

Einsatz besohlter Betonschwellen in engen Radien in der Schweiz

Untersuchungen zum Einsatz der besohlenen Betonschwelle in Radien < 300 m als Beitrag zur Verlängerung der Lebensdauer und Reduktion von Unterhaltskosten

PETER GÜLDENAPFEL | STEFAN WERNER

Die 2014 in der Schweiz zugelassene besohlte Betonschwelle war aufgrund der damaligen Erkenntnisse erst für Mindestradien von 450 m (Schienenprofil 54 kg/m) zugelassen. Aufgrund der vermuteten Potenziale wie Schotterschonung oder Reduktion der Schlupfwellenbildung in engen Radien wurde im Rahmen einer Betriebserprobung auf verschiedenen Streckenabschnitten der Nachweis erbracht, dass das besohlte Betonschwellengleis bis zu einem Grenzdurchmesser von 250 m lückenlos verschleißt werden kann. Dieser Beitrag zeigt die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Untersuchungen und Nachweise bis zur Zulassung durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) und deren Auswirkungen auf die Gleislage.

Besohlte Betonschwelle 2014 erstmals zugelassen

Die besohlte Betonschwelle wurde in der Schweiz nach intensiver Betriebserprobung im Jahr 2014 auf Antrag der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) erstmals durch das BAV zugelassen [1]. Dabei wurden folgende Anwendungsbedingungen festgelegt:

- steife Schwellensole, deren Bettungsmodul C_{stat} zwischen $0,25 \text{ N/mm}^3$ und $0,35 \text{ N/mm}^3$ liegen muss

- Mindestradien für lückenlose Gleise:

- $R_{\text{min}} = 650 \text{ m}$ für Schienenprofil 60 kg/m
- $R_{\text{min}} = 450 \text{ m}$ für Schienenprofil 54 kg/m

Zu diesem Zeitpunkt war aber bereits klar, dass diese Mindestradien sehr konservativ angesetzt waren. So galt z. B. für die Holzschwelle (ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen) bereits ein Mindestradius von $R = 400 \text{ m}$ für das Schienenprofil 54 kg/m.

Aufgrund der vermuteten Potenziale der besohlenen Betonschwelle zur Schotterschonung im Allgemeinen und zur Reduktion der Schlupfwellenbildung in engen Radien wurde mit Unterstützung der Schweizerischen Südostbahn (SOB) sowie in einer zweiten Phase zusätzlich der Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn (BLS) der Einsatz von besohlenen Betonschwellen in Radienbereichen bis $R = 235 \text{ m}$ getestet.

Projekt Betriebserprobung besohlte Betonschwellen Gübensee

Für die erste Phase konnte davon profitiert werden, dass bei der SOB im Bahnhof Gübensee zwei Gleise zur gleichen Zeit erneuert wurden. Das Gleis 2 wurde mit besohlenen Betonschwellen B91 eingebaut, das Gleis 1 diente als Referenzgleis und wurde mit Betonschwellen ohne Besohlung eingebaut. Der statische Bettungsmodul der steifen Besohlung beträgt $C_{\text{stat}} = 0,30 \text{ N/mm}^3$ gemäß DIN 45673-1.

Die Teststrecke ist gut einen Kilometer lang und besteht aus drei Kurven mit Radien von je 400 m und einer maximalen Überhöhung von 116 mm. Sie wird mit einer Geschwindigkeit von 85 km/h befahren. Die mittlere Gleisbelastung beträgt 15000 Bruttotonnen pro Tag und Gleis (Abb. 1).

Aufgrund intensiver Diskussionen aus früheren Messkampagnen (z. B. Kiesens SBB) wurde besonderer Wert auf die Querverschiebewiderstandsmessungen gelegt. Dazu wurden

QVW-Messungen mit und ohne Schwellenbesohlung sowohl in der Geraden als auch im Bogen durchgeführt. Um etwaige Unterschiede zwischen den Messmethoden der SBB und der TU München (TUM) und deren Einfluss auf den QVW feststellen zu können, wurden die Messungen parallel mit den Messteams der SBB und der TU München durchgeführt.

