

FFU Kunstholzschwellen: Messung Querverschiebewiderstand im Schotteroberbau

Die horizontale Lagestabilität des lückenlos verschweißten Gleises im Schotteroberbau soll durch einen ausreichend hohen Querverschiebewiderstand (QVW) der Schwellen gewährleistet werden. Im Auftrag der Fa. SEKISUI Chemical GmbH wurden im Juli 2015 vom Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München Messungen des QVW im unkonsolidierten Gleis und im Oktober 2016 im konsolidierten Gleis durchgeführt.

1. ALLGEMEINES

Das Hauptziel dieser Untersuchungen der Technischen Universität München war der Vergleich des QVW im konsolidierten und unkonsolidierten Zustand von FFU Kunstholzschwellen im Schotteroberbau im Bezug zu Holzschwellen.

Hierzu wurden die identischen Schwellen der Bahnstrecke Köln–Aachen nach einer Verkehrslast von 33,9 Mio. Lasttonnen im Oktober 2016 erneut untersucht. In vergleichenden Messungen wurden fünf verschiedene Querschnitte der FFU-Kunstholzschwellen und Holzschwellen geprüft.

2. VERSUCHSBESCHREIBUNG UND ERGEBNISSE

Der QVW wurde an unbelasteten und belasteten Schwellen in fünf Messabschnitten ermittelt

- Messabschnitt 1: FFU-Kunstholzschwellen (Nr. 1.1 bis 1.15) mit den Abmessungen H/B/L = 12 x 26 x 260 cm ohne Aufdopplungen
- Messabschnitt 2: FFU-Kunstholzschwellen (Nr. 2.1 bis 2.15) mit den Abmessungen H/B/L = 12 x 26 x 260 cm mit 3 Aufdopplungen (H/B/L = 6 x 26 x 15 cm)
- Messabschnitt 3: FFU-Kunstholzschwellen (Nr. 3.1 bis 3.15) mit den Abmessungen H/B/L = 16 x 26 x 260 cm ohne Aufdopplungen
- Messabschnitt 4: FFU-Kunstholzschwellen (Nr. 4.1 bis 4.15) mit den Abmessungen H/B/L = 16 x 26 x 260 cm mit 2 Aufdopplungen (H/B/L = 2 x 26 x 15 cm)
- Messabschnitt 5: Holzschwellen (Nr. 5.1 bis 5.15) mit den Abmessungen H/B/L = 16 x 26 x 260 cm ohne Aufdopplungen

Im konsolidierten Zustand wurden die identischen Schwellen, wie bei der Messung im



Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Freudenstein
Professor und Direktor, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau der Technischen Universität München
stephan.freudenstein@tum.de



Dr.-Ing. Konstantin Geisler
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München
konstantin.geisler@tum.de



Dipl.-Phys. Johannes Mack
Wissenschaftlicher Mitarbeiter Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau der TU München
johannes.mack@tum.de



Dr. Günther Koller
Geschäftsführer
koooco technology & consulting GmbH
guenther.koller@koooco.eu

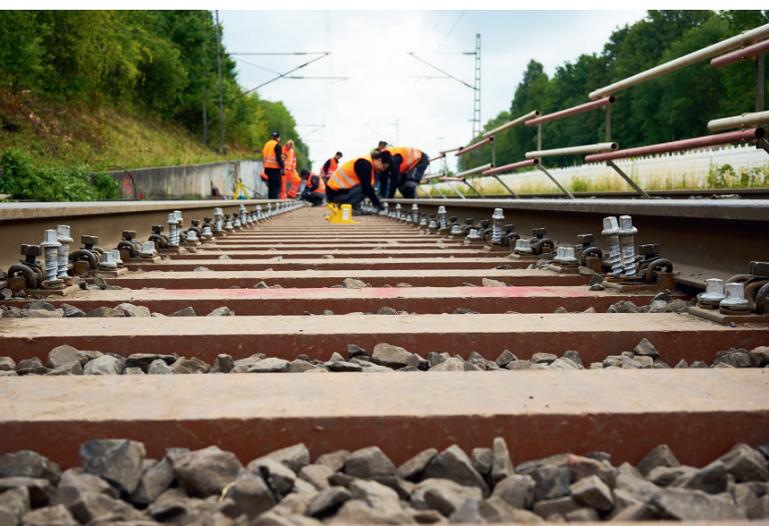


BILD 1:
Vorbereitung Verschiebung FFU Schwellen

unkonsolidierten Zustand im Juli 2015, zur Gleissinnenseite verschoben.

