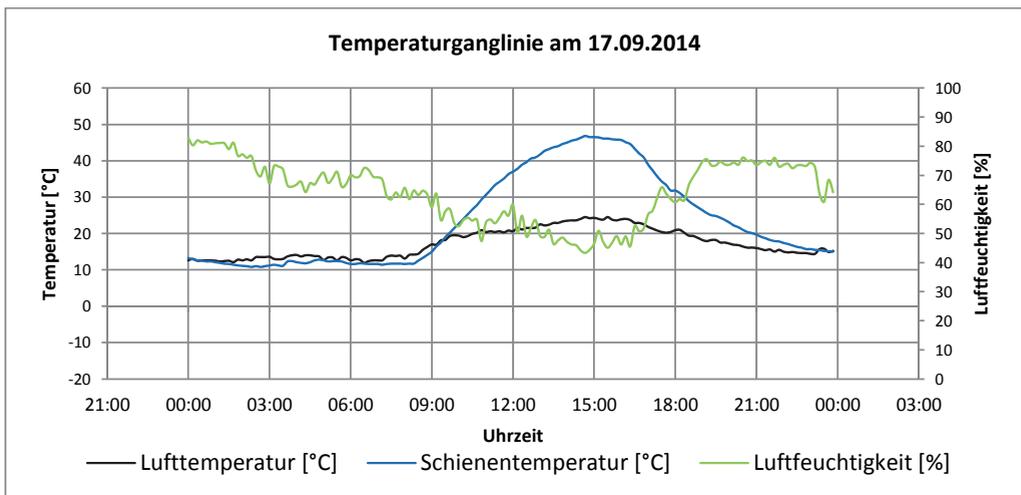


Abbildung 62: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 17.09.2014

Für den dritten Abschnitt der Messungen wird aus Lesbarkeitsgründen der Abschnitt vom 16.02.2015 bis 28.04.2015 herausgegriffen. Dieser Zeitraum stellt sich als zweigeteilt dar. Zuerst mit vorwiegend hoher Luftfeuchtigkeit und geringen Luft- und Schienentemperaturen und danach mit geringerer Luftfeuchte und höheren Temperaturen. Die maximale Schienentemperatur in diesem Abschnitt beträgt dennoch nur 44 °C (15.04.2015).

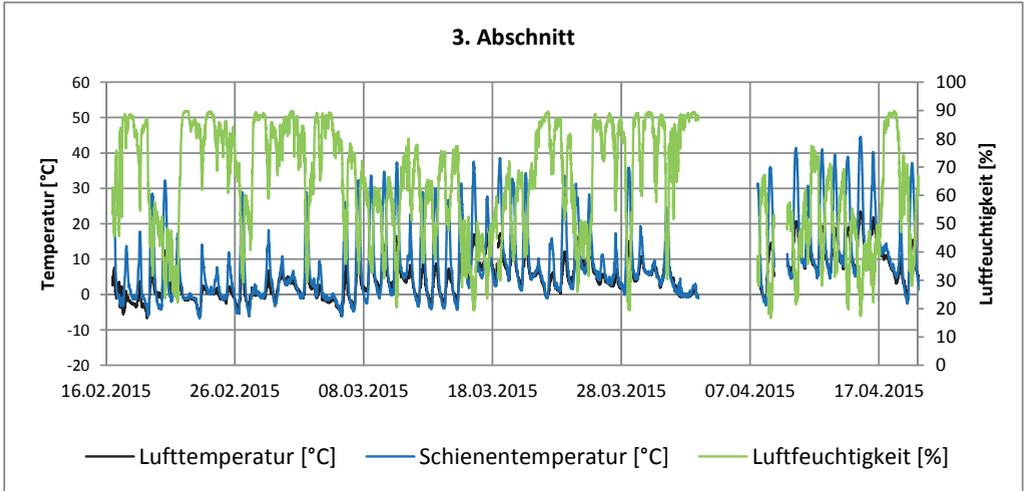


Abbildung 63: Wettersituation 16.02.2015 – 19.03.2015 (3. Abschnitt)

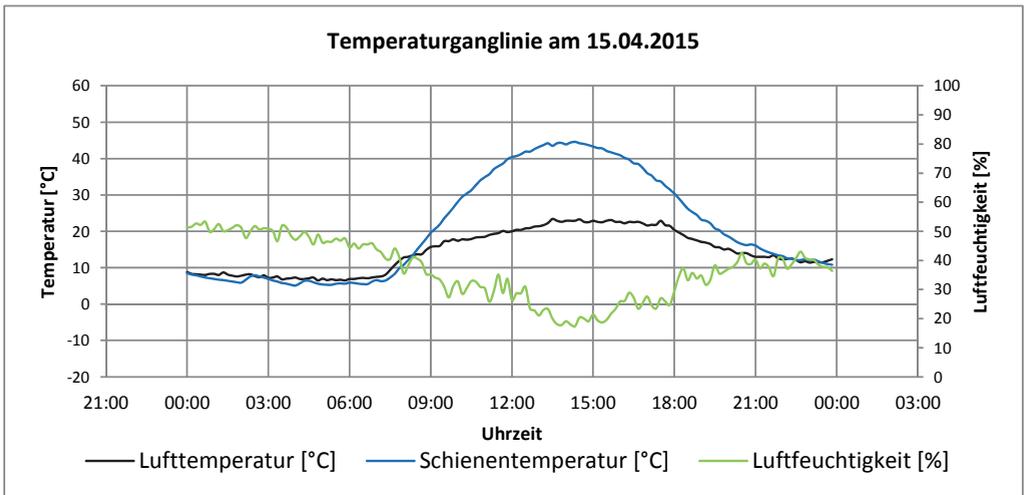


Abbildung 64: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 15.04.2015

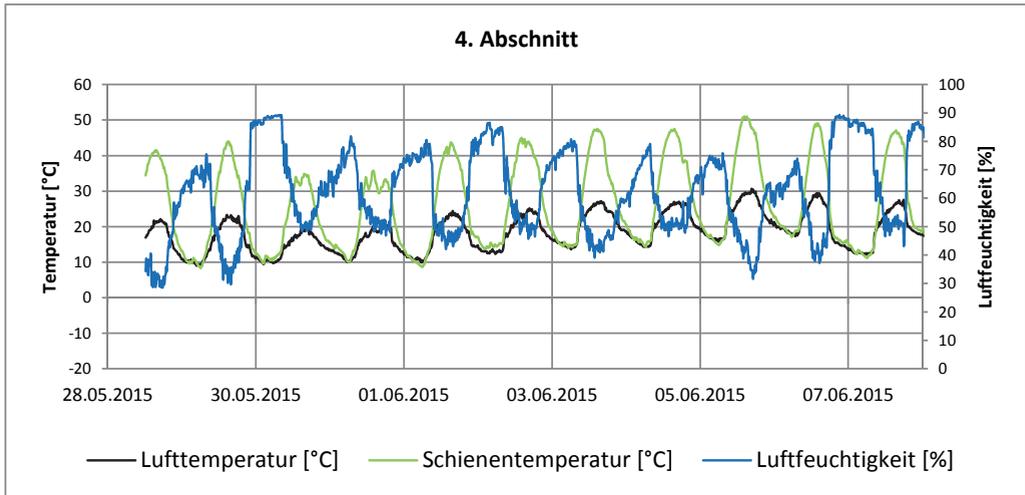


Abbildung 65: Wettersituation 4. Abschnitt

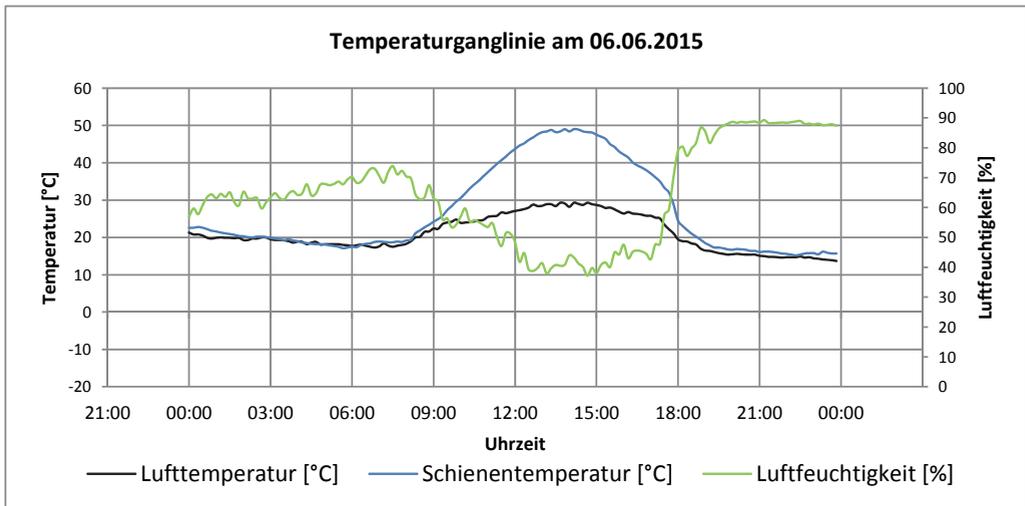


Abbildung 66: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie am 06.06.2015

Die Verteilung und Entwicklung der Luft- und Schienentemperaturen sind auch in den folgenden Boxplots dargestellt¹⁸.

¹⁸ Eine Zeichenerklärung zur Darstellung der Boxplots findet sich im Anhang unter Abbildung 155.

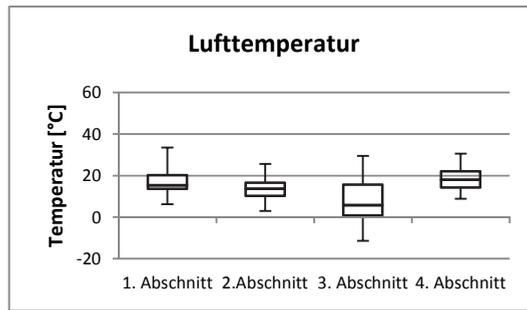


Abbildung 67: Lufttemperaturmessungen Braz, alle Abschnitte

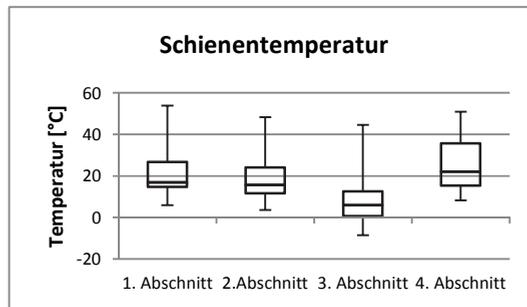
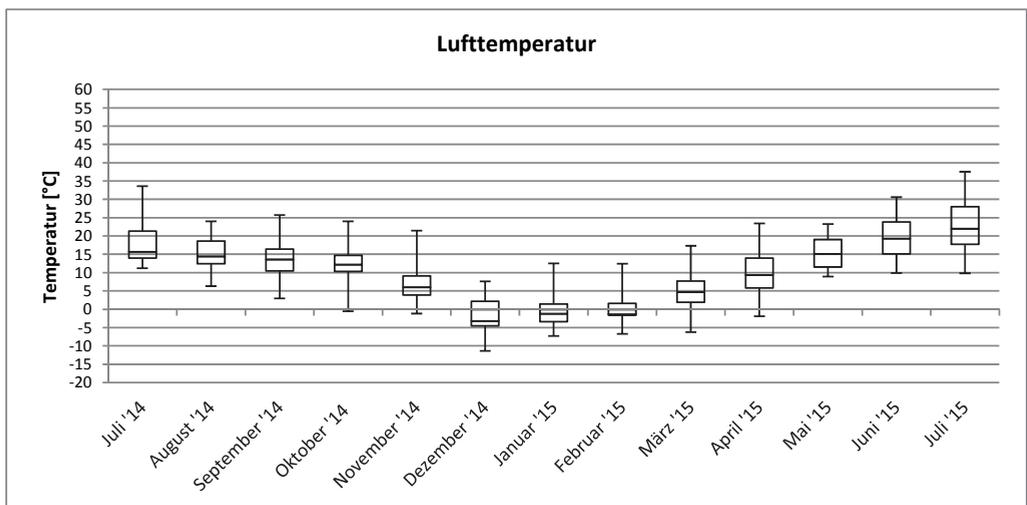


Abbildung 68: Schienentemperaturmessung Braz, alle Abschnitte

Abbildung 69: Lufttemperaturentwicklung, Brazer Bogen¹⁹

¹⁹ Im Mai 2015 wurden nur 3 Tage messtechnisch erfasst.

Wie zu erwarten ist, nahmen die Luft- und die Schienentemperatur in den Wintermonaten (3. Abschnitt) deutlich ab, jedoch sind aufgrund der möglichen warmen Tage im Frühjahr mit bereits stärkerer Sonneneinstrahlung Schienentemperaturen bis über 40 °C erreicht worden. Unabhängig davon wurde die maximale Streuung der gemessenen Schienentemperaturwerte um 50 °C nicht überschritten. Da aufgrund der erwähnten Wetter- und Kalibrierungsprobleme im August 2014 nur wenige (nasse) Tage erhoben wurden, sind die Temperaturen für diesen Monat insgesamt zu gering.

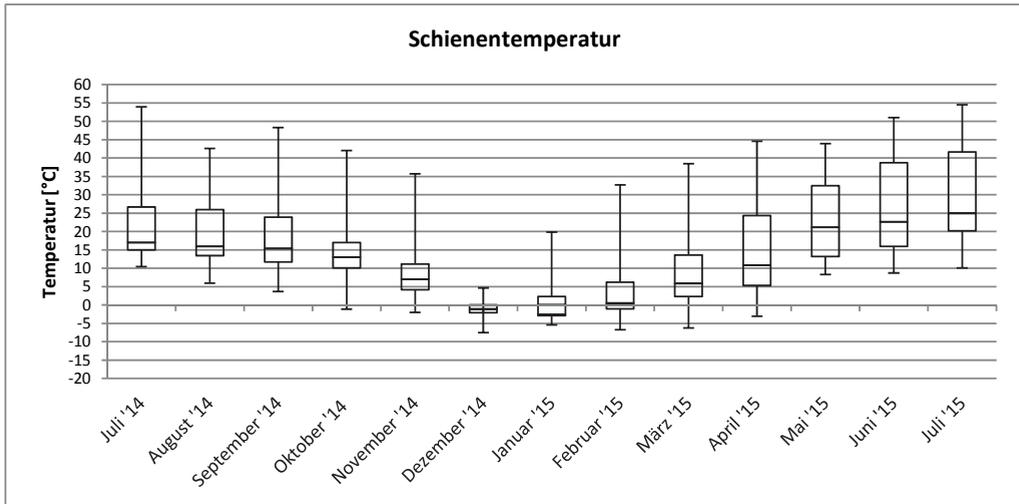


Abbildung 70: Schienentemperaturentwicklung Braz¹⁹ (siehe vorherige Seite)

6.2.7 Schienenspannung und Schienentemperatur

Durch Einflüsse wie Zugüberfahrten, bremsende Züge usw. werden Kräfte in die Schiene eingebracht. Im Stoßlückengleis auf Bergstrecken bewirken diese Kräfte über einen längeren Zeitraum das Wandern der Schienen in Talrichtung. Die Stoßlücken vor Fixpunkten werden dabei überdrückt und sind anschließend dauerhaft geschlossen. Daher werden auf solchen Streckenabschnitten die Schienen in einem regelmäßigen Abstand wieder ausgerichtet und bergauf gezogen.

Im LV-Gleis wird das Schienenwandern unterbunden. Hier ist ein Abwandern der Schienenlängsspannungen aus der freien Strecke hin zu Fixpunkten zu beobachten. Um diese Spannungen zerstörungsfrei zu erfassen, wurden im Brazer Bogen die bereits erwähnten beiden DMS Vollbrücken installiert. Die damit gemessenen Daten geben allerdings keinen Aufschluss über die absoluten Schienenspannungen (hierfür wäre z.B. ein Aufschneiden der Schiene notwendig). Es können lediglich die relativen Schienenspannungen, also die Veränderung des Spannungsniveaus gemessen werden. Um eine Vergleichbarkeit zu erhalten, wurde bei der Auswertung davon ausgegangen, dass beim Einbau der Stoßlücken normgerecht die Stoßlücke bei 30 °C Schienentemperatur geschlossen ist [45], sowie die Schienen beim Herstellen der durchgehenden Schweißung bei 25 °C keine Längsspannungen hatten [2].

In den folgenden Diagrammen sind jeweils die relative Bewegung des Gleisrostes und die Schienentemperatur über der relativen Schienenspannung aufgetragen. Abbildung 71 zeigt dies für den DMS 1 (im Schwellenfach neben der Stoßlücke) für den 2. Messabschnitt. Die Verteilung der rel. Schienenspannungen zur Schienentemperatur ähnelt stark dem theoretischen Verlauf der Schienenspannungen in einer Stoßlücke (Abbildung 73). Der Bereich ab einer Schienenspannung von ca. 13 N/mm² zeigt das Verhalten des Stoßgleises bei geschlossener Stoßlücke.

Über die vorhandene Streuung der rel. Schienenspannungen im Bereich < 13 N/mm² kann auf den Laschenwiderstand rückgeschlossen werden. Unter Verwendung der Formel (6-1), einer vorhandenen Schienenlänge von 30 m, Zug- und Druckspannungen von insgesamt 151008 N (=24 N/mm² * A_{Schiene}) und einem angenommenen LVW von 6,8 N/mm pro Schiene ergibt sich im vorliegenden Fall ein Laschenwiderstand von nur 24,5 kN (Normwerte zwischen 50 und 200 kN [12])). Dies könnte auf gelockerte Laschenschrauben und eine ungenügende Stoßpflege zurückgeführt werden. Im Bereich der geschlossenen Stoßlücke müsste theoretisch aufgrund der steigenden Schienentemperatur (z.B. bei 45 °C um 15 °C) nach Formel (2-2) die rel. Schienenspannung 37,8 N/mm² erreichen. Die hier gemessenen Schienenspannungen liegen bei ca. 33 N/mm², die Bogenatmung von 1 mm reduziert die Schienelängsspannung nur um 0,8 N/mm². Die erhaltenen Messergebnisse stimmen somit gut mit der Theorie überein.

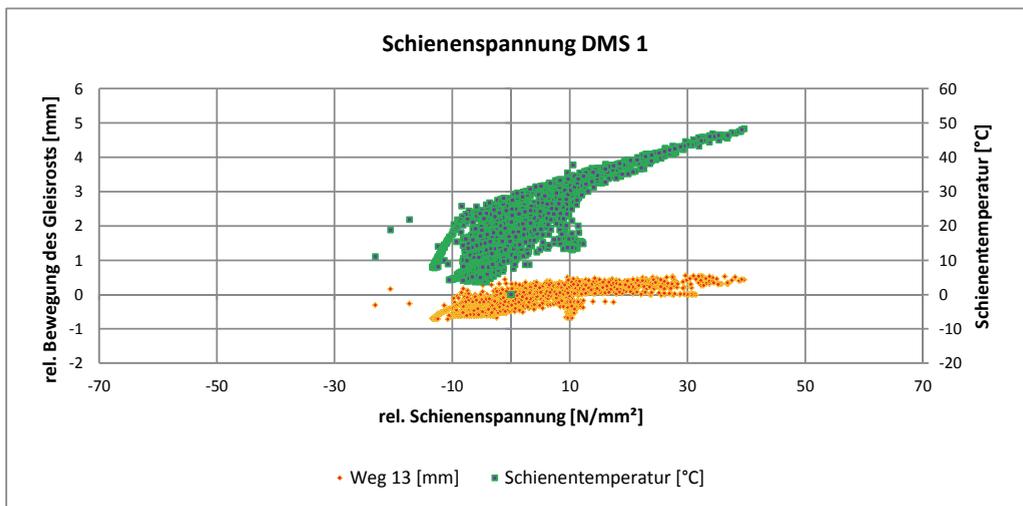


Abbildung 71: Schienenspannungen (DMS 1) vom 08.09.2014 – 29.09.2014

DMS 2 (Abbildung 72) zeigt im Verhältnis zu DMS 1 (Abbildung 71) eine größere Streuung der rel. Schienenspannungen (siehe auch Abbildung 79). Diese entsteht durch den Abstand von 10 Schwellenfächern zur Messstelle der Bogenatmung und dem entlang dieser Strecke bereits aufgebauten Durchschubwiderstand von 15 – 30 kN/ Schienenaufleger [12].

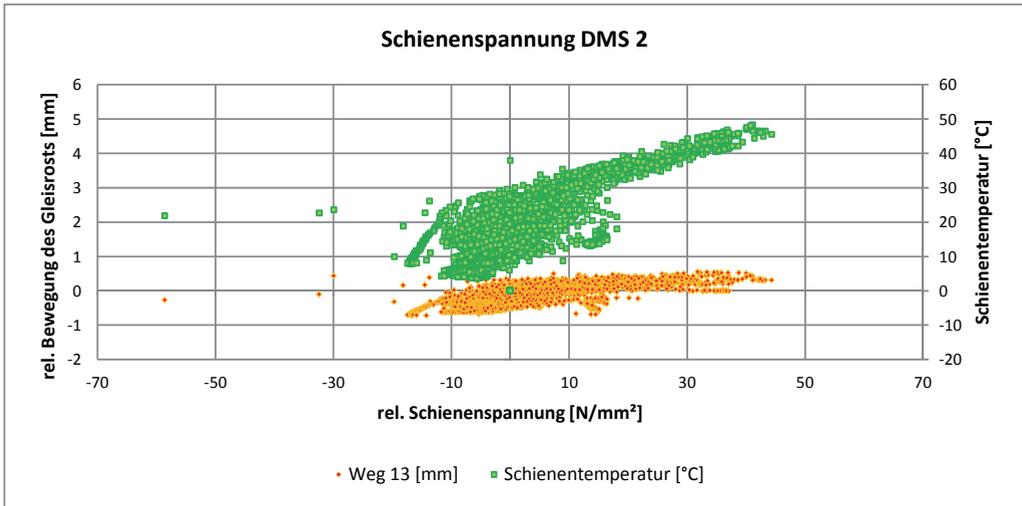


Abbildung 72: Schienenspannungen (DMS 2) vom 08.09.2014 – 29.09.2014

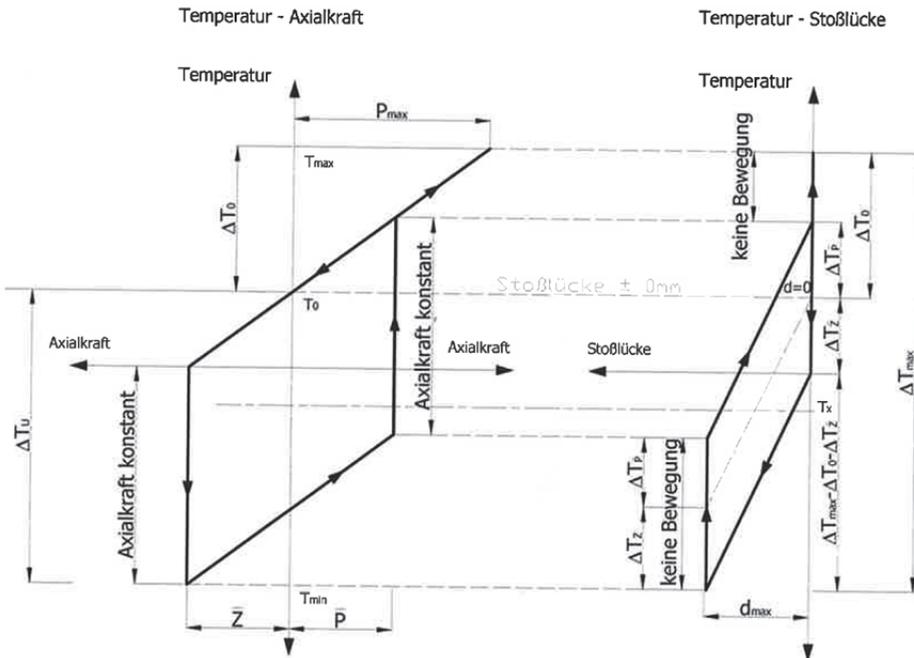


Abbildung 73: Theoretischer Kräfteverlauf im Stoßlückengleis [8]

Formel zur Berechnung der Widerstandskräfte [8]:

$$\bar{P} = \bar{Z} = L + p * \frac{l}{4} \quad (6-1)$$

Mit:

- $\bar{P} = \bar{Z}$: nötige Druck und Zugkräfte
 L: Laschenwiderstand
 p: Längsverschiebewiderstand (1,7 facher QVW (ohne SIK) [18])
 l: Schienenlänge

Die folgenden Diagramme zeigen die rel. Schienenspannungen für den Abschnitt 3 (einmal im Herbst und einmal im Frühjahr) sowie den Abschnitt 4. Auch hier tragen die kleinen Gleisrostbewegungen nur zu einer sehr geringen Schienenspannungsreduktion bei. Unter der theoretischen Annahme einer Erwärmung von 15 °C müsste wiederum eine Schienenspannungszunahme von 37,8 N/mm² folgen. Im Herbst 2014 (Abbildung 74) ist dies mit gemessenen 38 N/mm² sehr genau erreicht, wohingegen im Frühjahr nur mehr 30 N/mm² gemessen wurden (Abbildung 75). Dies zeigt die schon beschriebene Verflüchtigung der vorhandenen Schienenspannungen. Die theoretische Verschweißtemperatur ist somit durch die Belastung von 25 °C²⁰ auf 22 °C gesunken.

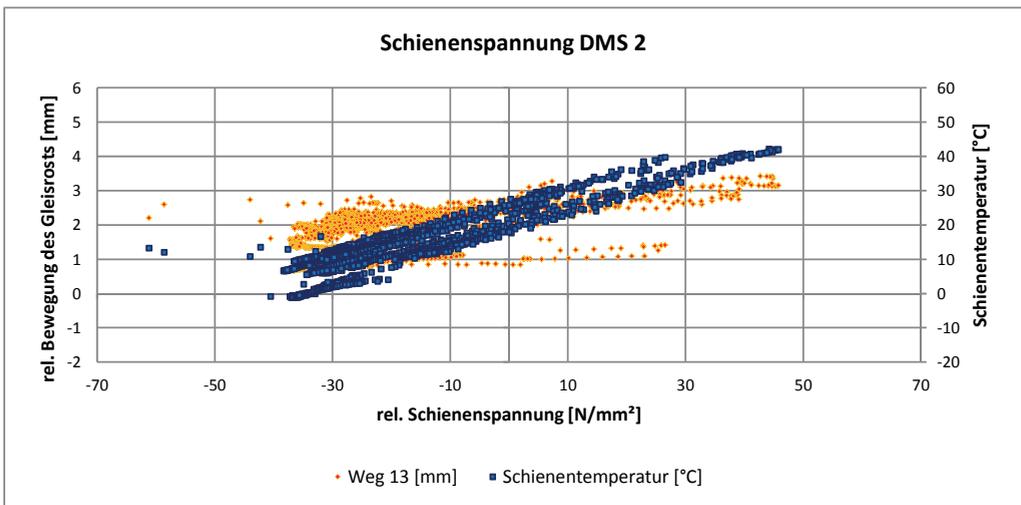


Abbildung 74: Schienenspannungen (DMS 2) vom 10.10.2014 – 29.10.2014

²⁰ Die Schluss-Schweißung beider Schienen bei km 128,656 fand am 10.10.2014 ohne Ziehgerät bei 25 °C Schienentemperatur statt. [64]

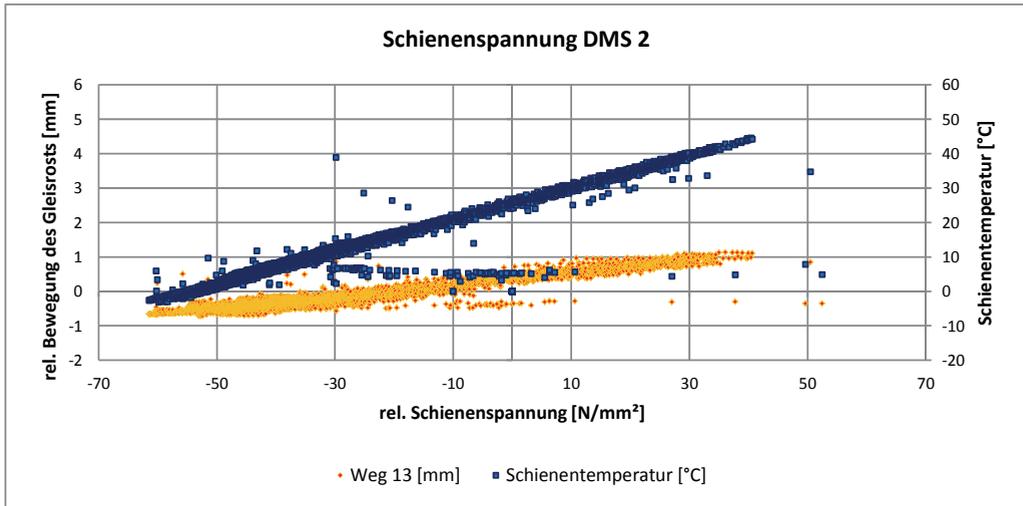


Abbildung 75: Schienenspannungen (DMS 2) vom 21.03.2015 – 22.04.2015

Im 4. Abschnitt vom 28.05.2015 bis 08.06.2015 verhalten sich die Schienenspannungen ähnlich den im Herbst gemessenen. Aufgrund der höheren Schienentemperaturen treten hier auch höhere Spannungen auf. Einzelne erfasste stark streuende Werte stehen unter dem Einfluss von Zugüberfahrten oder Gleiswartungsarbeiten. Da das Messraster mit 6 Messungen pro Stunde relativ gering war und einige grobe Ausreißer bereits herausgefiltert wurden, handelt es sich nur um eine geringe Zahl. Zusätzlich ist in Abbildung 76 die theoretische relative Schienenspannung nur infolge der Temperatureinwirkung nach Formel (2-2) aufgetragen. Erkennbar ist, dass die Bogenatmung nur unmerklich zur Reduzierung der Schienenspannungen beiträgt, da diese ansonsten einen steileren Verlauf haben müssten.