Um das Verhalten der beiden Testgleise analysieren zu können, wurden neben den QVW-Messungen noch weitere Messungen (Setzungsmessungen, Einsenkungsmessungen, Gleislagemessungen) durchgeführt (Tab. 1).

Ergebnisse und Fazit zu QVW-Messungen in Gübensee

Die QVW-Messungen durch Messteams der TUM und der SBB wurden in der Nacht vom 11./12. August 2014 in vier Messabschnitten durchgeführt (Abb. 2).

Die bei 2 mm Verschiebeweg gemessenen Kräfte sind als Durchschnittswerte in den nachfolgenden Abbildungen jeweils mit Angabe der Verschieberichtung dargestellt.

Die im Schnitt deutlich höheren Werte der SBB sind auf ein unterschiedliches Messverfahren zurückzuführen. Betrachtet man die Ergebnisse der TU München im Durchschnitt, lässt sich festhalten, dass der messtechnisch ermittelte QVW im besohlenen Gleis um 15 % (gerades Gleis) bzw. um 10 % (Bogengleis) größer ist als derjenige der unbesohlenen Schwelle (Abb. 3 und 4). Dies lässt darauf schließen, dass die Verzahnung der obersten Schotterschicht in das elastische Material einen positiven Einfluss auf den QVW zur Folge hat. Die Messungen der SBB bestätigen diesen Effekt, da auch hier der QVW im besohlenen Gleisabschnitt um ca. 27 % (gerades Gleis) bzw. ca. 12 % (Bogengleis) größer ist als im unbesohlenen Gleisabschnitt. Messabschnitt 1 und 2 wurde am 12./13. August 2014 nur vom SBB-Messteam vermessen (Abb. 5). In diesem Abschnitt liegen die QVW-Werte der besohlenen Schwellen im Durchschnitt um 17 % höher als bei unbesohlenen Schwellen.

Um die Langzeitentwicklung des QVW zu vergleichen, wurden in den darauffolgenden Jahren durch das SBB-Messteam weitere QVW-Messungen durchgeführt. Auch nach fast zwei Betriebsjahren weist der besohlte Abschnitt AB1 wie zu Beginn der Messreihe höhere QVW-Werte auf als die unbesohlenen Schwellen im Referenzabschnitt AB2 (Abb. 6). Nachdem im

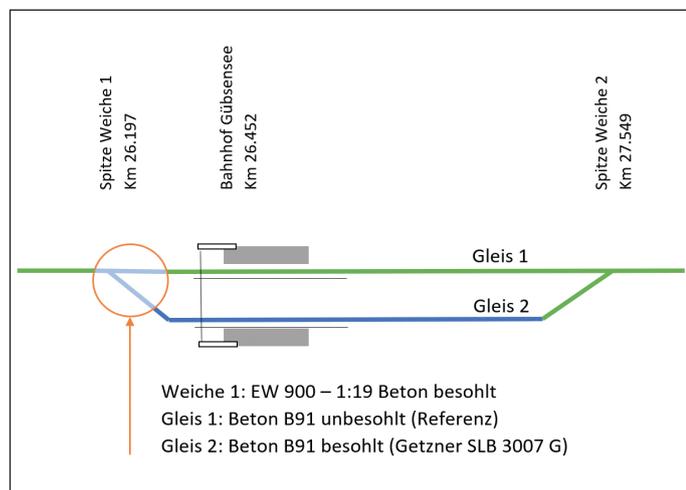


Abb. 1: Übersicht Gleisgeometrie und Situation Gübensee

Messung	Zweck	Wann	Wer	Bemerkungen
M _{E1} - Messung	Qualitätskontrolle Unterbau	Während Umbau	Unternehmung	
Setzungen	Setzungsverhalten besohlt / unbesohlt	Nach Einbau, dann ca. alle 6 Monate	SBB-Messtechnik	Bis Anfangssetzungen abgeklungen sind
Einsenkungen	Steifigkeitsunterschiede im Gleis	November 2014	SBB-Messtechnik	
QVW	Querverschiebewiderstand Gerade / Kurve besohlt / unbesohlt	Nach 3. Stopfung	SBB-Messtechnik TU München	Folgemessungen geplant
Gleislagegüte	Gleislage	Reguläre Messfahrten	DFZ - SBB	

