

Gebrauchstauglichkeit besohlter Betonschwellen Meterspur

4 Fahrbahnsteifigkeit

Abschlussbericht



Datum: 04.04.2024

Version: 1.0

Verfasser: Stefan Werner
Philippe Schneider

KPZ Fahrbahn AG
KPZ Fahrbahn AG

Impressum

Geldgeber: Bundesamt für Verkehr (BAV)
Forschungsausschuss BIF
CH-3003 Bern

Verband öffentlicher Verkehr (VöV)
Forschungs- und Entwicklungsfonds (FEF)
Dählhölzliweg 12
CH-3005 Bern

Auftraggeber: Matterhorn Gotthard Bahn (MGB)
Bahnhofplatz 7
CH-3900 Brig

Auftragnehmer: KPZ Fahrbahn AG
Schützengasse 3
CH-8001 Zürich

Management Summary

Steife Schwellenbesohlungen (USP = Under Sleeper Pads) mit einem statischen Bettungsmodul von $C_{\text{stat}} \geq 0.25 \text{ N/mm}^3$ wurden bereits ausführlich bei Normalspurbahnen getestet und sind heute in der Schweiz zugelassen. Die Hauptvorteile von USP sind die gezielte Veränderung der Elastizität des Oberbaus und die damit verbundenen positiven Auswirkungen auf die Gleislagegüte. Dieses Projekt befasste sich mit der Gebrauchstauglichkeit besohlter Betonschwellen bei den Meterspurbahnen. Dazu wurde ein umfangreiches Versuchskonzept für vier Teststrecken bei drei Bahnbetreibern erstellt. Beteiligt am Forschungsprojekt waren die Matterhorn Gotthard Bahn (MGB), die Transports publics fribourgeois (TPF) und die Zentralbahn (ZB). Neben der Gleislagegüte wurden das Schlupfwellenwachstum, die Gleislagestabilität sowie die Auswirkungen auf Erschütterungen und Lärm untersucht.

Zur Gleislagegüte und zur Schlupfwellenentwicklung kann zum jetzigen Zeitpunkt noch keine abschliessende Beurteilung getroffen werden, da der zur Verfügung gestandene Untersuchungszeitraum bei teils niedrigem Verkehrsaufkommen zu kurz ist, um langfristige Veränderungen in der Gleislage oder beim Schlupfwellenwachstum feststellen zu können. Frühere Messungen in einem Bogen bei Clies auf dem Netz der MVR deuten jedoch darauf hin, dass Schwellenbesohlungen einen positiven Einfluss auf die Schlupfwellenbildung haben. Bei den Versuchen hat sich gezeigt, dass produktspezifische Eigenschaften zu teils unterschiedlichen Ergebnissen führen. Beim Querverschiebewiderstand lieferte beispielsweise die plastische Besohlung von Getzner die besten Ergebnisse, danach folgte die elastische Besohlung von Tiflex und zum Schluss die steife und harte Besohlung von Müller. Dieses Ergebnis kann durch eine effektivere Verzahnung zwischen Schotter und Besohlung bei plastischen Werkstoffen begründet werden. Deshalb wird empfohlen, in engen Bögen vorzugsweise plastische Besohlungen zu verwenden. Generell kann festgestellt werden, dass der Einsatz von Schwellenbesohlungen zu einem homogeneren Gleis mit besserer Gleislagegüte und weniger Hohllagen führt. Diese Effekte sind vor allem auf die Schotterschonung und die bessere Lastverteilung zurückzuführen.

Aufgrund des steifen Bettungsmoduls von $C_{\text{stat}} \geq 0.25 \text{ N/mm}^3$ wird bei starrem Untergrund bzw. Unterbau (z.B. AC-Rail) die Verwendung von weichen Zwischenlagen empfohlen, wobei in diesem Zusammenhang mit einer leicht erhöhten Lärmemission zu rechnen ist. Erschütterungen und Körperschall werden durch steife Besohlungen weder verstärkt noch reduziert. Es wurden auch keine erhöhten Lärmemissionen festgestellt, die rein auf die Verwendung von Schwellenbesohlungen zurückgeführt werden konnten.

Für die zukünftige Weiterentwicklung des Oberbaus bei Meterspurbahnen wäre es lohnend, das Bogenatmungsverhalten von Betonschwellen mit plastischen Sohlen ohne Sicherungskappen zu untersuchen. Entsprechende Versuche bei der Normalspur zeigten eine deutlich gleichmässige Bogenatmung der besohnten Betonschwellen im Vergleich zu den unbesohnten Betonschwellen.

Inhalt

1	Ausgangslage.....	5
2	Grundlagen	6
2.1	Begriffe	6
2.2	Literatur und Prüfberichte	6
3	Stand der Technik	7
3.1	Einsatzgebiete der Schwellenbesohlungen.....	7
3.2	Stand bei den Meterspurbahnen.....	8
4	Beschreibung der verwendeten Besohlungen	9
4.1	Schwellenbesohlung von Getzner	9
4.2	Schwellenbesohlung von Tiflex.....	9
4.3	Schwellenbesohlung von Müller	9
5	Beschreibung der Testabschnitte.....	10
5.1	MGB Dieni – Sedrun.....	10
5.2	MGB Station Kalpetran.....	11
5.3	TPF Gruyères – Enney	12
5.4	ZB Engelbergthal.....	13
6	Ergebnisse der Messungen.....	14
6.1	Übersicht der Messungen.....	14
6.2	Schienenrauheit.....	15
6.3	Schlupfwellen	16
6.4	Setzungen des Gleises.....	22
6.5	Einsenkung des Gleises	23
6.6	Querverschiebewiderstand	29
6.7	Bogenatmung	32
6.8	Gleislagegüte	35
6.9	Erschütterungen	38
6.10	Luftschall	40
7	Fazit	41
7.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	41
7.2	Empfehlungen	42
7.3	Forschungsbedarf.....	43
Anhang		44
Anhang 1:	Versuchskonzept Besohlte Betonschwellen Meterspur	44
Anhang 2:	Messbericht Bogenatmung MGB Kalpetran	44
Anhang 3:	Messbericht Einsenkung MGB Andermatt – Disentis	44
Anhang 4:	Messbericht Einsenkung TPF Gruyères – Enney.....	44
Anhang 5:	Messbericht Querverschiebewiderstand TPF Gruyères – Enney	44

1 Ausgangslage

Die Schwellenbesohlung (USP = Under Sleeper Pad) wurde bei den Normalspurbahnen in den letzten Jahren ausführlich getestet und ist heute in der Schweiz für viele Anwendungsfälle zugelassen. Einer der Hauptvorteile von USP ist die Möglichkeit, einen zusätzlichen elastischen Layer unter der Betonschwelle einzubringen. Dadurch lässt sich die Elastizität des Oberbaus gezielt verändern. Die Schwellenbesohlung bewirkt im Schotteroberbau folgende positiven Effekte:

- Grössere Kontaktfläche zwischen Schwellenunterseite und Schotter
- Bessere Verteilung / Ableitung der Kräfte in Schotter und Unterbau
- Schonung des Schotters unter der Schwelle
- Verlängerung der Stopfintervalle
- Reduktion der Unterhaltskosten

Nebst der gezielten Anpassung der Elastizität des Oberbaus ist der Hauptvorteil der Besohlungen die Schotterschonung. Diese kommt im Wesentlichen durch zwei Effekte zustande, welche je nach Materialeigenschaften der Besohlung mehr oder weniger ausgeprägt sind. Einerseits führen die Besohlungen zu einer Vergrösserung der Kontaktfläche zwischen der Schwellenunterseite und der obersten Schotterlage, andererseits bewirken die Besohlungen je nach Steifigkeit und Material eine Vergrösserung der Biegelinie. Beide Effekte führen zu einer besseren Verteilung resp. Ableitung der Kräfte in den Schotter. Dies wiederum führt zur Schonung des Schotters unter der Schwelle. Zudem tragen die Schwellenbesohlungen generell zu einem homogenen Gleis mit weniger Hohllagen bei.

Die obengenannten Wirkungen führen insgesamt zu einer Verbesserung der Gleislagegüte. Mit besohlenen Betonschwellen kann somit die Liegedauer des Oberbaus erhöht und dadurch eine Reduktion der Lebenszykluskosten (LCC) erzielt werden. Im Rahmen dieses Projekts soll nun untersucht werden, wie sich die Erfahrungen aus der Normalspur auf den Einsatz besohlter Betonschwellen bei der Meterspur übertragen lassen.

2 Grundlagen

2.1 Begriffe

Fahrbahn	Die Fahrbahn umfasst Oberbau und Unterbau mit Entwässerung
Fahrweg	Der Fahrweg umfasst alle für den Betrieb der Bahn notwendigen Anlagenteile wie Fahrbahn und Fahrleitung
Oberbau	Der Oberbau ist derjenige Teil des Gleiskörpers oberhalb der Planie, er umfasst Schiene, Schwelle und Schotter
Unterbau	Der Unterbau ist derjenige Teil unterhalb der Planie und beinhaltet Sperrschicht, Foundationsschicht und Übergangsschicht
Planie	Die Planie stellt die Grenze zwischen Oberbau und Unterbau dar
Schlupfwellen	Schlupfwellen sind Oberflächenfehler auf der Fahrfläche der Schiene, welche aufgrund der Torsionsschwingungen der Radsätze in engen Bögen auf der Innenschiene auftreten
Schwellenbesohlung	Die Schwellenbesohlung (UPS = Under Sleeper Pad) ist eine elastische oder plastische Schicht, die an der Schwellenunterseite meist vollflächig angebracht wird

2.2 Literatur und Prüfberichte

- [1] UIC IRS 70713-1: Railway Application - Track & Structure, Under Sleeper Pads (USP) - Recommendations for Use, Paris, 2018
- [2] BAFU-Forschungsprojekt: Schlupfwellen in engen Bögen, Zürich, 2019
https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/laerm/fachinfo-daten/forschung-eisenbahnlaerm/infrastruktur/freiestrecke/2019_Bericht%20Schlupfwellen_Trombik.pdf.download.pdf/2019_Bericht%20Schlupfwellen_Trombik.pdf
- [3] KPZ Fahrbahn: Versuchskonzept Besohlte Betonschwellen Meterspur, Bern 2020
- [4] Patrick Braess: Bogenatmungsmessungen Kalpetran, MGB 10.08.2021, Zürich, 2021
- [5] infraMT Messbericht 20-125-2: Einsenkungsmessung (EMWMS) MGB, Andermatt – Disentis, Finsterhennen, 2021
- [6] infraMT Rapport de mesure 21-102-1: Mesure d'enfoncement (EMWMS) TPF voie métrique, Finsterhennen, 2021
- [7] infraMT Messbericht 21-105-1: Querverschiebewiderstandsmessung (QVW) Transports publics fribourgeois SA (TPF), USP-Teststrecke Gruyères – Enney, Finsterhennen, 2021
- [8] Irissys-Daten (Gleisgeometrie) übermittelt am 02.12.2022 von Jackson Buckner, MGB
- [9] Zentralbahn Präsentation vom 31.08.2022: Versuchsstrecke für den Einsatz von Referenzschwellen, besohlenen Schwellen und Stahlschwellen, Stansstad, 2022
- [10] Patrick Braess: Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmenden Bögen, Dissertation ETH Nr. 25112, ETH Zürich, 2018

3 Stand der Technik

3.1 Einsatzgebiete der Schwellenbesohlungen

In den letzten Jahrzehnten hatten die Bahnen die Qualität des Oberbaus massgeblich verbessert. Dabei kamen hochwertige Schienenstähle, Betonschwellen und moderne Befestigungssysteme zum Einsatz. Dadurch stellt heute der Schotter das schwächste Glied im Fahrweg dar. Aufgrund gesteigerter Belastungen aus dem Bahnbetrieb muss der Schotter immer mehr dynamische Kräfte aufnehmen und er muss in kürzeren Intervallen gereinigt und/oder erneuert werden. Durch den Einsatz von Betonschwellen mit Besohlungen kann der Schotter geschont werden. Die Schotterschonung besohlter Betonschwellen ist der Hauptgrund für die bessere Gleislagegüte.

Je nach Steifigkeit der Schwellenbesohlung ergeben sich unterschiedliche Einsatzgebiete. Die Klassifizierung einer Besohlung erfolgt üblicherweise anhand des statischen Bettungsmoduls. Die Einteilung der Sohlensteifigkeit ist im UIC IRS 70713-1 [1] zusammengefasst, siehe Tabelle 1. Die möglichen Einsatzgebiete der Schwellenbesohlungen sind in Abhängigkeit des statischen Bettungsmoduls gemäss UIC IRS 70713-1 [1] in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Klassifizierung des statischen Bettungsmoduls der Besohlungen

Quelle: [1]

Schwellensohlentyp	Statische Bettungsmoduln 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	$0,08 \text{ N/mm}^3 \leq C_{\text{stat}} < 0,15 \text{ N/mm}^3$

Tabelle 2: Mögliche Einsatzgebiete der Schwellenbesohlungen

Quelle: [1]

Verwendungsbereiche der Schwellensohlen	Schwellensohlentyp		
	Weich	Mittel	Starr
Verbesserung der Gleisqualität			
Weichen und Kreuzungen			
Übergangsbereiche			
Bereiche mit reduzierter Schotterdicke			
Reduzierung von Schlupfwellenbildung			
Reduzierung von Körperschall			

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass nicht nur der statische Bettungsmodul der Besohlung, sondern auch deren Materialeigenschaften für das Verhalten im Gleis entscheidend ist. Es gibt grundsätzlich elastische plastische Sohlentypen. Die in diesem Projekt verwendeten Besohlungen sind in Kapitel 4 beschrieben.

Das Haupteinsatzgebiet von Schwellenbesohlungen ist die Verbesserung der Gleislagegüte mittels besohlter Streckenbetonschwellen. Zunehmend kommen die Besohlungen auch in Weichen und Kreuzungen zum Einsatz, um auch dort eine bessere Lagequalität zu erreichen und um die Weichenbauteile zu schonen. Im Weiteren sind Schwellenbesohlungen ein effizientes Mittel, um einen Übergang mit unterschiedlichen Fahrbahnsteifigkeiten zu optimieren und eine Reduzierung der dynamischen Belastung zu gewährleisten. Die Besohlungen eignen sich insbesondere zur Schonung des Schotters im Anschlussbereich von Bauwerken oder Tunnels mit einer Festen Fahrbahn.

Ein weiterer Einsatzbereich von Schwellenbesohlungen ist die Reduktion der Schlupfwellenbildung in engen Bögen. Bei unbesohlenen Betonschwellen wurde auf der Innenschiene eine raschere Entstehung von Schlupfwellen festgestellt. Sie erhöhten den Gleisverschleiss, den Instandhaltungsaufwand und den Geräuschpegel. Messungen im Normalspurnetz der BLS haben gezeigt, dass steife Besohlungen in Kombination mit weichen Zwischenlagen die dynamischen Parameter des Rad-Schiene-Systems signifikant verändern, was in der Regel zur Veränderung der Eigenfrequenzen von Gleiskomponentenschwingungen führt und der Schlupfwellenbildung offenbar entgegenwirkt [2].

3.2 Stand bei den Meterspurbahnen

Bei einer Umfrage unter den Meterspurbahnen hat sich gezeigt, dass Schwellenbesohlungen aktuell noch wenig eingesetzt werden. Dort wo diese eingesetzt werden, kommen fast ausschliesslich steife Besohlungen zum Zuge, die rein zur Schotterschonung eingebaut werden. Zur Reduzierung von Erschütterungen oder Körperschall sind diese Besohlungstypen aufgrund ihrer Steifigkeit jedoch nicht geeignet.

In der Schweiz kommen im Meterspurgleis bis dato nur steife Besohlungen zum Einsatz, da diese bereits ihre Gebrauchstauglichkeit im Gleis bei der Normalspur mehrfach unter Beweis gestellt haben und vom BAV zugelassen sind. Hersteller dieser steifen Besohlungen sind Getzner (AT), Tiflex (UK) und Müller (DE). Bei der RhB ist erstmals der Einsatz von weichen Besohlungen im Meterspurbereich geplant. Dieser Versuch wird momentan im Rahmen einer Betriebserprobung vom KPZ begleitet.

Zur Reduktion der Schlupfwellenbildung in engen Bögen konnten bei den Meterspurbahnen bisher nur weiche Schienenzwischenlagen jedoch ohne Schwellenbesohlungen über einen längeren Zeitraum beobachtet werden. Diese Versuche erfolgten auf dem Netz der MGB zwischen Täsch und Zermatt, wobei eine Verbesserung der Schlupfwellenproblematik festgestellt werden konnte. Versuche auf dem Netz der MVR in einem Bogen bei Clies mit derselben Massnahme führte allerdings nicht zur wesentlichen Reduzierung von Schlupfwellen. Deshalb wurde bei der MVR nachträglich zudem die Schienenstahlgüte gewechselt und Betonschwellen mit steifen Besohlungen eingebaut. Die ersten Erkenntnisse sind in Kapitel 6.3 kurz beschrieben. Diese Kombination aus weichen Schienenzwischenlagen und steifen Schwellenbesohlungen wurde in den Versuchsstrecken des vorliegenden Projekts nirgends eingebaut, so dass die Ergebnisse der MVR leider nicht erneut verifiziert werden konnten.

4 Beschreibung der verwendeten Besohlungen

Die Besohlung soll aus fertigungstechnischen Gründen und um Schäden zu vermeiden etwas kleiner sein als die Grundfläche der Betonschwelle. Diese Empfehlung der UIC hat Vigier Rail für die Betonschwelle Meterspur Typ VöV-E M2 entsprechend berücksichtigt. Die Besohlung wird im Rahmen dieses Projekts vollflächig auf der Schwellenunterseite angebracht. Sie besteht aus zwei Hälften, so dass sie bei der Schwellenproduktion einfacher appliziert werden kann.

In diesem Projekt kamen nur steife Schwellenbesohlungen von drei Herstellern zum Einsatz. Die drei hier verwendeten Besohlungen weisen jedoch unterschiedliche Materialeigenschaften auf.

4.1 Schwellenbesohlung von Getzner

Die Schwellenbesohlung der Firma Getzner (AT) besteht aus einer Federschicht aus Polyurethan und einem Montagegitter für die Applikation der Sohle auf der Betonschwelle. Die Besohlung weist ein plastisches Materialverhalten auf. Die Schottersteine können sich dauerhaft in der Besohlung verkrallen, so dass eine grosse Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotter entsteht. Zudem führt diese Besohlung zu einer leichten Vergrösserung der Biegelinie.

Die Produktbezeichnung der Sylomer Besohlung lautet SLB3007G. Das ist eine steife USP mit einem statischen Bettungsmodul von $C_{\text{stat}} = 0.34 \text{ N/mm}^3$ (Bereich von $0.30 - 0.35 \text{ N/mm}^3$) nach EN 16730 und einer Nenndicke von 7 mm (ohne Montagegitter).

4.2 Schwellenbesohlung von Tiflex

Die Schwellenbesohlung der Firma Tiflex (UK) besteht aus einer Wirkschicht aus einer Polymermischung, einer äusseren Schotterschutzschicht sowie einer Geotextilschicht für die Applikation der Sohle auf der Betonschwelle. Die Besohlung weist ein elastisches Materialverhalten auf. Dies führt zu einer leichten Vergrösserung der Kontaktfläche zwischen Schwelle und Schotter. Dafür wird mit dieser Besohlung eine deutliche Vergrösserung der Biegelinie erzielt, was zu einem besseren Lastabtrag führt.

Die Produktbezeichnung der Besohlung lautet USP-7-S-3035. Das ist eine steife USP mit einem statischen Bettungsmodul von $C_{\text{stat}} = 0.31 \text{ N/mm}^3$ (Bereich von $0.30 - 0.35 \text{ N/mm}^3$) nach EN 16730 und einer Nenndicke von 7.5 mm (ohne Geotextilschicht).

4.3 Schwellenbesohlung von Müller

Die Schwellenbesohlung der Firma Müller (DE) besteht aus Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA). Sie weist ein vorwiegend steifes Materialverhalten auf und hat eine sehr harte Oberfläche. Dies erhöht die Kontaktfläche nur minimal gegenüber der unbesohnten Betonschwelle und auch die Biegelinie wird nicht signifikant vergrössert.

