



Einfluss der Kontaktfläche auf den Querverschiebewiderstand

Sandro Gabl, B.Sc.

Matr. Nr.: 1710694806

Formale Betreuung: FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Bernhard Rüger

Fachliche Betreuung: Dr. techn. Ferdinand Pospischil, M.Sc.

Stand: 01. August 2019

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum von März 2018 bis Juli 2019 im Rahmen meines berufsbegleitenden Masterstudiums Bahntechnologie und Management von Bahnsystemen an der Fachhochschule in St. Pölten.

Durch meine berufliche Tätigkeit bei den österreichischen Bundesbahnen als Techniker im Bereich Fahrweg am Anlagen Service Center in St. Pölten bin ich involviert am Instandhaltungsprozess von Oberbauanlagen. Die Aufgaben meiner Funktion ist die Planung und Steuerung von Instandhaltungstätigkeiten zur wirtschaftlich effizienten und technischen Abwicklung unter Einhaltung der Budget- und Qualitätsvorgaben. Das Ziel dabei ist immer einen sicheren und möglichst uneingeschränkten Zugverkehr zu gewährleisten.

Durch meine praktischen und theoretischen Kenntnisse am System Fahrweg erhielt ich die Möglichkeit in Kooperation mit der Firma Getzner Werkstoffe GmbH im Bereich von Schwellenbesohlungen zu forschen. Hierbei konnte ich meine Erfahrung einbringen und die Expertise von Spezialisten für eine erfolgreiche Diplomarbeit nutzen. Neben der Unterstützung wurde mir das Firmeneigene Labor samt Equipment zur Durchführung von Versuchen zu Verfügung gestellt, wofür ich mich sehr bedanke.

Einen weiteren Dank möchte ich dem Fachbereich Fahrwegtechnik der ÖBB aussprechen, welche mir die Ergebnisse von Messungen am Streckengleis zur Verfügung stellten.

Bedanken möchte ich mich auch bei meiner Familie und all meinen Freunden, welche mich während meines Studiums unterstützten.

Erklärung zur Veröffentlichung

Der Autor erklärt sich damit einverstanden, dass die FH St. Pölten die vorliegende Arbeit in geeigneter Weise unter Nennung des Autors/der Autorin bzw. in der vorliegenden Originalform als .pdf-Datei oder in gedruckter Form veröffentlichen darf.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Zusammenfassung

Die Umsetzung der gesellschaftlichen Forderung zum Ausbau des öffentlichen Verkehrs, sowie die Transportverlagerung von der Straße auf die Schiene hat negative Auswirkungen auf die Eisenbahninfrastruktur. Mit zunehmender Geschwindigkeit und steigenden Achslasten ist der Oberbau einer erhöhten Beanspruchung ausgesetzt, was in weiterer Folge zu einer Verschlechterung der Gleislage führt. Die dynamischen Kräfte werden von den Schienen über die Schwellen in das Schotterbett und weiter in den Untergrund eingeleitet. Der Schotter ist in diesem System das schwächste Glied und wird mit zunehmender Belastung zerstört. Dieser Vorgang wird speziell im Stoßlückengleis beschleunigt, da zusätzliche Kräfte in vertikaler Richtung wirken. Diese Tatsachen veranlassen eine Bahnverwaltung dazu, Schienen durchgängig zu verschweißen. Die Herstellung eines lückenlosen Gleis ist jedoch, auf Grund der temperaturbedingten Horizontalkräfte, nicht uneingeschränkt möglich. Um diese Kräfte in einer technisch beherrschbaren Größe zu halten, sind vor allem bei engen Bögen Zusatzmaßnahmen, wie z.B. der Einbau von Sicherungskappen oder die Verwendung von besohlenen Schwellen, erforderlich.

Schwellenbesohlungen sind eine Weiterentwicklung des Schotteroberbaus, welche in erster Linie zur Schotterschonung verwendet werden. Diese Werkstoffe ermöglichen unter der Radlast des Zuges eine größere Schieneneinsenkung und führen auf Grund dessen zu einer Verlängerung der Biegelinie der Schienen, was wiederum eine gleichmäßige Lastverteilung auf mehrere Schwellen bedeutet. Durch die verlängerte Biegelinie wird die Stützpunktkraft und somit die Schotterpressung unter der Schwelle reduziert. Damit bleibt die Gleislagequalität länger erhalten, was die Notwendigkeit von Hebe- und Richtarbeiten verringert.

Die Besohlung ermöglicht eine Einbettung der Gesteinskörner und stabilisiert die oberste Lage des Schotters, womit nicht nur die Kontaktfläche, sondern auch der Querverschiebewiderstand erhöht wird. Auf dem Markt werden verschiedene Besohlungen von unterschiedlichen Herstellern angeboten, welche an die jeweiligen Anforderungen des Gleises angepasst sind. Diese reichen von der Schotterschonung im Schwerlast, sowie im Hochgeschwindigkeitsverkehr bis hin zum Erschütterungsschutz im urbanen Bereich. Um diese Anforderungen zu erfüllen kommen Besohlungen aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Steifigkeiten zu Anwendung.

In dieser Arbeit sollen Besohlungen mit Hilfe von Laborversuchen hinsichtlich des Querverschiebewiderstandes untersucht werden, dabei ist festzustellen ob ein Zusammenhang zwischen dem Querverschiebewiderstand und der Kontaktfläche besteht. Zur Plausibilisierung der Messergebnisse werden bestehende Versuche am Streckengleis von der Universität Innsbruck herangezogen.

Abstract

The implementation of the societal demand for the expansion of public transport, especially shifting freight shipments from road to rail, has negative effects on the railway infrastructure. With increasing speed and axle loads, the track superstructure is exposed to increased tension, which in turn leads to a deterioration of the track position. The dynamic forces get transferred from the rails via the sleepers into the track ballast and further into the subgrade. The ballast is the weakest link in this system and gets destroyed with increasing burden. In this case, especially the jointed rail track is more vulnerable, as additional forces act in vertical direction. These facts must cause a railway administration to weld the rails continuously. However, due to the temperature-related horizontal forces, it is not possible to produce a continuous track without any restrictions.

In order to keep these forces at a technically controllable level, additional measures, such as the installation of sleeper ankers or the use of under sleeper pads (USP), are required, especially for narrow bends.

Under Sleeper pads, which are a further development of ballasted superstructure, are primarily used to protect the track ballast.

Because of the trains axle load, these materials allow a greater rail subsidence and therefore lead to an extension of the bending line of the rails, which in turn means an even load distribution over several sleepers. The extended bending line reduces the supporting point force and thus the ballast pressure under the sleeper reduces as well. That means that the quality of the track position is maintained longer, what reduces the need of tamping.

The USP enables the embedding of the aggregates and stabilizes the uppermost layer of the ballast, whereby not only the contact surface increases. It also produces a larger resistance to transverse displacement. There are various products from different manufacturers on the market, which are adapted to the respective requirements of the track. These range from ballast protection in heavy loads and high-speed traffic to vibration protection in urban areas. In order to meet these requirements, USP made of different materials with different stiffnesses are used.

In this thesis, under sleeper pads are to be examined with the help of laboratory tests with regard to the resistance to transverse displacement, in order to determine whether there is a connection between the resistance to transverse displacement and the contact surface. To check the plausibility of the measurement results, existing on site tests on the track from the University of Innsbruck will be used.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	ii
Erklärung zur Veröffentlichung	ii
Eidesstattliche Erklärung.....	ii
Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung.....	1
1.1 Allgemein	1
1.2 Ausgangslage	2
1.3 Ziel der Arbeit	2
1.4 Methoden der Arbeit	3
2 Schotteroberbau	4
2.1 Schwellenbesohlung.....	4
2.1.1 Vor und Nachteile von Schwellensohlen	5
2.1.2 Anforderungen an Material und Verbund.....	9
2.2 Lückenlos verschweißte Gleis	10
3 Einwirkungen auf das Gleis	14
3.1 Vertikalkräfte	15
3.2 Querkkräfte	15
3.3 Schienenlängskräfte	16
3.3.1 Beschleunigungs- und Bremskräfte.....	16
3.3.2 Normalkraft durch Temperatur	16
3.3.3 Kräfte als Folge der Wechselwirkung zwischen Bauwerken und Gleis	18
4 Widerstände im Gleis.....	19
4.1 Querverschiebewiderstand	19
4.1.1 Einfluss der Art, Geometrie und Gewicht der Schwelle	20
4.1.2 Einfluss des Schwellenabstandes	22
4.1.3 Einfluss des Bettungsquerschnitt:	22
4.1.4 Einfluss der Schotterqualität	23
4.1.5 Einschotterungsgrad.....	24
4.1.6 Einfluss des Verdichtungsverhältnisses des Schotters	24
4.1.7 Einfluss des mechanischen Verdichtungsverfahrens	25
4.1.8 Angewandte Messmethoden zur Bestimmung des QVW	25
4.1.9 Umwelteinflüsse.....	26
4.1.10 Einfluss zusätzlicher Sicherungsmaßnahmen.....	27
4.2 Längswiderstand	27
4.2.1 Längsverschiebewiderstand LVW.....	27

4.2.2	Durchschubwiderstand	28
4.3	Verdrehwiderstand VDW zwischen Schiene und Schwelle	29
4.4	Biegesteifigkeit des Gleisrostes	29
5	Versuchsablauf	30
5.1	Eigenschaften der einzelnen Besohlungen	30
5.2	Besohlungstypen.....	33
5.2.1	SLB 3007	33
5.2.2	SLB 1510	33
5.2.3	SLN 1010.....	34
5.2.4	SL NG	34
5.2.5	M02	34
5.3	Wahl der Prüfkörper	35
5.4	Versuchsaufbau.....	36
6	Auswertung Laborversuche	42
6.1	Auswertung der Messergebnisse der Prüfkörper	43
6.1.1	Laborauswertung im unkonsolidierten Zustand	44
6.1.2	Laborauswertung im konsolidierten Zustand	45
6.1.3	Gegenüberstellung der Laborauswertung unkonsolidiert / konsolidiert.....	46
6.1.4	Vergleich unterschiedlicher Prüfkörpergrößen.....	48
6.1.5	Auswertung der Kontaktfläche.....	49
6.1.6	Einfluss der Kontaktfläche auf den konsolidierten Zustand.....	52
7	Vergleich Labor zu in Situ	56
7.1	Versuchsaufbau der Messungen im Gleis.....	56
7.2	QVW Messungen am Streckengleis	57
7.2.1	QVW Messungen an L6 Schwellen	58
7.2.2	L6 Schwelle: Ergebnisse und Vergleich zu den Labormessungen	58
7.2.3	QVW Messungen an der K1 Schwelle	61
7.2.4	K1 Schwelle: Ergebnisse und Vergleich zu den Labormessungen	61
7.3	Vergleich L6 / K1 Schwellen.....	64
7.4	Unterschiedliche Vergleichsvoraussetzungen	67
8	Conclusio	69
8.1	Ausblick	70
9	Verzeichnisse	71
9.1	Abbildungsverzeichnis.....	71
9.2	Diagrammverzeichnis	72
9.3	Tabellenverzeichnis.....	72
9.4	Literaturverzeichnis.....	73

1 Einleitung

Bereits in der Antike wurden die Vorteile von in der Spur geführten Fahrzeugen erkannt. Der Vorläufer der heutigen Schienen, waren damals in die Straße geschlagene Rillen, welche speziell in Steinbrüchen, dem Transport von schweren Wagen dienten. Gegen Ende des Mittelalters wurden hölzerne Gleise verlegt, durch diese Erfindung war der Transport nicht mehr auf die bestehenden Straßen angewiesen. Ab 1770 wurde das Holz durch eiserne Schienen, welche auf Steinblöcken gelagert wurden, ersetzt. Dadurch bekam der Fahrweg auch seinen Namen, die eiserne Bahn.

Mit der Erfindung der Dampfmaschine erhielt die Eisenbahn ihren Durchbruch. Seit daher sind Transporte von Gütern und Personen über große Entfernungen in relativ kurzer Zeit möglich. Das System, der auf Schienen geführten Bahn, wurde seit deren Anfängen bis heute ständig weiterentwickelt und auf die Wechselwirkungen von Fahrzeug und Fahrweg angepasst.¹

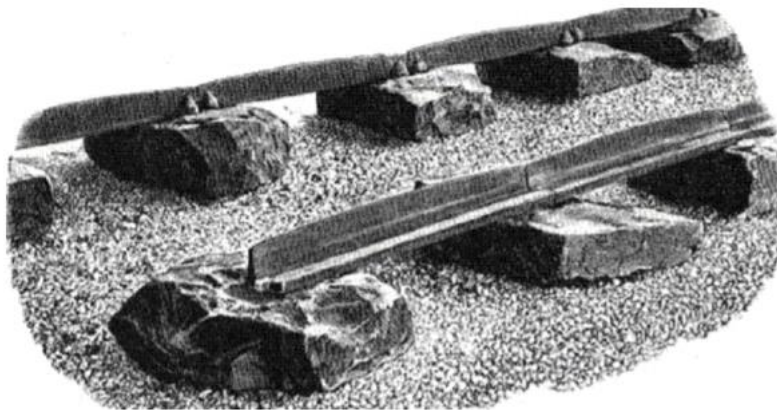


Abbildung 1: Auf Steinblöcken gelagerte Schienen²

1.1 Allgemein

Das Gleis besteht nicht nur aus Einzelkomponenten, welche für sich allein gesehen werden sollten, sondern als „System Eisenbahnrad – Fahrweg“. Das Eisenbahnrad überträgt senkrechte und horizontale Kräfte auf das Gleis. Um die Belastungen auf den Fahrweg zu reduzieren, sind die einzelnen Systemteile der Fahrzeuge über Komponenten mit Feder- und Dämpferwirkung gekoppelt. Andererseits muss der moderne Schotteroberbau eine ausreichende Elastizität aufweisen und die Kräfte so verteilen, dass die zulässige Schotterpressung unter der Schwelle und die Bodendruckspannungen nicht überschritten werden.

¹ Vgl.: M. Hinterndorfer, Grundlagen des Eisenbahnbetriebs, Fh. St. Pölten WS 2013

² Vgl.: B. Knoll, Oberbau Einführung, Fh. St. Pölten WS 2015

1.2 Ausgangslage

Seit der Errichtung der ersten Eisenbahn haben sich die Geschwindigkeiten sowie die Achslasten der Fahrzeuge vervielfacht und die Ansprüche auf den Fahrweg wurden ständig erhöht. Darüber hinaus wird durch die hohe Frequenz an Zugfahrten die Möglichkeit der Instandhaltung stark begrenzt. Das Ziel muss es sein, die Komponenten des Fahrweges möglichst hoch verfügbar und instandhaltungsarm zu konstruieren. Dazu zählt auch beispielsweise die lückenlose Verschweißung der Schienen. Ein durchgängig verschweißtes Gleis begrenzt die Längsdehnung der Schienen, erhöht jedoch die Spannungen. Diese zusätzlichen Spannungen müssen über die Schwellen an das Schotterbett abgegeben werden und erhöhen die Anforderungen an die Gleislagestabilität. Die Gleislagestabilität nimmt eine zentrale Rolle im Eisenbahnoberbau und in dessen Planung ein. Sie beeinflusst die Qualität und die Sicherheit aller im Fahrweg vorhandenen Komponenten. Die Stabilität der Gleislage ist insbesondere vom Querverschiebewiderstand der Schwellen, also der Verzahnung der Schwelle mit dem Schotter abhängig.

In der Vergangenheit wurde durch zahlreiche Messungen bewiesen, dass der Schotteroberbau mit unbesohlenen Betonschwellen im geraden Gleis einen ausreichend hohen Querverschiebewiderstand zur Aufnahme der Horizontalkräfte aufweist. Um jedoch bei engen Bögen eine Herstellung von lückenlosen Gleisen zu ermöglichen sind zusätzliche Maßnahmen notwendig. Einer dieser Maßnahmen ist die Verwendung von besohlenen Schwellen.

Die Besohlung ermöglicht eine Einbettung des Schotterkorns in das elastische Material, wodurch die lastabtragende Fläche zwischen Schwelle und Schotter vergrößert wird. Die Erfahrung, sowie Messungen am Streckengleis zeigen, dass durch die Verwendung von besohlenen Schwellen der Querverschiebewiderstand steigt.

Neueste Messergebnisse geben den Anschein, dass es einen Zusammenhang zwischen der Kontaktfläche der Schwelle mit dem Schotter und dem Querverschiebewiderstand der Schwellen gibt.

1.3 Ziel der Arbeit

In dieser Diplomarbeit soll mit Hilfe von Versuchen der Zusammenhang der Kontaktfläche zwischen dem Schotter und der Schwellenbesohlung untersucht und die Auswirkungen auf den Querverschiebewiderstand bzw. die Gleislagestabilität erforscht werden.

Schwellenbesohlungen sind Werkstoffe aus verschiedenen Materialien. Das Materialverhalten und die Steifigkeit einer Besohlung ist immer an die jeweiligen Eigenschaften des Eisenbahnoberbaus anzupassen. In Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebsprogramm, welches auf einer Eisenbahnstrecke verkehrt, sowie den örtlichen Gegebenheiten werden unterschiedliche Anforderungen an die Besohlungen gestellt. Schwellenbesohlungen werden am Streckengleis vorwiegend zur Schotterschonung eingesetzt wohingegen im urbanen Bereich diese Werkstoffe vermehrt zum Schutz vor Erschütterungen ihre Anwendung finden.

Die Anforderungen stehen daher immer in Wechselwirkung zwischen Achslast und Geschwindigkeit

Bei der vorliegenden Arbeit wird der Einfluss von konventionellen Schwellen und Schwellen mit unterschiedlichen Besohlungstypen auf den Querverschiebewiderstand gegenübergestellt. Die Steifigkeit der unterschiedlichen Besohlungstypen hat einen wesentlichen Einfluss auf die Kontaktfläche. Die Vermutung besagt, dass eine weiche Besohlung eine größere Einbettung der Schotterkörner ermöglicht, wodurch eine deutliche Zunahme der Kontaktfläche erwartet wird. Eine hohe Kontaktfläche schont auf der einen Seite den Schotteroberbau und auf der anderen sollte der Querverschiebewiderstand erhöht werden. In dieser Arbeit gilt es nun zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen der Größe der Kontaktfläche und einer Zunahme des Querverschiebewiderstandes besteht.

1.4 Methoden der Arbeit

Im ersten Teil der Arbeit wird auf die theoretischen Hintergründe der Gleislagestabilität eingegangen. Dabei werden die Einwirkungen und die Widerstände auf den Oberbau beschrieben. Darüber hinaus werden die vorhandenen Methoden zur Messung und die Ansätze zur Berechnung des Querverschiebewiderstandes erläutert.

Nach der theoretischen Abhandlung erfolgt die Wahl der geeigneten Prüfkörper zur Durchführung der Laborversuche. Der Querverschiebewiderstand setzt sich aus dem Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand zusammen. Bei den durchzuführenden Laborversuchen wird nur der Sohlwiderstand auf ausgewählten Prüfkörpern bestimmt, was jedoch nicht den Bedingungen am Streckengleis entspricht. Um eine Anpassung der Laborversuche an reale Bedingungen zu ermöglichen, werden bereits bestehende Feldversuche herangezogen.

Abschließend werden die Ergebnisse der Feld- und Laborversuche ausgewertet und gegenübergestellt. Dabei wird versucht das Ergebnis aus den Laborversuchen auf reale Streckenbedingungen umzulegen.

2 Schotteroberbau

Auf den ersten Blick möge das System des Schotteroberbaus als recht simpel erscheinen. Für den Laien besteht der Fahrweg zumeist nur aus dem Schotter mit darin „schwimmenden“ Schwellen und darauf gelagerten Schienen. In Wahrheit besteht das System Fahrweg nicht nur aus seinen Einzelkomponenten, sondern aus einem in sich geschlossenen Gesamtsystem. Die weltweit am häufigsten vorkommende Oberbauform sind in Schotter gelagerte Schwellen. Der Schotter ist das schwächste Glied im System Fahrweg und ist ständig einer latenten dynamischen Umlagerung unterworfen. Der Oberbau erfährt durch den Einfluss von Schienenfahrzeugen dynamische Kräfte, welche zu einer Verschlechterung der Gleislage führt. Die Auflagerfläche der Schwelle bestimmt die Größe des Bettungsdrucks, welche in Abhängigkeit der Schotterbetthöhe auf den Unterbau einwirkt. Die hohen Kontaktkräfte im Betonschwellengleis können unter Umständen zur Zerstörung des Schotters führen. Die frühzeitige Schotterzerstörung ist vor allem bei steifen Untergrundverhältnissen mit starker Schlupfwellenbildung zu beobachten.³

2.1 Schwellenbesohlung

Schwellenbesohlungen sind eine Weiterentwicklung des klassischen Eisenbahnoberbaus und wurden erstmals versuchsweise im Jahr 1996 zur Schonung des Schotters im Streckennetz der ÖBB eingesetzt.⁴ Die elastischen Werkstoffe werden direkt unterhalb der Gleisschwelle angebracht. Diese können entweder bei der Schwellenfertigung direkt in den Frischbeton eingelegt, oder nachträglich an der Unterseite aufgeklebt werden.

Damit die Schwellenbesohlungen im Zuge von Gleisdurcharbeitungen nicht von den tiefgreifenden Stopfpickel erfasst und beschädigt oder abgetrennt werden können, sind diese nicht vollflächig, sondern umlaufend um ca. 5 mm bis 15 mm kleiner als die Unterseite der Betonschwelle.⁵



Abbildung 2: Querschnitt einer besohnten Schwelle und möglicher Aufbau einer Schwellenbesohlung

³ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 34.

⁴ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 32.

⁵ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen, 2011, S. 8.

2.1.1 Vor und Nachteile von Schwellensohlen

Durch die Verwendung von Schwellenbesohlungen wird eine zusätzliche und dauerhafte Elastizität in den Oberbau eingebracht, welche die Lebensdauer des Schottergleises und die Intervalle zwischen den Stopfarbeiten verlängert. Die elastische Schwellenbesohlung ermöglicht unter der Radlast des Zuges eine größere Schieneneinsenkung und führt auf Grund dessen zu einer Verlängerung der Biegelinie der Schienen, was wiederum eine gleichmäßige Lastverteilung auf mehrere Schwellen bedeutet. Durch die verlängerte Biegelinie wird die Stützpunktkraft und somit die Schotterpressung unter der Schwelle reduziert.

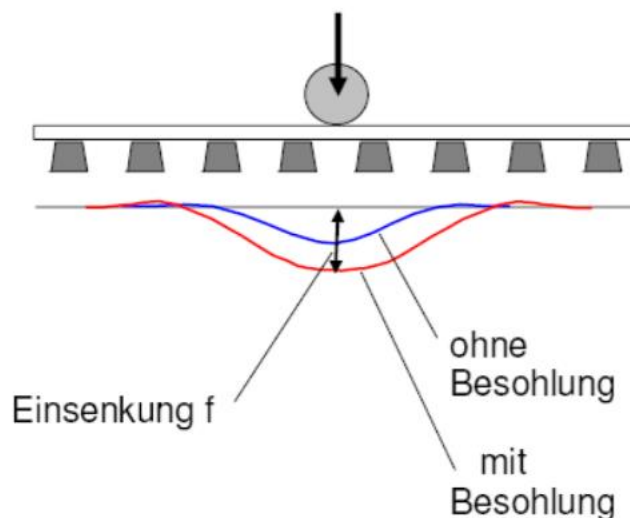


Abbildung 3: Einsenkung unter Betriebslast mit und ohne Besohlung⁶

Mit zunehmender Anzahl von Achsüberfahrten werden die Schottersteine in die Besohlung eingebettet, wodurch eine Vergrößerung der Kontaktfläche feststellbar ist. Im Vergleich zu unbesohlenen Betonschwellen, welche auf Grund einer steifen Unterseite nur wenige Berührungspunkte (5-8 %) mit Schotter aufweisen, können Besohlungen, speziell aus einem elasto-plastischen Material, eine Kontaktfläche von 30 – 35 % erreichen.⁷

Dieser Effekt führt zu einer Stabilisierung der obersten Schotterlage und verteilt die eingeleiteten Kräfte auf mehrere Gesteinskörner. Damit wird nicht nur die Kontaktpressung reduziert, sondern auch eine frühzeitige Schotterzerstörung verhindert.

Auf Grund der besseren Lastverteilung ist eine Reduzierung der Schotterbettstärke möglich, dies ist nicht das primäre Ziel von Schwellenbesohlungen, bringt jedoch den Vorteil von geringeren Errichtungskosten bei Gleisneulagen, wird aber in der Praxis nicht angewandt.

⁶ Knoll Bernhard, Oberbau auf Hochleistungsstrecken, 2019, S. 14.

⁷ Loy, H., Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs, 2008.



Abbildung 4: Digitale Kontaktflächenanalyse bei besohlenen Betonschwellen nach dem Ausbau⁸

Wie Laborversuche und Gleismessungen zeigen, ist der Querverschiebewiderstand von besohnten Schwellen auf Grund einer tieferen Einbettung der Schotterkörner in die Besohlung höher als jener von konventionellen Betonschwellen. Dieser bleibt infolge der verlangsamten Abrundung der Schotterkörner auch länger erhalten und reduziert damit den Instandhaltungsaufwand.

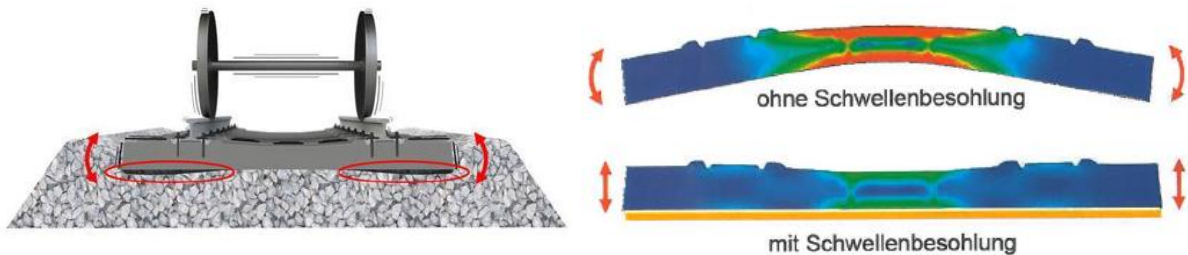
Der Einsatz von Schwellenbesohlungen führt auf Grund einer gleichmäßigeren Auflagerung im Schotterbett zu einer besseren Gleislagequalität, da die Hohllagenbildung, speziell unter den Schwellenköpfen fast vollständig vermieden wird. Messungen an unbesohnten Betonschwellen zeigen am Schwellenkopf eine deutlich größere Einsenkung als in Schwellenmitte. Dieses Phänomen führt häufig zum „Aufreiten“ der Betonschwelle in Schwellenmitte, was wiederum eine Erhöhung des Biegemomentes bedeutet. Es ist davon auszugehen, dass die partielle Hohllagenbildung unter den Schwellenköpfen die Ursache für eine frühzeitige Schotterzerstörung darstellt. Im Vergleich dazu, zeigen Messungen an besohnten Betonschwellen bei der Überfahrt nur geringe Unterschiede zwischen Schwellenkopf und Schwellenmitte.⁹

Hohl liegende Schwellen begünstigen neben der Schotterzerstörung auch die Bildung von Schlupfwellen. Anfällig für die Schlupfwellenbildung sind Betongleise mit einem Radius von weniger als 600 m. Die Erfahrung zeigt, dass sehr steife Gleiskonstruktionen (unbesohlte Betonschwellen, steife Zwischenlagen) die Bildung von Schlupfwellen fördern.¹⁰

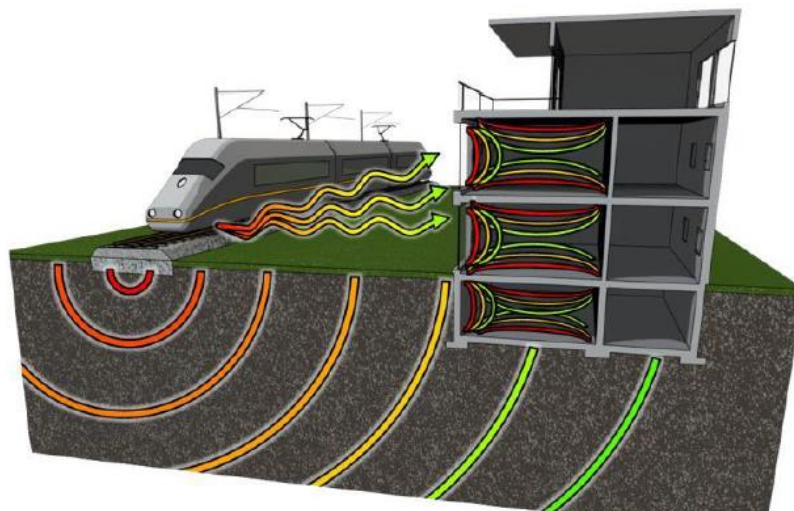
⁸ Loy, H., Minderung von Erschütterungsemissionen und sekundärem Luftschall durch Schwellenbesohlungen - Wirkungsweise und Erfahrungen, 2015, S. 51.

⁹ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 79–83.

¹⁰ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 109.