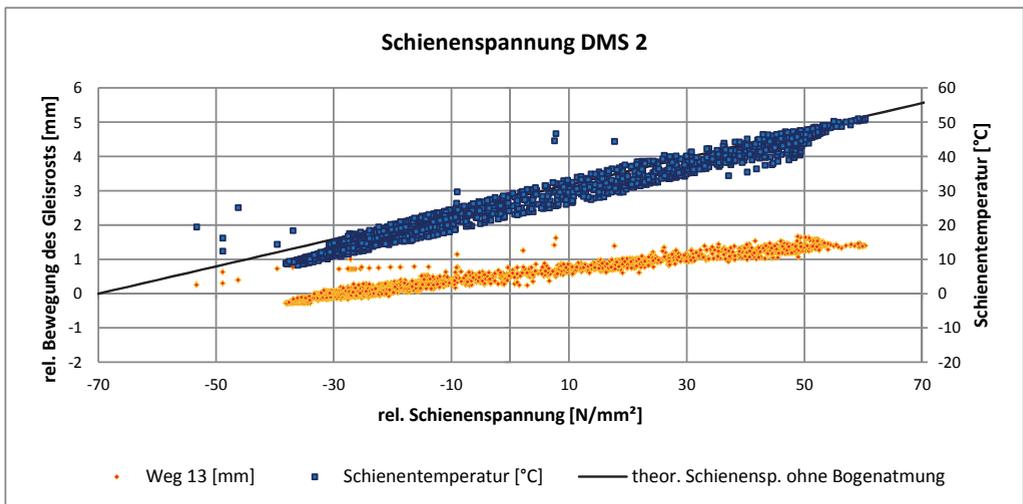


Abbildung 76: Schienenspannungen (DMS 2) vom 28.05.2015 – 08.06.2015

Die folgende Abbildung zeigt nun die Messung der Schienentemperatur über der rel. Schienenspannung des DMS 2 mit Stoßlücken (Grün) und im LV-Gleis (Blau). Bei einer geschlossenen Stoßlücke ist der Verlauf gleich dem LV-Gleis. Die beim LV-Gleis auftretenden geringen rel. Schienenspannungen (hier $< -14 \text{ N/mm}^2$) werden durch das Öffnen der Stoßlücke kompensiert.

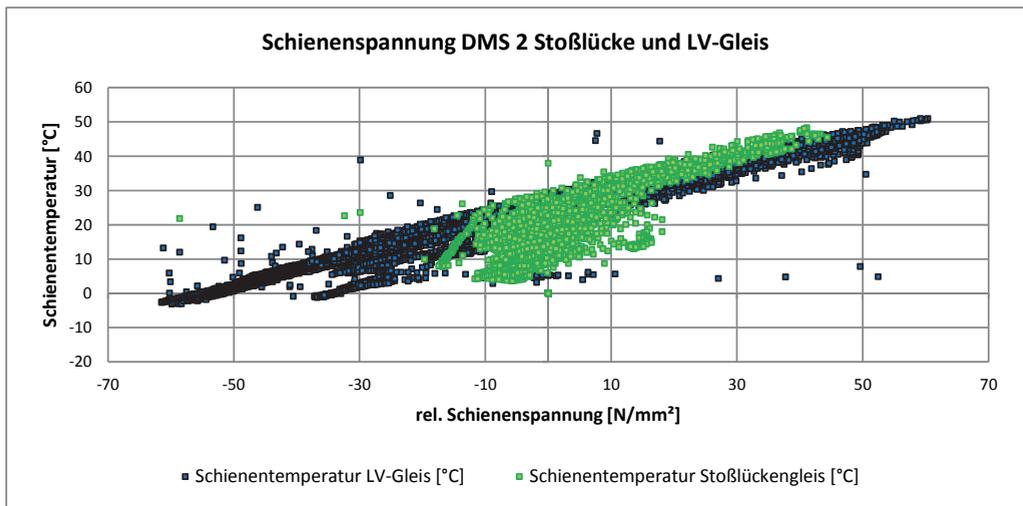


Abbildung 77: Vergleich Stoßlückengleis - LV Gleis

Werden die hier erlangten Ergebnisse mit der Messung im Windauer Bogen [41] verglichen (schlecht gewartetes Stoßlückengleis, Radius 243 m), so zeigen sich neben der ähnlich kleinen vorhandenen Bogenatmung deutlich geringere Schienenspannungen. Der Bereich der Atmung befindet sich auch hier zwischen -10 und $+10 \text{ N/mm}^2$.

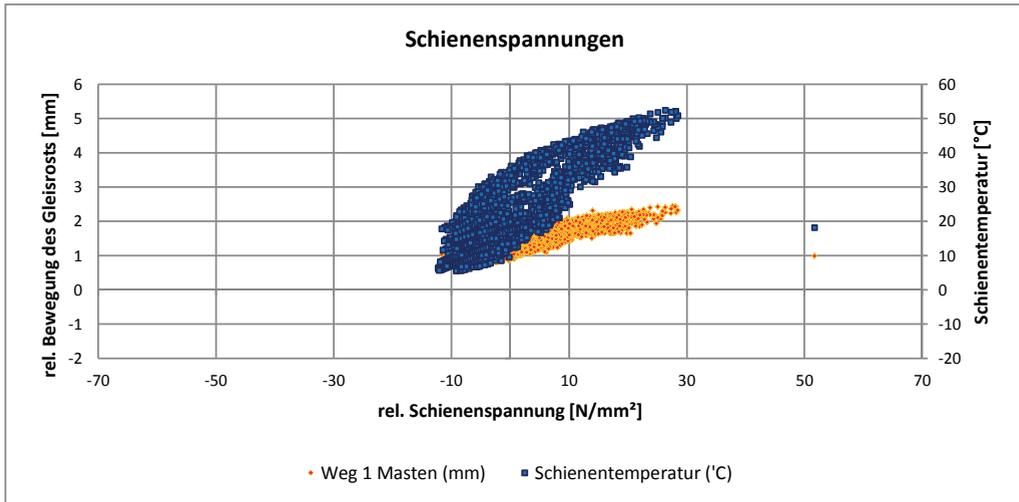


Abbildung 78: Schienenspannungen und Bewegungen des Gleises bzw. Schienentemperaturen im Windauer Bogen vom 01.08.2008 – 31.08.2008 (Daten aus [41])

Der folgende Vergleich zeigt die in den voranstehenden Abbildungen gezeigten Entwicklungen der Schienenlängsspannungen. Wie auch in Abbildung 68 zu sehen ist, war in Abschnitt 3 sowohl der Mittelwert als auch das 75 % Quantil (oberes Quartil) der Schienentemperatur meist niedriger als 25 °C, daher sind auch hier die Schienenspannungen größtenteils im relativ negativen Bereich dargestellt.

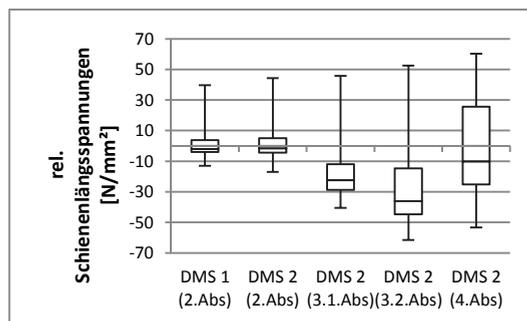


Abbildung 79: Vergleich der rel. Schienenlängsspannungen

6.2.8 Schienenlängsspannungen vs. Tageszeit

Bei Betrachtung der rel. Schienenlängsspannungen über einen Tag wird die Kopplung zur Schienentemperatur erneut deutlich. Im 2. Abschnitt sind sowohl die Spannungen als auch die Gleisrostbewegungen aufgrund der vorhandenen Stoßlücken geringer als in den übrigen Abschnitten. In Abbildung 82 deutet die unruhige Linie der Schienenspannungen auf die Bewegung der Stoßlücke hin.

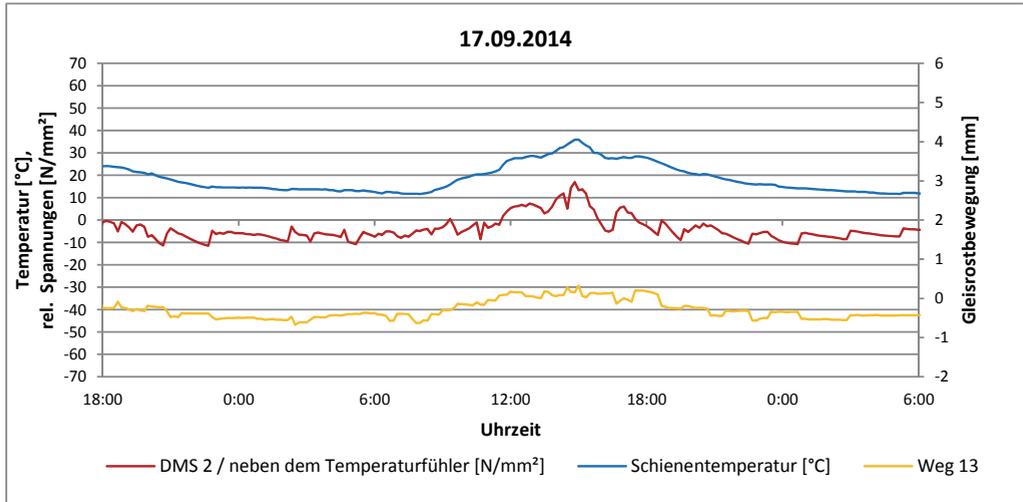


Abbildung 80: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 17.09.2014 (2. Abschnitt)

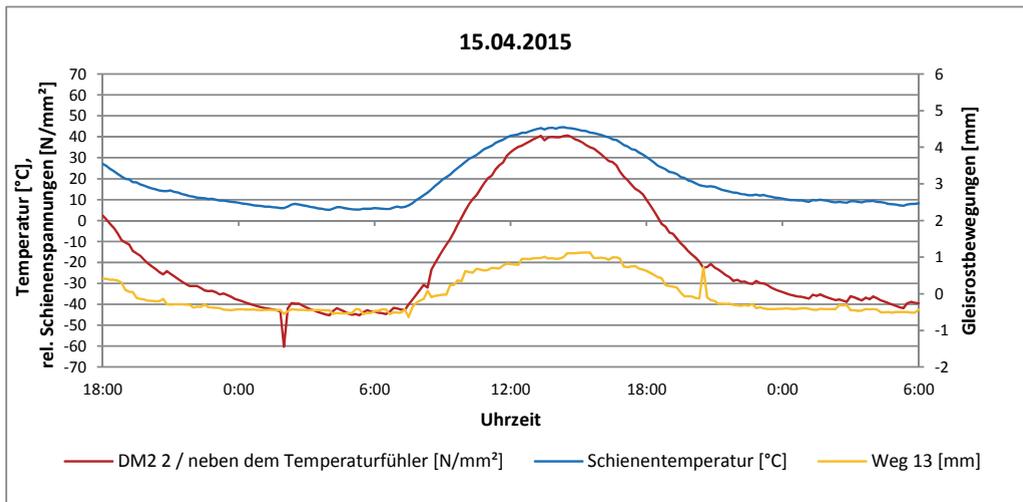


Abbildung 81: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 15.04.2015 (3. Abschnitt)

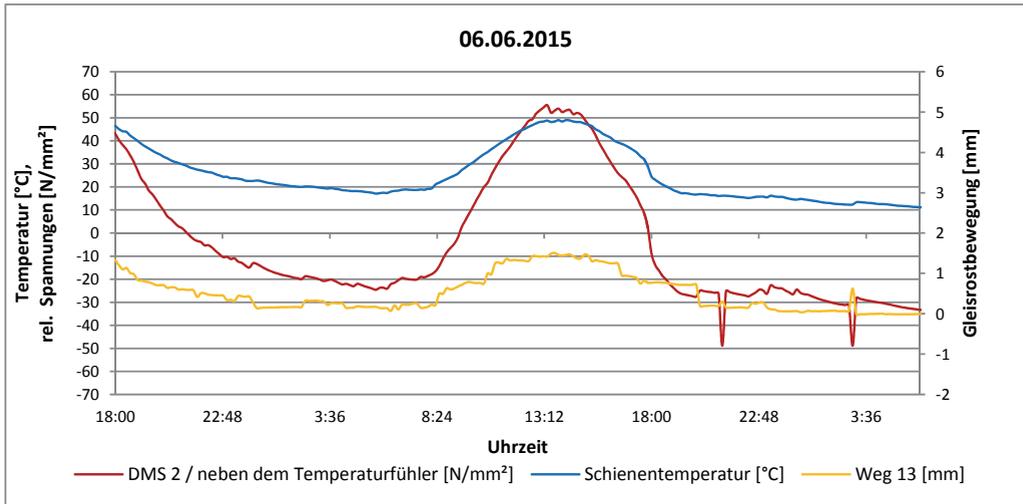


Abbildung 82: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 06.06.2015 (4. Abschnitt)

6.2.9 Bewegung des Bogens vs. Schienentemperatur

Zur Betrachtung der Gleisrostbewegungen im ersten Abschnitt wurden aufgrund der Wetterverhältnisse der Messabschnitt vom 18.07.2014 bis 28.07.2014 und genauer der 19.07.14 und 20.07.14 herangezogen. Die Gesamtbetrachtung in Vergleichsform ist in Abbildung 83 dargestellt.

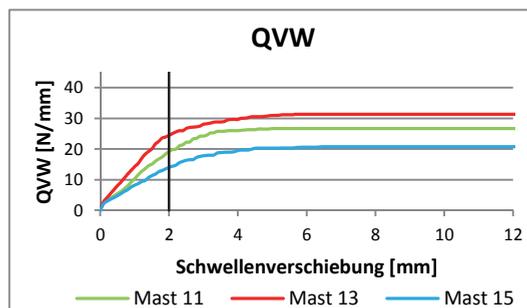


Abbildung 83: QVW im ersten Messabschnitt

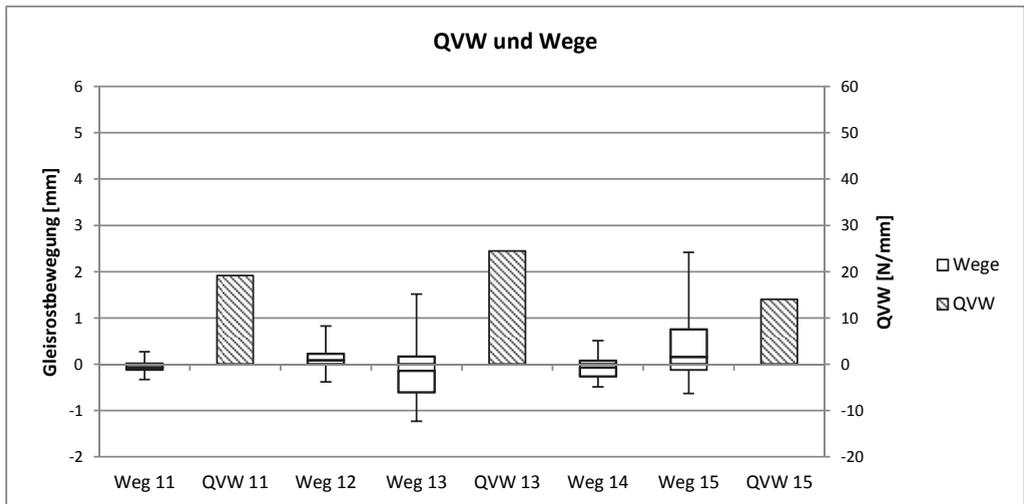


Abbildung 84: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 1. Abschnitt, Braz

Die stark unterschiedlichen Bewegungen des Gleisrosts haben keinen direkten Zusammenhang mit den örtlichen QVW. Die gemessenen QVW sind zwar inhomogen, aber es kann aus einem hohen QVW nicht auf geringe Gleisrostbewegungen geschlossen werden (Weg 13). Die Bewegungen des Gleisrosts hängen demnach von weiteren Faktoren ab. Diese Betrachtung zeigt auch, dass es wichtig ist, die Lage des Gleisrosts zum Zeitpunkt der QVW Messung zu kennen. Falls diese Messung z.B. nachts stattfindet, befindet sich der Gleisbogen in einer „entspannten“ Lage. Es ist somit ein Atmungsspalt in Richtung Bogenaußenseite von bis zu 4 mm vorhanden. Da die QVW Messung die benötigte Kraft pro mm Streckengleis bei 2 mm Schwellenverschiebung angibt, ist hiermit keine Aussage getroffen, ob der Vorkopfwiderstand bereits aktiviert wurde oder, ob es sich um die Flanken und Bodenreibung handelt. Da aber der Vorkopfwiderstand einen Einfluss (siehe Kapitel 3.1.2) auf den QVW hat (insbesondere bei Verwendung von SIK) wird der QVW oft zu gering angenommen.

Dass die Atmung des Gleisrosts nicht homogen stattfindet, wurde von Bopp im Meterspurbereich untersucht [21]. Bei Betrachtung der Wege über einen Teil des ersten Abschnitts wird diese unterschiedliche Atmung deutlich.

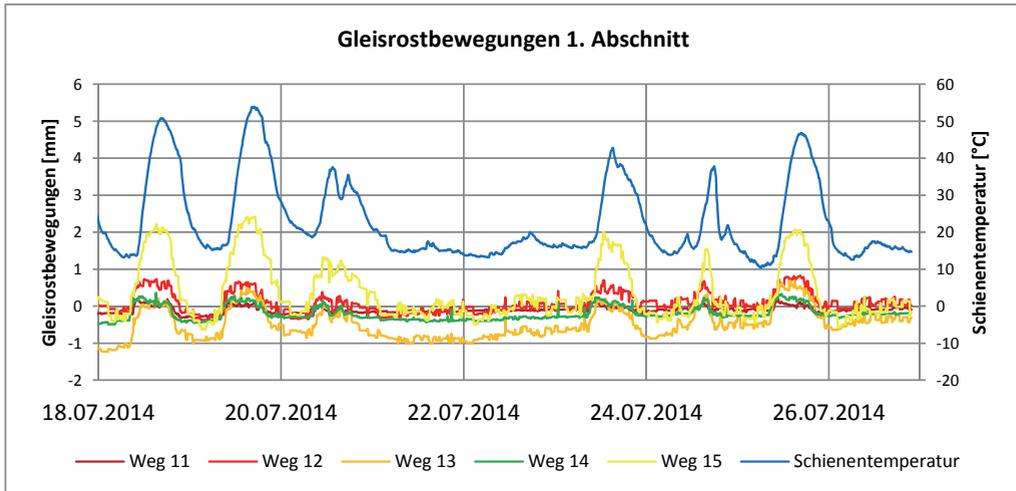


Abbildung 85: Gleisrostbewegungen im 1. Abschnitt vom 18.07.2014 - 26.07.2014

Werden die Bewegungen nur am 19.07.2014 betrachtet (vergleiche Abbildung 60) so fallen wiederum die großen Bewegungen von Weg 15 auf. Anders als die Wegmessungen 13 und 15 zeigen die Wegmessungen 11, 12 und 14 ein weniger ausgeprägtes, dem Schienentemperaturverlauf entsprechendes Atmungsverhalten. Die Sprünge innerhalb der Aufzeichnungen deuten auf Zugüberfahrten hin und werden in Kapitel 6.2.11 genauer betrachtet. Die geringsten Wege und somit der größte Gleisbogenhalbmesser werden um ca. 05:00 Uhr gemessen. Abbildung 87 zeigt die Bewegung mit den dazugehörigen Schienentemperaturen im Stundenraster.

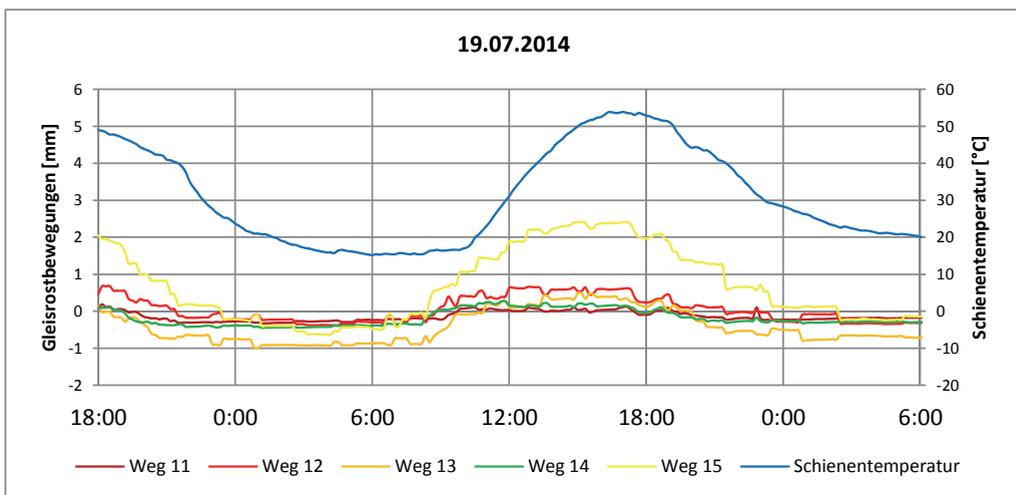


Abbildung 86: Gleisrostbewegungen am 19.07.2014

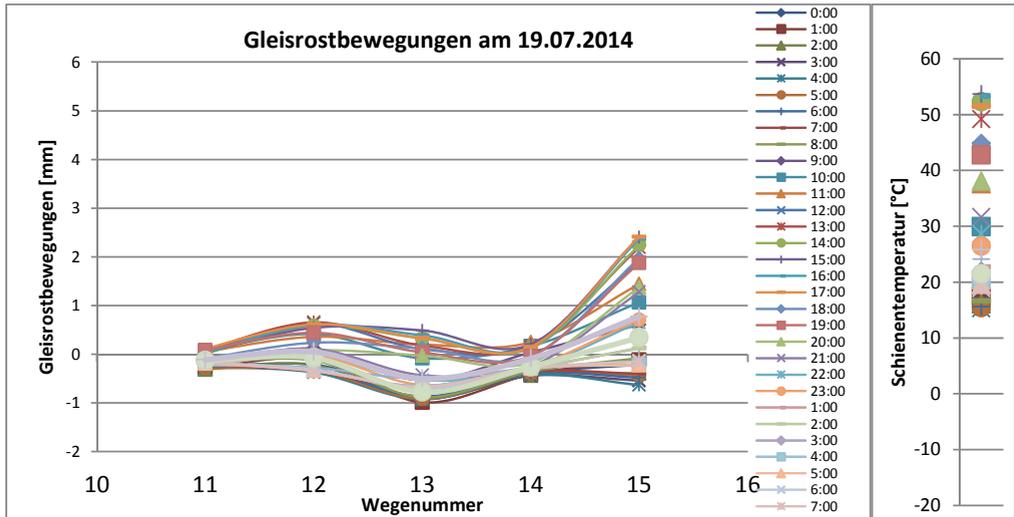


Abbildung 87: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 19.07.2014 mit der dazugehörigen Schienentemperatur

In den folgenden Abbildungen sind die Gleisrostbewegungen für den zweiten Abschnitt dargestellt. Nach Einbau der Sicherungskappen und einer Durcharbeitung des Gleisrostes sind die Querverschiebewiderstände homogener und die Gleisrostbewegungen deutlich kleiner geworden. Dennoch sind die Unterschiede der Wege deutlich zu erkennen. Da die Gleislage nach dem Stopfen jedoch wieder in „Soll“ Lage gebracht wurde, ist hieraus zu schließen, dass der vorliegende QVW nicht ausschlaggebend für die Atmungsform des Gleisbogens ist. Sowohl in Abbildung 87 als auch in Abbildung 92 zeigt sich, dass die großen Bewegungen des Weges 15 ohne Zusammenhang mit den benachbarten Bewegungen zu sehen sind. So ist beispielsweise um 8:00 Uhr jeweils bei Schienentemperaturen unter 30 °C die Lage des Weges 15 weiter Richtung Bogeninnenseite als die Lage des Weges 14. Dieses Verhalten ändert sich mit Übertritt der 30 °C Schienentemperaturmarke. Ab diesem Zeitpunkt springt der Weg 15 weiter nach bogenaußen, als der benachbarte Bereich (Weg 14). Daraus ist ersichtlich, dass lokale Maxima und Minima über den Tag verteilt an unterschiedlichen Stellen auftreten können.

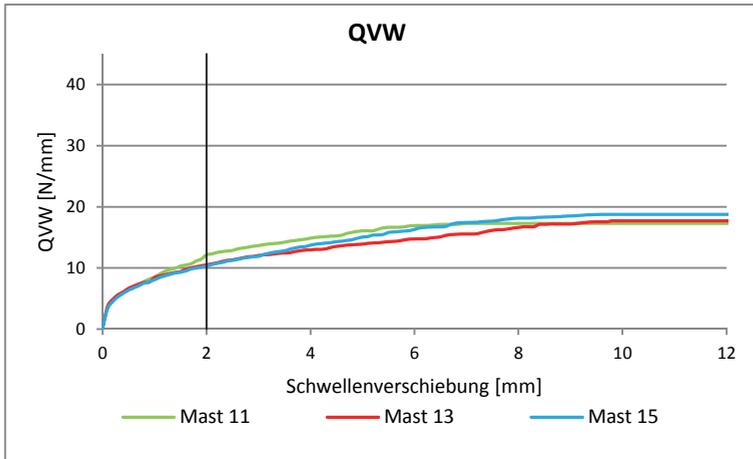


Abbildung 88: QVW Messung im zweiten Abschnitt (nach Einbau der SIK)

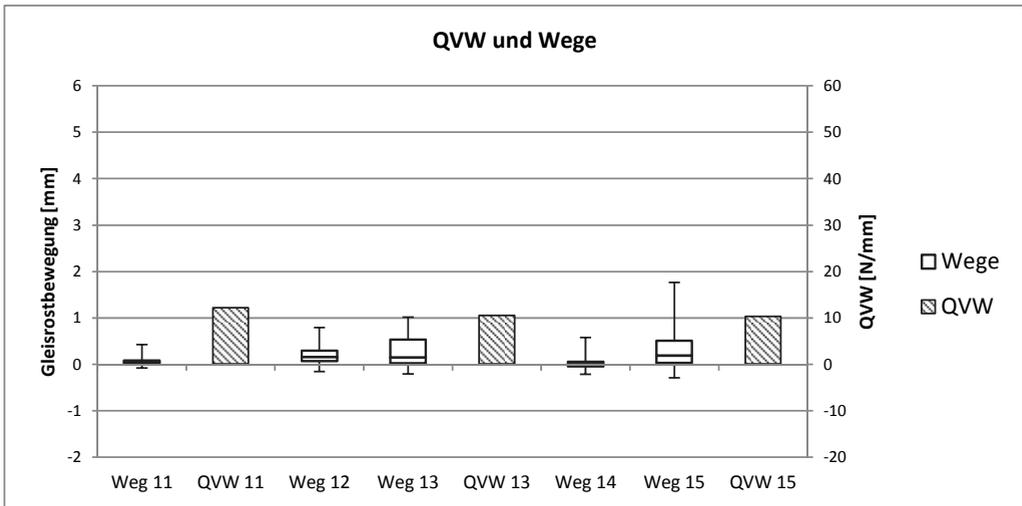


Abbildung 89: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 2. Abschnitt

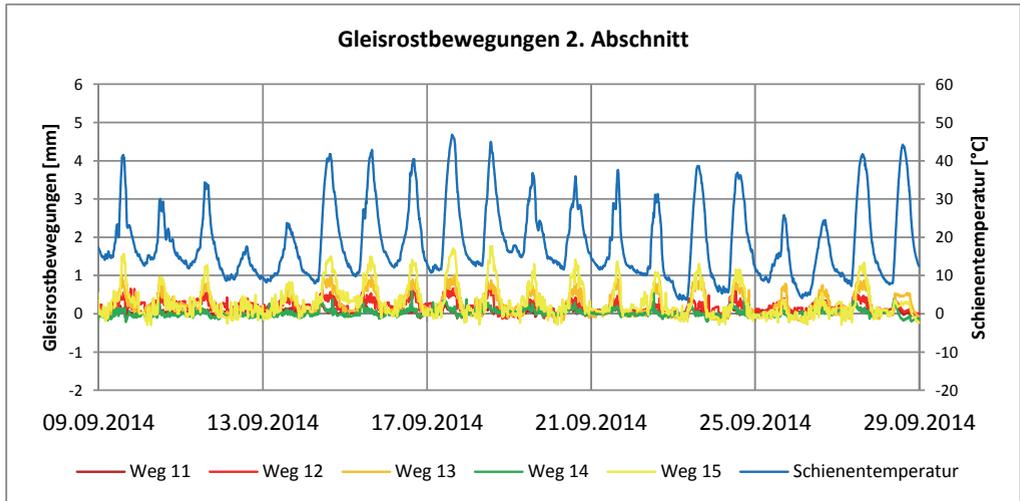


Abbildung 90: Gleisrostbewegungen im 2. Abschnitt

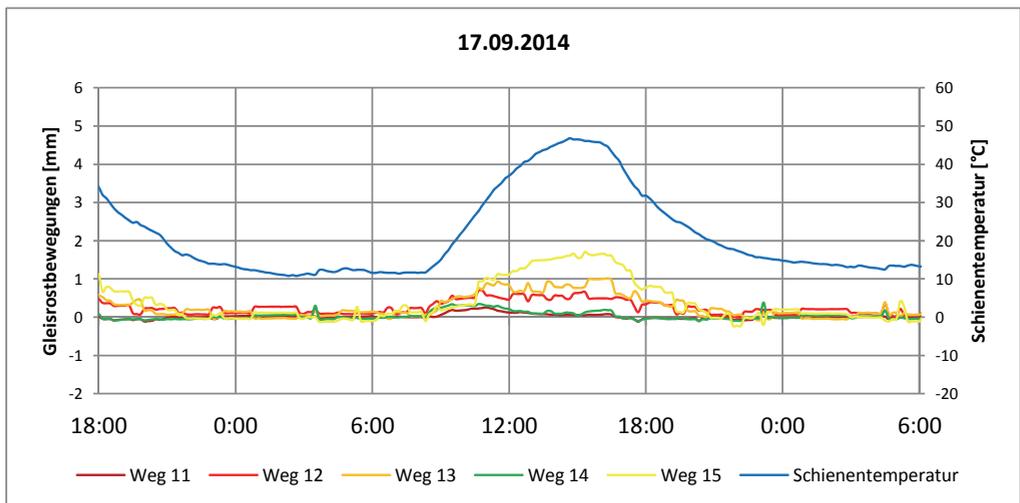


Abbildung 91: Gleisrostbewegungen im 2. Abschnitt am 17.09.2014

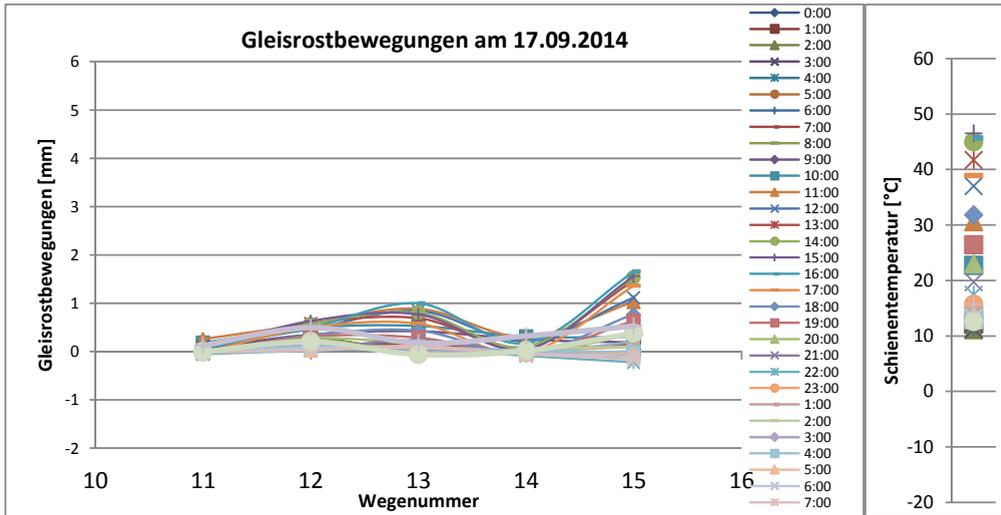


Abbildung 92: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 17.09.2014 mit der dazugehörigen Schienentemperatur

Der dritte Abschnitt zeigt nun die Bewegungen des Gleisrostes in der Konsolidierungsphase mit SIK 6 und längs verschweißten Schienen. In dieser Zeitperiode wurden keine QVW- Messungen durchgeführt. Abbildung 93 zeigt die Gleisrostbewegungen dieses Abschnitts. Hier ist erkennbar, dass die Wege deutlich größer geworden sind. Die Unterschiede der maximal erreichten Gleislage der einzelnen Messpunkte bleiben jedoch ähnlich den der Abschnitte 1 und 2. In Abbildung 95 ist der Atmungsverlauf am 15.04.2015 dargestellt. Hier ist die unterschiedliche Bogenatmung der verschiedenen Wege deutlich zu erkennen.