Die Produktbezeichnung der Besohlung lautet M02. Das ist eine steife USP mit einem statischen Bettungsmodul von $C_{\text{stat}} = 0.30 - 0.35 \text{ N/mm}^3$ nach EN 16730 und einer Nenndicke von 7 mm.

5 Beschreibung der Testabschnitte

Im Rahmen dieses Projekts nahmen folgende drei Meterspurbahnen teil: Matterhorn Gotthard Bahn (MGB), Transports publics fribourgeois (TPF) und Zentralbahn (ZB). Sie stellten hierzu insgesamt vier Teststrecken mit besohlenen Betonschwellen zur Verfügung.

5.1 MGB Dieni – Sedrun

Die Teststrecke Dieni – Sedrun liegt auf der MGB Linie Andermatt – Disentis/Mustér. Sie wird vom Glacier-Express und von Regionalzügen befahren. Güterverkehr ist nicht vorhanden. Die Belastung der Strecke beträgt ca. 5'300 Bruttotonnen pro Tag. Die Geschwindigkeit im gesamten Perimeter beträgt $V = 50 \text{ km/h}$. Der Versuchsabschnitt umfasst eine typische Geometrie mit wechselnden Abschnitten von Geraden und Kreisbögen mit Radien zwischen 105 und 361 m.

Im Rahmen einer Fahrbahnerneuerung (FbE) wurde im September/Oktober 2020 auf dem Streckenabschnitt Dieni – Sedrun zwischen km 85.380 und 87.150 die gesamte Strecke mit besohlenen Betonschwellen erneuert (Ausnahme war die Station Rueras zwischen km 86.384 und 86.500). Dabei kamen Beschlungstypen zweier Hersteller (Getzner SLB3007G und Müller M02) zum Einsatz, einer auf dem Versuchsabschnitt V1 und der andere auf dem Versuchsabschnitt V2. Das Schienenprofil 46E1 wurde lückenlos verschweisst. Es wurden steife Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit von $c_{\text{stat}} = 700 \text{ kN/mm}$ verwendet. In Tabelle 3 sind die Angaben zur MGB Teststrecke Dieni – Sedrun zu finden.

Auf einen Referenzabschnitt ohne Beschlung musste leider aufgrund der fortgeschrittenen Planung verzichtet werden. D.h. es konnten dort Erfahrungen zur Gebrauchstauglichkeit zweier Beschlungen in einem Meterspurgleis mit typischer Geometrie gesammelt werden, jedoch konnten keine Vergleiche zum unbesohlenen Betonschwellengleis unter denselben Betriebsbedingungen gemacht werden.

Tabelle 3: MGB Teststrecke Dieni – Sedrun

Abschnitt	km von	km bis	Radius	Schiene	Zw	USP
V1	85.380	86.384	$R_{\min} = 120 \text{ m}$ $R_{\max} = 361 \text{ m}$	46E1	700 kN/mm	Getzner SLB3007G
V2	86.500	87.150	$R_{\min} = 105 \text{ m}$ $R_{\max} = 350 \text{ m}$	46E1	700 kN/mm	Müller M02

5.2 MGB Station Kalpetran

Die Teststrecke bei der Station Kalpetran liegt auf der MGB Linie Visp – Zermatt. Sie wird vom Glacier-Express, von Regionalzügen und von Güterzügen befahren. Die Belastung der Strecke beträgt ca. 8'900 Bruttotonnen pro Tag. Die Geschwindigkeit im gesamten Perimeter beträgt $V = 30 - 35$ km/h. Der besohlte Versuchsabschnitt V3 umfasst eine typische Geometrie mit engen Bögen mit Radien zwischen 95 und 300 m. Als Referenzabschnitt R1 dient ein enger Bogen mit unbesohlenen Betonschwellen aus der FbE Steischir von 2019, welcher unmittelbar angrenzend an den Versuchsabschnitt erneuert wurde.

Im Rahmen einer Fahrbahnerneuerung (FbE) wurde im Oktober/November 2020 im Bereich der Station Kalpetran zwischen km 19.511 und 19.962 die Strecke mit besohlenen Betonschwellen erneuert. Der besohlte Betonschwellenoberbau diente dazu, weitere Erkenntnisse über den Einfluss der Besohlung auf das Atmungsverhalten sowie die Bildung von Schlupfwellen in engen Bögen zu gewinnen. Das Gleis wurde auf einer Asphaltsperrschicht gebaut. Die besohlenen Betonschwellen in diesem Versuchsabschnitt V3 wurden mit der Schwellenbesohlung M02 von Müller versehen. Bereits im Jahr 2019 wurden im Rahmen der FbE Steischir (km 19.323 bis 19.511) unbesohlte Betonschwellen auf einer PSS-Sperrschicht verlegt. In diesem Abschnitt liegt der unbesohlte Referenzabschnitt R1 in einem engen Bogen mit Radius 95 m auf einer Länge von 20 m. Das Schienenprofil 46E1 wurde lückenlos verschweisst. Es wurden steife Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit von $c_{\text{stat}} = 700$ kN/mm verwendet. In Tabelle 4 sind die Angaben zur MGB Teststrecke bei der Station Kalpetran zu finden.

Tabelle 4: MGB Teststrecke Station Kalpetran

Abschnitt	km von	km bis	Radius	Schiene	Zw	USP
R1	19.323	19.511	$R = 95$ m	46E1	700 kN/mm	Referenz unbesohlt
V3	19.511	19.962	$R_{\min} = 95$ m $R_{\max} = 300$ m	46E1	700 kN/mm	Müller M02

5.3 TPF Gruyères – Enney

Die Teststrecke Gruyères – Enney liegt auf der TPF Linie Bulle – Montbovon. Sie wird von Regionalzügen befahren. Güterverkehr ist nicht vorhanden. Die Belastung der Strecke beträgt knapp 3'000 Bruttotonnen pro Tag. Die Geschwindigkeit im gesamten Perimeter beträgt $V = 60 \text{ km/h}$. Der Versuchsabschnitt umfasst eine typische Geometrie mit wechselnden Abschnitten von Geraden und Kreisbögen mit Radien zwischen 156 und 173 m.

Im Rahmen einer Fahrbahnerneuerung (FbE) wurde im Oktober 2020 auf dem Streckenabschnitt Gruyères – Enney zwischen km 24.170 und 26.560 die gesamte Strecke mit besohnten Betonschwellen erneuert (Ausnahme war der Referenzabschnitt T1 zwischen km 24.316 und 24.532, wo unbesohlte Betonschwellen eingebaut wurden). Dabei kamen Besohlungstypen zweier Hersteller (Tiflex USP-7-S-3035 und Müller M02) zum Einsatz, einer auf dem Testabschnitt T2 und der andere auf dem Testabschnitt T3. Das Gleis wurde auf einer Asphaltsperrschicht gebaut. Das Schienenprofil 46E1 wurde lückenlos verschweisst. Es wurden steife Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit von $c_{\text{stat}} = 700 \text{ kN/mm}$ verwendet. In Tabelle 5 sind die Angaben zur TPF Teststrecke Gruyères – Enney zu finden.

Tabelle 5: TPF Teststrecke Gruyères – Enney

Abschnitt	km von	km bis	Radius	Schiene	Zw	USP
T1	24.316	24.532	R = 156 m	46E1	700 kN/mm	Referenz unbesohlt
T2	24.676	24.892	R = 173 m	46E1	700 kN/mm	Tiflex USP-7-S-3035
T3	24.892	25.108	R = 164 m	46E1	700 kN/mm	Müller M02

5.4 ZB Engelbergthal

Die Teststrecke Engelbergthal zwischen Wolfenschiessen und Grafenort liegt auf der ZB Linie Stans – Engelberg. Sie wird von Regionalzügen befahren. Güterverkehr ist nicht vorhanden. Die Belastung der Strecke beträgt ca. 10'900 Bruttotonnen pro Tag. Die Geschwindigkeit im gesamten Perimeter beträgt $V = 100 \text{ km/h}$. Der gesamte Versuchsabschnitt liegt auf einer Geraden.

Im Rahmen einer Fahrbahnerneuerung (FbE) wurde im Frühling 2021 auf dem Streckenabschnitt Wolfenschiessen – Grafenort zwischen km 13.800 und 15.025 die gesamte Strecke mit besohnten Betonschwellen erneuert (Ausnahme war der Referenzabschnitt R1 zwischen km 14.350 und 14.600 und die beiden Anschlussstücke am Anfang und Ende der FbE, wo unbesohlte Betonschwellen eingebaut wurden). Dabei kamen Besohlungstypen zweier Hersteller (Getzner SLB3007G und Müller M02) zum Einsatz, einer auf dem Versuchsabschnitt V1 und der andere auf dem Versuchsabschnitt V2. Das Gleis wurde auf einer Asphaltsperrschicht gebaut. Das Schienenprofil 46E1 wurde lückenlos verschweisst. Es wurden steife Zwischenlagen mit einer statischen Steifigkeit von $c_{\text{stat}} = 700 \text{ kN/mm}$ verwendet. In Tabelle 6 sind die Angaben zur ZB Teststrecke im Engelbergthal aufgeführt.

Tabelle 6: ZB Teststrecke im Engelbergthal

Abschnitt	km von	km bis	Radius	Schiene	Zw	USP
V1	14.100	14.350	∞	46E1	700 kN/mm	Getzner SLB3007G
R1	14.350	14.600	∞	46E1	700 kN/mm	Referenz unbesohlt
V2	14.600	14.975	∞	46E1	700 kN/mm	Müller M02

6 Ergebnisse der Messungen

6.1 Übersicht der Messungen

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts soll die Gebrauchstauglichkeit besohlter Betonschwellen bei den Meterspurbahnen untersucht und beurteilt werden. Im Vorfeld wurde ein entsprechendes Versuchskonzept erstellt [3]. Es waren bei allen Teststrecken einerseits Messungen im Gleis und andererseits eine regelmässige visuelle Überwachung im Rahmen der Streckeninspektion geplant.

Gegenüber dem ursprünglichen Versuchskonzept gab es bei den Bahnen gewisse Änderungen im Messprogramm. Verschiedene Messungen sind noch nicht abgeschlossen, andere wurden noch nicht durchgeführt und auf die Bogenatmung bei der TPF wurde ganz verzichtet. Einen Überblick über die bisher erfolgten Messungen per Dezember 2023 gibt Tabelle 7. Zusätzlich wurden auf Wunsch der Geldgeber die Messergebnisse der Schienenrauheit bei einem Bogen in der Nähe von Clies bei der MVR in diesen Bericht mit aufgenommen.

Tabelle 7: Übersicht der Messungen (Stand: Dez. 2023 / *noch nicht durchgeführt / **nicht mehr in Planung)

Bahngesellschaft und Teststrecke	MGB Dieni– Sedrun	MGB Station Kalpetran	TPF Gruyères– Enney	ZB Engel- bergtal
Messung				
Schienenrauheit / Verschleiss	X*	X*		✓
Setzungen des Gleises				✓
Einsenkungen des Gleises	✓	✓	✓	✓
Querverschiebewiderstand			✓	✓
Bogenatmung		✓	X**	
Gleislagegüte	✓	✓		✓
Schwingungen / Schall				✓
Überwachung				
Visuelle Kontrollen			✓	✓

Seitens der MGB gab es bis dato keine Rückmeldung bzgl. der visuellen Kontrollen. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass bisher keinerlei Probleme auftraten. Die Versuchsstrecken bei der TPF und der ZB wiesen bis zum heutigen Zeitpunkt keinerlei Auffälligkeiten auf. Die Schienenrauheitsmessungen auf den Versuchsabschnitten der MGB konnten aufgrund von unvorhergesehenen Schleifzyklen nicht durchgeführt werden. Bei der TPF wurde auf eine Bogenatmungsmessung in den Bögen zwischen Gruyères und Enney aufgrund der relativ grossen Radien verzichtet. Eine weitere aussagekräftige Schienenrauheitsmessung soll aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens erst in ein paar Jahren durchgeführt werden. Daten zur Gleislage sind bei der TPF vorhanden, sie wurden jedoch den Autoren dieses Berichts noch nicht übergeben.

6.2 Schienenrauheit

ZB Engelbergtal

Das Schienenrauheitsmessgerät tastet die Ebenheit des Fahrspiegels gemäss EN 15610 mit hoher Genauigkeit ab und ist für einen Wellenlängenbereich von 0.3 – 50 cm geeignet. Drei Wegsensoren führen eine kontinuierliche Rauheitsmessung durch und ermitteln auf dem jeweiligen Abschnitt die Rauheit des Fahrspiegels auf dem Schienenkopf. Es werden jeweils die linke und rechte Schiene gemessen und die Werte am Ende über beide Schienenstränge gemittelt. Die Ergebnisse der Schienenrauheitsmessung vom 13.10.2022 bei der ZB im Engelbergtal sind in Abbildung 1 dargestellt.

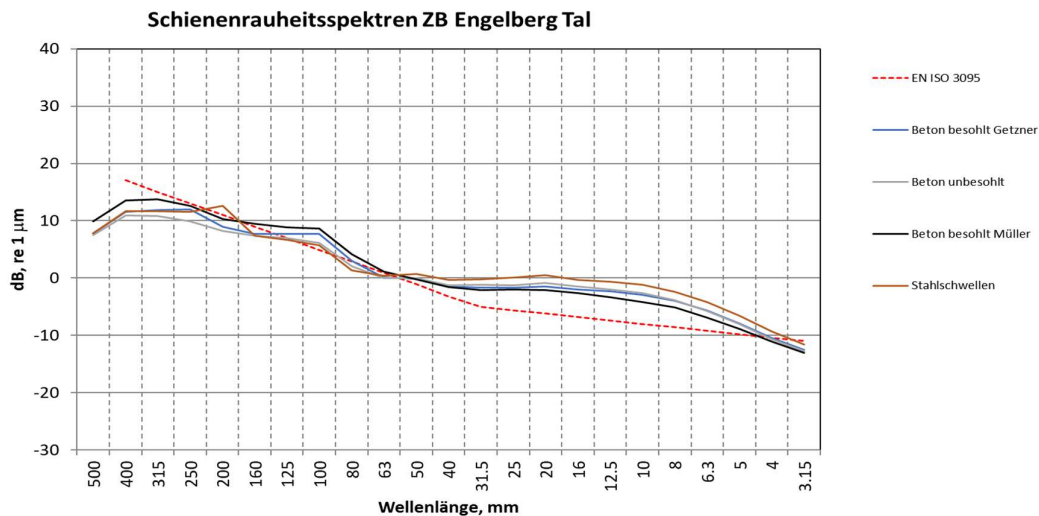


Abbildung 1: Schienenrauheit Innen- und Aussenschiene gemittelt

Wie zu erkennen ist, sind die Schienenrauheitsspektren grösstenteils oberhalb der roten Bezugslinie der EN ISO 3095. Dies dürfte vor allem daran liegen, dass die Schiene noch nicht geschliffen wurde. Der berechnete Einzahlwert der Schienenrauheit zeigt deutlich, dass der Fahrspiegel der Schiene als rau zu bezeichnen ist (Werte > 10 dB) und geschliffen werden müsste, siehe Abbildung 2. Die Rauigkeit der Schiene dürfte einen grossen Anteil an der gemessene Lärmemission haben (vgl. Kapitel 6.10).

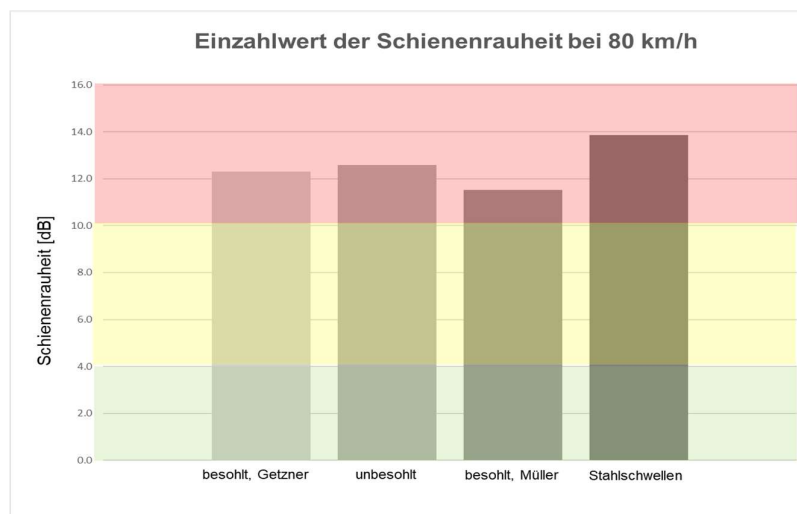


Abbildung 2: Darstellung der Schienenrauheit als Einzahlwert

6.3 Schlupfwellen

TPF Gruyères – Enney

Bei der Messkampagne der Schlupfwellen bei der TPF zwischen Gruyères und Enney wurde das gleiche Messgerät verwendet, wie in Kapitel 6.2 beschrieben. Die Abtastung erfolgt über drei Wegsensoren, die in einem Abstand von 5 mm zueinander positioniert sind, um möglichst gut den gesamten Fahrspiegel kontinuierlich zu erfassen. Es wurden jeweils Innen- und Aussenschiene gemessen und separat ausgewertet. Die Spektren der Schienenrauheit sind in den folgenden Diagrammen für alle Wegsensoren des Schienenrauheitsmessgeräts dargestellt.

Ein Diagramm zeigt jeweils pro Schienenstrang und Zeitpunkt T_x für Innen- resp. Aussenschiene die Rauheitsspektren der Messabschnitte, die jeweils der kompletten Länge des Bogens entsprechen. Die erste Messung erfolgte zum Zeitpunkt T_1 kurz nach dem Umbau am 30.09.2021. Die grünen Kurven zeigen die zweite Schienenrauheitsmessung zum Zeitpunkt T_2 rund ein Jahr nach der ersten Messung, durchgeführt am 22.11.2022. Die Schienen wurden seit dem Umbau nie geschliffen.

Aufgrund der Schienenrauheitsmessungen in den drei Bögen der TPF zwischen Gruyères und Enney zu den Zeitpunkten T_1 und T_2 kann folgendes festgestellt werden:

- Die ungeschliffene Schiene zeigt eine erhöhte Rauheit bis zu einer Wellenlänge von 250 mm.
- Aufgrund der geringen Verkehrsbelastung kann im Zeitraum von nur 14 Monaten noch kein ausgeprägtes Schlupfwellenwachstum festgestellt werden.
- Durch das Überrollen der Räder wird die anfängliche Schienenrauheit deutlich reduziert.
- Zum Zeitpunkt T_2 sind die Schienenrauheitsspektren der Innenschiene aller Gleisabschnitte grösstenteils unterhalb der schwarzen Bezugslinie der EN ISO 3095. Dies gilt allerdings nicht für die Aussenschiene.
- Auf sämtlichen Aussenschienen kann jeweils ein Peak mit einer Wellenlänge von ca. 8 mm festgestellt werden.
- Zum Zeitpunkt T_2 steigen bei der Innenschiene im unbesohlenen Referenz-Abschnitt sowie im Testabschnitt mit Müller Besohlungen die Spektralwerte bei 63 mm leicht an. Daraus könnten sich in den kommenden Monaten bzw. Jahren Schlupfwellen bilden.
- Die besohlenen Gleisabschnitte haben global gesehen (über alle Wellenlängen hinweg) bei der Innenschiene eindeutig die tiefsten Rauheitswerte zum Zeitpunkt T_2 . Dies deutet darauf hin, dass das Schlupfwellenwachstum gegenüber der unbesohlenen Referenz geringer ist. Ein ausgeprägtes Schlupfwellenwachstum konnte jedoch aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens bis dato auch im unbesohlenen Abschnitt noch nicht festgestellt werden.

Die Ergebnisse der Schlupfwellen-Messkampagne auf der TPF Teststrecke Gruyeres – Enney sind in den folgenden Diagrammen ersichtlich. Die Schienenrauheitsspektren des unbesohlenen Referenzabschnitts T_1 sind für die Innenschiene in Abbildung 3 und für die Aussenschiene in Abbildung 4 dargestellt. Die Schienenrauheitsspektren des Testabschnitts T_2 mit Tiflex Besohlungen sind für die Innenschiene in Abbildung 5 und für die Aussenschiene in Abbildung 6 dargestellt. Die Schienenrauheitsspektren des Testabschnitts T_3 mit Müller Besohlungen sind für die Innenschiene in Abbildung 7 und für die Aussenschiene in Abbildung 8 dargestellt.