Abbildung 5: Schwellenverformung mit und ohne Besohlung¹¹

Die Gleislagequalität hat auch einen erheblichen Einfluss auf das Auftreten von Vibrationen. Eine Bahnstrecke mit einem langfristig verbesserten Gleislageverhalten emittiert durch die Verwendung von Schwellenbesohlungen weniger Lärm und Vibrationen, da die Züge reibungsloser fahren. Der Einsatz von hochelastischen Materialien können die Emissionen in die Umgebung erheblich reduzieren, indem das physikalische Prinzip der Massenkraftkompensation zur Schwingungsisolierung genutzt wird. Dabei ist die Eigenfrequenz idealerweise deutlich niedriger als die zu isolierende Anregerfrequenz. Die Wirksamkeit elastischer Bauteile im Bahnaufbau hängt von Variablen wie Masse, Steifigkeit und Dämpfung ab. Je nach Anforderung können die Materialien mit einer mehr oder weniger ausgeprägten Dämpfungseigenschaft versehen werden. Mit einer dynamischen Steifigkeit, welche für jede Anwendung genau eingestellt werden kann, können Schwellenbesohlungen für die Schwingungsisolierung im Gleis verwendet werden. Je höher die dynamische Wirksamkeit des gewählten Materials ist, desto höher ist in der Regel der Erschütterungsschutz.

Abbildung 6: Ausbreitung von Vibrationen im Bereich der Eisenbahn¹²

¹¹ Loy, H., Minderung von Erschütterungsemissionen und sekundärem Luftschall durch Schwellenbesohlungen - Wirkungsweise und Erfahrungen, 2015, S. 52.

¹² Loy, H., Minderung von Erschütterungsemissionen und sekundärem Luftschall durch Schwellenbesohlungen - Wirkungsweise und Erfahrungen, 2015, S. 51.

Der Einsatz von Schwellenbesohlungen kann neben den vielen positiven Eigenschaften auch zu Nachteilen im Schotteroberbau führen. Durch den Einbau von elastischen Sohlen nimmt die Schwingweite der Schwelle unter der dynamischen Last zu. Besonders bei weich besohlenen Schwellen ist eine erhöhte Reibung an den Schwellenflanken festzustellen, in Folge dessen steigt der Schotterabrieb in diesem Bereich. Dieser Verschleiß ist flächenmäßig begrenzt und zeigt keine Auswirkungen auf die Gleislage, daher ist dieser Effekt zu vernachlässigen.

Besohlte Schwellen sind Verbundwerkstoffe und werden seit der Jahrtausendwende im modernen Oberbau eingesetzt. Die technische Nutzungsdauer eines Gleises beträgt in etwa 30 Jahre, diese Zeitspanne wurde bei besohlenen Schwellen noch nicht erreicht, daher erfolgte bislang kein Abtrag in großer Stückzahl. Ein zukünftiger Ausbau von besohlenen Schwellen ist mit erhöhten Entsorgungskosten verbunden, da bei der Wiederverwertung das elastische Material von der Betonschwelle gelöst werden muss.¹³

Bei der Verwendung von besohlenen Schwellen überwiegen die positiven Effekte auf den Eisenbahnoberbau. Die Vorteile können in folgende Punkte zusammengefasst werden.

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

Die Vielzahl an positiven Einflüssen auf das Gleisverhalten hat die ÖBB dazu veranlasst, bei Gleisneulagen alle Betonschwellen im Hauptnetz (in Gleisen mit einer Verkehrsbelastung größer 30.000 Gesamtbruttotonnen pro Jahr bzw. in Bögen mit einem Radius < 500m) standardmäßig zu besohlen.¹⁴



Abbildung 7: Schonung des Schotterbettes durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen¹⁵

¹³ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen, 2011, S. 7.

¹⁴ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 32.

¹⁵ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 35.

2.1.2 Anforderungen an Material und Verbund

Die Anforderungen an das Beschlungsmaterial werden in der BN 918 145-01 definiert. Folgende Eigenschaften sind nachzuweisen:

- Statischer Bettungsmodul
- Dynamischer Bettungsmodul
- Dauerfestigkeit
- Tieftemperaturbeständigkeit ¹⁶
- Witterungsbeständigkeit
- Alterungsbeständigkeit (künstliche Alterung)
- Entflammbarkeit

Der Bettungsmodul stellt die Beziehung zwischen der Flächenpressung und der Einsenkung dar.

$$C = \frac{p}{y}$$

C	Bettungsmodul
p	Flächenpressung
y	Einsenkung

Der statische und dynamische Bettungsmodul wird im Labor mittels Normschotterplatte ermittelt. Die Kenngröße C_{stat} dient zur Abschätzung der statischen Einfederung des Gleises oder der Schiene unter Betriebslasten und dient zu Vergleichszwecken verschiedener Schwellenbeschlungen. Des Weiteren gibt der statische Bettungsmodul die Prüflast für die Dauerfestigkeitsprüfung vor. Mit der Kenngröße C_{dyn} kann die niederfrequente Biegeverformung der Schiene unter dem rollenden Rad aus dem Zusammenspiel der Biegeelastizität von Schiene und besohlter Schwelle abgeschätzt werden. Der niederfrequente Bettungsmodul C_{dyn} dient zur Ermittlung der Oberbaudynamik.¹⁷

Zur Absicherung des Verbunds zwischen Schwelle und Sohle müssen folgende mechanische Eigenschaften überprüft werden.¹⁸

■ Abreißfestigkeit

Die wichtigste Anforderung an den Verbund bildet die Mindestabreißfestigkeit. Hierbei wird jene Kraft bestimmt, welche notwendig ist, um ein 50 mm großes kreisrundes Beschlungsteil von der Betonschwelle zu lösen. Zur Bewertung wird ein Wert in N/mm² angegeben.

¹⁶ Vgl. *Pospischil, F.*, Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015.

¹⁷ Vgl. *Deutsches Institut für Normung e.V.*, Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, 45673-6, S. 6.

¹⁸ *Deutsches Institut für Normung e.V.*, Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, 45673-6, S. 13–17.

■ Frost- und Taubeständigkeit des Verbundes

Sowohl das Material der Schwellenbesohlung als auch der Verbund zwischen Betonschwelle und Schwellenbesohlung sollte gegen Einwirkungen infolge Tau-Frost-Wechseln beständig sein. Nach 50 Tau-Frost-Zyklen wird der dynamische Bettungsmodul ermittelt und mit Referenzwerten verglichen, sowie die Abreißfestigkeit überprüft.

■ Abscherfestigkeit

Die Abscherfestigkeit ist horizontal zur Verbundfläche zu ermitteln. Durch die zweischnittige Anordnung der Schwellenbesohlung wird sichergestellt, dass nur eine abscherende Beanspruchung aufgebracht wird und somit exzentrische Lastangriffe vermieden werden.

Um die genannten Eigenschaften zu erfüllen, benötigen die Besohlungen ein Kontaktmedium, welches einen Verbund zur Betonschwelle herstellt. Je nach Produzent, werden unterschiedliche Verfahren angewendet. Die meist verwendeten Schwellenbesohlungen besitzen ein Kunststoffgeflecht (Wirrgitter) als Kontaktmedium. Dieses wird im Produktionsprozess in das Besohlungsmaterial eingebunden. Eine andere Möglichkeit zur Verbundherstellung ist die Verwendung eines Vlieses, die neueste Entwicklung ist eine Befestigung mittels Flock.

2.2 Lückenlos verschweißte Gleis

Ab einer durchgehenden Schienenlänge von mehr als 60 m gelten Gleise als lückenlos verschweißt, dabei wird die temperaturbedingte Längenänderung der Schiene behindert. Die daraus resultierenden Druck- oder Zugkräfte werden über die Schienenbefestigung, die Schwellen und den Schotter in den Unterbau übertragen. Um diese Kräfte in einer technisch beherrschbaren Größe zu halten, sind die Schienen bei einer neutralen Temperatur zu verspannen. Die Neutraltemperatur auf der freien Strecke liegt in Österreich zwischen +20°C und +26°C und ist vom Bogenradius sowie der Schwellenart abhängig.¹⁹

Anwendung	Neutraltemperaturbereich im Freiland	
Betonschwellen	$R \leq 300 \text{ m}$ +24°C bis +26°C	$R > 300 \text{ m}$ +20°C bis +26°C
	$R \leq 550 \text{ m}$ +24°C bis +26°C	$R > 550 \text{ m}$ +20°C bis +26°C
Feste Fahrbahn und Masse-Feder-Systeme	+10°C bis +20°C	

Tabelle 1: Neutraltemperatur der Schiene im Freiland²⁰

¹⁹ Vgl. ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 9.

²⁰ ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 15.

Lückenlos verschweißte Gleise (Lv-Gleise) bringen technische und ökonomische Vorteile, daher ist diese Anwendung gegenüber dem Stoßlückengleis zu bevorzugen. Bei der Herstellung von Lv-Gleisen können folgende positiven Eigenschaften genannt werden:²¹

- Wirtschaftlichkeit (Herstellungskosten, Instandhaltungskosten)
- Fahrkomfort
- Rückstromführung
- Energieersparnis
- Lärmverminderung
- Schonung des Oberbaus und der Fahrzeuge
- höhere Fahrgeschwindigkeit

Ein Schienenstoß stellt immer eine Unstetigkeitsstelle im Aufbau des Gleises dar. Jede Achsüberfahrt verursacht, besonders bei niedrigen Temperaturen und einer weit geöffneten Stoßlücke einen vertikalen Schlag auf das Gleis. Diese zusätzlichen punktuellen Kräfte führen früher oder später zu einer Verschlechterung der Gleislage und reduzieren die Liegedauer der einzelnen Oberbaukomponenten. Schienenstöße erfordern deshalb einen erhöhten Aufwand der Schienenpflege, so ist zum Beispiel ein regelmäßiges Stopfen und Berichten der Stoßbrücke notwendig, um solche vertikalen Schläge zu reduzieren. Denn diese schlagartige Belastung führt zu einer erhöhten Schotterpressung und beansprucht den Unterbau, die Ausbildung einer Spritzstelle ist in diesem Bereich keine Seltenheit. Zur Minimierung der Schotterpressung unter einer Stoßbrücke werden zwei Schwellen zu einer Doppelschwelle verschraubt und mit der Anordnung einer breiten Rippenplatte wird die Kraft gleichmäßig auf beide Schwellen verteilt.



Abbildung 8: Schienenstöße sind Unstetigkeitsstellen²²



Abbildung 9: Spritzstelle unter einem Stoß (Foto Veit)²³

²¹ ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 11.

²² Vgl.: F. Auer; Zur Verschleißreduktion von Gleisen in Engen Bögen; Wien 2010, Foto J. Hofer

²³ Vgl.: M. Landgraf; Der Einfluss von Unterbau, Untergrund und Wasserwigigkeit auf die Gleislagestabilität; TU Graz 2011

Mit der Zeit wurde versucht immer engere Bögen zu verschweißen, dass das lückenlos verschweißte Gleis aber nicht uneingeschränkt anwendbar ist wurde spätestens nach der ersten Gleisverwerfung erkannt. Zur Vermeidung einer Gleisverwerfung wurde bei Holzschwellen der Querverschiebewiderstand durch die Verwendung von Sicherungskappen erhöht. Durch die Verbreiterung des Schotterbettes an der Bogenaußenseite (halbe Bettungsbreite $d = 1,80\text{m}$) sowie die Montage von Sicherungskappen an den Schwellen (einseitig oder beidseitig) können Gleisbögen mit engeren Radien verschweißt werden. Für Gleise mit Holzschwellen und Rippenplattenbefestigung ergeben sich Mindestradien R_{\min} für das lückenlose Verschweißen im Gleisrang a gemäß nachfolgender Tabelle.

Oberbauart		Regel- querschnitt	halbe Bettungs- breite: $d=1,80\text{m}$	SIK jede 3.Schwelle (innenseitig)	SIK jede 2.Schwelle (innenseitig)	SIK jede Schwelle (innenseitig)	SIK jede Schwelle (beidseitig)
Schwelle	Schienen- form	$R_{\min} [\text{m}]$	$R_{\min} [\text{m}]$	$R_{\min} [\text{m}]$	$R_{\min} [\text{m}]$	$R_{\min} [\text{m}]$	$R_{\min} [\text{m}]$
Holz (Buche, Eiche)	49 E1	> 450	$450 \geq R_{\min} > 400$	$400 \geq R_{\min} > 320$	$320 \geq R_{\min} > 260$	$260 \geq R_{\min} > 180$	$180 \geq R_{\min} \geq 170$
	54 E2	> 555	$555 \geq R_{\min} > 490$	$490 \geq R_{\min} > 370$	$370 \geq R_{\min} > 315$	$315 \geq R_{\min} > 190$	$190 \geq R_{\min} \geq 180$
	60 E1	> 850	> 750	$750 \geq R_{\min} > 500$	$500 \geq R_{\min} \geq 370$	$370 \geq R_{\min} \geq 230$	$230 \geq R_{\min} \geq 210$

Tabelle 2: Mindestradien R_{\min} für Lv-Holzschwellengleise mit Rp-Befestigung im Gleisrang a²⁴

„Im Hauptnetz der ÖBB werden Holzschwellengleise standardmäßig in sehr engen Gleisbögen mit Radien $\leq 250\text{m}$ verwendet. Ein lückenloses Verschweißen der Betonschwellengleise ist in sehr engen Bögen nicht oder nur mit zusatzmaßnahmen möglich“.²⁵ Zusätzlich Maßnahmen, um engere Bögen lückenlos zu verschweißen ist neben dem Einbau von Sicherungskappen die Anordnung von besohnten Betonschwellen.

Da in Österreich bis dato noch weniger Erfahrungswerte vorliegen, dürfen Betonschwellengleise vorerst nur bis zu einem Mindestbogenradius von $R_{\min} = 250\text{m}$ lückenlos verschweißt werden. Für Bogenradien $R_{\min} < 250\text{m}$ ist eine Zustimmung der technisch verantwortlichen Stelle einzuholen. In der folgenden Tabelle sind die Mindestradien zur lückenlosen Verschweißung von Betonschwellen dargestellt.

²⁴ ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 26.

²⁵ Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 17.

Oberbauart		Regel- querschnitt	halbe Bettungs- breite: d=1,80m	SIK jede 3.Schwelle (innenseitig)	SIK jede 2.Schwelle (innenseitig)	SIK jede Schwelle (innenseitig)
Schwelle	Schienen- form	R_{min} [m]	R_{min} [m]	R_{min} [m]	R_{min} [m]	R_{min} [m]
Be 19, Be 19a, K1, L1, L2 unbesohlt	49 E1	> 200*	$200^* \geq R_{min} > 175^*$	$175^* \geq R_{min} > 170^*$	---	---
	54 E2	> 250*	$250^* \geq R_{min} > 200^*$	$200^* \geq R_{min} \geq 170^*$	---	---
	60 E1	> 300	$300 \geq R_{min} > 250$	$250^* \geq R_{min} \geq 200^*$	---	---
K1, L1, L2 besohlt	49 E1	> 170*	---	---	---	---
	54 E2	> 175	$175^* \geq R_{min} > 170^*$	---	---	---
	60 E1	> 200	$200^* \geq R_{min} > 190^*$	$190^* \geq R_{min} > 170^*$	---	---
L6 unbesohlt	49 E1	> 250	$250^* \geq R_{min} \geq 220^*$	$220^* \geq R_{min} \geq 190^*$	$190^* \geq R_{min} > 170^*$	---
	54 E2	> 300	$300 \geq R_{min} \geq 250$	$250^* \geq R_{min} \geq 200^*$	$200^* \geq R_{min} > 180^*$	$180^* \geq R_{min} > 170^*$
L6 besohlt	49 E1	> 180*	$180^* \geq R_{min} \geq 170^*$	---	---	---
	54 E2	> 210*	$210^* \geq R_{min} \geq 190^*$	$190^* \geq R_{min} \geq 170^*$	---	---

Tabelle 3: Mindestradien R_{min} für Lv-Betonschwellengleise im Gleisrang a²⁶

Bei Betrachtung dieser Tabelle ist bei Betonschwellen ersichtlich, dass im Regelquerschnitt durch die Verwendung von Besohlungen gegenüber unbesohlenen Schwellen um 70 – 100 m engere Radien lückenlos verschweißt werden können. Die Verwendung von Schwellenbesohlung ist mit dem Einsatz von Sicherungskappen an jeder dritten Schwelle gleichzusetzen. Die Kombination aus besohlenen Schwellen und Sicherungskappen ermöglicht eine lückenlose Verschweißung des Gleises bis zu einem Radius von 170 m.

²⁶ ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 25.

3 Einwirkungen auf das Gleis

Das rollende Rad überträgt Kräfte auf die Schienen und beansprucht den Oberbau. Ausgehend durch die hohe Pressung am Berührungspunkt zwischen Rad und Schiene wird die Kraft schrittweise über die einzelnen Oberbaukomponenten bis hin zum Untergrund abgeleitet. Die Kräfte, welche auf das Gleis wirken müssen durch Widerstände, die das Gleis diesen Kräften entgegenstellt, aufgenommen werden. Die Kräfte werden nach ihrer Wirkungsrichtung in folgende drei Gruppen unterteilt.



Abbildung 10: Einwirkungen auf das Gleis²⁷

- Vertikalkräfte (grün)
 - Radlasten
 - Lotrechte nach unten wirkende Schläge (Stoßlücken, Räder mit Flachstellen)
 - Lotrechte nach oben wirkende Kräfte (Schiene als Träger auf federnden Stützen)
- Querkräfte (blau)
 - In der Geraden die Anlaufstöße des Spurkranzes
 - Im Bogen der Führungsdruck und die Fliehkräfte

²⁷ Knoll Bernhard, Kräfte und Lastabtragung, WS 2015.

- Schienenlängskräfte (gelb)
 - Kräfte aus dem Rollvorgang der Fahrzeuge (Brems- und Beschleunigungskräfte)
 - Kräfte als Folge der Temperaturschwankungen in den Schienen
 - Kräfte als Folge der Wechselwirkung zwischen Bauwerken und Gleis
 - Eigenspannungen in der Schiene beim Walzen sowie Schrumpfspannungen bei Schweißarbeiten

3.1 Vertikalkräfte

Vertikalkräfte werden durch Radsatzlasten verursacht, diese sind von der Verkehrsart bzw. ihrer Geschwindigkeit abhängig. Für Radsatzlasten bis 300 kN und einer Geschwindigkeit bis 300 km/h kann in Hochgeschwindigkeits- (HGV), Personen- (PV), Güter- (GV) und Schwerverkehr unterschieden werden.

Verkehrsart	HGV/PV	PV/GV	SV
Radsatzlast [kN]	200	250	300

Tabelle 4: Radsatzlast in Abhängigkeit von der Verkehrsart²⁸

Die statischen Verkehrslasten verursachen Spannungen, elastische Verformungen und Stützpunktkräfte im Gleis. Mit anwachsender Geschwindigkeit entstehen dynamische Einwirkungen, welche durch Unregelmäßigkeiten im Fahrkantenverlauf wie zum Beispiel durch Stoßlücken oder Gleislagefehler verstärkt werden. Unvermeidbar sind auch bei sorgfältig instand gehaltenen Gleisen Anregungen aus der Hohlform der Schwellen.

Rollenden Fahrzeuge regen dynamische Belastungen an und führen zu abwechselnden Be- und Entlastungen der Räder, dadurch entstehen nicht nur nach unten, sondern auch nach oben wirkende Kräfte, da die Schiene als elastischer Träger auf federnden Stützen zu betrachten ist.

Sind die Fahrzeuge nicht entsprechend gewartet und die Räder mit Fachstellen versehen, führen diese zu vertikalen und horizontalen Schlägen, welche eine zusätzliche Belastung für den Oberbau sind. Auch bei der Bogenfahrt entsteht infolge der unausgeglichene Seitenbeschleunigung und einer möglichen Ladungsverschiebung eine Änderung der Radlastkräfte. Dabei kommt es zu einer Belastung des einen und gleich großer Entlastung des anderen Rades eines Radsatzes.

3.2 Querkräfte

Die Spurführungen der Fahrzeuge erzeugen Führungskräfte, welche die Schienen horizontal im rechten Winkel zur Gleisachse belasten. Diese Kräfte wirken sich auf Grund der

²⁸ Fendrich, L., Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2007, S. 253 f.

sinusförmigen Laufeigenschaften der Fahrzeuge sowohl in der Geraden als auch im Bogen, wobei der Führungsdruck während der Bogenfahrt verstärkt auftritt. Die Führungskräfte sind von mehreren fahrzeugtechnischen Parametern, wie Achslast, Achsstand, Konstruktion des Drehgestells, Feder- und Dämpfkonstanten, aber auch von gleisgeometrischen Bedingungen sowie der Geschwindigkeit abhängig.²⁹

3.3 Schienenlängskräfte

3.3.1 Beschleunigungs- und Bremskräfte

Zu den Schienenlängskräften zählt in erster Linie die Beanspruchung des Oberbaus durch den Beschleunigungs- und Bremsvorgang der Fahrzeuge. Getriebene Achsen erzeugen infolge der Haftung zwischen Rad und Schiene Längskräfte im Gleis. Diese Kräfte treten speziell bei Bergstrecken auf, lang andauernde und wiederholende Bremsvorgänge bewegen die Schienen talwärts. Bei eingleisigen Strecken, im Zweirichtungsbetrieb entsteht durch die Beschleunigung der bergauf fahrenden Züge eine zusätzliche Belastung.

Nicht nur bei Bergstrecken treten Schienenlängskräfte durch den Beschleunigungs- und Bremsvorgang auf, sondern auch beim An- und Wegfahren eines Haltepunktes. Die Bewegung der Schiene führt zur Zunahme der Spannungen insbesondere vor Zwangspunkten.³⁰

3.3.2 Normalkraft durch Temperatur

Aufgrund des Einflusses der Temperatur entstehen in der Schiene in Abhängigkeit deren Länge Zug (+) bzw. Druckkräfte (-). Das Vorzeichen dieser Kräfte ist von der Änderung der Temperatur in Bezug auf die Neutraltemperatur abhängig. Das durchgehend verschweißte Gleis erhöht den Spannungszustand in der Schiene, denn im Gegensatz zum Stoßlückengleis besteht keine Ausdehnungsmöglichkeit. Die resultierenden Zwangskräfte in der Schiene müssen über die Schwellen in das Schotterbett und weiter in den Untergrund abgeleitet werden. Somit hat die Temperatur einen wesentlichen Einfluss auf die Gleislagestabilität. Den durch die zu erwartenden Temperaturschwankungen entstehen bei durchgehenden Eisenbahnschienen enorme Kräfte. Die entstehenden Zugkräfte bei niedrigen Temperaturen können zum einen zu Schienenbrüchen führen, zum anderen besteht bei heißen Witterungsbedingungen die Gefahr einer Gleisverwerfung. „Als Gleisverwerfung wird das Ausweichen eines Gleises aus seiner horizontalen und/oder vertikalen Lage bezeichnet. Dies kann ausgelöst werden, wenn der Querverschiebewiderstand und die Rahmensteifigkeit des Gleises nicht ausreichen, um ein Ausknicken des Gleisrostes infolge von Druckspannungen

²⁹ Vgl. *Lichtberger, B.*, Handbuch Gleis, 2003, S. 39.

³⁰ Vgl. *Pospischil, F.*, Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 9.

zu verhindern“.³¹ Das Gleis gilt als Verwerfungssicher, wenn die reelle Temperatur der Schiene geringer ist als die kritische Temperatur. Die kritische Temperatur ist die Differenz zwischen der Neutraltemperatur des Gleises und der derzeitigen Schienentemperatur. Als Neutraltemperatur wird die Schienentemperatur bezeichnet bei welcher die Schiene annähernd spannungsfrei ist. Da in Österreich jährliche Temperaturunterschiede in der Schiene von -30°C bis +40°C möglich sind, wurde die Neutraltemperatur im Bereich von +20°C bis +26°C festgelegt.

In folgender Abbildung ist der Verlauf der kritischen Temperatur dargestellt. Ist die Differenz der Temperaturerhöhung kleiner als $T_{b,min}$ gilt das Gleis als verwerfungssicher. Im Bereich zwischen $T_{b,min}$ und $T_{b,max}$ besteht das Risiko einer Gleisverwerfung. Ist die Temperaturerhöhung größer als $T_{b,max}$ kann sicher von einer Verwerfung ausgegangen werden.

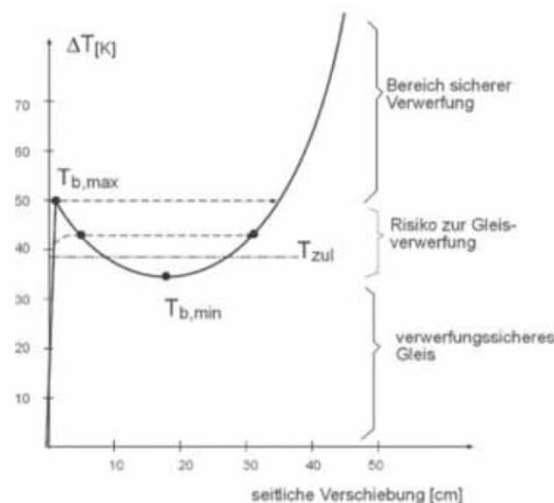


Abbildung 11: seitliche Verschiebung eines Lv-Betonschwellengleises bei Änderung der Temperatur über Neutraltemperatur³²

Die Schienentemperatur ist nicht gleich zu setzen mit der Lufttemperatur. Zusätzliche sind unter anderem die Sonnenscheindauer, der Lage der Schiene zur Sonne (Ausrichtung, Anstrahlwinkel, Verschattung) die Schienenoberfläche und die Verdunstung an der Schienenoberfläche (z.B. Windchill-Faktor) sind Faktoren die die Schienentemperatur beeinflussen. Die Schienentemperatur (T_{Schiene}) kann mit der Formel von Prof. Prager ab einer Lufttemperatur (T_{Luft}) von ca. 10°C bei direkter Sonneneinstrahlung näherungsweise abgeschätzt werden.³³

$$T_{\text{Schiene}} = \frac{T_{\text{Luft}} + 15,75}{0,925}$$

³¹ ÖBB Infrastruktur AG, RW 07.06.05, S. 10.

³² Vgl.: B. Lichtberger: "Der Querverschiebewiderstand der Gleise", EIK - Eisenbahn

³³ Prager, G., Messungen am Eisenbahnoberbau, Heft 12, 2007.

Aus der Jahresganglinie einer Schienen- und Lufttemperaturmessstelle konnten folgende Maximal- und Minimalwerte extrapoliert werden.

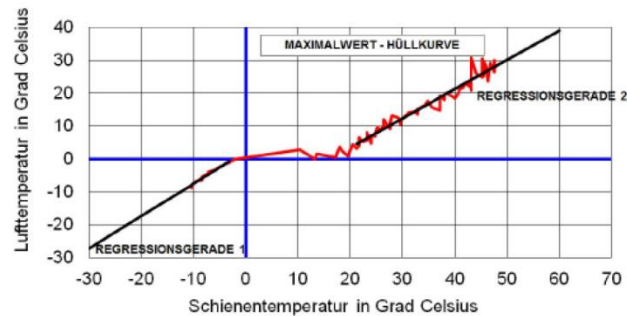


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Schienentemperatur und Lufttemperatur³⁴

„Es ist erkennbar, dass bereits bei geringen positiven Lufttemperaturen die Schienentemperatur weit über der Lufttemperatur liegen kann, jedoch selbst bei Frostgraden ist die Schienentemperatur kaum niedriger als die Umgebungstemperatur“.³⁵

3.3.3 Kräfte als Folge der Wechselwirkung zwischen Bauwerken und Gleis

Zusätzliche Schienenlängskräfte entstehen durch die Wechselwirkung zwischen Ingenieurbauwerken und dem Gleis. Schienen sind grundsätzlich lückenlos über Bauwerke zu führen. Jedoch müssen die Schienen die Verformung des Tragwerkes ohne Auswirkungen auf die Gleislage aufnehmen können. Werden die Verformungen und die daraus resultierenden Schienenspannungen zu groß, so sind Auszugsvorrichtungen vorzusehen. Schienenauszugsvorrichtungen sind sogenannte „geraden Weichen“ ohne Ablenkung, jedoch mit Zungen und Backenschienen. Diese können sich in Folge von Temperaturverformungen in Schienenlängsrichtung ausdehnen.

³⁴ Prager, G., Messungen am Eisenbahnoberbau, Heft 12, 2007.

³⁵ Pospischil, F., Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 7.

4 Widerstände im Gleis

Die Kräfte des Gleises müssen durch entsprechende Widerstände, die das Gleis diesen Kräften gegenüberstellt, aufgenommen werden.

4.1 Querverschiebewiderstand

Der Querverschiebewiderstand ist für die Lagesicherheit des Gleises von ausschlaggebender Bedeutung. Als Querverschiebewiderstand wird jener Widerstand bezeichnet, welcher einer seitlichen Verschiebung des Gleisrostes normal zur Gleislängsrichtung entgegenwirkt.