Tab. 1: Überblick Messkonzept Versuchsstrecke SOB Gübsensee

ersten Jahr lediglich beim Referenzgleis ein leichter Konsolidierungseffekt zu beobachten war, hat sich der QVW des besohnten Gleises um 27 % gegenüber der ersten Messung erhöht, während beim Referenzgleis eine Zunahme von 32 % zu verzeichnen war. Die relative Änderung der Standardabweichung (σ) schneidet beim besohnten Gleis ebenfalls besser ab: War kurz nach Fertigstellung des Gleises die Streuung der QVW-Werte im besohnten Abschnitt noch größer, wurde dieser Rückstand im Laufe der Zeit wettgemacht.

Auf Basis der Erkenntnisse, dass der QVW im besohnten Gleis auch nach einer Konsolidierung höher ist als im unbesohnten Gleis, wurden mittels einer Modellrechnung mit dem Programm CWERRI der SBB und in Einvernehmen mit dem BAV für die besohnten Betonschwellen neue folgende Mindestradien für lückenlose Gleise festgelegt:

- $R_{min} = 350$ m für Schienenprofil 60 kg/m
- $R_{min} = 300$ m für Schienenprofil 54 kg/m

Diese Grenzwerte entsprachen den zu diesem Zeitpunkt zugelassenen Mindestradien für unbesohlte Betonschwellen. Damit wurde erstmals die Gleichstellung von besohnten mit unbesohnten Betonschwellen in Bezug auf den Mindestradius durch das BAV akzeptiert.

Parallel zu diesen Erkenntnissen untersuchte eine Arbeitsgruppe „Erhöhte Fahrwegbeanspruchung Y_{qst} “ unter der Leitung des BAV mit Vertretern von SBB, BLS und SOB die Konsequenzen des Einsatzes höherwertiger Oberbaumaterialien als Folge der radienabhängigen Erhöhung von Y_{qst} von 60 kN bis max. 67,5 kN für die Fahrzeugzulassung [2]. Daraus resultierte unter anderem die Erkenntnis, dass der bisher zulässige Mindestradius von 300 m für das lückenlose Gleis mit Betonschwellen nicht durch mangelnde Gleisstabilität bedingt ist, sondern auf Erfahrungen basiert, dass der im Gegensatz zu Holzschwellengleisen steifere Gleisrost in den Radien unter 300 m zur schnelleren Schlupfwellenbildung führt (Abb. 7).

Da insbesondere die beiden Bahnen SOB und BLS in ihrem Netz eine größere Anzahl von Abschnitten mit Radien unter 300 m aufweisen, wurde im Rahmen einer Betriebserprobung geprüft, wie das Einbringen von höherer Elastizität in das Gleis (Schienenbefestigung und Schwellenbesohlung) für das Betonschwellengleis mit Schienenprofil 54E2 realisiert und damit die Schlupfwellenbildung im Radienbereich zwischen 250 und 300 m verhindert respektive verzögert werden kann.