2.1. MESSSTELLE

Die ausgewählte Messstelle mit KS-Befestigung befindet sich auf der Bahnstrecke zwischen Köln und Aachen, im Abschnitt Stolberg – Bahnhof Aachen Rothe Erde im Gleis 1 zwischen km 65,86 und km 66,01.

Das Gleis im Bereich der Messstelle wurde am 21. Juli 2015 umgebaut. Am 30. und 31. Juli 2015 wurden die Messungen des QVW im unkonsolidierten Zustand (Bericht 3303 vom 30.12.2015 [1]) durchgeführt. In den Nächten zwischen dem 03.10. und 06.10.2016 wurden die Messungen des QVW im konsolidierten Zustand durchgeführt. Die Messung erfolgte nachts zwischen 0:00 Uhr und 4:00 Uhr bei Temperaturen zwischen 15 °C und 20 °C, im trockenen Schotterbett.

2.2. VERFAHREN ZUR BESTIMMUNG DES QVW AN UNBELASTETEN EINZELSCHWELLEN

Im folgenden Abschnitt wird das Verfahren des Prüfamtes für Verkehrswegebau der TU München zur Bestimmung des QVW an unbelasteten Einzel-Schwellen im Betriebsgleis beschrieben.

Vor der Messung des QVW wurden alle Schrauben im maßgebenden Versuchsabschnitt gelöst, beide Schienen wurden mittels hydraulischen Pressen angehoben, bis die komplette Schienenbefestigung des KS-Oberbaus der zu prüfenden Schwellen entfernt werden konnte. Somit wurde sichergestellt, dass während des horizontalen Verschiebevorganges kein Kontakt zwischen Schwelle und Schienenfußunterseite stattfindet. Anschließend wurden die Schienen wieder herabgesetzt und zu den übrigen Schwellen befestigt.

Der QVW wurde durch ein Verschieben von einzelnen, unbelasteten Schwellen zur Gleisinnenseite, d. h. „zur linken Seite“ mit Blickrichtung in Fahrtrichtung Aachen Hbf, ermittelt. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse zu vermeiden, wurde ein Abstand von 2 Schwellen zwischen den Versuchsschwellen eingehalten. Die zu prüfenden Schwellen sind von den Schienen gelöst und wurden mittels eines Druckzylinders quer verschoben. Die zu den übrigen Schwellen verspannte Schiene diente als Widerlager für den Verschiebevorgang. Die Belastungseinheit wurde mit zwei Schrauben zur maßgebenden Schwelle befestigt und die horizontale Kraft griff in etwa auf Höhe des Schienenschwerpunktes an. Die Querverschiebung und Schwellenanhebung wurden in Abhängigkeit der aufbrachten Kraft kontinuierlich aufgezeichnet.

Im Nachfolgenden sind die einzelnen Versuchsparameter zur Bestimmung des QVW von unbelasteten Einzelschwellen zusammengefasst:

- kein Kontakt zwischen Prüfschwelle und Schienenfußunterseite während der Messung
- Widerlager der lateralen Kraft: Schiene, die zu den benachbarten Schwellen fest verspannt ist
- Abstand zwischen den Prüfschwellen in Gleislängsrichtung: 2 Schwellen
- Gewicht der Belastungseinheit: 50 kg
- Position der Belastungseinheit: auf der Schwelle, im Bereich zwischen den Schienen
- Kraftübertragung Belastungseinheit - Schwelle: mittels 2 Schwellenschrauben
- Kraftübertragung Belastungseinheit – Schiene: über ein Passstück in etwa im Schienenschwerpunkt, parallel zur Schwelle ($\alpha = 0^\circ$)



BILD 2:
Querverschiebeeinrichtung



ZUGELASSENE VERKEHRSPRODUKTE

- » Gleisüberwegplatten
- » Gleistragplatten
- » Gleistragwannen
- » Spezialelemente