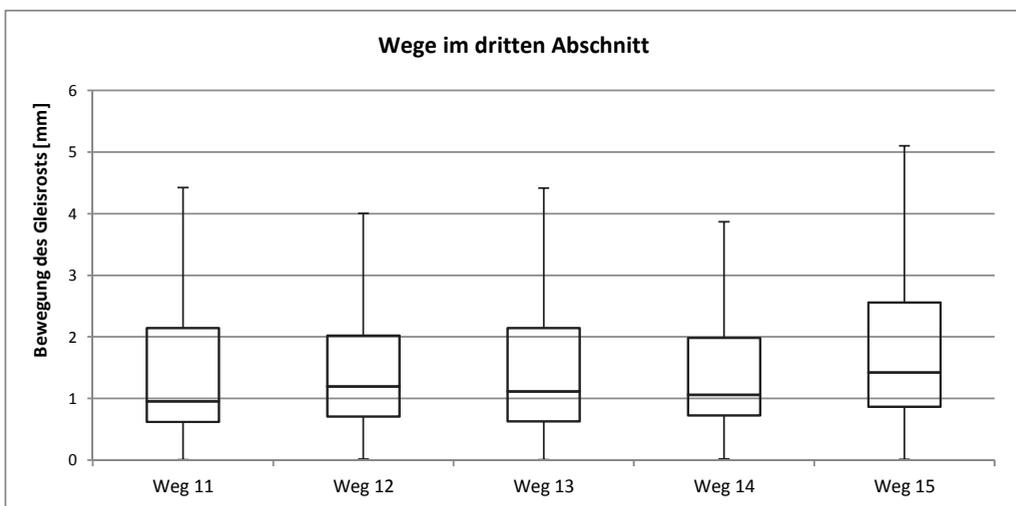


Abbildung 93: Bewegungen des Gleisrostes im dritten Messabschnitt

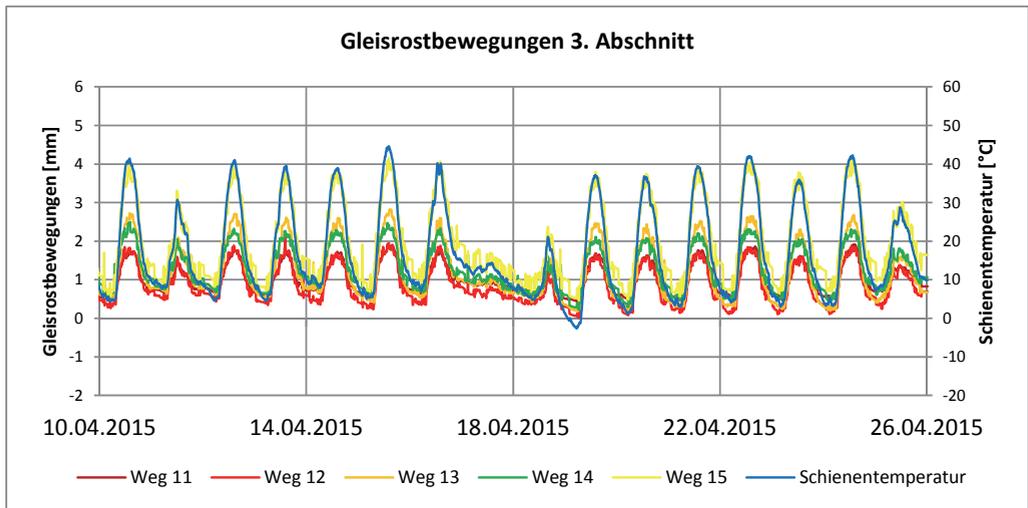


Abbildung 94: Gleisrostbewegungen im Frühjahr 2015 (dritter Abschnitt)

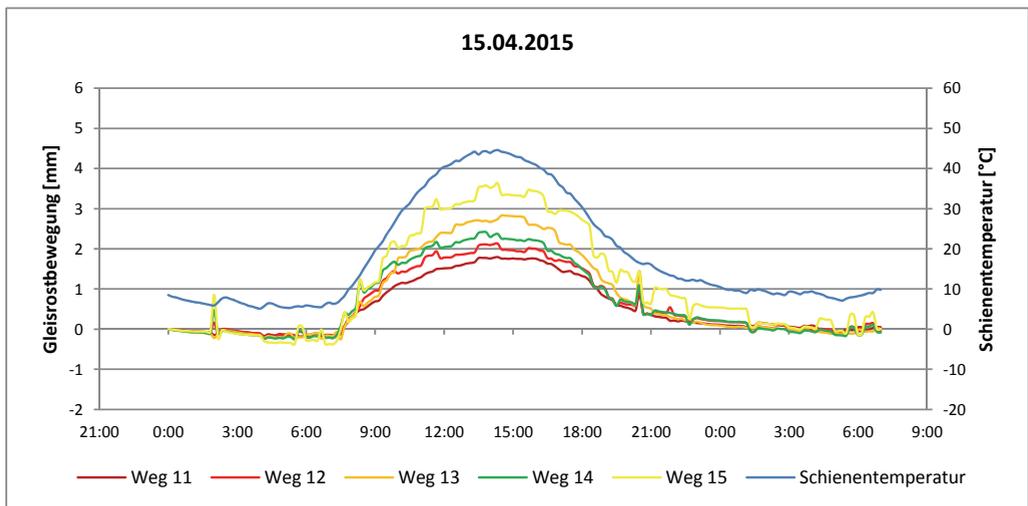


Abbildung 95: Gleisrostbewegungen im 3. Abschnitt am 15.04.2015

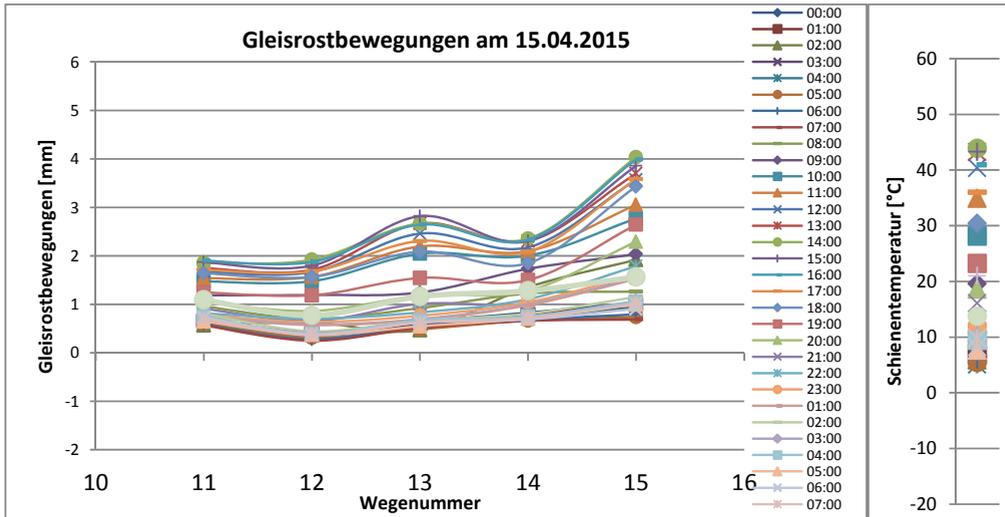


Abbildung 96: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 15.04.2015 mit der dazugehörigen Schienentemperatur

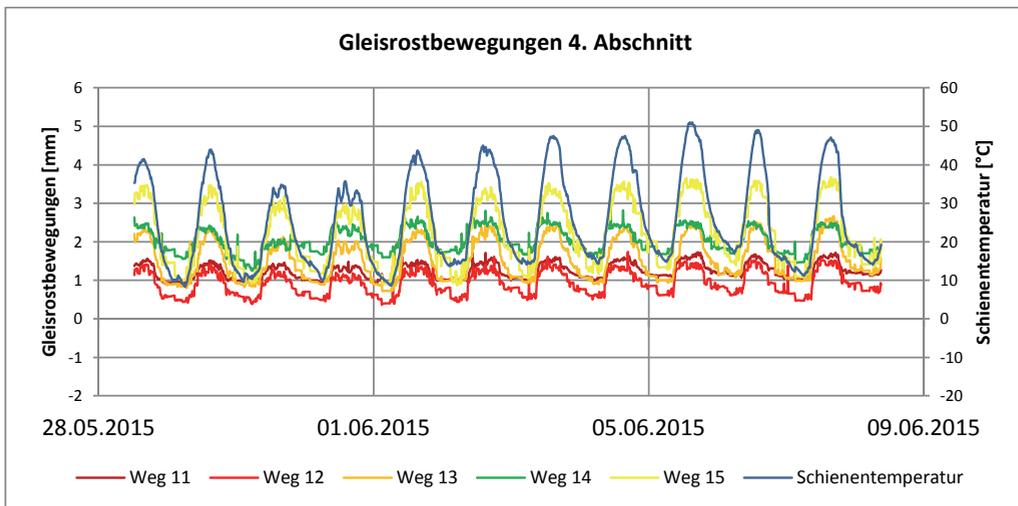


Abbildung 97: Gleisrostbewegungen im Sommer 2015

Da der dritte Messabschnitt die Konsolidierungsphase des Gleises abdeckte, sind die Wege des nun gefestigten Bogens im 4. Abschnitt deutlich geringer. Der Vergleich zu den vorliegenden Querverschiebewiderständen verdeutlicht die stabile Lage des Bogens.

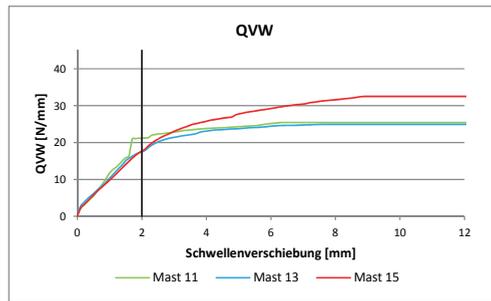


Abbildung 98: QVW Messung im vierten Abschnitt

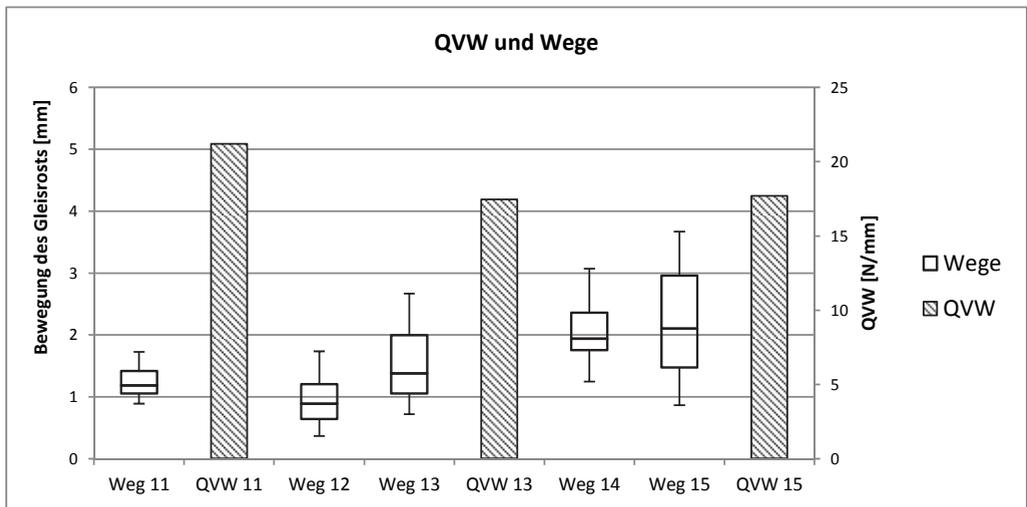


Abbildung 99: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 4. Abschnitt

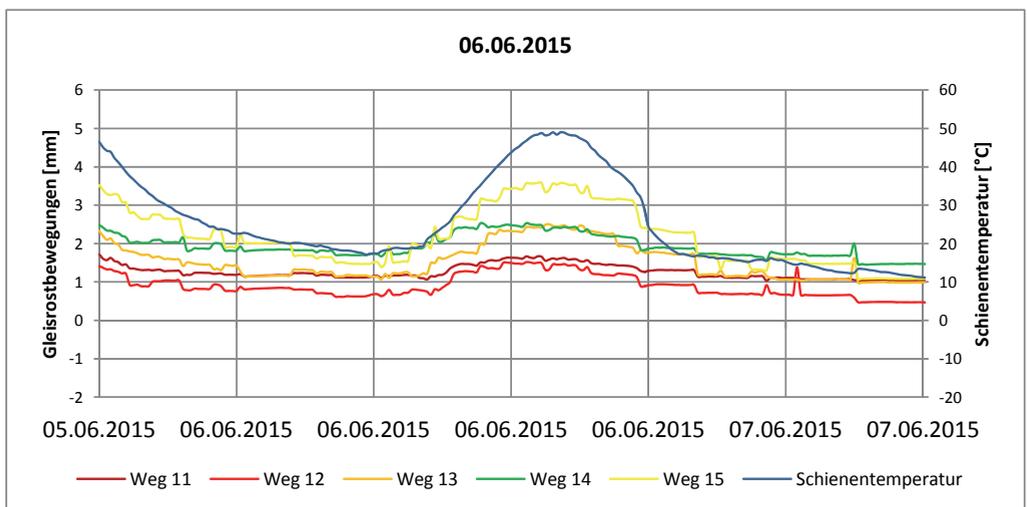


Abbildung 100: Gleisrostbewegungen im 4. Abschnitt am 06.06.2015

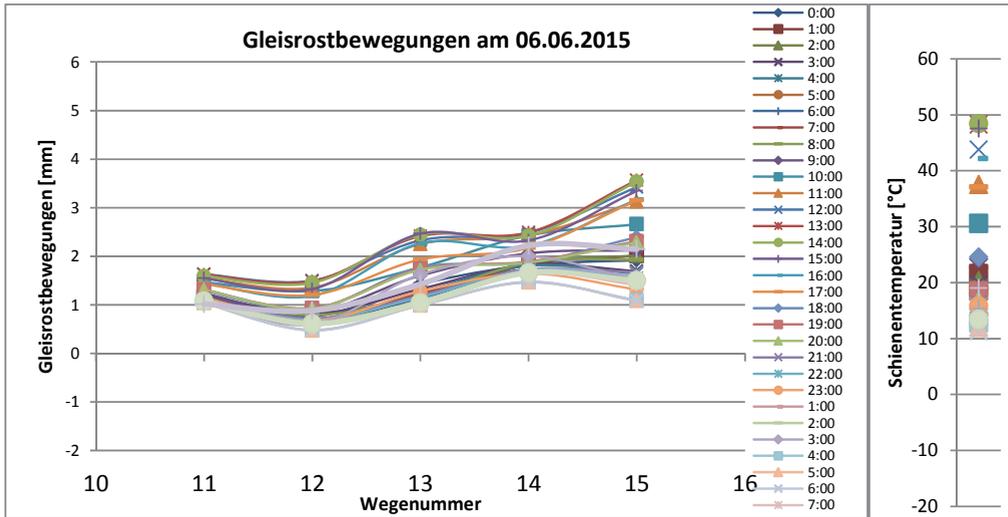


Abbildung 101: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 06.06.2015 mit der dazugehörigen Schienentemperatur

6.2.10 Genaues Einmessen des Bogens

Um neben der Messstellen-Dauermessung der Bogenatmung an 5 einzelnen Punkten den Bogen an einigen Tagen auch in seiner ganzen Länge zu erfassen, wurden am 18.03.2015 (11:00 Uhr, 28 °C Schienentemperatur), am 09.07.2015 (14:00 Uhr, 35 °C Schienentemperatur) und am 10.07.2015 (8:00 Uhr, 12 °C Schienentemperatur) Pfeilhöhenmessungen durchgeführt.

Zuerst wurden hierbei die Abstände der jeweils aktuellen Gleislage zu den Oberleitungsmasten in einer Bezugspunktliste aufgenommen und die Ist-Richtung mit deren Soll-Richtung verglichen. In einem nächsten Schritt wurden sodann jeweils von der Schienenachse auf der Höhe eines OL-Masts ausgehend eine Messlatte angepeilt (Abbildung 102). Diese Messlatte, welche zuerst auf der Höhe des vorherigen Masts aufgestellt wird (zur „0“ Einstellung der Optik) wird sodann in 5 bzw. 10 Meterschritten heran bewegt, wobei der auf der Messlatte ablesbare Bogenstich notiert wird.



Abbildung 102: Durchführung der Pfeilhöhenmessungen

Die Pfeilhöhenmessungen wurden mit den Daten der Messstelle verglichen, wobei anzumerken ist, dass die Daten der Messstelle nicht als absolute Werte vorlagen, da hier die Soll-Gleislage nicht bekannt ist und daher nur die Bewegungen der Gleisroses aufgenommen werden. Diese Werte wurden daher einheitlich verschoben, um sie mit den Daten der Pfeilhöhenmessung zu vergleichen. Dies war nötig, da die „Null“-Lage des über die Messstation gemessenen Gleisbogens wie in Kapitel 6.2.9 beschrieben, für den kältesten Zeitpunkt der Messung, also der theor. entspanntesten Gleislage, gewählt worden ist. Es stellte sich nun heraus, dass auch diese „Null-Gleislage“ bereits große Verformungen aufweist und die Werte daher nicht mit der Pfeilhöhenmessung verglichen werden können. Im Gegensatz dazu allerdings vergleichbar ist die Differenz der gemessenen Daten vom 09.07.2015 und 10.07.2015, welche Abbildung 106 dargestellt.

Die Abweichung von der Soll-Lage der händischen Nachmessung (Pfeilhöhenmessung) mit bis zu -35 mm kommen aufgrund der letzten Stopfung (ohne vorherigem Richten des Gleises) zustande, und sind für Bögen mit 250 m Radius nicht ungewöhnlich, wobei die Ungenauigkeiten der händischen Nachmessung der Gleislage bei ca. $\pm 5\text{ mm}$ ²¹ liegen. Wie auch bei den Messungen am 09.07 und am 10.07 erkennbar ist, zeigt sich auf der Messstrecke eine ungleichmäßig auftretende Bogenatmung.

²¹ Die maximale gemessene Bogenatmung liegt bei 5 mm im dritten Abschnitt, wobei die mit der Messstation aufgenommenen Daten geringe Ungenauigkeiten aufweisen. (vgl.6.2.4)

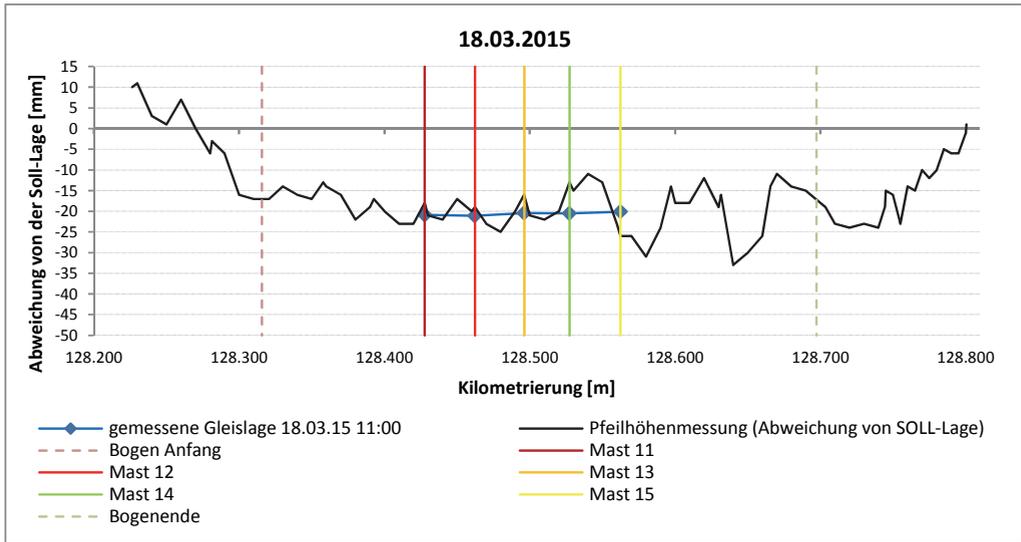


Abbildung 103: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 18.03.2015

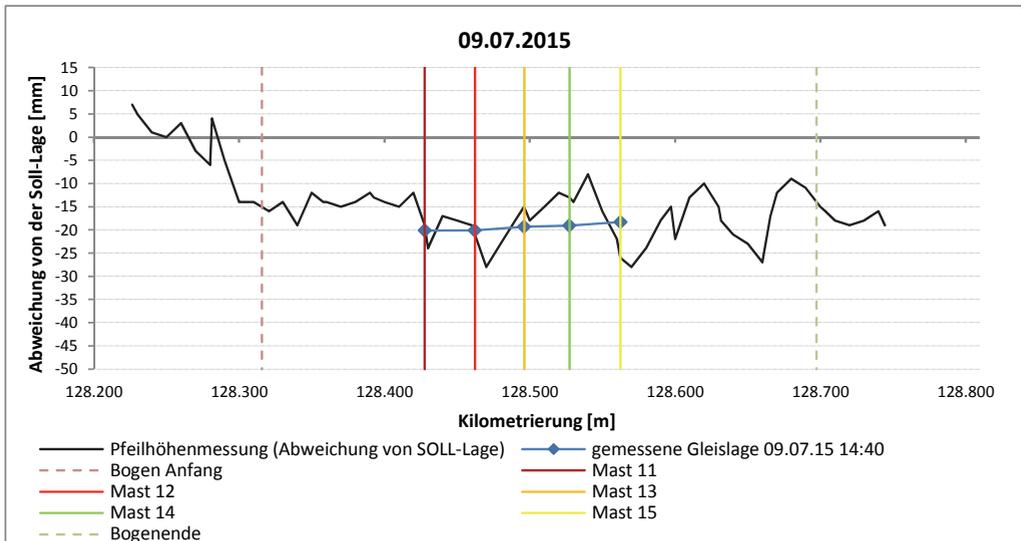


Abbildung 104: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 09.07.2015

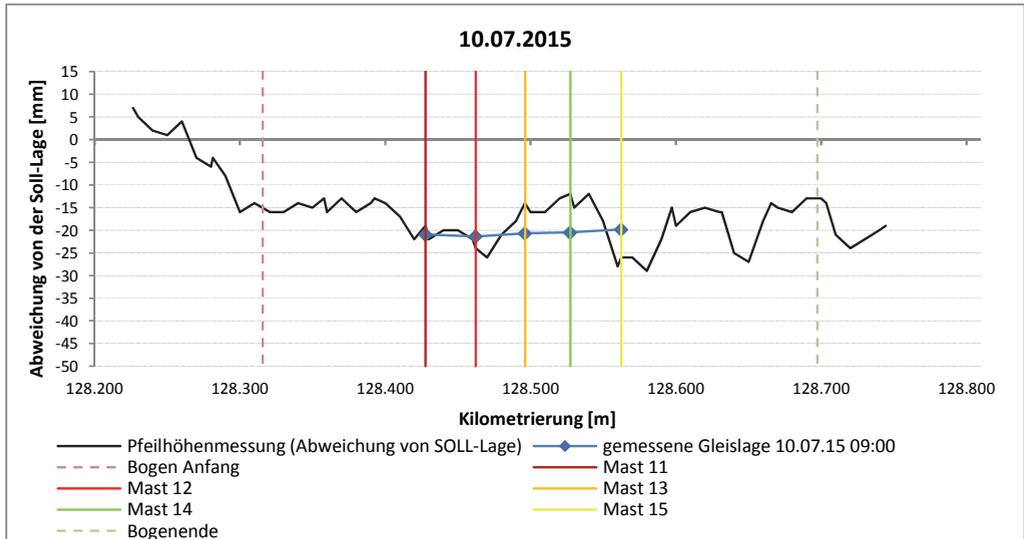


Abbildung 105: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 10.07.2015

Die folgende Darstellung zeigt die Differenz der beiden Pfeilhöhenmessungen vom 09.07.2015 nachmittags und 10.07.2015 vormittags. Es zeigt sich wiederum, dass der Bogen nicht konstant atmet, und dass die Bewegungen auch aufgrund des hohen QVW gering ausfallen. Auch zeigt sich, dass die Lage der Oberleitungsmasten nicht ausreicht, um die gesamte Bogenatmung zu erfassen, da - wie in nachstehender Abbildung zu sehen ist - die Querschnitte auf Höhe der Masten jeweils deutlich als Bereiche mit geringerer Verschiebungen erkennbar sind. Dies kann aber auch daran liegen, dass die Masten nicht optisch mittels Bogenstich eingemessen wurden, sondern per Maßband, und daher eine höhere Ablesegenauigkeit vorliegt. Unterschiedlich zeigt sich die Differenz der Daten der Messstelle und der Daten der Pfeilhöhe. Die Messstelle signalisiert eine konstante sehr geringe Veränderung der Gleislage (vgl. Abbildung 107) sowie der Bogenatmung an den Masten, wobei die Pfeilhöhenmessung zwar an den Masten eine Verringerung bestätigt, aber zwischen den Messpunkten stets eine Vergrößerung der Atmung angibt.