Frühere Querverschiebemessungen an unbesohlten Schwellen zeigten im bilinearen Kraft-Verformungsverlauf einen Steigungswechsel bei ca. 2 mm Verformungsweg. Durch diese Erkenntnisse wurde jene Widerstandskraft als maßgebend festgelegt, welche beim Belastungsvorgang einen horizontalen Verschiebeweg der Schwelle von 2 mm erreicht. Die Kraft dividiert durch den Schwellenabstand wird als QVW [N/mm] ausgedrückt.³⁶ Da die Schwellen „schwimmend“ im Schotterbett gelagert sind, trägt neben der Sohlreibung auch der Schwellenfach- und der Vorkopfschotter zum QVW bei. Der Schotter an der Schwellenlängsseite wirkt als Flankenwiderstand und jener an der Schwellenstirnseite als Vorkopfwiderstand.

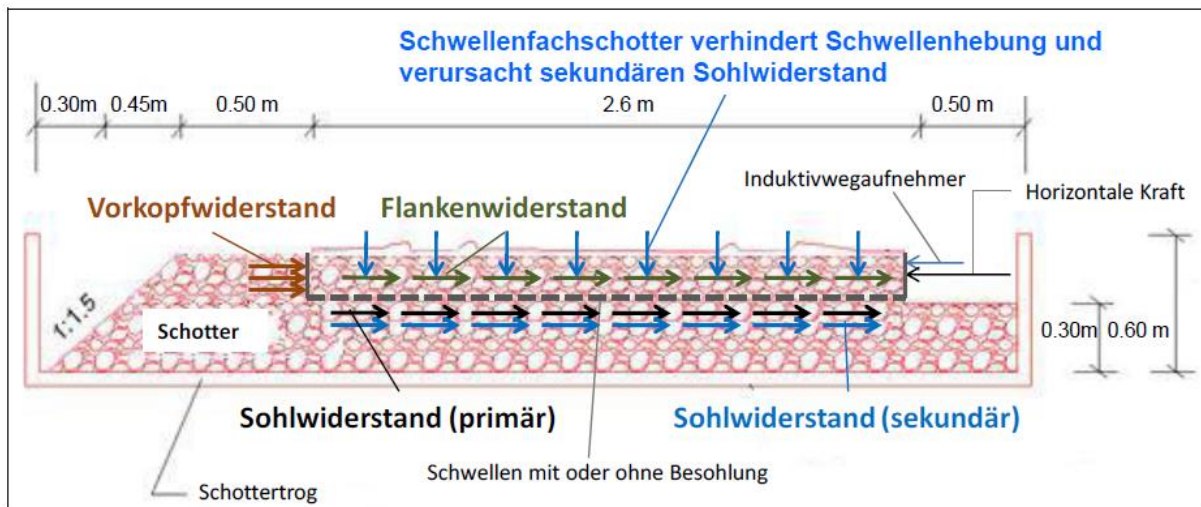
Der Flankenwiderstand wird vom aktiven Erddruck beeinflusst, welcher auf die Schwellenflanken wirkt. Der Vorkopfwiderstand entspricht dem passiven Erddruck und wirkt einer horizontalen Querverschiebung der Schwelle entgegen. Der Sohlwiderstand kann in primär und sekundär Widerstand unterteilt werden. Der primäre Sohlwiderstand beschreibt die Reibung zwischen der Schwellenunterseite und dem Schotter.

Während des horizontalen Verschiebeweges folgt die Schwelle dem Weg des geringsten Widerstands in vertikaler Richtung. Ein „Aufklettern“ der Schwelle findet statt, diese Schwellenhebung wird jedoch durch die geneigten Schwellenflanken und dem darauf aufliegenden Schotter begrenzt. Die Schwelle wird durch die vertikale Widerstandskraft nach unten gedrückt, die zusätzliche Sohlreibungsanteil wird als sekundärer Sohlwiderstand bezeichnet.³⁷

In der folgenden Abbildung sind die einzelnen Anteile des QVW dargestellt.

³⁶ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlten Schwellen, 2011, S. 61.

³⁷ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlten Schwellen, 2011, S. 94–104.

Abbildung 13: Darstellung der einzelnen Anteile des QVW³⁸

Der QVW ist von folgenden Faktoren abhängig:

- der Schwellenart (Gewicht, Abmessungen, Material, Rauigkeit)
- dem Schwellenabstand
- dem Bettungsquerschnitt
- den Eigenschaften des Schotter
- dem Einschotterungsgrad
- dem Verdichtungsverhältnis des Schotter
- dem Mechanischen verdichtungsverfahren beim Einbau des Schotter
- dem angewandten Messverfahren infolge der Betriebsbelastung und den Untergrundverhältnissen
- den dynamischen Anregungen des Gleises
- den Umweltbedingungen
- Anwendung zusätzlicher Sicherungsmaßnahmen

4.1.1 Einfluss der Art, Geometrie und Gewicht der Schwelle

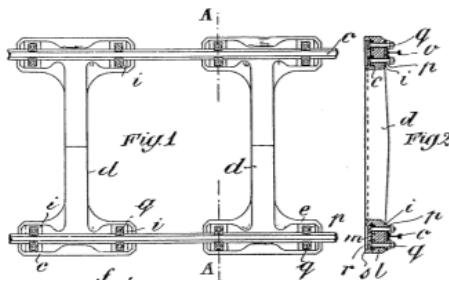
Der QVW wird von der Schwellenart sowie den geometrischen Merkmalen und dem Gewicht signifikant beeinflusst. Weltweit werden Schwellen aus verschiedenen Materialeien wie Spannbeton, Holz, Stahl oder Kunststoff hergestellt. Holzschnellen erreichen aufgrund des geringeren Gewichts gegenüber Betonschnellen einen um 50% kleineren QVW.³⁹

³⁸ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schnellen, 2011, S. 104.

³⁹ Vgl. Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schnellen, 2011, S. 81.

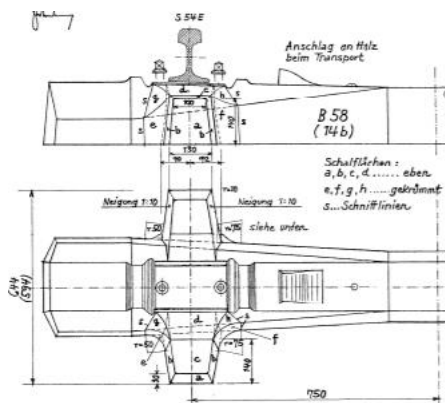
Sonderformen zur Erhöhung des Querverschiebewiderstandes

Mit Hilfe von speziellen geometrischen Ausführungen wurde bei Betonschwellen versucht, die Fläche zum Schotter zu vergrößern und dadurch auch den Widerstand gegen Querverschiebung zu erhöhen.



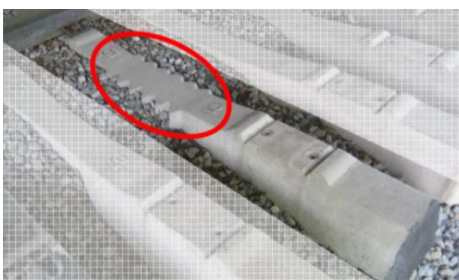
Bereits 1908 wurde ein Experiment durchgeführt, die Auflagerfläche der normalen Querschelle durch längsschwellenartige Fortsätze zu vergrößern und ein Doppel-T-Auflager zu schaffen. Die Kenntnisse der Betoneigenschaften und der Bewehrungstechnik zur Ausführung in Stahlbeton waren zur damaligen Zeit nicht ausreichend, um diesen Vorschlag zu verwirklichen.⁴⁰

Abbildung 14: Querschwellengleis mit Längsunterstützung



Einen ähnlichen Ansatz wurde 1971 durch die Entwicklung der sogenannten „Ohrenschwelle“ verfolgt, eine Querschwelle mit Fortsätzen im Bereich des Schienenaufagers. Die gesammelten Erfahrungen mit lückenlosen verschweißen von engen Gleisbögen waren positiv. Auf Grund der fehlenden Bewehrung der Längsunterschwellung kam es jedoch im Laufe der Zeit zu Abplatzungen der Fortsätze, wodurch eine größere Anwendung nicht erfolgte.⁴¹

Abbildung 15: Ohrenschwelle



1989 wurde eine Schwelle mit profilierten Seitenflächen im Mittelbereich entwickelt. Diese sollte eine bessere Verzahnung mit dem Schotterbett erwirken und den Anteil der Flankenreibung erhöhen.

Die Anwendung wurde jedoch auf einer Versuchsstrecke mit einer Gesamtlänge von mehreren Kilometer beschränkt.⁴²

Abbildung 16: "Eder-Schwelle" mit
profilierten Seitenflächen

⁴⁰ Vgl. *Lachmayer, H.*, "Über die Schwelle".

⁴¹ Vgl. *Lachmayer, H.*, "Über die Schwelle".

⁴² Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 30.

4.1.2 Einfluss des Schwellenabstandes

Der Widerstand gegen die seitliche Verschiebung wird von der Schwellenteilung beeinflusst. Der QVW einer Einzelschwelle sinkt bei einer Vergrößerung des Schwellenabstandes um 0,83% pro 1 cm. Sollte z. B. im Zuge einer lückenlosen Verschweißung des Gleises ein höherer QVW erforderlich sein, kann dieser durch eine Verringerung der Schwellenteilung erzielt werden. Bei einer Reduzierung des Schwellenabstandes von 60 cm auf 55 cm nimmt der QVW um 4 % zu.⁴³

4.1.3 Einfluss des Bettungsquerschnitt:

Das Schotterbett soll den Schwellendruck möglichst gleichmäßig auf den Unterbau übertragen und einen ausreichenden Widerstand gegen die Längs- bzw. Querverschiebung der Schwellen aufbringen. Daher ist eine möglichst große Bettungsdicke anzustreben, wobei auf eine Überschneidung der Druckverteilungslinien zu achten ist, denn ansonsten ist ein hochpressen des Untergrundes zwischen den Schwellen möglich. Die erforderliche Bettungsstärke ist vom Schwellenabstand, von der Schwellenbreite und vom Reibungswinkel des Schotters abhängig.

Bei Achslasten von 22,5 t und einem Schwellenabstand von 60 cm soll die Bettungsstärke mindestens 30 cm betragen, eine Dicke von 40 cm wird für Hochleistungsstrecken angestrebt. Zudem ist ein Schottervorkopf vor den Schwellen von 45 cm bis 50 cm wichtig, da dieser den Querverschiebewiderstand beeinflusst.

Bei überhöhten Gleisen steigt die Schotterstärke unter dem Außenstrang entsprechend an und das Planum muss adäquat verbreitert werden. Die optimale Schotterstärke wird bei einem gleichmäßigen Druckverlauf auf dem Planum erreicht. Das Schotterbett hat eine druckverteilende Wirkung, dieser nimmt mit zunehmender Tiefe ab.⁴⁴

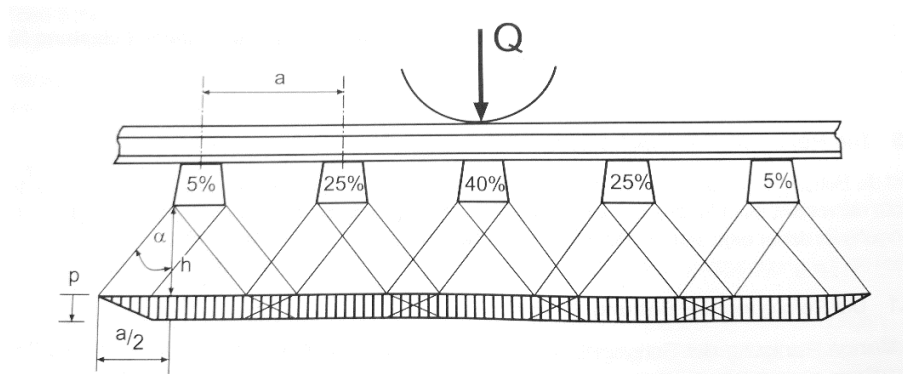


Abbildung 17: Schematische Darstellung zur Errechnung der optimalen Schotterbettstärke⁴⁵

⁴³ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen, 2011, S. 90 f.

⁴⁴ Vgl. *Lichtberger, B.*, Handbuch Gleis, 2003, S. 171.

⁴⁵ *Lichtberger, B.*, Handbuch Gleis, 2003, S. 184.

Die Kraftausbreitung ist vom Druckverteilungswinkel α abhängig. Neuer kantiger Schotter hat einen Druckausbreitungswinkel von 42° , Gebrauchtschotter 39° und verschmutzter Schotter von nur 30° . Ein konstanter Druckverlauf ist von der Schwellenteilung abhängig und wird beim Überschneiden der Druckkegel erreicht. Die optimale Schotterhöhe ergibt folgende geometrische Beziehung:

$$h = \frac{a}{2 * \tan(\alpha)}$$

Die folgende Tabelle zeigt, in Abhängigkeit der Schwellenteilung und des Schotterausbreitungswinkel, die optimale Schotterbetthöhen.

Schotterbetthöhen [cm]			
a [m]	30°	39°	42°
0,6	52	37	33
0,63	55	39	35
0,65	56	40	56

Tabelle 5: optimale Schotterbetthöhen⁴⁶

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass für den Gebrauchsschotter typischen Druckausbreitungswinkel von 39° bei einer Schwellenteilung von 65 cm eine Schotterbetthöhe von 40 cm optimal wäre. Sie zeigt aber auch, dass bei verschmutztem Schotter eine sehr ungünstige schwankende Druckverteilung auf das Planum auftritt.

Über die Schienendurchbiegung wird die Radlast auf die Schwellen verteilt. Die Schwelle unter dem Rad nimmt im Normalfall 40 % der Radlast auf, die Nachbarschwellen zusammen 50 % und die beiden darauffolgenden jeweils 10 %. Je steifer die Untergrundverhältnisse und je geringer die Schotterhöhen werden, umso mehr Last übernimmt die mittlere Schwelle. Die Verteilung der Radlast auf die Schwellen hängt vom Schwellenabstand, der Biegesteifigkeit der Schienen und der Bettungszahl ab.⁴⁷

4.1.4 Einfluss der Schotterqualität

Eine sichere Gleislage wird durch eine gute Luft- und Wasserdurchlässigkeit gewährleistet, intakte Entwässerungen sorgen für die notwendige Tragfähigkeit des Untergrundes und reduzieren die Korrekturmaßnahmen am Gleis durch Stopf- und Richtarbeiten. Diese Forderungen können durch eine entsprechende Schotterqualität mit einer ausreichenden Verdichtung erfüllt werden. Das Rohgestein soll Frost- Taubeständig, scharfkantig und frei von Beimengungen wie Lehm oder Erde sein, sowie eine große Zähigkeit und Druckfestigkeit

⁴⁶ Lichtberger, B., Handbuch Gleis, 2003, S. 185.

⁴⁷ Lichtberger, B., Handbuch Gleis, 2003, S. 184 f.

aufweisen. Am besten ist Hartschotter wie Basalt, Diabas oder Granit, Weichschotter wie Kalk, Dolomit oder Sedimentgestein ist zumeist weniger geeignet.

Mit zunehmender Betriebsbelastung wird der Schotter überbeansprucht, denn durch jede Zugüberfahrt hebt die Schwelle ab und schlägt auf den Schotter zurück, was zu einer Absplitterung und Kornumlagerung führt. Nicht nur jeder Abrollvorgang, sondern auch Instandhaltungsstopfungen verursachen einen Schotterabrieb. Eine Verunreinigung der Bettung durch etwaige Ladungsverluste oder Vegetationsrückstände ist möglich. Feinteile und Verunreinigung beeinträchtigen die Wasserableitung und führen zu einer Verschlechterung der Gleislage.⁴⁸

4.1.5 Einschotterungsgrad

Bei einer Vergrößerung der Breite des Vorkopfschotters von 40 cm auf 50 cm, bzw. von 50 cm auf 60 cm nimmt der QVW um 6 % bzw. um 5 % zu. Frühere Messungen im Betriebsgleis haben gezeigt, dass eine Verbreiterung des Vorkopfschotters von 60 cm auf 80 cm eine Steigerung des QVW von 9 % mit sich bringt. Jedoch ist die Vergrößerung der Schulterbreite des Bahnkörpers wegen der erforderlichen großen Mengen an Schotter aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt. Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des QVW ist die Anhäufung des Schotters im Vorkopfbereich der Schwelle. Dadurch kann der Widerstand gegen Querverschiebung um 10 % bis 15 % zunehmen. Auf Grund der Schotterflugproblematik und der Wirtschaftlichkeit kommt diese Methode begrenzt zur Anwendung.⁴⁹

4.1.6 Einfluss des Verdichtungsverhältnisses des Schotters

Durch die dynamische Belastung des Schotters in Folge des Zugverkehrs entsteht eine Umlagerung des Korngefüges. Die vorhandenen Hohllagen unter der Schwelle werden minimiert, was wiederum eine Erhöhung der Kontaktfläche bedeutet. Messungen haben gezeigt, dass nach ca. 1 Mio. aufgebrachten Lastwechseln der maximale Widerstand gegen Querverschiebung der Schwelle erreicht wird.⁵⁰ Neben der Zunahme der Oberbausteifigkeit erfolgt durch die Konsolidierung eine Verzahnung zwischen der Schwellenunterseite und den Schotterkörnern, dieser Effekt trägt zur Erhöhung des QVW bei. Durch die Betriebsbelastung konnte sowohl bei konventionellen als auch bei besohnten Schwellen ein um 29 % bis. 49 % höherer QVW als im unstabilisierten Zustand gemessen werden.⁵¹

⁴⁸ Vgl. *Lichtberger, B.*, Der Querverschiebewiderstand der Gleise, 2007, S. 61–76.

⁴⁹ Vgl. *Leykauf G.*, Forschungsbericht Nr. 1983, 2003.

⁵⁰ Vgl. *Fengler W./Gerber U.*, Setzungsverhalten des Schotters.

⁵¹ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen, 2011, S. 66.

4.1.7 Einfluss des mechanischen Verdichtungsverfahrens

Mit zunehmender Betriebsbelastung entsteht eine Verschlechterung der Gleislage. Der Vorteil des Schotteroberbaus besteht darin, dass eine unruhige Gleislage mit Hilfe eines maschinellen Durcharbeitungszuges einfach korrigiert werden kann. Beim Stopfvorgang werden die Schwellen angehoben und der Schotter wird unter Vibration gegen die Schwellensohle gepresst. Nach der Gleisdurcharbeitung sinkt der Querverschiebewiderstand durch die Neuordnung der Steine, da die hohe Lagerungsdichte des konsolidierten Schottergefüges abnimmt. Bei einer Hebung von 2 cm wurde die geringste Abnahme des QVW in Bezug auf den konsolidierten Zustand festgestellt. Bei einer Stopfung ohne Hebung, was in der Realität nicht möglich ist, bzw. bei einer Hebung um 4 cm nimmt der QVW stärker ab.⁵²

Um nach der Gleisdurcharbeitung einen höchstmöglichen QVW zu erhalten wird ein dynamischer Gleisstabilisator (DGS) eingesetzt. Dabei wird der Schotter mit einer vertikalen Kraft belastet und gleichzeitig werden Schwingungen in horizontaler Richtung am Schienenkopf eingeleitet. Durch die Verwendung eines DGS werden ohne Qualitätseinbußen 30 % bis 50 % der Anfangssetzung des Gleises vorweggenommen.⁵³ Die Eingebraachte Schwingung ist mit einer Betriebsbelastung von 100.000 t gleichzusetzen.⁵⁴

4.1.8 Angewandte Messmethoden zur Bestimmung des QVW

Als QVW wurde jener Wert festgelegt, welcher bei einer horizontalen Verschiebung der Schwelle senkrecht zur Gleislängsrichtung um 2 mm erreicht wird. Die Angabe erfolgt entweder in KN/mm Gleislänge oder als Absolutwert in N unter Berücksichtigung des Schwellenabstandes.

Zur experimentellen Ermittlung des QVW sind verschiedene Verfahren üblich.

■ Einzelschwellenmethode

Diese Methode ist recht einfach und schnell ohne große Betriebsunterbrechungen durchzuführen. Hierfür muss die Schienenbefestigung gelöst und die Schienen von der Schwelle entkoppelt werden. Mit Hilfe von hydraulischen Pressen wird eine einzelne Schwelle horizontal verdrückt, wobei die Schiene als Widerlager verwendet werden kann. Die Einzelschwellenmethode verlangt kein nachträgliches Stopfen des Gleises.⁵⁵

⁵² Vgl. Klugar K., Einfluss der mechanischen Nachverdichtungsverfahren auf den Querverschiebewiderstand des Gleises.

⁵³ Vgl. Gräbe, P.J./Maree, J.S., Use of a Dynamic Track Stabilisator to Improve Track Maintenance and Optimisation of Track Pumping, S. 27–32.

⁵⁴ Vgl. Frage D161 Dynamische Erscheinung der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung, S. 14.

⁵⁵ Vgl. Pospischil, F., Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 22.

■ Jochverschiebemethode

Hierbei wird ein 4 bis 6 m langes Gleisjoch verdrückt, ohne die Schienen von den Schwellen zu lösen. Diese Methode erfordert ein Auftrennen des Gleises, was wiederum mit einem erhöhten Aufwand an Vor- und Nachbereitung der Messstelle gegenüber der Einzelschwellenmethode bedeutet. Als Widerlager dient ein eingebautes oder angrenzendes Fundament, welches die hohen Kräfte der Hydraulikzylinder zur Verschiebung des Gleisjoches aufnehmen muss.⁵⁶

■ 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 Hebezyylinder das Gleis mit einer Vertikalkraft belasten.⁵⁷

■ Methode mit Entgleisungswagon

In den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wurden erstmals Versuche mit einem Entgleisungswagon durchgeführt. Dieser spezielle Waggon verfügt über drei Achsen mit einem Abstand von ungefähr 4 m bei einem Gesamtgewicht von etwa 37 t. Die beiden äußeren Achsen dienen als Laufachsen, während die mittig angeordnete Antriebsachse über eine entsprechende Vorrichtung sowohl die Radlast als auch die Horizontalkraft, welche senkrecht zur Gleislängsrichtung wirkt, variieren kann. Damit ist es möglich, für verschiedene Radlasten die Querverschiebung des Gleises in Abhängigkeit von der aufgetragenen Horizontalkraft zu messen. Diese Methode kommt der realen Beanspruchung am nächsten, wird jedoch auf Grund des großen Aufwandes selten angewandt.⁵⁸

■ Kontinuierliche dynamische Messung

Dabei werden Echtzeitergebnisse direkt nach der Gleisdurcharbeitung verwendet.⁵⁹

4.1.9 Umwelteinflüsse

Im Laufe eines Jahres können in Österreich Temperaturschwankungen von -30° C bis +40 °C auftreten, welche wiederum den QVW beeinflussen. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt kann im Korngefüge durch eine mögliche Eisbildung eine Verfestigung der Hohlräume entstehen, wodurch die Größe des QVW zunimmt.

Gegenteilig ist das Verhalten bei Feuchtigkeit, welche wie eine Schmierschicht zwischen den Schottersteinen selbst und zur Schwellenoberfläche wirkt.⁶⁰

⁵⁶ Vgl. *Pospischil, F.*, Längverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 22.

⁵⁷ Vgl. *Bosch R.v.d.*, Querverschiebewiderstandsmessungen mit dem dynamischen Gleisstabilisator.

⁵⁸ Vgl. *Robert Kupfer*, Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes, 2004, S. 17 f.

⁵⁹ *Pospischil, F.*, Längverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 22.

⁶⁰ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch beschlten Schwellen, 2011, S. 87–89.

4.1.10 Einfluss zusätzlicher Sicherungsmaßnahmen

Sollen die Schienen in sehr engen Bögen lückenlos verschweißt werden, kann der QVW durch den Einbau von Sicherungskappen (SIK) erhöht werden. Die Anzahl der SIK ist vom Bogenradius abhängig, diese werden in der Regel an der Schwellenstirnseite zum Bogenmittelpunkt angebracht und reichen in etwa 150 mm unter der Schwellenunterkante in die Bettung. Durch die Verwendung einer Sicherungskappe entsteht eine Vergrößerung der Schwellenstirnseite wodurch der QVW um ca. 30 % zunimmt.⁶¹

4.2 Längswiderstand

Im lückenlos verschweißten Gleis entstehen auf Grund von Temperatureinwirkungen, sowie durch die Beschleunigungs- und Bremsvorgänge der Fahrzeuge Horizontalkräfte in Schienenlängsrichtung. Die einwirkenden Kräfte verursachen eine Längsverschiebung zwischen Schiene und Schotter bzw. zwischen Schiene und Schwelle. Diesen Bewegungen entgegen wirkt auf der einen Seite der Längsverschiebewiderstand und auf der anderen der Durch Schubwiderstand.

4.2.1 Längsverschiebewiderstand LVW

Der Längsverschiebewiderstand wird ähnlich wie der Querverschiebewiderstand über die Bettung aufgenommen, mit dem Unterschied, dass dieser um 90° entgegenwirkt. Zum Widerstand gegen Längsverschiebung trägt ebenso der Schwellenfach- und Vorkopfschotter sowie die Sohlreibung bei. Bezüglich des letztgenannten Anteils ist zwischen den beiden Widerständen kein Unterschied auszumachen, da hierfür jeweils dieselbe Fläche zur Verfügung steht. Während beim Querverschiebewiderstand an der Schwellenflanke Reibung auftritt und der Vorkopfschotter eine mögliche Verschiebung des Gleisrostes behindert, ist die Wirkungsweise dieser beiden Beiträge im Falle des Längsverschiebewiderstandes genau umgekehrt. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass sich die Größe der Flächen, welche beim Längsverschiebewiderstand Seitenreibung aufnehmen bzw. einer Gleisverschiebung entgegenwirken, im Vergleich zum Querverschiebewiderstand deutlich verändert.⁶² Der Flankenwiderstand ist daher zur Vermeidung der Längsverschiebung die maßgebende Größe. Wie Messungen zeigen erreicht der LVW gegenüber dem QVW die um 1,7 Fach höheren Werte.⁶³

⁶¹ Vgl. *Iliev Dimitre L.*, Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch beschlachten Schwellen, 2011, S. 92.

⁶² Vgl. *Robert Kupfer*, Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes, 2004, S. 20 f.

⁶³ *Knoll Bernhard*, Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen, 1998.

Der LVW wird maßgeblich beeinflusst von:⁶⁴

- den Eigenschaften der Schwellen in Abhängigkeit von Form, Abmessung, Baustoff und Rauigkeit
- dem Schwellenabstand
- dem Bettungsstopfen und dem Verdichtungsgrad
- der Größe der Belastung
- der Länge und Häufigkeit des Lasteintrags

4.2.2 Durchschubwiderstand

Der Durchschubwiderstand, welcher einer Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle entgegenwirkt, wird einerseits über die Schienenbefestigung und andererseits über die Zwischenlagen aufgenommen. Die elastische Schienenbefestigung dient zur Niederhaltung der Schienen und sorgt für eine dauerhafte Verbindung zu den Schwellen. Zwischenlagen bringen im Schotteroberbau ebenfalls eine zusätzliche Elastizität ein und werden wie der Name besagt zwischen der Schiene und der Schwelle verlegt.

Der Durchschubwiderstand ist von der Reibung der einzelnen Bauteile und der Anpresskraft, die die Schienenbefestigung auf den Schienenfuß ausübt, abhängig. Die Schienen können heutzutage entweder direkt oder indirekt auf den Schwellen befestigt werden. Bei der indirekten, welche vorwiegend bei Holzschwellen zum Einsatz kommt, wird zur Spurhaltung eine Rippenplatte auf den Schwellen montiert. Die Befestigung selbst geschieht durch Klemmplatten und Federringe, die mittels Hackenschrauben und Schraubenmuttern gehalten werden. Die heute übliche Befestigung zieht anstatt der Klemmplatte den Einsatz von Spannklemmen vor. Diese ermöglicht einen größeren Federweg und damit eine höhere Elastizität der Schienenbefestigung.

Bei Betonschwellen kommt eine direkte Schienenbefestigung zur Anwendung. Zur Spurhaltung wird beidseitig zum Schienenfuß eine Winkelführungsplatte angeordnet, mit welchen die Seitenkräfte direkt in die Betonschultern eingeleitet werden können. Die Befestigung der Schiene erfolgt ebenso über eine Spannklemme und der dazugehörigen Schraubenmutter.⁶⁵

Beim Durchschubwiderstand ist das Verhältnis zwischen Kraft und Weg bis zum Erreichen der Durchrutschgrenze annähernd linear. Ab dieser Grenze tritt bei gleichbleibender Kraft nur mehr eine Verschiebung der Schiene gegenüber der Schwelle ein.

⁶⁴ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch beschlachten Schwellen, 2011.

⁶⁵ Vgl. Robert Kupfer, Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes, 2004, S. 33 f.

4.3 Verdrehwiderstand VDW zwischen Schiene und Schwelle

Wird der Gleisrost im Zuge einer Gleisverwerfung seitlich verschoben, so tritt in diesem Abschnitt nicht nur eine Verbiegung der beiden Schienensträng, sondern auch eine Verdrehung der Schienen auf den Schwellen (Verdrehwinkel α) auf. Das dadurch erzeugte Drehmoment kann von der Befestigungsart unterschiedlich groß sein.

