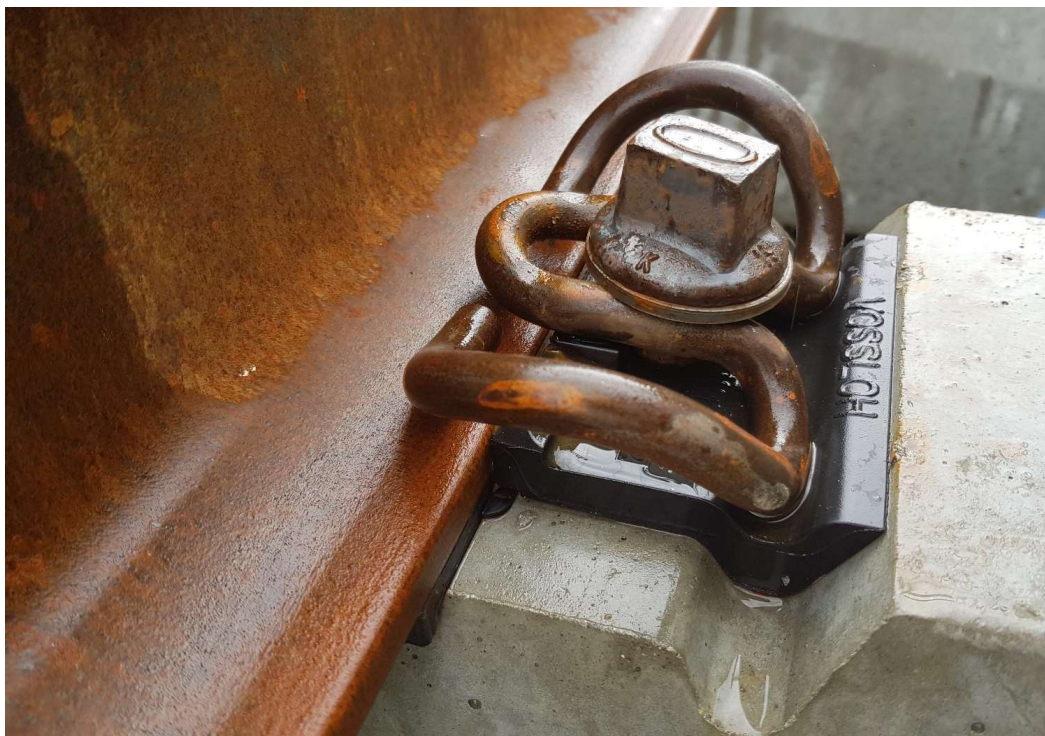




Forschungsprojekt Schienenbefestigung Phase I

Schlussbericht

Im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft



Quelle: KPZ Fahrbahn

Version	Datum	Ersteller	Bemerkungen / Änderungen
1.0	19.01.2021	P. Huber, P. Schneider	Erstausgabe
1.1	03.02.2021	P. Huber, P. Schneider	Ergänzungen aus Schlussbesprechung vom 28.01.2021

Philipp Huber

Direkt +41 79 571 31 15
E-Mail philipp.huber@kpz-fahrbahn.ch
Homepage www.kpz-fahrbahn.ch



KPZ Fahrbahn AG
Schützengasse 3
8001 Zürich
Schweiz

Impressum

Auftraggeberin:	Schweizerische Eidgenossenschaft; Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV), CH-3003 Bern. Das BAFU und das BAV sind Ämter des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
Auftragnehmerin:	KPZ Fahrbahn AG
Autor/Autorin:	Philipp Huber, Philippe Schneider
Begleitung:	BAFU: Franz Kuster, Fredy Fischer BAV: Robert Attinger, Christoph Dürig
Hinweis:	Dieser Bericht wurde im Auftrag der Bundesämter für Umwelt (BAFU) und Verkehr (BAV) verfasst. Für den Inhalt ist allein die Auftragnehmerin verantwortlich.

Management Summary

Ausgangslage und Ziel des Forschungsprojekts

Im Forschungsprojekt «Schienenbefestigung» soll der Einfluss der Befestigungskomponenten hinsichtlich der akustischen Eigenschaften auf dem Schienennetz erfasst und untersucht werden. Der Fokus liegt bei der Verlegeart mit moderner Schienenbefestigung auf Betonschwellen. Sie beinhaltet folgende Komponenten: Spannklemme (Skl), Winkelführungsplatte (Wfp), Zwischenlage (Zw), Schwellenschraube (Ss) und Schraubdübel (Sdü). Der Fokus soll dabei auf die Niederhalterkraft der Skl gelegt werden, da diese die Vorspannung der Zw beeinflusst, was sich wiederum auf die Stützpunktsteifigkeit auswirkt.

Die Montage und die Alterungsbeständigkeit der Befestigungskomponenten haben einen Einfluss auf die Inhomogenitäten des Oberbaus und auf die Gleisabklingrate sowie auf die Lärmabstrahlung des Gleises. Bis jetzt wurde der Zustand der Schienenbefestigung bei der Montage als auch im Betrieb unseres Wissens in der Vergangenheit nicht systematisch erfasst. Unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit war dies auch nicht nötig. In der Phase I dieses Forschungsprojekts soll geklärt werden, ob die Schienenbefestigung in den Bereichen Lärm und Unterhaltskosten einen relevanten Einfluss hat und wo hinsichtlich der Befestigungskomponenten ein Verbesserungspotenzial besteht.

Ergebnisse aus der Projektphase I

Die Phase I des Projekts «Schienenbefestigung» hat gezeigt, dass die Bahnen BLS, SOB und SBB im Regelfall die moderne Verlegeart W14 mit den passenden Befestigungskomponenten verwenden. Einziger Unterschied ist, dass entweder eine weiche oder steife Zwischenlage eingesetzt wird. Hingegen wird nach wie vor die alte Schwellenschraube mit Spitzgewinde verwendet, die ursprünglich von der Holzschwellenbefestigung abstammt. Dabei zeigt sich, dass die Schwellenschraube zum Verklemmen im Dübel neigt und bei der drehmomentgesteuerten Montage mit der Tirfoneuse nicht immer vorschriftsgemäss angezogen wird.

In den Datenbanken der Bahnen ist meist nur die Verlegeart erfasst, Angaben zu den Befestigungskomponenten (insbesondere Zw und deren Steifigkeit, Ausführung mit Kippschutz) fehlen, was bei Unterhaltsarbeiten zu Verwechslungen und falschen Bauteilkombinationen führen kann. Aufgrund unserer Beobachtungen bei Begehungen mit Streckenwärtern und Montagen von Schienenbefestigungen sowie Gesprächen mit den Instandhaltungsverantwortlichen bei BLS und SOB wird dem korrekten Einbau und Zustand der Schienenbefestigung wenig Beachtung geschenkt. Es wird darauf vertraut, dass der drehmomentgesteuerte Einbau die genügende Vorspannung der Spannklemmen gewährleistet und diese dauerhaft bestehen bleibt. Der gemäss dem Hersteller einzuhaltende Luftspalt von maximal 0,5 mm zwischen der Mittelschleife der Spannklemme und der Winkelführungsplatte wird nicht überprüft.

Eine von uns durchgeführte Stichprobenkontrolle hat ergeben, dass 10 – 15% der Schrauben zu wenig angezogen sind und dadurch die Niederhalterkraft der Spannklemme zu gering ist. Dies bewirkt eine zu geringe Vorspannung der Zwischenlage, was Inhomogenitäten im Gleis hinsichtlich der Steifigkeit zur Folge hat. Dadurch wird die Gleisabklingrate negativ beeinflusst und es kann zu mehr Lärmabstrahlung der Schiene führen und lokal auch mehr Gleisunterhalt erfordern. Grund hierfür ist die Schwellenschraube mit Spitzgewinde, die beim Eindrehen zum Verklemmen neigt und auch Verschmutzung im Dübel, welche das Eindrehen erschwert.

Es gibt bei der Schienenbefestigung für die B91-Betonschwelle verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten bei den Befestigungskomponenten, die sich sowohl hinsichtlich der LCC des Gleises (Montage und Gleisunterhalt) als auch hinsichtlich der Lärmabstrahlung positiv auswirken würden. Das Verbesserungspotential könnte mit folgernden neuartigen, verbesserten Komponenten der Schienenbefestigung ausgeschöpft werden:

- Neue Kombination Schwellenschraube Ss NG und Schraubdübel Sdü NG
Neue Schrauben-Dübel-Kombination mit Ss NG / Sdü NG mit Rundgewinde verhindert das Verklemmen beim Eindrehen und führt bei der drehmomentgesteuerten Montage zuverlässiger zur gewünschten Vorspannung der Spannklemme. Sie ist zudem weniger empfindlich auf Verschmutzung im Dübel, was das Eindrehen ebenfalls erleichtert.
- Neue Winkelführungsplatte Wfp 700-HTR
Die neu entwickelte Winkelführungsplatte Wfp 700-HTR hat eine grössere Führungsfläche entlang des Schienenfusses und führt dadurch zu einem erhöhten Verdrehwiderstand des Schienenfusses, was die Gleislagestabilität verbessert.
- Verlegeart W28 mit der Spannklemme Skl 28
Diese Verlegeart hat eine grössere Niederhaltekraft und führt zu einer höheren Stützpunktsteifigkeit. Bei Gleisen in engen Bögen führt dies zu einer signifikanten Reduktion der Schlupfwellenbildung, was sich sowohl positiv auf den Gleisunterhalt (Schienenschleifen) und die Lärmentwicklung auswirkt.
- Neue Schienenzwischenlage Zw 700-200-EPDM mit mittlerer Steifigkeit
Eine neue mittelsteife Zwischenlage Zw 700-200-EPDM aus dem verschleiss- und alterungsbeständigen Material EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) mit einer statischen Steifigkeit von $c_{\text{stat}} \approx 200 \text{ kN/mm}$ wäre ein sinnvoller und preiswerter Kompromiss zwischen den oberbautechnischen und den akustischen Anforderungen.

Dieses Massnahmenpaket führt zu homogenen Verhältnissen hinsichtlich Vorspannung der Spannklemmen und Stützpunktsteifigkeit sowie hinsichtlich Bewegungsfreiheit der Schiene im Stützpunkt zu einer Versteifung im Stützpunkt, womit die Gleisabklingrate erhöht wird und auch die LCC des Gleises (Montage und Gleisunterhalt) positiv beeinflusst werden.

Empfehlungen für die Projektphase II

Aufgrund der Erkenntnisse aus der Phase I wird für die Phase II dieses Forschungsprojekts empfohlen, das Massnahmenpaket mit den verbesserten Schienenbefestigungskomponenten in einer Teststrecke einzubauen und deren Wirkung messtechnisch zu erfassen. Dies scheint uns am innovativsten, zukunftsgerichtet und zielführend dahingehend, dass bei einer positiven Wirkung hinsichtlich Lärminderung eine weitere Massnahme zur Verfügung steht. Je nach Kombination der Komponenten gehen wir von einem Lärminderungspotenzial von 1 – 3 dBA aus, es fehlen aber noch Simulationen resp. Messungen im Gleis. Auch hinsichtlich der LCC des Oberbaus bieten die neuen Befestigungskomponenten ein Verbesserungspotential bei der Montage und beim Gleisunterhalt sowohl auf hochbelasteten Strecken als auch bei Gleisen in engen Bögen (Reduktion der Schlupfwellenbildung). Wir empfehlen daher, in der Phase II mit einer interessierten Bahn eine Teststrecke im Rahmen der Fahrbahnerneuerung mit verschiedenen Abschnitten zu planen und zu realisieren.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage.....	6
2.	Ziel und Zweck des Auftrags.....	7
3.	Inhalt und Struktur des Forschungsvorhabens.....	8
3.1.	Phase I	8
3.2.	Phase II	9
4.	WP I-2: Schienenbefestigungskomponenten bei BLS und SOB	10
4.1.	Ausgeführte Arbeiten WP I-2	10
4.2.	Zusammenfassung WP I-2.....	10
5.	WP I-3: Zustand der Schienenbefestigungen im Betrieb.....	13
5.1.	Ausgeführte Arbeiten WP I-3	13
5.2.	Zusammenfassung WP I-3.....	13
6.	WP I-4: Auswirkungen auf die Lärmabstrahlung.....	16
6.1.	Ausgeführte Arbeiten WP I-4	16
6.2.	Theoretische Betrachtungen WP I-4	16
6.3.	Erfahrungen bei Messungen WP I-4	19
6.4.	Zusammenfassung WP I-4.....	22
7.	Zusammenfassung aller WP der Phase I	24
8.	Empfehlungen für die Phase II.....	26
9.	Literaturverzeichnis	27
	Anhang.....	28
	Anhang 1: Übersicht Schienenbefestigungen v6 vom 01.12.2020	29
	Anhang 2: Protokoll Einbau Betonschwellengleis SOB Wädenswil	30
	Anhang 3: Protokoll Streckenbegehung SOB Schindellegi - Wädenswil	33
	Anhang 4: Protokoll Zwischenlagentausch BLS Kerzers-Müntschemier	35
	Anhang 5: Protokoll Interview mit Albert Iten, Instandhaltung SOB-Südnetz	37
	Anhang 6: Protokoll Interview mit Andreas Bellwald, Instandhaltung BLS.....	40
	Anhang 7: Literatur, Kurzzusammenfassung Stichworte	45

1. Ausgangslage

Im Jahr 2000 waren in der Schweiz 265'000 Menschen schädlichem oder lästigem Eisenbahnlärm ausgesetzt. Zu ihrem Schutz wurde nach Massgabe des Bundesgesetzes vom 24. März 2000 über die Lärmsanierung der Eisenbahnen (BGLE alt) bis 2015 ein umfassendes Konzept zur Lärmreduktion umgesetzt. Es beinhaltete Massnahmen am schweizerischen Rollmaterial, die Realisierung von Lärmschutzwänden und den Einbau von Schallschutzfenstern. Damit konnten unter weitgehender Einhaltung der Fristen und mit einer wesentlichen Unterschreitung der ursprünglich geschätzten Kosten zwischen 160'000 und 170'000 Menschen vor übermässigem Lärm geschützt werden.

Das im Gesetz formulierte Minimalziel zur Anzahl der zu schützenden Personen (Schutzgrad) von mindestens zwei Dritteln wurde mit 60-64 % jedoch knapp nicht erreicht.

Das Parlament trat deshalb im Rahmen der Beratung der Gesamtschau FinöV (ZEB-Gesetz) nicht auf eine Kürzung des Lärmkredites ein. Es verlangte, dass mit den verbleibenden Finanzmitteln eine Verbesserung des Lärmschutzes zu erreichen sei.

Im Rahmen des revidierten BGLE sind zur Vergrösserung der Massnahmenpalette zur Lärmbekämpfung unter anderem Mittel für Ressortforschung vorgesehen (Art. 10a BGLE).

Mit dieser Ressortforschung sollen lärm mindernde Technologien bei Infrastruktur und Rollmaterial zur Reduzierung des Fahrlärms von Eisenbahnen um mindestens 1 dB (Beurteilungspegel L_r nach Massgabe LSV) erforscht werden. Die Vorhaben können im Stadium der Entwicklung (Ideenphase), Erprobung (Konzeptphase) oder Zulassung (Anwendungsphase) sein.

Quelle: BAFU

2. Ziel und Zweck des Auftrags

Im Forschungsprojekt «Schienenbefestigung» soll der Einfluss der Komponenten der Schienenbefestigungen generell und insbesondere im eingebauten Zustand hinsichtlich akustischer Eigenschaften auf dem Schienennetz erfasst und untersucht werden.