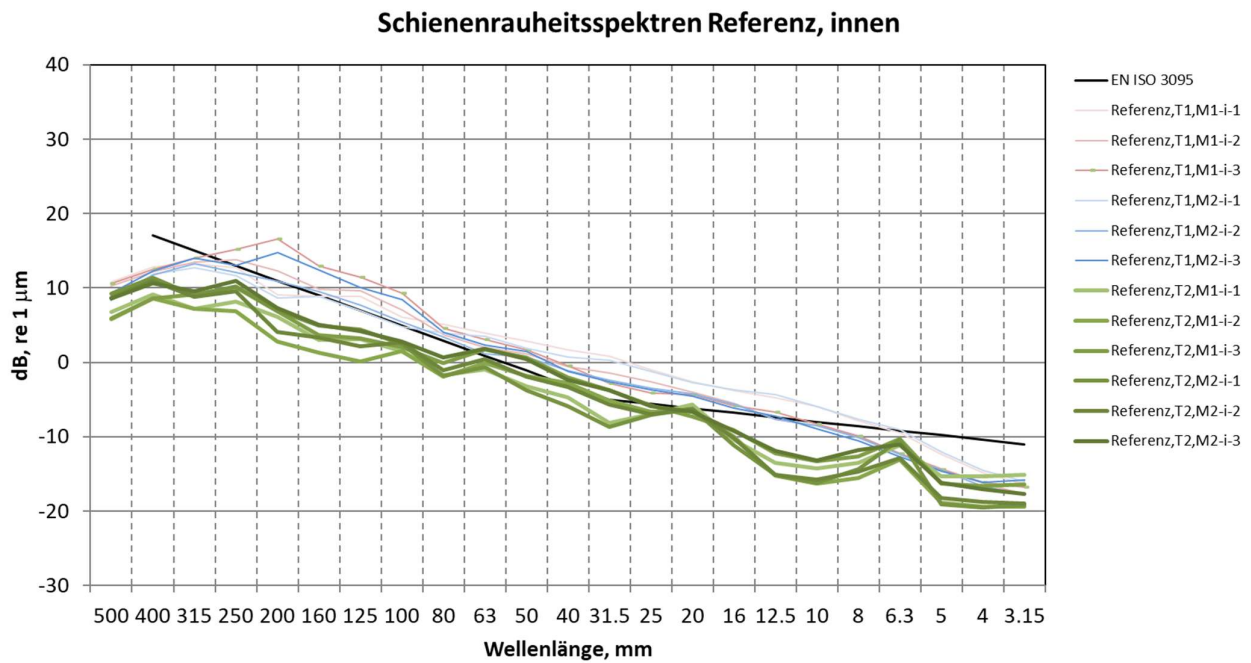


Abbildung 3: Schienenrauheitsspektrum Referenzabschnitt T1 Innenschiene, TPF Gruyères – Enney

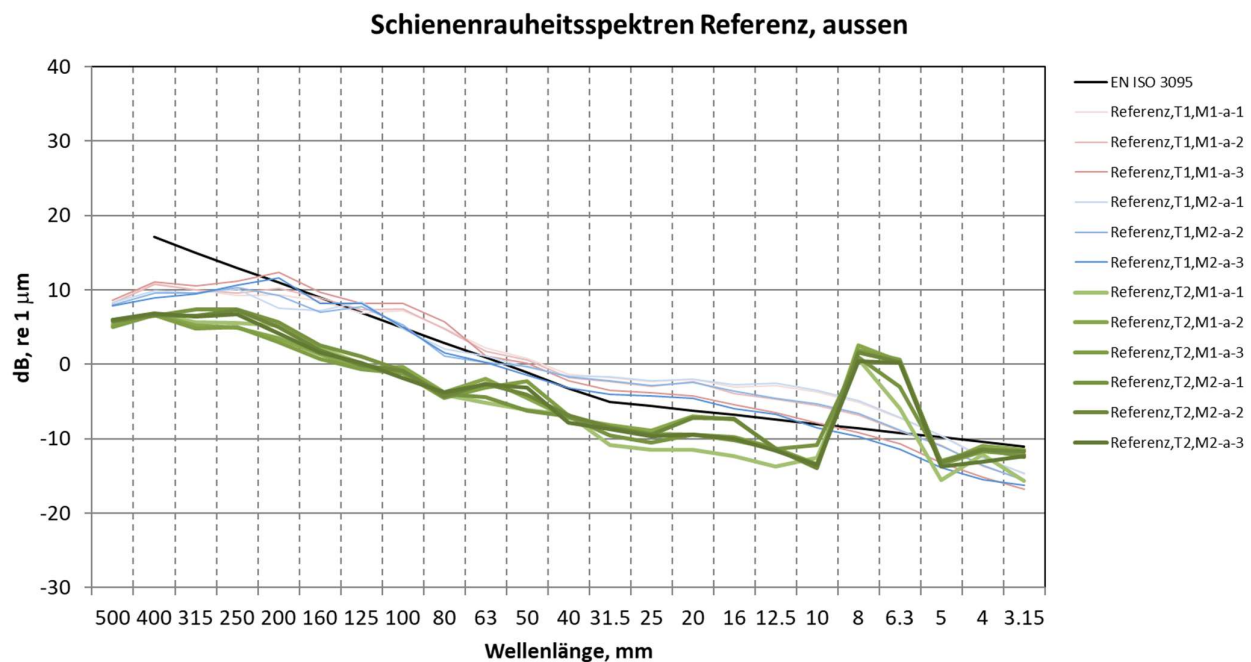


Abbildung 4: Schienenrauheitsspektrum Referenzabschnitt T1 Aussenschiene, TPF Gruyères – Enney

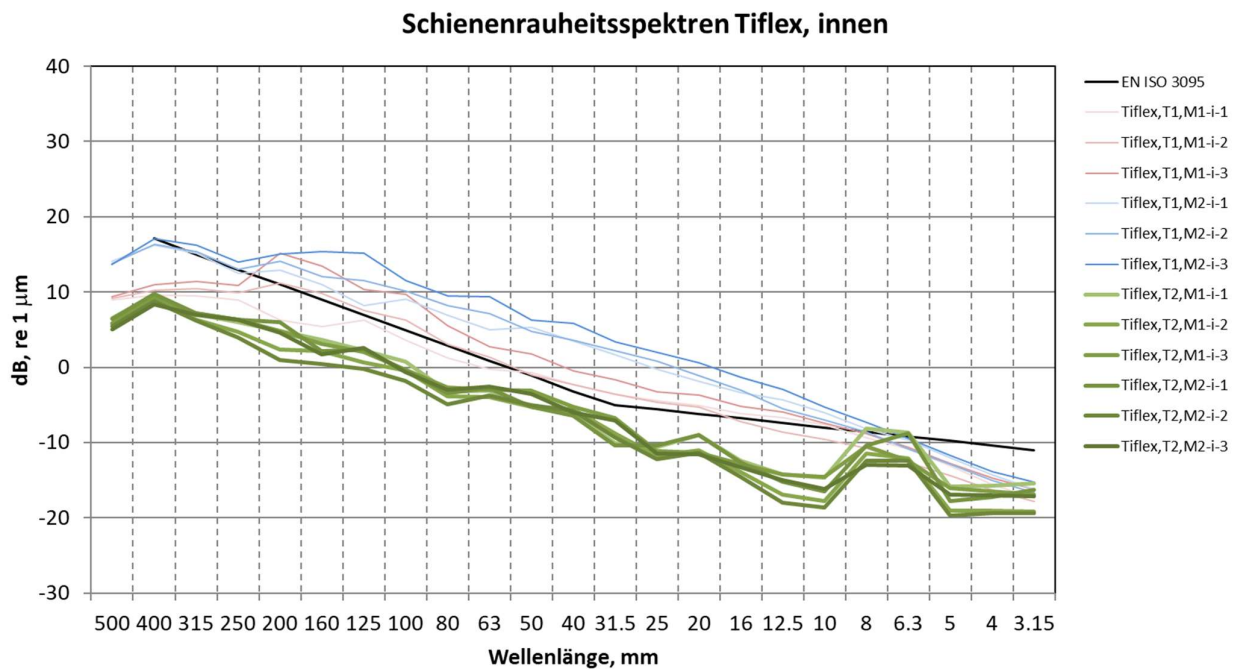


Abbildung 5: Schienenrauheitsspektrum Testabschnitt T2 Tiflex Innenschiene, TPF Gruyères – Enney

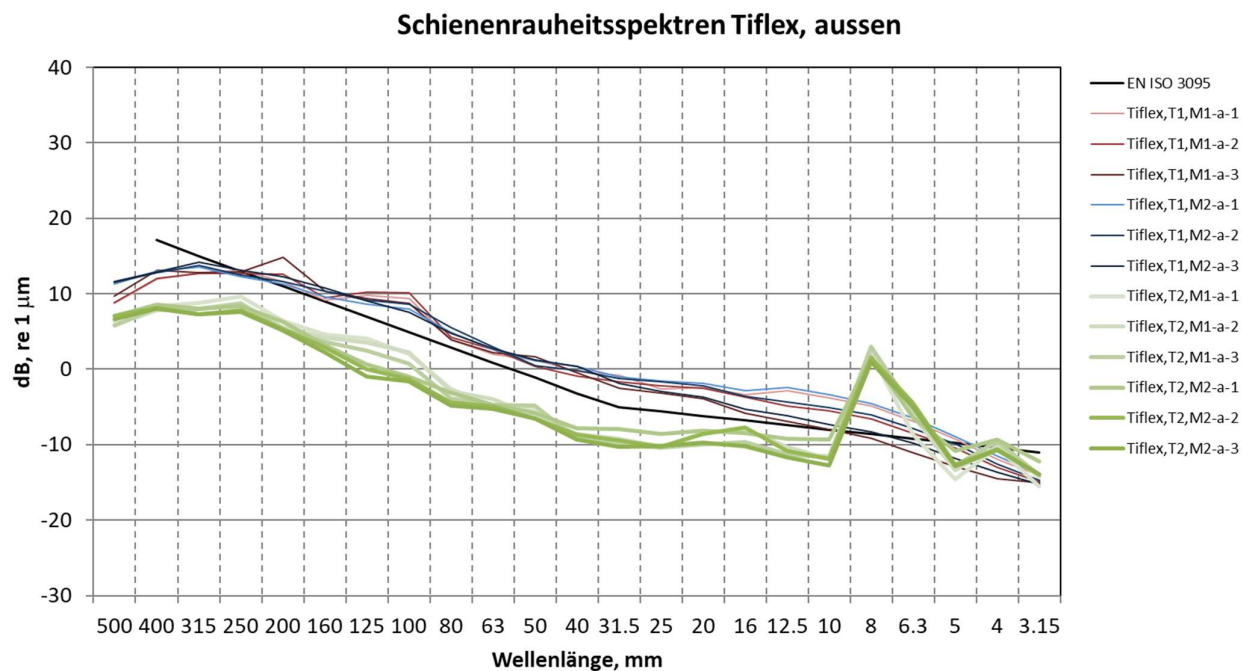


Abbildung 6: Schienenrauheitsspektrum Testabschnitt T2 Tiflex Aussenschiene, TPF Gruyères – Enney

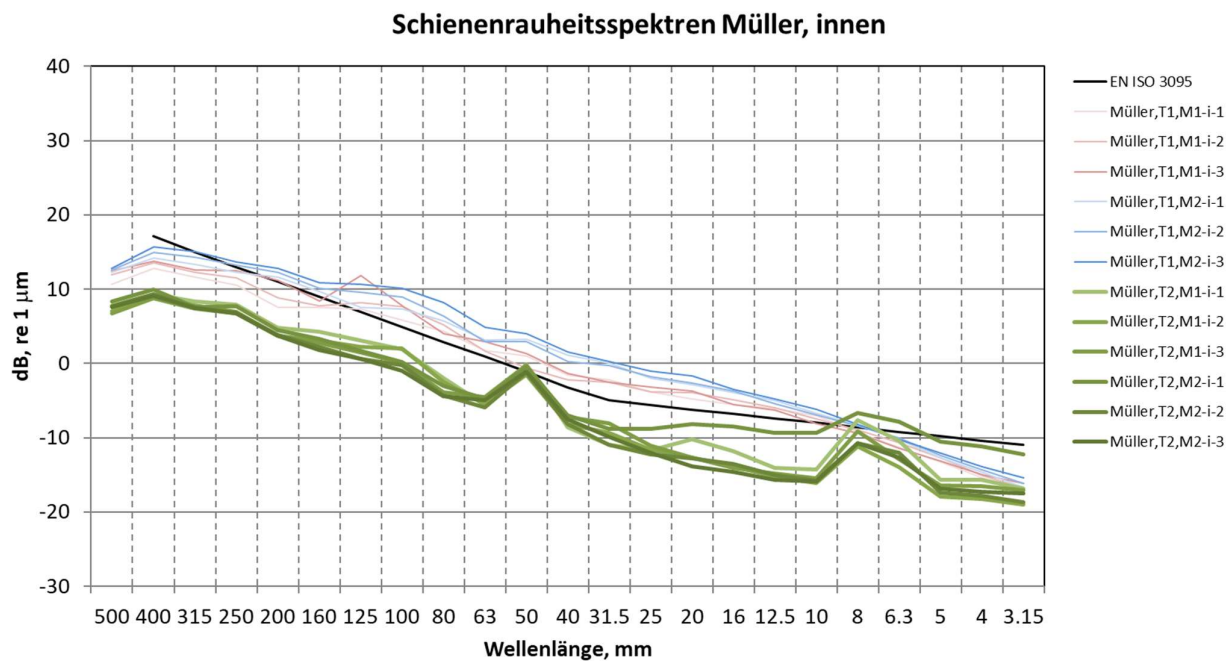


Abbildung 7: Schienenrauheitsspektrum Testabschnitt T3 Müller Innenschiene, TPF Gruyères – Enney

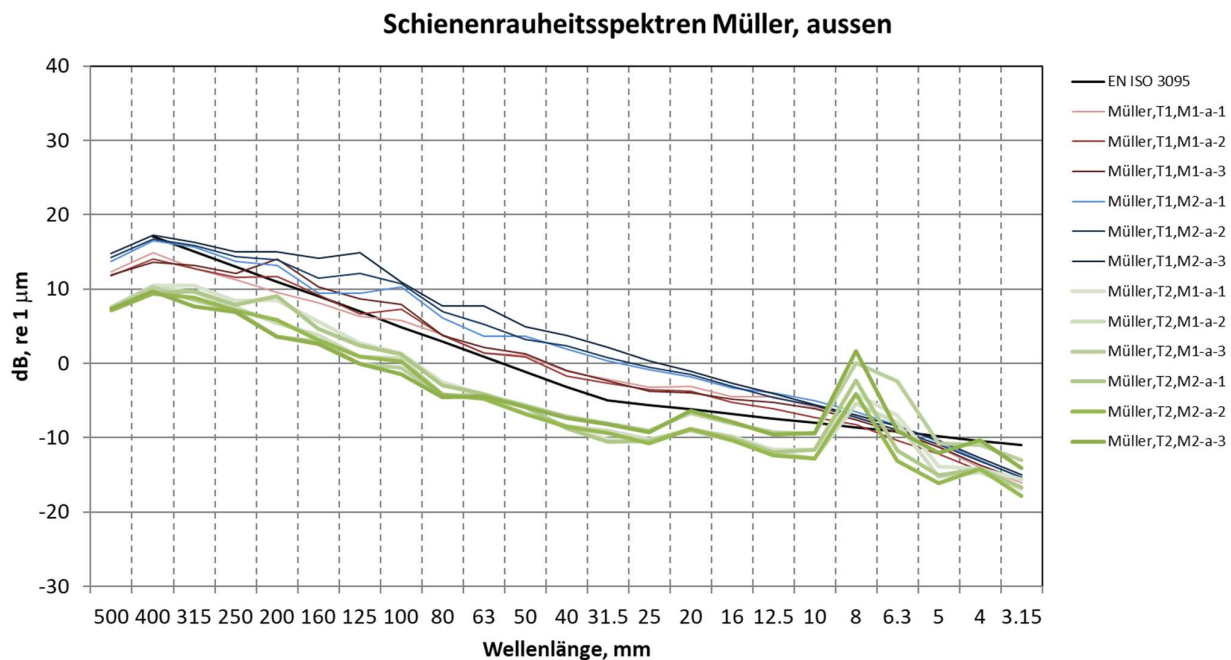


Abbildung 8: Schienenrauheitsspektrum Testabschnitt T3 Müller Aussenschiene, TPF Gruyères – Enney

MVR enger Bogen bei Clies

Ausserhalb dieses Forschungsprojekts konnten vor ein paar Jahren Erfahrungen im Zusammenhang mit Schlupfwellen bei der Meterspur gesammelt werden. Um das Bild zu vervollständigen, wird hier kurz auf die Ergebnisse bei der Transports Montreux – Vevey – Riviera (MVR) eingegangen.

Der untersuchte Bogen mit Radius $R = 79 \text{ m}$ befindet sich unmittelbar nach der Haltestelle Clies in Richtung Blonay zwischen km 2.054 und 2.145 auf der MVR Linie Vevey – Blonay, siehe Abbildung 9. Im Dezember 2017 wurden starke Schlupfwellen in diesem Bogen festgestellt, siehe Abbildung 9. In einem ersten Schritt wurden die steifen Zwischenlagen ($c \approx 700 \text{ kN/mm}$) durch weiche Zwischenlagen ausgetauscht ($c_{\text{neu}} \approx 85 \text{ kN/mm}$). Vom Einbau weicher Zwischenlagen versprach man sich einen geringeren Verschleiss der Schienen. Um die Schlupfwellenentwicklung auf den Schienen vor dem Austausch beurteilen zu können, wurden am 28.02.2018 Rauheitsmessungen durchgeführt. Unmittelbar nach der 1. Messung bzw. vor dem Austausch der Zwischenlagen wurden die Schienen neu geschliffen.



Abbildung 9: Standort der Messung (links) sowie vorhandene Schlupfwellen im Dez. 2017 (rechts)

Das gesamte Messprogramm ist in Tabelle 8 dargestellt, wobei sich die dritte Messkampagne (T0,3 bis T5,3) erst aus den Ergebnissen der ersten beiden ergeben hat, denn der Wechsel von steifen zu weichen Zwischenlagen führte nicht zu den gewünschten Ergebnissen, siehe Abbildung 10.

Tabelle 8: Messprogramm Schienenrauheit in einem engen Bogen bei Clies auf dem MVR Liniennetz

Mess.	Datum	Beschrieb der Messung	Schiene, Betonschwelle, Zwischenlage
T0,1	28.02.2018	Zustandsmessung, nach > 800 d	R260, VöV-E M2 unbesohlt, steife Zw
T0,2	29.11.2018	Zustandsmessung, nach 247 d	R260, VöV-E M2 unbesohlt, weiche Zw
T0,3	08.07.2019	Nullmessung	R400, VöV-E M2 mit SLB3007, weiche Zw
T2,3	12.08.2019	nach 35 d	R400, VöV-E M2 mit SLB3007, weiche Zw
T3,3	08.10.2019	nach 92 d	R400, VöV-E M2 mit SLB3007, weiche Zw
T4,3	07.01.2020	nach 183 d	R400, VöV-E M2 mit SLB3007, weiche Zw
T5,3	21.07.2020	nach 379 d	R400, VöV-E M2 mit SLB3007, weiche Zw

Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, lag die dominante Wellenlänge auf der Innenschiene vor dem Zwischenlagenwechsel bei ca. 40 mm (blauer Verlauf). Danach hat sich das Maximum auf eine Wellenlänge von ca. 63 mm verschoben, was sich lärmtechnisch geringfügig positiv auswirkt, denn bei der Berechnung der schienenseitigen Lärmemission, ausgedrückt durch den Einzahlwert der Schienenrauheit, fallen langwellige Anteile weniger stark ins Gewicht als kurzwellige. Insgesamt konnte jedoch die Schlupfwellenbildung nur durch weiche Zwischenlagen nicht reduziert werden. Deshalb entschied man sich, zusätzlich besohlte Betonschwellen einzusetzen. Gleichzeitig wurde die Schiene gewechselt und eine Schiene mit einer höheren Schienenstahlgüte verwendet.