Der VDW ist abhängig von:⁶⁶

- 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

4.4 Biegesteifigkeit des Gleisrostes

Die Biegesteifigkeit bzw. das Flächenträgheitsmoment des Schienenprofils spielt im Hinblick auf die Sicherheit gegen Gleisverwerfung eine wesentliche Rolle. Bedingt durch die Temperaturproblematik und die dadurch entstehenden Druckkräfte im durchgehend verschweißten Gleis, ist die horizontale Stabilität des Gleisrostes auch von der Größe der Schienenquerschnittsfläche abhängig. Durch das Schienenbefestigungssystem werden die Schienen mit den Schwellen zu einem Gleisrost verbunden. Beim seitlichen Ausknicken des Gleises findet eine geometrisch bedingte Verdrehung der Schiene zur Schwelle statt. Diese wird vor allem durch die Art und den Verspanngrad des Befestigungssystems beeinflusst bzw. eingeschränkt.⁶⁷

⁶⁶ Knoll Bernhard, Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen, 1998.

⁶⁷ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen, 2011, S. 29.

5 Versuchsablauf

Besohlungen werden aus verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften und Steifigkeiten hergestellt. Das Ziel dieser Arbeit ist anhand von Laborversuchen ein Zusammenhang zwischen der Kontaktfläche und dem Querverschiebewiderstand herzustellen.

Bei der Versuchsdurchführung sollte der QVW sowohl im unkonsolidierten als auch im konsolidierten Zustand an Prüfkörpern aus Beton mit vier unterschiedlichen Typen von Besohlungen im Labor ermittelt werden. Zusätzlich werden Versuche an reinen Betonquader, ohne Besohlung durchgeführt. Anschließend wird die Kontaktfläche zwischen der Besohlung und den Schotterkörnern ermittelt. Schlussendlich sind die Ergebnisse aus den Laborversuchen mit den Messungen auf der freien Strecke zu vergleichen.

Bei den durchzuführenden Laborversuchen werden folgende Besohlungstypen analysiert.

- SLB 3007
- SLB 1510
- SL-NG
- SLN 1010
- M02

5.1 Eigenschaften der einzelnen Besohlungen

„Auf dem Markt gibt es eine Reihe von elastischen Besohlungen unterschiedlicher Hersteller. Einige davon werden zur Verbesserung der dynamischen Gleiseigenschaften sowie zur Schotterschonung, andere zum Erschütterungs- und Schallschutz eingesetzt. Der Grundkörper (die Federschicht) einer Schwellenbesohlung kann aus einem Elastomer wie z.B. Naturkautschuk (NR), Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), Polyurethan (PUR) oder einem thermoplastischen Werkstoff wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Ethylenvinylacetat-Copolymeren (EVA), Polyamid (PA) gebildet sein. Üblicherweise weisen elastische Besohlungen eine Dicke von ca. 5 mm bis 20 mm auf. Weiche Schwellenlagerungen können zum Schutz gegen Durchstoßungen oder Risse, hervorgerufen durch scharfkantige Schottersteine, mit einer zusätzlichen Deckschicht (Geotextil-Vlies oder auch steifere, plastische Schicht) ausgestattet werden. Dabei ist der Verbund zwischen der Deck- und Federschicht über die Lebensdauer der Besohlung zu gewährleisten.“⁶⁸

Die im Labor zu untersuchenden Besohlungen besitzen unterschiedliche Materialeigenschaften und sind daher für verschiedene Anwendungsbereiche vorgesehen. Besohlungen kommen auf der freien Strecke vorwiegend zur Schotter- bzw.

⁶⁸ Iliev Dimitre L., Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohnten Schwellen, 2011, S. 8.

Schwellenschonung zum Einsatz. Im innerstädtischen Gebiet jedoch sind zunehmend Maßnahmen zum Erschütterungsschutz erforderlich. Es ist daher erkennbar, dass es für die verschiedenen Einsatzbereiche unterschiedliche Schwellensohlen Typen benötigt. Ein wichtiges Merkmal ist die elastische Einsenkung des Gleises unter Betriebslast.

Schwellenbesohlungen vergrößern die Einsenkung des Gleises und tragen zu einer besseren Lastverteilung bei. Die aufzunehmenden Kräfte im Schotterbett und Untergrund werden reduziert und die Setzungsraten im Gleis nehmen damit deutlich ab. Je weicher die Besohlung, desto größer die elastische Einsenkung und desto kleiner die Kräfte im Schotterbett und im Untergrund. Die Einsenkung sollte dabei nicht zu groß sein, denn dies führt zu einer Erhöhung der Schienenspannungen. Die untere Grenze der vertikalen Einsenkung stellt sich bei unbesohlenen Betonschwellen mit steifen Zwischenlagen auf steifem Untergrund mit ca. 0,4 mm ein. Die hohen punktuellen Kräfte führen im Schotterbett zu einer raschen Kornzerstörung, wodurch die Bildung von Spritzstellen begünstigt wird.

Die vertikale Einsenkung des Gleises kann in die Anteile zwischen

- Schiene-Schwelle,
 - Schwelle-Schotterbett
 - und Schotterbett-Untergrund
- aufgeteilt werden.

Der Verformungsanteil Schwelle-Schotterbett wird durch die Wahl der Schwellenbesohlung beeinflusst. Die optimale Gleiseinsenkung zwischen Schwelle und Schotterbett wird häufig mit 1,2 mm bis 1,5 mm angegeben. Die Erfahrungen zeigen, je weicher die eingesetzte Schwellenbesohlung, umso größer ist die elastische Einsenkung des Gleises und desto besser ist die vertikale Gleislagestabilität. Um die Schienenspannungen zu begrenzen sollte speziell bei hohen Geschwindigkeiten eine steife Besohlung verwendet werden, um Schienenbrüche aufgrund von Ermüdung zu vermeiden.

Ein besohltes Gleis erfährt im Vergleich zu einem unbesohlenen eine größere Einsenkung, daher ist im Übergangsbereich ein unterschiedliches Setzungsverhalten möglich. In diesem Bereich können punktuelle Gleislagefehler entstehen, welche durch Stopfarbeiten korrigiert werden müssen.⁶⁹

⁶⁹ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 36 f.

Abbildung 18: Übergangsbereich Betonschwellen mit und ohne Besohlung⁷⁰

Die Steifigkeit der Schwellenbesohlung wird über den statischen und dynamischen Bettungsmodul ausgedrückt. Für den Oberbau mit besohlenen Schwellen werden folgende statische Federziffern C_{Stat} und Einsatzbereiche empfohlen.

Steifigkeit der Besohlung	Statischer Bettungsmodul C_{Stat}
steif	$0,25 \text{ N/mm}^3 \leq C_{\text{Stat}} < 0,45 \text{ N/mm}^3$
mittel	$0,15 \text{ N/mm}^3 \leq C_{\text{Stat}} < 0,25 \text{ N/mm}^3$
weich	$0,08 \text{ N/mm}^3 \leq C_{\text{Stat}} < 0,15 \text{ N/mm}^3$
sehr weich	$C_{\text{Stat}} < 0,08 \text{ N/mm}^3$

Tabelle 6: Steifigkeit in Abhängigkeit vom Bettungsmodul⁷¹

Anwendungsbereiche von Schwellenbesohlungen	Steifigkeit der Besohlung		
	weich	mittel	steif
Verbesserung der Gleislagequalität			
Weichen und Kreuzungen			
Übergangsbereiche			
Bereiche mit reduzierter Schotterbettstärke			
Reduzierung von Wellenbildung			
Reduzierung von Schwingungen			

Tabelle 7: Einsatzbereiche Schwellenbesohlung⁷²

In der Regel kommen mittlere bis steife Schwellenbesohlungen zur Verbesserung der Gleislagequalität zum Einsatz. Weiche Besohlungen werden hauptsächlich im

⁷⁰ Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 37.

⁷¹ "Under Sleeper Pads (USP) Recommendations for Use" General Part.

⁷² "Under Sleeper Pads (USP) Recommendations for Use" General Part.

innerstädtischen Bereich mit geringen Achslasten zur Reduzierung von Erschütterungen verwendet.

Brücken oder feste Fahrbahnen sind im Gegensatz zum Schotteroberbau sehr steif und stellen immer eine Unstetigkeit dar, deshalb sind solche Übergangsbereiche gesondert auszustatten. Die unterschiedlichen vertikalen Steifigkeiten zwischen Brücken-, Kunst und Erdbauwerken sowie zwischen fester Fahrbahn und Schotteroberbau erfordern im Übergangsbereich besondere konstruktive Maßnahmen wie Beischienen zur Lastverteilung, Unterschottermatten und/ oder das Verkleben des Schotters. Um die Steifigkeitsunterschiede zu verringern werden im Bereich der festen Fahrbahn weiche Zwischenlagen verwendet. Das Ziel muss es sein die Schieneneinsenkung möglichst konstant zu halten.⁷³

5.2 Besohlungstypen

Bei den durchzuführenden Laborversuchen kommen unterschiedliche Besohlungstypen mit verschiedenen Einsatzgebieten zur Anwendung. Auf die Eigenschaften der verwendeten Besohlungen wird in den folgenden Punkten eingegangen.

5.2.1 SLB 3007

Die SLB 3007 ist eine elasto-plastische Schwellenbesohlung aus Polyurethan mit Montagegitter für Betonschwellen. Dieser Besohlungstyp wird bei Vollbahnen in Österreich als Standard angewandt. Sie dient neben der Schotter- und Unterbauschonung zur Verbesserung der Gleislagequalität und ist zudem im Hochgeschwindigkeitsverkehr einsetzbar. Die Gesamtstärke inklusive Montagegitter beträgt ca. 12 mm, wobei im eingebauten Zustand eine Nenndicke von ca. 7 mm erreicht wird. Das Flächengewicht dieses Typs beträgt ca. 3 kg/m³. Zur Befestigung an der Schwelle wird das Montagegitter vollflächig bei der Produktion der Schwelle in den nassen Beton eingebracht. Die Abreißfestigkeit der Verbindung beträgt mindestens 0,4 N/mm², wobei im Durchschnitt 0,5 N/mm² erreicht wird.

Der Bettungsmodul beträgt nach DIN 45673-1 0,30 N/mm³ und ist damit als steifer Besohlungstyp zu betrachten.⁷⁴

5.2.2 SLB 1510

Die SLB 1510 ist eine elasto-plastische Schwellenbesohlung aus Polyurethan mit Montagegitter für Betonschwellen. Dieser Besohlungstyp wird in Österreich hauptsächlich im Bereich von S- und U-Bahn Betrieb angewandt, jedoch ist auch ein Einsatz im Schwerlastverkehr wie beispielsweise in Nordamerika üblich. Die Besohlung dient neben der Schotter- und Unterbauschonung zur Verbesserung der Gleislagequalität und trägt zur

⁷³ Vgl. *Lichtberger, B.*, Handbuch Gleis, 2003, S. 289.

⁷⁴ Vgl. *Getzner Werkstoffe GmbH*, Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 3007G.

Reduktion störender Vibrationen bei, dies ist jedoch auf Grund der elasto-plastischen Eigenschaft als nachrangig zu betrachten.

Die Gesamtstärke inklusive Montagegitter beträgt ca. 15 mm, wobei im eingebauten Zustand eine Nenndicke von ca. 10 mm erreicht wird. Das Flächengewicht dieses Typs beträgt ca. 4,2 kg/m³. Der Bettungsmodul beträgt nach DIN 45673-1 0,15 N/mm³ und ist damit als weicher bis mittelsteifer Besohlungstyp zu betrachten.⁷⁵

5.2.3 SLN 1010

Die SLN 1010 ist eine elastische Schwellenbesohlung aus Polyurethan mit Montagegitter für Betonschwellen. Dieser Besohlungstyp wird bei Vollbahnen neben der Schotter- und Unterbauschonung als Erschütterungsschutz angewandt und dient zusätzlich zur Verbesserung der Gleislagequalität. Die SLN 1010 verfügt zusätzlich auf der Unterseite über eine Schutz- und Lastverteilungsschicht aus Vlies. Diese schützt das hoch elastische und eher weiche Besohlungsmaterial vor den scharfkantigen Schottersteinen. Ohne dieses Vlies würde die Besohlung mit fortschreitender Belastung ihre Wirkung verlieren, welche die Übertragung des Körperschalls behindert. Die Besohlung bietet auf Grund des Lärm- und Erschütterungsschutzes besondere Vorteile im innerstädtischen Bereich. Die Gesamtstärke inklusive Montagegitter beträgt ca. 15 mm, wobei im eingebauten Zustand eine Nenndicke von ca. 10 mm erreicht wird. Der Bettungsmodul beträgt nach DIN 45673-1 0,10 N/mm³ und ist damit als weicher bis mittelsteifer Besohlungstyp zu betrachten.⁷⁶

5.2.4 SL NG

Die SL NG ist eine in Entwicklung befindende Schwellenbesohlung mit einem sehr ausgeprägten plastischen Verhalten. Sie sollte zukünftig bei Vollbahnen neben der Schotter- und Unterbauschonung vorwiegend zur Verbesserung der Gleislagequalität mit höheren QVW- Werten eingesetzt werden, sodass die Möglichkeit besteht zukünftig enge Bögen mit noch kleineren Radien lückenlos verschweißen zu können.

Die Gesamtstärke inklusive Montagevlies beträgt 7 mm bei einem Bettungsmodul nach DIN 45673-1 von 0,30 N/mm³, damit ist der Besohlungstyp als steif zu betrachten.⁷⁷

5.2.5 M02

Die M02 ist eine elastische Schwellenbesohlung aus Ethylen-Vinylacetat-Copolymer (EVA) mit einem Vlies als Befestigung für Betonschwellen. Dieser Besohlungstyp wird bei Vollbahnen in Österreich als Standard angewandt. Sie dient neben der Schotter- und Unterbauschonung zur

⁷⁵ Vgl. *Getzner Werkstoffe GmbH*, Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 1510G.

⁷⁶ Vgl. *Getzner Werkstoffe GmbH*, Produktdatenblatt Sylodyn Schwellenbesohlung SLN 1010G.

⁷⁷ *Pospischil, F.*, Interview Schwellenbesohlung SL NG, 2019.

Verbesserung der Gleislagequalität und ist zudem im Hochgeschwindigkeitsverkehr einsetzbar. Die Gesamtstärke inklusive Vlies beträgt ca. 7 mm. Zur Befestigung an der Schwelle wird das Vlies vollflächig bei der Produktion der Schwelle in den nassen Beton eingebracht. Der Bettungsmodul beträgt nach DIN 45673-1 $0,30 \text{ N/mm}^3$ und ist damit als steifer Besohlungstyp zu betrachten.⁷⁸

5.3 Wahl der Prüfkörper

Bei den durchzuführenden Versuchen sollte der Einfluss der Kontaktfläche auf den Querverschiebewiderstand ermittelt werden. Der Querverschiebewiderstand setzt sich wie in Kapitel 4.1 beschrieben aus dem Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand zusammen. Da der Einfluss auf die Besohlung ausschließlich vom Sohlwiderstand abhängig ist, werden bei der Versuchsdurchführung Betonkörper auf ein vorverdichtetes Schotterplanum gelegt.

Der Anteil des Querverschiebewiderstandes, welcher von der Besohlung aufgenommen wird ist neben der Masse der Schwelle, von der Fläche der Besohlung abhängig. Zudem spielt die Kornverteilung des Schotters und der Konsolidierungszustand der Schwelle eine entscheidende Rolle.

Zur einfacheren Abwicklung der Versuche, werden anstatt von Ganzschwellen nur Betonquader mit einer Abmessung von $30 \times 30 \times 10 \text{ cm}$ verwendet. Auf Grund der geringeren Größe sind die Betonquader wesentlich leichter und könne ohne maschinelle Unterstützung bewegt werden. Zudem sind diese kostengünstiger herzustellen, denn eine besohlte Schwelle ist nach der Erzeugung eines konsolidierten Zustandes für weitere Versuche nicht mehr zu gebrauchen. Die Schotterkörner verursachen elastische sowie plastische Abdrücke in der Besohlung, welche die Auswertung von nachfolgenden Messungen negativ beeinflusst, denn die Berührungspunkte zwischen Schotter und Besohlung können nicht mehr exakt bestimmt werden. Ein Austausch der Besohlung ist auf Grund des starken Verbundes mit der Schwelle nicht möglich.

Als Nachteil der verwendeten Betonquader ist zu befürchten, dass durch die aufzubringende Horizontalkraft die Prüfkörper auf Grund der geringen Größe leicht kippen könnten. Ein mögliches Aufklettern der Schottersteine ist ebenfalls nicht auszuschließen, den durch die Verwendung einer Besohlung wird der Widerstand durch die Einbettung der Schottersteine erhöht und ein Gleiten über die Bettung ist möglich. Um diesen Problemen entgegenzuwirken und eine der Norm entsprechende Prüfung durchzuführen sind die Prüfkörper während der Ermittlung des Querverschiebewiderstandes zu beschweren. Die DIN 45673-6 sieht Prüfkörper mit Abmessungen von $30 \times 30 \times 20 \text{ cm}$ als Ersatz für die Schwelle vor. Da die gewählten Quader nur die halbe Höhe der Normprüfkörper aufweisen wurde als Ausgleich eine Beschwerung in Form einer Stahlplatte mit einem Gewicht von 18,4 kg gewählt. Daraus ergibt sich ein Gesamtprüfgewicht von 40 kg.

⁷⁸ Vgl. Paul Müller Technische Produkte GmbH, Produktdatenblatt Schwellensohle M 02.

Für den Versuchsaufbau ist eine gerade Zahl an Versuchskörpern, auf Grund der Einleitung einer Dauerschwingbelastung am besten geeignet. Eine Versuchsreihe besteht deshalb aus vier Prüfquadern. Zur Ermittlung des Einflusses der Kontaktfläche auf den Querverschiebewiderstandes werden zwölf Prüfkörper aus Beton mit einer Abmessung von 30 x 30 x 10 cm vorbereitet. Acht dieser Betonblöcke erhalten jeweils an der Ober- sowie Unterseite eine elastische Besohlung unterschiedlicher Steifigkeit mit einer Stärke von 10 mm. Damit ergibt sich eine Gesamthöhe der beidseitig besohnten Prüfkörper von 120 mm. Ziel ist es jeweils vier Prüfkörper mit denselben Besohlungen auszustatten, wobei vier Prüfkörper nur einseitig eine Besohlung erhalten. Zusätzlich wird ein größerer Prüfkörper mit den Abmessungen 60 x 30 x 10 cm vorbereitet. Dieser erhält auch jeweils zwei unterschiedliche Besolungstypen und soll das Verhältnis des QVW in Bezug auf die doppelte Kontaktfläche darstellen.

5.4 Versuchsaufbau

Die Versuche werden am Großprüfstand der Fa. Getzner Werkstoffe GmbH durchgeführt. Hierfür wird ein Schotterbettkasten aus Metall mit einer Größe von 115 x 115 cm errichtet. In diesen Versuchsrahmen, welcher an den Seitenflächen mit einer steifen Matte ausgekleidet ist, wird manuell ein Gleisschotter der Körnung 1 in zwei Lagen je 15 cm eingebracht und mit einer Rüttelplatte verdichtet. Sind die Vorbereitungen abgeschlossen, so können die Prüfkörper mit Hilfe einer hölzernen Lehre auf die Schotteroberfläche aufgelegt werden. Die Lehre dient dazu, dass die Prüfkörper jeweils an derselben Stelle mit konstantem Abstand zur Rahmenwand positioniert werden können.



Abbildung 19: Anordnung der Prüfkörper (eigene Abbildung)

Die Prüfkörper befinden sich in unkonsolidierten Zustand, da noch keine Belastung aufgebracht wurde. Um Vergleichswerte zu erhalten werden die Querverschiebewiderstände an denselben Prüfkörper zuerst im unkonsolidierten und später im konsolidierten Zustand ermittelt.



Abbildung 20: Versuchsaufbau Labor (eig. Abb.)

Zur Ermittlung der Querverschiebewiderstände wird seitlich am Schotterbettkasten eine Konstruktion mit Messsensoren errichtet und mit Hilfe von Schraubzwingen befestigt. Diese Konstruktion besteht aus einer Kraftmessdose, welche in einer hydraulischen Presse verbaut ist und aus vier am Rand angeordneten Wegaufnehmern.

Die gesamte Messtechnik wird an einen PC angeschlossen und mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz die durch die Presse ausgelöste Kraft mit den dazugehörigen Wegen aufgezeichnet. Die Wegaufnehmer zeichnen bei einer eingeleiteten Kraft nicht nur die Verschiebung, sondern auch die Verdrehung bzw. das Kippen der Prüfkörper auf. Der Verschiebeweg wird durch die Größe des Hydraulikzylinders bestimmt, welcher jedoch nur bis zu einer Maximallänge von 20 mm aufgezeichnet werden kann. Die aufgezeichneten Daten werden im Anschluss in eine Excel Datei

exportiert und ausgewertet.

Sind die Messungen der vier Prüfkörper im unkonsolidierten Zustand abgeschlossen, werden diese vom Schotterkasten gehoben. Anschließend wird der Schotter mit einer Kalkschicht bestäubt. Die weiße Kalkschicht hinterlässt Abdrücke auf der schwarzen Sohle und erzeugt somit einen verstärkten Kontrast. Dieser Kontrast ist nach der Versuchsdurchführung zur einfachen Bestimmung der Kontaktfläche zwischen den Prüfkörpern und den Schottersteinen notwendig. Anschließend werden die Prüfkörper wieder auf der Schotteroberfläche platziert. Zur Herstellung eines konsolidierten Zustandes müssen die Prüfkörper belastet werden. Die Belastung wird an die Prüfung des Dauerschwellversuches angelehnt, jedoch sollte in diesem Fall nicht die Dauerfestigkeit nachgewiesen, sondern ausschließlich eine vertikale Betriebsbelastung simuliert werden. Hierfür sieht die Norm zwei Laststufen vor, welche auf der einen Seite von dem Bettungsmodul der Schwellenbesohlung und auf der anderen Seite von der Betriebsbelastung abhängig ist.

Statischer Bettungs- modul C_{stat} der Schwellenbesohlung, ermittelt nach 4.1.1 N/mm^3	Last- stufe	Oberlast F_o in kN bei Vorlast $F_u = 1 \text{ kN}$				Anzahl der Lastwechsel
		Straßen- bahn ^a	U-Bahn ^a	S-Bahn ^a	Vollbahn ^a	
$\leq 0,10$	1	13	14	15	21	$5 \cdot 10^6$
	2	17	18	22	28	$3 \cdot 10^6$
0,20	1	14	16	19	24	$5 \cdot 10^6$
	2	19	21	26	32	$3 \cdot 10^6$
$\geq 0,30$	1	15	17	21	26	$5 \cdot 10^6$
	2	20	22	27	34	$3 \cdot 10^6$
Bei Zwischenwerten des statischen Bettungsmoduls (z. B. für $0,15 \text{ N/mm}^3$) ist die Oberlast F_o zwischen den gegebenen Werten zu interpolieren.						
^a Typische Achslasten siehe DIN 45673-1.						

Tabelle 8: Belastung in Normalenrichtung beim Dauerschwellversuch⁷⁹

Bei der Belastung der Prüfkörper wird die Laststufe zwei angewandt, da diese eine größere Oberbaulast vorsieht. Die Prüfkörper verschiedener Versuchsreihen sind mit unterschiedlichen Besohlungstypen ausgestattet. Die anzusetzende Kraft zur Belastung der Prüfkörper ist vom statischen Bettungsmodul der Besohlung abhängig. Um dieselben Voraussetzungen zu schaffen und das Ergebnis des Querverschiebewiderstandes nicht durch die Größe der Belastung zu verfälschen, wird abweichend von der Norm, bei allen Versuchsreihen unabhängig vom Bettungsmodul, dieselbe Kraft zur Belastung der Prüfkörper angesetzt. Zur Simulation der Betriebsbelastung wird nicht, wie in der Norm vorgesehen, die volle Anzahl der Lastwechsel angewandt, da diese sonst den Zeitrahmen der Versuchsdurchführung sprengen würde. Stattdessen wird die Belastung auf eine Dauer von einer Stunde beschränkt. Dies ergibt somit bei einer Frequenz von 4 Hz eine Anzahl von 14.400 Lastwechsel. Die Konsolidierung der Prüfkörper ist bei dieser Anzahl an Lastwechsel nahezu vollständig abgeschlossen. Um eine schlagartige Belastung der Schotterkörner zu vermeiden, wird die Kraft über einen Zeitraum von 15 Minuten bis zum Erreichen der Volllast kontinuierlich gesteigert.

⁷⁹ Deutsches Institut für Normung e.V., Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen, 45673-6, S. 12.



Abbildung 21: Konsolidierungsvorgang im Labor (eig. Abb.)

Abheben der Prüfkörper zu verhindern.

Zur Herstellung eines konsolidierten Zustandes werden die vier Prüfkörper einer Versuchsreihe gleichzeitig belastet. Um die Belastung annähernd gleichmäßig auf alle vier Prüfkörper zu verteilen wird eine gelenkig gelagerte Konstruktion aufgelegt. Die Krafteileitung erfolgt über einen zentral angeordneten Hydraulikzylinder. Damit ist eine nahezu gleichmäßige Lastverteilung sichergestellt und die Normbelastung kann mit einem Faktor multipliziert werden, welcher dem der Anzahl der Prüfkörper entspricht. Für die Vollastphase wurde laut Norm jene Belastung gewählt, welche für den statischen Bettungsmodul von 20 N/mm^3 anzusetzen ist. Daraus ergibt sich, wie in folgender Abbildung dargestellt, eine Vorlast F_v von 4 kN und eine Oberlast F_o von 128 kN . Eine Vorlast ist notwendig, um ein

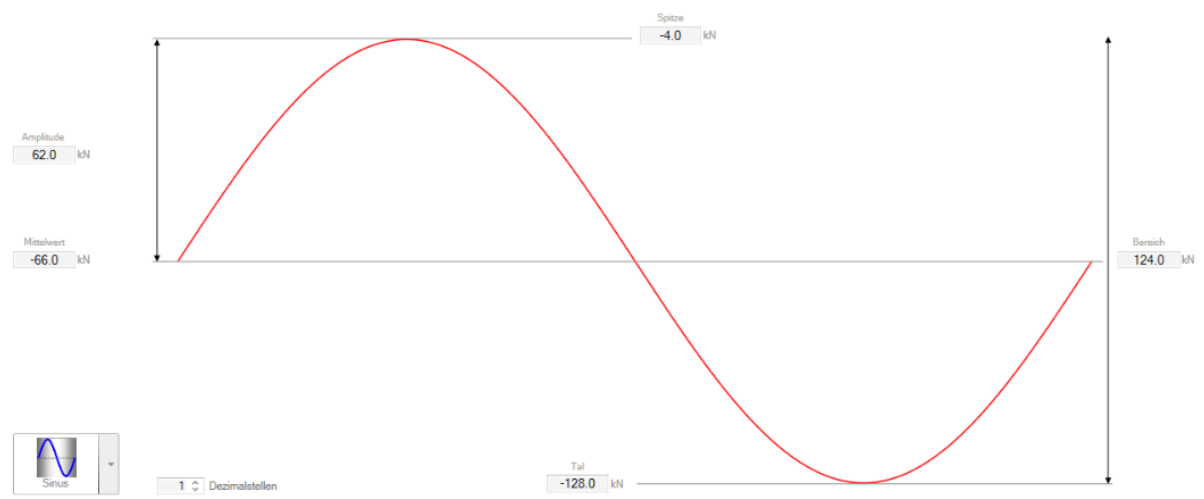


Abbildung 22: Belastung der Prüfkörper zur Herstellung eines konsolidierten Zustandes (eig. Abb.)

Der Konsolidierungsgrad, also die Umlagerung und Einarbeitung der Schotterkörner in die Schwellenbesohlung nimmt mit der Anzahl der Lastwechsel zu. Durch die simulierte Betriebsbelastung tritt eine Setzung der Prüfkörper auf. Die größte Setzung ist während der ersten Belastungszyklen festzustellen, mit zunehmender Anzahl der Schwingungen flacht die Kurve rasch ab. Das Setzungsverhalten der Prüfkörper wird im folgenden Diagramm, an Hand des Besohlungstyps SLB 3007 dargestellt.