WEITERE PRODUKTE

- » Großflächenplatten
- » Stahlankerplatten
- » Parkdachsystem 1095
- » Umweltschutz-Produkte



BTE Stelcon GmbH

Philippsburger Str. 4
76726 Germersheim

Tel. 0 72 74 / 70 28-0
Fax 0 72 74 / 70 28-129

info@stelcon.de
www.stelcon.de

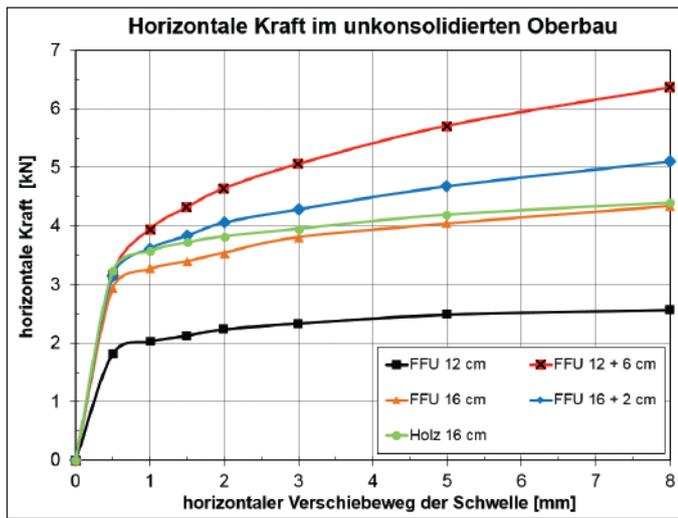


BILD 3: Kraft/Verschiebung im unkonsolidierten Zustand

- Laterale Schwellenverschiebung: bis ca. 8 mm
- Belastungsgeschwindigkeit: 10 s bis 15 s bis zu einer lateralen Schwellenverschiebung von 8 mm
- Art der Lasteinleitung: kontinuierlich mit elektrischer Pumpe und hydraulischem Zylinder
- Aufzeichnung von Querverschiebung (lateral) und Schwellenanhebung (vertikal) in Abhängigkeit der aufgebrachten lateralen Kraft mit Induktivwegaufnehmern

→ Aufzeichnung der lateralen Kraft mit Kraftmessdose.

Nach der Messung wurde die Prüfschwelle in die ursprüngliche Position im Gleis zurückverschoben. Der QVW wurde in insgesamt 5 Messabschnitten erfasst. Je Versuchsabschnitt wurde der QVW an jeweils 15 Schwellen bestimmt. Somit wurde der QVW an insgesamt 59 FFU-Kunstholzschnellen und 15 Holzschwellen ermittelt.

Die Messung erfolgte im geraden Gleis

TABELLE 1: Statischer QVW in Abhängigkeit vom Verschiebeweg von unbelasteten Einzel-schwellen

| Messabschnitt Nr. (Mittelwert aus jeweils 14 bzw. 15 Schwellen) | QVW in Abhängigkeit vom Verschiebeweg der Schwelle [N/mm] | | | | | | |
|---|---|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|
| | 0,5 mm | 1,0 mm | 1,5 mm | 2,0 mm | 3,0 mm | 5,0 mm | 8,0 mm |
| Messabschnitt 1 (UK): FFU 12 cm | 3,0 | 3,4 | 3,6 | 3,7 | 3,9 | 4,2 | 4,3 |
| Messabschnitt 1 (K): FFU 12 cm | 6,9 | 8,3 | 8,7 | 8,8 | 8,8 | 8,5 | 8,0 |
| Zunahme [%] | 129 | 146 | 146 | 136 | 125 | 105 | 87 |
| Messabschnitt 2 (UK): FFU 12 + 6 cm | 5,3 | 6,6 | 7,2 | 7,7 | 8,4 | 9,5 | 10,6 |
| Messabschnitt 2 (K): FFU 12 + 6 cm | 11,1 | 14,5 | 16,0 | 16,6 | 17,2 | 17,5 | 17,7 |
| Zunahme [%] | 109 | 121 | 122 | 114 | 103 | 83 | 67 |
| Messabschnitt 3 (UK): FFU 16 cm | 4,9 | 5,4 | 5,7 | 5,9 | 6,4 | 6,7 | 7,2 |
| Messabschnitt 3 (K): FFU 16 cm | 10,8 | 13,6 | 14,5 | 14,9 | 14,9 | 14,6 | 13,8 |
| Zunahme [%] | 120 | 150 | 156 | 152 | 134 | 116 | 91 |
| Messabschnitt 4 (UK): FFU 16 + 2 cm | 5,3 | 6,0 | 6,4 | 6,8 | 7,1 | 7,8 | 8,5 |
| Messabschnitt 4 (K): FFU 16 + 2 cm | 10,8 | 14,5 | 16,0 | 16,8 | 17,3 | 17,3 | 16,8 |
| Zunahme [%] | 105 | 140 | 150 | 148 | 142 | 122 | 97 |
| Messabschnitt 5 (UK): Holz 16 cm | 5,4 | 6,0 | 6,2 | 6,4 | 6,6 | 7,0 | 7,3 |
| Messabschnitt 5 (K): Holz 16 cm | 10,6 | 13,4 | 14,4 | 14,8 | 15,1 | 14,8 | 14,2 |
| Zunahme [%] | 97 | 125 | 132 | 133 | 129 | 111 | 93 |