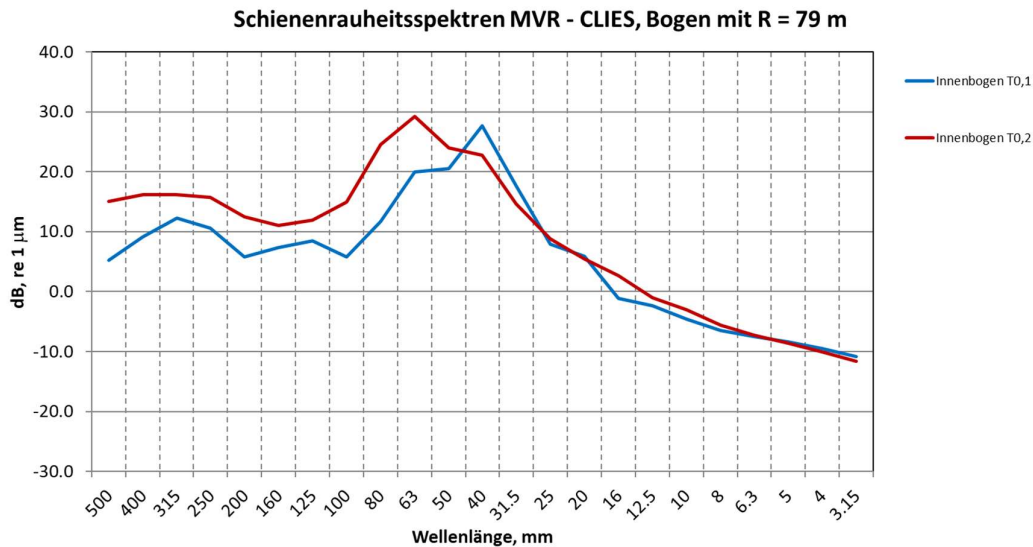


Abbildung 10: Schienenrauheitsspektrum vor und nach dem Zw-Wechsel, MVR Clies

Die Ergebnisse der Messkampagnen vor und nach dem Einbau der besohnten Betonschwellen sind in Abbildung 11 dargestellt.

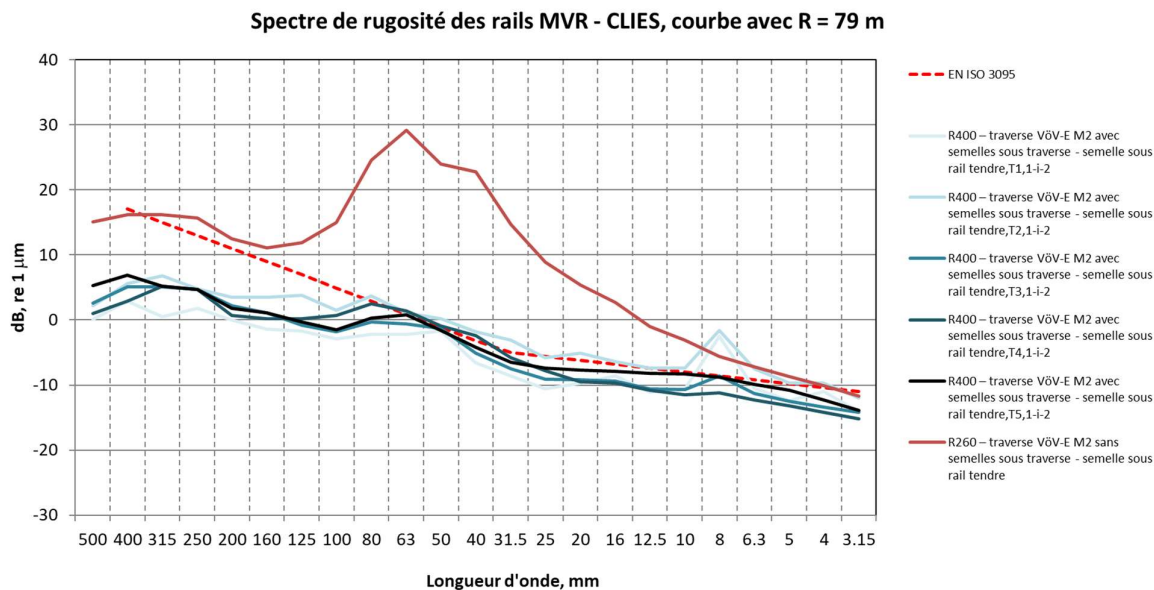


Abbildung 11: Schienenrauheitsspektrum vor und nach dem Einbau der besohnten Schwellen, MVR Clies

Im Bogen bei Clies bei der MVR führte die verbesserte Schienenstahlgüte zusammen mit der besohlenen Betonschwelle zu einer deutlichen Reduktion der Schlupfwellenbildung. Nach über einem Jahr unter Betrieb konnten mit der neuen Oberbaukonfiguration noch keine Schlupfwellen auf der bogeninneren Schiene festgestellt werden. Welchen genauen Anteil die Schienenstahlgüte an diesem Ergebnis hat, lässt sich bei dieser Untersuchung leider nicht feststellen.

In Abbildung 12 wurde für jede Messung der Einzahlwert der Schienenrauheit ermittelt. Durch die Zugüberfahrten wurde der anfänglich mittelraue Fahrspiegel (> 5 dB) mit der Zeit geglättet. Am Ende der Messkampagne konnten die Aussenschiene als glatt und die Innenschiene als mittelrau bezeichnet werden. Ein Schienenschleifen war weder aus verschleisstechnischer noch aus akustischer Sicht nötig.

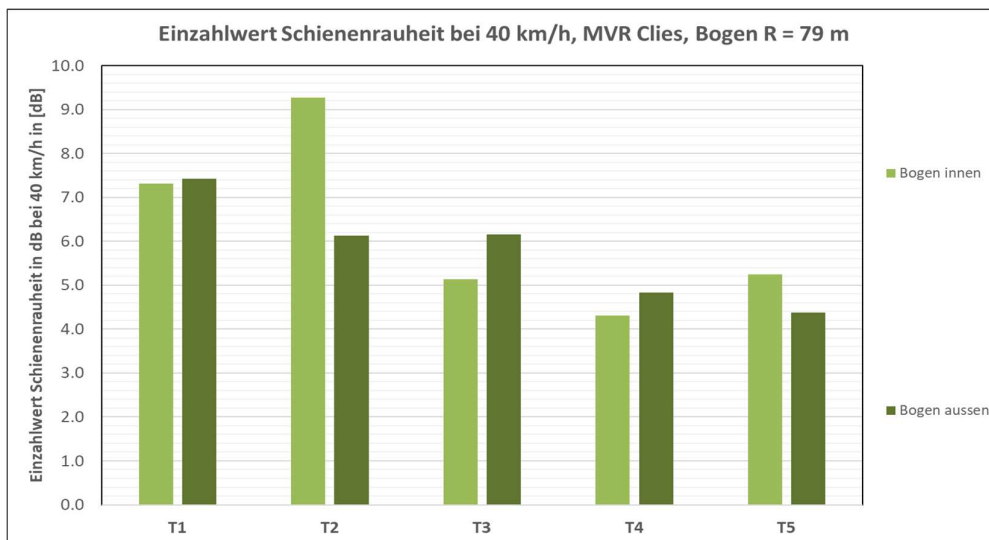


Abbildung 12: Einzahlwerte der Schienenrauheit mit Besohlung, MVR Clies

Zwischenfazit zu den Schlupfwellen

Wie die Erfahrungen bei der MVR gezeigt haben, kann die Kombination aus besohlenen Betonschwellen und weichen Schienenzwischenlagen das Schlupfwellenwachstum signifikant reduzieren.

6.4 Setzungen des Gleises

ZB Engelbergthal

Die Setzungen des Gleises wurden nur bei der ZB im Engelbergthal gemessen. Den Autoren liegen keine Messberichte vor. Die Aussagen beruhen deshalb auf der ZB Präsentation «Versuchsstrecke für den Einsatz von Referenzschwellen, besohlenen Schwellen und Stahlschwellen» vom 31.08.2022 [9].

Die Setzungskurven zeigten nach dem Umbau eine deutliche Setzung aller Schwellen im gesamten Überwachungsbereich zwischen 7.0 und 9.3 mm. Die Unterschiede zwischen den Bereichen waren gering. Etwas kleiner waren diese Initialsetzungen bei der Besohlung von Müller. Diese Initialsetzungen dürften primär mit der Unterbaukonsolidation zusammenhängen. Die Folgemessung der Setzungen des Gleises im April 2022 zeigte eine nur noch geringfügige Zunahme der Setzungen um 1 mm auf. Im Bereich der Stahlschwellen war die Zunahme mit 2 mm etwas grösser. Es ist anzunehmen, dass die Setzungen langfristig asymptotisch gegen Null auslaufen.

6.5 Einsenkung des Gleises

ZB Engelbergertal

Die Mittelwerte der Einsenkung des Gleises bei der ZB im Engelbergertal sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Der Verlauf der Einsenkung über den gesamten Bereich der Teststrecke ist in Abbildung 13 ersichtlich.

Tabelle 9: Einsenkung des Gleises (Mittelwerte und Standardabweichung), ZB Engelbergertal

Quelle: [9]

Abschnitt	MW Einsenkung 2 m	MW Basis-Einsenk. 20 m	σ Einsenkung 2 m
A Getzner SLB 3007 G	-0.96	-0.72	0.30
B VöV-E M2 (Ref.)	-0.47	-0.27	0.18
C Paul Müller M02	-0.70	-0.51	0.19
D Stahlschwellen	-0.76	-0.58	0.25

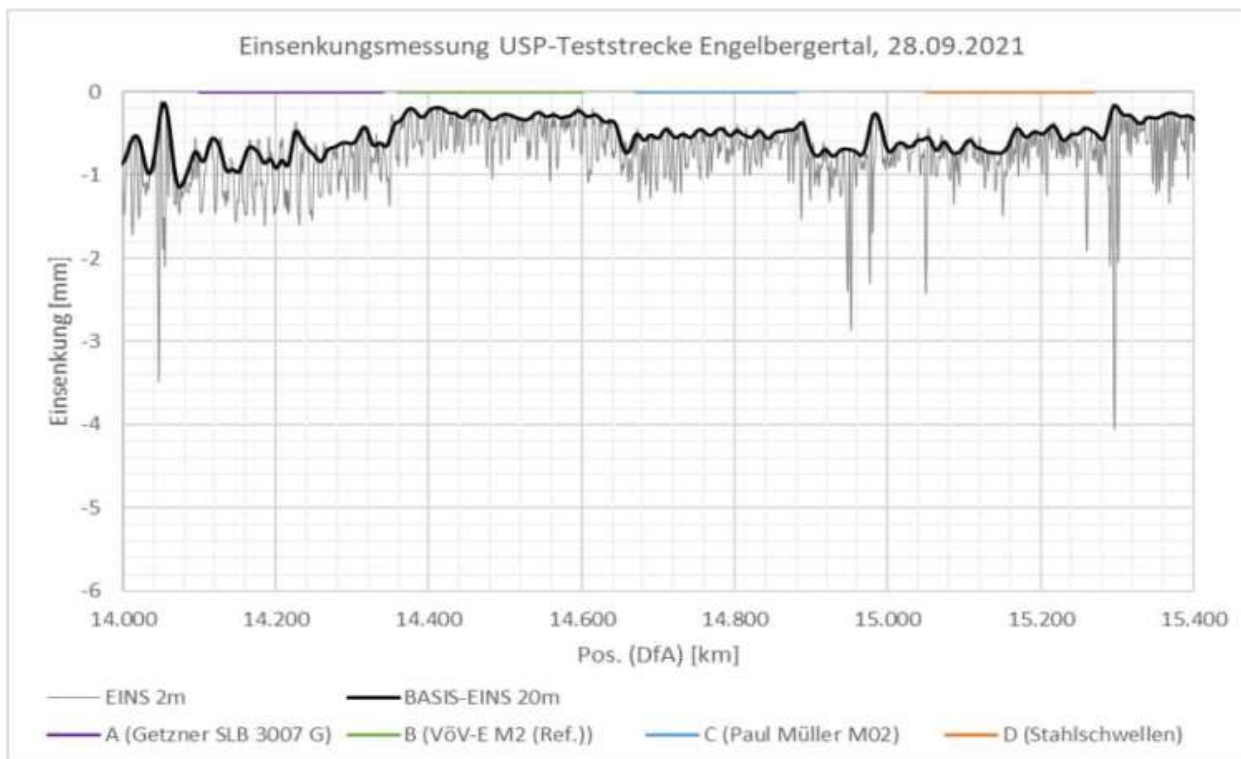


Abbildung 13: Einsenkungsverlauf, ZB Engelbergertal

Quelle: [9]

Im unbesohlenen Referenzabschnitt beträgt die Einsenkung des Gleises nur ca. 0.3 mm. Die Abschnitte mit Besohlung haben eine Einsenkung von 0.5 – 0.7 mm. Das Delta erscheint eher untypisch gross, da die steifen USP üblicherweise nur eine zusätzliche Einsenkung von ca. 0.1 mm bewirken.

Es zeigt sich aber einmal mehr, dass Neubaugleise mit starrem Unterbau mit AC-Rail klar zu wenig Einsenkung aufweisen (Zielbereich: 1.0 – 1.5 mm). Deshalb ist es umso wichtiger, dort zusätzliche Elastizität ins System einzubringen, sei es über Schwellenbesohlungen oder weiche Zwischenlagen.

MGB Dieni – Sedrun

Bei der MGB Teststrecke Dieni – Sedrun erfolgten die Einsenkungsmessungen am 30.05.2021. Die Ergebnisse (Mittelwerte und Streuung sowie Einsenkungsverlauf) sind in Abbildung 14 dargestellt.

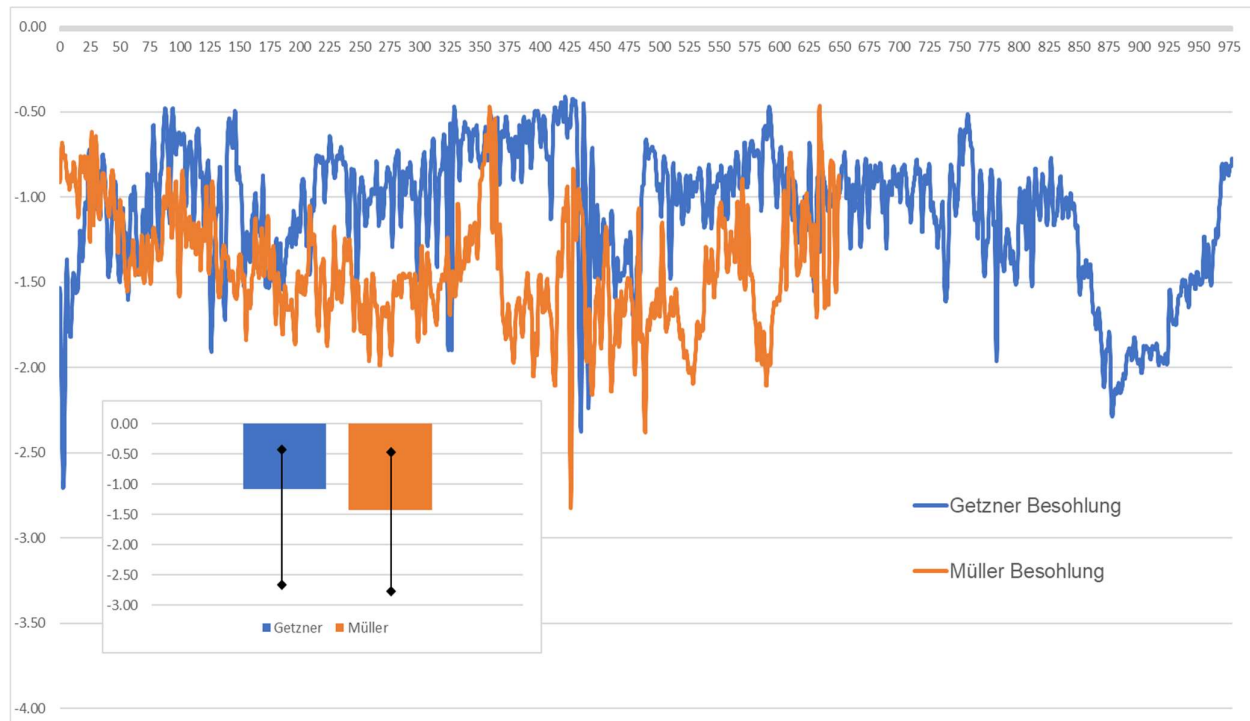


Abbildung 14: Einsenkungsverlauf sowie Mittelwerte und Streuung, MGB Dieni – Sedrun

Quelle: [5]

Die mittlere Einsenkung des Gleises beträgt bei der Getzner Besohlung ca. 1.1 mm und bei der Müller Besohlung ca. 1.4 mm. Dieses Einsenkungsniveau entspricht dem Zielbereich von 1.0 – 1.5 mm und es führt zu einer idealen Lastverteilung. Eine zusätzliche Elastizität im Gleis ist hier nicht notwendig.

MGB Station Kalpetran

Bei der MGB Teststrecke Station Kalpetran erfolgten die Einsenkungsmessungen am 10.10.2022. Die Ergebnisse (Mittelwerte und Streuung sowie Einsenkungsverlauf) sind in Abbildung 15 dargestellt.

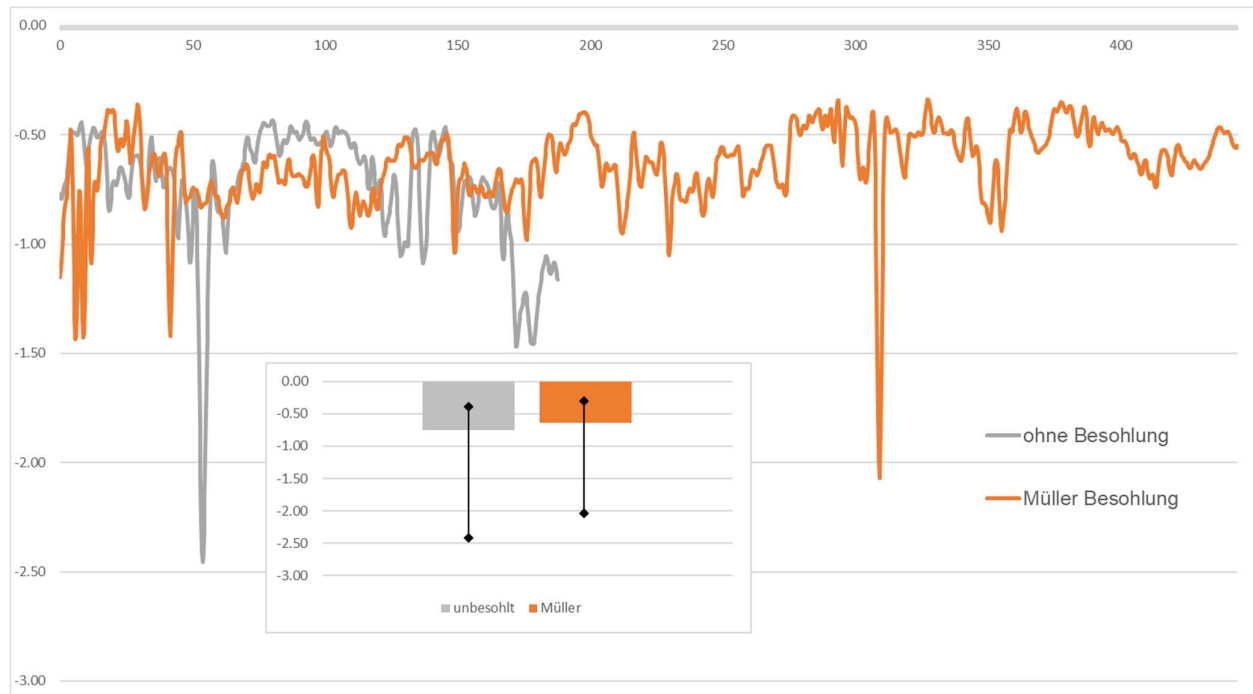


Abbildung 15: Einsenkungsverlauf sowie Mittelwerte und Streuung, MGB Station Kalpetran

[5]

Die mittlere Einsenkung des Gleises beträgt im unbesohnten Referenzabschnitt ca. 0,7 mm und beim Abschnitt mit der Müller Besohlung ca. 0,6 mm. Das mutet auf den ersten Blick komisch an. Der Grund liegt aber darin, dass der unbesohlte Referenzabschnitt einen PSS-Unterbau aufweist und der Abschnitt mit Müller Besohlung eine Asphalttragschicht mit AC-Rail. Es zeigt sich auch hier, dass der PSS-Unterbau im Gegensatz zur Asphalttragschicht erfahrungsgemäss eine etwas grössere Elastizität aufweist. Trotz einem zusätzlichen elastischen Layer in Form der Müller Besohlung nimmt die Einsenkung im Bereich mit AC-Rail sogar um ca. 0,1 mm ab.