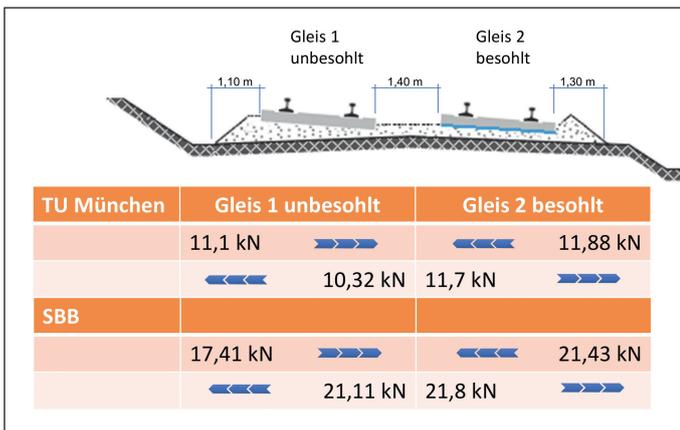


Abb. 3: Resultate QVW TUM und SBB Messabschnitt 5 und 6 (Gerade) Gübsensee

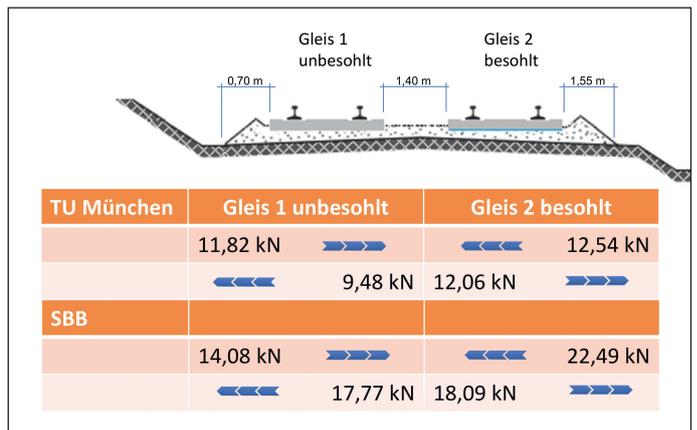


Abb. 4: Resultate QVW TUM und SBB Messabschnitt 3 und 4 (R=400 m) Gübsensee



Abb. 2: QVW-Messungen durch TU München und SBB-Messtechnik

Betriebserprobung besohlte Betonschwellen in Radien unter 300 m

Für die beim BAV eingereichte Betriebserprobung wurden folgende Strecken ausgewählt:

- BLS Walkringen – Biglen (Einbau 2015)
- BLS Leissigen – Därligen (Einbau 2018)
- SOB Wollerau – Samstagern (Einbau 2017)

Neben den bereits in Gübsensee durchgeführten Messungen von QVW, Einsenkung, Setzung und Gleislage wurden bei diesen Objekten erstmals auch Bogenatmungsmessungen durchgeführt, um die seitlichen Bewegungen des Gleises im Sommer zu beobachten. In der Schweiz ist für Normalspurgleise eine seitliche, temperaturabhängige Bogenatmung im unbelasteten Zustand in der Regel zu vermeiden. Bei den Meterspurbahnen ist unter gewissen Voraussetzungen eine seitliche Bogenatmung zulässig, sofern diese über den Bogen verteilt gleichförmig erfolgt. Die Untersuchungen im Rahmen der Dissertation Braess [3] haben aber gezeigt, dass die seitliche Bogenatmung sowohl in Meter- als auch Normalspurgleisen sehr ungleichmäßig auftritt und in einem direkten Zusammenhang zur Rahmensteifigkeit des Gleisrostes steht. Die Bogenatmungsmessungen der Abschnitte mit besohnten Betonschwellen hatten deshalb zum Ziel, etwaige Unterschiede zum unbesohnten Gleis erkennen zu können.

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für KPZ Fahrbahn AG /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group, 2019