ohne Überhöhung. Nach Angabe der DB Netz AG hat im Zeitraum zwischen den beiden Messungen keine Instandhaltung stattgefunden.

2.3. ERMITTLUNG DES QUERVERSCHIEBEWIDERSTANDES DER EINZELNEN SCHWELLEN

Die gemessenen horizontalen Widerstandskräfte [kN] der fünf untersuchten Oberbaukonfigurationen wurden in Abhängigkeit vom Verschiebeweg als Mittelwert von jeweils 15 Schwellen (Messabschnitte 1, 2, 3, 5) bzw. von 14 Schwellen (Messabschnitt 4) ermittelt. In Messabschnitt 4 konnte eine Schwelle nicht verschoben werden. Grund dafür war, ein an der Schiene angebrachter Magnet der Signaltechnik. Dadurch konnte die Schienenbefestigung nicht gelöst werden.

Zu Vergleichszwecken wurde bei beiden Zuständen die Widerstandskraft bei einem Verschiebeweg von 2 mm maßgebend für den QVW gewählt. Der Quotient aus dieser Kraft und dem Schwellenabstand (600 mm) ergibt den QVW in [N/mm]. Weiterhin wurde vom Prüfamtm für Verkehrswegebau festgestellt, dass eine Gleisverwerfung im durchgearbeiteten geraden Gleis nach maximal 7 bis 8 mm Gleisrostbewegung in Querrichtung entsteht [2]. Aus diesem Grund, und auch weil bei höheren Verschiebewegen i.d.R. keine weitere signifikante Kraftsteigerung stattfindet, wurde der QVW bis zu einem Verschiebeweg von 8 mm gemessen.

Die ermittelten Werte des QVW [N/mm] im unkonsolidierten und konsolidierten Zustand sind in Tabelle 1 in Abhängigkeit der Schwellenverschiebung gegenübergestellt.

2.4. DISKUSSION DER MESSERGEBNISSE

Es kann festgehalten werden, dass sich durch die Konsolidierung der QVW bei 2 mm horizontaler Verschiebung bei allen Schwellentypen mehr als verdoppelt hat.

Beim Vergleich der FFU-Kunstholzschnellen (Höhe 16 cm) mit den Holzschwellen (identische Höhe) zeigt sich folgender Sachverhalt: Im unkonsolidierten Gleis lag der QVW der Kunstholzschwelle um 7,8% unter dem der Holzschwelle. Durch die Konsolidierung ist der QVW der FFU-Kunstholzschwelle stärker angestiegen, sodass im konsolidierten Zustand beide Schwellentypen hinsichtlich des QVW gleichwertig sind. Die Werte des QVW nach der Konsolidierung betragen bei einer horizontalen Verschiebung von 2 mm 14,9 N/mm für die FFU- bzw. 14,8 N/mm für die Holzschwelle. Offensichtlich fand bei der FFU-Schwelle eine zunehm-

1980 - 2017
37
 Jahre FFU®
 Kunstholz
 1.400 km
 Sicherheit!