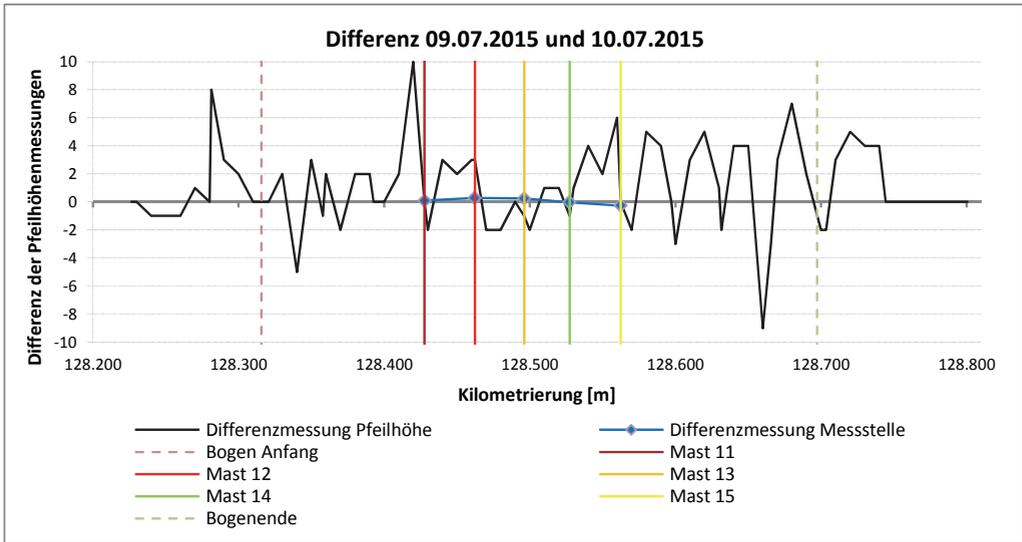


Abbildung 106: Differenzmessung der Pfeilhöhenmessungen vom 09.07.2015 und 10.07.2015

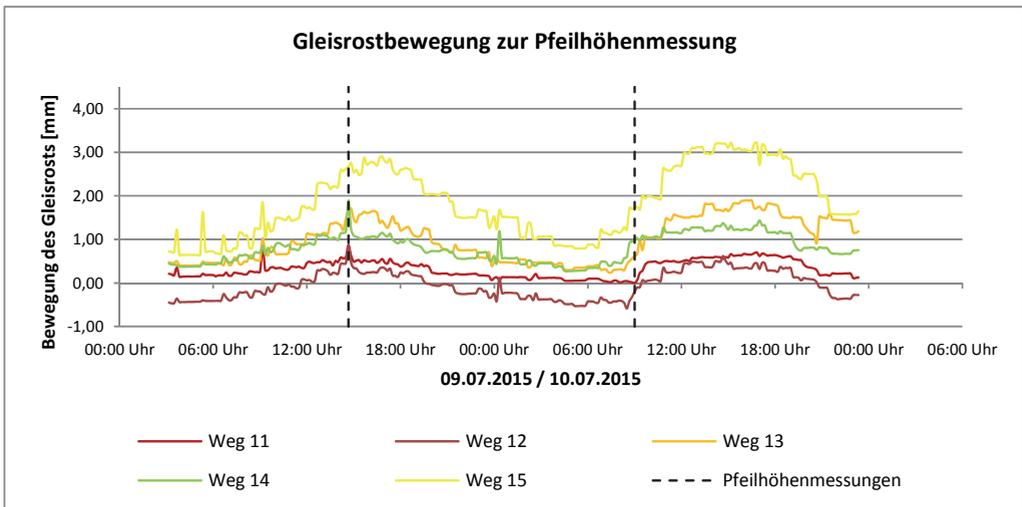


Abbildung 107: Bewegung des Gleisrosts zur Pfeilhöhenmessung am 09.07.2015 und 10.07.2015

6.2.11 Einfluss der Zugüberfahrt

Um den Einfluss einer Zugüberfahrt und den genauen zeitlichen Ablauf der Bogenatmung feststellen zu können, wurde vom 20.02.2015 bis 26.02.2015 eine Messung mit der maximal möglichen Abtastrate des midi Loggers GL820 von 200 ms durchgeführt. Hiervon wurde aufgrund der Wetterlage der 20.02.2015 für die genauere Auswertung herangezogen. In Abbildung 108 sind der Verlauf des Wegaufnehmers 13 in Bogenmitte sowie der Luft- und Schienentemperaturen zu erkennen. Die großen Aus-

schläge des Weges 13 stellen Zugüberfahrten dar. Die Einsenkung der Schwelle unter der Achse, sowie die darauf folgende Abhebewelle ergeben aufgrund des langen „Wegarmes“ einen theoretischen Verschiebungsanteil von 0,002 mm und sind daher vernachlässigbar. Erkennbar ist, dass die Bewegung des Gleisrostes jeweils zwischen zwei Zugüberfahrten annähernd linear bleibt, und die Bewegung durch Zugüberfahrtsereignisse ausgelöst wird. Die kurzzeitige seitliche Bewegung durch Fliehkräfte bewegt sich hierbei um ca. 1 mm, an diesem Tag entspricht dies knapp der gesamten Ruhe-Bewegung des Gleisrostes. Die rot hinterlegten Züge wurden herausgenommen, um den genauen Zeitpunkt der Bewegung zu verifizieren.

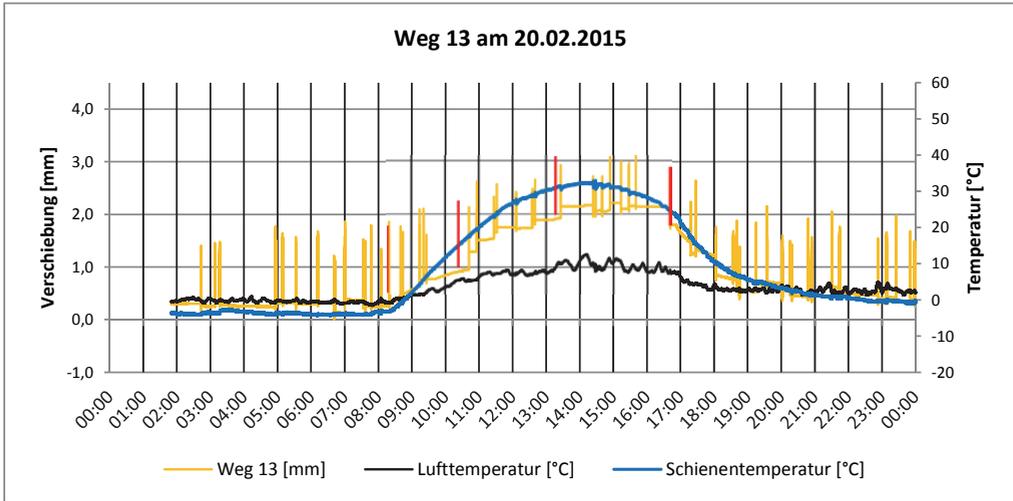


Abbildung 108: Genaue Messung, Weg 13, Luft- und Schienentemperatur, am 20.02.2015 im Brazer Bogen

Die ersten zwei hier gezeigten überwachten Zugfahrten (rot) sind vormittags um 08:40 Uhr, diese erste mit einem markanten Anstieg der Bewegung, und um 10:42 Uhr die Fahrt mit der größten ausgelösten positiven Bewegung, wobei die Schienentemperatur stetig stieg und temperaturbedingte Schienenspannungen vorhanden waren. Die Überfahrt um 16:40 Uhr ist die erste Zugüberfahrt, welche eine Bewegung in Richtung Bogeninnenseite zur Folge hatte.

Die erste untersuchte Zugfahrt um 08:40 Uhr war ein Güterzug in Fahrtrichtung zum Arlberg (Braz – Hintergasse) und ist an allen Messarmen zu erkennen. Wie zuvor beschrieben, ist Weg 15 am „beweglichsten“ und hat hier eine Veränderung der Lage um 0,5 mm nach der Zugüberfahrt zur Folge. Bedingt durch das gewählte Messraster von 200 ms sind teilweise die einzelnen Drehgestelle²² erkennbar, oftmals sind diese auch mit einem Messausschlag verbunden. Um die einzelnen Achsen innerhalb eines Drehgestells zu erkennen, müsste die Abtastrate kürzer als 30 ms sein.

²² Da hier ein Güterzug registriert wurde, kann es sich dabei teilweise auch um Einzel-Achsen (bei 2-achsigen Waggons) gehandelt haben

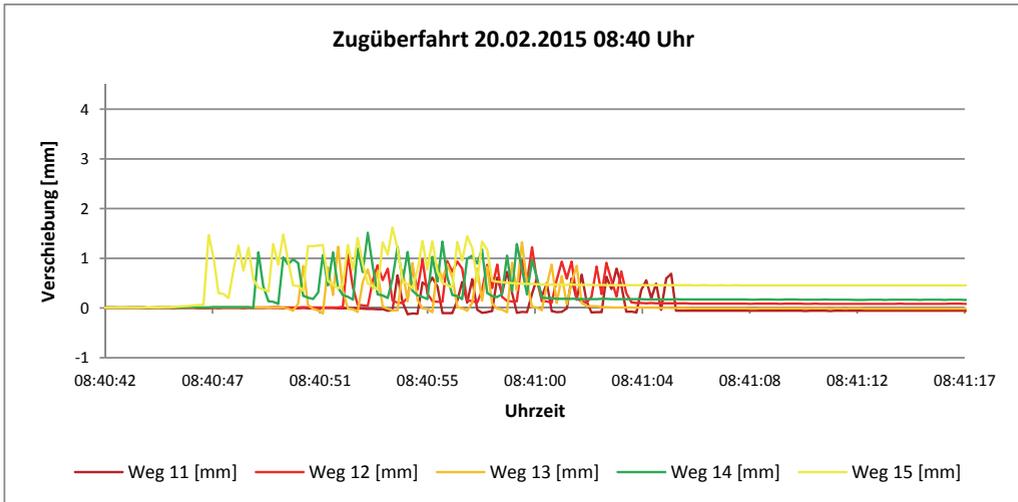


Abbildung 109: Bewegungen des Gleisrosts aufgrund einer Zugüberfahrt im Brazer Bogen am 20.02.2015 um 08:40 Uhr

Um die Bewegung zu analysieren, wird nachfolgend die Zugfahrt mit den größten Bewegungen um 10:42 Uhr dargestellt (Abbildung 110). Der hier abgebildete EC 163 bewegte mit seiner Überfahrt alle Messbereiche in Richtung Bogenaußenseite. Mit dieser Darstellung kann auch gezeigt werden, dass die Oberleitungsmasten als Widerlager ausreichend stabil gelagert sind und keine störenden Schwingungen auftreten.

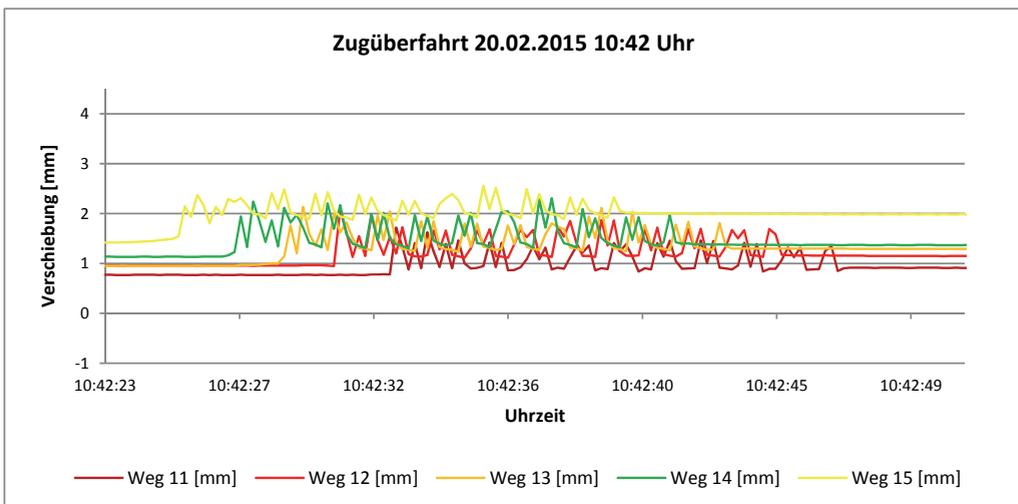


Abbildung 110: Bewegungen des Gleisrosts aufgrund einer Zugüberfahrt im Brazer Bogen am 20.02.2015 um 10:42 Uhr

Die größte Bewegung dieser Messung, der Weg 15, ist in der nun folgenden Abbildung 111 der Schientemperatur gegenübergestellt:

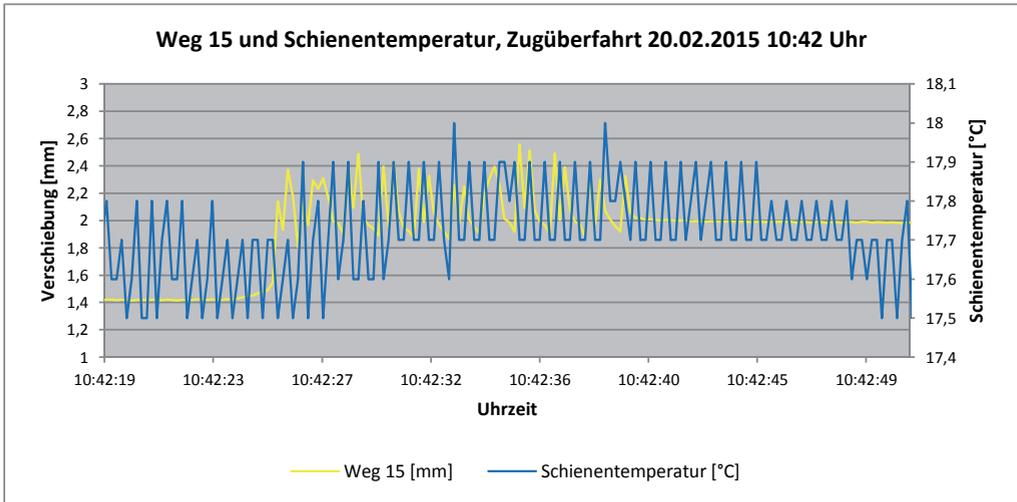


Abbildung 111: Weg 15 und Schientemperatur aufgrund einer Zugüberfahrt Brazer Bogen 20.02.2015 10:42 Uhr

Der Weg 15 wird demnach bereits bei der ersten Bewegung in die spätere „Endlage“ gehoben. Die weiteren Bewegungen haben keinen Einfluss mehr auf die Lage des Bogens. Die Entspannung des Bogens findet somit nicht erst nach der Zugüberfahrt statt, sondern beginnt bereits in der Abhebewelle vor und nach der ersten Achse bzw. dem ersten Drehgestell.

Um zu überprüfen, ob eine Lok mit ihren hohen Achslasten einen Einfluss auf die Bewegung hat, wurde der Weg 13 für die Doppelgarnitur des RJ 560/160 auf seiner Fahrt von St. Anton Richtung Bludenz ausgewertet (siehe Abbildung 113, Railjet jeweils gezogen).



Abbildung 112: Railjet - Doppelgarnitur und Kesselzug an der Bogenmessstelle in Braz (km 128,5) auf dem Weg nach Bludenz

Die Blau hinterlegten Bereiche sind die Einflussspitzen der Lokomotiven. Da die Ausschläge der zweiten Lokomotive ähnlich denen der benachbarten Wagen sind, kann festgestellt werden, dass die Bewegung des Bogens, unabhängig von der relativen Größe der Belastung, stets bereits im Bereich der ersten Abhebewelle des ersten Drehgestells auftritt.

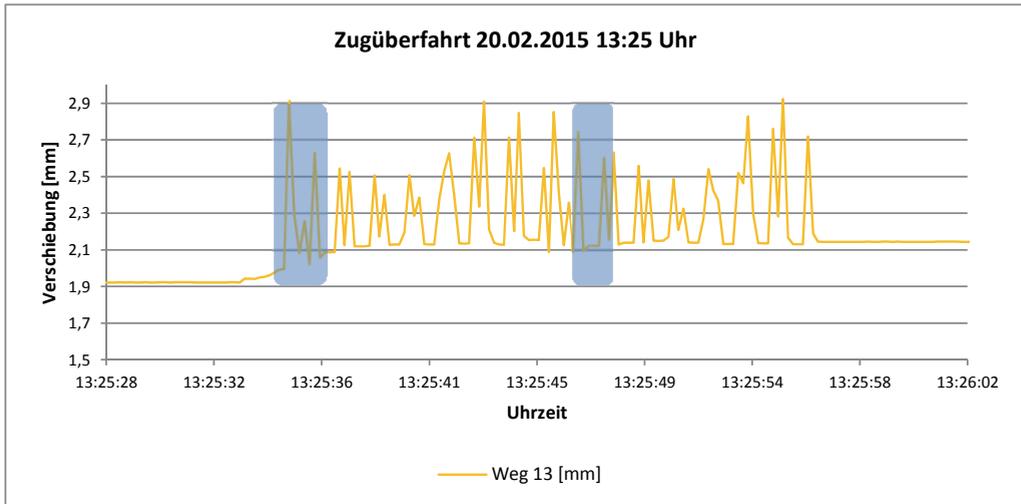


Abbildung 113: Zugüberfahrt Railjet-Doppelgarnitur an der Messstelle, Weg 13

Der geringe, aber durchaus vorhandene Zusammenhang zwischen Schienenlängsspannungen und Bewegung des Bogens (vgl. 6.2.7) geht auch aus Abbildung 114 hervor. Hier ist bei einer Zugüberfahrt mit einer Entspannung des Bogens (Weg 13) von 0,2 mm eine Reduktion der Schienenlängsspannung von $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ verbunden. Dies entspräche einem Temperaturunterschied von $0,4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Die Einflüsse auf die Schiene während der Zugüberfahrt sind mehrdimensional²³ (u.a. Zug- und Druckspannungen aufgrund der Achslasten und Bremskräfte). Die Bremskräfte des hier gezeigten bergabfahrenden Güterzuges würden für die Lok (Blau) unter Annahme einer Bremskraft von 30 kN [46] eine rel. Schienenspannung von $4,8 \text{ N/mm}^2$ ergeben. Die Bremskräfte haben daher in kurzzeitiger Hinsicht keinen Einfluss auf die Schienenlängsspannungen.

²³ Die DMS können nicht in der absoluten Nulllinie der Schiene angebracht werden und messen daher auch geringe Anteile der Durchbiegung der Schiene.

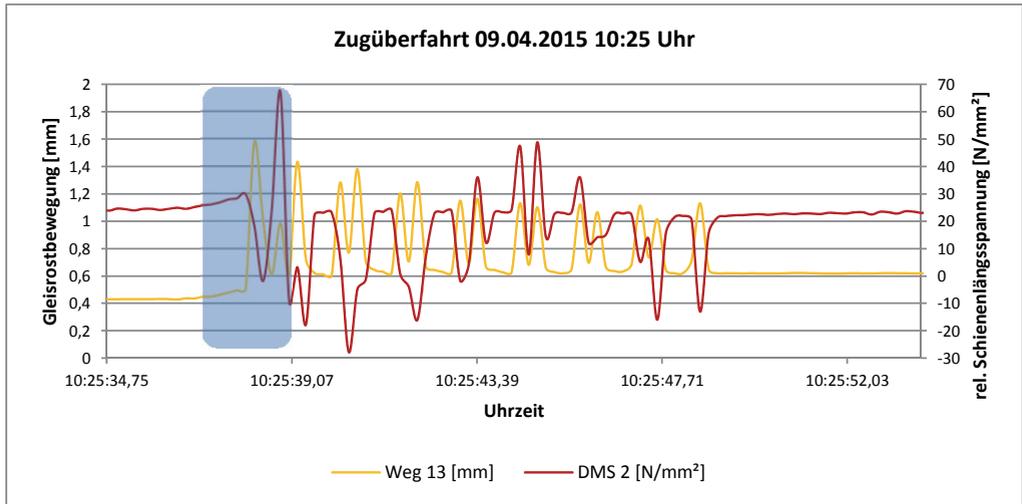


Abbildung 114: Zugüberfahrt am 09.04.2015 um 10:25 Uhr, Weg 13 und DMS 2

Um das Bewegungsverhalten während des Abkühlens und somit Zusammenziehens des Bogens zu untersuchen, wurde die Zugüberfahrt um 16:40 Uhr ausgewählt. Hierbei wurde Weg 13 herausgefiltert (Abbildung 115 und Abbildung 116). Erkennbar sind wiederum die Bewegungen innerhalb der Abhebewelle vor dem ersten Drehgestell, sowie das Erreichen der Endverformung mit dem zweiten Drehgestell (Blau).²⁴

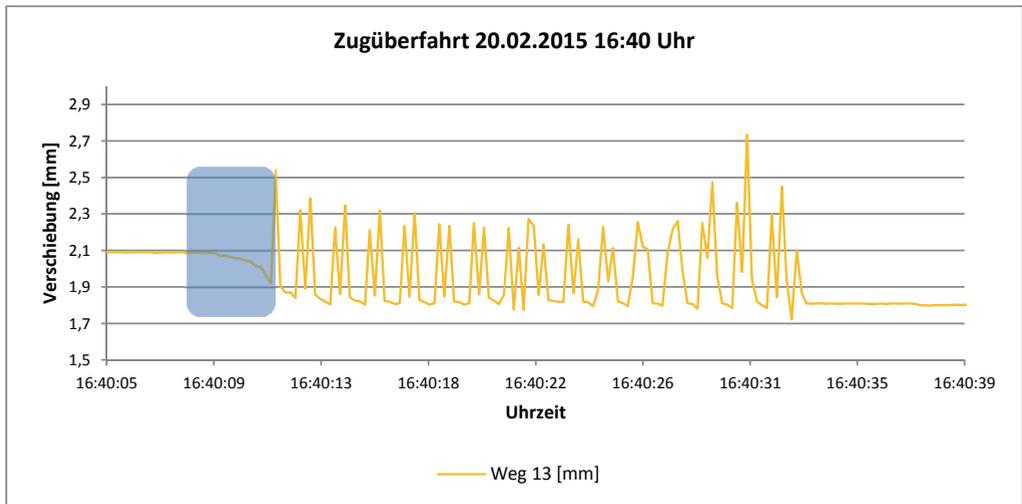


Abbildung 115: Zugüberfahrt am 20.02.2015 um 16:40 Uhr, Weg 13

²⁴ Das wahrscheinlichste Auftreten der Gleisverwerfung ist nach ILIEV im Bereich zwischen zwei Drehgestellen eines IC-Wagens. [17]

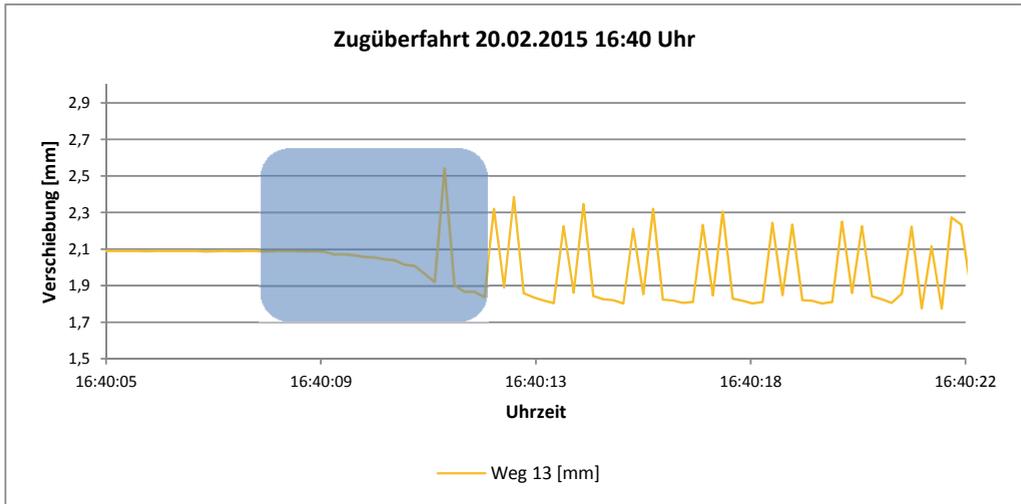


Abbildung 116: Detailanalyse der Zugüberfahrt am 20.02.2015 um 16:40 Uhr, Weg 13

Diese Theorie konnte, mit weiteren durchgeführten Auswertungen, verifiziert werden.

Um darüber hinaus jedoch noch mehr Ergebnisse zu erhalten, und zur Überprüfung der hier angeführten Theorien, ist zusätzlich noch eine Bogenatmungsmessung mit 190 m Radius entlang der Mittenwaldbahn geplant, welche im Zeitraum von Herbst 2015 bis Herbst 2016 vorgesehen ist.

6.3 Erkenntnisse aus den Messkampagnen

Die QVW-Messungen haben folgende Ergebnisse hervorgebracht:

- Der im Gleis gemessene QVW ist deutlich größer als der im Labor gemessene
- Die Gleismessungen zeigen große Sicherheitsreserven zu den in den Berechnungen verwendeten Daten
- Die Lage des Gleisrostes zum Zeitpunkt der QVW Messung ist entscheidend für deren Ergebnis
- Der 2 mm Wert zur Ermittlung des QVW ist nicht der maßgebende

Aus der Betrachtung der Bogenatmungsmessung lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Die Bogenatmung findet nicht gleichmäßig statt
- Die maximalen Bewegungen liegen bei 5 mm
- Die Bogenatmung steht nicht im direkten Zusammenhang mit dem QVW
- Die geringe vorhandene Bogenatmung trägt nur zu einer unwesentlichen Reduzierung der Schienenlängsspannung bei
- Schienenlängsspannungen können durch Belastungen abwandern
- Die Veränderung der Gleislage findet bereits in der Abhebewelle des ersten Drehgestells oder direkt danach statt, unabhängig von der Reihung der Lok im Zugverband
- Bremskräfte haben nur einen vernachlässigbar kleinen Anteil an den gesamten Schienenlängsspannungen
- Die Gleisrostbewegung aufgrund einer einzelnen Zugüberfahrt entspricht etwa der maximalen Bewegung des Gleisrostes (ohne Zugspitzen) eines Tages.

7 MASSNAHMEN ZUR VERBESSERUNG DER GLEISLAGESTABILITÄT IN ENGEN BÖGEN

Wenn es künftig im Sinne des Untersuchungszieles beabsichtigt ist, vermehrt auch in engeren Gleisbögen auf Stoßlücken zu verzichten, um dort ein lückenlos verschweißtes Gleis herzustellen, dann sollten entsprechend der Beurteilung der örtlichen Gegebenheiten erforderlichenfalls auch geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Gleislagestabilität ergriffen werden. Im folgenden Kapitel werden dazu einige Überlegungen aufgezeigt bzw. bestehende Möglichkeiten kurz beschrieben.

7.1 Stahlgüte verändern

Da die Härte der Schiene sehr gut mit deren Verschleißfestigkeit korreliert und ein feines Materialgefüge widerstandsfähiger gegen die Bildung von Rollkontaktermüdung ist, kann davon ausgegangen werden, dass je härter die Schiene bei möglichst gleichbleibender Viskosität ist, desto:

- geringer der Schienenverschleiß
- langsamer das Risswachstum
- weniger tief werden die Schlupfwellen sein

Neuartige Schienen mit geringeren Eigenspannungen können dazu beitragen, die gesamten Schienenspannungen in Bögen zu reduzieren. Hierdurch verringert sich die Zahl der Schienenfehler und das Risiko von Schienenbrüchen und Verformungen sinkt. [47]

7.2 Schienenprofil verändern

Da das Schienenprofil, wie in Abbildung 17 gezeigt wurde, auch den zulässigen Mindestradius für die Herstellung eines LV-Gleises beeinflusst, kann durch dessen geeignete Wahl ein positiver Effekt erreicht werden. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass die Fußbreite des neuen Profils gleich derjenigen der bislang jeweils verbauten Schienen ist (49E1 und 54E2 = 125 mm, 52 E1 und 60E1 = 150 mm), da ansonsten die Rippenplatten und Spannklemmen ausgetauscht werden müssen. Beispielsweise könnte, falls es die Belastung der Strecke erlaubt, durch den Einbau der Schiene 52E1 anstelle der 60E1 (Fußbreite = 150 mm) die Fläche der Schiene von 7687 mm² auf 6643 mm² reduziert werden. Hiermit entstehen geringere temperaturinduzierte Normalkräfte und in Verbindung mit den heutzutage höheren Stahlgüten sinkt neben der Gefahr von Schienenbrüchen und Rollkontaktermüdungen auch die der Gleisverformungen.

7.3 Schwellenform verändern

Weiterhin besteht die Möglichkeit, die Form der Schwellen zu verändern. Hierbei mögliche Schwellenformen aus Spannbeton sind:

- Rahmenschwellen
- Flachswellen
- HD Schwellen
- Ohrenschwellen und
- Normalschwellen mit Ohrensattel

Eine neue Entwicklung, welche derzeit in der Testphase (sowohl im Gleis der ÖBB als auch im Labor der TU München) steht, ist die BEHO Schwelle (Beton Schwelle mit den Maßen einer Holzschwelle). Sie soll durch Faserzusätze widerstandsfähiger gegen etwaige Entgleisungsschäden sein und hauptsächlich auf Nebenbahnen, sowie in Rangierbahnhöfen eingesetzt werden. QVW-Versuche sind Ende 2015 geplant.

Bei Rahmenschwellen können Probleme während des Stopfens auftreten. Aufgrund der großen Fläche der Schwelle und der zwei separaten Schwellenanteile, welche durch einen Steg miteinander verbunden sind, kann es zu unterschiedlichen Lagerbedingungen der einzelnen Schwellenteile kommen. Dies führt unter Umständen zur Rissbildung in den Rahmenverbindungen oder zu Instabilitäten der Schwelle.

Flachswellen oder HD-Schwellen sind mit ~450 Kg schwerer als die Normalschwellen B70 (~300 Kg), was eine größere Bodenpressung hervorruft und positiv im Sinne der Abhebewelle wirkt. Sie sind aber ca. doppelt so teuer wie die Schwelle B70 oder die Ohrenschwelle [48]. Letztere befindet sich derzeit in der Erprobung an der Technischen Universität München.

Die Normalschwelle mit Ohrensattel bringt als Vorteil eine größere Aufstandsfläche. QVW-Versuche zu dieser Schwelle / Kombination aus Schwelle und Sicherungskappe sind im nächsten Unterkapitel beschrieben.

Generell würde eine Verlängerung der Betonschwelle um 100 mm (von 2700 mm auf 2800 mm) die Schotterpressung um 9 – 12 % reduzieren. Dies erlaubt bei bisherigen Werten eine Erhöhung der freien Seitenbeschleunigung und somit eine Steigerung der zulässigen Geschwindigkeiten von bis zu 10 km/h [13], [49]. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass damit der Platzbedarf für den Querschnitt der Trasse steigt, und gerade im Bergland dieser oft nicht zur Verfügung steht und erhebliche Mehrkosten entstehen. Da die meisten der oben genannten Schwellen nicht automatisch verlegt werden können, sondern einzeln mit Schienenbaggern eingehoben werden müssen, und gleichzeitig die Sperrzeiten und Zeitfenster für Erneuerungen schrumpfen, finden diese Sonderbauarten bislang selten Anwendung.

7.4 Optimierungen bei der Verwendung von Sicherungskappen

Wie bereits im Abschnitt 3.1.3 beschrieben wurde, erhöhen Sicherungskappen (SIK) den Querverschiebewiderstand einer Schwelle.

Da die derzeit verwendeten SIK 6 auf Holzschwellen im Netz der ÖBB einen erhöhten Wartungsaufwand erfordern, wurde auch eine veränderte SIK konstruiert. Im Unterschied zur SIK 6, welche über den Schwellenrand gesteckt wird (Abbildung 117) und Schotterflächen unterhalb der Schwelle aktiviert, sollte die neue SIK in der Schienenachse ähnlich einer Ohrenschwelle mit einem vergrößerten Vorkopfwiderstand wirken. Der große Vorteil wäre hierbei der mögliche Einbau bei sehr geringen Schotterbettstärken, denn bei zu geringen Schotterbettstärken mussten die bisherigen SIK vielfach erst in situ auf die passende Länge zurechtgeschnitten werden. Durch eine Anordnung unter der Schiene kann die neue SIK mit der Rippenplatte kombiniert werden, wodurch zusätzliche Schraubverbindungen (Wartung und Sicherheit) entfallen. Des Weiteren kann diese sogenannte 'SIK Ohrensattel' bei Neuverlegung des Gleises automatisiert verlegt werden.