Der Fokus liegt bei der modernen Schienenbefestigung auf Betonschwellen. Sie beinhaltet verschiedene Komponenten. Die wichtigsten Befestigungskomponenten sind:

- Spannklemme
- Winkelführungsplatte
- Schienenzwischenlage
- Schwellenschraube und Schraubdübel

In der Vergangenheit wurden meist steife Zwischenlagen eingebaut. In den letzten Jahren war bei Oberbauerneuerungen ein Trend zum Einbau von weichen Zwischenlagen zu beobachten. Bei diesen Befestigungen mit weichen Zwischenlagen kann sich die Stützpunktsteifigkeit je nach Niederhaltekraft der Spannklemmen stark ändern. Es ist deshalb entscheidend, dass die optimale Niederhaltekraft über die Zeit erhalten bleibt.

Die optimale Niederhaltekraft kann aus folgenden Gründen beeinträchtigt sein:

- Fehler beim Einbau der Schienenbefestigung
- Schwellenschrauben lösen sich mit der Zeit
- Materialermüdung der Spannklemme oder der Zwischenlage
- Verschleiss an der Zwischenlage

Bei einer steifen Verbindung von Schiene und Schwelle hat die Schiene im Stützpunkt weniger Freiheiten zu schwingen und strahlt deshalb weniger Schall ab. Es ist auch denkbar, dass (einzelne) lose Schienenbefestigungen die Entstehung von Schienenschäden begünstigen. Eine Beeinträchtigung der Sicherheit des Bahnsystems konnte in der Vergangenheit nicht beobachtet werden.

Der Zustand der Schienenbefestigung wurde unseres Wissens in der Vergangenheit nicht systematisch erfasst. Unter dem Gesichtspunkt der Sicherheit war dies nicht nötig. Es ist zu klären, ob die Schienenbefestigung in den Bereichen Lärm und Unterhaltskosten einen relevanten Einfluss hat. Dieses Projekt möchte den Zustand der Schienenbefestigung im realen Gleis dokumentieren und den Einfluss der beobachteten Variabilität auf die Lärmabstrahlung abschätzen.

Die Untersuchung konzentriert sich dabei primär auf die Netze der BLS und der SOB. Hinsichtlich Fahrbahntyp fokussiert die Untersuchung auf Betonschwellen im Schotteroberbau.

Es sind folgende Arbeiten vorgesehen:

- Zusammenstellen der Informationen zu eingesetzten Schienenbefestigungen
- Dokumentation des Einbaus der Befestigungen durch Gleisbauunternehmen
- Dokumentation des Zustandes von eingebauten Befestigungen
- Messung der Gleisabklingrate mit variierter Niederhaltekraft der Befestigung
- Literaturrecherche und Berichterstattung

3. Inhalt und Struktur des Forschungsvorhabens

Die Arbeiten sind in eine Phase I und eine Phase II unterteilt. Vorerst wird die Phase I bearbeitet. Basierend auf den Erkenntnissen aus Phase I und dem vorhandenen Budget wird in Abstimmung mit dem BAFU das weitere Vorgehen in Phase II festgelegt. Beim Abschluss der Phase I sind die weiteren Untersuchungen in Phase II zu definieren.

Die Phase I wird in vier Workpackages WP I-1 bis WP I-4 unterteilt.

3.1. Phase I

3.1.1. WP I-1: Projektleitung

WP Leiter: Philipp Huber, KPZ Fahrbahn AG, Zürich

- Ansprechperson für BAFU
- Kommunikation, Besprechungen mit BAFU / intern, Protokolle
- Vorgehen und Konzepte
- Führung und Koordination der Beteiligten
- Administration und Auftragsabwicklung
- Termin- und Kostenkontrolle

3.1.2. WP I-2: Schienenbefestigungskomponenten bei BLS und SOB

WP Leiter: Philippe Schneider, KPZ Fahrbahn AG, Bern

Sammeln, Gruppieren und Zusammenstellen verfügbarer Informationen zu eingesetzten Schienenbefestigungen bei BLS und SOB, Angaben zu Kosten und Lebensdauer, Statistik, Häufigkeitsverteilung, allenfalls Gegenüberstellung zu vereinzelter Informationen bei SBB, ÖBB, DB, SNCF.

Komponenten:

- Zwischenlagen Zw (Steifigkeit, Abmessungen, Bauform, Material, Kippschutz, Alter)
- Spannklemmen Skl (Typ)
- Winkelführungsplatten Wfp (Material, Form)
- Schwellenschrauben Ss und Schraubdübel Sdü (Material, Gewindetyp)
- Schienenprofile (60 E1/E2, 54 E2)
- Betonschwellen (B91, Flachbetonschwelle B06 FS, ältere Betonschwellentypen)

Deliverable D I-2: Tabellarische Zusammenstellung, Kurzbericht

3.1.3. WP I-3: Zustand der Schienenbefestigungen im Betrieb

WP I-3.1, Zustand der Schienenbefestigungen im Betrieb

WP Leiter: Philipp Huber, KPZ Fahrbahn AG, Zürich

Begehungen, Interviews, Beobachtungen, Protokolle:

- Begehung mit Streckenwärter SOB und/oder BLS
- Interviews mit Instandhaltungsverantwortlichen SOB, BLS, sammeln Zustandsrapporte
- Literatur, Berichte / Diplomarbeiten zu Schadensanalysen etc.
- Begleitung Ein- und Ausbau Schienenbefestigungen bei verschiedenen Gleisbauunternehmen, Fokus Verspannung, Spalt Skl-Wfp bei Einbau, Zustand Spalt Skl-Wfp, Schwellenschrauben / Gewinde bei Ausbau, Entnahme Zwischenlagen für allfällige Laborprüfungen (siehe WP II-3.3)

Deliverable D I-3.1: Kurzbericht mit Protokollen

WP I-3.2: Sensitivitätsanalyse Spaltmass Skl-Wfp (in Phase I nicht ausgeführt)

WP Leiter: Philipp Huber, KPZ Fahrbahn AG, Zürich

- Vorversuch Einstellen Spaltmass auf 0,5 mm
- Einstellen des Spaltmasses bei Befestigung W14 auf die zulässigen 0,5 mm auf 30 m Länge, in Abschnitten mit weicher und steifer Zwischenlage
- Messung Gleisabklingrate in den zwei Abschnitten
- Anziehen Schienenbefestigung auf 0 mm
- Wiederholung Messung Gleisabklingrate

Deliverable D I-3.2: Messbericht

3.1.4. WP I-4: Auswirkungen auf die Lärmabstrahlung

WP Leiter: Philipp Huber, KPZ Fahrbahn AG, Zürich

- Recherche bisheriger akustischer Analysen und Messungen zum Thema (Forschungsprojekte SBB Faktor X, BAFU Ressortforschung, Publikationen Bahnakustiktagungen, IWRN etc.)
- Recherche verfügbare Laborprüfberichte Zwischenlagen, Steifigkeit statisch / dynamisch, Ermüdung und Kriechen
- Zusammenführen der akustisch relevanten Ergebnisse WP I-2 und WP I-3
- Zusammenstellung in Bericht, Empfehlungen, weiteres Vorgehen

Deliverable D I-4: Bericht

3.2. Phase II

Wie bereits erwähnt, bezieht sich dieser Bericht auf die Phase I des Forschungsprojekts. Aufgrund der Erkenntnisse werden im Kapitel 8 Empfehlungen für die Phase II abgegeben.

4. WP I-2: Schienenbefestigungskomponenten bei BLS und SOB

4.1. Ausgeführte Arbeiten WP I-2

- Recherche und Abklärungen zu den Schienenbefestigungen / Verlegearten
- Abklärungen zu den Komponenten bei Betonschwellen im Schotteroberbau
- Erstellung und Validierung der Übersicht Schienenbefestigungen, siehe Anhang 1
- Gespräche bei BLS und SOB Unterhaltsverantwortlichen zum Einsatz der verschiedenen Befestigungskomponenten in ihren Netzen
- Vervollständigung und Fertigstellung der Übersicht Schienenbefestigungen
- Erstellung Kurzbericht als Zusammenfassung des WP I-2 im Schlussbericht

4.2. Zusammenfassung WP I-2

Die ersten Betonschwellen mit modernen Schienenbefestigungen wurden in der Schweiz in den 70er-Jahren eingebaut und haben sich in den letzten 50 Jahren stets weiterentwickelt. Dies führte dazu, dass im Laufe der Zeit immer neue und verbesserte Befestigungskomponenten entwickelt und eingeführt wurden. Deshalb gibt es heute eine Vielzahl unterschiedlicher Befestigungen für Betonschwellen in den Netzen der Bahnen.

Die Schienenbefestigung und deren Komponenten hat verschiedenste sicherheitsrelevante Aufgaben im Gleis zu erfüllen. Wichtig ist auch, dass die Befestigungen den komplexen Anforderungen gewachsen sind und dass die einzelnen Komponenten optimal aufeinander abgestimmt sind.

Um eine aktuelle Übersicht zu den Schienenbefestigungen bei Betonschwellen im Schotteroberbau zu erhalten, wurden im Rahmen der Phase I in diesem Projekt alle notwendigen Daten und Unterlagen im WP I-2 zusammengetragen. Danach wurde diese Übersicht der Schienenbefestigungen mit den zuständigen Fachpersonen (Unterhalt und Anlageverantwortliche) bei der BLS und der SOB besprochen und mit deren Inputs ergänzt.

Die Übersicht Schienenbefestigungen v6 vom 01.12.2020, siehe Anhang 1, bildet dabei die Basis für den Einsatz der Befestigungskomponenten bei der BLS und SOB und als Vergleich bei der SBB. Sie ist gleichzeitig auch das Hauptergebnis aus dem WP I-2. Ergänzend zur Übersichtstabelle folgen hier noch ein paar ergänzende Ausführungen und die Zusammenfassung der wichtigsten Punkte.

Die Übersichtstabelle zeigt, dass sich bei den Schienenbefestigungen für die Betonschwellen historisch bedingt eine Vielzahl an Schienenbefestigungssystemen resp. -komponenten etabliert haben. Diese Entwicklung lässt sich grob so zusammenfassen, dass bei den Betonschwellen -im Gegensatz zu den Holz- und Stahlschwellen- von Anfang an eine elastische Befestigung mittels Spannklemmen (Skl) vorhanden war. Allerdings war die Verlegeart W3 mit der Skl 1 von der Dauerfestigkeit der Spannklemme her auf eine dynamische Bewegung von 1.4 mm begrenzt. Deshalb lässt die Verlegeart W3 keine weichen Schienenzwischenlagen (Zw) zu. Die modernere Verlegeart W14 mit der Skl 14 lässt bereits eine dynamische Bewegung von 2.0 mm zu, so dass auch weiche Zw eingesetzt werden können. Weiterentwicklungen wie z.B. die Verlegeart W28 erlaubt eine dynamische Bewegung von 2.5 mm.

Aktueller Standard beim Betonschwellengleis im Schotteroberbau

In der Übersichtstabelle, siehe Anhang 1, ist der aktuelle Standard beim Betonschwellengleis im Schotteroberbau ersichtlich. Er wurde für jede Bahn mit gelber Farbe hervorgehoben. Der aktuelle Standard beim Betonschwellengleis im Schotteroberbau besteht aus:

- Schienenprofil 54 E2 (BLS, SOB, SBB) und 60 E1/E2 (BLS, SBB)
- Verlegeart W14 (BLS, SOB, SBB)
- Betonschwelle B91 (BLS, SOB, SBB)

Die Verlegeart W14 besteht aus folgenden Befestigungskomponenten, siehe Abbildung 1:

- Schwellenschraube Ss 0 mit Unterlagsscheibe Uls 7
- Schiene 54 E2 / 60 E1/E2
- Spannklemme Skl 14
- Winkelführungsplatte Wfp 14K-12
- Schienenzwischenlage Zw (Details zu den Zw siehe unten)
- Schraubdübel Sdü 9c 203

Diese Komponenten werden sowohl bei der BLS als auch bei der SOB und der SBB verwendet. Einziger Unterschied ist die Schienenzwischenlage Zw.

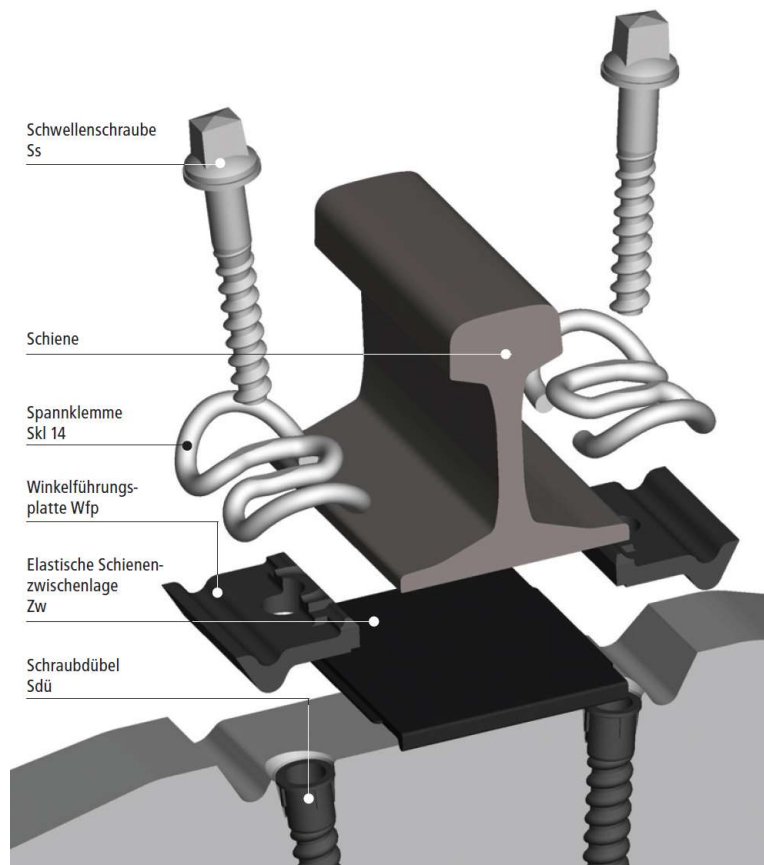


Abbildung 1: Verlegeart W14

Quelle: Vossloh

Die BLS verwendet im Regelfall die weichen Schienenzwischenlagen Zw 700a/700b, die SOB die steifen Schienenzwischenlagen Zw 664-6 und Zw 686a und die SBB die steifen Schienenzwischenlagen Zw 661-6 und Zw 664-6.

Das zeigt exemplarisch das Dilemma der Bahnen zwischen oberbautechnischem Optimum (weiche Zwischenlage) und lärmtechnischem Optimum (steife Zwischenlage). Je nach Gewichtung der beiden Parameter wird dann entweder eine weiche oder eine steife Zw gewählt. Aktuell laufen Projekte, um das Beste beider Zw-Typen in einer neuen Zw zu vereinen. Die Schwierigkeiten hierbei sind die hohen Belastungen im Gleis (Dauerfestigkeit und Langlebigkeit der Zw) und der Preis. Inwieweit sich dämpfende Eigenschaften positiv auf den Lärm auswirken und diese neu entwickelten Zw trotzdem den Belastungen im Gleis standhalten, wird sich in Zukunft zeigen müssen.

Verbesserungsvorschläge für die Schienenbefestigung

Im Rahmen des WP I-2 wurden auch bekannte Schwächen der aktuellen Schienenbefestigung in der Schweiz betrachtet und dabei nach valablen Verbesserungen recherchiert. Die Varianten der Befestigungskomponenten mit Optimierungspotenzial sind in der Übersichtstabelle, siehe Anhang 1, in grüner Farbe hervorgehoben. Es handelt sich um folgende Verbesserungsvorschläge für die Schienenbefestigungen bei Betonschwellen in der Schweiz:

- Verlegeart W28 mit der Spannklemme Skl 28

Diese Verlegeart hat eine grössere Niederhaltekraft, was sich insbesondere in engen Bögen sehr positiv auf die Schlupfwellenbildung und dadurch auf den entstehenden Lärmpegel auswirkt [20]. Diese Verlegeart ist erprobt und in Europa im Einsatz.

