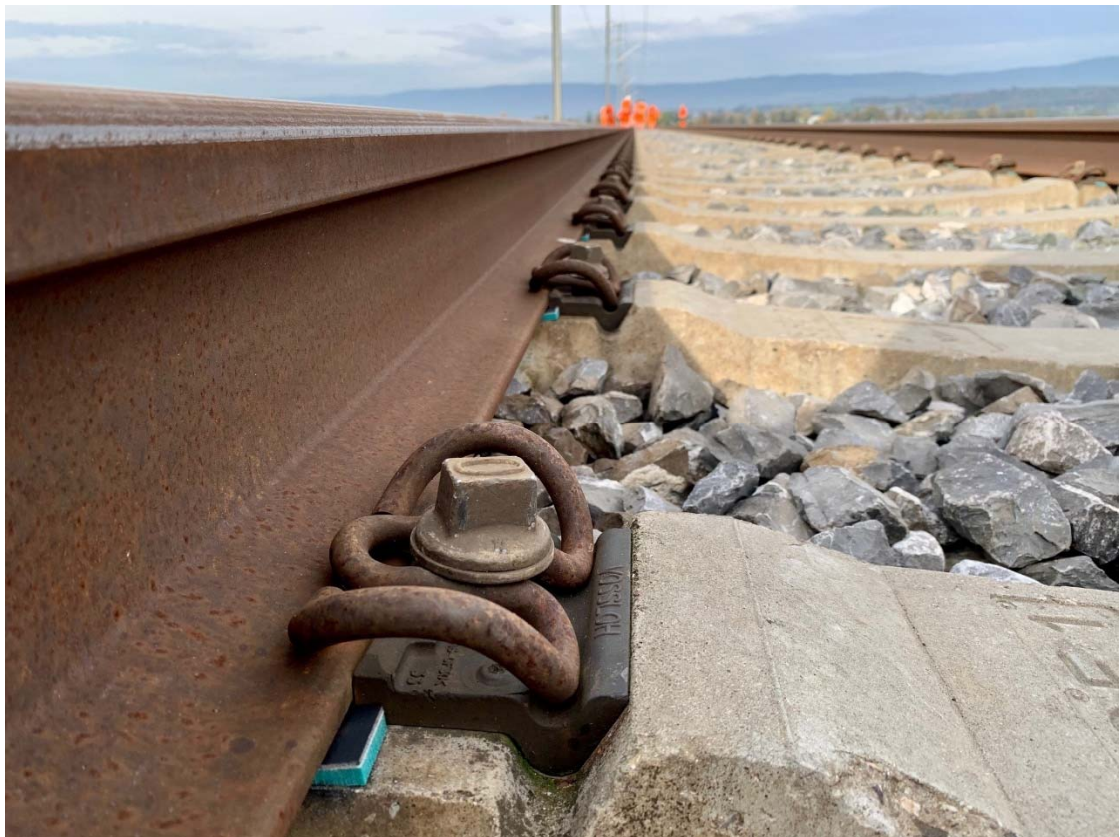




## Vergleich Zwischenlagen für Betonschwellen Analysebericht

Im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft



Quelle: St. Werner, KPZ Fahrbahn AG

Version	Datum	Ersteller	Bemerkungen / Änderungen
1.0	17.02.2021	St. Werner, Ph. Huber	Erstausgabe
1.1	09.04.2021	St. Werner, Ph. Huber	Bewertung Akustik
1.2	26.04.2021	St. Werner, Ph. Huber	Ergänzungen DSV
1.3	15.06.2021	St. Werner, Ph. Huber	Ergänzungen BAFU
1.4	07.07.2021	St. Werner, Ph. Huber	Ergänzungen Prose

**Philipp Huber / Stefan Werner**

Direkt +41 79 571 31 15 / +41 79 963 23 09

E-Mail philipp.huber@kpz-fahrbahn.ch  
stefan.werner@kpz-fahrbahn.ch

Homepage www.kpz-fahrbahn.ch

## 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
Projektleitung	Stefan Werner
Autor/Autorin:	Stefan Werner, Philipp Huber
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 der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Zusammenfassung.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Ausgangslage und Zielsetzung .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Anforderungen an Zwischenlagen.....</b>	<b>6</b>
3.1. Reduktion Stützpunktkräfte und Schotterpressungen (LCC).....	6
3.2. Vermeidung des Schotterfliessens (LCC) .....	7
3.3. Dauerhaftigkeit der Zwischenlage (LCC).....	7
3.4. Gleisabklingrate (Lärm) .....	7
<b>4. Eigenschaften und Vergleich der getesteten Zwischenlagen .....</b>	<b>8</b>
4.1. Niederfrequente Eigenschaften .....	8
4.2. Dauerhaftigkeit der Zwischenlagen .....	13
4.3. Gleisabklingraten der Zwischenlagen.....	15
<b>5. Zusammenfassung der Bewertung.....</b>	<b>18</b>
<b>6. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>20</b>