Abbildung 117: SIK 6 vor dem Einbau



Abbildung 118: SIK Ohrensattel auf Holz und Betonschwelle, Foto: [48]

Das Prüfamt für Verkehrswegebau der TU München hat hierfür Laborversuche zur Ermittlung des QVW mit einem für Österreich typischen Granitschotter durchgeführt

[50]. Die dort durchgeführten Versuche an unbelasteten Einzelschwellen im konsolidierten Oberbau ergaben, dass durch Einbau der SIK Ohrensattel der QVW nicht wesentlich gesteigert werden konnte. Es konnte der QVW einer Holzschwelle ohne SIK (7,1 N/mm) mithilfe der SIK Ohrensattel nur auf 7,75 N/mm (einseitiger Einbau) bzw. 8,25 N/mm (beidseitiger Einbau) angehoben werden. Unter Verwendung von unbeholzten Betonschwellen konnte lediglich eine Steigerung von 8,7 % erreicht werden (SIK²⁵9, 60 % Steigerung). Hierdurch hat sich bestätigt, dass insbesondere der Schotterbereich unter Schwellenaufast einen positiven Einfluss auf den QVW nimmt, während der eher lockere Schotter in den Schwellenzwischenfächern keine große Steigerung der Stabilität erzeugt. [50] Aus den hier genannten Gründen wird die Entwicklung der SIK Ohrensattel derzeit nicht weiter getestet bzw. verfolgt.

Ein weiterer Versuch zur optimierten Verwendung von SIK ist im Herbst 2015 auf der Karwendelbahn geplant. Hier sollen die SIK 6 beidseitig eingebaut werden, um den QVW noch weiter zu erhöhen. Es wird hiervon eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Mindestradien für ein LV-Gleises erwartet. Im Zuge dieser Untersuchung wird auch untersucht werden, welchen Einfluss die Lage der SIK (Außen- oder Innenschiene) auf den QVW hat. Diese Fragestellung ist insoweit von Interesse, als auf alten Bergstrecken teilweise im Bogeninneren nicht genügend Schotterbettstärke vorhanden ist, letztere aber auf Grund der Überhöhung auf der Bogenaußenseite durchaus in ausreichendem Maße vorhanden sein kann.

7.5 Besohlte Schwellen verwenden

Die Verwendung von besohnten Schwellen hat mehrere positive Effekte auf den Oberbau.

Es werden neben der besseren Abtragung der Lasten im Schotterbett auch die Vibrationen verringert. Durch ersteres wird die Last durch die größere Aufstandsfläche gleichmäßiger in den Schotterkörper eingetragen, somit ist die Belastung des einzelnen Schotterkorns geringer und die Abnutzungserscheinungen kleiner. Zweitens erfolgt die Abrundung der Schotterkörner langsamer, somit bleibt der QVW länger erhalten und die Kosten für die Instandhaltung werden geringer.

Besohlte Schwellen haben folgende Vorteile [51], [52]:

- Verbesserung der Gleislagequalität
- Verbesserung der Gleisstabilität
- Reduzierung der Schotterbettstärke
- Reduzierung von Körperschall und Erschütterungen möglich
- Reduzierung von Schlupfwellen in engen Kurvenradien
- Reduzierung der Instandhaltungsarbeiten durch längere Stopfzyklen

²⁵ Die SIK 6 ist für die Befestigung an Holzschwellen die SIK 9 für Betonschwellen konstruiert.

Durch die dickeren elasto-plastischen Schwellenbesohlungen wird neben den oben genannten Einflüssen auch die Lage der Schwelle im Schotterbett merklich verbessert²⁶. Es wird davon ausgegangen, dass durch deren Einsatz nahezu jede Schwelle „satt“ im Schotterbett liegt und somit die Lastübertragung ohne Schläge auf das Schotterbett erfolgt. Es wurde festgestellt, dass sich die wirksame Kontaktfläche des Schotters zur Schwelle von unbesohlenen (Beton-) Schwellen mit < 5% über Standardbesohlungen (EVA) mit 5,9 % bis auf 27,8 % (PUR) erhöht. [53]

7.6 Schotter verkleben

Bei einer Verklebung des Schotters erhöht sich der QVW, da die Atmung der Schwellen eingeschränkt und das Gefüge starrer wird. Es ist allerdings zu beachten, ob nicht zu große Kräfte auftreten, welche die Verklebung zerstören. Die Wiederverwendbarkeit und Umweltverträglichkeit der Verklebung ist laut den Herstellern nachgewiesen und problemlos durchführbar. [54] Es ist noch zu klären, wie groß der QVW einer Schwelle in einem verklebten Vorkopfschotterbett ist (quasi Kofferprofil), und welchen Einfluss diese Verklebung tatsächlich auf die GLS hat. Gerade bei geringen Schotterbettstärken könnte dies zu Problemen führen, da das verklebte Schotterbett durch seine zu geringe Eigenmasse die Kräfte aus dem Gleis nicht aufnehmen kann.

7.7 Veränderung der Rippenplatten

Rippenplatten auf Holzschwellen (Rph) werden im Eisenbahnoberbau dazu eingesetzt, die Schiene auf der Schwelle zu fixieren und somit möglichst dauerhaft einen Gleisrost mit hohem Verdreh- und Durchschubwiderstand auszubilden²⁷. Sie werden zwischen Schwelle und Schiene eingebaut. Es wird im Allgemeinen zwischen Strecken- und Weichenrippenplatten unterschieden, wobei hier auf letztere nicht eingegangen werden soll. In der folgenden Abbildung 119 ist eine Rippenplatte (Blau) auf einer Holzschwelle dargestellt.

Rippenplatten in ihrer bisherigen Ausführung bergen einige Schwachstellen. Neben dem Einarbeiten der Schiene in die Rippenplatte sowie dem Einarbeiten der Rippenplatte in die Holzschwelle, kann es durch Überbelastung zu einem Abscheren der Schwellenschrauben kommen.

²⁶ Bögen unter 500 m Radius sollen, um die Verwerfungssicherheit zu gewährleisten, nach Berechnungen von JERSCHOW keine Schwelle in Hohlage aufweisen. [63]

²⁷ Die vor allem in der Anfangszeit der Eisenbahn verwendeten Schienennägeln oder die unmittelbare Verschraubung der Schienen auf der Holzschwelle konnten diese Kriterien nicht erfüllen.

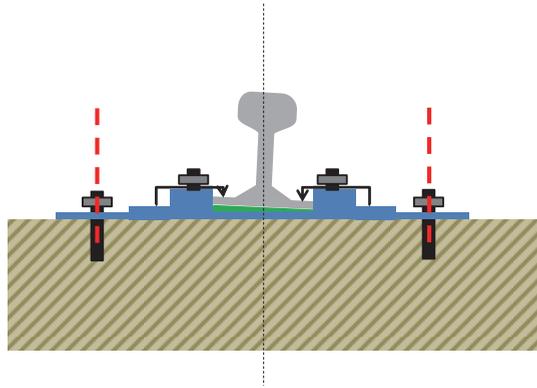


Abbildung 119: Schienenbefestigung mit Rippenplatten auf Holzschwelle (Schema)

Das Einarbeiten der Schiene in die Rippe der Rippenplatte geschieht hauptsächlich außenseitig in engen Bögen. Grund hierfür sind die zu weichen Rph's und die zu geringe Kontaktfläche der Rph zur Schiene (siehe Abbildung 120 und Abbildung 121). Gleichzeitig verliert die Spannklemme auf der gegenüberliegenden Schienenseite die Kontaktfläche und kann, wie in Abbildung 122 ersichtlich, vom Schienenfuß rutschen.

Als Gegenmaßnahme wäre die Ausführung der Rph in einer höheren Stahlgüte denkbar, wobei allerdings zu beachten ist, dass die Güte der Rippenplatte nicht höher sein darf als die der Schienen. Ein sonst entstehendes Einarbeiten der Rph in die Schiene muss um jeden Preis verhindert werden, da hier eine Verzahnung entstehen und weitere Spannungsspitzen in das Gleisbett eingebracht werden würden.

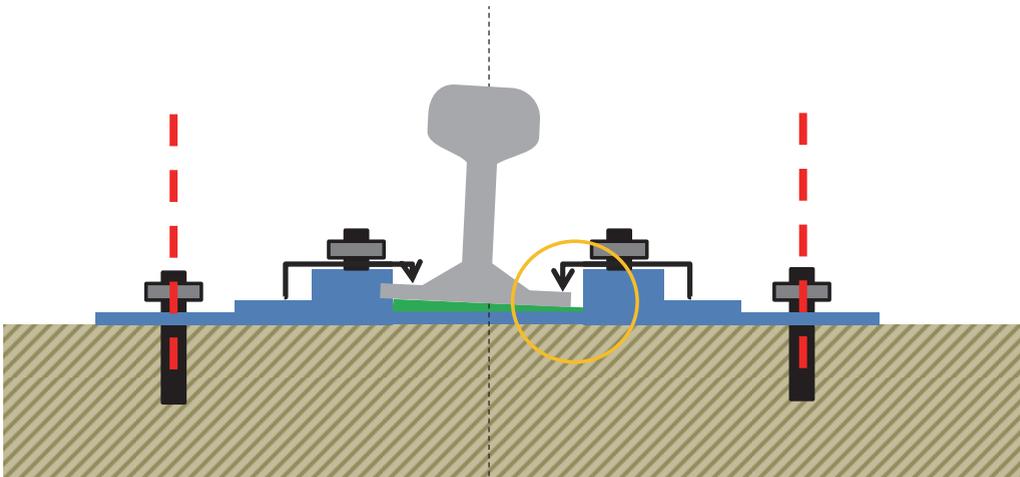


Abbildung 120: Eingearbeitete Schiene in der Rippenplatte, Schema



Abbildung 121: Eingearbeitete Schiene in der Rippenplatte

In obenstehender Abbildung ist rechts das Einarbeiten der Rph in die Holzschwelle zu erkennen. Dies kommt in engen Bögen außenseitig vor. Durch die zu geringe Lastübertragungsfläche der Rph auf die Schwelle arbeitet sich diese entlang der Faser in das Holz ein und kippt Richtung Bogenaußenseite. Hierdurch vergrößert sich die Spurweite und es kommt zu erhöhten Belastungen und mehr Verschleiß. Diesem Problem und der oben genannten geringen Übertragungsfläche Schiene - Rph kann durch eine Vergrößerung der Rph begegnet werden.

Auch sollten die Rph's mit der Schwelle verklebt werden (Abbildung 122 rechts). Durch eine derartige Versiegelung werden die Schraubenlöcher im Holz vor eindringendem Wasser geschützt, wodurch die Verschraubung auf der Schwelle langlebiger wird. Hierfür entstehen neben den reinen Materialkosten keine weiteren Aufwendungen.



Abbildung 122: Spannklemmen mit geringer Sicherheitsreserve und geklebte Rph

Das dritte oben angeführte Problem, die Überbelastung und das Abscheren der Schwellenschrauben, kommt neben den engen Bögen vor allem in Steigungs- und Gefällestrecken, sowie vor Fixpunkten (wie Weichen) vor. Hauptgrund hierfür sind durch Überdehnung geschwächte Schrauben, welche durch die erhöhten Lasten so dann abgesichert werden können. Diesem Effekt kann meist bereits durch sachgemäße Handhabung der Schwellenschrauben oder Ölen der Schrauben, sowie dem oben genannten Verkleben der Rph auf der Schwelle begegnet werden.

7.7.1 Mögliche Abmessungen für Rippenplatten

Um dem geschilderten Problem eines zu hohen Flächendrucks an den Kontaktstellen der Schiene zur Rph und der Rph zur Schwelle zu begegnen, soll nachfolgend untersucht werden, wie sich eine Variation der Abmessungen der Rippenplatte auf die Druckverhältnisse auswirkt, wobei nachstehende Rph 1 hinsichtlich ihrer Abmessungen als Bezugsfall dient.

Rippenplatte Rph 1

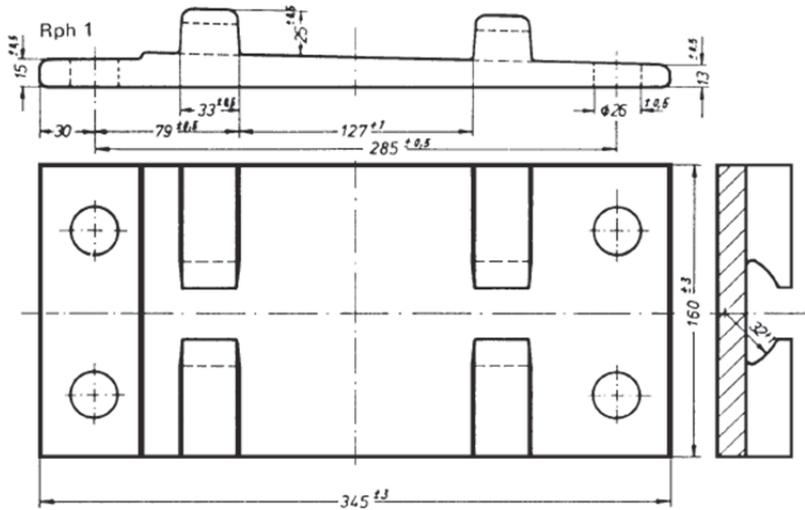


Abbildung 123: derzeitige Rippenplatte Rph1 [55]

Für eine Abschätzung der Veränderung der Flächenpressung wird folgendes vereinfachte Modell verwendet, in welchem die Rph in blau dargestellt ist, die Flächenpressung in grün und die Kräfte durch die Schwellenschrauben und die Schiene angreifen.

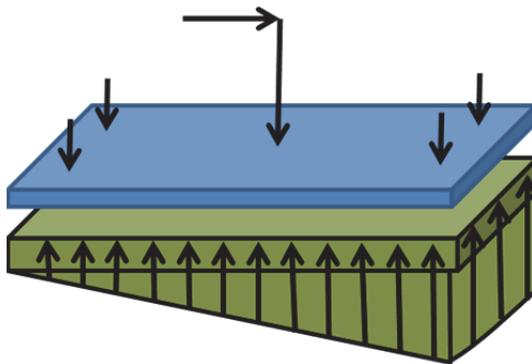


Abbildung 124: Vereinfachtes Modell der Rippenplatte

Hierbei werden als Horizontallast 50 kN in einem Abstand von 150 mm von der Rph-Unterkante, eine zentrale Auflast mit 120 kN, sowie Vorspannungen durch die vier Schrauben von je 15 kN aufgebracht. Es wird davon ausgegangen, dass die Vorspannung der Schrauben nicht über die Zeit nachlässt. Die Schraubenpositionen haben auf den Verlauf der Flächenpressung keine Auswirkungen, da sie symmetrisch um den Schwerpunkt der Rph angeordnet sind. Der Abstand zur Mittellinie wird erst für eine genauere Betrachtung interessant (Biegung, Wölbung, ...). Der dadurch entstehende Flächendruck wird unterteilt in eine Rechtecks- sowie eine Dreiecksspannung.

In einem ersten Schritt wird die Breite der Rippenplatte in Schritten von 5 mm unter Beibehaltung der Länge der Rph von 345 mm erweitert, und jeweils der Flächendruck errechnet. (Hierbei ist als linkes Rph-Ende die Gleisinnenseite und das rechte Rph-Ende als die Bogenaußenseite definiert.)

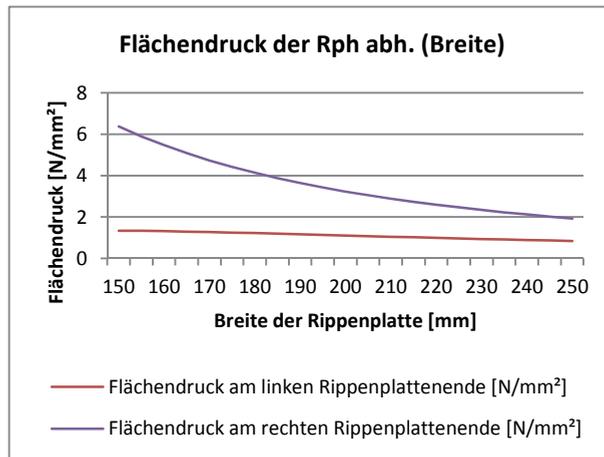


Abbildung 125: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Breite der Rph

Für die Bogenaußenseite (hier rechtes Rippenplattenende) ist eine Verbreiterung der Rph von großem Vorteil. Die hier auftretenden Spannungen gehen stark zurück und somit kann einem Einarbeiten der Rph in die Schwelle effektiv entgegengewirkt werden.

In einem nächsten Schritt wird die Rph in 5 mm Schritten verlängert, unter Beibehaltung der Breite von 150 mm.

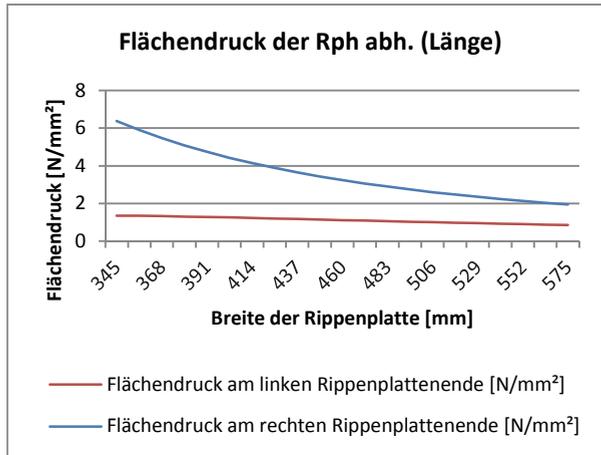


Abbildung 126: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Länge der Rph

Unter Veränderung der Länge sinkt die Flächenpressung am rechten Rph-Ende nahezu linear. Eine reine Verlängerung der Rph scheint im Verhältnis zur Verbreiterung ein geringeres Potential zu haben.

Im dritten Schritt der Untersuchung wird die Breite und Länge verändert, wobei das Verhältnis der beiden zueinander festgesetzt ist (nach aktuellem Verhältnis $l/b = 2,3$). Da die Breite maßgebender scheint, wird diese in Schritten von 5 mm erweitert und die Länge im Verhältnis dazu angehoben. Es ist erkennbar, dass hierbei der Flächendruck auf der maßgebenden Seite stark abnimmt, wobei eine Länge der Rippenplatte von 575 mm sicherlich nicht realisierbar scheint.

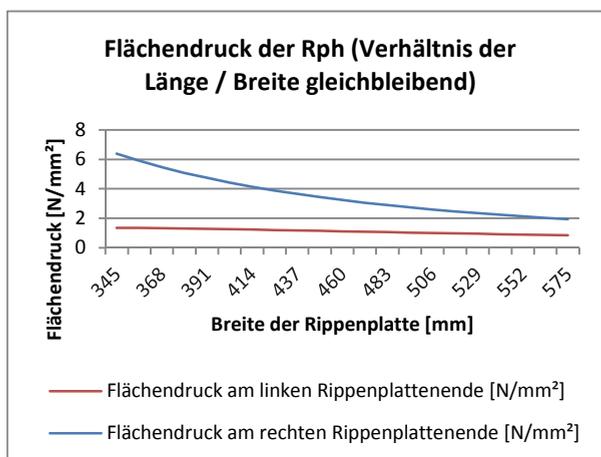


Abbildung 127: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Länge und Breite bei gleichbleibendem Verhältnis Länge / Breite = 2,3

Bei allen hier gezeigten Berechnungen entsteht keine klaffende Fuge (negativer Flächendruck) an der linken inneren Rph-Seite.

Da die Fläche der Rippenplatte einen entscheidenden Einfluss auf den Preis hat, sind nachfolgend die verschiedenen Möglichkeiten gegenübergestellt, wobei nur der maßgebende Flächendruck am rechten Rippenplattenende betrachtet wird. Da für die Länge und Breite verschiedene Grenzwerte vorhanden sind, wird jeweils nur bis zu deren Werten der Verlauf dargestellt. Im Vergleich ist erkennbar, dass die Veränderung der Länge mit den geringsten Kosten einhergeht. Die größte Entlastung ist bei Gleichbehalt des Verhältnisses der Länge zur Breite zu erwarten.

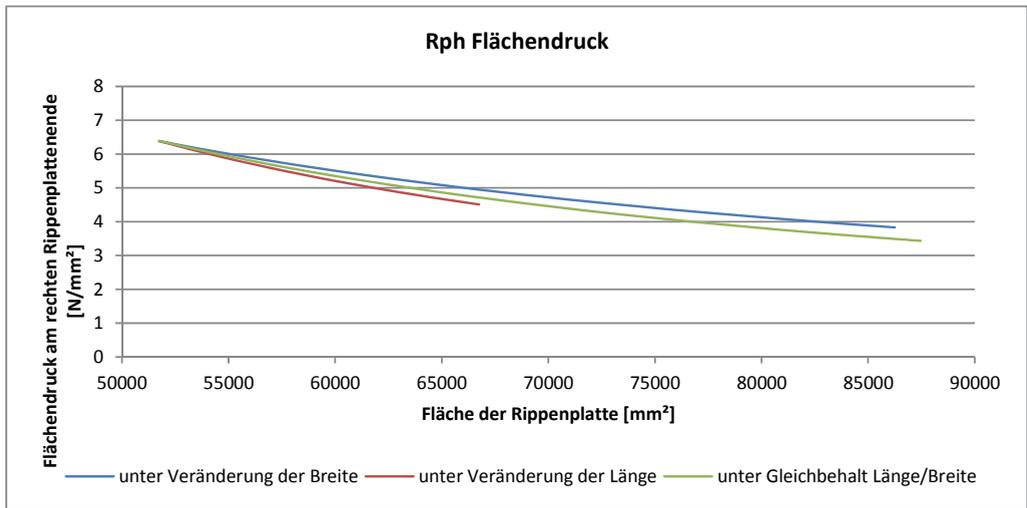


Abbildung 128: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle im Verhältnis zur Fläche der Rippenplatte

Aufgrund der obigen Überlegungen wurden vier vergrößerte Rippenplatten gemeinsam mit den ÖBB konstruiert und zwar basierend auf der Rph1 und Rph 6 eine Rph XL und eine Rph XXL (siehe Abbildung 129 und Abbildung 130).

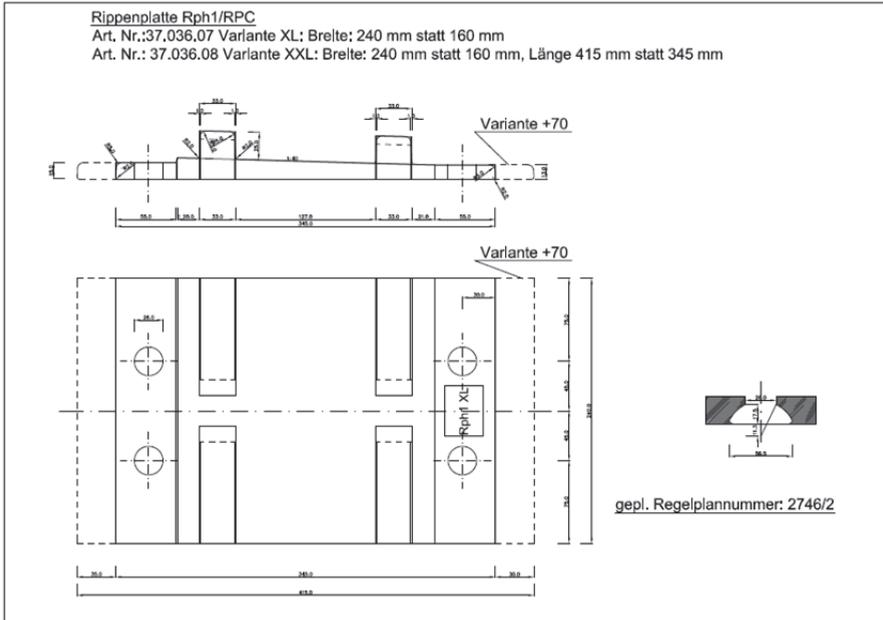


Abbildung 129: Rph 1 XL und XXL basierend auf der Rph 1 [48]

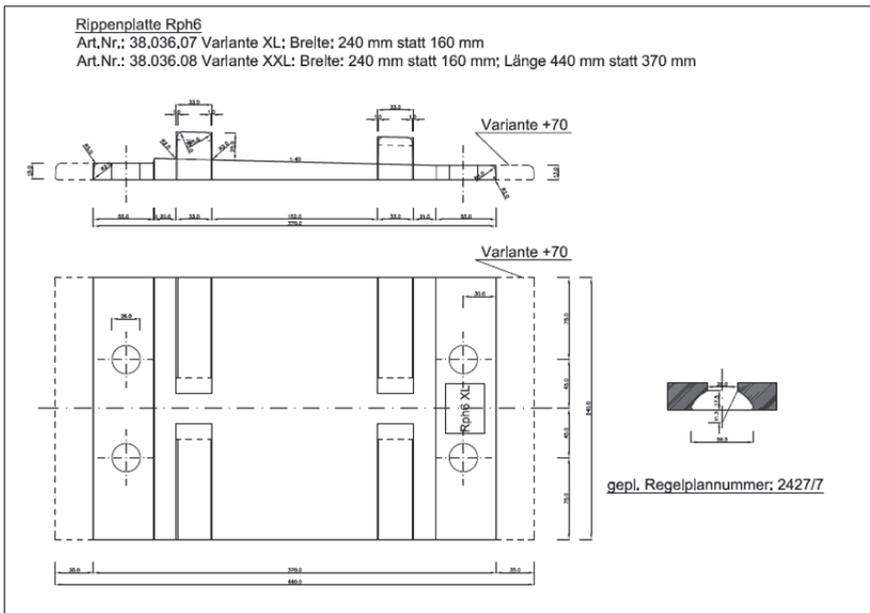


Abbildung 130: Rph 6 XL und XXL basierend auf der Rph 6 [48]

7.7.2 Einbau der vergrößerten Rippenplatten

Die vergrößerten Rippenplatten mit der Bezeichnung „Rph 1 XL“ wurden bereits teilweise während der Arlbergsperrung im Herbst 2014 u.a. bei km 117,4 nahe Wald am Arlberg eingebaut. In den zwei folgenden Abbildungen sind die neuen Rippenplatten auf neuen Schwellen sowie die alten Rippenplatten auf Schwellen aus dem Jahr 1986 zu sehen.



Abbildung 131: Rph 1 XL auf neuen Schwellen



Abbildung 132: Rph 1 XL im Vergleich zur bisherigen RP C

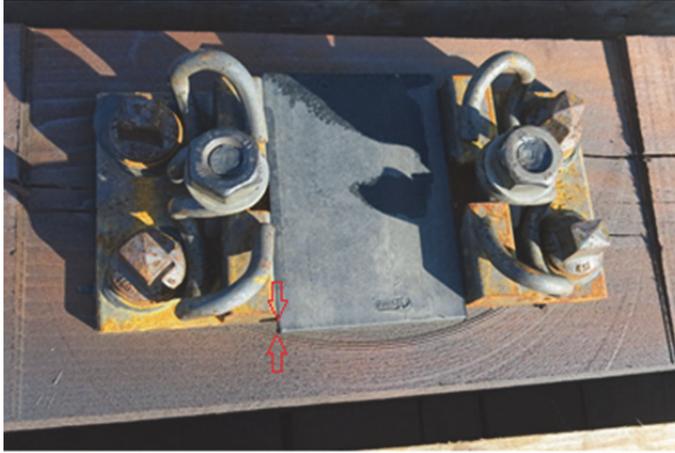


Abbildung 133: Holzschwelle mit vormontierter Rph und Zwischenlage ZW, bereit zum Einbau



Abbildung 134: Rph, Rph XL und Rph XXL im Vergleich

Beim Einbau der neuen Schwellen, mit vormontierten Zwischenlagen und Rph 1 XL wurde festgestellt, dass die Zwischenlagen (ZW) aufgrund der überstehenden Nase herunterfallen können. Dies ist damit zu erklären, dass der in Abbildung 133 dargestellte Überhang der ZW („Nase“, welche nötig ist um ein Verrutschen der ZW zu verhindern, siehe Abbildung 135) durch die breiten Rph 1 XL bereits über die Schwelle hinausragten, wenn die jeweiligen Fertigungstoleranzen ausgenützt werden. Sie werden sodann vom Schnellumbauzug (SUZ) beim maschinellen Verlegen durch das Abheben der benachbarten Schwellen erfasst und abgeworfen - dies führt zu einem weiteren Arbeitsschritt. Eine geringfügige Anpassung der Breite ist demnach noch sinnvoll. Ob sich die Erwartung an die eingebauten Rph XL hinsichtlich einer Reduzierung des Einarbeitens erfüllen, wird sich zeigen.



Abbildung 135: Zwischenlage mit "Nasen"

7.8 Schienenfarbe verändern

Wie in Kapitel 2.1 erwähnt wurde, ist die Schienentemperatur auch von der Farbe der Schiene abhängig, womit es nahe lag zu untersuchen, in wie weit die Erwärmung der Schiene durch eine erhöhte Reflexion der Oberfläche vermindert werden kann und welche Farbe zu den besten Ergebnissen führt.

Hierzu wurden drei einzelne Schienenstücke (UIC 54 E2) à 50 cm mit Temperatursensoren ausgestattet und über längere Zeit auf eine nicht verschattete Ebene (Dach des Instituts) gelegt. Zwei der drei Schienen wurden mit Farbe lackiert, um diesen Einfluss zu überprüfen (siehe Abbildungen 136), wobei die Lauffläche jeweils ausgespart blieb, um näher an der Realität im Betriebsgleis zu sein²⁸.

- Schiene 1 („Natur“): wurde nicht lackiert und diente als Referenzmessung
- Schiene 2 („Weiß“): wurde mit einem handelsüblichen weißen Kunstharz-Emaill-Lack lackiert. Die Farbe wurde in zwei Lagen aufgebracht.
- Schiene 3 („Silber“): wurde mit einem handelsüblichen Felgensilber lackiert. Die Farbe wurde in zwei Lagen aufgebracht. Es sollte somit ein Kompromiss aus weißer Farbe und sich einstellender Verschmutzung simuliert werden.