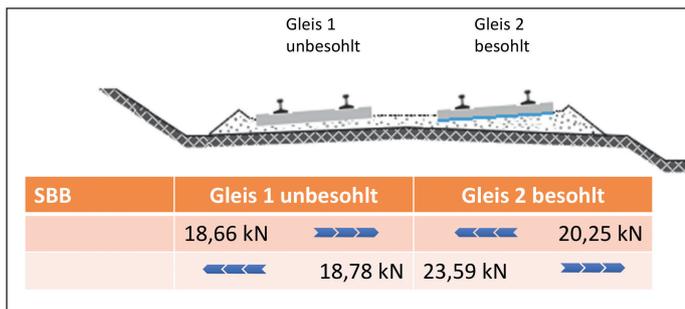


Abb. 5: Resultate QVW SBB Messabschnitt 1 und 2 (R=400 m) Gübsensee

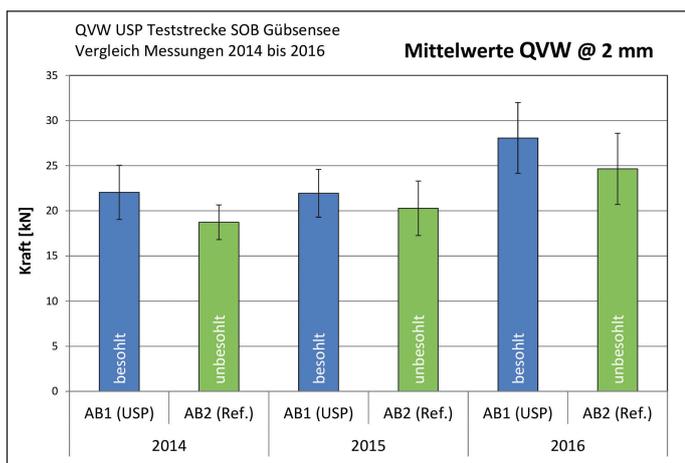


Abb. 6: Vergleich QVW-Messungen 2014 und 2015 im Messabschnitt 1 und 2 (R = 400 m)

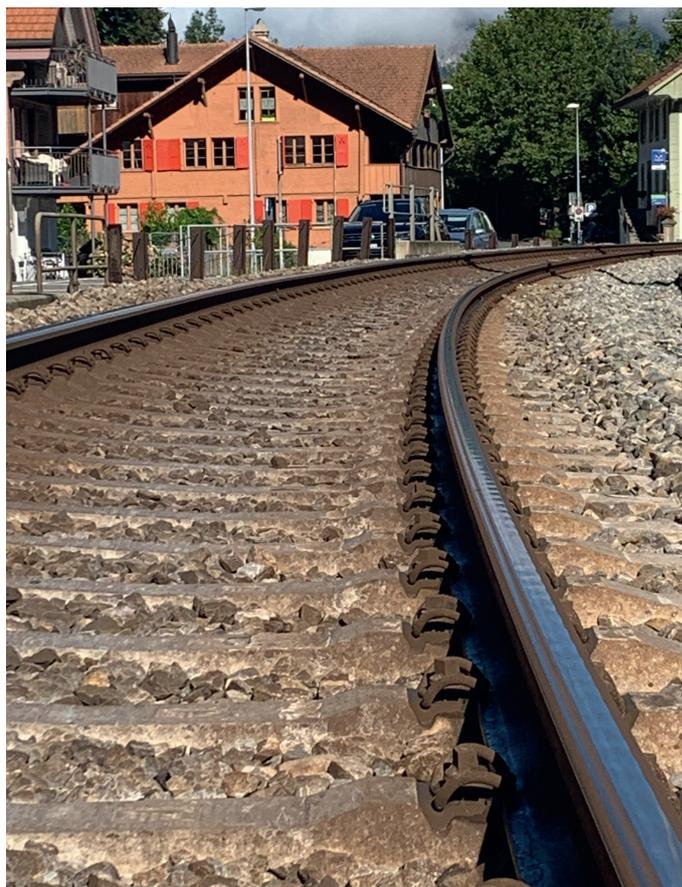


Abb. 7: Schlupfwellenbildung in engen Radien

Ergebnisse und Fazit zu Messungen in Radien kleiner 300 m

Die Teststrecke Walkringen–Biglen ist ca. 500 m lang und umfasst eine typische Geometrie mit wechselnden Abschnitten von Geraden und Kreisbögen mit Radien von 235 m bis 268 m. Die Strecke verfügt über drei besohlte und drei unbesohlte Abschnitte. Der statische Bettungsmodul der steifen Besohlung beträgt 0,30 N/mm³. Als Zwischenlage wurde auf der gesamten Teststrecke die ZW 700 AT 123/160 mit einer statischen Federziffer von 100 kN/mm eingebaut.

Die QVW-Messungen wurden 2015 nach der dritten Stopfung durchgeführt und nach zwei Jahren Konsolidierung des Schotterbettes ein zweites Mal wiederholt.