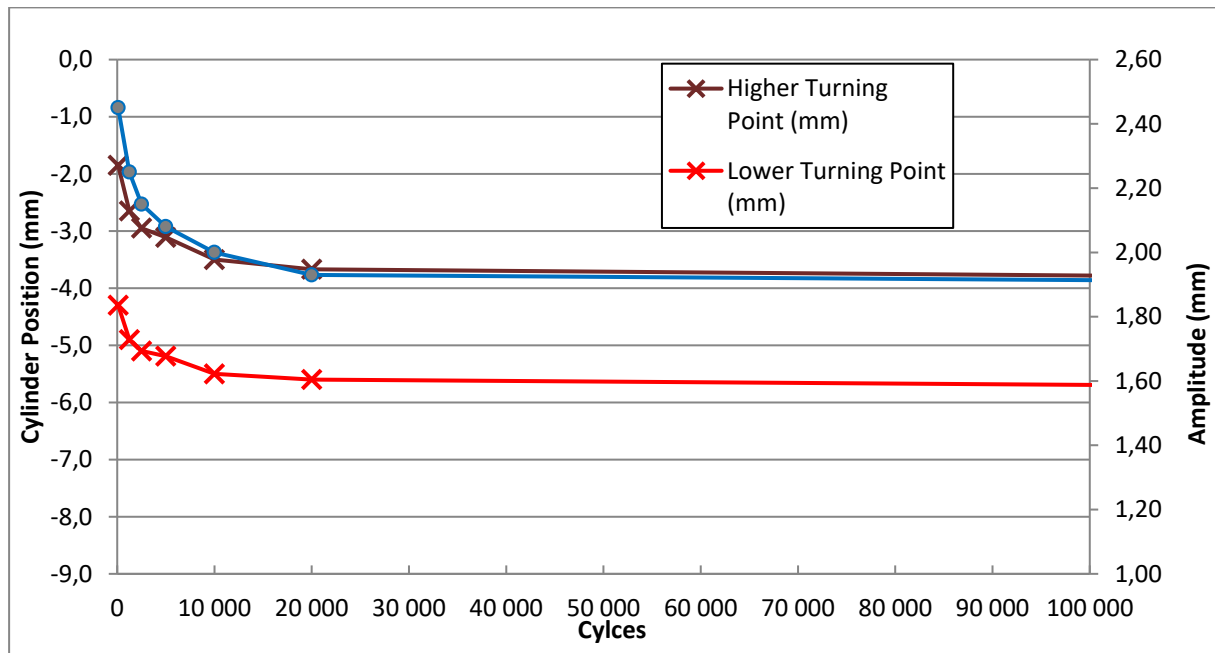


Abbildung 23: Setzungskurve aus Laborversuchen mit der Besohlung SLB 3007 (Getzner Werkstoffe GmbH)

Hierbei ist zu erkennen, dass die Konsolidierung ab ca. 20.000 Lastwechsel nahezu abgeschlossen ist. Die durchgeführten Laborversuche wurden auf 14.400 Lastwechsel beschränkt. Bei der Versuchsdurchführung wurde diese Anzahl als ausreichend befunden, da höchstens nur noch geringfügige Änderungen zu erwarten sind. Die Setzungslinie von Vor- und Oberlast verläuft parallel, wodurch der Konsolidierungsvorgang abgeschlossen und mit keiner weiteren Setzung zu rechnen ist.

Der rechnergestützte Hydraulikzylinder, über welchen die Belastung aufgebracht wird ist mit hochpräzisen Sensoren ausgestattet und zeichnet die eingeleitete Kraft exakt auf.

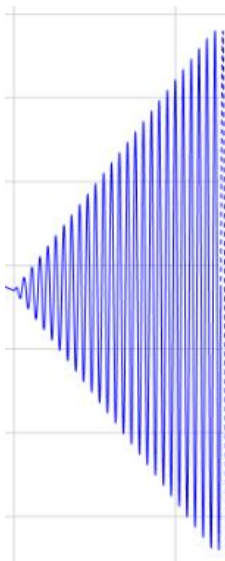


Abbildung 24: Einschwingphase

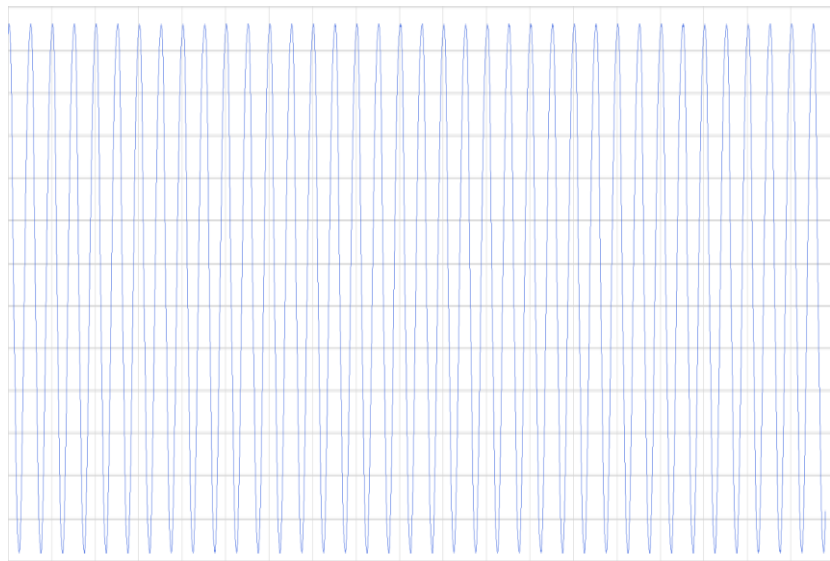


Abbildung 25: Volllastphase

In dieser Abbildung ist beispielsweise die zu Beginn der Krafteinleitung notwendige Einschwingphase mit einer linearen Laststeigerung ersichtlich. Diese endet nach 15 Minuten bei 3.600 durchgeführten Schwingungen und geht anschließend zur Vollastphase mit 14.400 Lastwechsel über.

Ist die Konsolidierung der Prüfkörper abgeschlossen, erfolgt die Messung des Querverschiebewiderstandes, nach derselben Vorgehensweise wie im unbelasteten Zustand. Anschließend wird die Schotteroberfläche mit Hilfe eines Spatens aufgeraut und erneut verdichtet, sodass die Prüfkörper der nächsten Versuchsreihe aufgelegt werden können.

6 Auswertung Laborversuche

Schotter ist ein sehr inhomogener Baustoff, durch die Aufbringung einer Horizontalverschiebung geraten die einzelnen Körner, durch den Kontakt mit der Besohlung in Bewegung. Diese Umlagerungen fallen bei jeder Versuchsdurchführung sehr unterschiedlich aus. Deshalb sind auch beim größten Bemühen einer exakten Wiederholung der Messungen Abweichungen der Resultate in einem gewissen Streubereich festzustellen. Diese Abweichungen können nach Betrag und Vorzeichen zufallsbedingt schwanken und sind statistisch um einen Mittelwert herum verteilt. Um diese Fehler zu reduzieren wird die Messung an mehreren Prüfkörper durchgeführt. Mit steigender Anzahl der Messwerte gleicht sich deren Mittelwert dem wahren Wert an und die zufälligen Abweichungen nähern sich gleich Null. Ein Ergebnis ist gleich kein Ergebnis, denn ohne einen Vergleichswert kann keine Aussage getroffen werden. Zur Plausibilisierung der Ergebnisse sind mindestens drei Messungen notwendig.

Bei den durchgeführten Messungen des Querverschiebewiderstandes wurde bei zwölf Versuchsreihen eine durchschnittliche Standardabweichung von ca. 36 N erreicht. Der Wert der Standardabweichung ist bei einer Verschiebung des Prüfkörpers um 2 mm vom Besohlungstyp sehr unterschiedlich. Ein Zusammenhang in Abhängigkeit vom Belastungszustande ist nicht zu erkennen. Um die Streuung möglichst gering zu halten wurde bei den QVW Messungen jeder Versuchsreihe ein Mittelwert gebildet. Die zwei Prüfkörper mit den vorzeichenmäßig größten Abweichungen vom Mittelwert werden ausgeschlossen und für die Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Nach Ausschluss jener Prüfkörper sinkt die durchschnittliche Standardabweichung auf ca. 16 N.

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Standardabweichung der einzelnen Versuchsreihen.

Besohlungstyp	Standardabweichung konsolidiert		Standardabweichung unbelastet	
Anzahl der Blöcke	vier	zwei	vier	zwei
SLB 1510	29,65	2,98	45,01	30,37
SLN 1010	27,19	25,54	28,63	0,71
M02	60,14	15,33	17,03	17,46
SLB 3007	52,22	37,46	45,97	10,50
S -NG	20,92	13,06	51,97	6,24
UB	31,64	5,82	28,13	28,13
Mittelwert	36,96	16,70	36,12	15,56

Tabelle 9: Standardabweichung QVW Messungen Labor (eigene Abbildung)

6.1 Auswertung der Messergebnisse der Prüfkörper

Als Querverschiebewiderstandes wird jener Wert definiert, welcher bei einem Verschiebeweg der Schwelle von 2 mm bezogen auf 1 mm Gleislänge erreicht wird. Bis zu einer Verschiebung von 2 mm ist die größte Kraftsteigerung erforderlich, nach dem Erreichen dieses Wertes flacht die Kurve allmählich ab. Messungen am realen Streckengleis zeigen, dass der QVW ab einer Verschiebung von 8 mm nahezu konstant bleibt.

Die QVW Messungen an den Betonprüfkörper wurden bis zu einer maximalen Verschiebung von 20 mm aufgezeichnet. Die Verschiebung bei der Versuchsdurchführung ist durch die Federlänge des Wegaufnehmers und der Höhe des Hydraulikzylinders beschränkt. Im Durchschnitt wurde eine Verschiebung von 10 mm erreicht, da die Wegaufnehmer bei Versuchsbeginn schon einige Millimeter Federlänge, durch die Positionierung am Schotterbettkasten benötigen.

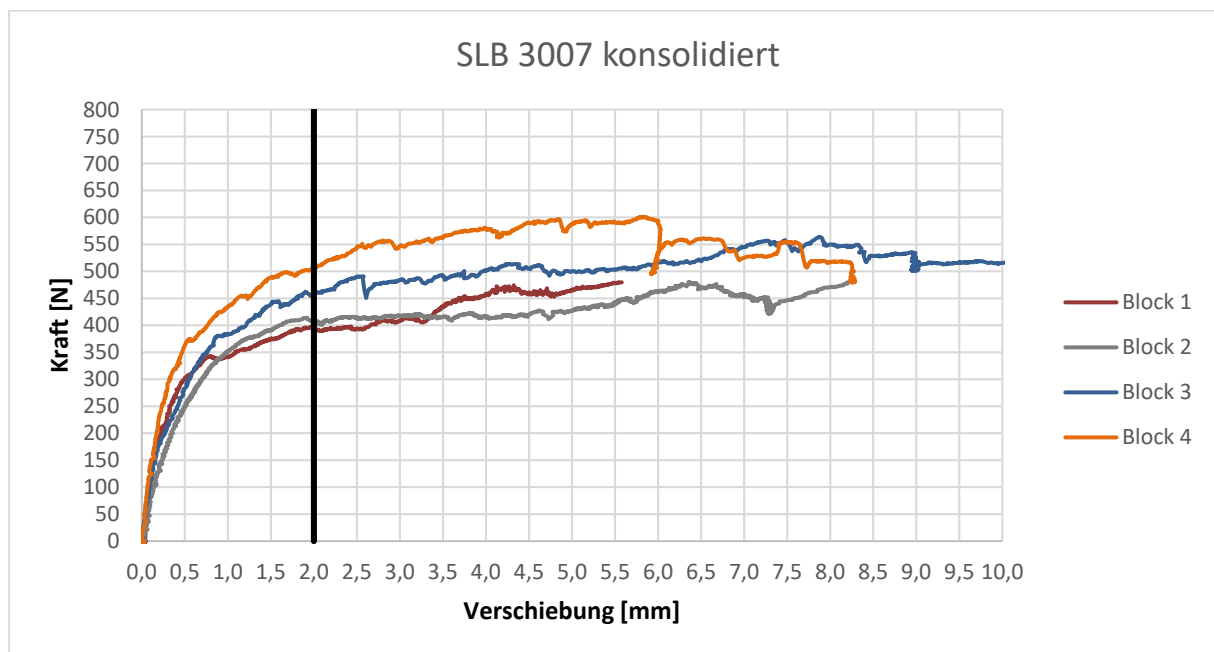


Diagramm 1: Zusammenstellung der Versuchsreihen SLB 3007 konsolidiert (eigene Abbildung)

In dieser Abbildung ist an Beispiel des Beschlungstyps SLB 3007 das Kraft/Weg Diagramm dargestellt. Bei der Versuchsdurchführung am Betonprüfkörper wurde wie bei den Messungen am Streckengleis eine Maximalkraft bei einer Verschiebung zwischen 6 und 8 mm erreicht. Bei der Auswertung der Laborergebnisse sind jedoch sehr ausgebreigte Kraftsprünge festzustellen, welche auf die Hublänge der Handpumpe zurückzuführen sind. Die Geschwindigkeit der Lastaufbringung hat einen Einfluss auf die Messergebnisse. Bei der Versuchsdurchführung wurde versucht eine kontinuierliche Belastungsgeschwindigkeit aufzubringen, was jedoch bedingt möglich war. Nach einer Hublänge der Handpumpe musste die Belastung zurückgenommen und neu angesetzt werden. In der Abbildung ist an Hand von Block 3 (2,5 mm) und Block 4 (6 mm) ein deutlicher Rückgang der Kraft zu erkennen. Die Kraft

steigt durch die erneute Belastung rasch an, kann jedoch denselben Wert nicht erreichen. Unterbrechungen verursachen Auswirkungen auf den Maximalwert und stören einen kontinuierlichen Kräfteverlauf. Ohne Unterbrechung dürfte der Maximalwert um die Differenz der Unterbrechung höher sein. Da der QVW bei einer Verschiebung um 2 mm ausschlaggebend ist, spielt diese Abweichung keine Rolle.

6.1.1 Laborauswertung im unkonsolidierten Zustand

Die durchschnittlichen Messergebnisse der zwei Prüfkörper mit den geringsten Abweichungen vom Mittelwert wurden in einem Diagramm zusammengestellt. Dabei ist im unkonsolidierten Zustand eine geringe Schwankungsbreite der einzelnen Besohlungstypen zu erkennen. Der Grund dafür ist, dass nur das Eigengewicht einwirkt und deshalb kaum eine Einarbeitung der Schotterkörner in die Besohlung entsteht. Der unbesohlte Betonblock erzielte wie erwartet durch die sehr harte und glatte Oberfläche im Gegensatz zu den besohnten Objekten nur geringe Werte. Um ein Vergleich der einzelnen Besohlungen zu ermöglichen, wurde jener mit dem geringsten Messergebnis (M02) als Referenz Wert gewählt. Auffallend dabei ist die große Abweichung von Typ M02 zu den übrigen Besohlungen. Die Ursache dafür ist die kompakte und glatte Oberfläche, welche auf Grund der fehlenden Belastung keine Verzahnung mit den Schotterkörnern ermöglicht. Die weiteren Besohlungstypen verhielten sich im unkonsolidierten Zustand annähernd gleich.

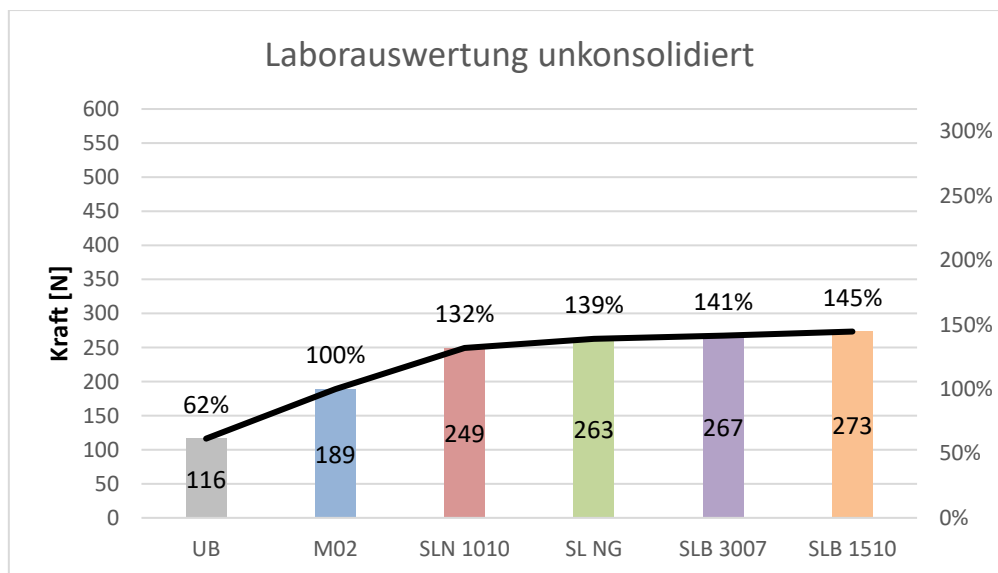


Diagramm 2: Laborauswertung unkonsolidierte Prüfkörper (eigene Darstellung)

Nach der Versuchsdurchführung im unkonsolidierten Zustand wurde die Sohlenunterseite analysiert. Eine Bestimmung der Kontaktfläche war jedoch nicht möglich, da bewusst keine Kalkschicht aufgebracht wurde. Damit konnte eine zusätzliche Verunreinigung der Unterseite vermieden werden. Eine saubere Sohle ermöglicht eine exaktere Bestimmung der

Kontaktfläche im konsolidierten Zustand, welche auf Grund der Belastung eine höhere Aussagekraft darstellt. Wie bereits erwähnt konnten nach der Querverschiebung im unbelasteten Zustand nur geringe Schotterabdrücke festgestellt werden. Die folgenden Abbildungen zeigen die Sohlunterseite nach der Versuchsdurchführung im unkonsolidierten Zustand.

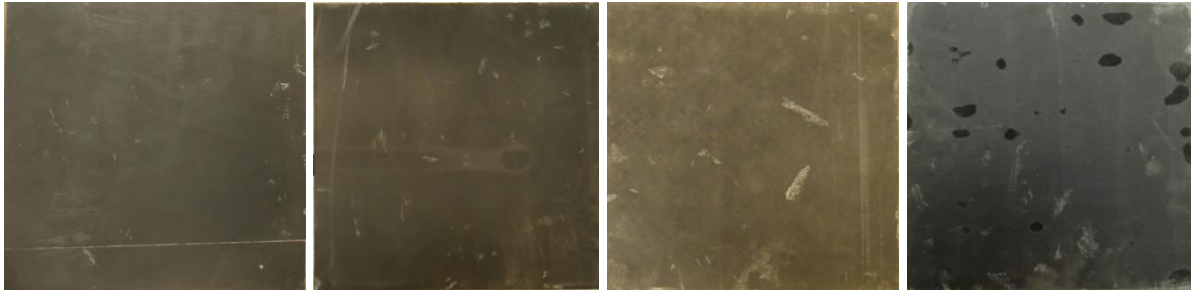


Abb. 26: M02 unkons.

Abb. 27: SL NG unkons.

Abb. 28: SLB 3007 unkons.

Abb. 29: SLB 1510 unkons.

Der Beschlungstyp M02 besitzt eine glatte und kompakte Oberflächenstruktur und blieb nahezu vollständig unversehrt. Bei den Versuchsobjekten (Abb.27 - 29) sind bereits leichte Abdrücke der Schotterkörner zu erkennen, womit die höheren QVW Werte zu erklären sind. Beim Typ SLN 1010 sind keine augenscheinlichen Veränderungen ersichtlich, jedoch stellt die raue Vliesoberfläche einen besseren Verbund dar, wodurch die ebenfalls höheren QVW im Vergleich zum Referenzobjekt erklärbar sind.

6.1.2 Laborauswertung im konsolidierten Zustand

Durch die aufgebrachte Belastung entsteht eine Verzahnung zwischen Prüfkörper und Schotterkörner. Dieses Ineinander greifen sorgt für eine deutliche Erhöhung des QVW. In absoluten Zahlen ausgedrückt wurden die Ergebnisse der QVW Messung im konsolidierten Zustand bei einer Verschiebung um 2 mm in einem Diagramm der Größe nach sortiert abgebildet. Als Referenzwert wurde der besohlte Prüfkörper (M02) mit dem niedrigsten QVW Wert herangezogen.

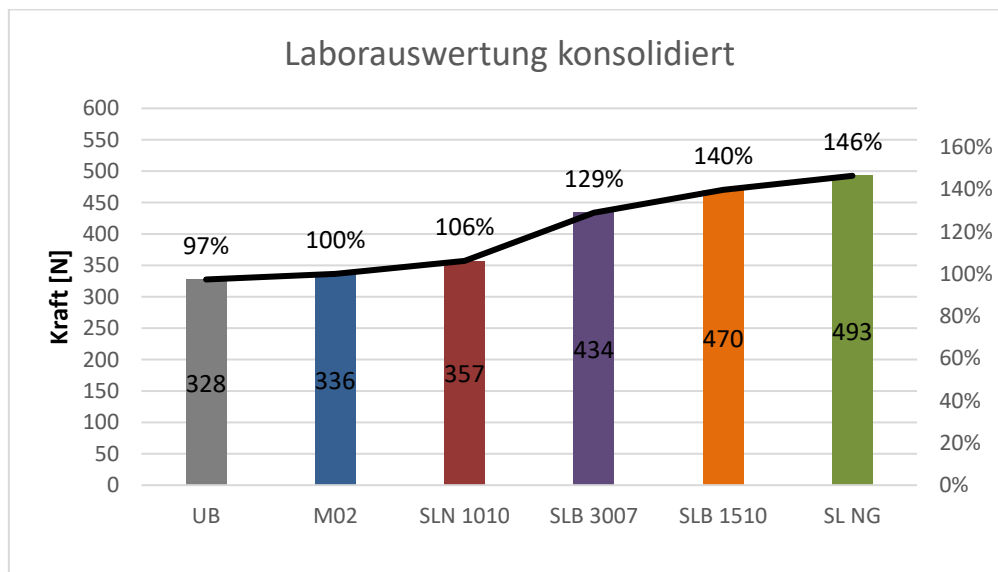


Diagramm 3: Laborauswertung konsolidierte Prüfkörper (eigene Darstellung)

Im konsolidierten Zustand sind die Messwerte des unbesohnten Prüfkörpers, auf Grund der starken Zunahme, nicht wesentlich von denen des Prüfkörpers mit dem Besohlungstyp M02 zu unterscheiden. Die Besohlung M02 dient vorwiegend der Schotterschonung und zielt nicht auf eine Erhöhung der QVW ab, sie stellt jedoch keine Verschlechterung dieses Wertes dar. Die QVW-Werte des Besohlungstyps SLN 1010 liegen durch das elastische Verhalten nur 6 % über dem Referenzwert. Grund hierfür ist ebenfalls das Anwendungsgebiet der Besohlung, dieses liegt neben der Schotterschonung hauptsächlich im Bereich des Erschütterungsschutzes. Deutlich höhere Messergebnisse erreichen die Besohlungstypen SLB 3007, SLB 1510 und SL NG, wobei letzterer im Vergleich zum unkonsolidierten Zustand den Maximalwert erreicht. Die Typen SLB 3007 und SLB 1510 dienen wie alle Besohlungen vorwiegend der Schotterschonung. Dieser Effekt kann laut Hersteller besser durch eine größere Kontaktfläche erreicht werden und wie die durchgeführten Messungen zeigen, sind auch Auswirkungen auf den QVW zu erkennen. Eine Besonderheit stellt das Schwellenlager SL NG dar, diese Neuentwicklung zeichnet sich neben der Schotterschonung auf eine Maximierung des QVW aus. Auf Grund der Tatsache, dass diese Besohlung im Vergleich nur eine Nenndicke von 7 mm verfügt, könnte der QVW bei einer stärkeren Ausführung noch deutlich größere Werte erzielen.

6.1.3 Gegenüberstellung der Laborauswertung unkonsolidiert / konsolidiert

Auf Grund der unterschiedlichen Materialeigenschaften sind Abweichungen des QVW der einzelnen Besohlungen festzustellen. Durch den Konsolidierungsvorgang konnten diese Werte jeweils gesteigert werden. Im folgenden Diagramm sind die Querverschiebewiderstände der einzelnen Besohlungen sowohl im unkonsolidierten (hell) als auch im konsolidierten (dunkel) Zustand dargestellt. Zudem ist die Veränderung in Prozent der

beiden Konsolidierungszuständen über den jeweiligen Säulen angegeben. Die Erhöhung bezieht sich auf den im unkonsolidierten Zustand ermittelten Betrag. Als Information ist zusätzlich noch die ermittelte Kontaktfläche abgebildet.

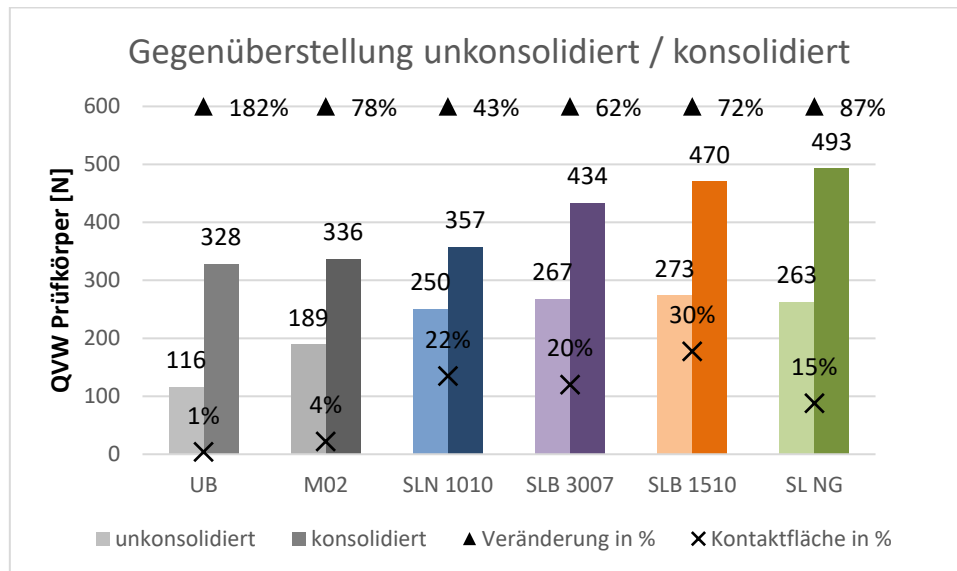


Diagramm 4: Gegenüberstellung unkonsolidiert / konsolidiert Labor (eigene Darstellung)

Beim Betracht dieses Diagramms ist keine gleichmäßige Steigerung der einzelnen Versuchsreihen zu erkennen. Bei den besohnten Objekten ist eine Kraftzunahme zwischen 43 % und 87 % festzustellen. Auffallen dabei ist die starke Kraftzunahme von 182 % der unbesohnten Prüfkörper zwischen unbelasteten und belasteten Zustand. Dies lässt sich auf die sehr geringen QVW Werte im unkonsolidierten Zustand zurückführen. Hierbei konnte der Prüfkörper mühelos ohne jegliche Verzahnung über die Schotterkörner gleiten. Durch die aufgebrachte Belastung entstanden deutlich sichtbare Kerben an der Betonunterseite, welche für einen besseren Verbund und daraus resultierenden für einen höheren QVW ausschlaggebend sind. Dasselbe gilt für den Prüfkörper mit der Besohlung M02, wobei im Vergleich nur eine Steigerung von 78 % erzielt wurde. Beim Schwellenlager NG wurde eine Erhöhung des Querverschiebewiderstandes von 87 % festgestellt, wobei bereits im unkonsolidierten Zustand im Vergleich zur Besohlung M02 bereits ein überdurchschnittlicher QVW ermittelt wurde. Für die hohen QVW Werte dieser Besohlung ist das plastische Verformungsverhalten verantwortlich.

Die Besohlungen SLN 1010 erzielte mit 43 % die geringste Kraftsteigerung, dies ist auf der einen Seite auf die Vlieschutzschicht und auf der anderen Seite auf das elastische Verformungsverhalten zurückzuführen. Das Vlies verhindert eine größere Verzahnung mit den Schotterkörnern. Nach der Belastung sind daher nur geringe Abdrücke vorhanden, welche sich jedoch rasch rückbilden.

Die Besohlungen SLB 3007 und SLB 1510 sind als elasto-plastisch anzusehen, da diese bereits im unkonsolidierten Zustand eine Verzahnung mit den Schotterkörnern eingehen und leicht Abdrücke aufweisen. Durch diesen Verbund sind bereits im unkonsolidierten Zustand

überdurchschnittliche QVW-Werte festzustellen, welche durch die aufgebrachte Belastung um 62 % bzw. 72 % steigen. Die entstandenen Abdrücke schwinden nach der Versuchsdurchführung, jedoch bleibt mittelfristig eine plastische Restverformung.

Die Kraftzunahme zwischen den beiden Konsolidierungszuständen ist zum größten Teil von der Art des Verformungsverhalten abhängig.

6.1.4 Vergleich unterschiedlicher Prüfkörpergrößen

Bei der Durchführung von Laborversuchen wurde zusätzlich zu den 30 x 30 cm großen Prüfkörpern ein Versuchsobjekt mit den doppelten Abmessungen (60 x 30 cm) hergestellt. Dieser eine Prüfkörper wurde jeweils auf einer Seite mit der Besohlung SLB 1510 und auf der andern mit der Besohlung SLB 3007 ausgestattet. Anschließend erfolgte eine Verschiebung des Versuchsobjektes in Längsrichtung, wobei der Querverschiebewiderstand, analog der Standardprüfkörper, aufgezeichnet wurde. Da hierbei nur ein Objekt dieser Größe zur Verfügung steht, konnten keine Mittelwerte zur Feststellung einer gewissen Streuung gebildet werden. Die Messergebnisse der unterschiedlichen Prüfkörpergrößen wurden im nachfolgenden Diagramm gegenübergestellt und ausgewertet.