- Neue Kombination Schwellenschraube Ss NG und Schraubdübel Sdü NG

Die aktuellen Schwellenschrauben mit Spitzgewinde Ss 0 neigen dazu, sich bei der Montage im Schraubdübel Sdü 9c 203 zu verklemmen resp. teilweise quasi ein neues Gewinde in den Schraubdübel zu drehen. Bei der heute üblichen drehmomentgesteuerten Montage kann dies dazu führen, dass die Spannklemmen eine ungenügende Vorspannung aufweisen. Die neue Kombination aus Schwellenschraube Ss NG mit Rundgewinde und Schraubdübel Sdü NG würde zu einem besseren Sitz der Schwellenschraube und dadurch zur gewünschten Vorspannung der Spannklemmen führen. Diese Schwellenschrauben und Schraubdübel sind erprobt und in Europa zugelassen.

- Neue Winkelführungsplatte Wfp 700-HTR

Die neue Winkelführungsplatte Wfp 700-HTR, siehe Abbildung 2, ist eine aktuelle Weiterentwicklung von Vossloh Fastening Systems, welche im Vergleich zur Wfp 14K zu einem höheren Verdrehwiderstand und dadurch zu einer besseren Gleislagestabilität führt. Das wäre in der Schweiz bei Gleisen in engen Bögen von Vorteil. Diese Wfp 700-HTR soll im Jahr 2021 bei der DB in Deutschland und bei der ÖBB in Österreich eingebaut und getestet werden. Ein Einbau bei einer Schweizer Bahn wäre möglich.

- Schienenzwischenlage Zw 700a-200-EPDM mit mittlerer Steifigkeit

Wie bereits erwähnt, existieren heute auf dem Markt entweder steife Schienenzwischenlagen aus EVA (Ethylen-Vinyl-Azetat) oder weiche Schienenzwischenlagen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer). Für die Versuche in Phase II wäre es sinnvoll, eine neue Schienenzwischenlage Zw 700a-200-EPDM mit einer mittleren Steifigkeit von $c_{\text{stat}} \approx 200 \text{ kN/mm}$ aus EPDM testweise einzubauen. Solche Zw können problemlos hergestellt werden, halten den Belastungen im Gleis stand, sind langlebig und preisgünstig. Ein Einbau bei einer Schweizer Bahn wäre möglich.

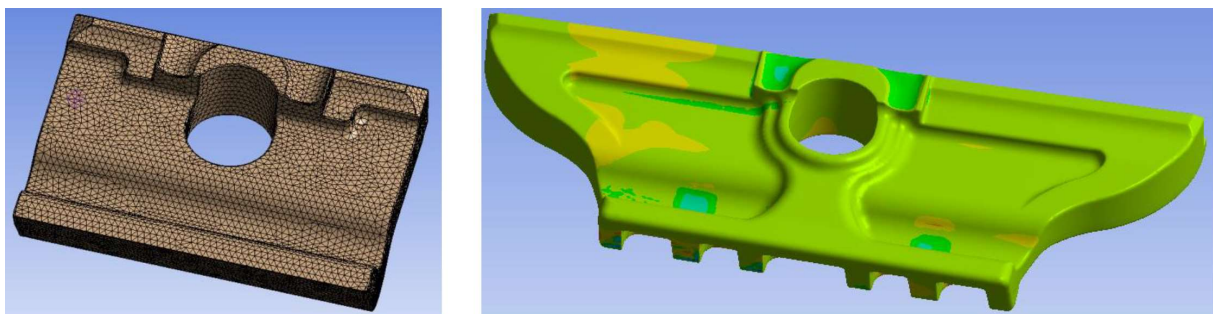


Abbildung 2: Vergleich Wfp 14K (links) mit neuer Wfp 700-HTR (rechts)

Quelle: Vossloh

5. WP I-3: Zustand der Schienenbefestigungen im Betrieb

5.1. Ausgeführte Arbeiten WP I-3

- Begleitung Einbau Schienenbefestigungen Wädenswil, siehe Protokoll im Anhang 2
- Begehung mit Streckenwärter SOB, Strecke Schindellegi - Wädenswil, siehe Protokoll im Anhang 3
- Begehung mit Streckenwärter BLS, Strecke Kerzers - Müntschemier während des Zwischenlagenwechsels, siehe Protokoll im Anhang 4
- Interview mit Albert Iten, SOB, Verantwortlicher Instandhaltung, siehe Protokoll im Anhang 5
- Interview mit BLS, Verantwortlicher Instandhaltung, siehe Protokoll im Anhang 6
- Literaturrecherche, siehe Anhang 7
- Nicht ausgeführt: Sensitivitätsanalyse Spaltmass, siehe folgendes Kapitel 5.2

5.2. Zusammenfassung WP I-3

Der Zustand der Schienenbefestigungen im Betrieb wurde bei der SOB und BLS stichprobenweise in ausgewählten Streckenabschnitten mit Betonschwellen untersucht. Es wurde insbesondere auf die Verspannung bzw. den Luftspalt zwischen Mittelschleife Spannklemme und Winkelführungsplatte geachtet, siehe Abbildung 3.

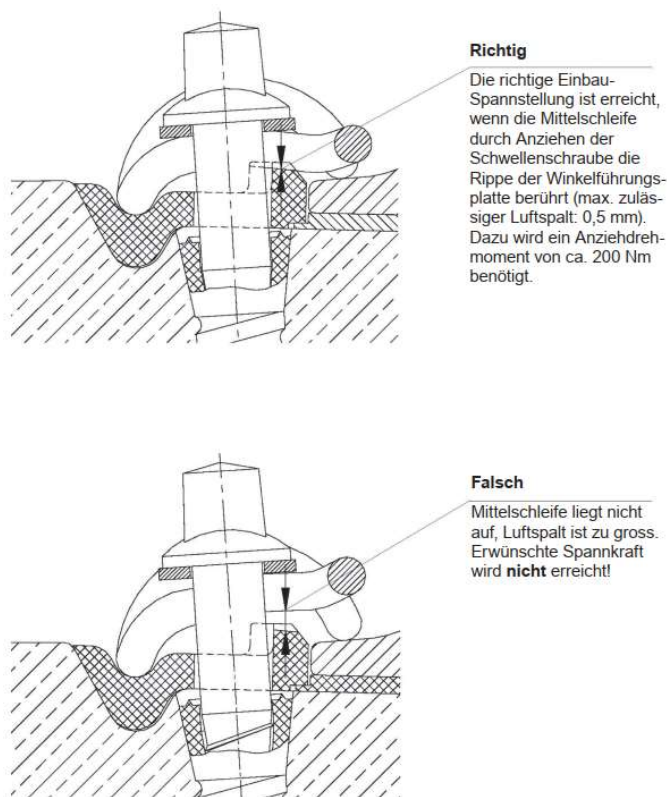


Abbildung 3: Einbauanleitung Schienenbefestigung W14 mit Skl 14

Quelle: Vossloh / [18]

Beim Einbau von Schienenbefestigungen durch Vanoli in einem kurzen Streckenabschnitt von ca. 300 m bei Wädenswil, siehe Protokoll im Anhang 2, zeigte sich, dass der maximal zulässige Luftspalt von 0.5 mm zwischen Mittelschleife Spannklemme und Winkelführungsplatte vielfach nicht eingehalten wird, sondern teilweise mehrere Millimeter betrug. Allerdings wurde diese Nichteinhaltung der Einbauanweisung Vossloh von den Verantwortlichen gar nicht bemerkt. Es wurde ausschliesslich auf das Drehmoment bei der Tirefoneuse geachtet, welche in einem ersten Schritt mit einem Drehmoment von 160 Nm und nach dem Neutralisieren mit 220 Nm anzog. Auffällig war auch die Verschmutzung durch kleine Steine infolge Stopfen, welche sich teilweise zwischen Spannklemme und Winkelführungsplatte festsetzten.

Bei der Streckenbegehung der SOB Strecke Schindellegi - Wädenswil mit einem Streckenwärter wurde generell eine ordentliche Verspannung der Schienenbefestigungen festgestellt, siehe Protokoll im Anhang 3. Nur vereinzelt wurde ein zu grosser Luftspalt erkannt. Aufgefallen sind andererseits die B70-Schwellen mit Rissen ausgehend von der Schwellenschulter bei der Befestigung. In einzelnen Bögen sind in diesem Streckenabschnitt weiche Zwischenlagen eingebaut in Kombination mit den Winkelführungsplatten mit Kippschutz.

Beim BLS-Streckenabschnitt Kerzers - Müntschemier wurde die Häufigkeit von deutlich zu wenig vorgespannten Spannklemmen (Luftspalt > ca. 2 mm) untersucht. In einem Abschnitt mit W14-Befestigung und steifen Zwischenlagen waren 10% (bei 100 Stichproben) der Spannklemmen zu wenig vorgespannt. Im Bereich mit weichen Zwischenlagen waren 13% (bei 100 Stichproben) der Spannklemmen zu wenig vorgespannt.

Die Durchsicht der Literatur zeigte, dass es Fälle gibt mit ungenügender Verspannung in der Schienenbefestigung wie die folgenden zwei Beispiele zeigen:

Im SBB Projekt Faktor X ([15],[16]) wurde die unüblich tiefe Gleisabklingrate bei B70-Schwellen in Verbindung gebracht mit ungenügender Verspannung zwischen Schiene und Schwelle, verursacht durch Alterung und Verschleiss der Zwischenlagen. Aufgrund der Beobachtung bei der SOB mit Rissen in den B70-Schwellen ist auch denkbar, dass die Risse etwas mit der Lockerung der Befestigungen zu tun haben könnten.

Bei der BLS Strecke zwischen Thun und Lötschberg-Basistunnel sind aufgrund einer Untersuchung ([11]) fünf Bögen mit Spannklemmenbrüchen bekannt. Die Bögen wiesen Radien zwischen 349 m und 491 m auf, und waren mit B91-Betonschwellen, Ws-Befestigung, Skl 1 oder Skl 14, Wfp 14K-12 in Kombination mit Zw 700b-AT-100-SF125 (zumindest Schadau-Kurve in Thun) und Schienen 54 E2 bestückt. Die Schadau-Kurve, wo die Problematik als erstes auftrat, wurde detailliert untersucht. Materialfehler bei den Spannklemmen wurden aufgrund Materialuntersuchungen ausgeschlossen. Die Quintessenz der Untersuchung war, dass Wfp und Zw nicht zusammenpassten bzw. für diese Zw eine Wfp mit Kippschutz hätte eingebaut werden müssen. Zudem wurde auch festgestellt, dass einige Spannklemmen aufgrund des festgestellten Luftspaltes von mehreren Millimetern nicht richtig montiert waren. Diese Fehler führten zu grossen Relativbewegungen zwischen Schienenfuss und Winkelführungsplatte (Kippen sowie Verschiebung horizontal quer), die von den Spannklemmen aufgenommen werden mussten. Interessanterweise brachen die Spannklemmen immer am höchsten Punkt, im Gegensatz zu Spannklemmenbrüchen in Deutschland und Österreich [13], die hinten bei der Auflage brachen, wo aufgrund des grösseren Hebelarmes bei vertikaler Kontaktkraft zwischen Schienenfuss und Spannklemme die grösste Beanspruchung herrscht.

Folglich dürfte bei den BLS-Bögen eine Kontaktkraft in Richtung horizontal-quer den Bruch verursacht haben (Schienenfuss bewegt sich horizontal quer zwischen den Wfp). Dies wiederum bestätigt die Beobachtung ungenügender Verspannung. Die BLS vermutet im vorliegenden Fall eine falsche bzw. unsaubere Montage, verursacht durch Zeitdruck und Nacharbeit.

Die zwei Beispiele zeigen, dass es unterschiedliche Ursachen gibt für die ungenügende Verspannung. Einerseits ist es bereits eine unsaubere, nur über das Drehmoment der Tirefoneuse gesteuerte Montage, wie auch das Beispiel Wädenswil zeigt, andererseits kann die Verspannung durch Alterung und Verschleiss der Zwischenlage, allenfalls Lockerung der Schwellenschraube durch Risse in der Betonschwelle etc. nachlassen.

Die bisherigen Beobachtungen und Recherchen zeigen, dass das maximale Spaltmass von 0.5 mm vermutlich vielerorts überschritten wird und nicht wie angenommen auf dem Netz grösstenteils gewährleistet ist. Mehrfach wurde ein Spaltmass von mehreren Millimetern festgestellt. Daher sind wir der Meinung, dass die Sensitivitätsanalyse Spaltmass (WP I-3.2) keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern wird. Zudem wird sich die Niederhalterkraft pro Befestigung aufgrund der Federkennlinie der Skl 14 bei Einstellen des Luftspaltes von 0.5 mm gegenüber 0 mm Luftspalt von ca. 18 kN nur um ca. 1 kN reduzieren, womit sich auch die Stützpunktsteifigkeit und Gleisabklingrate kaum ändern wird. Abklärungen bei der BLS, SOB und Vanoli ergaben ausserdem, dass es zur Zeit kein Verfahren gibt, den Luftspalt zuverlässig auf 0.5 mm einzustellen. Die Sensitivitätsanalyse Spaltmass (WP I-3.2) wurde daher aus oben genannten Gründen nach Absprache mit dem Auftraggeber gestrichen.

6. WP I-4: Auswirkungen auf die Lärmabstrahlung

6.1. Ausgeführte Arbeiten WP I-4

- Literaturrecherche akustische Analysen und Messungen, siehe Anhang 7
- Recherche Laborprüfberichte
- Zusammenstellung in Bericht, Empfehlungen, weiteres Vorgehen

6.2. Theoretische Betrachtungen WP I-4

6.2.1. Zwischenlagensteifigkeit in Abhängigkeit der Vorspannung

Fahrbahnseitig kann die Lärmabstrahlung resp. Lärmemission bei Zugsvorbeifahrt hauptsächlich über die Schienenrauheit und Gleisabklingrate beeinflusst werden. Bekannt ist, dass die Gleisabklingrate durch die Schienenbefestigung beeinflusst wird, insbesondere durch die Eigenschaften der Zwischenlage (Steifigkeit, Dämpfung) und die Vorspannung mittels Spannklemmen. Die Vorspannung beeinflusst dabei die Steifigkeit der Zwischenlage, da die verwendeten Werkstoffe (EPDM, EVA) im Gegensatz zu Stahlfedern nichtlineare Federkennlinien aufweisen, i.d.R. mit progressivem Verlauf. Dies bedeutet, die Steifigkeit nimmt mit zunehmender Belastung/Vorspannung zu. Abbildung 4 zeigt für eine typische weiche Zwischenlage diesen progressiven Verlauf der Federkennlinie und die ermittelten Tangentensteifigkeiten für 28 kN (übliche Vorspannung Skl 28), 18 kN (übliche Vorspannung Skl 14) und beispielsweise 9 kN (Vorspannung gelockert, Luftspalt ca. 6 mm), welche sich mit 75 kN/mm, 60 kN/mm und 46 kN/mm deutlich unterscheiden. Zwar handelt es sich im gezeigten Beispiel um statische Steifigkeiten, welche eigentlich für die Akustik nicht relevant sind, aber die dynamischen Steifigkeiten unterscheiden sich zu den statischen normalerweise nur über einen Versteifungsfaktor, welcher material- und frequenzabhängig ist, so dass die Steifigkeitsverhältnisse akustisch ähnlich sind.