Bei der Station Kalpetran haben beide Abschnitte eher zu wenig Einsenkung. Eine grössere Biegelinie wäre also wünschenswert. Um die Elastizität zu erhöhen, könnte der Oberbau in diesem Fall durch weiche Zwischenlagen optimiert werden. Zudem würden Besohlungstypen mit einem anderen Materialverhalten zu einer etwas grösseren Biegelinie führen.

TPF Gruyères – Enney

Bei der TPF Teststrecke zwischen Gruyères und Enney erfolgte die Einsenkungsmessung des Gleises im April 2021. Die Mittelwerte der Einsenkung des Gleises sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Der Verlauf der Einsenkung über den jeweiligen Testabschnitt inkl. Verteilfunktion sind für den unbesohnten Referenzabschnitt in Abbildung 16, für den besohnten Abschnitt mit Tiflex Besohlung in Abbildung 17 und für den besohnten Abschnitt mit Müller Besohlung in Abbildung 18 ersichtlich.

Tabelle 10: Einsenkung des Gleises (Mittelwerte und Standardabweichung), TPF Gruyères – Enney

Quelle [6]

Einsenkung	Referenz (unbesohlt)	Tiflex	Müller
Mittelwert	-0.67 mm	-0.66 mm	-0.49 mm
Standardabweichung	0.21 mm	0.26 mm	0.12 mm

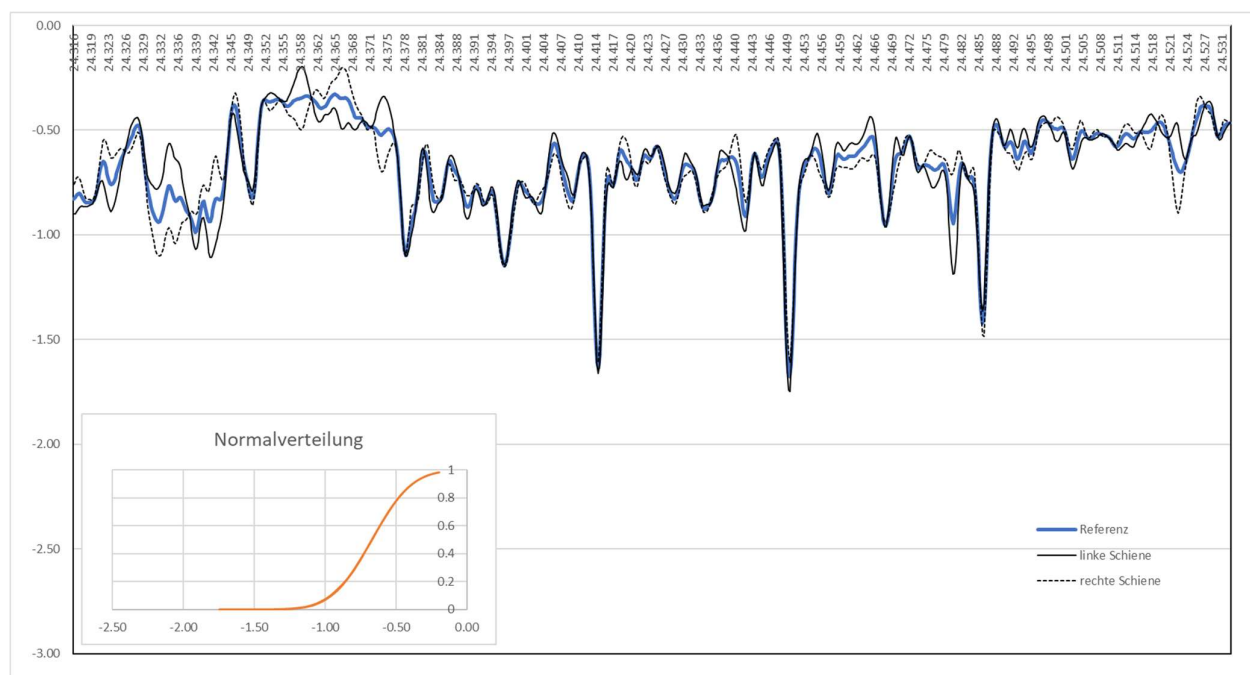


Abbildung 16: Einsenkungsverlauf Referenzabschnitt, TPF Gruyères – Enney

Quelle: [6]

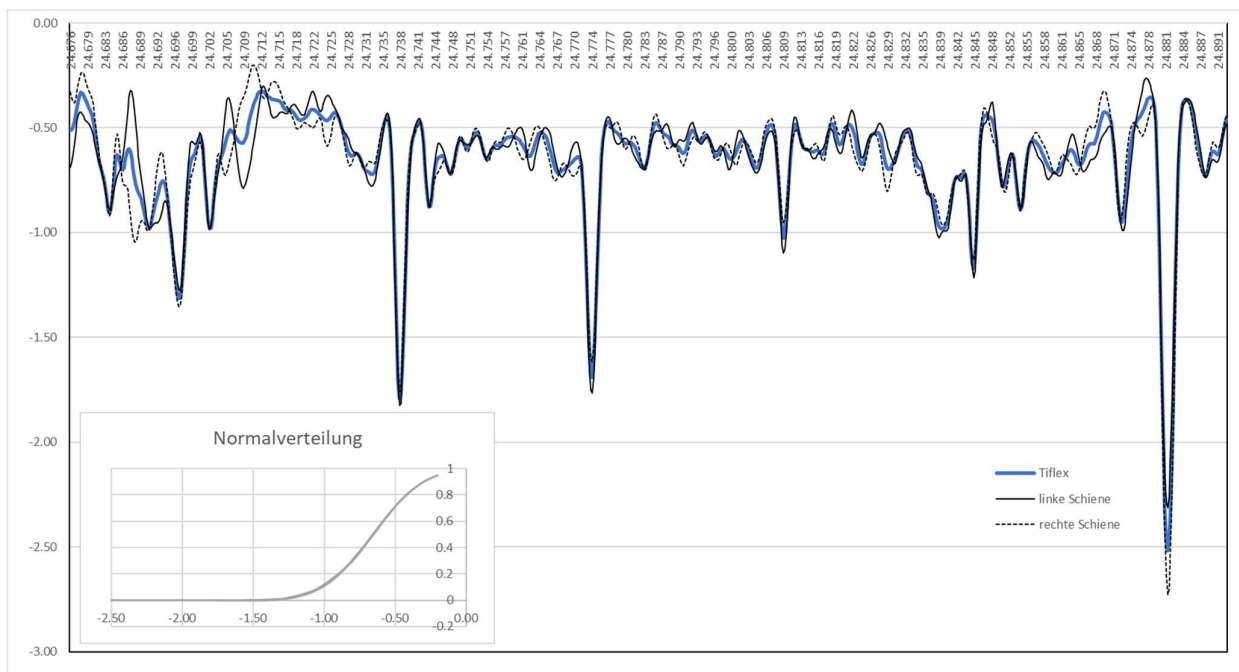


Abbildung 17: Eisenkungsverlauf Abschnitt Tiflex Besohlung, TPF Gruyères – Enney

Quelle: [6]

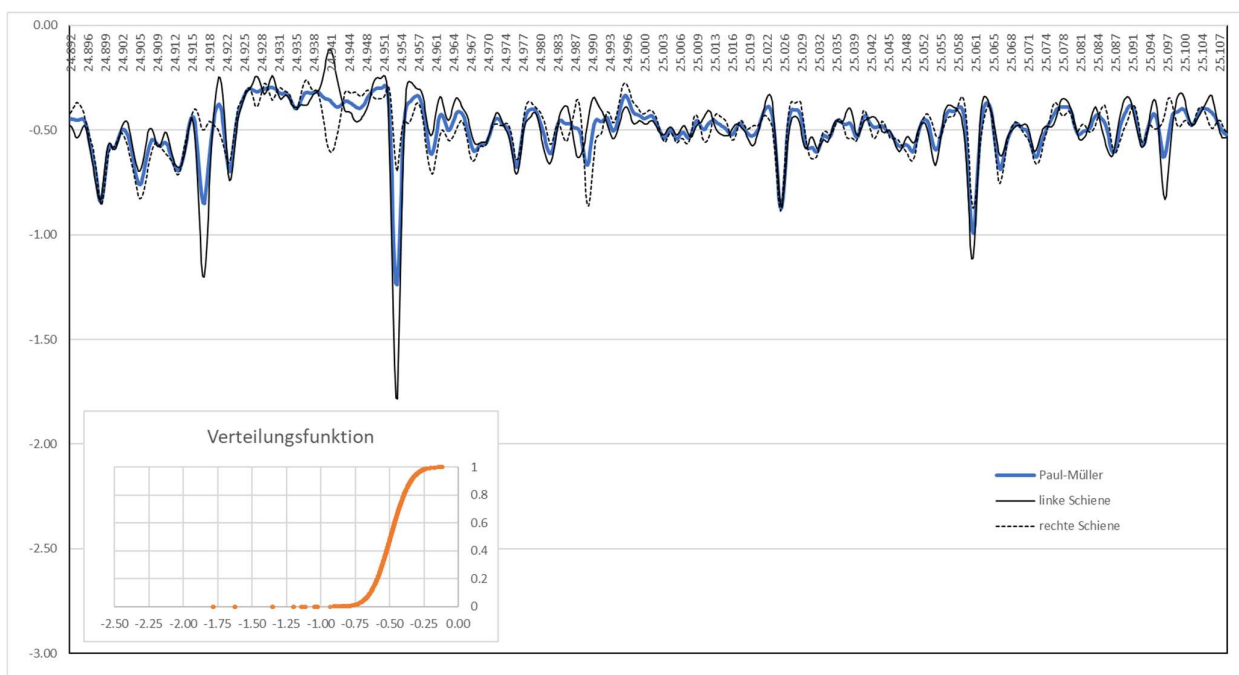


Abbildung 18: Eisenkungsverlauf Abschnitt Müller Besohlung, TPF Gruyères – Enney

Quelle: [6]

Beim Vergleich der Einsenkungsverläufe auf der TPF Teststrecke Gruyères – Enney lässt sich festhalten:

- Der unbesohlte Referenzabschnitt und der Abschnitt mit Tiflex Besohlung verhalten sich sehr ähnlich. Beide Abschnitte haben eine mittlere Einsenkung von knapp 0.7 mm.
- Der Abschnitt mit Müller Besohlung hat eine mittlere Einsenkung von knapp 0.5 mm. Er zeigt ein sehr steifes Oberbauverhalten. Das Resultat ist insofern speziell, als dass die Müller Besohlung sogar noch weniger Einsenkung aufweist als der unbesohlte Referenzabschnitt. Die Müller Besohlung hat ein sehr steifes Materialverhalten mit einer harten Oberfläche. Sie ist insbesondere bei Neubaugleisen mit starrem Unterbau eher ungeeignet, um die gewünschte Gleiselastizität zu erreichen.
- Die ganze Teststrecke wurde durchgehend mit einer Asphalttragschicht mit AC-Rail erstellt. Das führt auch hier zu einem eher steifen Verhalten des Gleises. Eine Verbesserung der Elastizität könnte mit weichen Zwischenlagen erreicht werden, was zu einer besseren Lastverteilung führen würde.
- Die sonst üblicherweise zu erwartende leichte Zunahme der Einsenkung bei besohnten Abschnitten kann bei der TPF Teststrecke nicht nachgewiesen werden.

Zwischenfazit zur Einsenkung des Gleises

Bei der Analyse aller oben aufgeführten Einsenkungsmessungen kann generell als Zwischenfazit festgehalten werden, dass der Unterbau mit AC-Rail deutlich steifer ist als der Unterbau mit einer PSS-Schicht. Deshalb sind beim Unterbau mit AC-Rail zusätzliche elastische Elemente notwendig, um die gewünschte Oberbauelastizität zu gewährleisten. Dies kann entweder mit Schwellenbesohlungen oder mit weichen Schienenzwischenlagen realisiert werden. Beim Einsatz weicher Schienenzwischenlagen ist jedoch der Lärmaspekt zu berücksichtigen.

6.6 Querverschiebewiderstand

ZB Engelbergthal

Die Messung des Querverschiebewiderstands (QVW) erfolgte bei der ZB im Engelbergthal im Sommer 2021 als Einzelmessung an besohlenen und unbesohlenen Schwellen nach der TU-München-Methode (auch DB-Methode genannt) im unbelasteten Zustand. Gemessen wurde nach dem Einbau sowie im konsolidierten Zustand. Das Kraft-Weg-Diagramm der Messungen ist in Abbildung 19 dargestellt.

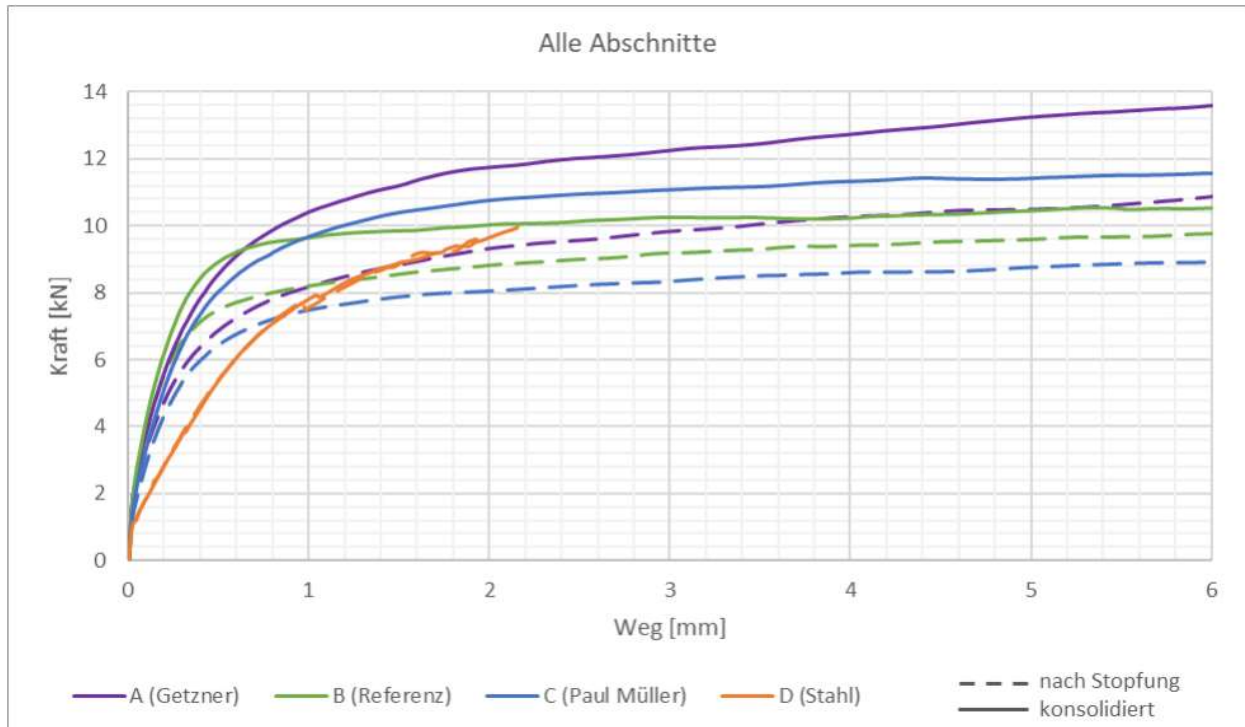


Abbildung 19: QVW aller Testabschnitte nach Einbau und im konsolidierten Zustand, ZB Engelbergthal

Quelle: [9]

Bei den Stahlschwellen lagen die QVW-Werte zu Beginn der Verschiebung unter denjenigen der Betonschwellen. Da sie aber stetig anstiegen, erreichten sie im konsolidierten Zustand bei ca. 2 mm denselben Wert wie die unbesohlenen Betonschwellen. Die Ergebnisse für die Stahlschwellen sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da das gewählte Messverfahren nur bedingt für diesen Schwellentyp geeignet ist. Dabei war der Verschiebeweg der Messung wegen der Rippenplatten auf ca. 2 mm begrenzt.

Bei den Betonschwellen zeigte sich, dass im konsolidierten Zustand die Schwellen mit Getzner Besohlung die höchsten QVW-Werte aufwiesen, danach folgten die Schwellen mit Müller Besohlung. Die tiefsten QVW-Werte wies die unbesohlte Betonschwelle auf. Dieses Verhalten ist auf die unterschiedlich starke Verkrallung der obersten Schotterschicht je nach Sohlenmaterial zurückzuführen. Bei der plastischen Besohlung ist dieser Effekt am ausgeprägtesten, während er bei der steifen Besohlung mit harter Oberfläche deutlich geringer ist. Bei der unbesohnten Betonschwelle können sich die Schottersteine i.d.R. gar nicht verkrallen.

TPF Gruyères – Enney

Die Messung des QVW erfolgte bei der TPF auf der Teststrecke Gruyères – Enney in der Nacht vom 23./24.08.2021 als Einzelmessung an besohnten und unbesohnten Schwellen nach der TU-München-Methode (auch DB-Methode genannt) im unbelasteten Zustand. Gemessen wurde im konsolidierten Zustand. Die untersuchten Schwellen befinden sich jeweils im Bereich des Vollbogens und liegen symmetrisch zur Bogenmitte. Die QVW-Messungen wurden an jeder vierten Schwelle durchgeführt. Die Verschiebung der Schwellen erfolgte dabei zur Bogenaussenseite.

Die QVW-Werte sowie deren Streuung (Standardabweichung) sind in Tabelle 11 zu finden. Das Kraft-Weg-Diagramm der Messungen ist in Abbildung 20 dargestellt.