Es wurden keine besonderen Lacke mit z.B. Nanobeschichtung (zur evtl. besseren Reinigung) oder ähnlichem getestet.

Die Schienen wurden quer zur Südrichtung und parallel zu einander in einem Abstand von 50 cm positioniert, um eine gegenseitige Verschattung und einen möglichen Temperatureinfluss auszuschließen. Sie wurden auf Holzklötzen mit einem einheitlichen Abstand über dem Dach montiert, um einem direkten Einfluss der schwarzen Dachpappe zu entgehen. Alle anderen Einflüsse sind für alle drei Schienen einheitlich (z.B. ein indirekter Einfluss durch eine oberflächennahe Erwärmung der Luft durch die schwarze Dachpappe). Die Temperaturmessstation wurde seitlich an das Dach angebracht und misst sowohl die Lufttemperatur, als auch die Luftfeuchtigkeit. Bei Ersterer wurden durch den geschützten Ort der Station und durch die Nähe der Dachlüftung etwas höhere Werte erzielt (Abbildung 138), wodurch die tatsächliche Temperatur der Schienen kälter sein kann als die vor Ort gemessene Lufttemperatur. Die Temperaturmessung wurde mit den Messdaten der ZAMG am Flughafen Innsbruck verglichen (Abbildung 140). Es war daraufhin zu erkennen, dass die ca. 1000 Meter entfernte Messstation am Flughafen geringere Werte liefert, welche im Weiteren als Basis genutzt wurden, da der Einfluss der Dachöffnung zu groß erschien.

Die Dauermessung der Schienentemperatur wurde auf der Schattenseite des Schienenstegs (Position 5 siehe Abbildung 137) durchgeführt. Hierzu wurde der Temperatursensor mithilfe einer Schraube an der Schiene befestigt und thermisch von dieser

²⁸ Gerade bei engen Gleisbögen unterliegt der Schienenkopf der bogenäußeren Schiene darüber hinaus auch an den Flanken einem starken Verschleiß, was beim Farbauftrag in dieser Versuchsanordnung jedoch unberücksichtigt blieb.

entkoppelt. Zur Überprüfung wurden an den übrigen Messpunkten mehrmals mit dem Temperaturhandmessgerät *ama-digit* Daten erhoben. Diese Messungen ergaben, dass die Abweichung der Dauermessung zur händischen Messung bei maximal 3°C in den erwarteten Schwankungsbreiten liegen.



Abbildungen 136: Schienentemperaturmessungen (2)



Abbildung 137: links Messpunkte der Temperaturmessung

Abbildung 138: rechts Temperatur und Feuchtigkeitsmessstelle



Abbildung 139: Ama-Digital Messgerät

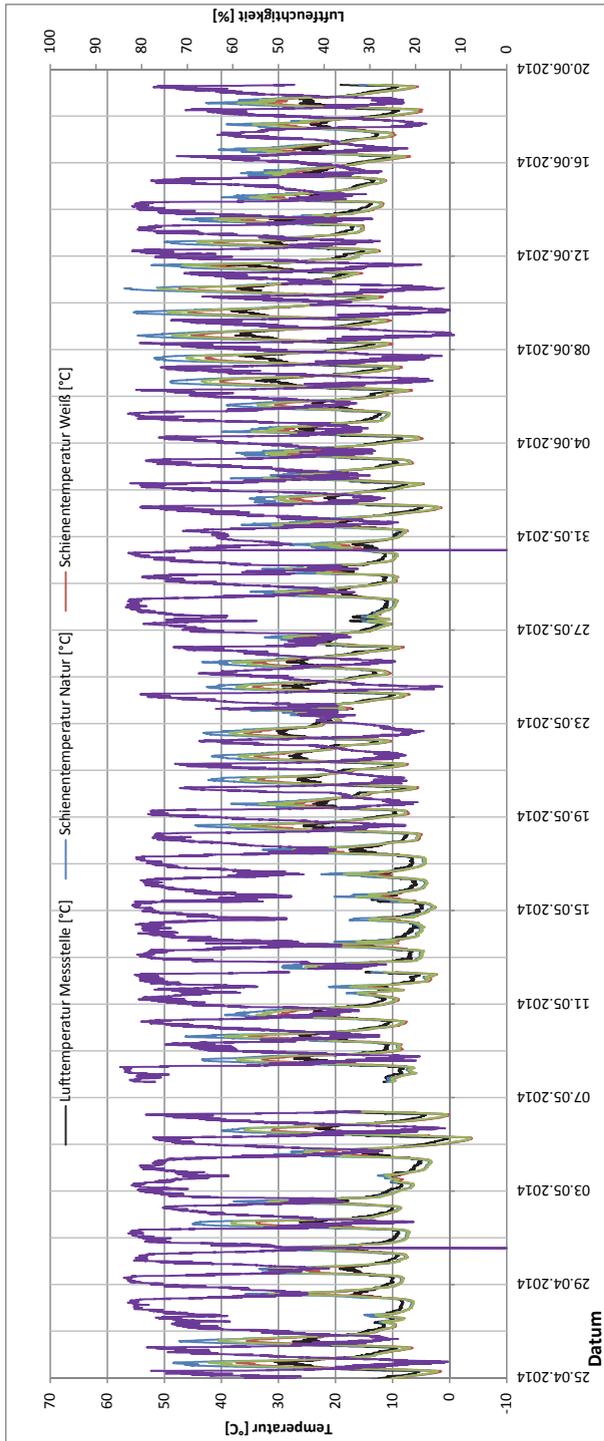


Abbildung 140: Dauermessschrieb der Schienentemperaturmessung

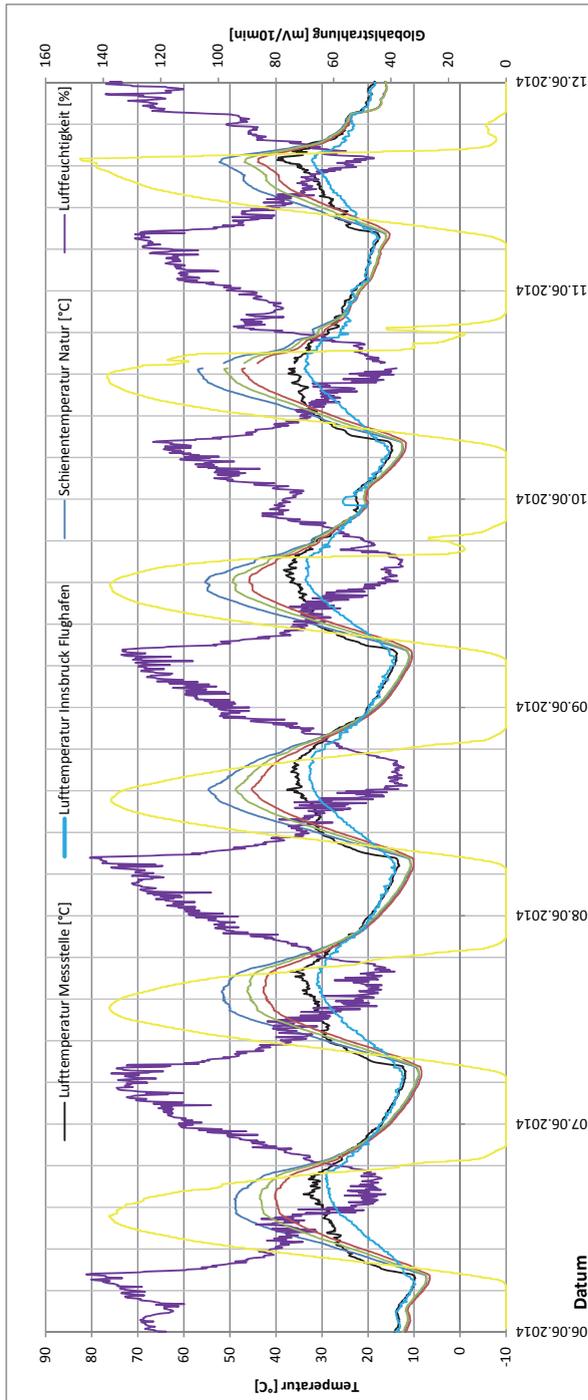


Abbildung 141: Schienentemperaturmessung – Tagesauswahl für den 06.06.2014 – 12.06.2014 (Quelle: Eigene Messungen und [56])

Die in der Messstation erhobenen und von der ZAMG [56] zur Verfügung gestellten Daten sind in Abbildung 143 dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass

- die Schienen nachts unabhängig von ihrer Farbgebung bis auf dieselbe Temperatur auskühlen. Die bleibenden Unterschiede liegen in einem Bereich von 1 °C und sind der Messtoleranz zuzuschreiben. Dies zeigt jedoch, dass die Sensoren gut eingestellt sind und für alle Schienen gleiche Bedingungen herrschen.
- die Lufttemperatur sich nachts auf einem höheren Niveau als die der Schienen befindet. Dies kann durch den „Wind-chill“ hervorgerufen werden, da die Schienen ohne Abschattung auf dem Dach dem Wind ausgesetzt sind, die beiden Wetterstationen (am Flughafen und die eigene am Campus der Technischen Wissenschaften der Universität) hingegen an windgeschützten Orten aufgestellt sind.
- kühlende Einflüsse wie Wolken unabhängig von der Schienenlackierung und mit einer deutlichen Zeitverzögerung erkennbar sind.
- die maximalen Schienentemperaturen deutlich von der gewählten Farbe abhängen und sich die Temperaturkurven nicht nur in deren Verlauf sondern auch in deren Extremwerten unterscheiden.

Die höchste Lufttemperatur gemessen am Flughafen Innsbruck betrug im Messzeitraum knapp 34 °C. Die hierbei größte Schienentemperatur (Naturschiene) lag bei 57 °C. Die höchste Lufttemperatur, welche in den Jahren 1990 bis 2013 an bergstreckenrelevanten Positionen in Österreich gemessen wurde, beträgt 38,1 °C (siehe Tabelle 6). Es muss also für die Berechnungen, wie auch schon PRAGER [5] feststellte, mindestens von einer maximalen Schienentemperatur von 60 °C ausgegangen werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen nun die Auswertungen der Messergebnisse (8200 Messwerte für den Zeitraum vom 24.04.2014 bis 19.06.2014).

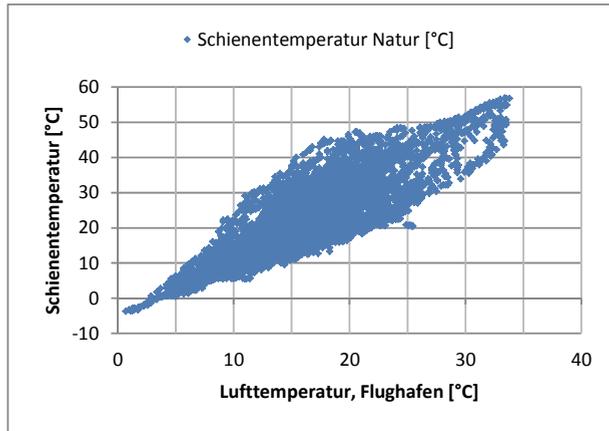


Abbildung 142: Schienentemperaturwerte Natur

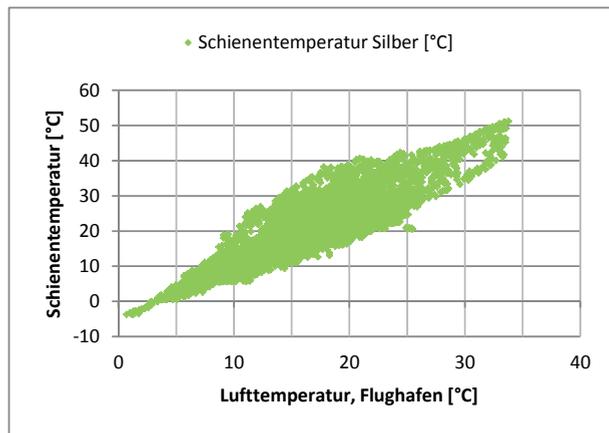


Abbildung 143: Schienentemperaturwerte Silber

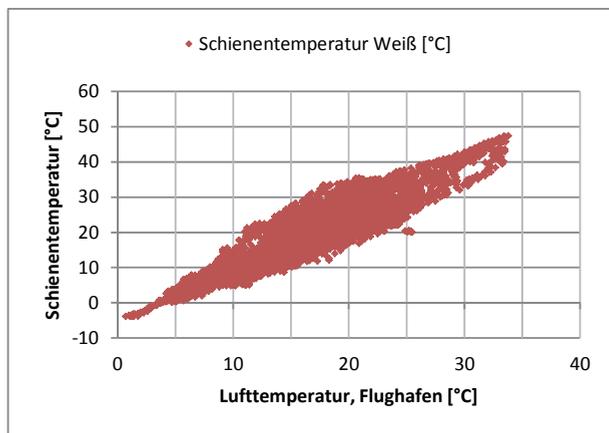


Abbildung 144: Schienentemperaturwerte Weiß

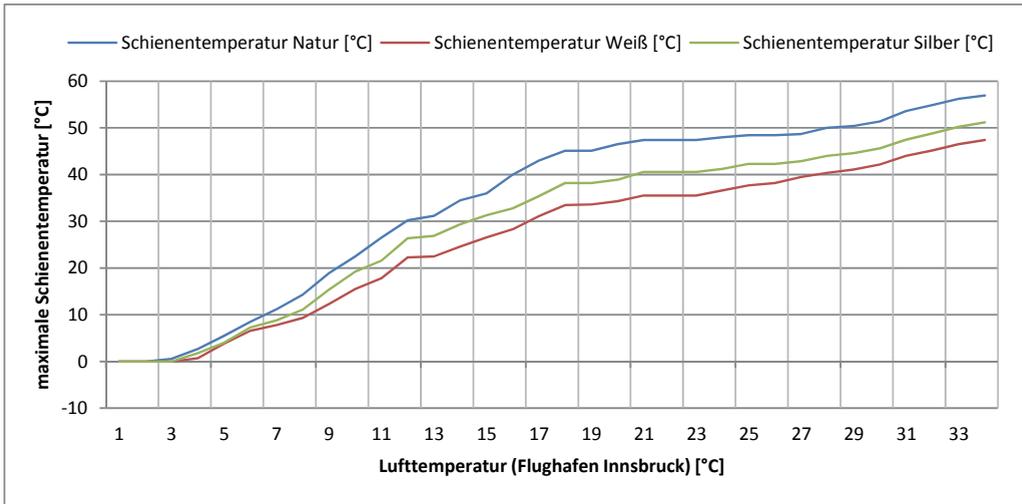


Abbildung 145: Schienentemperaturmaxima der verschiedenen Schienen

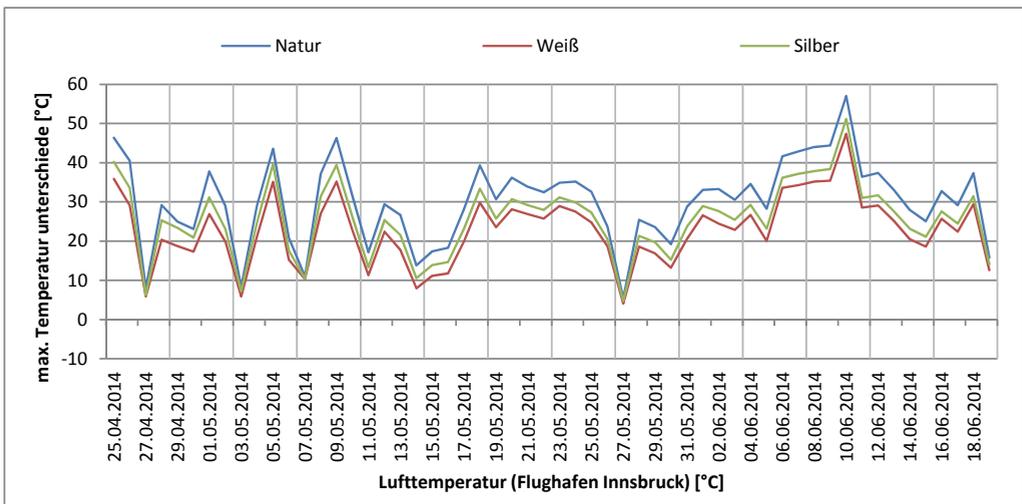


Abbildung 146: Die maximal auftretenden täglichen Temperaturunterschiede der Schienen

Wie in obenstehenden Grafiken erkennbar ist, könnte durch den Einsatz weißer Schienen die anzusetzende Schienenmaximaltemperatur um bis zu 10 °C gesenkt werden. Da es allerdings in situ durch Staub und Abrieb nicht vorstellbar erscheint, weiße Schienen dauerhaft in dieser Farbe zu erhalten, wurde eine Schiene mit silberner Farbe lackiert. Es wurde festgestellt, dass diese noch ca. 5 °C Temperaturunterschied bringen kann.

Unter Anwendung der Formeln (4-4) kann mit einer um 5 °C verringerten Maximaltemperatur der minimale Radius für LV- Gleise von 200 m auf 180 m gesenkt werden

(Holzschwellen Bu 1 mit Schienen 49 E1 verbreitertem Schotterbett und SIK an jeder Schwelle).

Mit der beschriebenen Handmessung konnte festgestellt werden, dass es an der Oberfläche der Schiene zu Temperaturunterschieden kommen kann, diese allerdings in einem Bereich von wenigen °C bleiben. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Temperatur nahezu gleichmäßig über den Querschnitt verteilt ist und es zu keinen zusätzlichen Kräften durch Biegespannungen der Schiene kommt.

Händische Messung mit *ama-digit*

Messort und Temperaturen [°C] bei Schiene	"Natur"	"Weiß"	"Silber"
Schienenfahrspiegel	54	48	51
Schienenkopf, Sonne	53	48	52
Schienenkopf, Schatten	52	48	52
Schienensteg, Sonne	54	47	51
Schienensteg, Schatten	52	47	50
Schienenfuß, Sonne	52	46	49
Schienenfuß, Schatten	52	45	49
<i>Zum Vergleich</i>			
Automatische Messung Steg, Schatten	55	47	51

Tabelle 9: Beispiel einer Schienenoberflächentemperaturmessung

Die mit einer Wärmebildkamera (*Varioscan, high resolution*) aufgenommenen Bilder sind im Folgenden dargestellt. Die Bilder wurden zur Mittagszeit aufgenommen, wobei die Sonne bereits nur noch eine Seite der Schiene beschienen hat und die andere im Schatten lag. Auch mit diesen Aufnahmen kann gezeigt werden, dass sowohl auf Sonnen- wie auch auf Schattenseite die Temperaturunterschiede über den Querschnitt der Schiene bei wenigen °C liegen, wobei die absoluten Unterschiede der Schienen zueinander bis zu 10 °C betragen.

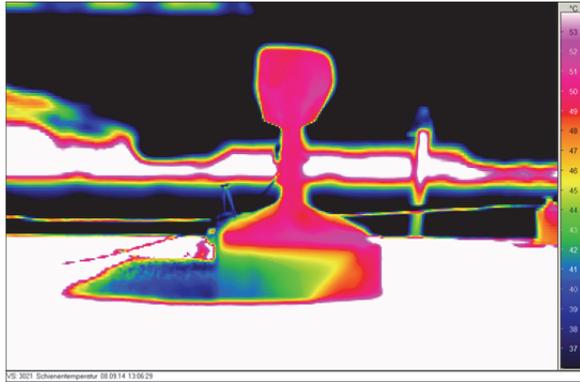


Abbildung 147: Wärmebild, Naturschiene, Sonnenseite

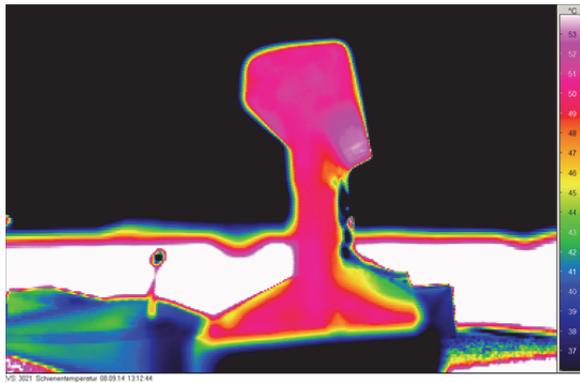


Abbildung 148: Wärmebild, Naturschiene, Schattenseite

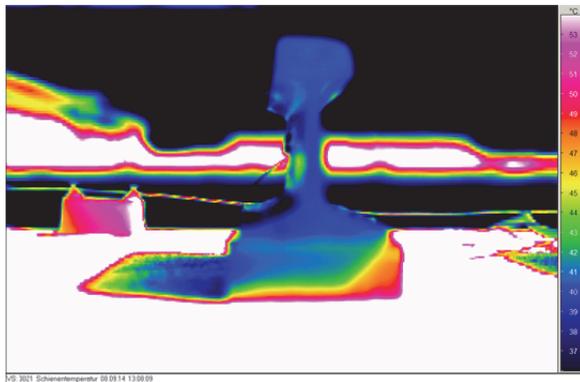


Abbildung 149: Wärmebild, weiße Schiene, Sonnenseite

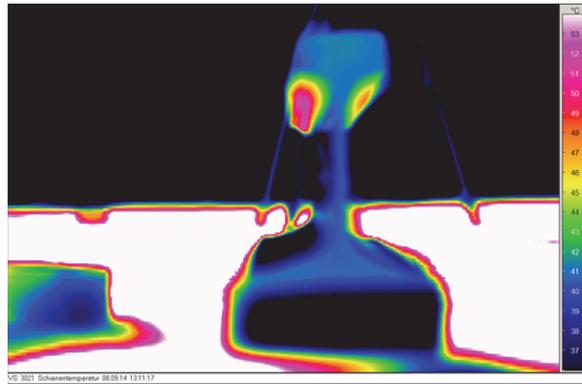


Abbildung 150: Wärmebild, weiße Schiene, Schattenseite

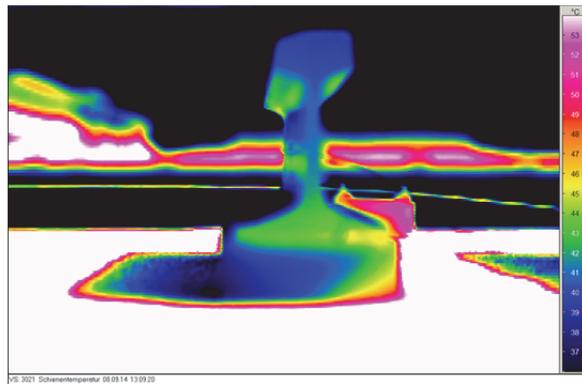


Abbildung 151: Wärmebild, Silberschiene, Sonnenseite

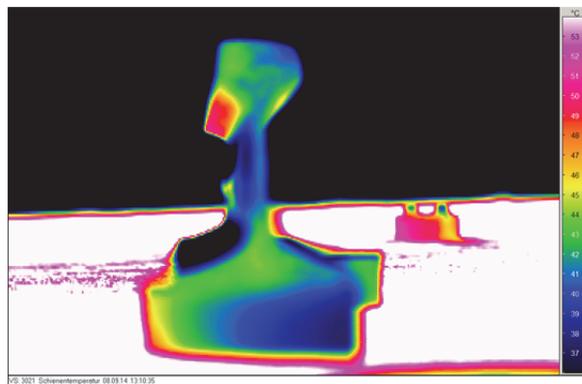


Abbildung 152: Wärmebild, Silberschiene, Schattenseite

Es kann festgestellt werden, dass es derzeit zwar nicht als Standardlösung zu empfehlen ist, allerdings die Überlegung durchaus angestellt werden kann, einen bestimmten Schienenabschnitt mit weißer Farbe zu lackieren und die Bewegungsunterschiede und möglichen positiven Effekte zu erfassen. Es würde sich aufgrund von Verschmutzung und anderer Einflüsse ein Temperaturverhalten ähnlich dem der silbernen Schiene einstellen. Hierbei wäre es wichtig, den zu überwachenden Bogen mitsamt den Übergangsbögen zu lackieren. Zu klären wäre hierbei noch das veränderte Verhalten der Schiene durch die Lackierung in Bezug auf das Rosten der Schiene und den nötigen Oberbauerhaltungsmaßnahmen.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit hat sich dem Thema der Gleislagestabilität beim Schottergleis in engen Bögen gewidmet. Neben theoretischen Überlegungen und Berechnungen, sowie Versuchen unter Laborbedingungen wurde besonderes Augenmerk auf die Versuche im Betriebsgleis gelegt. Die Untersuchung wurde dazu aufgeteilt in 3 große Blöcke:

- Einwirkungen auf den Gleisrost sowie Widerstände des Oberbaus gegen Lageveränderungen: Methoden zur Stabilitätsberechnung des Eisenbahngleises,
- durchgeführte Messungen im Gleis und
- mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Gleislagestabilität und weitere Forschungsfragen.

8.1 Einwirkungen auf den Gleisrost sowie Widerstände des Oberbaus gegen Lageveränderungen: Methoden zur Stabilitätsberechnung des Eisenbahngleises

Die maßgeblichen Einwirkungen auf die horizontale Stabilität eines Eisenbahngleises sind die Normalkraft durch Temperaturänderungen, die vorhandenen Gleislagefehler, auftretende Brems- und Beschleunigungskräfte sowie die freie Bogenatmung. Daneben sind die vorhandenen Untergrundeinflüsse, Spannungen, welche durch das Verschweißen entstehen, und überfahrtsbedingte Kräfte zu nennen.

Um die temperaturinduzierte Normalkraft vorherzusagen ist es möglich, auftretende Lufttemperaturen in die maximal vorhandenen Schienentemperaturen umzurechnen. Die bereits durchgeführten Berechnungen von PRAGER konnten mit Hilfe von Versuchen im Labor und in situ bestätigt werden.

Da nicht nur ein streng gerades, sondern generell ein exakt der Trassierungslinie folgendes Gleis im Schotteroberbau in der Praxis nie vorhanden ist und die Inhomogenitäten des Oberbaus zu Spannungsspitzen führen können, ist die kontinuierliche Wartung und Instandhaltung des Oberbaus von großer Bedeutung. Gerade auf Bergstrecken dürfen Brems- und Beschleunigungskräfte der Fahrzeuge nicht vernachlässigt werden. Sie werden daher in den Berechnungen mit einem gesonderten Sicherheitsfaktor berücksichtigt.

Alle vorgenannten Einwirkungen würden laterale Verschiebungen des Gleises von mehreren cm mit all ihren Folgen für den Eisenbahnbetrieb hervorrufen. Um u.a. diese zu verhindern, besitzt der Oberbau Eigenschaften, die als Widerstände den Einwirkungen entgegenwirken. Hierbei sind der Querverschiebewiderstand und der Längsverschiebewiderstand der Schwellen sowie der Verdrehwiderstand zwischen Schiene und Schwelle, der Durchschubwiderstand der Schienenbefestigung und die Biegesteifigkeit des Gleisrostes zu nennen. Von all diesen Widerständen ist der QVW der entscheidendste, da er alle Berechnungsmethoden zur Gleislagestabilität stark beeinflusst. Da unabhängig von der gewählten Berechnungsmethode das Ergebnis durch

eine Veränderung des QVW stark variiert, wurde dieser als wichtigster Eingangsparameter genauer untersucht.

8.2 Durchgeführte Messungen im Gleis

Im Zuge dieser Untersuchungen wurden insgesamt über 60 Schwellen horizontal, senkrecht zur Gleisachse, verschoben. Hierzu wurde (in Anlehnung an die bei der TU München sowie bei der DB-Systemtechnik verwendeten Apparate) eine Messeinrichtung konstruiert, welche das Verschieben innerhalb von Zugpausen ohne Gleissperungen ermöglicht. Anfangs wurde der hydraulische Druck für den Messzylinder mittels einer Handpumpe erzeugt, im weiteren Verlauf dann mittels Kompressor, nachdem eine Vergleichsmessung gezeigt hatte, dass kein Unterschied zwischen Handpumpen mit Druckabfall und kontinuierlichem Druckaufbau mittels Kompressor besteht.

Um einen Vergleich der gemessenen Werte zu den in der Literatur beschriebenen anstellen zu können, ist es nötig zu wissen, dass die Literaturwerte meist auf Labormessungen beruhen. Mit diesen Werten ist es daher möglich, Veränderungen und Weiterentwicklungen unter Laborbedingungen zu vergleichen, ohne in das Betriebsgeschehen einzugreifen. QVW Messungen im Betriebsgleis haben gezeigt, dass die dort gefundenen Werte im Allgemeinen über denen im Labor oder den in der Literatur beschriebenen liegen, es sind daher noch Sicherheitsreserven im System vorhanden. Festzustellen war, dass die Streuungen der gemessenen Werte bei konsolidierten Schwellen sehr hoch sind, diese können allerdings mittels einer Stopfung und darauf folgenden Stabilisierung kurzzeitig verringert werden. Eine langzeitige Verringerung der Streuungen und Anzahl der hohl liegenden Schwellen ist durch den Einbau von beschliffenen Schwellen erreichbar.

Generell sollten keine Stopfungen ohne dynamischen Gleisstabilisator durchgeführt werden. Auch sollten Gleisbaumaßnahmen mit Erhaltungsstopfungen nicht kurz vor Hitzeperioden durchgeführt werden, da direkt nach einer Stopfung der QVW deutlich herabgesetzt ist.