Bei Zwischenlagen mit progressivem Verlauf der Federkennlinie kann daher die Steifigkeit der Zwischenlage und damit die Gleisabklingrate mittels Vorspannung erhöht werden. Dafür eignet sich z.B. die Spannklemme Skl 28 mit einer höheren Vorspannkraft von ca. 28 kN.

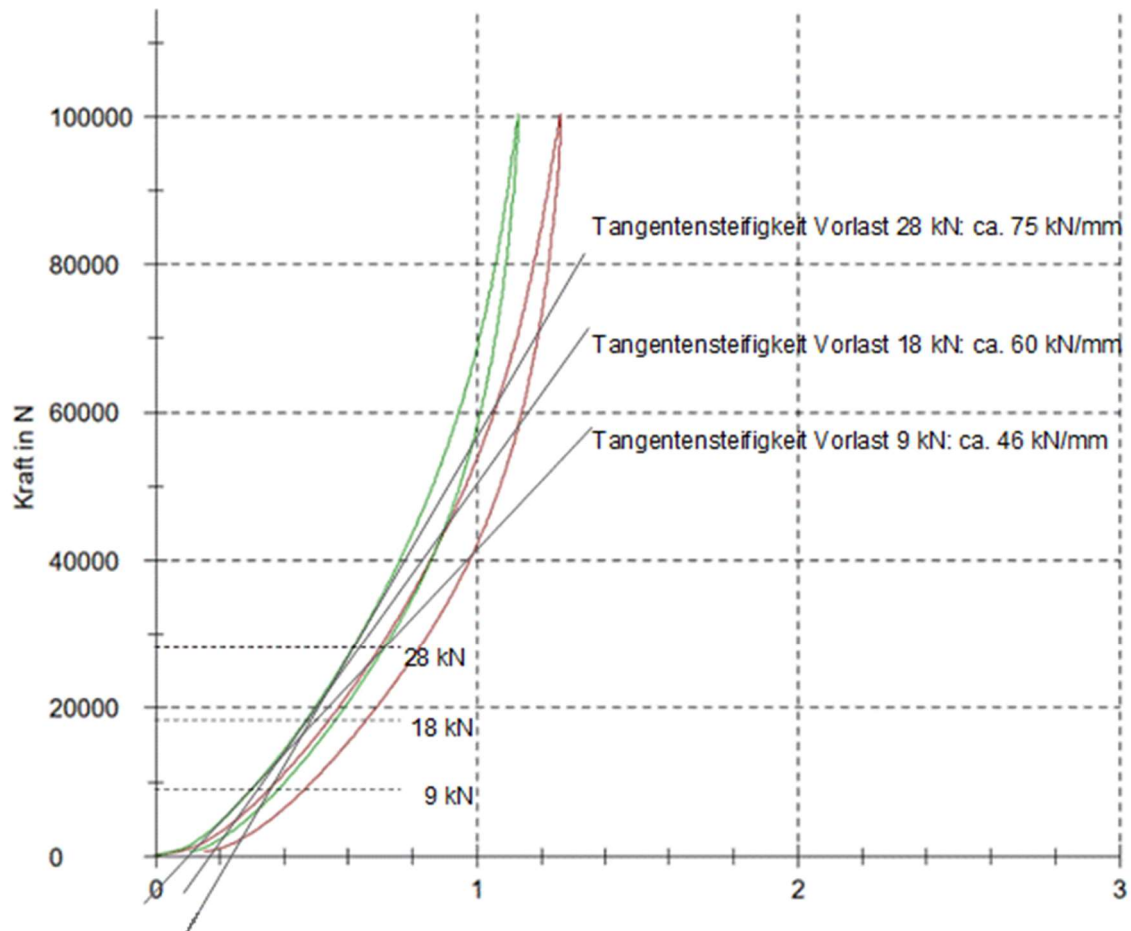


Abbildung 4: Federkennlinie Zw 700b-100-SF150

Quelle: Vossloh / Schubarth

6.2.2. Zwischenlagensteifigkeit und Gleisabklingrate (TDR)

Die Gleisabklingrate (TDR) horizontal und vertikal ist ein Mass für die Dämpfung der Schwingungsamplitude der Schiene in Schienenlängsrichtung. Wie das schwingende Rad strahlt auch eine schwingende Schiene Schall ab. Je geringer die Gleisabklingrate, umso weniger ist die Schwingung der Schiene gedämpft, das bedeutet, umso mehr strahlt die Schiene ab. Die Gleisabklingrate wird erhöht, indem möglichst viel Schwingungsenergie vernichtet (z.B. mit hochdämpfenden Zwischenlagen oder Schienenstegdämpfern) oder möglichst direkt (z.B. mit steifen Zw) in den Schotter geleitet wird.

Der Verlauf der Gleisabklingrate in Funktion der Frequenz wird durch verschiedene charakteristische Eigenfrequenzen des Oberbaus bestimmt. Diese lassen sich nach [6] anhand eines Zweimassenschwinger-Modells berechnen. Die folgende Abbildung zeigt die Lage der Eigenfrequenzen in Bezug auf den Verlauf der TDR vertikal. Analoges gilt auch für die TDR horizontal. Bei den ersten drei Eigenfrequenzen f_{c1} , f_2 und f_{c2} ergibt sich eine hohe TDR, weil die Schwingungsenergie der Schiene entzogen und in Schwelle und Schotter abgeleitet wird, bei der pinned-pinned Frequenz f_{pp} breitet sich die Schwingungsenergie praktisch ungedämpft in der Schiene aus. Für eine hohe Gleisabklingrate und tiefe Schallemissionen ist insbesondere die Eigenfrequenz f_{c2} entscheidend.

Diese ergibt sich aus der Zwischenlagensteifigkeit (s'_p) und der Masse der Schiene (m'_r). Die entsprechende Eigenform ist die Schwingung der Schiene translatorisch über dem Stützpunkt bzw. Schwelle. Liegt der Wert f_{c2} hoch, erfolgt der Abfall zu f_{pp} später und die Gleisabklingrate kann bis zu f_{c2} hoch gehalten werden, wie Abbildung 5 zeigt. Dies erklärt den entscheidenden Einfluss der Zwischenlagensteifigkeit auf die Gleisabklingrate.

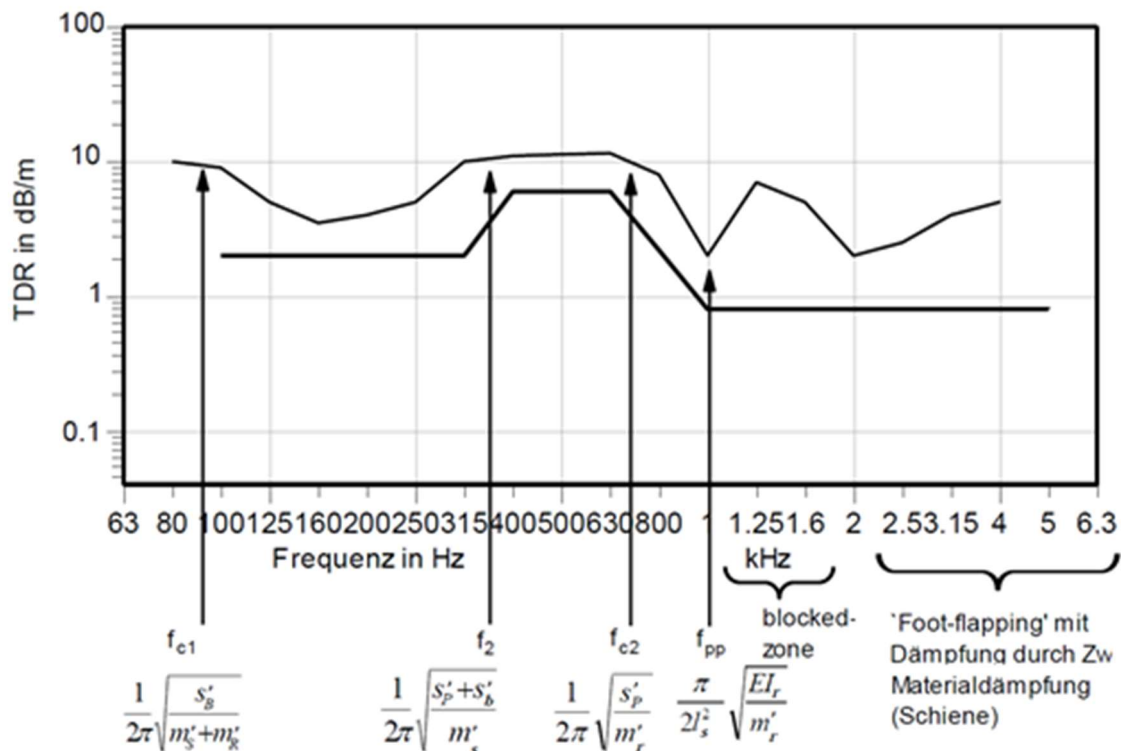


Abbildung 5: TDR vertikal und Oberbau-Eigenfrequenzen nach Ch. Gramowski

Quelle: [6]

Für den Betonschwellen-Oberbau (B91) mit weichen oder steifen Zwischenlagen wurden diese Eigenfrequenzen berechnet, basierend auf Labortests dieser Zwischenlagen ([3]) bei Vorlast 20 kN und Frequenz 400 Hz, siehe Abbildung 6. Die Zwischenlagensteifigkeit beeinflusst die Eigenfrequenzen f_2 und f_{c2} . Für hohe Gleisabklingraten sollten diese Werte möglichst hoch liegen. Darum werden rein unter dem Aspekt der Akustik steife Zwischenlagen bevorzugt.

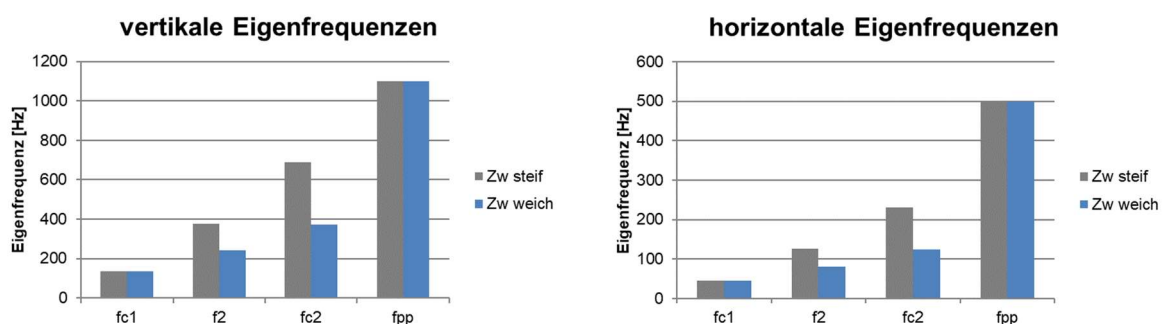


Abbildung 6: TDR vertikal und Oberbau-Eigenfrequenzen steifer und weicher Zw

6.3. Erfahrungen bei Messungen WP I-4

Betrachtet man theoretisch die Schiene als unendlich langen Balken, punktuell alle 60 cm auf Federn gelagert, so ergibt sich die pinned-pinned Frequenz unabhängig von der Zwischenlagensteifigkeit. Die Eigenform dieser Eigenfrequenz hat dabei jeweils bei den Federn alle 60 cm ein Schwingungsknoten, d.h. es ergibt sich dort bei den Federn keine Bewegung, womit die Federsteifigkeit keine Rolle spielt. Theoretisch müsste daher auch die Gleisabklingrate bei dieser Frequenz unabhängig sein von der Zwischenlagensteifigkeit.

Die in situ gemessenen Gleisabklingraten zeigen jedoch, dass dem nicht so ist, wie beispielsweise die Resultate von kürzlich durchgeführten Gleisabklingratenmessungen zwischen Kerzers und Müntschemier [19] zeigen, siehe Abbildung 7. Bei steifen Zwischenlagen liegen die Werte im Bereich der pinned-pinned Frequenzen vertikal (1'000 Hz) und horizontal (500 Hz) deutlich höher. Vermutlich hat dies damit zu tun, dass die Schienen real nicht wie im Modell punktuell elastisch gelagert sind, sondern auf einer Länge von ca. 16 cm auf der Zwischenlage und Schwelle aufliegen. Im Verhältnis zum Schwellenabstand von 60 cm ist das relativ viel und müsste z.B. in einem FE-Modell entsprechend berücksichtigt werden. Die Zwischenlage wirkt also auch bei der pinned-pinned Frequenz mit, wenn bei dieser Eigenform die Schiene über dem Stützpunkt rotiert. Dies führt zu einer Beanspruchung der Zwischenlage und entsprechenden Reaktionskräften, die in die Schwelle und den Schotter geleitet werden. Je höher die Rotationssteifigkeit der Zwischenlage, umso höher sind die abgeleiteten Kräfte und damit die Gleisabklingrate.

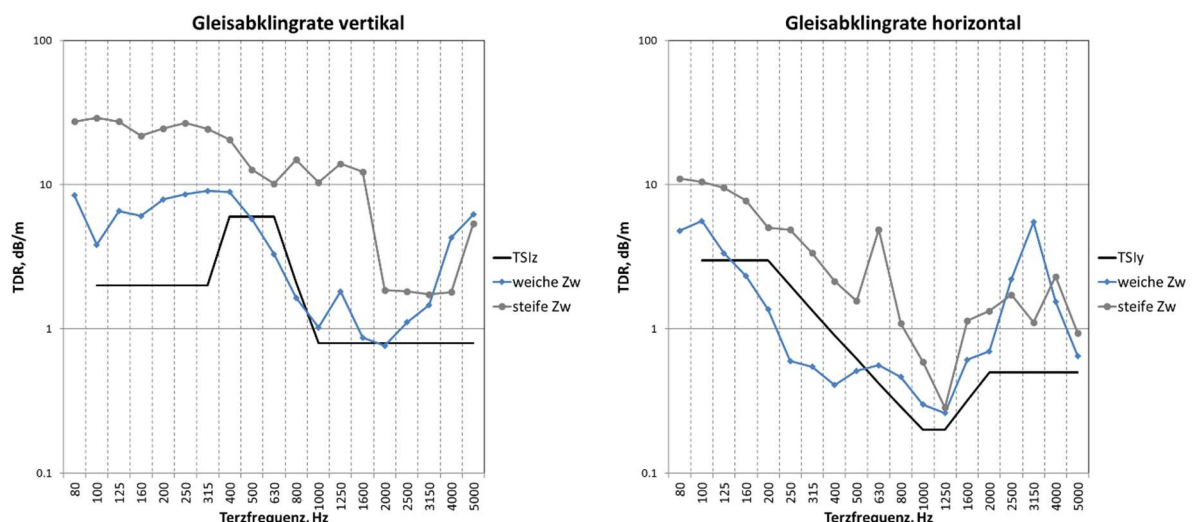


Abbildung 7: TDR vertikal und horizontal bei steifen und weichen Zw

Der Zusammenhang zwischen Vorspannung und Steifigkeit bzw. Gleisabklingrate / Mobilität wurde auch schon messtechnisch untersucht. In [4] wurde in einem kurzen Testgleis die Gleisabklingrate bei unterschiedlichem Anzugsdrehmoment der Schwellenschrauben gemessen. Die Resultate in Abbildung 8 zeigen dabei den Einfluss auf die Gleisabklingrate. Da es sich bei diesem Versuch nur um ein kurzes Testgleis mit freien Enden der Schienen handelte, sind die Resultate nicht mit dem realen Fall des unendlich, langen, lückenlos verschweissten Gleises vergleichbar. Trotzdem ist der erwartete Effekt erkennbar, dass die Gleisabklingrate mit zunehmendem Drehmoment zunimmt.