Die Messungen zeigen folgende Ergebnisse (Abb. 8):

- Der messtechnisch ermittelte QVW im besohlenen Gleis bei 2 mm Verschiebeweg ist um rund 36 % größer als im unbesohlenen Gleis.
- Die Standardabweichung der Messergebnisse nach der ersten Messung ist bei besohlenen Betonschwellen geringer, was auf eine homogenere Gleislage hindeutet.

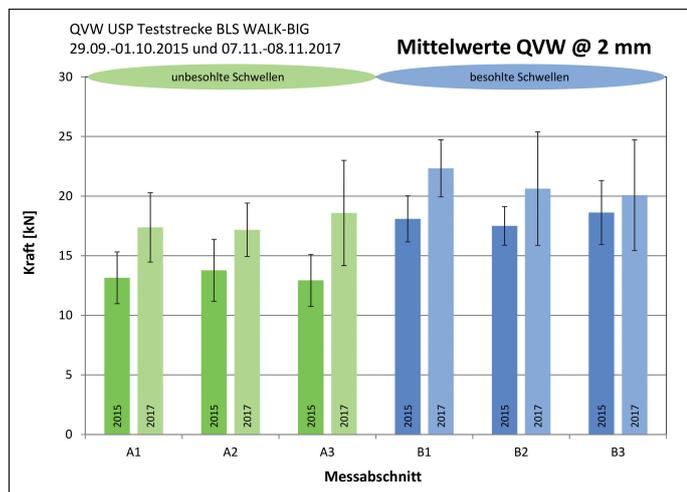


Abb. 8: Übersicht QVW - Messergebnisse Walkringen–Biglen 2015 und 2017

Die Strecke Walkringen–Biglen wurden im Abschnitt A2 (Bogenradius R=268 m, unbesohlt) und B3 (Bogenradius R=235 m, besohlt) durchgeführt. Wie in Abb. 9 zu erkennen ist, wurden relativ kleine, laterale Verschiebungen der Schwellen gemessen. Im Referenzabschnitt wurde selbst bei im Sommer hohen Temperaturunterschieden von 34°C eine maximale Amplitude von 3,4 mm gemessen. Im selben Zeitraum lag die maximale seitliche Bewegung im besohlenen Abschnitt bei 1,2 mm (ΔT von 36°C). Die Messergebnisse deuten darauf hin, dass durch den Einsatz von Schwellenbesohlungen zum einen eine gewisse Kontinuität der Querverschiebungen entlang des Bogens ermöglicht wird und zum anderen die Verschiebung des Gleisrostes in Querrichtung wesentlich reduziert werden kann. Durch diese geringere Streuung ist eine höhere Sicherheit gegen Gleisverwerfungen gegeben. Ein sehr ähnliches Verhalten konnte jüngst bei Bogenatmungsmessungen zwischen Leissigen und Därligen wiederholt festgestellt werden. Zusätzlich zum Versuchsabschnitt Walkringen–Biglen wurde 2017 zwischen Wollerau und Samstagern (SOB) im Rahmen des Einbaus der ganze Umbauabschnitt mit steif besohlenen Betonschwellen ausgerüstet. Dabei wurden zwei Abschnitte mit Radien von R=250 m messtechnisch untersucht. Bei den QVW-Messungen zeigte sich, dass der messtechnisch ermittelte QVW im besohlenen Gleis der Teststrecke Wollerau–Samstagern

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für KPZ Fahrbahn AG /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten
 genehmigt von DVV Media Group, 2019

in etwa dem QVW im eingefahrenen Zustand in Walkringen–Biglen entspricht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass auf der Strecke Wollerau–Samstagern nicht mehr nach SBB-, sondern nach TUM-Methode gemessen wurde.

Die am 7. Juli 2018 durchgeführten Bogenatmungsmessungen zeigen eine mittlere Amplitude (ohne Extremwerte) von 0,3 mm (Abb. 10). Die bei Position 21.6 gemessene maximale gemessene Amplitude von knapp 2 mm ist vermutlich auf eine Stelle mit schlechterer Tragfähigkeit zurück zu führen. Die Analyse der Einsenkungsmessungen zeigt in diesem Bereich eine leichte Mulde von 2 mm.