Vor Durchführung einer QVW-Messung muss die Lage des Gleisrostes bekannt sein. Durch das Atmen des Gleisbogens entsteht bei kalten Temperaturen eine Lücke zwischen äußerer Schwellenstirnseite und Schotterbett, welche größer als 2 mm sein kann. Da aber für die Berechnungen bisher der QVW bei einer Verschiebung von 2 mm als ausschlaggebender Wert bezeichnet wurde, wäre eine solche Messung lediglich der Anteil des QVW aus den Seitenflächen und Bodenflächen der Schwelle. Es ist daher und auch aufgrund des Verlaufs der Kraft-Weg Diagramme zu diskutieren, ob der 2 mm Wert des QVW der maßgebende sein kann. Der viel beschriebene „Knick“ in den Messschrieben bei 2 mm, welcher ein Gleiten der Schwelle induzieren soll, wurde bei den Messungen tatsächlich in einem Bereich zwischen 1 mm und 4 mm festgestellt. Dennoch wäre ein Beibehalten des bisherigen 2 mm Wertes im Vergleich zu einem andiskutierten 3 mm Wert sinnvoll, da er kleiner ist und somit mehr Sicherheiten enthält. Die Messungen haben außerdem gezeigt, dass eingefahrene Holzschwellen mit einem QVW von 10 N/mm gerechnet werden können. Unmittelbar nach dem Stopfen und Stabilisieren wurden bei Holzschwellen hingegen nur

noch 5 N/mm gemessen.

Für den Umbau von einem Holzschwellengleis mit Sicherungskappen SIK 6 und nachgeführtem Stopfen und Stabilisieren kann weiterhin mit einem QVW von 10 N/mm gerechnet werden, ein Wert, welcher aber mit eintretender Konsolidierung stark (gemessen bis zu 21 N/mm) ansteigt. Unbesohlte Betonschwellen liegen im eingefahrenen Zustand bei 26 N/mm und besohlte Betonschwellen bei 29 N/mm. Die Besohlung hat somit einen positiven Einfluss auf die Gleislagestabilität.

Um die Gleislagestabilität nicht nur über den Querverschiebewiderstand zu definieren, sondern auch die Bewegungen eines Gleisbogens besser kennen zu lernen, wurde der Brazer Bogen (Radius = 249,5 m bei einer Bogenlänge = 380 m) mehr als ein Jahr lang mittels einer Dauermessstelle mit Datenfernübertragung beobachtet. Da dieser Bogen während des Beobachtungszeitraums umgebaut wurde, ergab sich die Möglichkeit die Wirkung der durchgeführten Maßnahmen direkt zu überprüfen. Die Messabschnitte wurden daher eingeteilt in:

- Messung von gut eingefahrenen Holzschwellen im Stoßlückengleis während des Sommers 2014
- Messung von frisch gestopften und stabilisierten Holzschwellen mit SIK 6 im Stoßlückengleis im Herbst 2014
- Messung von mäßig eingefahrenen Holzschwellen mit SIK 6 und LV-Gleis im Winter und Frühjahr 2014/2015
- Messung von gut eingefahrenen Holzschwellen mit SIK 6 und LV-Gleis im Sommer 2015

An den Messstellen wurden neben der Bogenatmungsmessung auch die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit, die Schienentemperatur sowie die relative Schienenlängsspannung im 10-Minuten-Raster gemessen. Absolute Schienenlängsspannungen sind derzeit mit zerstörungsfreien Messmethoden nicht genau bestimmbar, daher sind die gemessenen Werte als Relativwerte zu betrachten. Die maximalen gemessenen Schienentemperaturen lagen im Juli 2015 bei 54,5 °C, die minimalen im Dezember 2014 bei – 8 °C.

Die Schienenspannungen wurden während der ersten und zweiten Messperiode sowohl neben der Stoßlücke, als auch acht Schwellenfächer davon entfernt in der Bogenmitte erfasst. Im LV-Gleis wurden die Schienenspannungen in Bogenmitte gemessen.

Für das Stoßlückengleis sind rel. Schienenspannungsdifferenzen von ca. 52 N/mm² gemessen worden. Im LV-Gleis sind diese mit ca. 100 N/mm² dementsprechend größer. Es konnte gezeigt werden, dass die Schienenspannungen und die daraus resultierende Neutral- und Verspanntemperatur nicht konstant bleiben. Die Schienenspannungen verflüchtigen sich aus dem Bogen. Sie werden vermehrt vor Unstetigkeiten im Oberbau, wie Weichen und Durchlässen, besonders am Ende von Gefällestrecken auftreten. Die Zunahme der Schienenlängsspannung im Tagesverlauf ist direkt mit der Schienentemperatur gekoppelt, die Bogenatmung trägt nur unmerklich zu einer Reduzierung der Spannung bei.

Die Bogenatmung wurde an 5 Stellen im Bereich von 200 m um die Bogenmitte gemessen. An den äußeren zwei Messpunkten sowie in der Mitte fanden auch QVW-Messungen statt, um einen Vergleich anstellen zu können. Bei diesem Vergleich ist aufgefallen, dass der QVW zu jeder Oberbauform etwa konstant über den gesamten Bogen verläuft, die Bewegungen allerdings stark unterschiedlich ausfallen. Da die geringste Schienentemperatur und damit auch die innerste Bogenlage erst um ca. 05:00 Uhr morgens vorhanden ist, wurden die Auswertungen nicht an normale Tagesganglinien 0 – 24 Uhr gekoppelt.

Im ersten Messzustand, Holzschwellengleis mit Stoßlücken, wurden Bewegungen bis zu 3 mm festgestellt, wobei die Unterschiede der einzelnen Messpunkte bis zu 2 mm betragen. Die Streuung der gemessenen QVW war sehr groß.

Nach dem Einbau der SIK 6 und nach der Stopfung und Stabilisierung des Bogens sank der gemessene QVW von 13,9 N/mm auf 10 N/mm. Die Streuung wurde aber stark verringert. Es verminderte sich auch die Bogenatmung auf ein Maximum von 2 mm und einer größten Differenz von 1 mm. Das Stopfen und Stabilisieren hat somit trotz Einbau der SIK 6 kurzfristig den QVW gesenkt, aber homogenisiert. Die Bogenatmung ist kleiner und homogener geworden und hat somit die Gleislagestabilität erhöht.

Im dritten Abschnitt der Messungen, bei Holzschwellen mit SIK 6 und LV-Gleis, sind die Bewegungen erwartungsgemäß deutlich größer geworden. Es wurden Bewegungen bis zu 5 mm gemessen, wobei diese mit der Verweildauer und der Konsolidierung der Schwellenlage unterschiedlicher wurden. Die Bogenatmung findet dementsprechend ungleichmäßig über den Bogen verteilt statt. Der Bereich, welcher im ersten Abschnitt die größten Bewegungen hatte, zeigte auch nun wieder die größte Bewegung.

Die vierte Messperiode, welche die Verhältnisse eines durchgehend verschweißten, konsolidierten Buchenschwellengleises mit SIK darstellt, zeigte hohe Werte für den QVW und dazu passend geringe Atmungsverläufe. Überprüft wurden die gemessenen Daten auch mittels Pfeilhöhenmessungen, welche zeigten, dass die Messungen korrekt durchgeführt wurden und nur geringe Bewegungen vorhanden sind.

Um den Bewegungsverlauf auch in seiner zeitlichen Abfolge zu erfassen, wurden genauere Messraster (im 3. Abschnitt) angewendet. Es ist erkennbar, dass die Bogenbewegungen hauptsächlich durch Zugüberfahrten ausgelöst werden. Innerhalb einer Zugüberfahrt bewegt sich der Bogen in der Abhebewelle vor dem ersten und zwischen den ersten beiden Drehgestellen. Unter den weiteren Drehgestellen liegt der Bogen bereits in seiner „entspannten“ Lage. Es ist hierbei nicht entscheidend, ob der Zug geschoben oder gezogen fährt. Auch eine zweite Lok (z.B. Railjet-Doppelgarnitur) ist nicht durch größere Bogenbewegungen erkennbar. Dieses Verhalten gilt sowohl für die Atmung in Richtung Bogenaussenseite (aufwärmendes Gleis), als auch für das sich abkühlende Gleis. Die Bewegung des Gleisrostes in horizontaler Richtung aufgrund einer einzelnen Zugüberfahrt entspricht der gesamten Bewegung des Gleisrostes ohne Zugüberfahrten eines Atmungszyklus.

8.3 Mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Gleislagestabilität und weitere Forschungsfragen

Aus den Erkenntnissen der Messungen im Betriebsgleis und aus den Gesprächen mit den fachlich zuständigen Stellen bei der ÖBB wurden einige mögliche Maßnahmen abgeleitet, um die Instandhaltung auf Bergstrecken zu vermindern und die Gleislagestabilität zu erhöhen, wobei festzuhalten ist, dass sich der Umbau auf LV-Gleis nicht negativ auf die Abnutzung und Liegedauer der Schienen auswirkt.

Eine hohe Stahlgüte der Schienen ist für eine geringe Instandhaltung von Interesse. Werden hierbei neuartige Schienen mit geringen Eigenspannungen eingesetzt, reduzieren sich die Schienenspannungen und damit die Zahl der Schienenfehler und das Risiko von Schienenbrüchen und Gleisverwerfungen.

Neben der Schienengüte ist für temperaturinduzierte Schienenspannungen die Querschnittsfläche der Schiene von großer Bedeutung. Falls es die Belastung der Strecke zulässt, ist demzufolge ein kleiner Querschnitt von Vorteil.

Auch die Schwellenform und Ausführung nimmt einen Einfluss auf die Instandhaltung. Nach derzeitigen Erkenntnissen sollten möglichst besohlte Betonschwellen eingebaut werden, da diese nicht nur die Gleislagequalität, sondern auch die Stabilität erhöhen und Schlupfwellen reduzieren und somit größere Stopfzyklen möglich sind. Daneben könnten besohlte HD-Schwellen in besonders kritischen Bereichen die Gleislagestabilität deutlich erhöhen. Diese haben allerdings den Nachteil, dass sie nicht automatisch verlegt werden können und der Einbau sehr präzise durchgeführt werden muss, da ein späteres Richten nur schwer möglich ist.

Eine Verklebung des Schotters erhöht zwar den QVW durch Erstellen eines starren Gefüges, allerdings sind die Instandhaltungsmöglichkeiten dadurch stark reduziert. Die Auswirkungen eines verklebten Vorkopfschotters sind positiv beschrieben, sollten aber noch mit Versuchen in situ nachgewiesen werden.

Neben diesen Möglichkeiten den Oberbau zu verbessern, wurde auch diskutiert, die Verschweißtemperatur zu erhöhen. Hierzu wurden Messstationen der ZAMG über ganz Österreich ausgewertet und in maximale Schienentemperaturen umgerechnet. Es lässt sich feststellen, dass in den kritischen Bereichen des ÖBB-Streckennetzes sowohl sehr hohe als auch sehr tiefe Schienentemperaturen auftreten, ein Vergleich mit den aktuellen Vorschriften zeigt, dass eine Veränderung der bisherigen Schweißtemperaturen derzeit nicht sinnvoll erscheint.

Aus Gesprächen mit den ÖBB sowie auf Begehungen der Strecken wurde das Problem des Einarbeitens der Schiene in die Rippenplatte, und der Rippenplatte in die Holzschwelle erkannt. Daher wurden nach vorangehenden Überlegungen zur Flächenpressung der Rippenplatte auf die Schwelle zwei neuartige Rippenplatten (Rph XL und Rph XXL) konstruiert. Diese unterscheiden sich zur bisherigen Rippenplatte (552 cm²) in der Fläche (Rph XL: 828 cm² und Rph XXL 996 cm²). Es soll somit und auch durch Verlängerung der Rippen die Instandhaltung verringert werden. Nach dem ersten Einbau auf der Arlbergstrecke warten diese Rippenplatten auf eine Übernahme in den Regeloberbau.

Eine weitere Möglichkeit, um die Schienentemperatur zu vermindern, könnte in einer Variation der Schienfarbe bestehen. Hierzu wurden drei Schienen einer Temperaturmessung unterzogen, wobei eine in „Natur“ belassen, eine weitere Schiene „Weiß“ und eine dritte Schiene „Silber“ (ähnlich einer verdreckten „Weißen“) lackiert wurde. Die Schienen wurden außerhalb von Betriebsgleisen unter gleichen Bedingungen gelagert und direktem Sonnenlicht ausgesetzt. Neben der Dauermessung im Schienensteg wurden auch Handmessungen über die gesamte Schienenoberfläche verteilt vorgenommen. Es kann festgestellt werden, dass die Schienen nachts unabhängig von ihrer Farbe auf die gleichen Temperaturen auskühlen, die Lufttemperatur nachts höher sein kann als die der Schienen, die Schienentemperaturen innerhalb der Schiene nur um wenige °C variieren, und die maximalen Schienentemperaturen deutlich von der gewählten Farbe abhängen. Jeweils bei einer Lufttemperatur von 33 °C ist bei der Naturschiene eine Schienentemperatur von 56 °C, bei der silbernen von 50 °C und bei der weißen von 46 °C gemessen worden. Die kritische Temperaturerhöhung bis zu einer Verwerfung kann somit für lackierte Bereiche um 6 °C (Silber) geringer angenommen werden. Hierdurch kann in kritischen Bereichen entweder die Sicherheit vor Gleisverwerfungen erhöht, oder der Mindestradius für die Herstellung von LV-Gleisen kann verringert werden. Eine Ausführung im Streckengleis wird diskutiert.

Um den zulässigen Mindestradius für die Herstellung von LV-Gleisen auch unter anderen Aspekten weiter reduzieren zu können, stehen ab Herbst 2015 Messungen an, welche die Auswirkung eines doppelseitigen Einbaues der SIK 6 untersuchen. Hierbei wird eine weitere Steigerung des QVW erwartet. Weiter sollte auch die Auswirkung eines verklebten Schotterbetts in situ untersucht werden. Neuartige Schwellen (z.B. Beho-Schwelle) sind bereits für eine Messung vorgesehen.

Um den genaueren Verlauf der Bogenatmung zu untersuchen, sind Bogenatmungsmessstellen mit mehr als 5 Messpunkten und engeren Radien sinnvoll. Auch sollten hier gleichzeitig die Schienenlängsspannungen nicht nur im Bogen, sondern auch in den angrenzenden Übergangsbögen bis zur ersten Unstetigkeit gemessen werden, sodass der immer noch weitgehend unbekanntes Verlauf der Längsspannungen in solchen Bereichen beleuchtet werden kann.

Mit dem Umbau des Brazer Bogens vom bisherigen Stoßlückengleis in ein LV-Gleis wurde Neuland beschritten. Die vorliegenden Untersuchungen zur Begleitung dieser Maßnahme haben jedoch gezeigt, dass dieser Schritt gerechtfertigt ist und die mit dem Forschungsprojekt beabsichtigten Ziele damit erreicht werden. Zusammen mit den bereits getätigten und noch vorgesehenen Ausbaumaßnahmen auf der Arlbergstrecke könnte die Presse in Analogie zur Berichterstattung vor gut 60 Jahren vielleicht einmal titeln: *"Auf lückenlosen Gleisen zu den Bregenzer Festspielen"...*

Warum auch nicht? Eigentlich ein guter Gedanke.

9 NACHWORT DES AUTORS

Nach meinem Studium des Bauingenieurwesens, welches ich an der TU München absolviert hatte, wollte ich mich im Bereich des Verkehrswesens weiterentwickeln und bewarb mich hierzu 2012 an den Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme der Universität Innsbruck. Dank Herrn Prof. Dr. Markus MAILER, dem Arbeitsbereichsleiter und seinem Team wurde ich hier sehr gut aufgenommen und konnte nach kurzer Zeit bereits in mehreren Projekten mitarbeiten, welche schlussendlich in dieser Arbeit mündeten. Die vorliegenden Ergebnisse zur Weiterentwicklung der Technik des Eisenbahnoberbaues wären nicht zustande gekommen ohne die enge Zusammenarbeit mit den Kollegen am Institut und deren Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Versuche.

Mein Dank gilt daher zuerst meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Günter PRAGER, welcher mich stets unterstützt hat und immer Zeit für fachlichen Rat oder Anregungen hatte. Er hat mit seinem Team, Herrn Ass. Prof. Dr. Ekkehard STEINER und Herrn Ing. Eric KASTNER jegliche meiner Ideen unterstützt und die Zeit durch kollegiale sowie freundschaftliche Verhältnisse angenehm gestaltet. Insbesondere Nachtmessungen und spontane Messstellen-Wartungen an Wochenenden verdeutlichen die Unterstützung der drei Kollegen am Institut, welche ich sehr zu schätzen weiß.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Norbert OSTERMANN bedanken, der als Leiter des Instituts für Verkehrswissenschaften der TU Wien die Zweitbegutachtung meiner Arbeit übernommen hat und wichtige Inputs zur Vollendung der Arbeit lieferte.

Neben meinen Kollegen an der Universität möchte ich mich auch besonders bei den Mitarbeitern der ÖBB-Infrastruktur bedanken, angefangen mit Herrn Dr. Bernhard KNOLL und seinem Assistenten Herrn Ing. Karl RACHBAUER, die als Projektauftraggeber den notwendigen Fortentwicklungen in der Versuchsreihe und speziellen Wünschen stets offen gegenüber standen. Weiter auch bei Herrn Ing. Rupert HAID, mit seinen Teams in den Anlagenservicecentern in Westösterreich, welche mir stets auch kurzfristig alle versuchsbedingten Eingriffe im Gleisoberbau für die Messungen ermöglichten und dabei auch helfend zur Seite standen.

Dank geht auch an die Universität Innsbruck, welche den Druck dieser Arbeit über Fördermittel unterstützte.

Danke auch allen Freunden, welche mir in den letzten Monaten und Jahren trotz aller Anspannung für die Erstellung der vorliegenden Arbeit die Treue gehalten haben und so dafür gesorgt haben, dass auch das Leben neben der Arbeit nicht in Vergessenheit geraten ist. Ich freue mich schon auf die Zukunft mit Euch!

Nicht zuletzt möchte ich mich aber bei meinen Eltern bedanken, welche mich seit nun fast 30 Jahren unterstützen - ohne Euch wäre ich nie so weit gekommen!

Danke Euch allen,

Innsbruck im Herbst 2015

Ferdinand Pospischil

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Garmisch-Partenkirchner Tagblatt: "Auf nahtlosen Schienen zu den Passionspielen 1960", *Garmisch-Partenkirchner Tagblatt*, 12.10.1953.
- [2] ÖBB Regelwerke: "ZOV 55 - Lückenlose Gleise und verschweißte Weichen", ÖBB GB Fahrweg Technik, Wien, 2001.
- [3] B. Lichtberger: "Der Querverschiebewiderstand der Gleise", *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender*, pp. 61-76, 2007.
- [4] C. Esveld: "Modern Railway Track", MRT Productions, Duisburg, 1989.
- [5] G. Prager: "Messungen am Eisenbahnoberbau - Habilitationsschrift", Mitteilungen des Instituts für Eisenbahnwesen und Öffentlichen Verkehr der Universität Innsbruck, Heft 12, 2007.
- [6] B. Knoll: "Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen", Institut für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 1998.
- [7] J. Eisenmann und L. Mattner: "Gleisverwerfung - Großversuche im Gleis und theoretische Analyse", Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München, Heft 52, 1988.
- [8] G. Prager: "Infrastruktur Schiene - Studienblätter zur Vorlesung", Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme, 2014.
- [9] N. Ruef: "*Gleisverwerfungen in Westösterreich*", ÖBB Infrastruktur AG, ASC Landeck, 2015.
- [10] R. Kupfer: "Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegung des Gleisrostes", Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 79, 2005.
- [11] W. Stahl: "Anpassung des Schotteroberbaus an die Anforderungen des Hochgeschwindigkeitsverkehrs durch die Verwendung von hochelastischen Zwischenlagen und einer Schiene mit breitem Fuß", Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 74, 1998.
- [12] B. Lichtberger: "Handbuch Gleis", Tetzlaff Verlag, Hamburg, 2010.
- [13] S. Rangosch: "Lagestabilität lückenloser Meterspurgleise in kleinen Bogenradien", Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Straßen- und Eisenbahnbau, ETH Zürich, 1995.

- [14] J. Liu: "Einfluss der Schienenbefestigungskomponenten auf das laterale Verformungs- und Lastverteilungsverhalten der Schiene", Mitteilungen des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München, Heft 87, 2013.
- [15] R. Zimmermann: "Theoretisches Modell zur Abschätzung des Einfluss einer Zugsdurchfahrt auf die laterale Gleisverschiebung in lückenlos verschweisstem Gleis in engen Radien", Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich, 2011.
- [16] B. Bösl: "Längsbewegung des Gleises als Folge von Normalkraftstörungen", Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 65, 1992.
- [17] V. Sunley: "Rolling out of Rails", British Rail Research & Development Division, Derby, 1982.
- [18] D. Iliev: "Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen", Mitteilungen des Prüfamtes für Verkehrswegebau der Technischen Universität München, Heft 86, 2012.
- [19] B. Lichtberger: "Schottergleisverhalten und Einflussparameter - der Versuch eines Überblicks", *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender*, pp. 3-43, 2006.
- [20] Y. Chatkeo: "Die Stabilität des Eisenbahngleises im Bogen mit engen Halbmessern bei hohen Axialdruckkräften", Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 46, 1985.
- [21] B. Bopp: "Das Verhalten von lückenlos verschweissten Gleisen (LVG) in engen Radien der Meterspur", Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich, 2014.
- [22] F. Pospischil mit R. Haid als Gesprächspartner: "*Instandhaltungsarmer Oberbau*, [Interview], Innsbruck, 2012.
- [23] DB Netz Regelwerk 820.2010 und VTZ 115: "Richtlinie; Grundlagen des Oberbaus; Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen", DB Netz AG, Frankfurt am Main, 2008.
- [24] R. v. d. Bosch: "Querverschiebewiderstandsmessungen mit dem dynamischen Gleisstabilisator", *EI - Eisenbahningenieur Heft 6*, pp. 15-19, 2006.
- [25] Delta Rail: "Validierung der Querverschiebewiderstandsmeßmethode des Stabilisators DGS62N, Phase 2", Delta Rail, Utrecht, 2009.
- [26] G. Leykauf und B. Lechner: "Forschungsbericht Nr. 1727" Prüfam für Bau von Landverkehrswegen der TU München, 18.11.1998.

- [27] DIN EN 13146 - Teil 2: "Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme, Bahnanwendungen - Oberbau", 2003.
- [28] F. Pospischil mit G. Prager; E. Steiner; E. Kastner als Gesprächspartner: "*Gespräche und Aufzeichnungen zur Dissertation*", [Interview], Innsbruck, 2013-2015.
- [29] E. Steiner und E. Kopp: "Schienenbefestigung IOARV 300 mit Spannklemmen SKL 13 und SKL15 Messungen im Sittenbergtunnel (HL- Strecke Wien - Linz) Prüfstandversuche am Institut - Forschungsbericht Vossloh" Universität Innsbruck - Institut für Eisenbahnwesen und Öffentlichen Verkehr, 1999.
- [30] S. Freudenstein: "Verkehrswegebau Ergänzungskurs", Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, TU München, 2009.
- [31] H. Meier: "Die Verwerfungsgefahr beim lückenlosen Vollbahngleis und ihre Beseitigung", Technische Hochschule München, 1934.
- [32] J. Eisenmann: "Gutachterliche Stellungnahme zum lückenlosen Gleis in engen Bögen bei Zugbildungsanlagen", München, 2006.
- [33] F. Pospischil mit J. Wichser und B. Bopp im Gespräch: "*Lagestabilität bei Meterspurbahnen*", [Interview], Gais, 2013.
- [34] SBB Regelwerk / Verband öffentlicher Verkehr: "Reglement 220.41 - Lückenlose Gleise, lückenlos verschweisste Weichen und verlaschte Gleise Normalspur", SBB Infrastruktur I-ASM, Bern, 2003.
- [35] DB Netz Regelwerke: 820.2010 und VTZ 115: "Richtlinie; Grundlagen des Oberbaus; Ausrüstungsstandard Schotteroberbau für Gleise und Weichen", DB Netz AG, Frankfurt am Main, 2012.
- [36] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: "Meteorologische Daten", Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Kundenservice für Tirol und Vorarlberg, Innsbruck, 2013.
- [37] J. Eisenmann und L. Mattner: "Forschungsbericht Nr. 1216 (nicht veröffentlicht)", Prüfamf für Bau von Landverkehrswegen der TU München, 1987.
- [38] A. Osl: "*Besprechung zum Einbau der Messstellen*", ÖBB Infrastruktur AG, Region West, Innsbruck, 2013.
- [39] Vorarlberg Online: „Vorarlberg Online,“ [Online]. Available: <http://www.vol.at/zugunglueck-in-braz-technischer-defekt-liess-zugentgleisen/news-20110817-11452044>. [Zugriff am 02 Dezember 2014].

- [40] S. Freudenstein und D. Iliev: "Bericht Nr. 3140 vom 02.09.2014 Ermittlung des Querverschiebewiderstandes der Strecke St. Gallen - Wattwil (Gübsensee), Schweiz", Technische Universität München, Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau, München, 2014.
- [41] G. Prager und E. Kopp: "Forschungsprojekt QL-Gleis", Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr, Innsbruck, 2010.
- [42] E. Steiner, C. Kuttelwascher und G. Prager: "Druckausbreitung von belasteten Eisenbahnschwellen im verschmutzten Gleisschotter", *Eisenbahntechnische Rundschau*, pp. 68 - 72, Heft 6, 2014
- [43] G. Prager: "Railjet-2008 Aschbach - Berechnung und Messung von Schienenspannungen und Bewegungen des Gleisrotes in Richtung waagrecht und quer", Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr, Innsbruck, 2008.
- [44] R. Haid, A. Osl und K. Rachbauer: "*Gespräche zu Instandhaltungsmaßnahmen und Messstellen*", ÖBB Infrastruktur AG, Region West, Innsbruck, 2012 - 2014.
- [45] ÖBB Regelwerk: "ZOV 22, Verlege- und Stoßlücken", ÖBB GB Fahrweg Technik, Wien, 2004.
- [46] L. Fendrich: "Handbuch Eisenbahninfrastruktur", Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [47] Teta Steel: "Spannungsfreie Schienen reduzieren Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben", *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, p. 86, Heft 12, 2014.
- [48] B. Knoll: "Sicherungskappen - Ohrensattel - Rippenplatten", ÖBB Infrastruktur AG, Wien, 2015.
- [49] E. Dirnberger und R. Pospischil: "Ermittlung der optimalen Länge von Spannbetonschwellen", TU München: Mitteilungen des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der Technischen Universität München, Heft 55 Teil II, 1989.
- [50] S. Freudenstein und D. Iliev: "Bericht Nr. 3088 vom 15.05.2014 - Laboruntersuchungen zur Ermittlung des Querverschiebewiderstands von ÖBB-Schotteroberbau" Lehrstuhl und Prüfamt für Verkehrswegebau der Technischen Universität München, München, 2014.
- [51] R. Schilder: "USP - Under Sleeper Pads Schwellenbesohungen", in *Getzner Bahnfachtagung*, Schwarzenberg, 2007.

- [52] F. Auer, R. Potvin, P. Godart und L. Schmitt: "Under Sleeper Pads in Track - the UIC project", *European Railway Review*, pp. 2-8, Volume 19, Issue 2, 2013.
- [53] H. Loy und A. Augustin: "Innovative Schwellenbesohlungen zur Schotterschonung für hochbelastete Strecken", *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, pp. 16-21, Heft 12, 2013.
- [54] Goldschmidt Thermit GmbH: "Schotterstabilisierung", 2015. [Online]. Available: <http://www.goldschmidt-thermit.com/leistungen/gleisservice/schotterstabilisierung/>. [Zugriff am 26 05 2015].
- [55] Heinrich Krug: "Produktkatalog - Oberbaumaterial, Kranschienenbefestigung und Weichenbaumaterial", Heinrich Krug GmbH & Co. KG, Dortmund, 2011.
- [56] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: "Meteorologische Daten", Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Kundenservice für Tirol und Vorarlberg, Innsbruck, 2014.
- [57] K. Lieberenz und D. Wegener: "Abtragung der Lasten im System Oberbau, Unterbau und Untergrund", *EIK, Eisenbahn Ingenieur Kalender*, pp. 53-72, 2009.
- [58] S. Freudenstein: "Grundkurs Verkehrswegebau", Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, TU München, 2008.
- [59] F. Auer: "Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen", Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, TU Graz, 2012.
- [60] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik: "Klimadaten von Österreich 1971 - 2000" 2014. [Online]. Available: http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm. [Zugriff am 10 Juli 2014].
- [61] F. Kopf: "Untersuchung zur Dynamik und Interaktion am Brückenobjekt L110", in *Innovationsmessfahrten 2012 Ergebnispräsentation*, ÖBB Infrastruktur AG, Wien, 13.02.2013.
- [62] I. Fejér, L. Halmai und J. Tötöl: "Erhöhung der Verwerfungssicherheit von lückenlosen Gleisen", *EI-Eisenbahningenieur*, pp. 6-11, Heft 3, 2014
- [63] B. Knoll: "Ausnahmegenehmigung für das lückenlose Verschweißen von Streckengleisen mit Holzschwellen am Arlberg 2014", ÖBB Infrastruktur AG, Wien, 2014.
- [64] ÖBB Infrastruktur AG, ASC Bludenz: "Verspannprotokoll - Brazer Bogen", ÖBB-Infrastruktur Bau-AG - ASC Bludenz, Bludenz, 2014.