Tabelle 11: Mittelwerte und Streuung der QVW-Messungen, TPF Gruyères – Enney Quelle: [7]

	A1 (Ref.)		A2 (Tiflex)		A3 (Müller)	
	MW [kN]	σ [kN]	MW [kN]	σ [kN]	MW [kN]	σ [kN]
@2mm	10.77	1.93	10.66	0.83	8.00	0.72
@4mm	11.73	1.39	11.61	0.79	8.70	0.78

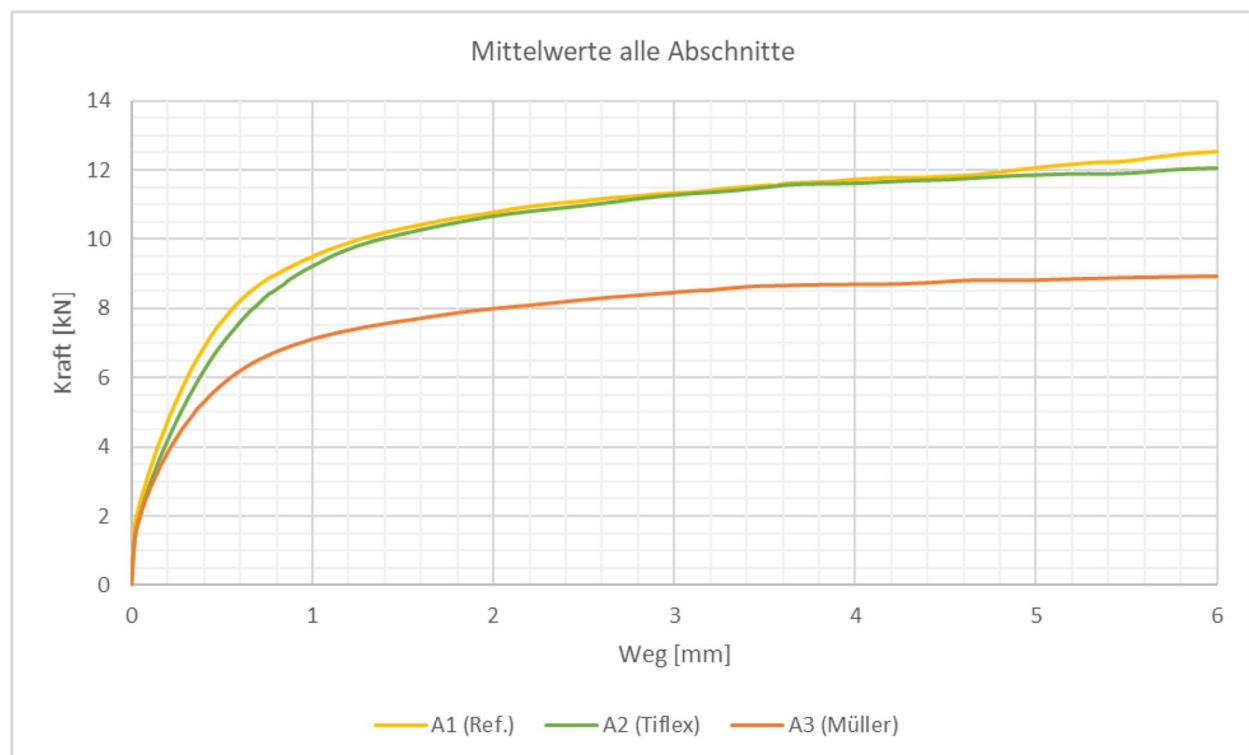


Abbildung 20: QVW aller Testabschnitte im konsolidierten Zustand, TPF Gruyères - Enney

Quelle: [9]

Sowohl die unbesohlenen Betonschwellen als auch die Schwellen mit der Tiflex Besohlung wiesen insgesamt die höchsten QVW-Werte auf. Teilweise lagen die unbesohlenen Betonschwellen geringfügig über den Schwellen mit Tiflex Besohlung. Signifikant tiefer lagen hingegen die QVW-Werte der Schwellen mit Müller Besohlung. Das unterschiedliche Verhalten der Besohlungen ist auf die Materialeigenschaften zurückzuführen. Bei den elastischen Sohlen entsteht eine grössere Kontaktfläche als bei den steifen Sohlen mit harter Oberfläche. Eher untypisch war in diesem Fall, dass die unbesohlenen Betonschwellen gleich gut resp. sogar besser abschnitten als die Schwellen mit Besohlung. Bei den Streuungen ist klar zu erkennen, dass der unbesohlte Referenzabschnitt eine deutlich höhere Varianz aufwies als die besohlenen Abschnitte. Die im Vergleich zu unbesohlenen Schwellen grössere Homogenität der Bettung ist eine immer wieder zu erkennende Eigenschaft von besohlenen Betonschwellen.

Zwischenfazit zum Querverschiebewiderstand

Als Zwischenfazit kann festgehalten werden, dass Besohlungen im Vergleich zu unbesohlenen Betonschwellen i.d.R. zu höheren QVW-Werten führen. Der Anstieg hängt u.a. vom Sohlenmaterial ab. Die plastischen USP bewirken eine gute Verkrallung des Schotters und eine grosse Kontaktfläche, was den höchsten QVW-Wert bewirkt. Elastische Besohlungen vergrössern ebenfalls die Kontaktfläche, so dass deren QVW-Werte im mittleren Bereich liegen. Die steifen Besohlungen mit harter Oberfläche haben den kleinsten QVW-Wert, da weder eine Verkrallung noch eine grössere Kontaktfläche entstehen. Gegenüber den unbesohlenen Schwellen weisen die besohlenen Schwellen immer eine deutlich niedrigere Streuung auf, was auf ein homogeneres Gleis mit weniger Hohllagen hindeutet. Diese Ergebnisse der Meterspur bestätigen die früheren Resultate der Normalspur.

In der Dissertation von Patrick Braess [10] wird der QVW-Verlauf von unbesohlenen Betonschwellen mit und ohne Sicherungskappen als Regression angegeben. In Abbildung 21 sind anhand der QVW-Messungen bei der ZB im Engelbergertal zusätzlich die beiden Regressionsverläufe von unbesohlenen Betonschwellen mit und ohne Sicherungskappen nach [10] gestrichelt in Rot dargestellt. Wie zu erkennen ist, liegen sämtliche Messwerte im konsolidierten Zustand innerhalb dieser beiden Funktionsverläufe. Die Plausibilität der QVW-Messwerte ist damit gegeben.

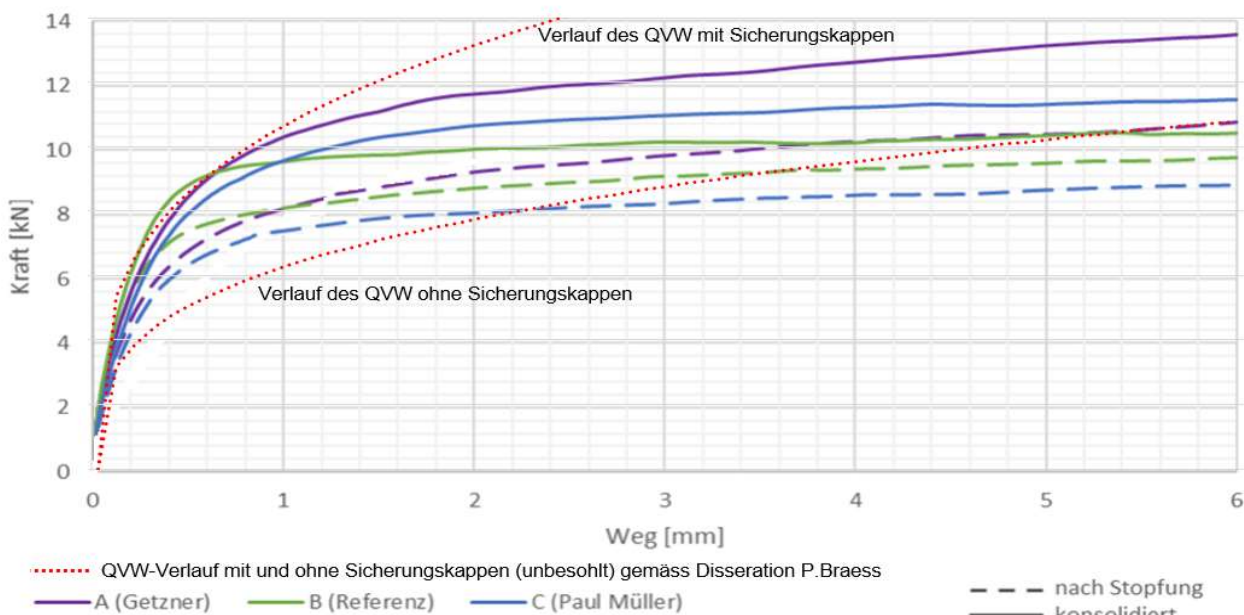


Abbildung 21: QVW-Verlauf bei der ZB inkl. Verlauf mit und ohne Sicherungskappen

Quelle: [9,10, eigene Darstellung]

6.7 Bogenatmung

MGB Station Kalpetran

Bei der MGB wurde die Bogenatmungsmessung vor und nach der Station Kalpetran an zwei Bögen mit dem Mephisto-Messgerät durchgeführt. Beide Bögen haben einen Radius von $R = 95 \text{ m}$ und sind mit Betonschwellen mit Sicherungskappen und Schienenprofil 46E1 ausgestattet.

Im Bogen 1 sind unbesohlte Betonschwellen als Referenz eingebaut und im Bogen 2 Betonschwellen mit Müller Besohlung. Damit konnte aufgrund der gleichen Lage und Randbedingungen überprüft werden, ob ein Einfluss der Schwellenbesohlung auf die Bogenatmung existiert. Allerdings muss hier der nicht unerhebliche Einfluss der Sicherungskappen auf den QVW berücksichtigt werden (siehe Abbildung 21). Die Angaben zu den beiden Bögen bei der MGB Station Kalpetran sind in Tabelle 12 zu finden.

Tabelle 12: Angaben zu den beiden untersuchten Bögen, MGB Station Kalpetran

Quelle: [4]

Messzeitraum	10.08.2021	
Bogenradius	95 m	95 m
Kilometrierung	km 19.4 – 19.5	km 19.82 – 19.86
Überhöhung	SOLL: 35 mm, IST: 34 - 35 mm	SOLL: 23 mm, IST: 20 - 24 mm
Längsneigung	Ansteigend bis 4.26 ‰	0.06 ‰
Schwelle	Betonschwellen VöV M2	Betonschwellen VöV M2 mit USP
Spurweite	1000 mm	
Schwellenabstand	0,6 m (Achse – Achse)	
Schiene	46E1	
Rollmaterial und Betrieb	1 Linie im Halbstundentakt von 6.00 bis 23.00 Uhr, zusätzlich einige Güterzüge und Glacier Express	
Geschwindigkeit	35 km/h	
Unterbau	PSS	Asphalt
Letzte Stopfung	2019	2020

Die Diagramme zur Messung der Bogenatmung sind in den nachfolgenden Abbildungen zu finden. Jedes Diagramm ist zweigeteilt, im linken Bereich ist die Bogenatmung zu sehen und im rechten Bereich der Verlauf der Schienenfuss- und Lufttemperatur. Abbildung 22 zeigt die Resultate für den Bogen 1 mit unbesohlenen Betonschwellen (Referenz) und Abbildung 23 die Ergebnisse für den Bogen 2 mit besohlenen Betonschwellen.

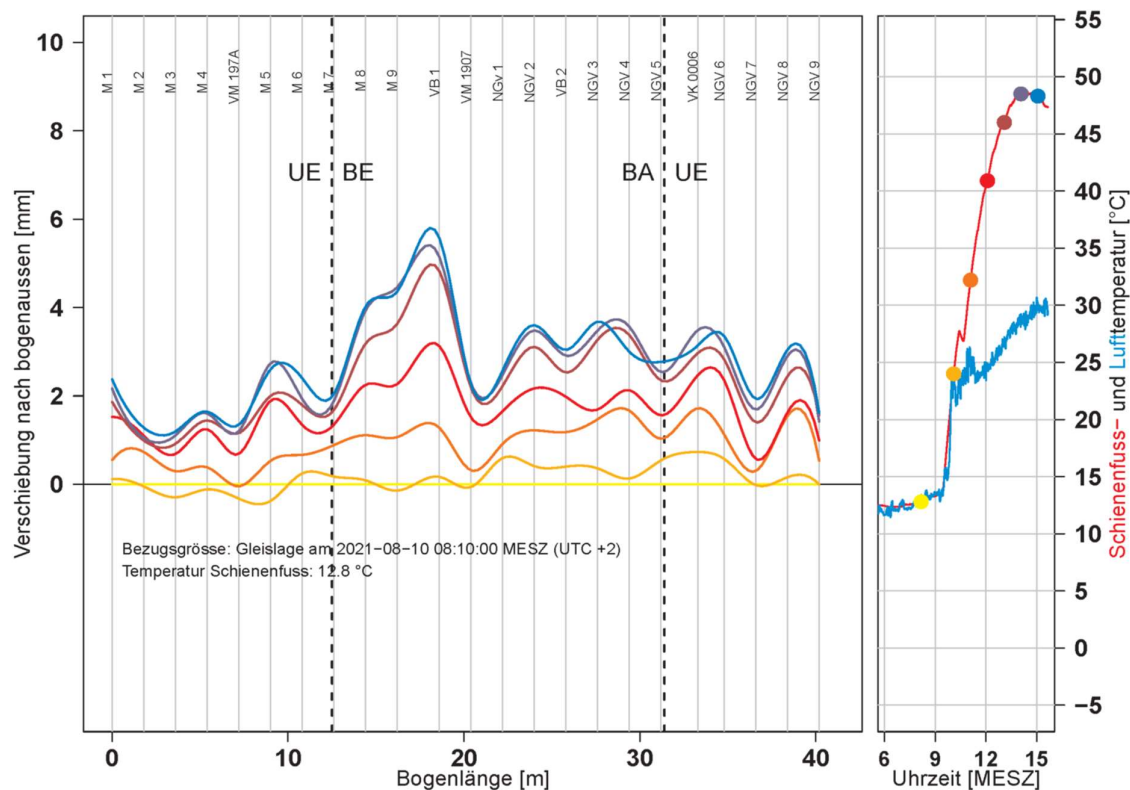


Abbildung 22: Bogenatmung Bogen 1, R = 95 m, unbesohlte Betonschwellen, MGB Kalpetran

Quelle: [4]

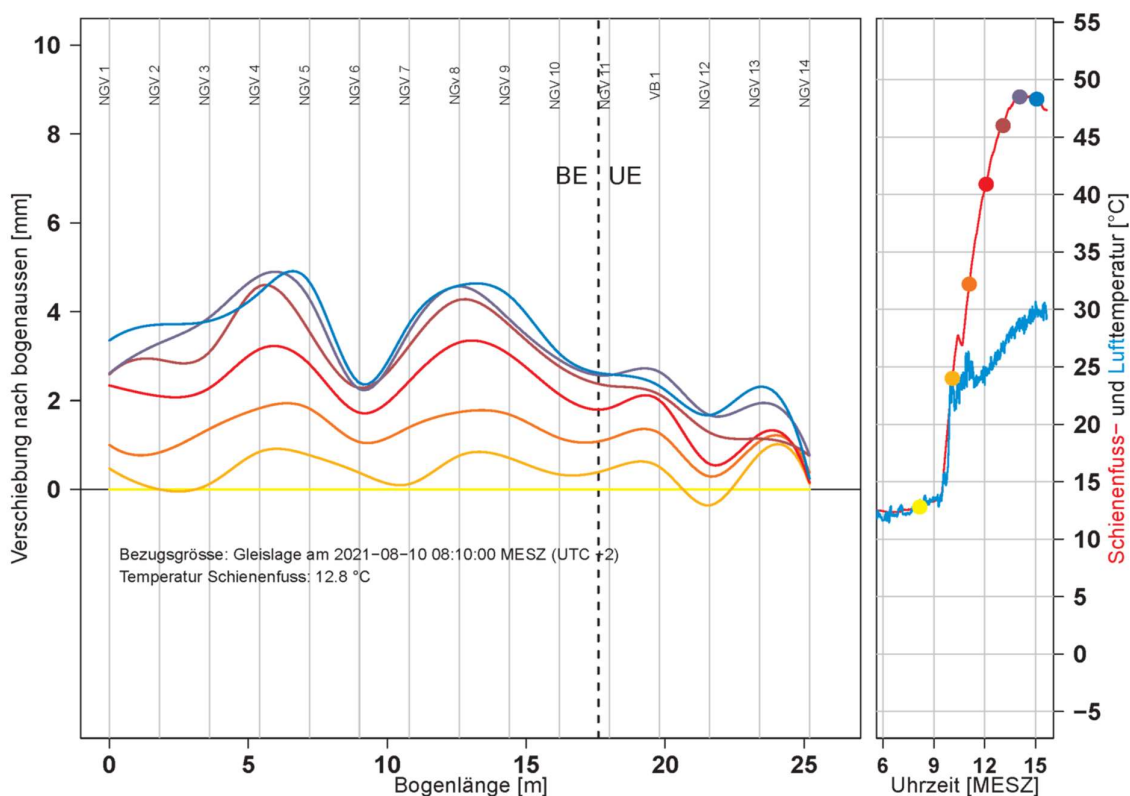


Abbildung 23: Bogenatmung Bogen 2, R = 95 m, besohlte Betonschwellen, MGB Kalpetran

Quelle: [4]

Aufgrund der Topografie erreichte der Bogen 1 mit unbesohlenen Betonschwellen erst bei der zweiten Messung um 10:00 Uhr die Neutraltemperatur. Grössere Bewegungen wurden jedoch zu diesem Zeitpunkt noch nicht festgestellt. In den folgenden Stunden verschob sich das Gleis gleichmässig nach bogenaussen. Lokale Fixpunkte waren nicht entstanden, jedoch waren die Verschiebungen nach bogenaussen doch verschieden gross. Die Varianz betrug zwischen knapp 2 mm und knapp 6 mm. An einer Stelle ergab sich eine lokale Verdrückung von etwa 4 mm, bei einer Gesamtatmung von maximal 6 mm. Diese lokale Verdrückung geschah auf einem recht kurzen Abschnitt innerhalb von 3 Schwellen resp. einer Länge von 1.80 m. Durch viele Atmungszyklen kann sich dieser lokale Schwachpunkt zukünftig akzentuieren und dann auf langer Sicht zu grösseren Verdrückungen führen.

Der Bogen 2 mit besohlenen Betonschwellen bewegte sich ebenfalls gleichmässig nach bogenaussen, im Übergangsbogen nahm die Bogenatmung wie zu erwarten kontinuierlich ab. Die Bogenatmung war mit bis zu 5 mm marginal geringer als im Referenzbogen ohne Schwellenbesohlung. Lokale Fixpunkte waren nicht entstanden, die Verschiebungen nach bogenaussen betrugen zwischen gut 2 mm und knapp 5 mm. Die Bogenatmung war also im Vergleich zum Referenzbogen gleichmässiger und weniger ausgeprägt. Es gab jedoch auch in diesem Bogen eine leichte Verdrückung, wo sich auf kurzer Distanz ein Bewegungsunterschied von knapp 3 mm bildete. Im Messbericht [4] wird angemerkt, dass davon auszugehen ist, dass die Bogenatmung aufgrund der Neulage des Gleises bei der Messung im Laufe der Jahre grösser wird, und sich dabei auch die Unregelmässigkeiten akzentuieren werden. Mit einhergehender Konsolidierung des Gleises dürfte sich allerdings auch der Querverschiebewiderstand erhöhen, was wiederum zu einer Reduzierung der Bogenatmung führt. Zur Ergänzung sei noch darauf hingewiesen, dass der Bogen durch den Bahnübergang lokal fixiert ist. Der Übergangspunkt vom Vollbogen zum Übergangsbogen befindet sich genau in der Mitte des Bahnübergangs. Der erste Messpunkt NGV 1 befindet sich ca. 3 m vom Bahnübergang entfernt und wies am Mittag eine Verschiebung von 4 mm auf. Es gibt somit auch am Ende des Bahnübergangs einen gewissen Versatz in der Gleislage.

Zwischenfazit zur Bogenatmung

Beide Bögen liegen zum Zeitpunkt der Messung gut und stabil. Die Bogenatmung ist insgesamt gering und weitestgehend gleichmässig. Nichtsdestotrotz zeichnen sich bereits jetzt Ungleichmässigkeiten in der Bogenatmung ab. Auf lange Sicht werden sich diese wahrscheinlich akzentuieren. Es kann keine allgemein belastbare Aussage über die Unterschiede zwischen den beiden Oberbauarten (besohlte vs. unbesohlte Betonschwellen) gemacht werden, da die Sicherungskappen einen wesentlichen Einfluss auf den Querverschiebewiderstand haben.

Tendenziell ist die Bogenatmung im Bogen mit besohlenen Schwellen jedoch etwas weniger ausgeprägt und auch gleichmässiger im Vergleich zum Referenzbogen. Die Frage für die Zukunft ist, welcher Effekt im besohlenen Abschnitt stärker ausgeprägt sein wird, das Wachstum der bereits erkennbaren Unregelmässigkeiten oder das gleichmässigeres Verhalten des Gleises aufgrund der Schwellenbesohlung. Dieser Einfluss auf die Bogenatmung könnte durch eine Nachmessung in vier bis fünf Jahren herausgefunden werden.