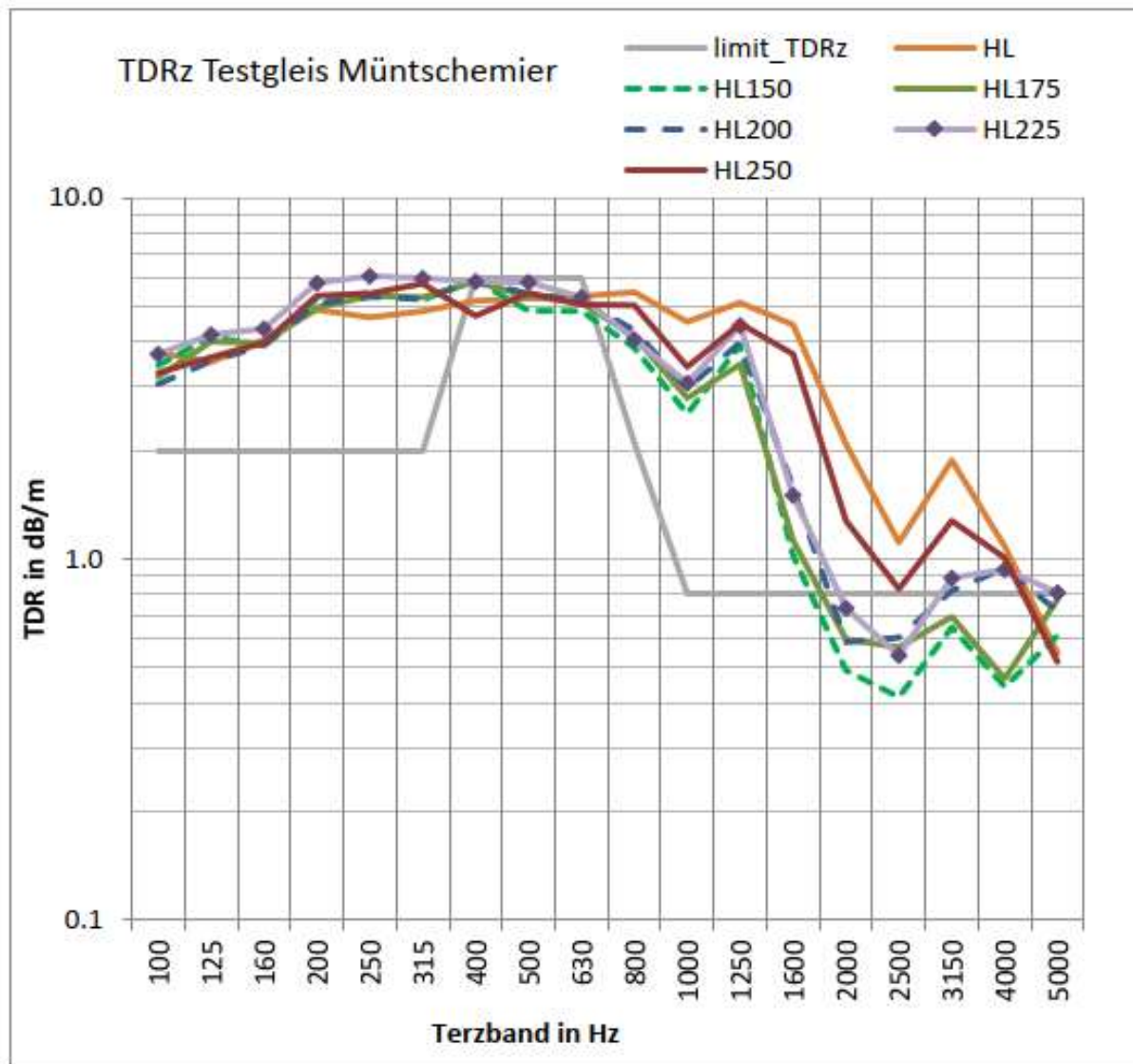


Abbildung 8: Einfluss Anzugsdrehmoment auf die vertikale Gleisabklingrate

Quelle: [4]

Eine ähnliche Untersuchung wurde auch im Rahmen des SBB Faktor X Projekts durchgeführt ([15],[16]). Allerdings wurde in diesem Fall nicht die Gleisabklingrate, sondern die Mobilität der Schiene über der Schwelle gemessen. Die Mobilität entspricht dabei der Schienenschwingung bei definierter Anregung. Je stärker die Schiene schwingt, umso höher ist auch die Schallabstrahlung. Dabei wurde der ursprüngliche Zustand eines Gleises verglichen mit dem Zustand nach definiertem Anziehen der Schwellenschrauben mit Drehmoment 180 Nm. In Abbildung 9 und Abbildung 10, welche die zwei Zustände zeigen, ist die Reduktion der Mobilität der Schiene aufgrund des Anziehens der Schwellenschrauben deutlich erkennbar, insbesondere im Frequenzbereich < 1000 Hz.

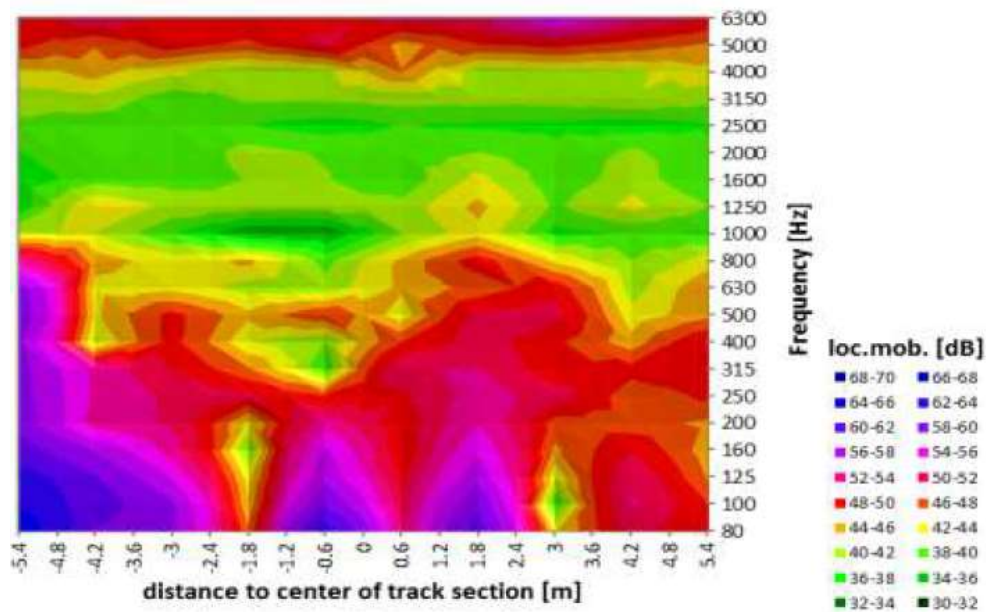


Figure 1 Vertical local mobilities of a rail head measured at 19 positions – all above sleepers

Abbildung 9: Nullmessung L_{Aeq} für MQ0a und MQ1a, Zugtypen EWII + Nina

Quelle: [15]/[16]

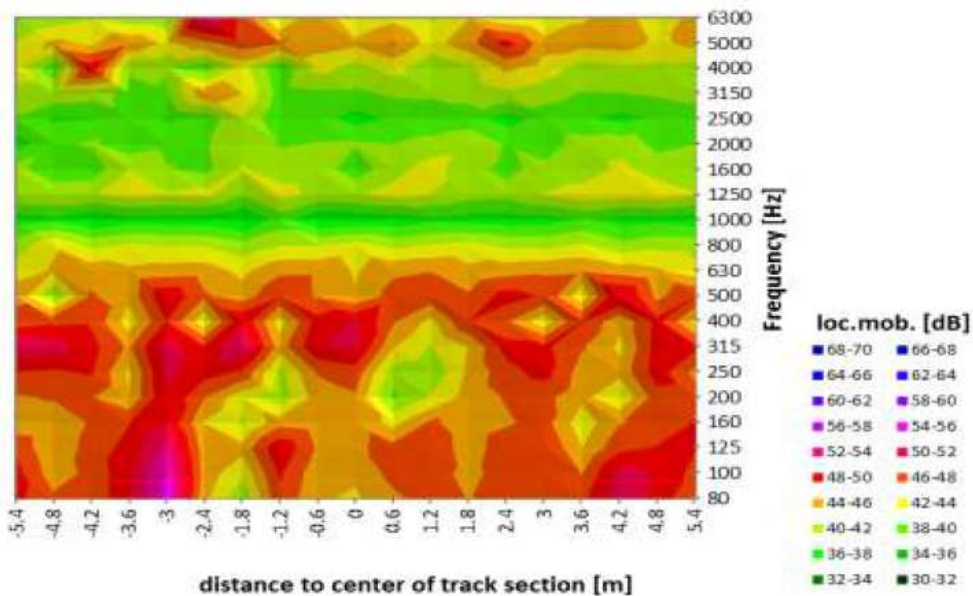


Figure 2 Vertical local mobilities of a rail head measured at 19 positions – after re-fixation at 180 N

Abbildung 10: Nullmessung L_{Aeq} für MQ0a und MQ1a, Zugtypen EWII + Nina

Quelle: [15]/[16]

6.4. Zusammenfassung WP I-4

Die Gleisabklingrate (TDR), neben der Schienenrauheit die wichtigste Kenngrösse fahrbahnseitig für die Schallemission vorbeifahrender Züge, wird insbesondere durch die Steifigkeit der Zwischenlage beeinflusst. Diese wiederum ist einerseits vom Material, der Form, Dicke und Steifigkeit, andererseits aber auch von der Vorspannung abhängig, da Zwischenlagen meist progressive Federkennlinien aufweisen. Das heisst, die Steifigkeit steigt mit zunehmender Vorspannung. Die richtige Vorspannung der Spannklemmen mittel Schwellenschrauben ist daher wesentlich für eine hohe Gleisabklingrate.

Wie in WP I-3 bereits beschrieben, ist diese Vorspannung bereits bei der Montage infolge Verschmutzung, Verklemmen im Gewinde beim Anziehen mit der Tirefoneuse etc. und Nichtbeachten des maximal zulässigen Luftspalts gemäss Einbauanweisung Vossloh nicht immer gewährleistet. Zusätzlich kann der Verschleiss (v.a. in Bögen) und die Alterung der Zwischenlagen über die Zeit zu einer Abnahme der Vorspannung und Steifigkeit der Zwischenlagen führen. Auch eine Lockerung der Schwellenschrauben, z.B. infolge von Rissen in Betonschwellen, kann die Vorspannung bzw. die Gleisabklingrate auf Dauer negativ beeinflussen. Die Beobachtungen auf der SOB Strecke Schindellegi - Wädenswil haben allerdings gezeigt, dass die Schwellenrisse hauptsächlich die B70-Betonschwellen betreffen und bei B91-Betonschwellen kaum mehr ein Thema sind.

Ein weiterer Aspekt, welcher die Gleisabklingrate speziell bei der pinned-pinned Frequenz stark beeinflusst, ist, dass die Auflagefläche der Schiene auf Zwischenlage und Schwelle (ca. 16 cm) im Verhältnis zum Schwellenabstand (60 cm) relativ gross ist. Die Schiene ist also nicht punktuell, wie das oft für vereinfachte Betrachtungen modelliert wird, sondern auf einer gewissen Länge gelagert. Die Rotationsfreiheit der Schiene über dem Stützpunkt bei dieser Eigenform wird dadurch reduziert, insbesondere bei steifen, aber auch dämpfenden Zwischenlagen. Dies erhöht die Gleisabklingrate in der entsprechenden Resonanzfrequenz, welche in vielen Fällen die Schallemission dominiert. Diese Betrachtungsweise gilt nicht nur in vertikaler Richtung, sondern auch horizontal. Dabei sind die Winkelführungsplatten von entscheidender Bedeutung. Gegenüber der Schienenbefestigungs-Regelbauart W14 sehen wir hier ein mögliches Lärminderungspotential mit speziellen neuen Winkelführungsplatten Wfp 700-HTR, die wir im folgenden Absatz im Massnahmenkatalog Schienenbefestigung zur Lärminderung aufgelistet haben.

Aus den vorhergehend beschriebenen Überlegungen haben wir abgesehen von der Zwischenlage bei den Komponenten der Schienenbefestigung, basierend auf der Regelbauart W14, folgendes Verbesserungspotential hinsichtlich Lärminderung identifiziert:

- Schwellenschrauben mit Rundgewinde anstelle von Spitzgewinde
Verhindern das Verklemmen beim Einschrauben und führen bei der drehmomentgesteuerten Montage zuverlässiger zur gewünschten Vorspannung der Spannklemmen
- Spannklemmen Skl 28
Haben grössere Niederhaltekraft und führen zu einer höheren Stützpunktsteifigkeit
- Winkelführungsplatten Wfp 700-HTR
Führen zu einem erhöhten Verdrehwiderstand des Schienenfusses horizontal

Dieses Massnahmenpaket führt zu homogenen Verhältnissen hinsichtlich Vorspannung der Spannklemmen und hinsichtlich Bewegungsfreiheit der Schiene im Stützpunkt zu einer Versteifung für alle sechs Freiheitsgrade (Translation und Rotation in alle drei Koordinatenrichtungen). Dies führt zu höheren Gleisabklingraten vertikal und horizontal. Weniger Bewegung bedeutet zudem auch weniger Verschleiss an der Zwischenlage. Damit wird auch das Nachlassen der Vorspannung in der Spannklemme über die Zeit vermindert. Eine in den Stützpunkten gleichmässig, mit geringer Streuung der Vorspannkraft, vorgespannte Schiene führt zu geringer Streuung bei den Stützpunktsteifigkeiten. Unter Belastung des rollenden Rades führen grosse Unterschiede bei den Stützpunktsteifigkeiten zu erheblichen Unterschieden bei der Einsenkung und damit zu zusätzlichen dynamischen Kräften und Schwingungen, was zu erhöhtem Verschleiss, Erschütterungen und Lärm führt.

Eine Versteifung im Stützpunkt kann allerdings, wie wir das von den steifen Zwischenlagen her kennen, negative Auswirkungen hinsichtlich LCC für den Oberbau haben. Wesentlich ist dabei primär die vertikale Steifigkeit bzw. eine gewisse Elastizität im Stützpunkt, um die quasistatischen, vertikalen Radlasten möglichst auf mehrere Stützpunkte verteilen zu können. Daher ist unter Berücksichtigung der Vorspannkraft die optimale Zwischenlagensteifigkeit vorzugeben. Geht man also davon aus, dass die vertikale Stützpunktsteifigkeit unverändert bleiben soll, wird die Gleisabklingrate durch das vorgeschlagene Massnahmenpaket durch die homogenen Verhältnisse hinsichtlich Vorspannung und erhöhten Verdrehwiderstand des Schienenfusses horizontal erhöht.