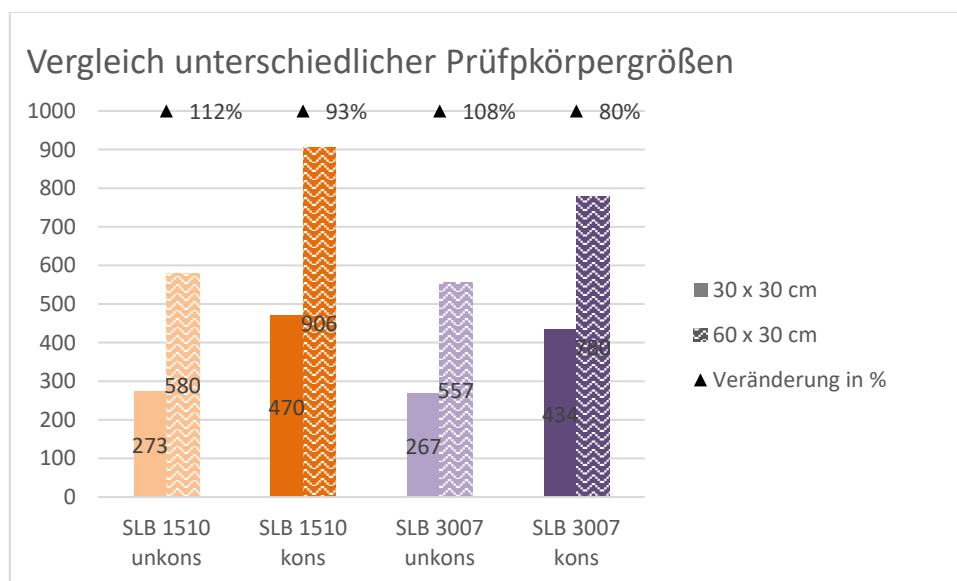


Diagramm 5: Vergleich unterschiedlicher Prüfkörpergrößen (eigene Darstellung)

Beim Betracht dieses Diagramms konnte durch die Verdoppelung der Abmessungen eine deutliche Vergrößerung des QVW erzielt werden. Das Verhalten der unterschiedlichen Besohlungstypen ist annähernd gleich, wobei im unkonsolidierten Zustand eine Steigerung der des QVW gegenüber den Standardprüfkörpern, um ca. 110% festzustellen ist. Nach dem Konsolidierungsvorgang beträgt der Unterschied noch 80 % bzw. 93 %.

6.1.5 Auswertung der Kontaktfläche

Nach der Versuchsdurchführung im konsolidierten Zustand wurde die Kontaktfläche zwischen Schotter und Besohlung analysiert. Zur Bestimmung der Kontaktfläche wurde ein Foto von der Auflagefläche des Prüfkörpers erstellt. Auf diesem sind die Kalkabdrücke der Schottersteine gut erkennbar. Jedoch sind neben der Kontaktfläche auch störende Betonverunreinigungen und produktionsbedingte Farbschwankungen der Besohlung sichtbar. Diese Farbabweichungen konnten trotz vorhergehender Reinigung nicht entfernt werden, haben aber keinen Einfluss auf die Messergebnisse verfälschen jedoch die Auswertung der Kontaktfläche. Mit Hilfe einer Bildbearbeitungssoftware (ImageJ) wurden die störenden Elemente entfernt und der Kontrast verstärkt. Die Software ist in der Lage die prozentuale Fläche der in diesem Fall rot eingefärbten Bildpunkte wiederzugeben.

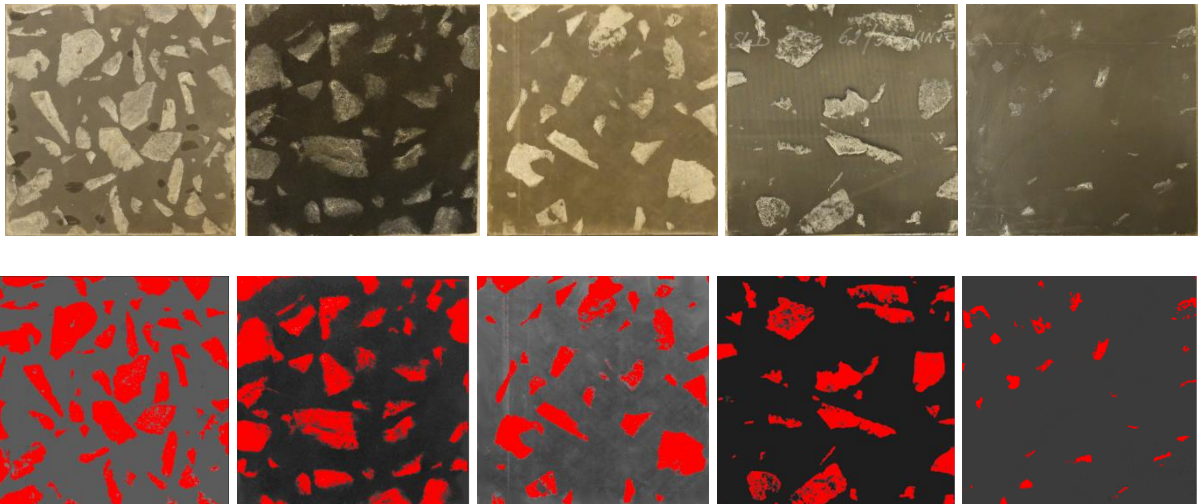


Abb. 30: SLB 1510/2 Abb. 31: SLN 1010/2 Abb. 32: SLB 3007/3 Abb. 33: SL NG/2 Abb. 34: M02/4

Bei der Auswertung der Kontaktfläche konnten große Unterschiede zwischen den einzelnen Besohlungstypen festgestellt werden, dies ist auf den vorherigen Abbildungen sowie im nachfolgenden Diagramm gut ersichtlich.

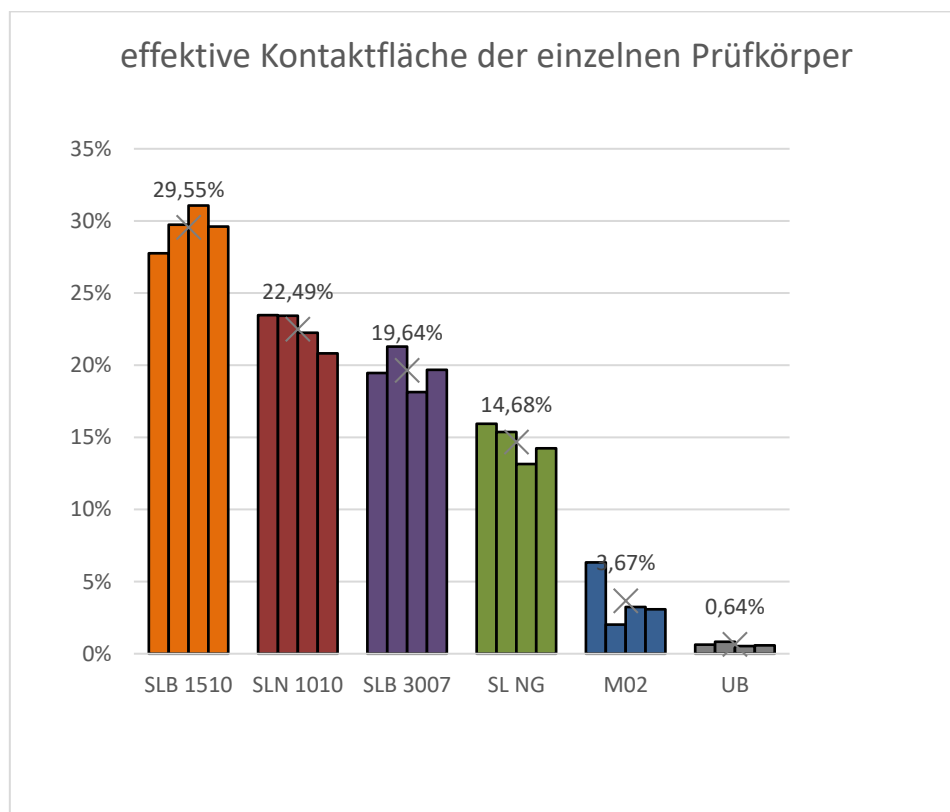
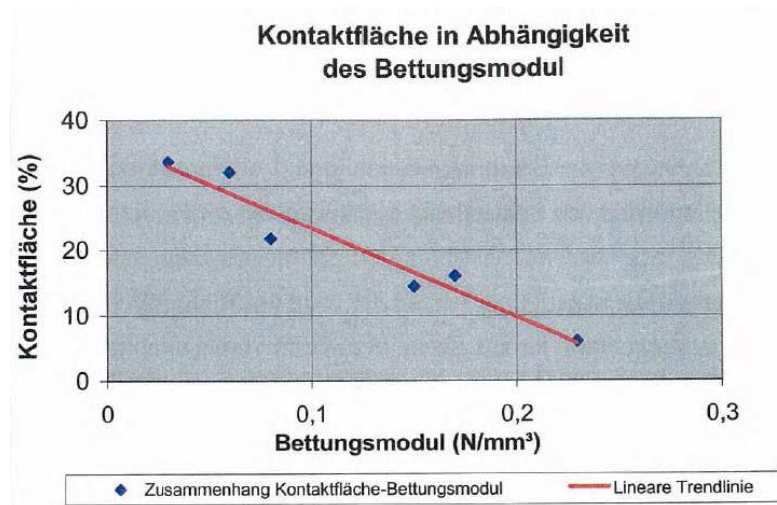


Diagramm 6: effektive Kontaktfläche der einzelnen Prüfkörper (eigene Darstellung)

Die Kontaktfläche im konsolidierten Zustand der unterschiedlichen Besohlungen reicht von 4% bis zu 30%. Daraus lässt sich schließen, dass die Kontaktfläche einerseits vom Bettungsmodul und andererseits von der Oberflächenbeschaffenheit sowie vom Verformungsverhalten abhängig sein muss, jedoch nicht von der Größe des Prüfkörpers. Die Kontaktfläche des Prüfkörpers mit den verdoppelten Abmessungen befinden sich im Schwankungsbereich der Standardobjekten.

Bei vorherigen Studien wurde bereits ein Zusammenhang zwischen der Schotterkontaktfläche und dem Bettungsmodul der Besohlung festgestellt.

Abbildung 35: Kontaktfläche in Abhängigkeit des Bettungsmodul⁸⁰

Eine weiche Besohlung ermöglicht eine bessere Einbettung der Schotterkörner, dementsprechend nimmt die Kontaktfläche mit zunehmenden Bettungsmodul ab. Eine ähnliche Tendenz wurde bei den in dieser Arbeit untersuchten Prüfkörpern festgestellt, wobei nur drei unterschiedliche Bettungsmodulies betrachtet wurden.

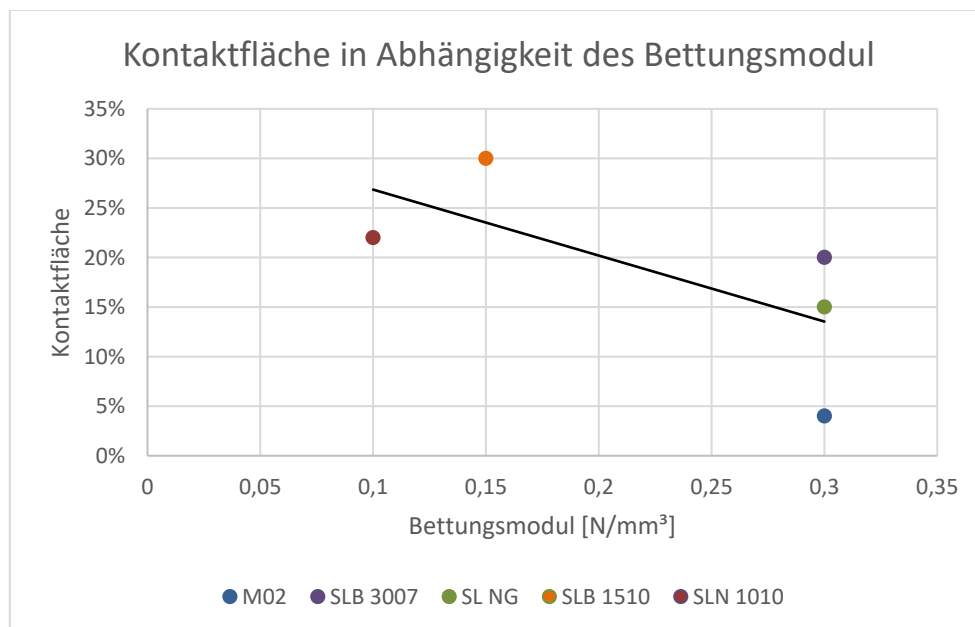


Diagramm 7: Kontaktfläche in Abhängigkeit des Bettungsmodul (eigene Abbildung)

In diesem Diagramm ist auffällig, dass die weiche Besohlung SLN 1010 entgegen der vorherigen Aussagen unterhalb der Trendlinie angeordnet ist. Beim genaueren Betracht des Beschlungstyps ist dieser Effekt durch eine verarbeitete Vlieschutzschicht an der

⁸⁰ Monaco V, Untersuchungen zu Schwellenbesohlungen im Oberbau, 2004.

Besohlungsunterseite zu begründen, welche einen erschwerten Verbund mit den Schotterkörnern ermöglicht.

Der Einfluss der Materialbeschaffenheit kommt bei der Beobachtung von Besohlungen mit denselben Steifigkeiten besser zur Geltung. Die Typen mit einem Bettungsmodul von 0,3 N/mm³ weisen Unterschiede bei der Kontaktfläche bis zu 15% auf. Demzufolge hat neben dem Bettungsmodul auch das Verformungsverhalten Auswirkungen auf die Kontaktfläche. Die Besohlungen lassen sich in elastische, plastische und elasto-plastische Verhalten unterteilen. Das Verhalten ist abhängig von der Verformung während und nach der Belastung der Besohlung. Der elastische Typ M02 ist sehr kompakt und nach der Versuchsdurchführung bleiben ausgeprägte Kerben an der Unterseite sichtbar. Auf Grund der Kompaktheit ist die Berührungsfläche relativ klein, da nur die Spitzen der Schotterkörner einen Verbund mit der Besohlung aufnehmen. Das Schwellenlager NG ist als plastisch einzuordnen, mit dem Unterschied, dass hierbei die Schotterkörner besser in die Besohlung eingebunden werden, wodurch eine größere Kontaktfläche entsteht.

Die Besohlungen SLB 1510 und SLB 3007 erreichen nach der Versuchsdurchführung mit fortschreitender Dauer nahe zu ihren Ausgangszustand, wobei nur mehr geringe Abdrücke sichtbar sind. Durch dieses elasto-plastische Verhalten erreichen die Besohlungen eine große Kontaktfläche mit den Schotterkörnern. Die Oberfläche der beiden Schwellenlager ist sehr ähnlich und daher ist unterschiedlich große Kontaktfläche auf den Bettungsmodul zurückzuführen.

6.1.6 Einfluss der Kontaktfläche auf den konsolidierten Zustand

Es wurde bereits versucht einen Zusammenhang zwischen der Steigerung des QVW und den beiden Konsolidierungszuständen herzustellen. Dabei wurde festgestellt, dass nur ein Vergleich von Besohlungstypen mit demselben Verformungsverhalten als sinnvoll erscheint. Um einen Einfluss der Kontaktfläche auf den QVW schließen zu können, wurde in folgendem Diagramm alle QVW Messergebnisse im konsolidierten Zustand mit der dazugehörigen Kontaktfläche dargestellt.

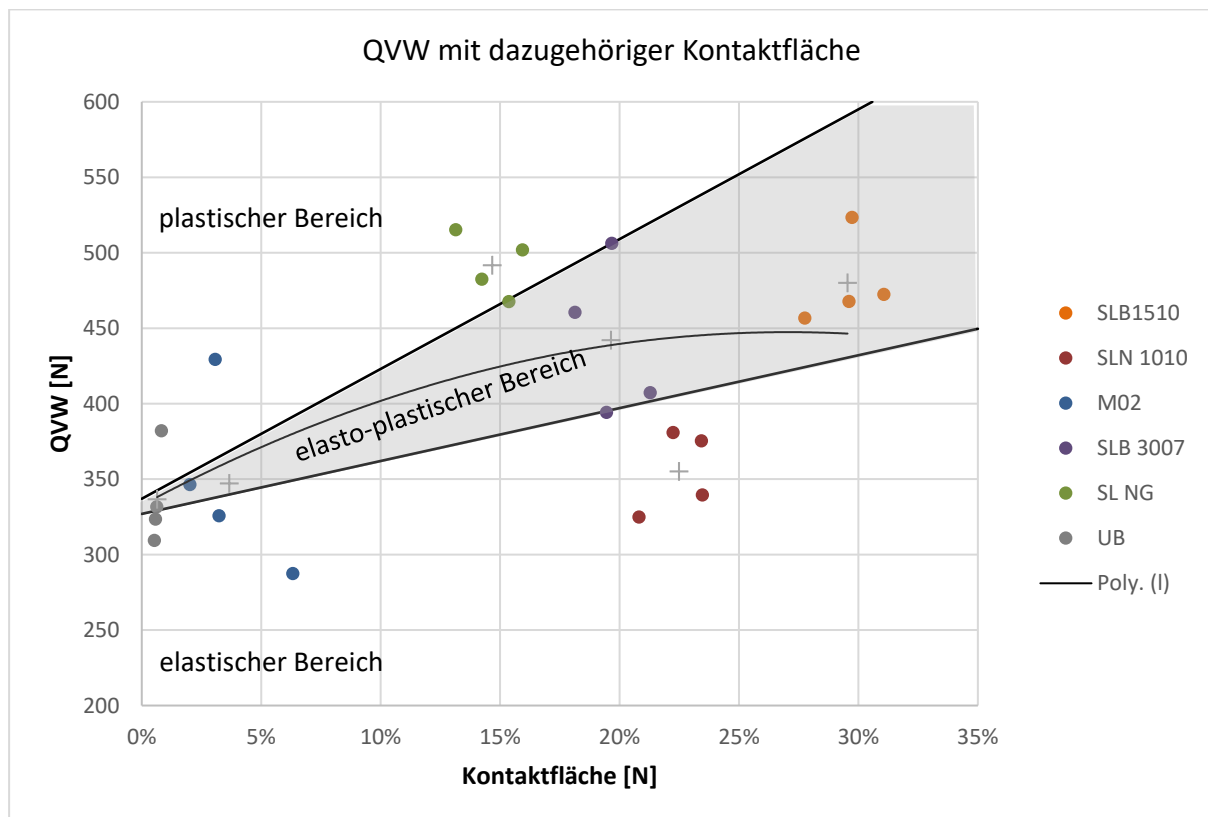


Diagramm 8: QVW mit dazugehöriger Kontaktfläche Labor (eigene Darstellung)

Ein Zusammenhang zwischen dem QVW und der Kontaktfläche lässt sich nur bedingt herstellen. Der unbesohlte Prüfkörper erreicht bei der geringsten Kontaktfläche auch den kleinsten QVW. Dieses Verhältnis ist auch bei den Besohlungen M02, SLB 3007 und SLB1510 zu erkennen. Abweichend hiervon ist das Verhalten der Besohlungen SLN 1010 und SL NG. Der Besohlung SLN 1010 erreicht beispielsweise mit 22 % die zweithöchste Kontaktfläche, jedoch mit 357 N nur einen unterdurchschnittlich großen QVW. Gegenteilig ist das Verhalten des Typs SL NG, welcher bei einer mittleren Kontaktfläche (15 %) den höchsten QVW (493 N) erreicht.

Beim Betracht der polynomisch zwischen allen Messergebnissen verlaufenden Trendlinie ist zu erkennen, dass bis zu einer Kontaktfläche von ca. 15% der QVW stark ansteigt, jedoch flacht die Linie bei einer weiteren Zunahme allmählich ab. Dies bedeutet, dass bei einer Erhöhung der Kontaktfläche über 35% kaum mehr mit einer Steigerung des QVW zu rechnen ist.

Wie bereits festgestellt, weichen die Ergebnisse der Versuchsreihen SLN 1010 und SL NG von dieser Trendlinie ab. Um einen aussagekräftigen Zusammenhang zwischen Kontaktfläche und QVW herzuleiten zu können, werden anschließend nur jene Versuchsreihen mit einem ähnlichen Verhalten untersucht.

Im folgenden Diagramm sind nur mehr die Prüfkörper UB, M02, SLB 3007 und SLB 1510 dargestellt. Da die Messungen auf Grund der Annahmen nur fiktive Werte darstellen, sind diese nur in Relation aussagekräftig.

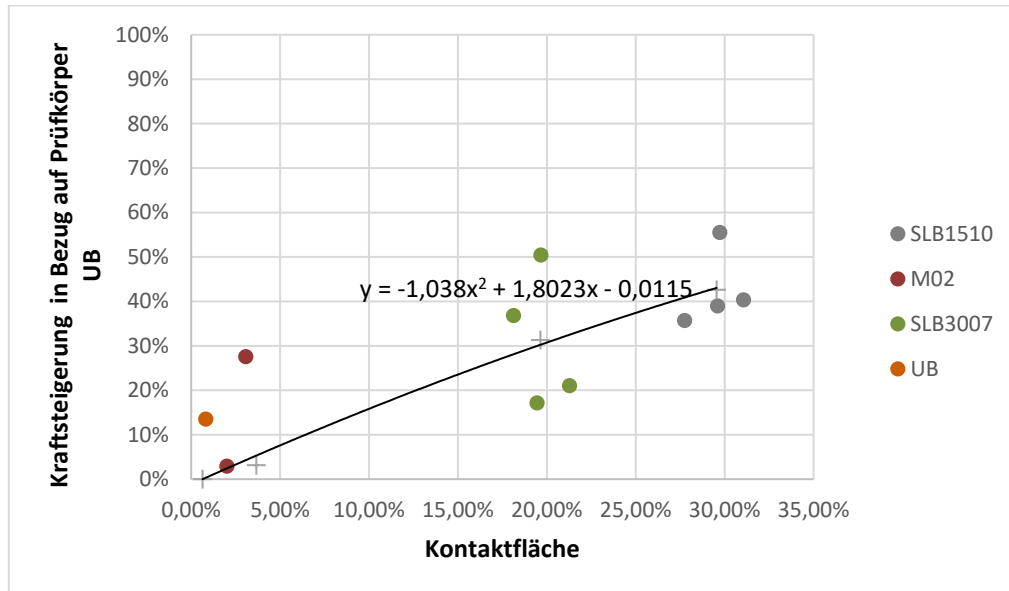


Diagramm 9: QVW mit dazugehöriger Kontaktfläche bei ähnlicher Tendenz (eigene Darstellung)

Mit Hilfe dieses Diagramms soll die Steigerung des QVW bei zunehmender Kontaktfläche in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper ersichtlich gemacht werden. Anhand der Gleichung

$$y = -1,038x^2 + 1,8023x - 0,0115$$

kann das Verhältnis zum unbesohlenen Prüfkörper im konsolidierten Zustand bei jeder möglichen Kontaktfläche bestimmt werden. Laut dieser Berechnung ist ein maximaler QVW bei einer Kontaktfläche von ca. 85% zu erreichen. Dieser Wert scheint jedoch nur sehr theoretisch, denn keine brauchbare Besohlung kann diesen Wert je erreichen. Ob eine Besohlung mit einer Kontaktfläche von größer 50 % dieser Funktion folgen würde ist fraglich, damit ist diese mit 35 % zu begrenzen.

In der folgenden Tabelle sind die zu erwartenden Steigerungen des QVW bei einer entsprechenden Kontaktfläche in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper mit obenstehender Gleichung berechnet.

Prüf- körper	Kontakt- fläche in %	Steigerung des QVW in % in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper		Prüf- körper	Kontakt- fläche in %	Steigerung des QVW in % in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper
UB	0,00%	-1,15%			23,00%	34,81%
	1,00%	0,64%			24,00%	36,13%
	2,00%	2,41%			25,00%	37,42%
	3,00%	4,16%			26,00%	38,69%
M02	4,00%	5,89%			27,00%	39,95%
	5,00%	7,60%			28,00%	41,18%
	6,00%	9,29%		SLB 1507	29,00%	42,39%
	7,00%	10,96%			30,00%	43,58%
	8,00%	12,60%			31,00%	44,75%
	9,00%	14,23%			32,00%	45,89%
	10,00%	15,84%			33,00%	47,02%
	11,00%	17,42%			34,00%	48,13%
	12,00%	18,98%			35,00%	49,22%
	13,00%	20,53%		nicht herstellbar	40,00%	54,33%
	14,00%	22,05%			45,00%	58,93%
	15,00%	23,55%			50,00%	63,02%
	16,00%	25,03%			55,00%	66,58%
	17,00%	26,49%			60,00%	69,62%
	18,00%	27,93%			65,00%	72,14%
SLB 3007	19,00%	29,35%			70,00%	74,15%
	20,00%	30,74%			75,00 %	75,64%
	21,00%	32,12%			80,00%	76,60%
	22,00%	33,48%			90,00%	76,98%

Tabelle 10: Steigerung des QVW in % in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper

Die Berechnungen beziehen sich auf die im Labor gemessenen Ergebnisse. Die Labormessungen stimmen zum Teil nicht mit denen am realen Streckengleis überein. In diversen Literaturen wird eine Kontaktfläche für unbesohlte Betonschwellen von 5 – 10% angegeben. Die in im Labor ermittelte Kontaktfläche beim unbesohlenen Betonblock beträgt <1 %, dies ist eventuell auf die geringe Konsolidierungszeit zurückzuführen. Im Vergleich zu den Besohlungen, welche bereits nach einer geringen Belastung eine nahezu vollständige Konsolidierung aufweisen, benötigen unbesohlte Betonschwellen dementsprechend länger. Die Kontaktfläche ist umso größer, je weiter die Schotterzerstörung fortschreitet.

Um die Ergebnisse aus den Laborversuchen plausibilisieren zu können ist ein Vergleich mit in Situ Messungen notwendig.

7 Vergleich Labor zu in Situ

Im Gegensatz zu den Labormessungen, welche uneingeschottet an Betonprüfkörper (30 x 30 cm) durchgeführt wurden, fanden die Messungen am Streckengleis an Ganzschwellen statt. Alle in Situ Messungen, welche in diese Arbeit einfließen, wurden von der Universität Innsbruck im Auftrag der ÖBB Infrastruktur AG durchgeführt.

7.1 Versuchsaufbau der Messungen im Gleis

Das Prinzip der QVW Messungen im Gleis weicht nicht wesentlich von den Messungen im Labor ab. Zur Datenerfassung wurde der Verschiebeweg der Schwellen mit Hilfe eines Wegaufnehmers und der hierfür notwendige Druck mittels Kraftmessdose aufgezeichnet. Der Zylinderdruck für die notwendige Verschiebung wurde mit einer Handpumpe bzw. mit einem elektrischen Kompressor erzeugt, wobei die Belastungsgeschwindigkeit möglichst konstant gehalten wurde.

Zur Ermittlung des QVW wurden die Schwellen von der Bogeninnenseite nach außen gedrückt. Um den Einfluss der auf den Schwellen gelagerten Schienen zu reduzieren, wurden die Schienenbefestigung sowie die vorhandenen Zwischenlagen entfernt. Somit konnte eine Entkopplung zwischen Schienen und Schwellen sichergestellt werden. Als Vorbereitung für die Krafteinleitung wurden die standardisierten Winkelführungsplatten durch eine Stahlwinkelsonderkonstruktion ersetzt. Der Hydraulikzylinder, über welchen die Kraft aufgebracht wird, wurde zwischen der Schiene und dem Stahlwinkel platziert, wobei die Schiene als Widerlager dient.

Nach der Versuchsdurchführung wurden die Schwellen wieder in ihre Ausgangsposition verschoben.⁸¹

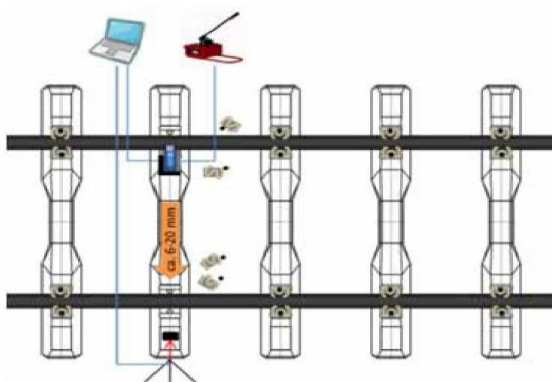


Abbildung 36: Versuchsaufbau Betonschwelle^{82 83}

⁸¹ Vgl. Pospischil, F., Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 45.

⁸² Vgl. Pospischil, F., Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015, S. 47.

⁸³ Vgl. Steiner, E./Prager, G., Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017.

7.2 QVW Messungen am Streckengleis

Als maßgebender QVW im Streckengleis fungiert jener Wert, welcher bei einem Verschiebeweg von 2 mm bezogen auf 1 mm Gleislänge erreicht wird. Da die Schwellen eingeschottert gelagert sind, setzt sich der QVW bei den in Situ Messungen aus dem Sohl-, Flanken und Vorkopfwiderstand zusammen. Bei vorangegangenen Studien wurde eine Zusammensetzung der Anteile wie folgt festgestellt:⁸⁴

- Sohlreibung 45 – 50%
- Vorkopfwiderstand 35 – 40%
- Flankenwiderstand 10 – 15%

Die Sohlreibung ist somit maßgebend für den Querverschiebewiderstand. Messungen haben jedoch gezeigt, dass in Schwellenmitte keine bzw. nur eine geringe Lastübertragung auf den Schotter erfolgt.