Die Ergebnisse der beiden Betriebserprobungen haben gezeigt, dass für Betonschwellen mit steifen Schwellensohlen und Schienenprofil 54 kg/m der bisherige Grenzradius von 300 m auf 250 m herabgesetzt werden kann. Auf dieser Basis wurde in Absprache mit dem BAV darauf verzichtet, den Einbau Leissigen–Därligen mit Ausnahme von Bogenatmungsmessungen messtechnisch zu untersuchen.

Aufgrund der Ergebnisse aus der Betriebserprobung besohlter Betonschwellen in Radien unter 300 m genehmigte das BAV für besohlte und unbesohlte Betonschwellen folgende Mindestradien [4]:

- $R_{\min} = 350$ m für Schienenprofil 60 kg/m
- $R_{\min} = 250$ m für Schienenprofil 54 kg/m

Diese Grenzwerte wurden auch in die Ausgabe der neu aktualisierten Regelung R RTE 22041 in den Anhang 1 integriert [5].

Auswirkungen auf Gleislage

Die Versuchsabschnitte Gübsensee (SOB) sowie Walkringen–Biglen (BLS) und Wollerau–Samstagern (SOB) sollen auch in Bezug auf eine Verlängerung der Lebensdauer und eine Reduktion von Unterhaltskosten untersucht werden. Dafür werden die mindestens einmal jährlich mit dem Diagnosefahrzeug der SBB durchgeführten Gleisgeometriemessungen analysiert und die Entwicklung der Gleislagequalität von besohlenen mit unbesohlenen Abschnitten verglichen.

Aufgrund der auf diesen Strecken bis zum heutigen Zeitpunkt vergleichsweise niedrigen Gleisbelastung konnte der Nachweis zur Verlängerung der Liegedauer noch nicht erbracht werden. Im Bogen und insbesondere in engen Bögen mit Schlupfwellenbildung ist aber bereits jetzt ein positiver Effekt der Schwellenbesohlung in Kombination mit einer weichen Schienenzwischenlage messbar. Dieser Effekt soll mit weiteren Schlupfwellenmessungen in engen Bögen erhärtet werden.

Ausblick

Der Grenzradius für besohlte (und auch der unbesohlenen) Betonschwellen konnte aufgrund der Betriebserprobungen von SOB und BLS für das Schienenprofil 54 kg/m auf 250 m herabgesetzt werden. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen kann durch den Einsatz besohlter Betonschwellen die Schlupfwellenbildung in

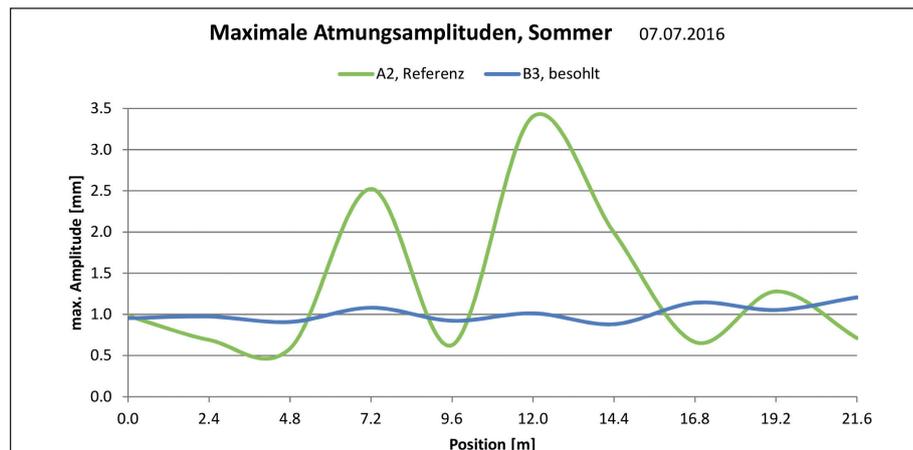


Abb. 9: Maximale Amplituden der seitlichen Bogenatmung Walkringen–Biglen im Sommer