Endgültige
EBA
 Zulassung
 wurde 2017 erteilt

BAHNTECHNIK
 State
 of the Art

FFU® KUNSTHOLZ



FFU® FLACHSCHWELLE



CALMMOON RAIL



3. FFU KUNSTHOLZ ENTWICKLUNG UND TECHNOLOGIE

FFU (Fibre reinforced Foamed Urethane) Kunstholz wurde im Jahre 1978 vom japanischen Kunststoff Spezialisten SEKISUI entwickelt. FFU ist ein Werkstoff, der die gleichen Materialeigenschaften für den Einsatz, die einfache Handhabung und Verarbeitung im Gleisbau wie Naturholz zeigt. Er hat annähernd das gleiche spezifische Gewicht wie Naturholz, jedoch gegenüber diesem eine wesentlich höhere Lebenserwartung und Witterungsbeständigkeit. Die Haltbarkeit wurde 1996 für 100 Millionen Lastwechsel an einer 15 Jahre alten, im täglichen Einsatz gewesenen FFU Kunstholzschwelle vom RTRI (Railway Technical Research Institut) mit mehr als 50 Jahren prognostiziert [3]. Im Jahre 2011 führte das RTRI wiederum Tests an nun bereits 30 Jahre unter Betrieb (56 000 Lasttonnen je Tag) eingesetzter Schwellen durch. Die Testergebnisse bestätigten die Lebenserwartung der prognostizierten 50 Jahre erneut, dies wurde dem Eigentümer (JR) schriftlich bestätigt [4].

FFU Kunstholz wird nach dem Pultrusions- oder auch Strangziehverfahren im Zuge einer strengen Qualitätssicherung entsprechend ISO-Zertifizierung hergestellt. Endlose richtungsorientierte Glasfaserstränge werden durch eine Rollenstrangpresse gezogen, mit Polyurethan vergossen und bei erhöhter Temperatur zu einem sehr hochwertigen geschlossen porigen Werkstoff ausgehärtet. Die Glasfasern werden hierbei für den maximalen Verbund mit der speziellen Polyurethankomposition an deren Oberfläche chemisch vorbereitet. Die hierbei entstehenden Rohlinge können in einem Stück bis zu einer Breite von 60 cm und einer durch den Transport vorgegebenen Länge von max. 12 Metern produziert werden. In der Höhe wird die Anfertigung der Schwellen nur durch die Vorgaben des Kunden und die Transportmöglichkeiten definiert.

Aus diesen Rohlingen, die die Breite und die Länge der planlichen Vorgaben haben, wird durch Laminierung mehrerer Stücke die endgültige Höhe der Schwelle produziert. Im Falle der Anfertigung von Schwellen z. B. für Network Rail im Jahre 2014 wurden mit einer Bauhöhe von 370 mm und einer Länge von 7500 mm 13 Rohlinge verklebt, um die geplante Höhe zu erreichen. Ebenso ist es möglich auf Wunsch des Auftraggebers im Werk Bahnschwellen und Brückenhölzer aus Kunstholz in Millimetergenauigkeit formgenau zu produzieren und eindeutig zu kennzeichnen. Im Jahre 2015 hatte z. B. Network Rail für ein Projekt in Kent Langschwellen mit Längen um die 7220 mm bestellt. Bei diesem Projekt wurden die Schienenbefesti- »



BILD 4: Mobile Einrichtung zur Messung des QVW

mende Einarbeitung der Schotterkörner in den Schwellenboden statt (siehe Bild 6). Somit konnte der anfänglich geringere QVW, bedingt durch die anfänglich glattere Oberfläche, ausgeglichen werden.