7. Zusammenfassung aller WP der Phase I

Die Erkenntnisse aus unseren Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes Schienenbefestigung auf Betonschwellen im Schotteroberbau Phase I können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der BLS, SOB und SBB wird im Regelfall die Verlegeart W14 mit Skl 14 und Wfp 14K-12 entweder mit steifen Zwischenlagen (SBB, SOB) oder weichen Zwischenlagen (BLS) angewendet.
- Die im Netz vorhandenen Befestigungskomponenten der Schienenbefestigung wie Spannklemme, Winkelführungsplatte und Zwischenlage sind bei den Bahnen in den Datenbanken ungenügend dokumentiert. Meist wird nur die Verlegeart (W, Ws, W14) in der Datenbank erfasst. Angaben zu den einzelnen Komponenten (insbesondere Zw und deren Steifigkeit, Ausführung mit Kippschutz NT/AT) fehlen.
- Dies stellt ein gewisses Verwechslungsrisiko dar, da dadurch Befestigungskomponenten miteinander kombiniert werden, die nicht zusammenpassen. Bei einem sicherheitsrelevanten Schadenfall, wo Zwischenlage und Winkelführungsplatte nicht zusammenpassten, und dadurch die Spannklemmen brachen, hätte eine saubere Dokumentation in der Datenbank womöglich diesen Schadenfall verhindert.
- Aufgrund unserer Beobachtungen bei Begehungen mit Streckenwärtern und Montagen von Schienenbefestigungen sowie Gesprächen mit den Instandhaltungsverantwortlichen wird dem korrekten Einbau und Zustand der Schienenbefestigung wenig Beachtung geschenkt. Es wird darauf vertraut, dass der drehmomentgesteuerte Einbau die genügende Vorspannung der Spannklemmen gewährleistet und diese dauerhaft bestehen bleibt. Der gemäss Vossloh einzuhaltende Luftspalt von maximal 0,5 mm zwischen Mittelschleife und Winkelführungsplatte wird in der Regel nicht überprüft.
- Wie einige Beispiele zeigten, ist die optimale Vorspannung bei der Montage nicht immer gewährleistet. Die Ursachen dafür sind die Schwellenschrauben mit Spitzgewinde, welche verklemmen, Verschmutzung durch kleine Steine zwischen Spannklemme und Winkelführungsplatte nach dem Stopfen und die mangelnde Überprüfung der korrekten Vorspannung. Durch Zeitdruck und Nacharbeit können sich solche Fehler häufen.
- Bei einem eingleisigen Abschnitt in einer Geraden mit weichen Zwischenlagen, welcher 2014 erneuert wurde, wurde die Häufigkeit ungenügend vorgespannter Spannklemmen stichprobenartig untersucht und betrug rund 13%. In einem benachbarten Abschnitt mit älterem Oberbau und steifen Zwischenlagen betrug die Häufigkeit ca. 10%.
- Für die Kontrolle der korrekten Vorspannung der Spannklemmen fehlt ein geeignetes Prüfmittel, welches den Luftspalt schnell und zuverlässig überprüfen könnte. Das Drehmoment ist kein zuverlässiger Indikator für die korrekte Vorspannung.
- Eine ungenügende Vorspannung der Spannklemmen ist lärmrelevant, da dies die Stützpunktsteifigkeit und damit die Gleisabklingrate reduziert. Zusätzlich führen inhomogene Verhältnisse bei den Stützpunktsteifigkeiten unter Belastung des rollenden Rades zu einer erheblichen, zusätzlichen dynamischen Anregung.
- Eine Verbesserung der Vorspannkraft der Schienenzwischenlagen kann sowohl durch eine grössere Niederhaltekraft (Verlegeart W28 mit Skl 28) als auch mit Schwellenschraube/Dübel-Kombination mit optimiertem Rundgewinde erreicht werden. Alternativ wäre auch ein neuer Schwellentyp (z.B. HDS-Schwellen) mit vier Spannklemmen pro Stützpunkt denkbar, diese Schwelle ist aber im Vergleich zur B91-Schwelle signifikant teurer und daher für einen netzweiten Einsatz unwirtschaftlich.

Diese oben aufgeführten Erkenntnisse und Mängel beinhalten Verbesserungspotential sowohl hinsichtlich LCC Oberbau wie auch hinsichtlich Lärminderung. Dieses Potential könnte mit neuartigen verbesserten Komponenten der Schienenbefestigung ausgeschöpft werden:

- Schwellenschrauben mit Rundgewinde anstelle von Spitzgewinde
Verhindern das Verklemmen beim Einschrauben und führen bei der drehmomentgesteuerten Montage zuverlässiger zur gewünschten Vorspannung der Spannklemmen
- Spannklemmen Skl 28
Haben grössere Niederhaltekraft und führen zu einer höheren Stützpunktsteifigkeit
- Winkelführungsplatten Wfp 700-HTR
Führen zu einem erhöhten Verdrehwiderstand des Schienenfusses horizontal

Dieses Massnahmenpaket führt zu homogenen Verhältnissen hinsichtlich Vorspannung der Spannklemmen und Stützpunktsteifigkeit sowie hinsichtlich Bewegungsfreiheit der Schiene im Stützpunkt zu einer Versteifung für alle sechs Freiheitsgrade im Stützpunkt (Translation und Rotation in alle drei Koordinatenrichtungen), womit die Gleisabklingrate erhöht wird.

Ein weiterer Aspekt sind die Schienenzwischenlagen. Wie bereits erwähnt, existieren heute auf dem Markt entweder steife Schienenzwischenlagen aus EVA (Ethylen-Vinyl-Azetat) oder weiche Schienenzwischenlagen aus EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer). Für die Versuche in Phase II wäre es sinnvoll, eine neue Schienenzwischenlage Zw 700a-200-EPDM mit einer mittleren Steifigkeit von $c_{\text{stat}} \approx 200 \text{ kN/mm}$ aus EPDM testweise einzubauen. Solche Zw können problemlos hergestellt werden, halten den Belastungen im Gleis stand, sind langlebig und preisgünstig. Sie stellen einen Kompromiss hinsichtlich Lärm und Elastizität dar. Diese Zw sind als Standardkomponenten schnell und preiswert für einen Versuch verfügbar. Dies soll als Ergänzung und nicht als Ersatz der laufenden Entwicklungen hochdämpfender Zwischenlagen mit tiefer statischer und hoher dynamischer Steifigkeit gesehen werden.

Fazit

Die Phase I des Forschungsprojekts Schienenbefestigung hat gezeigt, dass die Bahnen BLS, SOB und SBB im Regelfall die moderne Verlegeart W14 mit den passenden Befestigungskomponenten verwenden. Einziger Unterschied ist, dass entweder eine weiche oder steife Zwischenlage eingesetzt wird. Hingegen wird nach wie vor die alte Schwellenschraube mit Spitzgewinde verwendet, die ursprünglich von der Holzschwellenbefestigung abstammt. Dabei zeigt sich, dass die Schwellenschraube zum Verklemmen im Dübel neigt und bei der drehmomentgesteuerten Montage mit der Tirfoneuse nicht immer vorschriftsgemäss angezogen wird.

Eine Stichprobenkontrolle hat ergeben, dass 10 – 15% der Schrauben zu wenig angezogen sind und dadurch die Niederhaltekraft der Spannklemme zu gering ist. Dies bewirkt eine zu geringe Vorspannung der Zwischenlage, was Inhomogenitäten im Gleis hinsichtlich der Steifigkeit zur Folge hat. Dadurch wird die Gleisabklingrate negativ beeinflusst und es kann zu mehr Lärmabstrahlung der Schiene führen und lokal auch mehr Gleisunterhalt erfordern.

Es gibt für die bestehende Schienenbefestigung für die B91-Betonschwellen verschiedene Verbesserungsmöglichkeiten bei den Befestigungskomponenten, die sich sowohl hinsichtlich der LCC des Gleises (Montage und Gleisunterhalt) als auch hinsichtlich der Lärmabstrahlung positiv auswirken würden, siehe Kapitel 8.

8. Empfehlungen für die Phase II

Für das weitere Vorgehen in der Phase II dieses Forschungsprojekts wären folgende Möglichkeiten bei den Schienenbefestigungen denkbar:

- Teststrecke mit den verbesserten Befestigungskomponenten (Wfp 700-HTR, Ss NG und Sdü NG mit Rundgewinde, Verlegeart W28 mit Skl 28 und optimierter Zw)
- Entwicklung eines Prüfgeräts zur Spaltmessung für die korrekte Vorspannung
- Schall- und Gleisabklingratenmessung in einem inhomogenen Gleisabschnitt
- Korrelation zwischen Drehmoment und Luftspalt bei Spitz- und Rundgewinde

Eine **Teststrecke mit den verbesserten Befestigungskomponenten** scheint uns am innovativsten, zukunftsgerichtet und zielführend dahingehend, dass bei einer positiven Wirkung hinsichtlich Lärminderung eine weitere Massnahme zur Verfügung steht. Je nach Kombination der Komponenten gehen wir von einem Lärminderungspotenzial von 1 – 3 dBA aus, es fehlen aber noch Simulationen resp. Messungen im Gleis. Auch hinsichtlich der LCC des Oberbaus bieten die neuen Befestigungskomponenten ein Verbesserungspotential bei der Montage und beim Gleisunterhalt sowohl auf hochbelasteten Strecken als auch bei Gleisen in engen Bögen (Reduktion der Schlupfwellenbildung).

Wir empfehlen daher primär den Einbau von Winkelführungsplatten Wfp 700-HTR, Schwellenschrauben Ss NG und Schraubdübel Sdü NG mit Rundgewinde, Verlegeart W28 mit Skl 28 in einem geraden Testabschnitt inkl. akustischer Messungen für Phase II dieses Forschungsprojektes weiter zu verfolgen. Zusätzlich sollte auch darauf abgestimmt eine Zwischenlage mit optimaler Steifigkeit (hinsichtlich LCC und Lärm) getestet werden.

Um den akustischen Effekt der einzelnen Komponenten beurteilen zu können, wäre idealerweise ein Neubauabschnitt mit mehreren Gleisabschnitten à 108 m Länge mit unterschiedlichen Komponenten auszurüsten und zu messen:

- Referenzabschnitt 0: W14 Standardausführung mit weicher Zw
- Abschnitt 1: W14 mit weicher Zw und Wfp 700-HTR
- Abschnitt 2: W14 mit weicher Zw und Wfp 700-HTR sowie Ss NG / Sdü NG
- Abschnitt 3: W28 mit weicher Zw und Wfp 700-HTR sowie Ss NG / Sdü NG
- Abschnitt 4: W28 mit optimierter Zw und Wfp 700-HTR sowie Ss NG / Sdü NG

Um diesen Test realisieren zu können, braucht es eine Bahn, die einen genügend langen, geraden Abschnitt mit konstantem Unterbau in Normalspur, welcher nächstens mit Betonschwellen B91 oberbauerneuert wird, zur Verfügung stellt. Zusätzlich sind die Budgetrandbedingungen zu beachten (Mehrkosten inkl. akustische Messungen < CHF 100'000.-). Falls das Budget nicht ausreichen sollte, kann versucht werden, die Kosten mit dem Streichen einzelner Testabschnitte zu reduzieren oder weitere Geldgeber (z.B. VöV FEF) ins Boot zu holen.

Die Abklärungen für ein konkretes Angebot für die Phase II laufen zur Zeit. Sobald ein Testabschnitt gefunden ist und die Kosten für Lieferung und Einbau mit der Bahn sowie den Lieferanten verhandelt sind, wird das Projekt für Phase II konkretisiert und dem BAFU und BAV präsentiert.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Auer, F. / Schilder, R. (2009): Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB, ZEVrail 133
- [2] Auer, F. / Schöpp, A. (2012): Substanzermittlung von Oberbaukomponenten, ZEVrail 136
- [3] Czolbe, C. (2020): Akustisch optimierte Schienenzwischenlage, Bericht Nr. 04-03-02153, PROSE AG, Winterthur
- [4] Czolbe, C. (2019): Messbericht Anzugsmomente W14 Klemmung. Testgleis Müntschemier 2019, Kurzbericht Nr. 04-03-01905, PROSE AG, Winterthur
- [5] Czolbe, C.: Schienenbefestigung Betonschwellen B70 und B91, Memo 04-04-01390, PROSE AG, Winterthur
- [6] Gramowski, C. (2013): Gleisseitige Schallemission – Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Massnahmen, Dissertation, TU Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin
- [7] Huber, P. / Liengme J.-D. / Koller G. (2016): Rail shielding – influence on noise emission and rail vibration, 12th International Workshop on Railway Noise, Terrigal Australia
- [8] Knothe, K. (2001): Gleisdynamik, TU Berlin, Ernst & Sohn, Berlin
- [9] Liu, J. (2013): Einfluss der Schienenbefestigungskomponenten auf das laterale Verformungs- und Lastverteilungsverhalten der Schiene, TU München, Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, Schriftenreihe Heft 87
- [10] Maes, J. / Sol, H. / Guillaume P. (2006): Measurements of the dynamic railpad properties, Vrije Universiteit Brussel, Elsevier, Journal of Sound and Vibration 293 (2006) 557 - 565
- [11] Murer, R. (2018): Untersuchungen von Spannklemmenbrüchen in Thun und geeignete Gegenmassnahmen, CAS – Arbeit ET, Ecole d'ingenieurs et d'architectes de Fribourg
- [12] Hunn, S., Schweizerische Südostbahn AG (2019): Unterhaltsrichtlinie Fahrbahn, St. Gallen
- [13] Steger, M. (2018): Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und der daraus resultierenden Beanspruchung von Spannklemmen für Schienenbefestigungen unter Berücksichtigung von hochfrequenten Anregungen, TU München, Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, Schriftenreihe Heft 94
- [14] Thompson, D. (2009): Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling an Means of Control, Elsevier
- [15] Venghaus, H. (2015): Erprobung Schienendämpfer – Bestimmung Faktor X – Stardamp Tool. Eine Studie über die Einflussfaktoren aus dem Trassenaufbau auf die Wirkung von Schienendämpfern, Bericht Nr. ACB-1015-6374/6, Accon GmbH, Greifenberg
- [16] Venghaus, H. (2018): Ageing cuts down the track homogeneity causing differences between calculations an measurements of railway noise, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, D. Anderson et al., Springer International Publishing AG, Terrigal Australia
- [17] Fengler, W. / Gerber, U. (2014): Auslegung elastischer Zwischenlagen, Beeinflussung der Schleif- und Stopfzyklen durch elastische Zwischenlagen – Auswahl der Zwischenlagendicke in Abhängigkeit vom Material, EI – Eisenbahningenieur
- [18] Arbeitsgruppe VöV: Handbuch Fahrbahnpraxis Normalspur, D RTE 22040, VöV, 01.12.2009
- [19] Kneib, G. (2020): Bestimmung der Schienenabklingrate zwischen Kerzers und Müntschemier, Bericht Nr. C90649/01, Müller-BBM Schweiz AG, Muttentz, 06. November 2020
- [20] Auer, F. (2010): Zur Verschleissreduktion von Gleisen in engen Bögen, Dissertation, TU Graz

Anhang

Anhang 1: Übersicht Schienenbefestigungen v6 vom 01.12.2020

Anhang 2: Protokoll Einbau Betonschwellengleis SOB Wädenswil

Anhang 3: Protokoll Streckenbegehung SOB Schindellegi - Wädenswil

Anhang 4: Protokoll Zwischenlagentausch BLS Kerzers-Müntschemier

Anhang 5: Protokoll Interview mit Albert Iten, Instandhaltung SOB-Südnetz

Anhang 6: Protokoll Interview mit Andreas Bellwald, Instandhaltung BLS

Anhang 7: Literatur, Kurzzusammenfassung Stichworte

Anhang 1: Übersicht Schienenbefestigungen v6 vom 01.12.2020

BAFU Projekt 00723 · WP I-2 · Übersicht Schienenbefestigungen Betonschwellen

v6 / 01.12.2020 / PSC



Abgrenzung

Das WP I-2 bezieht sich auf die Schotterfahrbahn mit **Betonschwellen** bei der BLS und der SOB. Als Benchmark sind auch die Angaben der SBB angegeben. Alle Angaben ohne Gewähr.