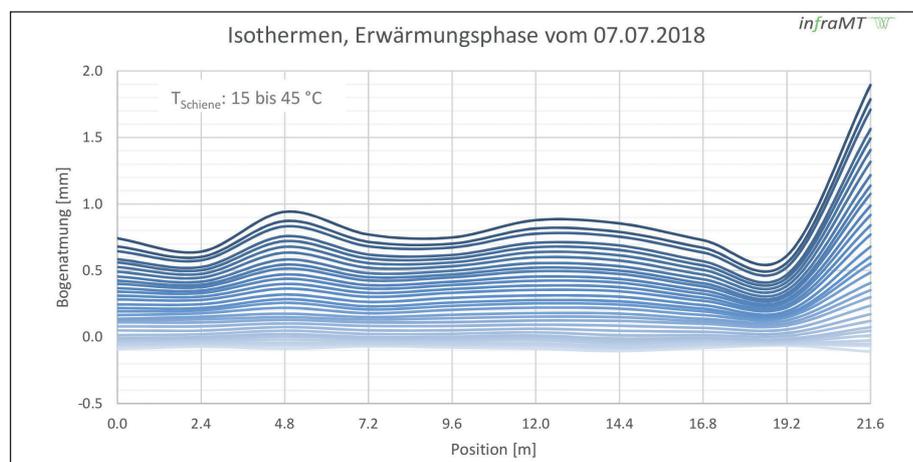


Abb. 10: Verlauf seitliche Bogenatmung Wollerau–Samstagern im Sommer

engen Bögen verzögert werden. Damit kann die Wirtschaftlichkeit der Gleise in engen Radien wirksam verbessert werden.

Die festgestellte geringere Streuungszunahme des QVW der besohlenen Betonschwelle mit der Betriebsbelastung leistet ebenfalls einen Beitrag zur Verbesserung der Gleislagestabilität, was die Gefahr einer lokalen Gleisverwerfung reduziert.

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen hat die besohlte Betonschwelle aus Sicht des QVW durchaus noch Potenzial bis in Radien von 200 m. Dazu wurden bereits weitere Versuche im Rahmen von Betriebserprobungen gestartet. Wichtiges Kriterium neben dem QVW ist dann aber die seitliche Bogenatmung, die möglichst gleichförmig sein sollte. Zusätzlich sollten auch die bereits erwähnten zusätzlichen Erkenntnisse der Dissertation Braess [3] zur Rahmensteifigkeit miteinbezogen werden. Mit einer geeigneten Kombination von besohlenen Betonschwellen und Schienenzwischenlagen kann die Schlupfwellenbildung weiter reduziert oder verzögert werden. Damit leisten diese Untersuchungen einen wichtigen Beitrag zur Verlängerung der Lebensdauer der Fahrbahn und zur Reduktion der Unterhaltskosten in engen Radien. ■

QUELLEN

- [1] Typenzulassung BAVR44TZ2014-01-00005 (Verfügung BAV vom 6.11.2014)
- [2] Gruppe Fahrtechnik BAV/SBB/BLS/SOB Schlussdokumentation Arbeitsgruppe „Erhöhte Fahrwegbeanspruchung Ygst und die Konsequenzen des Einsatzes höherwertiger Oberbaumaterialien“ vom 4.3.2014
- [3] Braess, H. P.: Sicherstellung einer langfristig guten Gleislage in atmdenen Bögen, Eidgenössische technische Hochschule ETH Zürich, Dissertation ETH Nr. 25112, 2018
- [4] Beschlussprotokoll: Betriebserprobung besohlte Betonschwellen in Radien kleiner 300 m BAV-KPZ Fahrbahn vom 13.4.2018
- [5] R RTE 22041 Lückenlose und verlaschte Gleise und Weichen Normalspur (Ausgabe 2019)



Dipl. Ing. ETH Peter Güldenapfel
Fachexperte und Stv. Geschäftsführer
KPZ Fahrbahn AG, CH-Zürich,
peter.gueldenapfel@kpz-fahrbahn.ch



Dipl. Ing. Stefan Werner EMBA FHO
Fachexperte
KPZ Fahrbahn AG, CH-Zürich
stefan.werner@kpz-fahrbahn.ch