6.8 Gleislagegüte

ZB Engelbergtal

Die Gleislage bei der ZB Teststrecke im Engelbergtal wurde vor und nach dem Umbau erfasst. In Abbildung 24 sind die Messungen dargestellt. Die Abschnitte sind wie folgt farblich gekennzeichnet:

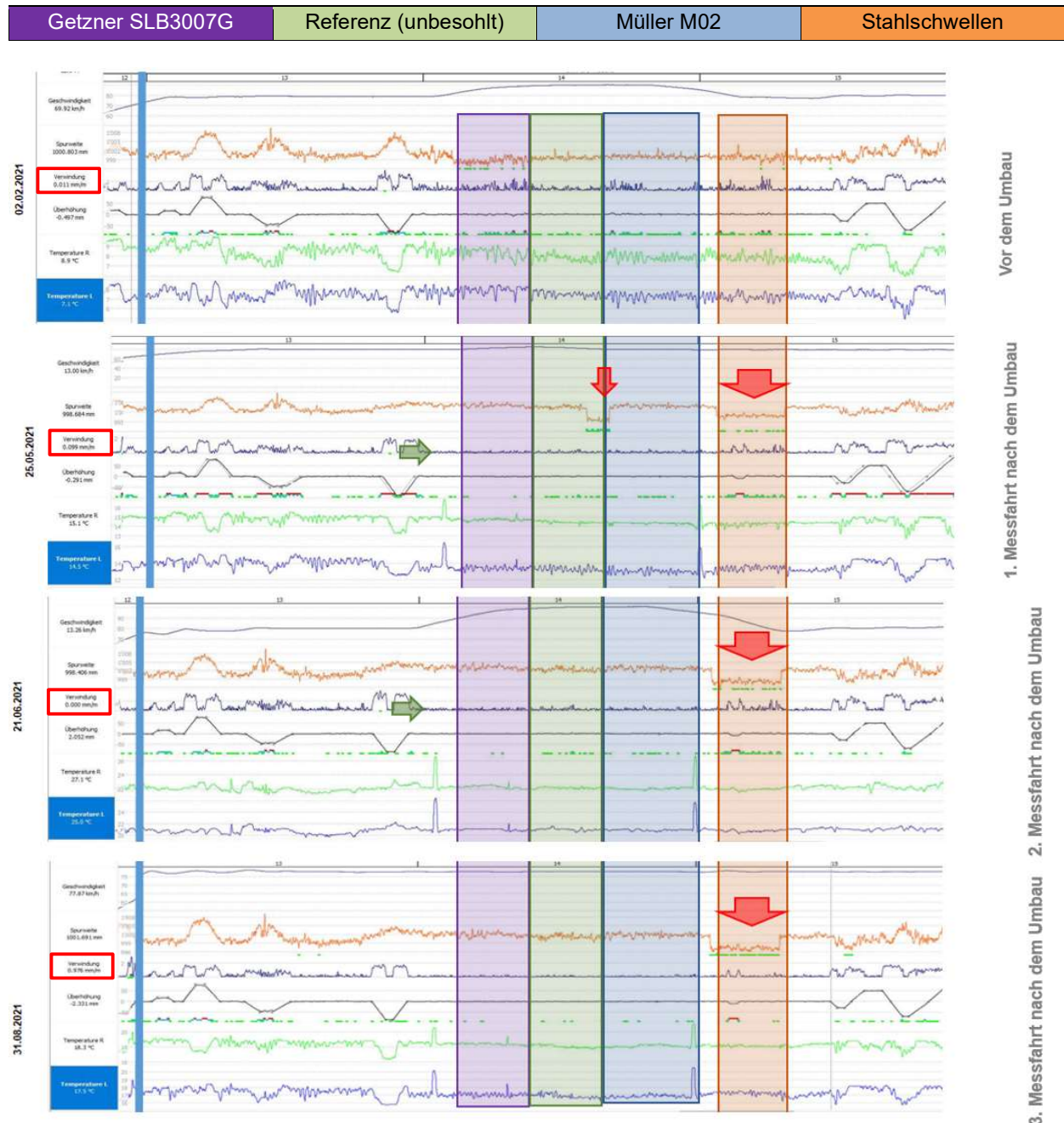


Abbildung 24: Gleislage in zeitlicher Abfolge vor und nach dem Umbau, ZB Engelbergtal

Quelle: [9]

Bei der Verwindung kann festgestellt werden, dass sich die Gleislage durch den Umbau von Stahl- auf Betonschwellen deutlich verbessert hat. Der Einfluss der Besohlung kann zum heutigen Zeitpunkt jedoch noch nicht beurteilt werden. Dazu müsste die Gleislage noch einige Jahre beobachtet werden.

MGB Dieni – Sedrun

Die Gleislage bei der MGB Teststrecke Dieni – Sedrun wurde im Dezember 2022 ausgewertet. Einen unbesohlenen Referenzabschnitt gibt es auf dieser Teststrecke leider nicht. In Abbildung 25 sind die Gleislagemessungen des Versuchsabschnitts V1 mit Getzner Besohlungen dargestellt und in Abbildung 26 sind diejenigen des Versuchsabschnitts V2 mit Müller Besohlungen zu sehen.

Analyse Gleislage ATM 02.12.2022

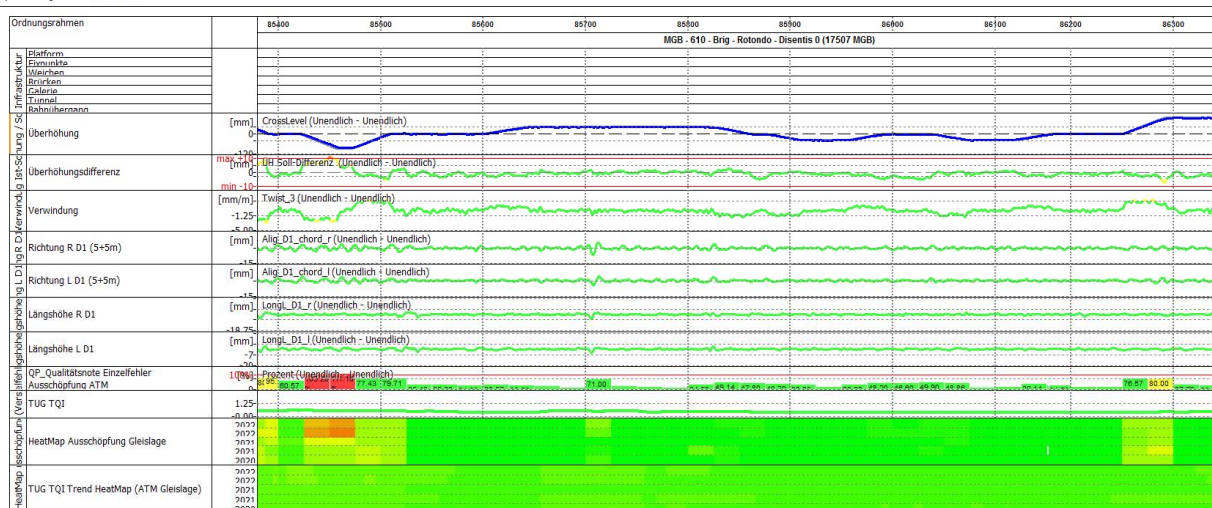


Abbildung 25: Gleislage im Abschnitt V1 mit Getzner Besohlung, MGB Dieni – Sedrun

Quelle: [8]

Analyse Gleislage ATM 02.12.2022

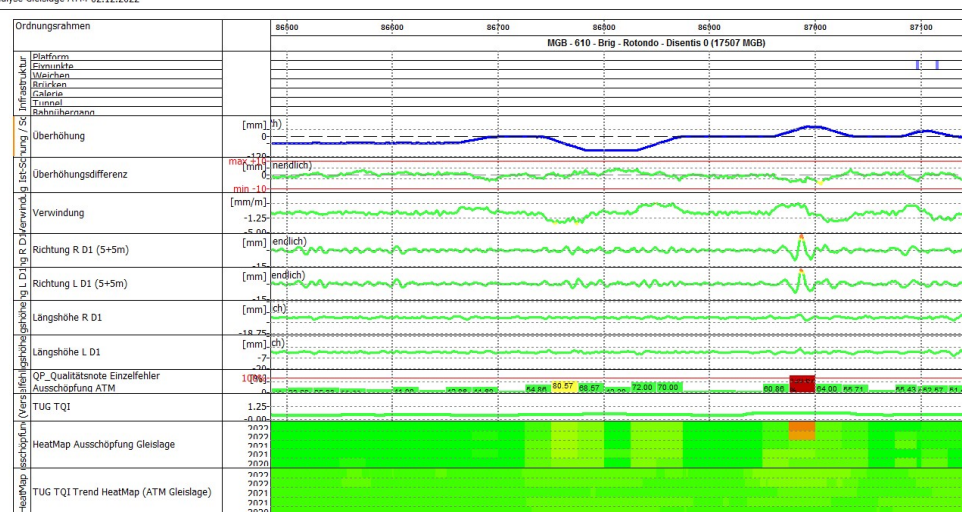


Abbildung 26: Gleislage im Abschnitt V2 mit Müller Besohlung, MGB Dieni – Sedrun

Quelle: [8]

Für einen Vergleich der Gleislage der beiden Sohlentypen ist es allerdings noch verfrüht. Wie in den Diagrammen zu erkennen ist, sind noch keinerlei gravierende Unterschiede in der Gleislagequalität aufgetreten. Neben wenigen Einzelfehlern kann die Gleislage als sehr gut betrachtet werden. Eine abschliessende Interpretation dürfte allerdings erst in ein paar Jahren Sinn machen.

MGB Station Kalpetran

Die Gleislage bei der MGB Teststrecke Station Kalpetran wurde im Dezember 2022 ausgewertet. Abbildung 27 zeigt die Gleislagemessung im unbesohnten Referenzabschnitt R1 sowie im Versuchsabschnitt V3 mit Müller Besohlungen.

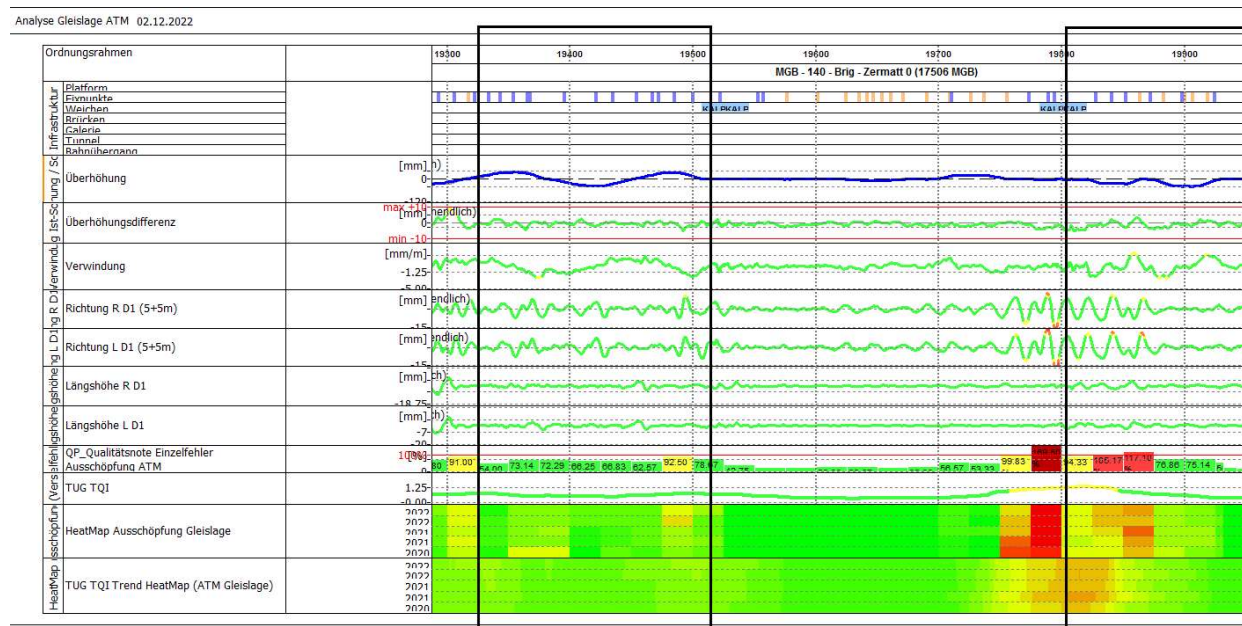


Abbildung 27: Gleislage im Abschnitt R1 (links) und im Abschnitt V3 (rechts), MGB Kalpetran

Quelle: [8]

Für einen Vergleich der Gleislage zwischen unbesohnten und besohnten Betonschwellen ist es allerdings noch verfrüht. Wie im Diagramm zu erkennen ist, verhalten sich beide Bögen in etwa ähnlich. Eine abschliessende Interpretation dürfte allerdings erst in ein paar Jahren Sinn machen.

Zwischenfazit zur Gleislagegüte

Bei der Erneuerung von alten Stahlschwellengleisen ist eine Verbesserung der Gleislagegüte in den neuen Betonschwellengleisen sichtbar. Aufgrund der kurzen Betriebsdauer lassen sich jedoch noch keine Unterschiede zwischen den unbesohnten Referenzabschnitten und den Versuchsabschnitten mit Besohlung erkennen. Aufgrund der Erfahrungen bei der Normalspur lässt sich auch sagen, dass es bezüglich der Gleislagegüte kaum Unterschiede zwischen den Sohlentypen geben wird. Es wird jedoch erwartet, dass im Verlaufe der Zeit die Besohlungen eine homogenere Gleislage mit weniger Hohllagen bewirken. Dies wird schlussendlich den gewünschten positiven Effekt bezüglich der LCC-Kosten ergeben. Um mehr Erkenntnisse bezüglich der Gleislagegüte bei den vorliegenden Teststrecken zu gewinnen, werden Nachmessungen der Gleislage in ein paar Jahren empfohlen.

6.9 Erschütterungen

ZB Engelbergtal

Bei der ZB im Engelbergtal wurde mittels Schwingungsmessungen der Einfluss verschiedener Oberbautypen auf die Erschütterungen in Gleisnähe ermittelt. Die Messungen erfolgten in einem Abstand von 8 m zum Gleis. Die Nullmessung erfolgte im Herbst 2020 vor dem Umbau, eine erste Folgemessung nach dem Umbau im Juni 2021 und eine zweite Folgemessung im Juli 2022. Die Ergebnisse der ersten Folgemessung nach dem Umbau sind in Abbildung 28 dargestellt.

An dieser Stelle sei jedoch ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die eingebauten Besohlungen weder zum Erschütterungsschutz noch zur Luftschallreduzierung geeignet sind. Die Hauptfunktion der hier untersuchten Sohlentypen ist die Schotterschonung und die Verbesserung der Gleislage.

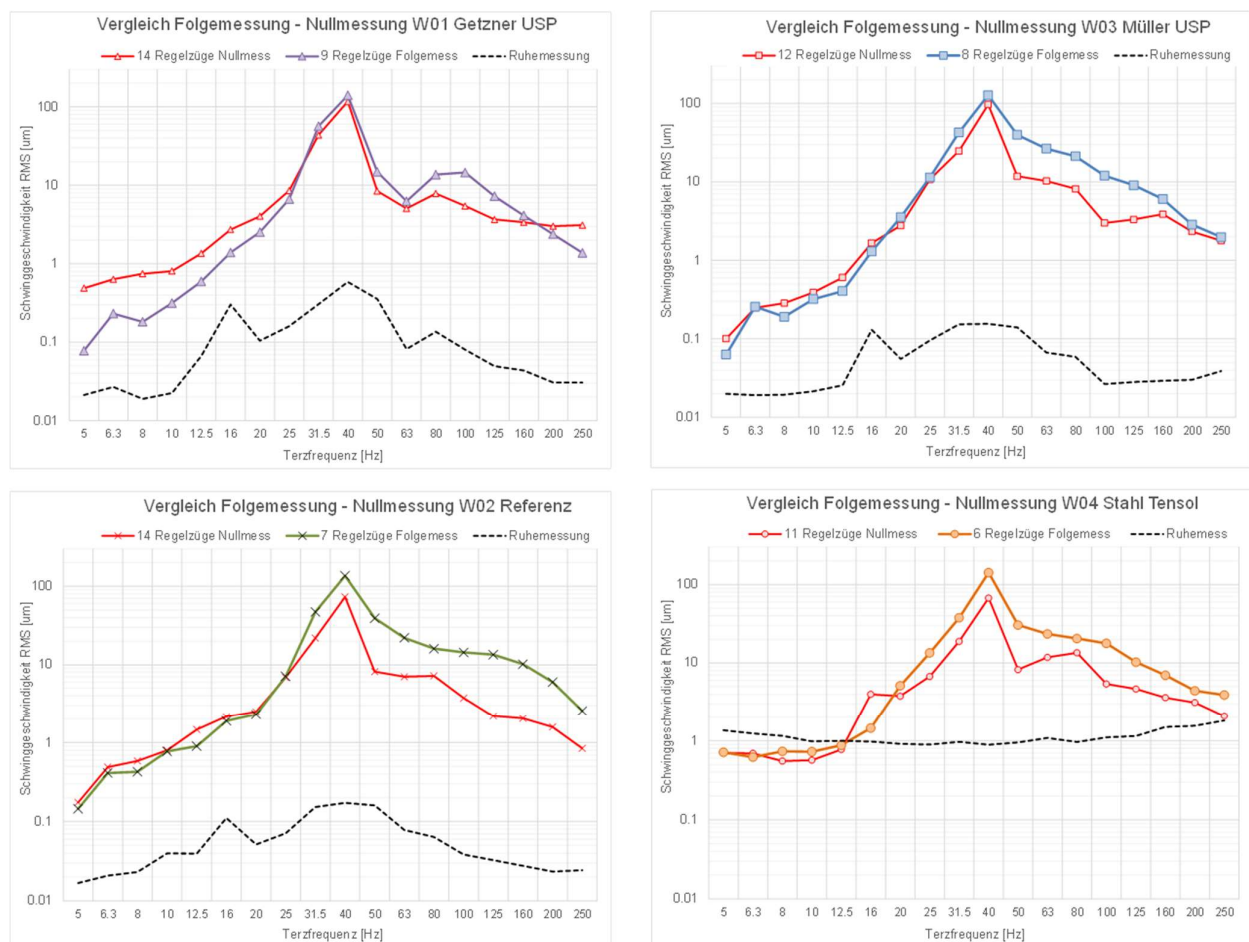


Abbildung 28: Erschütterungen der ersten Folgemessung nach dem Umbau, ZB Engelbergtal

Quelle: [9]

Nach der Fahrbahnerneuerung wurde eine Erschütterungszunahme bei der ersten Messung in allen Abschnitten für $f > 25$ Hz festgestellt, wobei sie nach Oberbau unterschiedlich ausgeprägt ist. Maximale Schwingungen treten bei ca. 40 Hz (Schwellenfachfrequenz für 80 km/h) auf, wobei selbst diese in der Größenordnung von 0.1 mm/s sehr gering ausfallen. Im tieffrequenten Bereich $f < 25$ Hz ist tendenziell eine Abnahme der Erschütterungen zu verzeichnen. Bei einem Vergleich können der Getzner Besohlung in diesem Frequenzbereich positive Ergebnisse attestiert werden.

Im Juli 2022 fand die zweite Folgemessung im konsolidierten Gleis statt. Die Differenzen zwischen der Nullmessung vor dem Umbau und der ersten Folgemessung im Juni 2021 sowie der zweiten Folgemessung im Juli 2022 sind in Abbildung 29 dargestellt.