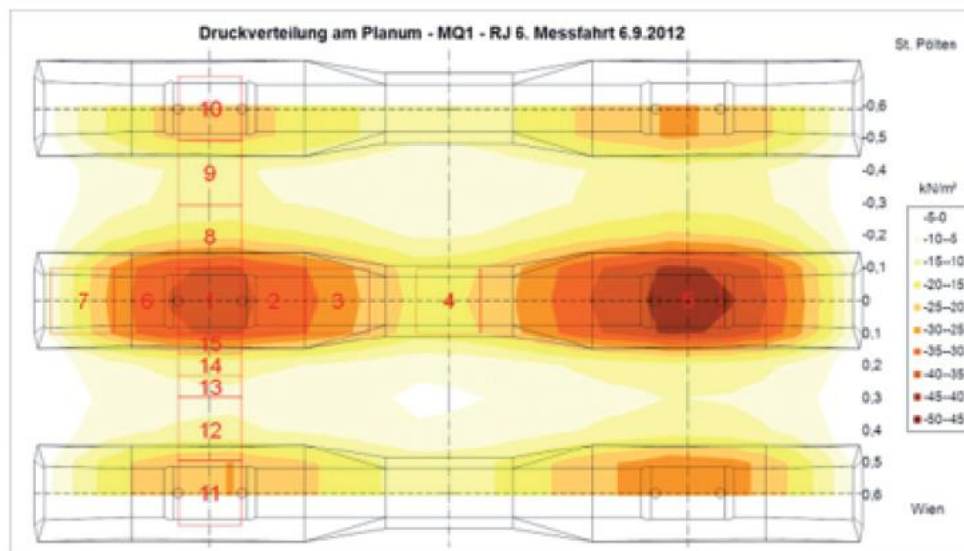


Abbildung 37: Druckverteilung am Planum⁸⁵

Auf der Neubaustrecke zwischen Wien und St. Pölten wurde die Druckverteilung am Planum gemessen, daraus ist ersichtlich, dass im Bereich des Schienenaufagers die größte Lastübertragung erfolgt. Diese Abbildung lässt somit auch auf die Wirksamkeit der Sohlreibung schließen, welche mit zunehmendem Abstand vom Schienenauflager schwindet.

Bei der Gegenüberstellung des QVW zwischen Labor- und Feldversuche wurde angenommen, dass die Schwelle gleichmäßig über die gesamte Fläche aufliegt.

Mit heutigem Wissensstand ist nur die Druckverteilung am Planum bekannt. Zur Bestimmung der Druckverteilung und des Einflusses auf die Sohlreibung direkt unter der Schwelle besteht noch Forschungsbedarf.

⁸⁴ Vgl. *Lichtberger, B.*, Der Querverschiebewiderstand der Gleise, 2007, S. 61–76.

⁸⁵ *Steiner, E./Kuttelwascher, C./Prager, G.*, Lastabtragung im Schotterbett.

7.2.1 QVW Messungen an L6 Schwellen

An der Strecke von Pöchlarn nach Scheibbs wurde bei Erlauf ein Versuchsabschnitt mit L6 Betonschwellen ausgestattet. Dieser Schwellentyp ist eine Neuentwicklung und stellt eine Alternative zu den Holzschwellen dar. Holzschwellen werden zum Schutz gegen Witterung und Schädlingsbefall mit Holzschutzmittel druckimprägniert. Diese Stoffe sind krankheitserregend und gefährden die Umwelt. Durch die Einschränkung von diversen Imprägniermitteln, kann die gewünschte Lebensdauer dieser Schwellen nicht mehr erreicht werden.

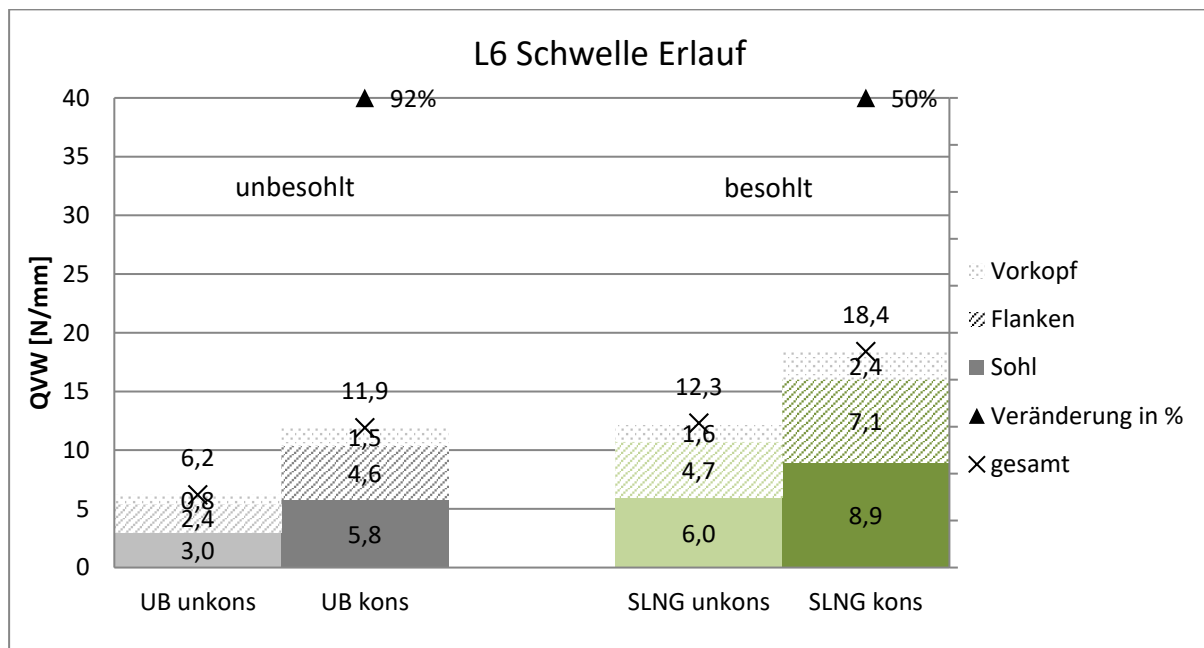
Die Betonschwelle L6 besitzt denselben Querschnitt einer Holzschwelle und wird für die gleichen Anwendungsbereiche verwendet. Mit einer Gesamtlänge von 240 cm ist diese für Neben- und Anschlussstrecken geeignet. Die umweltfreundliche Holzersatzschwelle bietet durch ihr größeres Eigengewicht von ca. 300 kg eine hohe Gleislagequalität.

Eine Holzschwelle verfügt über eine geringere Steifigkeit als eine Betonschwelle, dies führt zu einer unterschiedlichen Übertragung der Last in das Schotterbett. Die Unterseite der Betonschwellen bietet nur sehr wenige Kontaktpunkte zur Lastableitung an, während bei einer Holzschwelle, durch das Eindringen der Schottersteine eine regelrechte Verzahnung entsteht. Die Kontaktfläche bei Holzschwellen ist um einen Faktor 3 größer als bei Betonschwellen. Um diesen Nachteil auszugleichen, können Betonschwellen mit einer Schwellenbesohlung ausgestattet werden.⁸⁶

7.2.2 L6 Schwelle: Ergebnisse und Vergleich zu den Labormessungen

Die QVW Messungen in Erlauf wurden von der Universität Innsbruck an besohlenen und an unbesohlenen Betonschwellen L6 im konsolidierten als auch im unkonsolidierten Zustand durchgeführt. Der Gleisabstand beträgt 60 cm und die verwendete Besohlung ist der Typ SL NG. Die Ergebnisse stellen den gesamten QVW mit den Anteilen Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstand, bezogen auf ein mm Gleislänge dar. Aus den 10 Messungen wurde ein Mittelwert gebildet und in folgendem Diagramm dargestellt.

⁸⁶ Vgl. Auer, F., Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010, S. 33.

Diagramm 10: in Situ Messreihen L6 Schwelle Erlauf ⁸⁷

Beim Betracht der Messergebnisse ist bei den unbesohnten L6 Schwellen durch den Konsolidierungsvorgang nahezu eine Verdoppelung des QVW festzustellen. Diese Tendenz wurde ebenso bei den Laborversuchen erkannt, wobei unter Laborbedingungen noch größere Steigerungen erzielt wurden.

Die besohlte L6 Schwellen übertraf im unkonsolidierten Zustand bereits die Maximalwerte der unbesohnten Schwelle. Durch die Betriebsbelastung konnte dieser Wert nochmals um 50 % gesteigert werden. Dass Besohlungen deutlich höhere QVW-Werte erzeugen ist bekannt, dies wurde ebenso an Betonprüfkörper nachgewiesen. Hierbei konnte jedoch keine Besohlung im unkonsolidierten Zustand die Höchstwerte des unbesohnten Prüfkörpers überschreiten.

Mit Hilfe dieses Diagramms konnte ein Vergleich zwischen besohnten und unbesohnten L6 Schwellen hergestellt werden, zudem ist eine Tendenzen zu den Laborergebnissen ableitbar. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu den Laborergebnissen herzustellen, wird nur der Anteil des Sohlwiderstandes betrachtet, dieser liegt zwischen 45 und 50%.

Die Anteile von Sohl- Flanken- und Vorkopfwiderstand wurde wie folgt angenommen:

- Sohlwiderstand: 48,5%
- Flankenwiderstand: 38,5%
- Vorkopfwiderstand: 13 %

Neben der Verteilung der Widerstände spielt die Sohlfläche und der Schwellenabstand eine entscheidende Rolle. Die Länge der L6 Schwelle beträgt 240 cm, damit ist die Kontaktfläche dieser Schwelle um den Faktor 8 größer als jener der Laborprüfkörper, unter der Annahme, dass die Schwelle gleichmäßig über die gesamte Länge aufliegt. Das Gewicht von 300 kg je

⁸⁷ Vgl. Steiner, E./Prager, G., Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017.

Schwelle umgerechnet auf die Größe des Prüfkörpers ergibt 37,5 kg, damit liegen ähnliche Gewichtsbedingungen vor. Unter Berücksichtigung des Gleisabstandes ergeben sich für die Messungen an der L6 Betonschwelle folgende mit den Laborprüfkörpern vergleichbare Werte.

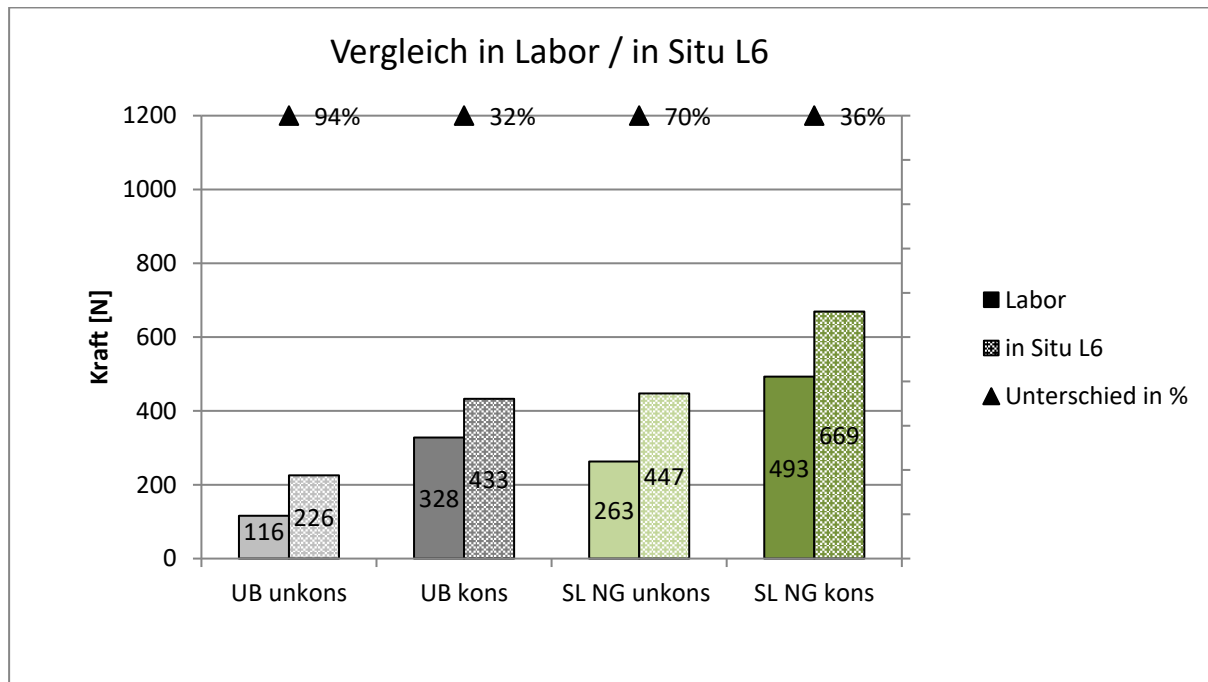


Diagramm 11: Vergleich in Labor / in Situ L6 Schwelle (eigene Abbildung)

In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass durch die gewählten Annahmen bei den in Situ Messungen größere Ergebnisse als bei den Laborversuchen erzielt wurden. Dabei wurden bei den unkonsolidierten Versuchsreihen nahezu die doppelten Werte erreicht. Das ist damit zu begründen, dass das Streckengleis vor der Versuchsdurchführung mit einem maschinellen Durcharbeitungszug (MDZ) in Kombination mit einem dynamischen Gleis Stabilisator (DGS) bearbeitet wurde. Durch die Verwendung eines DGS wird eine Schwingbelastung im Gleis erzeugt, welche Zugüberfahrten simuliert. Hierbei ist das Gleis noch als unkonsolidiert zu betrachten, da diese Tätigkeiten im Zuge einer Gleisneulage durchgeführt wurden. Durch die Verwendung eines DGS wurde im Streckengleis eine geringere Steigerung der Ergebnisse zwischen unkonsolidierten und konsolidierten Zustand in Relation zu den Laborversuchen festgestellt.

Die Messungen im konsolidierten Zustand erfolgten nach einer Regelbelastung von vier Monaten. Im Vergleich zu den Laborversuchen wurden bei den in Situ Messungen im konsolidierten Zustand „nur“ noch Steigerungen bis zu 36% festgestellt.

Um Vergleichswerte zu erhalten, sind weitere QVW Messungen an unterschiedlichen Beschlungstypen im Streckengleis zu analysieren. Die meistverbreitete Schwellenbeschlung im Netz der ÖBB ist der Typ SLB3007, daher liegen nur Messreihen dieses Typs vor.

Beschlungen werden jedoch hauptsächlich im hochrangigen Streckennetz verwendet, welches in der Regel mit K1 oder L2 Schwellen ausgestattet ist.

7.2.3 QVW Messungen an der K1 Schwelle

An der Arlbergstrecke wurden bei Ötztal und Flauring QVW Messungen an besohnten K1 Schwellen im vollständig konsolidierten Zustand durchgeführt. Als Referenzwert dienen die Messungen bei Tisis, welche im Zuge einer Gleisneulage an besohnten K1 Schwellen abgehalten wurden. Der Beschlungstyp ist bei beiden Messreihen nicht definiert, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Typ SLB 3007 verwendet wurde, da dieser bei den ÖBB vielfach eingesetzt wird.

Zusätzlich liegen noch Messergebnisse an unbesohnten K1 Schwellen bei Hallstatt vor, diese wurden unmittelbar vor und nach Instandhaltungsstopfarbeiten durchgeführt. Durch eine Instandhaltungsstopfung wird der Verbund zwischen Schotter und Schwelle gelockert, Folge dessen sinkt der QVW. Um diese Messwerte zu plausibilisieren wurde noch die Messreihen von Twimberg betrachtet, welche im Zuge einer Gleisneulage ermittelt wurden.

Im folgenden Diagramm wurden die Mittelwerte der einzelnen Messreihen zusammengestellt. Da bekanntlich der größte Teil des QVW über die Sohlreibung erzeugt wird, wurden die selben Reibungsverhältnisse wie bei der L6 Schwelle angenommen.

7.2.4 K1 Schwelle: Ergebnisse und Vergleich zu den Labormessungen

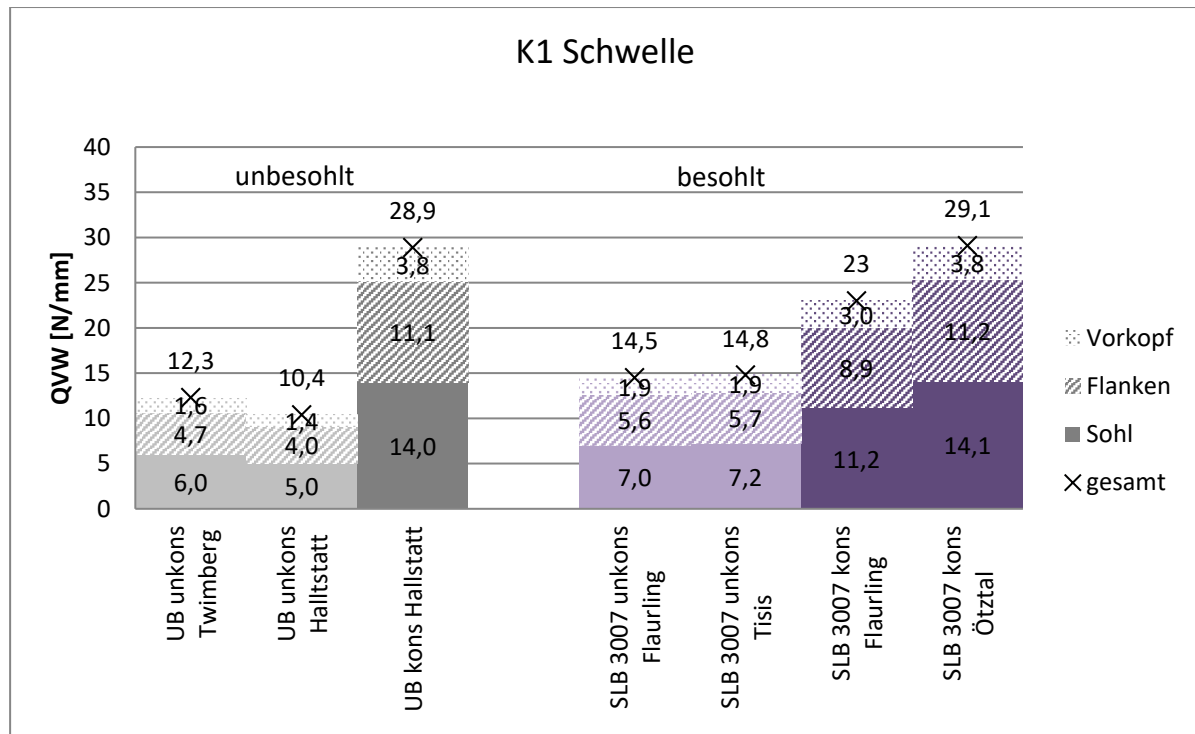


Diagramm 12: in Situ Messreihen K1 Schwellen ^{88 89}

⁸⁸ Vgl. Steiner, E./Prager, G., Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017.

⁸⁹ Vgl. Pospischil, F., Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015.

Beim Betracht dieses Diagramms sind die sehr hohen QVW-Werte der unbesohnten Messreihen von Hallstatt im vollständig konsolidierten Zustand auffällig. Diese Werte sind ident mit den Ergebnissen der besohnten Versuchsreihe von Ötztal. Dass besohlte und unbesohlte Schwellen einen ähnlichen QVW erzielen, stimmt mit keiner Aussage der vorherigen Untersuchungen überein. Die Begründung hierfür sind die unterschiedlichen Rahmenbedingungen des Schotteroberbaus.



Abb. 38: K1 besohlt bei Ötztal in km 47,168⁹⁰



Abb. 39: K1 Schwelle unbesohlt bei Hallstatt in km 44,330⁹¹

Der Oberbau bei Ötztal wurde in diesem Bereich im Jahr 2011 im Zuge einer Gleisneulage errichtet. Zum Zeitpunkt der Messungen betrug das Oberbualter ca. 3 Jahre. Der Oberbau bei Hallstatt stammt aus dem Jahr 1997, bis zum Zeitpunkt der Messung wurde ein Alter von 20 Jahren erreicht. Durch die Betriebsbelastung ist in beiden Fällen von einer vollständigen Konsolidierung auszugehen. Die unterschiedlichen Messergebnisse sind damit nicht auf das Oberbualter, sondern viel mehr auf den Zustand während der Versuchsdurchführung zurückzuführen. Beim Vergleich dieser beiden Streckenbilder sind zwei Punkte auffallend. Zum einen liegt das Gleis in Ötztal auf einer Dammlage und jenes bei Hallstatt in einem Einschnitt. Zweitens wurden bei Hallstatt die Messungen unmittelbar vor Stopfarbeiten durchgeführt. Ein Ergänzungsschotter lagert bereits auf den Schwellenköpfen und sorgt für eine zusätzliche Auflast, im Vergleich dazu liegen die Schwellenvorköpfe bei Ötztal frei. Beim Betracht der unbesohnten Versuchsreihen von Hallstatt wurde der QVW durch die Instandhaltungsstopfung um 64 % reduziert. Nach dieser Instandhaltungsmaßnahme sind die Schwellen als unkonsolidiert zu betrachten. Der erzielte Wert ist annähernd ident mit den Messergebnissen von Twimberg, welche im Zuge einer Gleisneulage erzielt wurden. Jedoch lässt die raue Betonschwellenunterseite bei Hallstatt, durch die vorherige Konsolidierung einen höheren QVW vermuten.

⁹⁰ ÖBB Infrastruktur AG Messtechnik, Streckenbild Strecke 5014 Gleis 1, 25.06.2019.

⁹¹ Vgl. Steiner, E./Prager, G., Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017.

Bei den Messungen von Ötztal und Hallstatt wurden im konsolidierten Zustand keine Abweichung zwischen besohnten und unbesohnten Schwellen festgestellt, dass dies eine Ausnahme darstellt belegen die weiteren Messergebnisse. Im unkonsolidierten Zustand konnten die besohnten Versuchsreihen von Flauring und Tisis, im Vergleich zu den unbesohnten Schwellen, einen um ca. 40 % höheren Verschiebewiderstand erreichen. Dieser Unterschied fällt im Vergleich zu den Laborergebnissen, durch die Verwendung eines DGS, jedoch deutlich geringer aus. Durch die Betriebsbelastung konnte der QVW der besohnten Schwellen um 60 % gesteigert werden, dieses Verhältnis entspricht den exakt den Labormessungen.

Mit Hilfe dieses Diagramms konnte ein Vergleich zwischen besohnten und unbesohnten K1 Schwellen hergestellt werden, zudem ist eine Tendenz zu den Laborergebnissen ableitbar. Um einen aussagekräftigen Vergleich zu den Laborergebnissen herzustellen, wird nur der Anteil des Sohlwiderstandes betrachtet. Neben der Verteilung der Widerstände spielt die Sohlfläche und der Schwellenabstand eine entscheidende Rolle. Die Länge der K1 Schwelle beträgt 260 cm, damit ist die Kontaktfläche mit 7320 cm² um den Faktor 8,133 größer als jener des Prüfkörpers. Das Gewicht von 280 kg je Schwelle umgerechnet auf die Größe des Prüfkörpers ergibt 34,44 kg, damit liegen geringere Gewichtsbedingungen vor. Unter Berücksichtigung des Gleisabstandes ergeben sich für die Messungen an der K1 Betonschwelle folgende mit den Laborprüfkörpern vergleichbare Werte. In diesem Diagramm werden die Messreihen aus Hallstatt und Flauring, da diese in Situ Versuche jeweils im konsolidierten und unkonsolidierten Zustand durchgeführt wurden, mit jenen aus dem Labor verglichen.

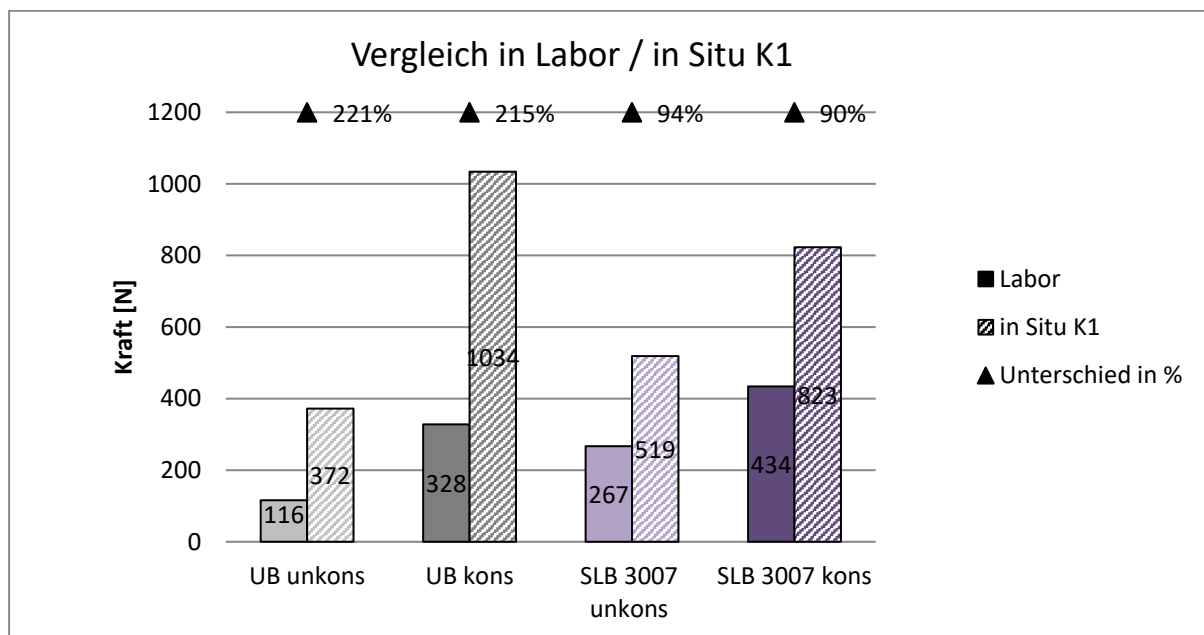


Diagramm 13: Vergleich in Labor / in Situ K1 Schwelle (eigene Abbildung)

In diesem Diagramm ist ersichtlich, dass durch die gewählten Annahmen bei den in Situ Messungen größere Ergebnisse als bei den Laborversuchen erzielt wurden. Deutliche Unterschiede sind bei den unbesohnten Objekten vorhanden, hierbei konnten die in Situ Messungen ungefähr die dreifachen Werte gegenüber den Laborergebnissen erreicht werden. Die unbesohnten Schwellen bei Hallstatt sind vollständig konsolidiert und die QVW-Werte sind weit über dem Durchschnitt. In diesem Bereich wurden unmittelbar nach einer Instandhaltungsstopfung Messungen im unkonsolidierten Zustand durchgeführt. Auf Grund dieser Maßnahme ist ein großer Rückgang ersichtlich, der QVW übertrifft jedoch die Laborergebnisse deutlich.

Die besohnten Messungen von Flauring erreichen gegenüber den Labormessungen ungefähr die doppelten Werte, wobei das Verhältnis zwischen unkonsolidiert und konsolidiert konstant ist.

Im Allgemeinen konnte die K1 Schwelle gegenüber der L6 Schwelle einen höheren QVW erreichen, daher werden die beiden Schwellenformen anschließend gegenüber gestellt.

7.3 Vergleich L6 / K1 Schwellen

Die K1 Schwelle ist einer der Standardbetonschwellen im hochrangigen Netz der ÖBB. Diese weist im Vergleich zu der L6 Schwelle im Mittelbereich eine deutliche Verjüngung des Querschnittes vor, wodurch von einem höheren Anteil des Flankenwiderstandes auszugehen ist. Die Flanken der K1 Schwelle sind im Gegensatz zur L6 Schwelle abgeschrägt, durch diese Beschaffenheit wird die Mantelreibung vergrößert, jedoch nimmt das Gewicht ab.