Hinsichtlich des Einflusses der Geometrie zeichnet sich nach der Konsolidierung ein ähnlicher Trend wie im neu eingebauten Gleis ab: Die FFU-Schwelle mit der niedrigsten Höhe von 12 cm zeigt, bedingt durch das geringe Gewicht, nach wie vor den niedrigsten QVW (8,8 N/mm). Durch das Verkleben von drei Aufdopplungen im Werk mit den Abmessungen B/H/L = 6 x 26 x 15 cm an der Unterseite der FFU-Kunstholzschwelle (Höhe 12 + 6 cm) kam es zu einem Anstieg des QVW um 89%. Bei den FFU-Kunstholzschwellen (Höhe 16 + 2 cm) mit zwei Aufdopplungen mit den Abmessungen B/H/L = 2 x 26 x 15 cm wurde mit 16,8 N/mm der höchste QVW registriert. Durch den Einbau der Aufdopplungen kam es in diesem Fall zu einem Anstieg des QVW um 13%. Es kann festgehalten werden, dass der Einfluss von Aufdopplungen auf den QVW bei der 12 cm hohen FFU Schwelle am größten ist. Der Grund dafür ist, dass die 6 cm hohen Aufdopplungen tiefer ins Schotterbett eingreifen als die 2 cm hohen. Die Schwelle FFU 12 + 6 cm (QVW von 16,6 N/mm) liegt mit der FFU 16 + 2 cm (QVW von 16,8 N/mm) auf ähnlichem Niveau im konsolidierten Zustand.

Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass im konsolidierten Gleis bei FFU-Kunstholzschwellen die Anhebung bei der Querverschiebung in etwa gleich ist wie bei den Holzschwellen. Die FFU-Schwellen mit Aufdopplungen zeigten durchschnittlich eine minimal höhere Anhebung als die Schwellen mit glatter Unterseite. Es zeigte sich die Tendenz, dass durch die Konsolidierung die Anhebung der Schwelle durch Querverschiebung zugenommen hat.

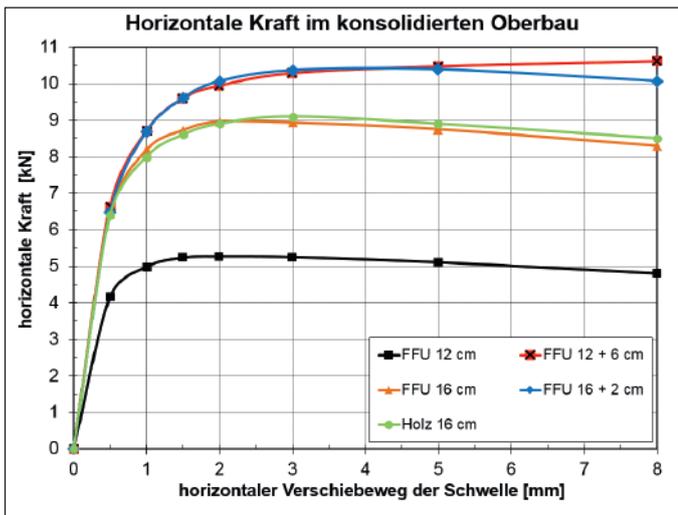


BILD 5: Kraft/Verschiebeweg im konsolidierten Zustand

gungen direkt auf die Langschwelen befestigt. Die Strecke liegt in einem Bogen. Dies bedeutet, dass die Langschwelle an jedem Eckpunkt eine andere Höhe hat. Die Höhe der Eckpunkte liegt im Bereich zwischen 44 und 54 cm.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Das Prüfamnt für Verkehrswegebau der TU München wurde von der Fa. SEKISUI Chemical GmbH beauftragt, an der Strecke Köln–Aachen an fünf verschiedenen Oberbaukonfigurationen mit FFU-Kunstholzwischwellen sowie Holzschwellen Untersuchungen hinsichtlich des Querverschiebewiderstandes (QVW) durchzuführen. Das Gleis wurde zwischen unkonsolidierter und konsolidierter Messung durch eine Betriebsbelastung von 33,9 Mio. Lasttonnen konsolidiert.

Die QVW-Messungen erfolgten an unbelasteten Einzel-Schwellen unterschiedlicher Höhe (12 cm bzw. 16 cm) ohne bzw. mit Aufdopplung (2 cm bzw. 6 cm) an der Schwellen-

unterseite im konsolidierten Oberbau. Zur Bestimmung des QVW wurde die betrachtete Schwelle von den Schienen gelöst und mittels Hydraulik quer verschoben. Dabei wurde der Betrag der Querverschiebung [mm] in Abhängigkeit der aufgetragenen Kraft [kN] kontinuierlich aufgezeichnet. Während der Messung wurde darauf geachtet, dass zwischen Prüfschwelle und Schienenfußunterseite kein Kontakt stattfindet.