	BLS	SOB	SBB	Bemerkungen
Schiene				
Schienenprofil 46 E1	-	(X)	-	Schienenprofil mit 46 kg/m mit Fussbreite 125 mm (SF125)
Schienenprofil 54 E2	X	X	X	Schienenprofil mit 54 kg/m mit Fussbreite 125 mm (SF125)
Schienenprofil 60 E1/E2	X	-	X	Schienenprofil mit 60 kg/m mit Fussbreite 150 mm (SF150)
Schienenbefestigungskomponente				
Verlegeart				
W	(X)	-	(X)	W ist alte Bezeichnung für Wfp aus Stahl, kein Rückschluss auf Ski möglich
Ws	X	X	X	Ws ist alte Bezeichnung für Wfp aus Kunststoff, kein Rückschluss auf Ski möglich
W3	X	X	X	W3 ist korrekte Bezeichnung der Verlegeart mit Ski 1
W14	X	X	X	W14 ist korrekte Bezeichnung der Verlegeart mit Ski 14
W28	-	-	-	W28 ist eine neue Verlegeart mit grösserer Niederhaltekraft
Schwellenschraube				
Ss 0	X	X	X	Schwellenschraube mit Spitzgewinde für Verlegeart W3 und W14 und W28
Ss 35-0	-	-	-	Schwellenschraube mit Rundgewinde für Verlegeart W14 und W28
Ss NG	-	-	-	Schwellenschraube NG (Next Generation) für Verlegeart W14 und W28
Unterlagsscheibe				
Uls 7	X	X	X	Unterlagsscheibe zu Ss 0 oder Ss 35-0 oder Ss NG
Spannklemme				
Ski 1	X	X	X	Ski 1 passt zur Verlegeart W3 (W oder Ws)
Ski 14	X	X	X	Ski 14 passt zur Verlegeart W14 (Ws)
Ski 28	-	-	-	Ski 28 passt zur Verlegeart W28 mit grösserer Niederhaltekraft
Winkelführungsplatte				
Wfp 2	(X)	-	(X)	Wfp aus Stahl für Verlegeart W3 (W)
Wfp 3b-12	X	X	X	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W3 (Ws) (ohne Spurenerweiterung)
Wfp 14K-12	X	X	X	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 oder W28 (ohne Spurenerweiterung)
Wfp 14K-7	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 oder W28 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 14K-9.5	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 oder W28 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 14K-14.5	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 oder W28 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 14K-17	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 oder W28 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 21K-700-NT-12 (früher Wfp 14K-NT-12)	X	(X)	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 mit Kippschutz für Schiene 54 E2 (ohne Spurenerweiterung)
Wfp 21K-700-NT-7	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 mit Kippschutz für Schiene 54 E2 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 21K-700-NT-9.5	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 mit Kippschutz für Schiene 54 E2 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 21K-700-NT-14.5	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 mit Kippschutz für Schiene 54 E2 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 21K-700-NT-17	-	-	-	Wfp aus Kunststoff für Verlegeart W14 mit Kippschutz für Schiene 54 E2 (mit Spurenerweiterung)
Wfp 700-HTR	-	-	-	Wfp aus Kunststoff mit hohem Verdrehwiderstand für Verlegeart W14 und W28
Isoliereinlage				
Isoliereinlage E1	(X)	-	(X)	Kunststoffeinlage zur Wfp 2 aus Stahl (Verlegeart W)
Schienenzwischenlage				
Zw 661-6	X	-	X	Zw: d = 6 mm, $c_{stat} = 700$ kN/mm, EVA, ohne Vormontagelippen, für Schiene 60 E1/E2
Zw 664-6	X	X	X	Zw: d = 6 mm, $c_{stat} = 700$ kN/mm, EVA, ohne Vormontagelippen, für Schiene 54 E2 (und 46 E1)
Zw 686a	X	X	-	Zw: d = 6 mm, $c_{stat} = 700$ kN/mm, EVA, mit Vormontagelippen, für Schiene 54 E2
Zw 687a	X	-	-	Zw: d = 6 mm, $c_{stat} = 700$ kN/mm, EVA, mit Vormontagelippen, für Schiene 60 E1/E2
Zw 7/200-123-TPU	(X)	(X)	(X)	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 200$ kN/mm, TPU, für Schiene 54 E2, für Schwelle B06 FS
Zw 7/200-148-TPU	(X)	-	(X)	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 200$ kN/mm, TPU, für Schiene 60 E1/E2, für Schwelle B06 FS
Zw 700a-100-SF125	X	X	(X)	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, ohne Vormontagelippen, für Schiene 54 E2
Zw 700a-100-SF150	X	-	X	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, ohne Vormontagelippen, für Schiene 60 E1/E2
Zw 700b-100-SF125	X	X	(X)	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, mit Vormontagelippen, für Schiene 54 E2
Zw 700b-100-SF150	X	-	X	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, mit Vormontagelippen, für Schiene 60 E1/E2
Zw 700a-AT-100-SF125	X	(X)	-	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, ohne Vormontagelippen, mit Kippschutz für Schiene 54 E2
Zw 700b-AT-100-SF125	X	(X)	-	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} = 100$ kN/mm, EPDM, mit Vormontagelippen, mit Kippschutz für Schiene 54 E2
Zw 700a-200-EPDM	-	-	-	Zw: d = 7 mm, $c_{stat} \approx 200$ kN/mm, EPDM, ohne Vormontagelippen
Schraubdübel				
Sdü 9	(X)	(X)	(X)	Sdü aus Kunststoff für Ss 0 (Spitzgewinde) für Betonschwelle B70
Sdü 9c 203	X	X	X	Sdü aus Kunststoff für Ss 0 (Spitzgewinde) für Betonschwelle B91
Sdü 27	-	-	-	Sdü aus Kunststoff für Ss 35-0 (Rundgewinde) für Betonschwelle B91
Sdü NG	-	-	-	Sdü aus Kunststoff für Ss NG (Next Generation) für Betonschwelle B91
Schwelle				
Betonschwelle B91	X	X	X	B91 = Standard-Betonschwelle für Normalspur
Betonschwelle B06 FS	X	X	X	B06 FS = Flachbetonschwelle für Normalspur
Betonschwelle B70	(X)	(X)	(X)	B70 = alte Betonschwelle für Normalspur
Betonschwelle HDS	-	(X)	-	HDS = Heavy Duty Sleeper (Schwerlastschwelle)
Betonschwelle Bi-Block	(X)	-	(X)	Bi-Block = alte Zweiblock-Betonschwellen

Legende: = aktueller Standard der Schienenbefestigung bei der jeweiligen Bahn

= Optimierungspotenzial der Schienenbefestigung in der Schweiz

Anhang 2: Protokoll Einbau Betonschwellengleis SOB Wädenswil

04. August 2020 vor dem Neutralisieren und 11. August 2020 nach dem Neutralisieren

Anwesend: Toni Grab SOB (teilweise)
Philipp Huber KPZ

Fokus Verspannung Schienenbefestigung bei Betonschwellen Streckengleis

Zusammenfassung, Beobachtungen:

- Typ Schienenbefestigung W14, Wfp 14K, Zw 686a mit langen Lippen
- provisorisch verspannt vor Neutralisieren, grosse Unterschiede beim Luftspalt, Drehmoment ca. 160 Nm
- werden bei der Neutralisierung (26°C) nochmals gelöst und dann definitiv verspannt, 180 – 200 Nm
- Schwellenschrauben nicht verzinkt, verklemmen teilweise
- im Zustand neutralisiert und vollverspannt haben einige Spannklemmen noch einen grossen Luftspalt
- nach dem Stopfen sind Schwellen, Schienen und Befestigungen stark verschmutzt
- beim Spannen kommen Steine dazwischen und blockieren die richtige Verspannung.
- Vorschlag: Lösen, reinigen und wieder anziehen

Abkürzungen:

Zw Zwischenlage
Wfp Winkelführungsplatte
Skl Spannklemme
Ss Schwellenschraube
Sdü Schraubdübel

Fotodokumentation, vor Neutralisieren:



Bild 1: Schwellenschraube 0



Bild 2: harte Zw 686a mit langen Lippen



Bild 3: erneuerter Streckenabschnitt



Bild 4: eingesetzte Tirefoneuse



Bild 5: grosser Luftspalt Skl zu Wfp



Bild 6: Skl korrekt montiert

Fotodokumentation, nach Neutralisieren:



Bild 7: grosser Luftspalt Skl zu Wfp



Bild 8: Steine zwischen Wfp und Skl

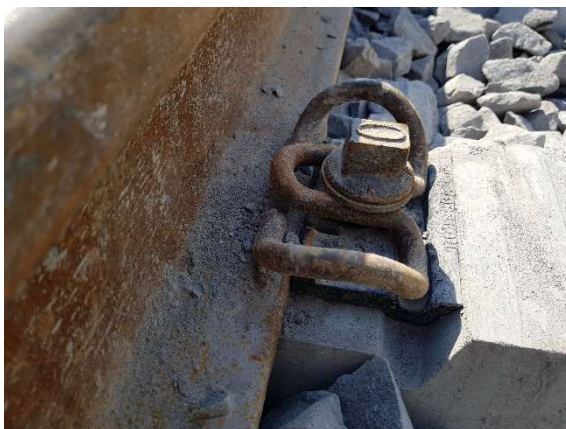


Bild 9: grosser Luftspalt Skl zu Wfp



Bild 10: Verschmutzung nach Stopfen

Anhang 3: Protokoll Streckenbegehung SOB Schindellegi - Wädenswil

Dienstag, 08. September 2020, 07:00 – 12:30 Uhr

Anwesend: Josef Styger SOB
 Philipp Huber KPZ

Fokus Zustand Schienenbefestigung bei Betonschwellen Streckengleis

Zusammenfassung, Beobachtungen:

- Verschiedene Betonschwellentypen in diesem Abschnitt: B70 (zwei Typen), B91, HDS
- Einzelne Bögen mit weichen Zwischenlagen ausgestattet
- Teilweise Wfp 14K mit Kippschutz NT 12
- Spannklemmen Skl 1 und Skl 14
- Nur vereinzelt Skl ungenügend angezogen, Ausnahme erneuerter Bereich 150 m kurz vor Wädenswil (Steine zwischen Wfp und Skl)
- Betonschwellen B70 vielfach mit Rissen ausgehend vom Höcker, gem. SOB gibt es diese Risse schon lange, keine Weiterentwicklung, daher kein Sicherheitsrisiko
- Einzelne weiche Zwischenlagen mehrere mm gedehnt in Längsrichtung

Fotodokumentation:



Bild 1: B70 Schwelle gerissen



Bild 2: Skl 1 bei B70 Schwelle



Bild 3: Übergang harte auf weiche Zw



Bild 4: HDS Schwellen



Bild 5: Wfp 14K mit Kippschutz NT 12

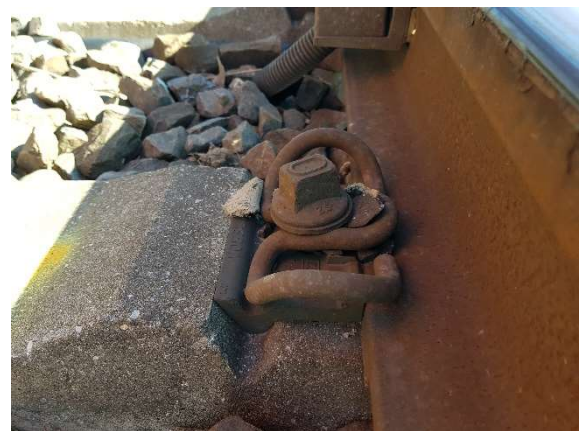


Bild 6: Steine zwischen Skl 14 und Wfp



Bild 7: neue Skl ungenügend angezogen



Bild 8: neue Skl ungenügend angezogen

Anhang 4: Protokoll Zwischenlagentausch BLS Kerzers-Müntschmied

Mittwoch, 21. Oktober 2020, 10:00 – 12:00 Uhr

Anwesend: Stefan Werner KPZ
 Philipp Huber KPZ
 Markus Heim Getzner

Fokus Montage Schienenbefestigung und Zustand ausgebaute Zw700

Zusammenfassung, Beobachtungen:

- Spannklemmen im Bereich Zw Getzner sauber verspannt
- keine verklemmten Schwellenschrauben beobachtet
- Schwellenschrauben drehen ohne grossen Widerstand, können von Hand reingedreht werden
- vereinzelt im Bereich weiche Zw zu wenig vorgespannte Spannklemmen vorhanden, siehe Bild 4
- Zwischenlagen wandern längs relativ zur Schwelle, daher Anrisse in einspringender Ecke (infolge Bremsen / Anfahren?)

Fotodokumentation:



Bild 1: Eingebaute Zw Getzner



Bild 2: Ausgebaute Zw 700



Bild 3: Zw Getzner eingebaut



Bild 4: Vereinzelt Skl zu wenig vorgespannt



Bild 5: Ausgebaute Zw mit Rissen



Bild 6: Zw-Riss bei einspringender Ecke



Bild 7: Schwellenschraube mit Skl und Wfp



Bild 8: Schwellenschraube mit Skl und Wfp

Anhang 5: Protokoll Interview mit Albert Iten, Instandhaltung SOB-Südnetz

Donnerstag, 02. Juli 2020, 08:45 – 10:30 Uhr

SOB Samstagn

Anwesend: Albert Iten SOB
 Philipp Huber KPZ

Fokus Betonschwellen Streckengleis

Ziel:

- Info SOB über BAFU-Projekt
- Wo, wie sind Informationen und Daten bei SOB verfügbar
- Kontakte bei SOB
- Inputs SOB in Projekt
- Fragen zu verschiedenen WP's
- Fragen durchgehen, klären welche spontan beantwortet werden können, welche Aufarbeitung benötigen und welche nicht beantwortet werden können
- Der Fragebogen ist erst im Entwurf
- Schlussendlich wird Protokoll erstellt

WP I-2**Frage KPZ:**

In welcher Form liegen Daten zu Schienenbefestigungen (Typ Skl, Wfp, Zw, Ss, Sdü, Schwellentyp und Schienenprofil) bei Betonschwellen vor bzw. welche sind wo auf dem Netz im Einsatz?

Antwort SOB:

In Datenbank Oberbau, Details zu Schienenbefestigung nur in den Köpfen, i.d.R. W14 Ws (Kunststoff Wfp), bei weichen Zw mit Neigetechnik und Skl14, weiche Zw's sind in Datenbank Oberbau. Zukünftig werden wieder harte Zw's eingebaut wegen Lärmreklamationen.

Frage KPZ:

Wo gibt es Streckenabschnitte mit Betonschwellen?

Antwort SOB:

Südnetz: Rapperswil-Schindellegi-Kaltenboden, Biberbrugg-Rothenturm, Wädenswil-Samstagn, HDS vor Samstagn.

Ostnetz: muss nachgefragt werden bzw. in Datenbank Oberbau (per mail am 2.7.2020 von Albert Iten SOB erhalten).

Frage KPZ:

Befestigungstypen? Viele verschiedene oder primär W14?

Antwort SOB:

Primär W14.

Frage KPZ:

Sind Angaben zu Kosten und Lebensdauer der Komponenten vorhanden?

Antwort SOB:

Nein, Skl-Brüche kaum bekannt, verkürzte Lebensdauer am ehesten bei Zw.

Frage KPZ:

Gibt es wesentliche Unterschiede bei Wahl und Einsatz von Schienenbefestigungen im Vergleich zu anderen Infrastrukturbetreibern?

Antwort SOB:

SBB Skl1 bis anhin, jetzt Skl14.

WP I-3.1**Frage KPZ:**

Zustand der Schienenbefestigungen: generell gut / schlecht / sehr unterschiedlich?

Antwort SOB:

Grob betrachtet gut bzw. der Zustand ist im Detail nicht bekannt.

Frage KPZ:

Gibt es Zustandsrapporte?

Antwort SOB:

Streckenwärter mit Programm Zedas, auf Details wird weniger geachtet, Bahmeister prüft die Rapporte des Streckenwärters und trifft gegebenenfalls Massnahmen.