- [65] W. W. Jerschow, A. A. Bondarenko, U. Gerber und W. Fengler: "Einfluss von Schwellenhohllagen auf die Verwerfungssicherheit", *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, pp. 51-54, Heft 5, 2015.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Für die Verlegung der 2.000.000 Spannbetonschwelle bei der DB wurde am 9.10.1953 Carola Schranz, die Frau des schnitzenden Bahnhofswirtes von Murnau, zur Patin auserwählt. [1]	1
Abbildung 2: Verschiedene Einwirkungen auf das Gleis und die aus dessen Bauart resultierenden Widerstände sind bestimmend für die Gleislagestabilität	5
Abbildung 3: Temperatur über Neutraltemperatur versus seitlicher Verschiebung des Lv- Gleises (Typischer Verlauf eines Betonschwellengleises) [3] bei [4]	6
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Luft- und Schienentemperatur. Aus Jahresganglinie extrapolierte Maximal- und Minimalwerte; [5]	7
Abbildung 5: Gleisverwerfung im Außerfern, 2015 [9]	8
Abbildung 6: Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene, [11] bei [10]	9
Abbildung 7: Freie Bogenatmung für Radien ≤ 750 m [12]	10
Abbildung 8: Kritische Querkraft, abhängig von der Achslast [12]	12
Abbildung 9: Beeinflussung des QVW durch Instandhaltungsarbeiten [12]	18
Abbildung 10: Zusammenstellung der Einflüsse auf den QVW (in Relation zur Schwelle B70 mit Schotterkörnung 1, gut verfüllt und vollständig stabilisiert, 15 N/mm)	21
Abbildung 11: Kraft- Verformungs-Verlauf des Gleisrostes bzw. Ersatzträgheitsmoment I_{ers} in Abhängigkeit der Verformung [18]	27
Abbildung 12: Ersatzträgheitsmoment (hier auf 9 Schwellen) [18]	28
Abbildung 13: Oberbaumangel - Sicherungskappe mit lockeren bzw. fehlenden Schrauben	29
Abbildung 14: Oberbaumangel - Stoßlückengleis mit zwei verschiedenen Rippenplatten	29
Abbildung 15: Kritischer Gleislagefehler im Bogen [12]	32
Abbildung 16: kritische Temperaturerhöhung unter Veränderung des Ungenauigkeitszusatzes (links) und des QVW (rechts)	35
Abbildung 17: kritische Temperaturerhöhung unter Veränderung der Schienenform	36
Abbildung 18: Vereinfachtes Struktur- und Federmodell des Gleisrostes [18]	37
Abbildung 19: realer Verlauf des QVW (gestrichelt) und angenommener Verlauf der Methode CWERRI®	38
Abbildung 20: Temperatur-Extremwerte 1990 – 2010 nach [36] und eigener Auswertung	42
Abbildung 21: Schienenextremtemperaturen nach Formel (2-3)	43
Abbildung 22: Neutraltemperaturen der Schienen, berechnet nach Formel (5-1)	44

Abbildung 23: Messzylinder und Winkelführungsplatte mit Versuchswinkel (beides Eigenbau, Universität Innsbruck)	46
Abbildung 24: QVW-Versuch, Holzschwelle mit Rippenplatte, K-Befestigung oder Spannklemme mit oder ohne SIK bzw. für Betonschwellen	47
Abbildung 25: QVW Verschiebungsvorrichtung für Holzschwellen, Messung Ötztaler Ache	47
Abbildung 26: Lage der Messstellen für die QVW Kalibrierungsmessung in Völs [38]48	
Abbildung 27: Querverschiebewiderstandsmessungen Völs, Buche 1, 700 mm Schwellenabstand	49
Abbildung 28: QVW Messstelle Ötztaler Ache 1 [38]	50
Abbildung 29: QVW Messung Ötztaler Ache, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand ..	51
Abbildung 30: QVW Messung Ötztaler Ache, Betonschwelle K1, besohlt, 600 mm Schwellenabstand	51
Abbildung 31: Lage der Messstellen für den QVW und Bogenatmungsversuch im Brazer Bogen [38]	52
Abbildung 32: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, konsolidiert, Nass	53
Abbildung 33: Unterseite einer ausgebauten ehemals sehr gut eingefahrenen Holzschwelle im Bereich Braz.....	54
Abbildung 34: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, gestopft gerichtet und dynamisch stabilisiertes Gleis ohne Regelbetrieb	55
Abbildung 35: QVW Brazer Bogen, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, konsolidiert	55
Abbildung 36: QVW Messstelle Westendorf [38].....	56
Abbildung 37: QVW Westendorf, Betonschwelle K1, unbesohlt, 600 mm Schwellenabstand	57
Abbildung 38: HD Schwelle, Versuchsaufbau, Westendorf	57
Abbildung 39: QVW Messstelle Landeck [38]	58
Abbildung 40: QVW Landeck, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, eingefahren.....	59
Abbildung 41: Vergleich Handpumpe / elektrischer Kompressor bei den QVW Messungen in Landeck	59
Abbildung 42: QVW Messung Landeck, Buche 1, 600 mm Schwellenabstand, SIK 6, gestopft gerichtet und dynamisch stabilisiertes Gleis ohne Regelbetrieb, nass	60
Abbildung 43: Querverschiebewiderstandsmessungen, Vergleich der Mittelwerte	62
Abbildung 44: QVW-Messungen, Vergleich der Mittelwerte (bei 2 mm Verschiebung) mit den maximalen gemessenen Abweichungen	63
Abbildung 45: Luftbild des Brazer Bogens - Quelle: Google Maps	64

Abbildung 46: Messbasis mit Messkiste, Stromversorgung und Wetterstation für Verschiebemessung	66
Abbildung 47: Messstange für Verschiebemessung	67
Abbildung 48: Messbasis für Verschiebemessung	67
Abbildung 49: Skizze Bogenatmungsmessstelle Mast 11 und Mast 12 (Situation am 05.09.2014)	68
Abbildung 50: Skizze Bogenatmungsmessstelle Mast 13 (Situation am 05.09.2014)	68
Abbildung 51: Skizze Bogenatmungsmessstelle Mast 14 und Mast 15 (Situation am 05.09.2014)	68
Abbildung 52: Applikation der DMS mit Temperaturkompensationsplatte	69
Abbildung 53: Blick in die Messkiste der Bogenatmungsmessstelle und Schaltung der DMS	70
Abbildung 54: Skizze des Messaufbaus (Brazer Bogen)	70
Abbildung 55: Messdaten 1. Abschnitt	72
Abbildung 56: Messdaten 2. Abschnitt	72
Abbildung 57: Messdaten 3. Abschnitt	73
Abbildung 58: Messdaten 4. Abschnitt	74
Abbildung 59: Wettersituation 17.07.2014 - 06.08.2014 (1. Abschnitt)	75
Abbildung 60: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 19.07.2014	75
Abbildung 61: Wettersituation 2. Abschnitt	76
Abbildung 62: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 17.09.2014	76
Abbildung 63: Wettersituation 16.02.2015 – 19.03.2015 (3. Abschnitt)	77
Abbildung 64: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie 15.04.2015	77
Abbildung 65: Wettersituation 4. Abschnitt	78
Abbildung 66: Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsganglinie am 06.06.2015	78
Abbildung 67: Lufttemperaturmessungen Braz, alle Abschnitte	79
Abbildung 68: Schienentemperaturmessung Braz, alle Abschnitte	79
Abbildung 69: Lufttemperaturentwicklung, Brazer Bogen	79
Abbildung 70: Schienentemperaturentwicklung Braz (siehe vorherige Seite)	80
Abbildung 71: Schienenspannungen (DMS 1) vom 08.09.2014 – 29.09.2014	81
Abbildung 72: Schienenspannungen (DMS 2) vom 08.09.2014 – 29.09.2014	82
Abbildung 73: Theoretischer Kräfteverlauf im Stoßlückengleis [8]	82
Abbildung 74: Schienenspannungen (DMS 2) vom 10.10.2014 – 29.10.2014	83
Abbildung 75: Schienenspannungen (DMS 2) vom 21.03.2015 – 22.04.2015	84
Abbildung 76: Schienenspannungen (DMS 2) vom 28.05.2015 – 08.06.2015	84
Abbildung 77: Vergleich Stoßlückengleis - LV Gleis	85

Abbildung 78: Schienenspannungen und Bewegungen des Gleises bzw. Schienentemperaturen im Windauer Bogen vom 01.08.2008 – 31.08.2008 (Daten aus [41])	86
Abbildung 79: Vergleich der rel. Schienenlängsspannungen	86
Abbildung 80: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 17.09.2014 (2. Abschnitt)	87
Abbildung 81: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 15.04.2015 (3. Abschnitt)	87
Abbildung 82: Schienenspannungen, Schienentemperatur und Weg 13 am 06.06.2015 (4. Abschnitt)	88
Abbildung 83: QVW im ersten Messabschnitt	88
Abbildung 84: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 1. Abschnitt, Braz	89
Abbildung 85: Gleisrostbewegungen im 1. Abschnitt vom 18.07.2014 - 26.07.2014 ..	90
Abbildung 86: Gleisrostbewegungen am 19.07.2014	90
Abbildung 87: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 19.07.2014 mit der dazugehörigen Schienentemperatur	91
Abbildung 88: QVW Messung im zweiten Abschnitt (nach Einbau der SIK)	92
Abbildung 89: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 2. Abschnitt	92
Abbildung 90: Gleisrostbewegungen im 2. Abschnitt	93
Abbildung 91: Gleisrostbewegungen im 2. Abschnitt am 17.09.2014	93
Abbildung 92: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 17.09.2014 mit der dazugehörigen Schienentemperatur	94
Abbildung 93: Bewegungen des Gleisrostes im dritten Messabschnitt	94
Abbildung 94: Gleisrostbewegungen im Frühjahr 2015 (dritter Abschnitt)	95
Abbildung 95: Gleisrostbewegungen im 3. Abschnitt am 15.04.2015	95
Abbildung 96: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 15.04.2015 mit der dazugehörigen Schienentemperatur	96
Abbildung 97: Gleisrostbewegungen im Sommer 2015	96
Abbildung 98: QVW Messung im vierten Abschnitt	97
Abbildung 99: Gleisrostbewegungen und Querverschiebewiderstände im 4. Abschnitt	97
Abbildung 100: Gleisrostbewegungen im 4. Abschnitt am 06.06.2015	97
Abbildung 101: Gleisrostbewegungen im Stundenraster am 06.06.2015 mit der dazugehörigen Schienentemperatur	98
Abbildung 102: Durchführung der Pfeilhöhenmessungen	99
Abbildung 103: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 18.03.2015	100

Abbildung 104: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 09.07.2015.....	100
Abbildung 105: Pfeilhöhenmessung Brazer Bogen 10.07.2015.....	101
Abbildung 106: Differenzmessung der Pfeilhöhenmessungen vom 09.07.2015 und 10.07.2015	102
Abbildung 107: Bewegung des Gleisrostes zur Pfeilhöhenmessung am 09.07.2015 und 10.07.2015	102
Abbildung 108: Genaue Messung, Weg 13, Luft- und Schienentemperatur, am 20.02.2015 im Brazer Bogen	103
Abbildung 109: Bewegungen des Gleisrosts aufgrund einer Zugüberfahrt im Brazer Bogen am 20.02.2015 um 08:40 Uhr.....	104
Abbildung 110: Bewegungen des Gleisrosts aufgrund einer Zugüberfahrt im Brazer Bogen am 20.02.2015 um 10:42 Uhr.....	104
Abbildung 111: Weg 15 und Schienentemperatur aufgrund einer Zugüberfahrt Brazer Bogen 20.02.2015 10:42 Uhr.....	105
Abbildung 112: Railjet - Doppelgarnitur und Kesselzug an der Bogenmessstelle in Braz (km 128,5) auf dem Weg nach Bludenz	105
Abbildung 113: Zugüberfahrt Railjet-Doppelgarnitur an der Messstelle, Weg 13	106
Abbildung 114: Zugüberfahrt am 09.04.2015 um 10:25 Uhr, Weg 13 und DMS 2 ...	107
Abbildung 115: Zugüberfahrt am 20.02.2015 um 16:40 Uhr, Weg 13	107
Abbildung 116: Detailanalyse der Zugüberfahrt am 20.02.2015 um 16:40 Uhr, Weg 13	108
Abbildung 117: SIK 6 vor dem Einbau.....	113
Abbildung 118: SIK Ohrensattel auf Holz und Betonschwelle, Foto: [48]	113
Abbildung 119: Schienenbefestigung mit Rippenplatten auf Holzschwelle (Schema)	116
Abbildung 120: Eingearbeitete Schiene in der Rippenplatte, Schema.....	116
Abbildung 121: Eingearbeitete Schiene in der Rippenplatte	117
Abbildung 122: Spannklemmen mit geringer Sicherheitsreserve und geklebte Rph	117
Abbildung 123: derzeitige Rippenplatte Rph1 [55]	118
Abbildung 124: Vereinfachtes Modell der Rippenplatte	118
Abbildung 125: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Breite der Rph.....	119
Abbildung 126: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Länge der Rph	120
Abbildung 127: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle unter Veränderung der Länge und Breite bei gleichbleibendem Verhältnis Länge / Breite = 2,3	120

Abbildung 128: Flächendruck der Rippenplatte auf die Schwelle im Verhältnis zur Fläche der Rippenplatte	121
Abbildung 129: Rph 1 XL und XXL basierend auf der Rph 1 [48]	122
Abbildung 130: Rph 6 XL und XXL basierend auf der Rph 6 [48]	122
Abbildung 131: Rph 1 XL auf neuen Schwellen	123
Abbildung 132: Rph 1 XL im Vergleich zur bisherigen RP C	123
Abbildung 133: Holzschwelle mit vormontierter Rph und Zwischenlage ZW, bereit zum Einbau	124
Abbildung 134: Rph, Rph XL und Rph XXL im Vergleich	124
Abbildung 135: Zwischenlage mit "Nasen"	125
Abbildungen 136: Schienentemperaturmessungen (2)	127
Abbildung 137: links Messpunkte der Temperaturmessung	127
Abbildung 138: rechts Temperatur und Feuchtigkeitsmessstelle	127
Abbildung 139: Ama- Digital Messgerät	127
Abbildung 140: Dauermessschrieb der Schienentemperaturmessung	128
Abbildung 141: Schienentemperaturmessung – Tagesauswahl für den 06.06.2014 – 12.06.2014 (Quelle: Eigene Messungen und [56])	129
Abbildung 142: Schienentemperaturwerte Natur	131
Abbildung 143: Schienentemperaturwerte Silber	131
Abbildung 144: Schienentemperaturwerte Weiß	131
Abbildung 145: Schienentemperaturmaxima der verschiedenen Schienen	132
Abbildung 146: Die maximal auftretenden täglichen Temperaturunterschiede der Schienen	132
Abbildung 147: Wärmebild, Naturschiene, Sonnenseite	134
Abbildung 148: Wärmebild, Naturschiene, Schattenseite	134
Abbildung 149: Wärmebild, weiße Schiene, Sonnenseite	134
Abbildung 150: Wärmebild, weiße Schiene, Schattenseite	135
Abbildung 151: Wärmebild, Silberschiene, Sonnenseite	135
Abbildung 152: Wärmebild, Silberschiene, Schattenseite	135
Abbildung 153: Langzeittemperaturmessung der Messstationen in Langen am Arlberg, eigene Auswertung, [36]	160
Abbildung 154: Meteorologisches Messnetz mit Auswahl der Messstationen in Österreich, [36]	161
Abbildung 155: Erklärung der Boxplots	162

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Werte des Querverschiebewiderstands bei verschiedenen Bauzuständen und Schwellenbauarten [12], [3]	15
Tabelle 2: Absoluter und prozentualer Vergleich der gemittelten Anteile des QVW (2 mm) [18].....	17
Tabelle 3: Einflussfaktoren auf den QVW [12]	20
Tabelle 4: Ersatzträgheitsmomente einiger Gleisrostformen der Normalspur nach CHATKEO [30].....	28
Tabelle 5: Annahmen zur Berechnung der Einflussfaktoren	35
Tabelle 6: Mindestradien im Vergleich [2], [34], [35]	40
Tabelle 7: Meteorologische Daten, Auswertung für 1990 – 2010 nach [36] und eigener Auswertung	42
Tabelle 8: Vergleich der gemessenen Werte mit der Literatur (siehe Kapitel 3.1).....	61
Tabelle 9: Beispiel einer Schienenoberflächentemperaturmessung	133

VERZEICHNIS DER VERWENDETEN ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Beschreibung
ASC	Anlagen und Service Center (bei der ÖBB)
BA	Bogenanfang
BE	Bogenende
Bhf.	Bahnhof
BM	Bogenmitte
DGS	Dynamischer Gleisstabilisator
DMS	Dehnmessstreifen
EM 250	Messfahrzeug der ÖBB INFRA
GBT	Gesamtbruttotonnen; Angabe zur Belastung eines Gleisabschnitts aus der aufsummierten Masse des überrollenden Zugverkehrs
GL 820	Graphtec midiLOGGER; zentraler Bestandteil des Messequipments zur Erfassung und Aufbereitung der Messdaten für die Datenfernübertragung
GLS	Gleislagestabilität
LV-Gleis	Lückenlos verschweißtes Gleis
LVW	Längsverschiebewiderstand
QVW	Querverschiebewiderstand
Rph	Rippenplatte
SIK	Sicherungskappe
SKL	Spannklemme
SOK	Schienenoberkante
SUZ	Schnellumbauzug
VDW	Verdrehwiderstand
WFP	Winkelführungsplatte
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (staatlicher meteorologischer und geophysikalischer Dienst für Österreich)
ZW	Zwischenlage

ANHANG

Ergänzende Abbildungen.....	160
Temperaturentwicklung in Langen am Arlberg 1990 - 2010	160
Meteorologisches Messnetz in Österreich	161
Boxplot Erklärung	162
Angaben zum Verfasser	163
Aus den Veröffentlichungen des Instituts	165
Schriftenreihe des Instituts für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme der Universität Innsbruck	165
Mitteilungen des Instituts für Infrastruktur AB Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr.....	165

ERGÄNZENDE ABBILDUNGEN

Temperaturentwicklung in Langen am Arlberg 1990 - 2010

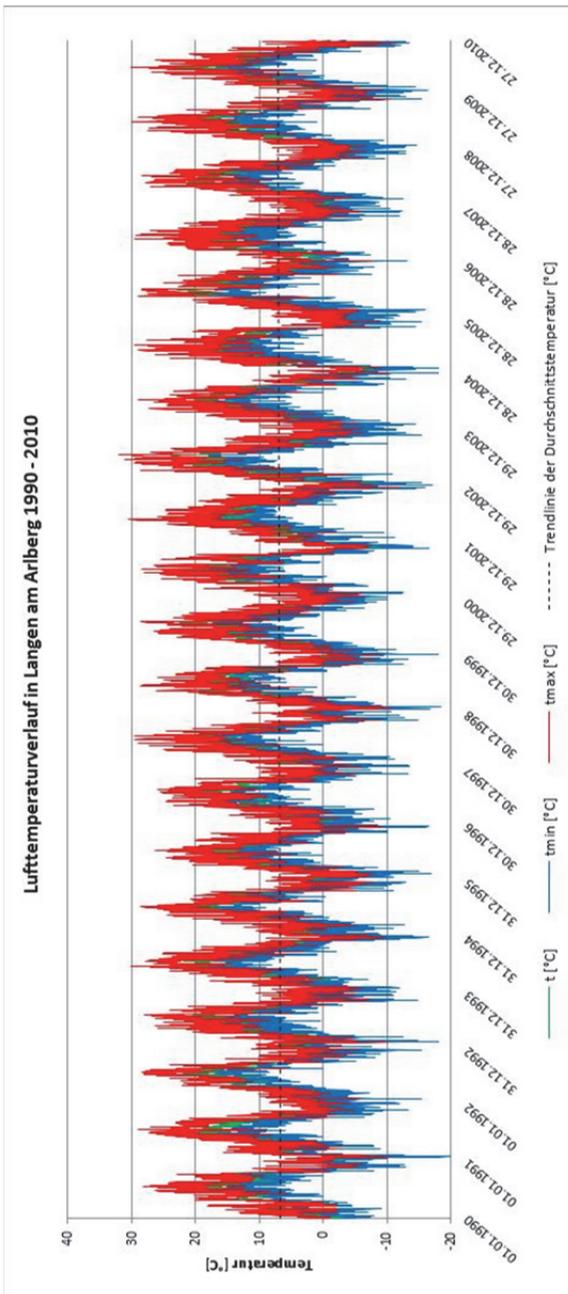


Abbildung 153: Langzeittemperaturmessung der Messstationen in Langen am Arlberg, eigene Auswertung, [36]

Meteorologisches Messnetz in Österreich

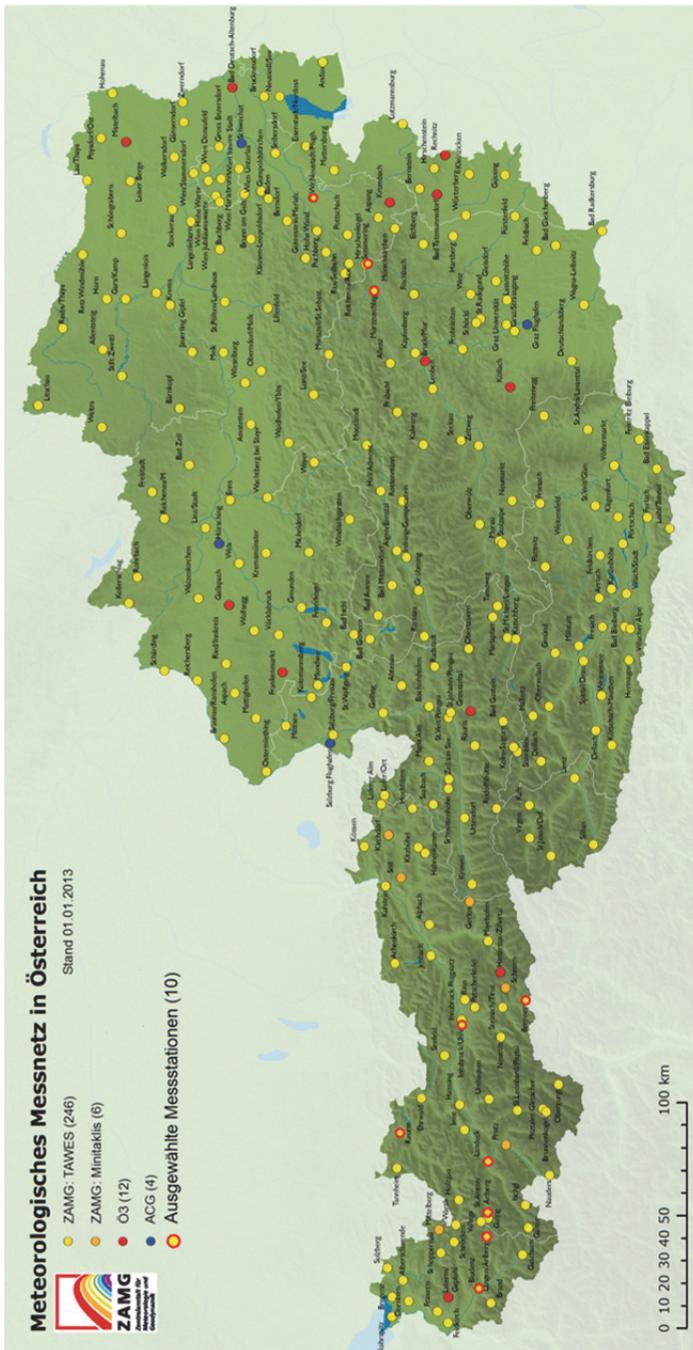


Abbildung 154: Meteorologisches Messnetz mit Auswahl der Messstationen in Österreich, [36]

Boxplot Erklärung

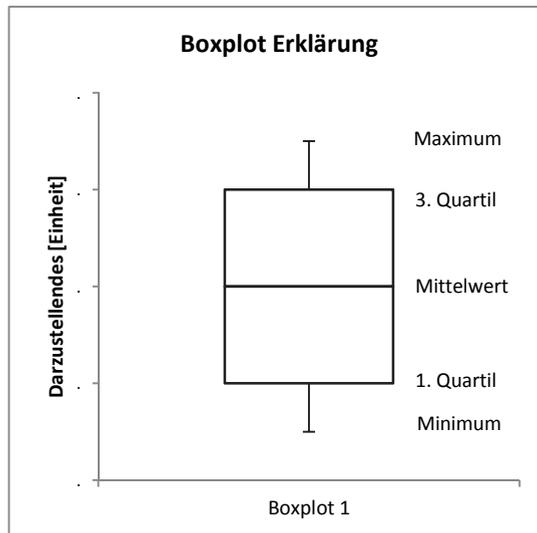


Abbildung 155: Erklärung der Boxplots

ANGABEN ZUM VERFASSER

Ferdinand Franz Xaver Pospischil

Geburtsdatum: 01.06.1986

Geburtsort: Ebersberg (Oberbayern)

Nationalität: Deutsch



Akademischer Werdegang

Okt. 2006 bis Okt.2009 Bachelor-Studiengang Bauingenieurwesen (B.Sc.), Technische Universität München (TUM), Vertiefungsrichtung Verkehr (zusätzlich mit Massivbau und Bauprozessmanagement)

Okt. 2009 bis Nov 2011 Master-Studiengang Bauingenieurwesen (M.Sc.), Technische Universität München, Vertiefungsfächer: Verkehrswegebau, Massivbau, Grundbau und Verkehrstechnik / Verkehrsplanung

Nov. 2011 Masterarbeit am Zentrum Geotechnik der TUM mit dem Thema: Herstellung und Berechnung von Brunnen

Feb. 2012 bis 2016 Universitätsassistent an der Universität Innsbruck, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme mit dem Dissertationsthema: Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen - eine Betrachtung der Gleislagestabilität

Nov. 2015 Promotion zum Dr. techn. an der Universität Innsbruck

Weitere Veröffentlichungen des Autors

S. Ekkehard, G. Prager, F. Pospischil:

„Auswirkungen hoher Geschwindigkeiten auf den Oberbau. Messungen von Einsenkungen und Verschiebungen von Schwellen bei hohen Geschwindigkeiten bis über 330 km/h. Die Ergebnisse haben die Hypothesen bestätigt.“ In: *ÖBB-Infrastruktur AG: Erkenntnisse aus den Innovationsmessfahrten 2012: 60 km Hochleistungsstrecke im Test: von Wien-Meidling nach St. Pölten*. Eisenbahntechnische Rundschau, ETR Austria Spezial (2014), ISBN 978-3-7771-0467-6, S. 17 - 20.

M. Mailer, S. Tischler, F. Pospischil, et al.:

„Innovative Beläge und Beleuchtung für Tunnel. Leitfaden“. Bozen: *Amt für Geologie und Baustoffprüfung* (2014).

F. Pospischil, M. Mailer:

“The Potential of Cycling for Sustainable Mobility in Metropolitan Regions – The Facts behind the Success Story of Innsbruck”

Transportation Research Procedia 4, (2014) pp. 80 – 89

G. Prager, E. Steiner, F. Pospischil:

„Forschungsprojekt ÖBB-Innovationsmessfahrten 2012 - Oberbaumessungen im Gleis - Untersuchungen im geraden Gleis und im Gleisbogen bei hoher Geschwindigkeit: Endbericht“ Forschungsbericht im Auftrag der *ÖBB-Infrastruktur Bau AG, Wien*, (2014)

F. Pospischil, E. Steiner, B. Knoll und G. Prager:

„Gleislagestabilität auf Bergstrecken - Untersuchung der Querverschiebewiderstände,“ ETR - *Eisenbahntechnische Rundschau*, (2015) Heft 6, pp. 94 - 98, Juni 2015.

F. Pospischil, E. Steiner und G. Prager:

„Gleislagestabilität auf Bergstrecken - Untersuchung der Bogenatmung,“ ETR - *Eisenbahntechnische Rundschau*, (2015) Heft 9, pp. 74 - 77, September 2015.

G. Prager, E. Steiner, F. Pospischil:

„Instandhaltungsarmer Oberbau auf Bergstrecken“ Forschungsbericht im Auftrag der *ÖBB-Infrastruktur Bau AG, Wien*, (2015).

AUS DEN VERÖFFENTLICHUNGEN DES INSTITUTS

Schriftenreihe des Instituts für Infrastruktur, Arbeitsbereich Intelligente Verkehrssysteme der Universität Innsbruck

BAND 1 (2015)

POSPISCHIL Ferdinand

Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen: Eine Betrachtung der Gleislagestabilität

Vorangehend zu dieser Schriftenreihe des Arbeitsbereichs Intelligente Verkehrssysteme stehen die beiden früheren Schriftenreihen

- des Arbeitsbereichs Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr sowie
- des Arbeitsbereichs für Verkehrsplanung und Straßenbau.

Bisher erschienen unter

Mitteilungen des Instituts für Infrastruktur AB Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr

Heft 1 (1986)

PRAGER Günter

Beanspruchung von Schienen mit Grenzverschleiß auf Gebirgsbahnen

Heft 2 (1987)

ABLINGER Peter

Krümmungsbildmethode für den rechnerunterstützten Gleisentwurf

Heft 3 (1988)

SCHÖCH Wolfgang

Beanspruchung von Schienen mit UIC- und Sonderprofilen in engen Bogen

Heft 4 (1990)

FISCHER Reinhard

Beurteilung von periodisch asymmetrisch reprofilierten Schienen in engen Bogen aufgrund durchgeführter Messungen

Heft 5 (1991)

STEINER Ekkehard

Betriebsfestigkeitsnachweis von Schienen mit großer Seitenabnutzung in engen Bogen aufgrund gemessener Lastkollektive

Heft 6 (1994)

HALLER Michael

Der Einfluß von "weichen" Zwischenlagen bzw. der Veränderung von Schleifparametern auf die Entwicklung von Schlupfwellen in engen Bogen

Heft 7 (1996)

CASAZZA Walter

Anschlußoptimierung in Fahrplannetzen mit einer Fuzzy-Logik-Bewertung der Umsteigequalität

Heft 8 (1997)

PRAGER Günter

Festschrift zum 60. Geburtstag von o. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Erich Kopp

Heft 9 (1998)

SCHABAUER Wolfgang

Untersuchung der Schienenverdrehung bei Verwendung von Schienenzwischenlagen mit unterschiedlichen Federsteifigkeiten

Heft 10 (1998)

LINTNER Alfred

Dynamische Beanspruchung des Eisenbahnoberbaus infolge Schlupfwellen in engen Bögen

Heft 11 (2006)

FEICHTER Roland

Ein Vergleich verschiedener Fester Fahrbahnen in einem engen Bogen im Hinblick auf Schlupfwellenbildung und daraus resultierenden Gleisbeanspruchungen

Heft 12 (2007)

PRAGER Günter

Messungen am Eisenbahnoberbau – Habilitationsschrift

Heft 13 (2007)

PRAGER Günter

Zusammenstellung wissenschaftlicher Arbeiten – Eisenbahnwesen und Öffentlicher Verkehr – mit Kurzzusammenfassungen ausgewählter Projekte

Heft 14 (2010)

LOY Harald

Ein Beitrag zur Analyse der vertikalen Lastabtragung im Weichenbereich und Optimierung der Auflagerbedingungen durch besohlte Schwellen