Als Mittelwert von 14 bzw. 15 Schwellen je Oberbaukonfiguration wurden im konsolidierten Zustand folgende QVW-Werte bei 2 mm gemessen: 8,8 N/mm (FFU 12 cm), 16,6 N/mm (FFU 12 + 6 cm), 14,9 N/mm (FFU 16 cm), 16,8 N/mm (FFU 16 + 2 cm) und 14,8 N/mm (Holz 16 cm).

Die FFU-Schwelle 16 + 2 cm zeigte den höchsten QVW und konnte somit die Holzschwelle um ca. 14% übertreffen. Die FFU-Schwelle 16 cm mit glatter Unterseite ist im konsolidierten Zustand hinsichtlich des QVW mit der 16 cm Holzschwelle gleichwertig (QVW bei 2 mm: 14,9 N/mm bzw. 14,8 N/mm). Die Wirksamkeit der Schwellenaufdopplung konnte vor allem bei der 12



BILD 6: Kontaktfläche FFU Kunstholz und Schotter nach ca. 3 Jahren im Einsatz

+ 6 cm FFU Schwelle unter Beweis gestellt werden. Sie erreichte einen QVW (2 mm) von 16,6 N/mm, der mehr als 10% höher als jener der 16 cm Holz/FFU-Schwelle ist.

Im Vergleich zu den Messungen im unkonsolidierten Zustand [1] kann festgestellt werden, dass sich der QVW für alle fünf Schwellentypen mehr als verdoppelt hat. ◀

Literatur

- [1] Freudenstein S., Iliev D.: Forschungsbericht Nr. 3303 des Prüfamtes für Verkehrswegebau der TU München vom 30.12.2015, nicht veröffentlicht
- [2] Eisenmann J., Mattner L.: Forschungsbericht Nr. 1216 des Prüfamtes für Bau von Landverkehrswegen der TU München vom 01.12.1987, nicht veröffentlicht
- [3] Ito Y., Railway Technical Research Institute, August 1996, Survey and lab tests on FFU synthetic sleepers after 15 years in Service, nicht veröffentlicht.
- [4] Oikawa Y., Railway Technical Research Institute, June 2011, Follow-up, Survey on FFU Synthetic Sleepers after 30 Years in Service, nicht veröffentlicht.

► SUMMARY

FFU artificial timber sleepers: Measuring lateral resistance in ballasted tracks

The Institute of Road, Railway and Airfield Construction at the Munich University of Technology was commissioned by Sekisui Chemical to carry out tests at five locations on the railway line between Cologne and Aachen with different track configurations involving FFU artificial timber sleepers and natural timber ones in order to look into lateral resistance. Between the unconsolidated measurement and the consolidated one, the track underwent consolidation by having 33.9 million tonnes of load running over it.

The lateral resistance measurements were carried out on a consolidated track using the underside of single unloaded sleepers of different heights (12 or 16 cm) both with and without reinforcements in the same material (of 2 or 6 cm). At 2 mm, the following lateral resistance values were measured as a mean of 14 or 15 sleepers for each of the track configurations in the consolidated state: 8.8 N/mm (FFU 12 cm), 16.6 N/mm (FFU 12 + 6 cm), 14.9 N/mm (FFU 16 cm), 16.8 N/mm (FFU 16 + 2 cm) and 14.8 N/mm (natural timber 16 cm). The 16 + 2 cm FFU sleeper displayed the highest lateral resistance and thus outperformed the natural timber sleeper by approximately 14%. The 16 cm FFU sleeper with a smooth underside in the consolidated state has an equal performance to the 16 cm natural timber sleeper as regards lateral resistance (lateral resistance at 2 mm: 14.9 N/mm or 14.8 N/mm respectively). The effectiveness of reinforcing the sleeper was demonstrated especially for the 12 + 6 cm FFU sleeper.

Compared with the measurements in the unconsolidated state, it was ascertained that the lateral resistance more than doubled for all five sleeper types.