Frage KPZ:

Häufig festgestellte Schäden / Verschleiss bei Schienenbefestigungen (Spannklemmenbrüche, Zw-Verschleiss, gebrochene oder gelockerte Spannklemmen / Schwellenschrauben, Wfp, Risse Schwellenhöcker etc.). Dokumentationen dazu? Diplomarbeiten?

Antwort SOB:

Am häufigsten Zw-Verschleiss in Bögen wurde allerdings bisher nicht statistisch aufgearbeitet.

Frage KPZ:

Wo sind Schäden am häufigsten (in Bögen, bei Gefälle, Bahnhöfen,...) oder die Instandhaltung für Schienenbefestigungen am intensivsten?

Antwort SOB:

In Bögen bzw. nicht im Detail bekannt.

Frage KPZ:

Wird die Verspannung gem. Einbauanweisung Vossloh in gewissen Zeitabständen geprüft? Wie und wie oft? Muss oft nachgezogen werden?

Antwort SOB:

Generell alle 7 Jahren werden Schienenbefestigungen kontrolliert, stichprobenweise mit Drehmomentenschlüssel. Bei Stopfen werden vorgängig Schienenbefestigungen kontrolliert.

Frage KPZ:

Sind nächstens Oberbauerneuerungen mit Betonschwellen geplant? Teilnahme möglich?

Antwort SOB:

Einsiedeln Ende Juli 3 Wochen Totalsperre, Holz- werden durch Betonschwellen ersetzt. Marcel Moser fragen.

Frage KPZ:

Wäre es möglich, für einen Halbttag mit einem Streckenwärter mitzugehen bei einem Streckenabschnitt mit Betonschwellen?

Antwort SOB:

Ist möglich, Albert Iten fragen.

Frage KPZ:

Gibt es interessante Literatur / Präsentationen zum Thema?

Antwort SOB:

Nicht bekannt.

Frage KPZ:

Hat man schon mal festgestellt, dass die Lärmemissionen zunehmen aufgrund Veränderungen in der Schienenbefestigung im Betrieb (Verspannung gelockert, Risse o.ä.)?

Antwort SOB:

Nein.

Frage KPZ:

Innovation / Entwicklung: Ist zukünftig der Einsatz anderer / optimierter Schienenbefestigungen geplant?

Antwort SOB:

Nein.

WP-I-3.2**Frage KPZ:**

Ist ein Spaltmass 0,5 mm zwischen Wfp und Spannklemme einstellbar?

Antwort SOB:

Unklar.

Frage KPZ:

Gibt es Abschnitte in der Geraden mit weicher und harter Zw?

Antwort SOB:

Siehe Datenbank Oberbau.

Anhang 6: Protokoll Interview mit Andreas Bellwald, Instandhaltung BLS

Donnerstag, 08. Oktober 2020, 13:15 – 14:30 Uhr

BLS Bern

Anwesend: Andreas Bellwald BLS
 Philippe Schneider KPZ

Fokus Betonschwellen Streckengleis

Ziel:

- Info BLS über BAFU-Projekt
- Wo, wie sind Informationen und Daten bei BLS verfügbar
- Kontakte bei BLS
- Inputs BLS in Projekt
- Fragen zu verschiedenen WP's
- Fragen durchgehen, klären welche spontan beantwortet werden können, welche Aufarbeitung benötigen und welche nicht beantwortet werden können
- Der Fragebogen ist erst im Entwurf
- Schlussendlich wird Protokoll erstellt

WP I-2**Frage KPZ:**

In welcher Form liegen Daten zu Schienenbefestigungen (Typ Skl, Wfp, Zw, Ss, Sdü, Schwellentyp und Schienenprofil) bei Betonschwellen vor bzw. welche sind wo auf dem Netz im Einsatz?

Antwort BLS:

Bei IUOB werden mehrheitlich Skl 12 auf Holz- und FFU-Schwellen resp. Skl 14 bei Betonschwellen mit den dazugehörigen Gummizwischenlagen verbaut.

Frage KPZ:

Wo gibt es Streckenabschnitte mit Betonschwellen?

Antwort BLS:

Seit den 90er Jahren immer mehr auf allen Streckenabschnitten und neuerdings auch im Bahnhofsbereich, wo die für Betonschwellen geforderten Anforderungen gegeben sind.

Frage KPZ:

Befestigungstypen? Viele verschiedene oder primär W14?

Antwort BLS:

Generell bei Verlegeart Beton mit Skl 14.

Frage KPZ:

Sind Angaben zu Kosten und Lebensdauer der Komponenten vorhanden?

Antwort BLS:

Bezüglich Verlegeart Beton sind noch wenige Daten vorhanden. Ausser im Kurvenbereich werden die Wfp nach ca. 10 – 15 Jahren Liegedauer stark verdrückt und es kommt auch hier zu Spurerweiterungen.

Frage KPZ:

Gibt es wesentliche Unterschiede bei Wahl und Einsatz von Schienenbefestigungen im Vergleich zu anderen Infrastrukturbetreibern?

Antwort BLS:

Nein.

WP I-3.1**Frage KPZ:**

Zustand der Schienenbefestigungen: generell gut / schlecht / sehr unterschiedlich?

Antwort BLS:

Die Befestigung kann gesamthaft als gut eingestuft werden. Ausnahme ist der Lötschberg Scheiteltunnel, wo die Befestigung starkem Rostbefall ausgesetzt ist.

Frage KPZ:

Gibt es Zustandsrapporte?

Antwort BLS:

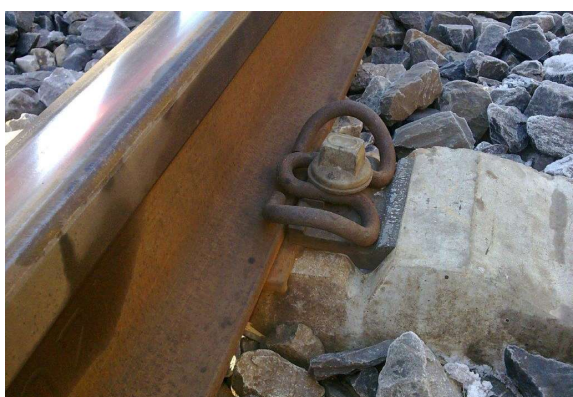
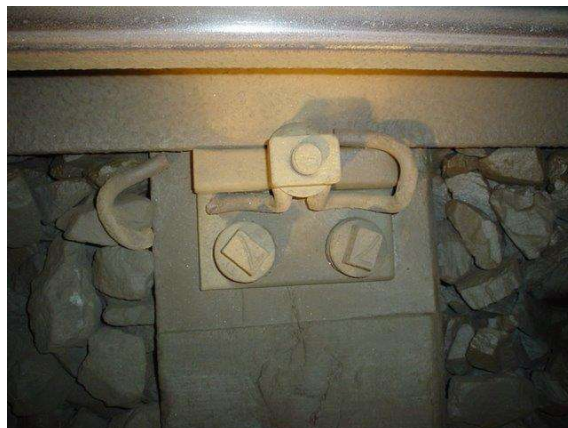
Wegen gebrochener Befestigungen im Scheiteltunnel ja. Sonst leider nein. Leider wurde die Probebefestigung mit Skl 24 im Scheiteltunnel bei km 12.000 – 12.400 nie richtig rapportiert.

Frage KPZ:

Häufig festgestellte Schäden / Verschleiss bei Schienenbefestigungen (Spannklemmenbrüche, Zw-Verschleiss, gebrochene oder gelockerte Spannklemmen / Schwellenschrauben, Wfp, Risse Schwellenhöcker etc.). Dokumentationen dazu? Diplomarbeiten?

Antwort BLS:

Siehe Bilder auf nächster Seite!!



Frage KPZ:

Wo sind Schäden am häufigsten (in Bögen, bei Gefälle, Bahnhöfen...) oder die Instandhaltung für Schienenbefestigungen am intensivsten?

Antwort BLS:

Klar im Scheiteltunnel wegen Rostbefall und bei Wfp in engen Radien.

Frage KPZ:

Wird die Verspannung gem. Einbauanweisung Vossloh in gewissen Zeitabständen geprüft? Wie und wie oft? Muss oft nachgezogen werden?

Antwort BLS:

Wegen gebrochener Skl wurde nur im Scheiteltunnel eine Nachkontrolle durchgeführt. Ansonsten wird auf diese verzichtet. Visuelle Kontrolle bei Abnahme von Gleiserneuerungen Schienenwechsel etc.

Frage KPZ:

Sind nächstens Oberbauerneuerungen mit Betonschwellen geplant? Teilnahme möglich?

Antwort BLS:

Das Umbaujahr 2020 ist abgeschlossen! Leider nein.

Frage KPZ:

Wäre es möglich, für einen Halbtage mit einem Streckenwärter mitzugehen bei einem Streckenabschnitt mit Betonschwellen?

Antwort BLS:

Bei Bedarf melden!

Frage KPZ:

Gibt es interessante Literatur / Präsentationen zum Thema?

Antwort BLS:

Nicht bekannt.

Frage KPZ:

Hat man schon mal festgestellt, dass die Lärmemissionen zunehmen aufgrund Veränderungen in der Schienenbefestigung im Betrieb (Verspannung gelockert, Risse o.ä.)?

Antwort BLS:

Nicht bekannt!

Frage KPZ:

Innovation / Entwicklung: Ist zukünftig der Einsatz anderer / optimierter Schienenbefestigungen geplant?

Antwort BLS:

Nicht bekannt!

WP-I-3.2**Frage KPZ:**

Ist ein Spaltmass 0,5 mm zwischen Wfp und Spannklemme einstellbar?

Antwort BLS:

Durch das Drehmoment kann und muss davon ausgegangen werden, dass die Verspannung richtig angezogen ist. Visuell ersichtlich – Materiell mit Zwischenlehre jedoch nur schwer zu kontrollieren.

Frage KPZ:

Gibt es Abschnitte in der Geraden mit weicher und harter Zw?

Antwort BLS:

Nicht bekannt.

Anhang 7: Literatur, Kurzzusammenfassung Stichworte

[1], Auer, F. / Schilder, R. (2009): Technische und wirtschaftliche Aspekte zum Thema Schwellenbesohlung – Teil 1: Langzeiterfahrungen im Netz der ÖBB, ZEVrail 133:

- Abnahme Niederhaltekraft aufgrund Materialermüdung, manchmal Lockerung Schwellenschraube – Schraubdübel Kontakt
- Skl 1 in engen Bögen nach wenigen Jahren getauscht, ebenso steife Zw
- Nachschrauben vor Stopfen
- Radien < 600 m Skl 28: Niederhaltekraft +50% gegenüber Skl 14
- mehr Verschleiss Zw im engen Bogen, wenn keine Besohlung
- Verschleiss auch bei Betonschwellen, wenn Zw nicht rechtzeitig getauscht wird

[2], Auer, F. / Schöpp, A. (2012): Substanzermittlung von Oberbaukomponenten, ZEVrail 136

- Gleislageanalysesystem NATAS misst Schienenneigung, damit lässt sich auf den Verschleisszustand der Zwischenlagen schliessen
- Im Bogenradius < 400 m Kriecherscheinungen bei Schraubdübeln Sdü 9 und Sdü 21
- Skl1 nicht genügend dauerhaft insbesondere in Kombination mit weicher Zw
- Seit 2007 Befestigungskombination Skl 28 – Zw 700 – Wfp 14K – Ss 35 – Sdü 25 robust genug für Gleisbögen

[4], Czolbe, C. (2019): Messbericht Anzugsmomente W14 Klemmung. Testgleis Müntschemier 2019, Kurzbericht Nr. 04-03-01905, PROSE AG, Winterthur

- Drehmoment 150 Nm bis 250 Nm in 25 Nm-Schritten
- Deutliche Unterschiede in der TDR erkennbar ab 1600 Hz
- Je höher das Anzugsdrehmoment, umso höher die TDR, insbesondere in vertikaler Richtung

[9], Liu, J. (2013): Einfluss der Schienenbefestigungskomponenten auf das laterale Verformungs- und Lastverteilungsverhalten der Schiene, TU München, Lehrstuhl und Prüfamf für Verkehrswegebau, Schriftenreihe Heft 87:

- Laterale Oberbauelastizität muss zukünftig definiert werden
- Laborversuche W14, W21, W28
- S. 10: Vorlast W14 = 17,0 kN; W21 = 17,7 kN; W28 = 27,9 kN
- Vorlast ermitteln nach DIN EN 13146-7
- Erkenntnis für Praxis: bei weicher Zw lässt sich Steifigkeit und damit TDR durch Skl 28 erhöhen, da höhere Vorlast und progressive Federkennlinie

[11], Murer, R. (2018): Untersuchungen von Spannklemmenbrüchen in Thun und geeignete Gegenmassnahmen, CAS – Arbeit ET, Ecole d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg

- Einige Spannklemmen schlecht montiert, ungenügend angezogen
- Spannklemmenbrüche bei der BLS in Bögen
- Schiene 54 E2 ungünstig, wegen schmalen Schienenfuss (125 mm)
- Falsche Kombination von Zw AT und Wfp Standard eingebaut, Zw ist zu schmal, nur 114 mm breit, es verbleibt ein Luftspalt zwischen Zw und Wfp von 9 mm
- Spannklemmen brechen am höchsten Punkt der Federarme

[12], Hunn, S. / Schweizerische Südostbahn AG (2019): Unterhaltsrichtlinie Fahrbahn, St. Gallen

- Verwaltung Inspektion im System ZEDAS
- Die Wartung beinhaltet u.a. das Anziehen nicht regelkonform vorgespannter Befestigungen, Fetten der Stellungen, Kontrolle Lage und Zustand Zw, Kontrolle Wfp, Ersatz defekter Komponenten
- In engen Radien ist auf das Verschleissen der Zw sowie das «einfressen» des Schienenfusses in die Wfp zu achten
- Für Gleisbelastungsgruppen 1-3 erfolgt die Wartung alle 7 Jahre und wird jeweils vor einer Regelstopfung ausgeführt
- Die visuelle Streckenkontrolle erfolgt durch den Streckenwärter im Auftrag vom Leiter Fahrbahn

[13], Steger, M. (2018): Untersuchungen zum Schwingungsverhalten und der daraus resultierenden Beanspruchung von Spannklemmen für Schienenbefestigungen unter Berücksichtigung von hochfrequenten Anregungen, TU München, Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau, Schriftenreihe Heft 94:

- Hypothese Spannklemmenbrüche infolge Resonanz der Spannklemmen bei Anregung durch Riffel
- Anlass Brüche Skl 1 in Kombination mit Zw700 bei Kassel bei Fahrt nahe Reibgrenze
- Relativbewegungen zwischen Schiene und Skl Federarm horizontal längs festgestellt
- Untersuchung Tauerntunnel zeigte keine Resonanz, sondern Versteifung Stützpunkt durch Verschmutzung und Korrosion
- Korrosion Grundplatte (FF PORR) führt zu erhöhter Vorspannung Skl (Schiene wird angehoben) und damit zum Bruch

[16], Venghaus, H. (2018): Ageing cuts down the track homogeneity causing differences between calculations and measurements of railway noise, Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems, Proceedings of the 12th International Workshop on Railway Noise, D. Anderson et al., Springer International Publishing AG, Terrigal Australia

- SBB Projekt Faktor X
- TDR bei B70 Schwellen wesentlich geringer als bei B91 Schwellen
- Zwischenlagendicke nimmt unter Betrieb mit der Zeit ab
- Dadurch reduzierte Vorspannung der Spannklemmen
- Abnahme der Steifigkeit der Zwischenlagen aufgrund Alterung (kumulierte Achslasten)
- Grosse Streuung der Schienenkopfmobilität
- Mit dem Anziehen der Schienenbefestigung mit Drehmoment 180 Nm reduzierte sich die Mobilität des Schienenkopfes bis zu 10 dB