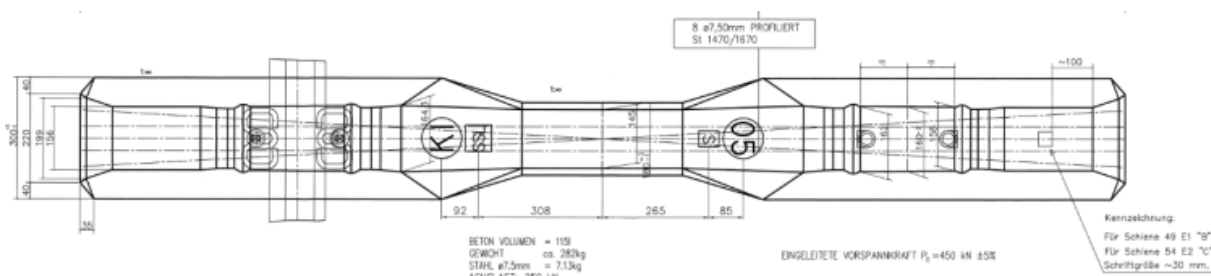


Abbildung 40: Regelzeichnung ÖBB (17207/10) Spannbetonschwelle K1 ab 2005

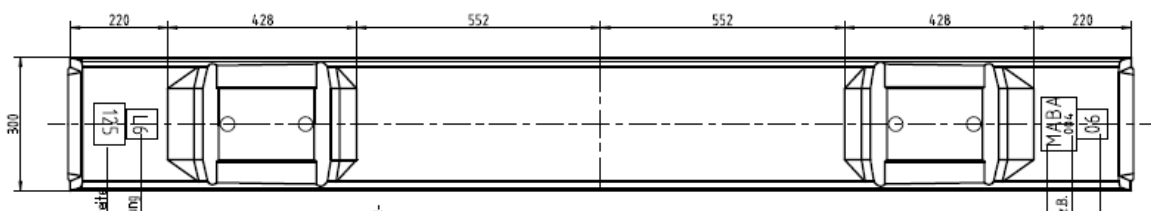


Abbildung 41: Regelzeichnung ÖBB (17209/0) Spannbetonschwelle L6 für Schienenform 54 E2 und 60 E1

Neben den optischen Unterschieden ist festzustellen, dass die K1 Schwelle bei einer größeren Abmessung ein geringeres Gewicht im Vergleich zu der L6 Schwelle aufbringt.

Technische Daten	K1 Schwelle	L6 Schwelle
Schwellenlänge [cm]	260	240
Schwellenbreite [cm]	30	30
Schwellenhöhe [cm]	23,3	17,8
Schwellengewicht [kg]	280	300
Sohlfläche [cm ²]	7320	7200

Tabelle 11: Technische Daten K1 / L6 Schwelle^{92 93}

Im folgenden Diagramm sind die Ergebnisse von L6 und K1 Schwellen dargestellt. Bei den durchgeführten Messungen sind Absolutwerte ohne Berücksichtigung der Anteile des Sohl-, Flanken- und Vorkopfwiderstandes abgebildet.

Bei den besohnten Messreihen ist nur ein Vergleich der Besohlungen SL NG mit SLB 3007 möglich.

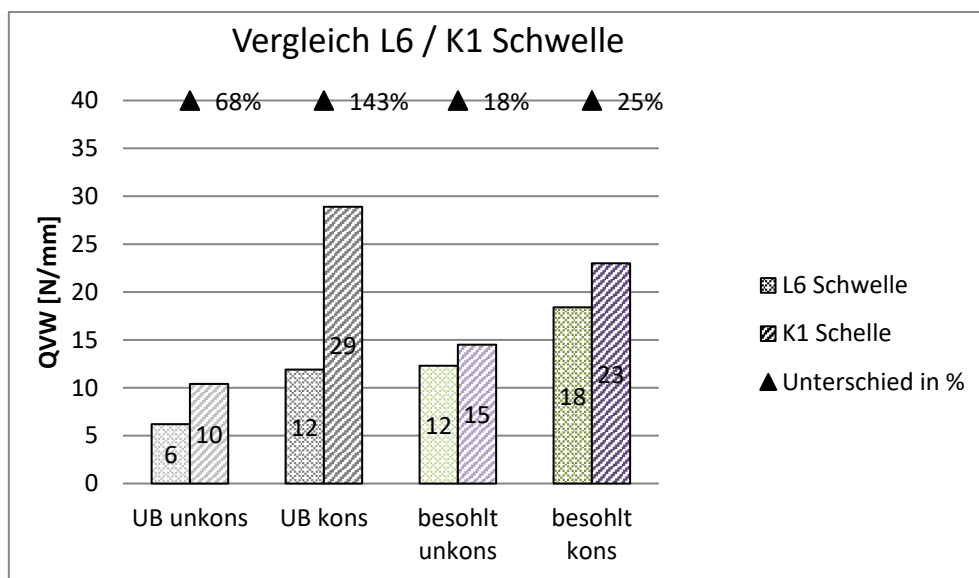


Diagramm 14: Vergleich L6 / K1 Schwelle (eigene Abbildung)

Die K1 Schwelle konnte gegenüber der L6 Schwelle jeweils die größeren QVW Werte erzielen. Dies ist auf Grund der größeren Sohlfläche und der höheren Flankenreibung nachvollziehbar. Bei den unbesohnten, unkonsolidierten Schwellen beträgt der Unterschied 68 %. Der enorme Unterschied von 143 % im konsolidierten Zustand lässt auf eine nicht plausible Messung schließen, welche daher nicht weiter berücksichtigt wird.

Der Abweichungen zwischen den besohnten Schwellen beträgt 25 % im konsolidierten bzw. 18 % im unkonsolidierten Zustand.

Die Sohlfläche der K1 Schwelle ist um 80 cm² größer als jene der L6 Schwelle, dies wurde im vorherigen Diagramm nicht mit einbezogen.

⁹² Vgl. SSL – Schwellenwerk und Steuerungstechnik Linz GmbH, Produktdatenblatt K1 Schwelle.

⁹³ Vgl. MABA - Kirchdorfer Concrete Solutions, Produktdatenblatt Betonschwelle L6, 2017.

Zur Berücksichtigung des Größenunterschiedes wird der Anteil des Sohlwiderstandes durch die Sohlfläche dividiert und mit dem Schwellenabstand multipliziert. Damit ein Vergleich zu den Laborergebnissen besteht wird die Kraft auf die Fläche der Prüfkörper (30 x 30 cm) umgelegt und anschließend in einem Diagramm abgebildet.

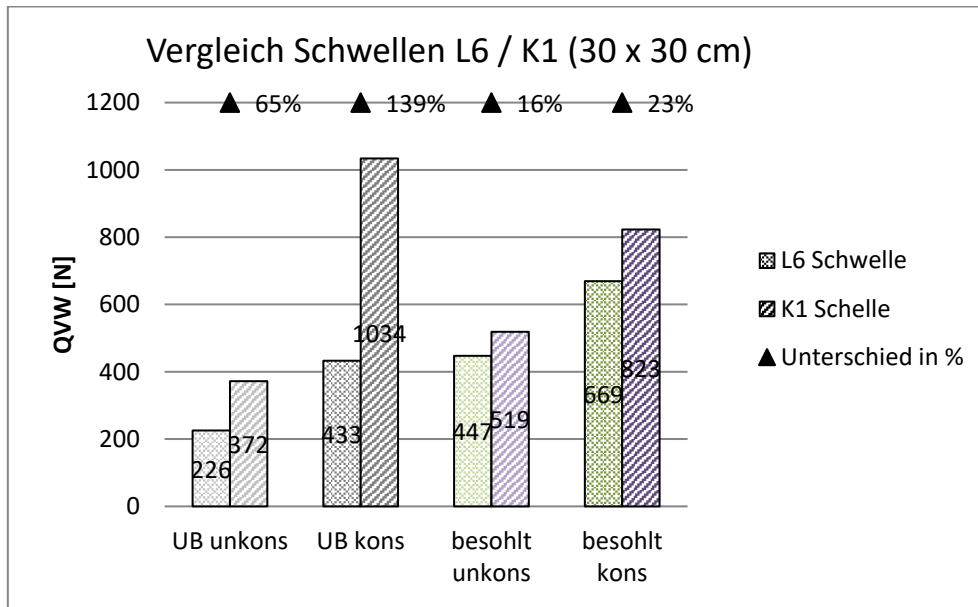


Diagramm 15: Vergleich Schwellen L6/K1 (30 x 30 cm) (eigene Abbildung)

Der Sohlwiderstand der L6 und K1 Schwelle umgelegt auf die Fläche des Laborprüfkörpers ergibt nur geringfügige Auswirkungen. Die erzielten Werte der K1 Schwelle sind sowohl mit als auch ohne Besohlung gegenüber der L6 Schwelle höher. Die Unterschiede zwischen den beiden Schwellenformen konnte durch die Umlegung auf dieselbe Fläche um bis zu 4 % verkürzt werden.

Die L6 und K1 Schwelle sind mit unterschiedlichen Besohlungstypen ausgestattet und weisen im Gegensatz zu den Laborergebnissen unterschiedliche Verhaltensmuster auf. Die Unterschiede zwischen den Besohlungen SL NG und SLB 3007 sind im folgenden Diagramm ersichtlich.

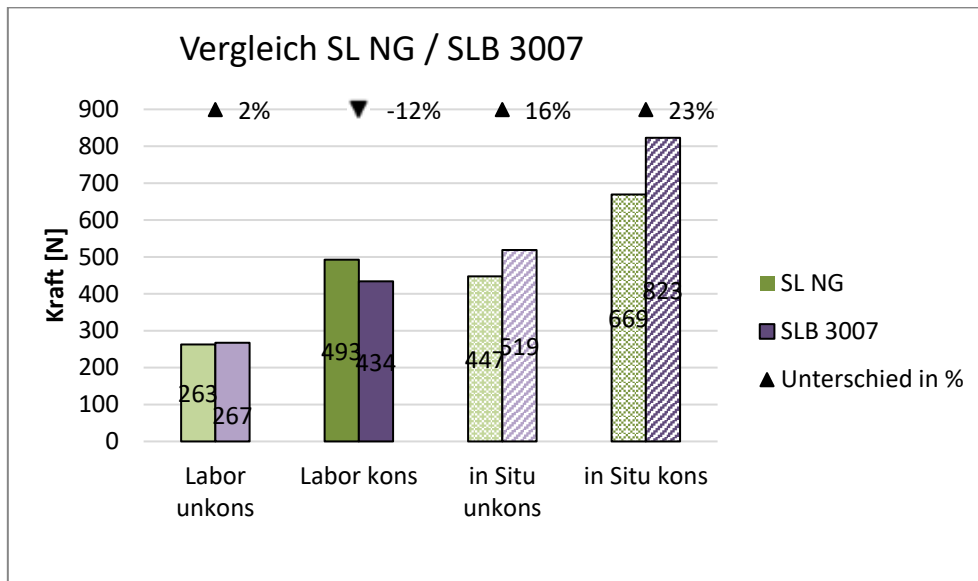


Diagramm 16: Vergleich SL NG / SLB 3007 (eigene Abbildung)

Wie bereits erwähnt konnten die Messungen am Streckengleis, bezogen auf den Sohlwiderstand, gegenüber den Labormessungen die größeren Ergebnisse erreichen.

Beim Vergleich der im Diagramm dargestellten Besohlungen sind unter Laborbedingungen im unkonsolidierten Zustand nur geringe Unterschiede festzustellen. Nach der Konsolidierung ist eine Abweichung von 12 % ersichtlich, wobei die SL NG die höheren Werte erzielt.

Am Streckengleis ist zwischen den beiden Schwellenformen ein Unterschied von 16 % im unkonsolidierten bzw. 23 % im konsolidierten Zustand ersichtlich. Im Gegensatz zu den Laborergebnissen konnte hierbei die K1 Schwelle mit der Besohlung SLB 3007 die Höchstwerte erzielen.

Unter Berücksichtigung, dass die beiden Schwellenformen mit verschiedenen Besohlungstypen ausgestattet sind, kann folgende Aussage getroffen werden.

Der QVW der K1 Schwelle ist im konsolidierten Zustand gegenüber der L6 Schwelle um 23 % größer. Zuzüglich der Differenz von 12 % zwischen der SL NG und der SLB 3007 aus den Laborversuchen kann auf einen Gesamtunterschied der beiden Schwellenformen von 35 % geschlossen werden.

7.4 Unterschiedliche Vergleichsvoraussetzungen

Ein Vergleich zwischen den Laborergebnissen und den in Situ Messungen ist nur bedingt möglich. Die verwendeten Prüfkörper mit den Abmessungen 30 x 30 cm wurden im Gegensatz zu den Schwellen am Streckengleis nicht eingeschottert, was wiederum nur den Anteil der Sohlreibung wiedergibt. Dieser Anteil ist zwar am QVW maßgebend, aber wie vorliegende Studien zeigen, wirkt dieser nur zu 50 % gegen eine seitliche Verschiebung.

Der QVW ist neben der Sohlreibung auch vom Flanken- und Vorkopfwiderstand abhängig, welche wiederum von der Schwellengeometrie beeinflusst werden. Die Messungen am Streckengleis wurden an unterschiedlichen Schwellenarten durchgeführt, da die Besohlung SL NG nur versuchsweise am untergeordneten Streckennetz an L6 Schwellen eingesetzt wurden. Im hochrangigen Streckennetz werden vorwiegend K1 bzw. L2 Schwellen mit der Besohlung SLB 3007 verlegt. Daher ist ein Vergleich von unterschiedlichen Schwellenformen in Bezug auf die Sohlreibung wenig aussagekräftig. Zudem ist der QVW von den örtlichen Gegebenheiten wie der Bettungsstärke, dem Verdichtungsgrad, sowie den Eigenschaften des Schotters abhängig.

Um einen sinnvollen Vergleich zu ermöglichen müssen dieselben Voraussetzungen gegeben sein. Diese liegen momentan nur bei den durgeführten Messungen im Labor vor, welche eine Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Kontaktfläche und dem QVW ermöglicht.

8 Conclusio

In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Besohlungen mit Hilfe von Laborversuchen hinsichtlich des Querverschiebewiderstandes untersucht. Hierbei wurden anstatt von Ganzschwellen Prüfkörper aus Beton mit einer Abmessung von 30 x 30 cm verwendet. Diese wurden in einem mit Schotter gefüllten Stahlrahmen platziert, sodass nur der Sohlreibungsanteil gegen eine seitliche Verschiebung wirkt. Die Widerstände von Vorkopf- und Flankenreibung sind auf Grund der Versuchsanordnung nicht vorhanden.

Der Vereinfachte Aufbau dient zur groben Abschätzung von Besohlungseigenschaften, welche den QVW positiv oder negativ beeinflussen. Hierbei ist zu untersuchen inwiefern der QVW von der Kontaktfläche abhängt.

Bei der Versuchsauswertung konnte festgestellt werden, dass die Kontaktfläche nicht unmittelbar mit dem QVW in Verbindung steht. Der QVW ist vielmehr vom Verformungsverhalten der Besohlung abhängig. Besohlungen mit einem plastischen Verhalten erreichen den größten Wert, wobei dieser mit zunehmender Elastizität abnimmt.

Das Verformungsverhalten ist somit für den QVW maßgebend, jedoch ist auch ein Einfluss der Kontaktfläche zu erkennen. Die höchste Kontaktfläche ist grundsätzlich bei weichen Besohlungen mit einem geringen Bettungsmodul festzustellen, wobei die Oberflächenbeschaffenheit zu berücksichtigen ist. Auf Grund der Dauerfestigkeit sind weiche Besohlungen mit einer Schutz- und Lastverteilungsschicht versehen, welche die Berührungsfläche zwischen Schotter und Besohlung mindert. Demzufolge erreicht eine Besohlung mit einer mittleren Steifigkeit, jedoch ohne Verteilungsschicht, die höhere Kontaktfläche. Die Kontaktfläche von Werkstoffen mit derselben Steifigkeit, ist wiederum vom Verformungsverhalten der Besohlung abhängig, wobei ein elasto-plastisches Verhalten begünstigt ist. In Folge der durchgeführten Untersuchungen ist zu erkennen, dass Besohlungen mit einem plastischen Verformungsverhalten bei einer möglichst geringen Steifigkeit den höchsten Widerstand gegen Querverschiebung erreichen.

Zur Plausibilisierung der Laborversuche wurden Messungen am Streckengleis von der Universität Innsbruck herangezogen. Hierbei sind die Schwellen vollkommen in das Schotterbett eingebunden, womit die Anteile des Sohl- Flanken- und Vorkopfwiderstandes eine seitliche Verschiebung behindern. In vorangegangenen Studien wurde die Verteilung des QVW auf die einzelnen Anteile untersucht. Mit diesen Ergebnissen konnte eine Umlegung der Widerstände aus den Laborversuchen auf die Messungen am Streckengleis erfolgen. Ein aussagekräftiger Vergleich zwischen Labor und in Situ Messungen ist auf Grund von verschiedenen Parametern, wie Schwellengeometrie und Bettungsverhältnissen nicht möglich. Jedoch ist zu erkennen, dass die Ergebnisse aus dem Streckengleis deutlich über den Labormessungen angesiedelt sind. Eine Gegenüberstellung von Messergebnissen ist nur sinnvoll, wenn dieselben Bedingungen vorliegen. Dies ist momentan nur bei den Laborversuchen der Fall.

8.1 Ausblick

Um in Zukunft ein Vergleich von unterschiedlichen Besohlungen hinsichtlich des Querverschiebewiderstandes durchführen zu können, sind Messungen am Streckengleis mit denselben Eingangsparametern erforderlich. Hierfür sollte ein Gleisabschnitt versuchsweise mit denen am Markt, für den jeweiligen Verwendungsbereich, verfügbaren Besohlungen ausgestattet werde.

In der Praxis wird heutzutage nicht zwischen den einzelnen Besohlungstypen unterschieden, sondern nur zwischen einem besohlenen oder einem unbesohlenen Gleis.

In Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden Abweichungen des Querverschiebewiderstandes von bis zu 50 % zwischen den einzelnen Besohlungen festgestellt. Diese Unterschiede können bei der Herstellung eines lückenlosen Abschnittes, speziell bei engen Bögen über die Lagesicherheit des Gleises entscheiden. Daher sollten die technischen Spezifikationen einer Besohlung für einen bestimmten Anwendungsbereich genau definiert werden, damit die Bahn in Zukunft noch sicherer und wirtschaftlicher verkehren kann.

9 Verzeichnisse

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auf Steinblöcken gelagerte Schienen	1
Abbildung 2: Querschnitt einer besohnten Schwelle und möglicher Aufbau einer Schwellenbesohlung	4
Abbildung 3: Einsenkung unter Betriebslast mit und ohne Besohlung	5
Abbildung 4: Digitale Kontaktflächenanalyse bei besohnten Betonschwellen nach dem Ausbau	6
Abbildung 5: Schwellenverformung mit und ohne Besohlung	7
Abbildung 6: Ausbreitung von Vibrationen im Bereich der Eisenbahn	7
Abbildung 7: Schonung des Schotterbettes durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen...	8
Abbildung 8: Schienenstöße sind Unstetigkeitsstellen	11
Abbildung 9: Spritzstelle unter einem Stoß (Foto Veit)	11
Abbildung 10: Einwirkungen auf das Gleis	14
Abbildung 11: seitliche Verschiebung eines Lv-Betonschwellengleises bei Änderung der Temperatur über Neutraltemperatur	17
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Schienentemperatur und Lufttemperatur	18
Abbildung 13: Darstellung der einzelnen Anteile des QVW	20
Abbildung 14: Querschwellengleis mit Längsunterstützung	21
Abbildung 15: Ohrenschwelle	21
Abbildung 16: "Eder-Schwelle" mit profilierten Seitenflächen	21
Abbildung 17: Schematische Darstellung zur Errechnung der optimalen Schotterbettstärke	22
Abbildung 18: Übergangsbereich Betonschwellen mit und ohne Besohlung	32
Abbildung 19: Anordnung der Prüfkörper	36
Abbildung 20: Versuchsaufbau Labor (eig. Abb.)	37
Abbildung 21: Konsolidierungsvorgang im Labor (eig. Abb.)	39
Abbildung 22: Belastung der Prüfkörper zur Herstellung eines konsolidierten Zustandes (eig. Abb.)	39
Abbildung 23: Setzungskurve aus Laborversuchen mit der Besohlung SLB 3007 (Getzner Werkstoffe GmbH)	40
Abbildung 24: Einschwingphase	40
Abbildung 25: Vollastphase	40
Abbildung 26 - 29: Kontaktfläche der unkonsolidierten Prüfkörper	45
Abbildung 30 – 34: Kontaktfläche der konsolidierten Prüfkörper	49
Abbildung 35: Kontaktfläche in Abhängigkeit des Bettungsmodul	51
Abbildung 36: Versuchsaufbau Betonschwelle	56
Abbildung 37: Druckverteilung am Planum	57
Abbildung. 38: K1 besohlt bei Ötztal in km 47,168.....	62

Abbildung. 39: K1 Schwelle unbesohlt bei Hallstatt in km 44,330.....	62
Abbildung 40: Regelzeichnung ÖBB (17207/10) Spannbetonschwelle K1 ab 2005	64
Abbildung 41: Regelzeichnung ÖBB (17209/0) Spannbetonschwelle L6 für Schienenform 54 E2 und 60 E1	64

9.2 Diagrammverzeichnis

Diagramm 1: Zusammenstellung der Versuchsreihen SLB 3007 konsolidiert (eigene Abbildung)	43
Diagramm 2: Laborauswertung unkonsolidierte Prüfkörper (eigene Darstellung)	44
Diagramm 3: Laborauswertung konsolidierte Prüfkörper (eigene Darstellung)	46
Diagramm 4: Gegenüberstellung unkonsolidiert / konsolidiert Labor (eigene Darstellung)....	47
Diagramm 5: Vergleich unterschiedlicher Prüfkörpergrößen (eigene Darstellung)	48
Diagramm 6: effektive Kontaktfläche der einzelnen Prüfkörper (eigene Darstellung)	50
Diagramm 7: Kontaktfläche in Abhängigkeit des Bettungsmodul (eigene Abbildung)	51
Diagramm 8: QVW mit dazugehöriger Kontaktfläche Labor (eigene Darstellung)	53
Diagramm 9: QVW mit dazugehöriger Kontaktfläche bei ähnlicher Tendenz (eigene Darstellung)	54
Diagramm 10: in Situ Messreihen L6 Schwelle Erlauf	59
Diagramm 11: Vergleich in Labor / in Situ L6 Schwelle (eigene Abbildung)	60
Diagramm 12: in Situ Messreihen K1 Schwellen	61
Diagramm 13: Vergleich in Labor / in Situ K1 Schwelle (eigene Abbildung)	63
Diagramm 14: Vergleich L6 / K1 Schwelle (eigene Abbildung)	65
Diagramm 15: Vergleich Schwellen L6/K1 (30 x 30 cm) (eigene Abbildung)	66
Diagramm 16: Vergleich SL NG / SLB 3007 (eigene Abbildung)	67

9.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Neutraltemperatur der Schiene im Freiland.....	10
Tabelle 2: Mindestradien für Lv-Holzschwellengleise mit Rp-Befestigung im Gleisrang a	12
Tabelle 3: Mindestradien für Lv-Betonschwellengleise im Gleisrang	13
Tabelle 4: Radsatzlast in Abhängigkeit von der Verkehrsart.....	15
Tabelle 5: optimale Schotterbetthöhen.....	23
Tabelle 6: Steifigkeit in Abhängigkeit vom Bettungsmodul.....	32
Tabelle 7: Einsatzbereiche Schwellenbesohlung	32
Tabelle 8: Belastung in Normalenrichtung beim Dauerschwellversuch	38
Tabelle 9: Standardabweichung QVW Messungen Labor (eigene Abbildung)	42
Tabelle 10: Steigerung des QVW in % in Relation zum unbesohlenen Prüfkörper.....	55
Tabelle 11: Technische Daten K1 / L6 Schwelle	65

9.4 Literaturverzeichnis

- “Under Sleeper Pads (USP) Recommendations for Use” General Part (“Under Sleeper Pads (USP) Recommendations for Use” General Part), in: International Railway Solution Nr. IRS 67131
- Auer, Florian* (Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, 2010): Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen, Dissertation, Technische Universität Graz, 2010
- Bosch R.v.d.* (Querverschiebewiderstandsmessungen mit dem dynamischen Gleisstabilisator): Querverschiebewiderstandsmessungen mit dem dynamischen Gleisstabilisator, in: EI - Eisenbahningenieur Heft 6 Nr. Heft 6, S. 15–19
- Deutsches Institut für Normung e.V. 45673-6: Mechanische Schwingungen - Elastische Elemente des Oberbaus von Schienenfahrwegen
- Fendrich, Lothar* (Handbuch Eisenbahninfrastruktur, 2007): Handbuch Eisenbahninfrastruktur, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007
- Fengler W./Gerber U.* (Setzungsverhalten des Schotters): Setzungsverhalten des Schotters, in: ETR Heft 4/2010,, S. 170–175
- Frage D161 Dynamische Erscheinung der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung (Frage D161 Dynamische Erscheinung der Wechselwirkung Fahrzeug/Gleis aus der Sicht der Gleisunterhaltung), in: ORE Nr. Bericht Nr. 1
- Getzner Werkstoffe GmbH* (Produktdatenblatt Sylodyn Schwellenbesohlung SLN 1010G): Produktdatenblatt Sylodyn Schwellenbesohlung SLN 1010G
- (Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 1510G): Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 1510G
- (Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 3007G): Produktdatenblatt Sylomer Schwellenbesohlung SLB 3007G
- Gräbe, P.J./Maree, J.S.* (Use of a Dynamic Track Stabilisator to Improve Track Maintenance and Optimisation of Track Pumping): Use of a Dynamic Track Stabilisator to Improve Track Maintenance and Optimisation of Track Pumping, in: RTR Railway Technical Review Nr. 4/1997
- Iliev Dimitre L.* (Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen, 2011): Die horizontale Gleislagestabilität des Schotteroberbaus mit konventionellen und elastisch besohlenen Schwellen, Dissertation, München, Technische Universität, 2011
- Klugar K.* (Einfluss der mechanischen Nachverdichtungsverfahren auf den Querverschiebewiderstand des Gleises): Einfluss der mechanischen Nachverdichtungsverfahren auf den Querverschiebewiderstand des Gleises, in: Eisenbahntechnische Rundschau Nr. ETR Heft 11/1972, S. 446–449
- Knoll Bernhard* (Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen, 1998): Die Möglichkeit einer Gleisverwerfung bei Schmalspurbahnen in engen Bögen, Technischen Universität Wien, 1998

- (Kräfte und Lastabtragung, WS 2015): Kräfte und Lastabtragung, Skriptum, St. Pölten, Fachhochschule, WS 2015
- (Oberbau auf Hochleistungsstrecken, 2019): Oberbau auf Hochleistungsstrecken, Skriptum, St. Pölten, Fachhochschule, 2019
- Lachmayer, H.* ("Über die Schwelle"): "Über die Schwelle": Böhlau Verlag Wien
- Leykauf G.* (Forschungsbericht Nr. 1983, 2003): Forschungsbericht Nr. 1983, München, Technische Universität, 2003
- Lichtberger, Bernhard* (Hrsg.) (Handbuch Gleis, 2003): Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit, Hamburg: Tetzlaff, 2003
- (Der Querverschiebewiderstand der Gleise, 2007): Der Querverschiebewiderstand der Gleise, in: Eisenbahn Ingenieur Kalender Nr. 11/2007 v. 2007
- Loy, Harald* (Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs, 2008): Under Sleeper Pads: improving track quality while reducing operational costs, in: Global Railway Review v. 2008
- (Minderung von Erschütterungsemissionen und sekundärem Luftschall durch Schwellenbesohlungen - Wirkungsweise und Erfahrungen, 2015): Minderung von Erschütterungsemissionen und sekundärem Luftschall durch Schwellenbesohlungen - Wirkungsweise und Erfahrungen, in: ZEVrail Nr. Sonderheft Juni v. 2015
- Produktdatenblatt Betonschwelle L6 (Produktdatenblatt Betonschwelle L6, 2017) (2017)
- Monaco V* (Untersuchungen zu Schwellenbesohlungen im Oberbau, 2004): Untersuchungen zu Schwellenbesohlungen im Oberbau, Dissertation, Technische Universität Graz, 2004
- ÖBB Infrastruktur AG: RW 07.06.05 [Zugriff: 2017-06-21]
- ÖBB Infrastruktur AG *Messtechnik* (Streckenbild Strecke 5014 Gleis 1, 25.06.2019): Streckenbild Strecke 5014 Gleis 1, 25.06.2019
- Paul Müller Technische Produkte GmbH* (Produktdatenblatt Schwellensohle M 02): Produktdatenblatt Schwellensohle M 02
- Pospischil, Ferdinand* (Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, 2015): Längsverschweißtes Gleis im engen Bogen, Dissertation, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2015
- (Interview Schwellenbesohlung SL NG, 2019): Interview Schwellenbesohlung SL NG, Interview vom 31. Januar 2019 in München
- Prager, Günter* (Messungen am Eisenbahnoberbau, Heft 12, 2007): Messungen am Eisenbahnoberbau, Habilitationsschrift, Universität Innsbruck, Heft 12, 2007
- Robert Kupfer* (Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes, 2004): Auswirkungen von Beschleunigungs- und Bremskräften auf die Längsbewegungen des Gleisrostes, Dissertation, München, Technische Universität, 2004
- Produktdatenblatt K1 Schwelle (Produktdatenblatt K1 Schwelle)
- Steiner, Ekkehard/Kuttelwascher, Christoph/Prager, Günter* (Lastabtragung im Schotterbett): Lastabtragung im Schotterbett: Änderungseffekte durch Konsolidierung und Bahnbetrieb, in: Eisenbahntechnische Rundschau Nr. Dezember Nr. 12

- Steiner, Ekkehard/Prager, Günter* (Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017):
Messung des Querverschiebewiderstandes: Erhaltungsstopfung Hallstatt, Messbericht,
Universität Innsbruck, September 2017
- (Messung des Querverschiebewiderstandes, 2017): Messung des
Querverschiebewiderstandes: L6 Betonschwellen Neulage, Messbericht, September 2017