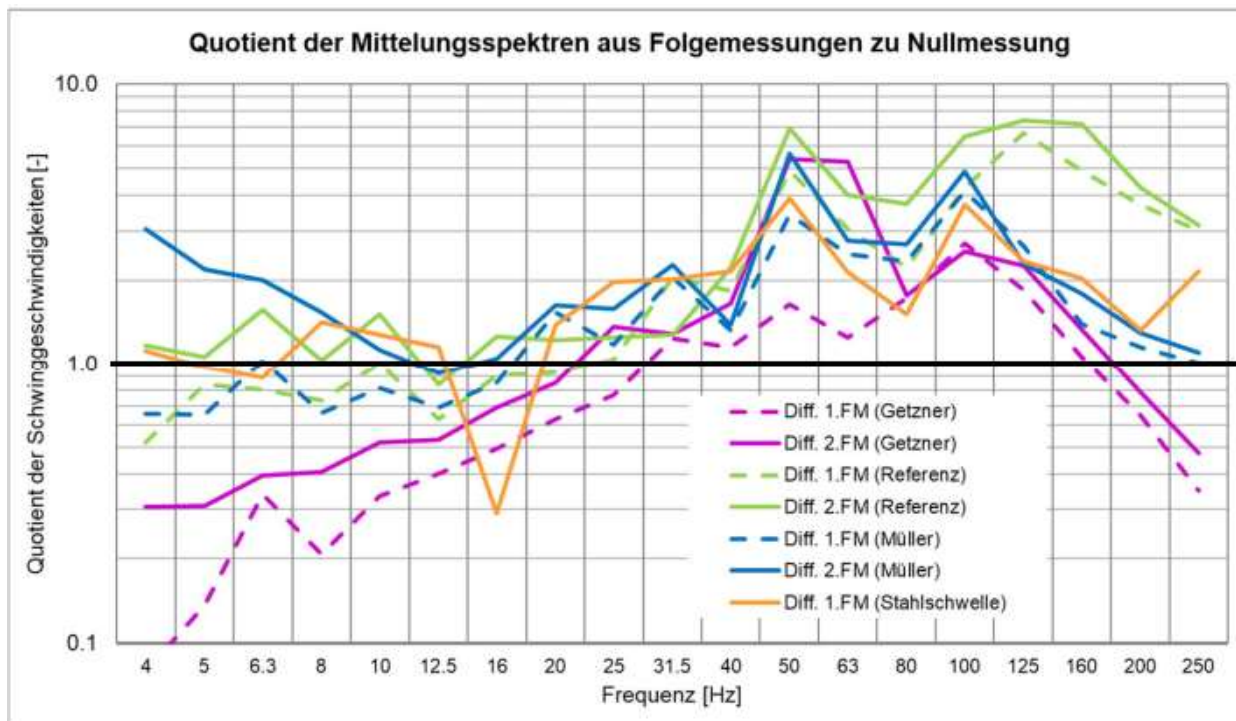


Abbildung 29: Differenzspektren der Erschütterung aus Folgemessungen zur Nullmessung, ZB Engelbergthal Quelle: [9]

Die zweite Folgemessung im Juli 2022 bestätigt die Ergebnisse der ersten Folgemessung nach dem Umbau. Im nunmehr konsolidierten Zustand dürften sich die Schottersteine der obersten Lage vollständig in die Schwellenbesohlung eingearbeitet haben. Damit nimmt die Steifigkeit der Besohlung aufgrund der effektiv geringeren Materialdicke über die Zeit zu, was zu einer Zunahme der Erschütterungen über sämtliche Frequenzen führen dürfte. Besonders ausgeprägt ist dieses Phänomen bei den plastischen Besohlungen, da der elastische Anteil mit der Zeit immer weniger zum Tragen kommt. Der Abschnitt mit Müller Besohlung sowie der Referenzabschnitt ohne Besohlung zeigen eine ähnliche Tendenz, wenn auch weniger stark ausgeprägt.

Zwischenfazit zu den Erschütterungen

Die Messungen an den ZB Teststrecke im Engelbergthal zeigen, dass der Totalumbau mit dem neuen Unterbau (AC-Rail) generell zu einer Erschütterungszunahme führt, im vorliegenden Fall sind die Schwingungen jedoch sehr gering. Dennoch ist diese Erschütterungsproblematik im dicht bebauten Siedlungsgebiet zu beachten.

Es sei hier nochmals daran erinnert, dass die hier eingebauten steifen Besohlungen weder zum Erschütterungsschutz noch zur Luftschallreduzierung geeignet sind. Zum Erschütterungsschutz sind weiche Besohlungen mit $C_{stat} < 0.15 \text{ N/mm}^3$ erforderlich. Ein entsprechender Versuch läuft momentan bei der RhB im Arosa-Tunnel. Dort werden weiche Getzner Besohlungen des Typs SLS1308 getestet.

6.10 Luftschall

ZB Engelbergthal

Bei der ZB im Engelbergthal wurden gleichzeitig zu den Erschütterungsmessungen auch Luftschallmessungen durchgeführt. Diese Messungen erfolgte standardisiert in 7.5 m Distanz zur Gleisachse und 1.0 m über der Schienenoberkante. Die Ergebnisse der Luftschallmessungen sind in Abbildung 30 dargestellt.

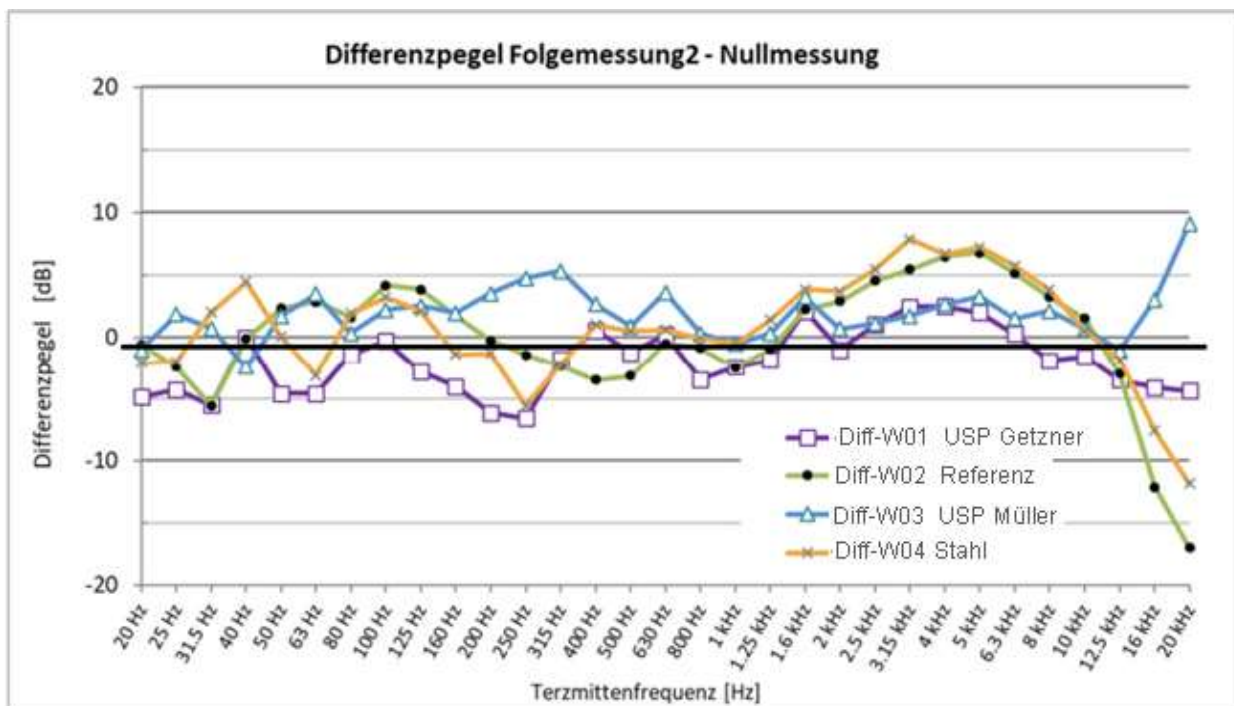


Abbildung 30: Differenzpegel der Luftschallmessung, ZB Engelbergthal

Quelle: [9]

Die zweite Folgemessung nach der Fahrbahnerneuerung liefert in allen Abschnitten ähnlich hohe Vorbeifahrtpegel. Die spektralen Unterschiede sind allerdings wesentlich geringer als bei der ersten Messung nach dem Umbau. Der Abschnitt W01 mit Getzner Besohlung verhält sich bezüglich des Aussenschalls etwas günstiger als die anderen Versuchsabschnitte. Die Schallmessungen zeigen ausserdem, dass Unstetigkeiten am Oberbau die Messwerte stark beeinflussen können. Die Analyse der zweiten Messung erlaubt den Schluss, dass die Besohlung keinen relevanten Einfluss auf den Aussenschallpegel hat, der Oberbautyp jedoch erhebliche spektrale Veränderungen bewirkt. Zudem dürfte die Schienenrauheit auch einen gewissen Anteil ausmachen, siehe Kapitel 6.2.

Zwischenfazit zum Luftschall

Die hier untersuchten steifen Schwellenbesohlungen haben i.d.R. keinen oder nur einen ganz geringen Einfluss auf den Luftschall. Dies deckt sich mit den Erfahrungen bei der Normalspur. Falls jedoch zum Erschütterungsschutz weiche Besohlungen zum Einsatz kommen sollten, ist auch ein Augenmerk auf den Luftschall zu legen, da weich gelagerte Betonschwellen freier schwingen können.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Bezüglich der **Schlupfwellen** haben die Erfahrungen bei der MVR gezeigt, dass die Kombination aus besohlenen Betonschwellen und weichen Schienenzwischenlagen das Schlupfwellenwachstum deutlich reduzieren kann. Es konnte allerdings nicht verifiziert werden, welcher Anteil der Reduzierung der Schienenstahlgüte R400 zuzuschreiben ist.

Für die **Einsenkung des Gleises** kann generell festgehalten werden, dass der Unterbau mit AC-Rail deutlich steifer ist als der Unterbau mit einer PSS-Schicht. Deshalb sind beim Unterbau mit AC-Rail zusätzliche elastische Elemente notwendig, um die gewünschte Oberbauelastizität zu gewährleisten. Dies kann entweder mit Schwellenbesohlungen oder mit weichen Schienenzwischenlagen realisiert werden. Beim Einsatz weicher Schienenzwischenlagen ist jedoch der Lärmaspekt zu berücksichtigen.

Beim **Querverschiebewiderstand** hat sich gezeigt, dass Besohlungen im Vergleich zu unbesohlenen Betonschwellen i.d.R. zu höheren QVW-Werten führen. Der Anstieg hängt u.a. vom Sohlenmaterial ab. Die plastischen USP bewirken eine gute Verkrallung des Schotters und eine grosse Kontaktfläche, was den höchsten QVW-Wert bewirkt. Elastische Besohlungen vergrössern ebenfalls die Kontaktfläche, so dass deren QVW-Werte im mittleren Bereich liegen. Die steifen Besohlungen mit harter Oberfläche haben den kleinsten QVW-Wert, da weder eine Verkrallung noch eine grössere Kontaktfläche entstehen. Gegenüber den unbesohlenen Schwellen weisen die besohlenen Schwellen immer eine deutlich niedrigere Streuung auf, was auf ein homogeneres Gleis mit weniger Hohllagen hindeutet.

Die Messung der **Bogenatmung** bei der MGB Station Kalpetran hat gezeigt, dass beide Bögen (unbesohlte / besohlte Betonschwellen) gut und stabil lagen. Die Atmung ist insgesamt gering und weitestgehend gleichmässig. Nichtsdestotrotz zeichnen sich bereits jetzt Ungleichmässigkeiten in der Bogenatmung ab. Auf lange Sicht werden sich diese wahrscheinlich akzentuieren. Es kann keine allgemein belastbare Aussage über die Unterschiede zwischen den beiden Oberbauarten gemacht werden, da die Sicherungskappen einen wesentlichen Einfluss auf den Querverschiebewiderstand haben. Tendenziell ist die Bogenatmung im Bogen mit besohlenen Schwellen jedoch etwas weniger ausgeprägt und auch gleichmässiger im Vergleich zum Referenzbogen. Nachmessungen in ein paar Jahren wären sinnvoll, um diesen ersten Trend zu verifizieren.

Für die **Gleislagegüte** kann gesagt werden, dass bei der Erneuerung von alten Stahlschwellengleisen mit neuen Betonschwellengleisen eine signifikante Verbesserung der Gleislagegüte erzielt werden kann. Aufgrund der kurzen Betriebsdauer lassen sich jedoch noch keine Unterschiede zwischen den unbesohlenen Referenzabschnitten und den Versuchsabschnitten mit besohlenen Betonschwellen erkennen. Es wird jedoch erwartet, dass im Verlaufe der Zeit die Besohlungen eine homogenere Gleislage mit weniger Hohllagen bewirken. Dies wird schlussendlich den gewünschten positiven Effekt bezüglich der LCC-Kosten ergeben. Um mehr Erkenntnisse bei den vorliegenden Teststrecken zu gewinnen, werden Nachmessungen der Gleislage in ein paar Jahren empfohlen.

Die in diesem Projekt eingebauten steifen Besohlungen sind weder zum Erschütterungsschutz noch zur Luftschallreduzierung geeignet. Deshalb sind die Aussagen zu den **Erschütterungen** und zum **Luftschall** wenig aussagekräftig. Die Messungen bei der ZB ergaben nach dem Umbau eine leichte Erschütterungszunahme. Diese Erschütterungsproblematik ist im dicht bebauten Siedlungsgebiet zu beachten. Die hier untersuchten steifen Schwellenbesohlungen haben i.d.R. keinen oder nur einen ganz geringen Einfluss auf den Luftschall. Falls jedoch zum Erschütterungsschutz weiche Besohlungen mit $C_{stat} < 0.15 \text{ N/mm}^3$ zum Einsatz kommen sollten, ist ein Augenmerk auf den Luftschall zu legen.

7.2 Empfehlungen

Aufgrund der QVW-Messungen und der sich daraus ergebenden Erkenntnisse wird in engen Bögen der Einsatz von plastischen Besohlungen mit $C_{\text{stat}} > 0.25 \text{ N/mm}^3$ empfohlen. Ab welchem Radius dies geschehen soll, ist noch zu definieren. Auf Strecken mit grösserem Radius und hohem Verkehrsaufkommen können zur Schotterschonung, und damit zur Verbesserung der LCC, alle zugelassenen steifen Beschlungstypen verwendet werden. Die Besohlungen führen generell zu einer besseren Lastverteilung und zu einem homogenen Gleis mit weniger Hohllagen.

Bei Übergängen mit Steifigkeitsunterschieden im Oberbau können Besohlungen dazu beitragen, die Steifigkeitssprünge zu reduzieren. Allerdings sind die steifen Besohlungen eher weniger geeignet, da sie nur zu einer kleinen Zusatzeinsenkung von rund $0.1 - 0.2 \text{ mm}$ führen. Mittelsteife Besohlungen mit $0.15 < C_{\text{stat}} < 0.25 \text{ N/mm}^3$ wären in diesem Fall hilfreicher. Diese Besohlungen sind jedoch noch nicht zugelassen. Die Steifigkeitsabstufungen sind im Einzelfall mittels Zimmermann-Analyse zu prüfen.

Die lastverteilende Wirkung durch eine vergrösserte Biegelinie konnte bei allen Produkten nur im geringen Masse festgestellt werden. Dies bedeutet, dass bei Asphalttragschichten ein zusätzliches elastisches Element (z.B. weiche Zwischenlage) verwendet werden sollte, um die gewünschte Einsenkung zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Verwendung von mittelsteifen Besohlungen mit einem Bettungsmodul $0.15 < C_{\text{stat}} < 0.25 \text{ N/mm}^3$, wobei diese Typen noch nicht zugelassen sind. Die zusätzliche Elastizität dürfte der Nachhaltigkeit des Oberbaus entgegenkommen.

Für eine abschliessende Beurteilung der Gleislagegüte ist es noch zu früh. Hierfür müsste die Gleislage über mehrere Jahre hinweg kontinuierlich gemessen und ausgewertet werden. Bei Verkehrsbelastungen unter $5'000 \text{ Bt/Tag}$ dürfte sich der Einsatz von Schwellenbesohlungen auf gerader Strecke und Abschnitten mit grossen Bögen kaum lohnen.

Die nachfolgende Abbildung 31 soll als grobe Entscheidungshilfe dienen, den richtigen Beschlungstyp gemäss den eigenen Zielvorgaben resp. Anforderungen zu wählen.

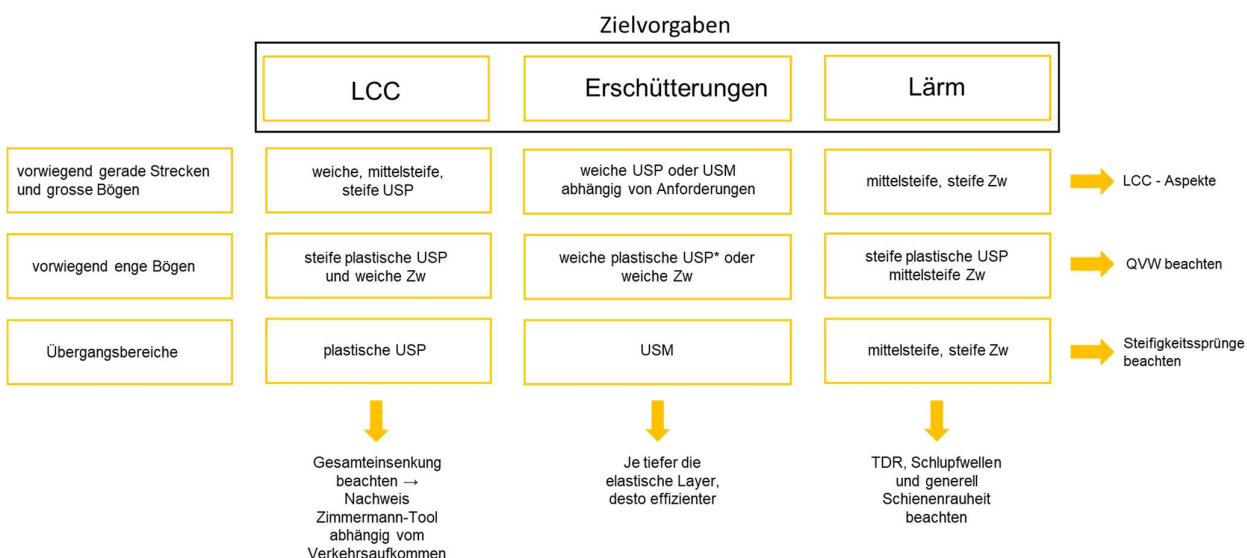


Abbildung 31: Entscheidungshilfe für Schwellenbesohlungen in Abhängigkeit der Zielvorgaben

Quelle: [Stefan Werner]

Bemerkung: Die Einteilung der Schwellenbeschlung nach statischem Bettungsmodul erfolgt gem. Tabelle 1. Für die Zwischenlagen gilt: weich $\approx 100 \text{ kN/mm}$, mittelsteif $\approx 200 \text{ kN/mm}$, steif $\geq 600 \text{ kN/mm}$.

7.3 Forschungsbedarf

Um noch ausstehende Wissenslücken zu schliessen, wären folgende Untersuchungen sinnvoll:

Materialeigenschaften

- Messung der Kontaktfläche bei Tiflex Besohlungen
- Vibrogirtest oder ähnlich mit Müller Besohlung
- Bestimmung des Bettungsmoduls der Tiflex sowie Müller Besohlung unter typischen Meterspurachslasten (gemäss EN 16730 TC1)

Schlupfwellen

- Messung der Schienenrauheit in engen Bögen mit hoher Verkehrsbelastung und tatsächlich vorhandener akuter Schlupfwellenbildung
- Nachmessung der Schienenrauheit bei TPF Gruyères – Enney nach 5 Jahren

Bogenatmung

- Messung der Bogenatmung in einem Bogen mit $R < 140$ m mit plastischen Besohlungen, jedoch ohne Sicherungskappen, zur Verifizierung einer gleichmässigeren Bogenatmung verglichen mit unbesohlenen Betonschwellen

Gleislage

- Überwachung der Gleislage z.B. mit Irissys über mehrere Jahre zur Beurteilung der langfristigen Entwicklung der Gleislagegüte beschlter Schwellen

Sämtliche oben erwähnten Versuche resp. Messungen würden dazu dienen, die Gebrauchstauglichkeit beschlter Betonschwellen bei der Meterspur noch besser zu verstehen. Sie könnten im Rahmen der Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug / Fahrweg Meterspur durchgeführt werden.

Anhang

Im Anhang zu diesem Abschlussbericht sind das Versuchskonzept sowie die Messberichte zu finden.

Anhang 1: Versuchskonzept Besohlte Betonschwellen Meterspur

KPZ Fahrbahn: Versuchskonzept Besohlte Betonschwellen Meterspur, Bern 2020

Anhang 2: Messbericht Bogenatmung MGB Kalpetran

Patrick Braess: Bogenatmungsmessungen Kalpetran, MGB 10.08.2021, Zürich, 2021

Anhang 3: Messbericht Einsenkung MGB Andermatt – Disentis

infraMT Messbericht 20-125-2: Einsenkungsmessung (EMWMS) MGB, Andermatt – Disentis, Finsterhennen, 2021

Anhang 4: Messbericht Einsenkung TPF Gruyères – Enney

infraMT Rapport de mesure 21-102-1: Mesure d'enfoncement (EMWMS) TPF voie métrique, Finsterhennen, 2021

Anhang 5: Messbericht Querverschiebewiderstand TPF Gruyères – Enney

infraMT Messbericht 21-105-1: Querverschiebewiderstandsmessung (QVW) Transports publics fribourgeois SA (TPF), USP-Teststrecke Gruyères – Enney, Finsterhennen, 2021