## 1. Zusammenfassung

Zwischenlagen sind ein integraler Bestandteil des Oberbausystems. Ursprünglich wurden sie entwickelt, um die Betonschwelle vor Beschädigung zu schützen. Unebenheiten zwischen Schiene und Schwelle führten häufig zu hohen lokalen Kraftspitzen, die wiederum zu Abplatzungen an der Schwelle führen konnten. Mit der Weiterentwicklung der verwendeten Materialien können heutzutage hoch elastische Zwischenlagen eingebaut werden, um die Achslasten noch besser zu verteilen und damit den Degradationsprozess des Oberbaus zu verlangsamen. Ein Nachteil dieser weichen Zwischenlagen ist eine erhöhte Lärmemission. Dieser Umstand leitete einen weiteren Entwicklungsschritt bei Zwischenlagen ein, hin zur hochdämpfenden Zwischenlage, deren Ziel ist im niederfrequenten Bereich die Eigenschaften einer weichen und im hochfrequenten Bereich die einer harten Zwischenlagen aufzuweisen. Im Rahmen dieser Entwicklungen wurde ein Überblick erstellt, der das Potenzial bzw. die Vor- und Nachteile der heute am Markt verfügbaren Zwischenlagen für den Schotteroberbau mit Betonschwellen darstellt. Dabei wurden folgende Gesichtspunkte näher beleuchtet:

- Lebenszykluskosten (LCC): Reduktion der Stützpunktkräfte, Vermeidung von Schotterfließen, Dauerhaftigkeit der Zwischenlage
- Lärm: Gleisabklingrate

Als Grundlage zur Bewertung der oben genannten Punkte, dienten Messungen an der Versuchsstrecke Kerzers-Müntschemier (BLS), Prüfberichte, Normen und Regelwerke sowie diverse Veröffentlichungen.

In einem ersten Schritt wurden die Anforderungen an moderne Zwischenlagen, eingeschränkt auf gerade Gleisabschnitte, definiert und begründet. Anhand dieser Kriterien wurden dann vier Zwischenlagentypen (hart, weich und 2x hochdämpfend) analysiert und bewertet.

Die Ergebnisse zeigen auf, welcher Typ Zwischenlage bei bestimmten Untergrundverhältnissen und Anforderungen bzgl. Lärm und LCC sinnvollerweise eingebaut werden sollte. Das Dokument soll den Bahnen zukünftig als Entscheidungshilfe dienen. Harte Zwischenlagen haben den Vorteil, weniger Lärm zu emittieren, wohingegen die geringe Lastverteilung bei gutem bis hartem Unterbau zu höheren LCC führen kann. Elastische Zwischenlagen mit wenig Dämpfung sind bei diesen Untergrundverhältnissen hinsichtlich LCC die bessere Wahl. Allerdings handelt man sich mit ihnen eine Erhöhung der Luftschallemissionen (ca. 3 dBA) ein. Eine echte Alternative bieten hochdämpfende Zwischenlagen. Wie die Analyse der Gleisabklingrate zeigt, verhalten sie sich hinsichtlich der Schallabstrahlung im niederfrequenten Bereich < 400 Hz wie weiche Zwischenlagen. Darüber sind sie den harten Zwischenlagen sehr ähnlich, was dazu führt, dass die fahrbahnseitige Schallemission merklich reduziert werden kann. Bzgl. Dauerhaftigkeit können mittlerweile beide Hersteller einen bestandenen Dauerschwingversuch vorweisen. Langzeiterfahrungen gibt es jedoch noch keine. Der zukünftige Einsatz im Gleis wird hier mehr Aufschluss geben müssen und sollte von den Bahnen entsprechend überwacht werden.

Die folgende Abbildung 1 zeigt wie die unterschiedlichen Zwischenlagen in Abhängigkeit von Untergrundsteifigkeit und Fahrgeschwindigkeit in geraden Gleisabschnitten eingesetzt werden sollten. Die Grafik beruht auf der Annahme, dass sowohl Lärm wie auch LCC im betreffenden Streckenabschnitt relevant sind. Ist eines dieser zwei Kriterien für einen bestimmten Streckenabschnitt von untergeordneter Bedeutung, z.B. Lärm (keine Anrainer, Einschnitt, Tunnel, Lärmschutzwand), ist in diesem Fall klar, dass die weiche Zwischenlage vorzugsweise eingesetzt wird.

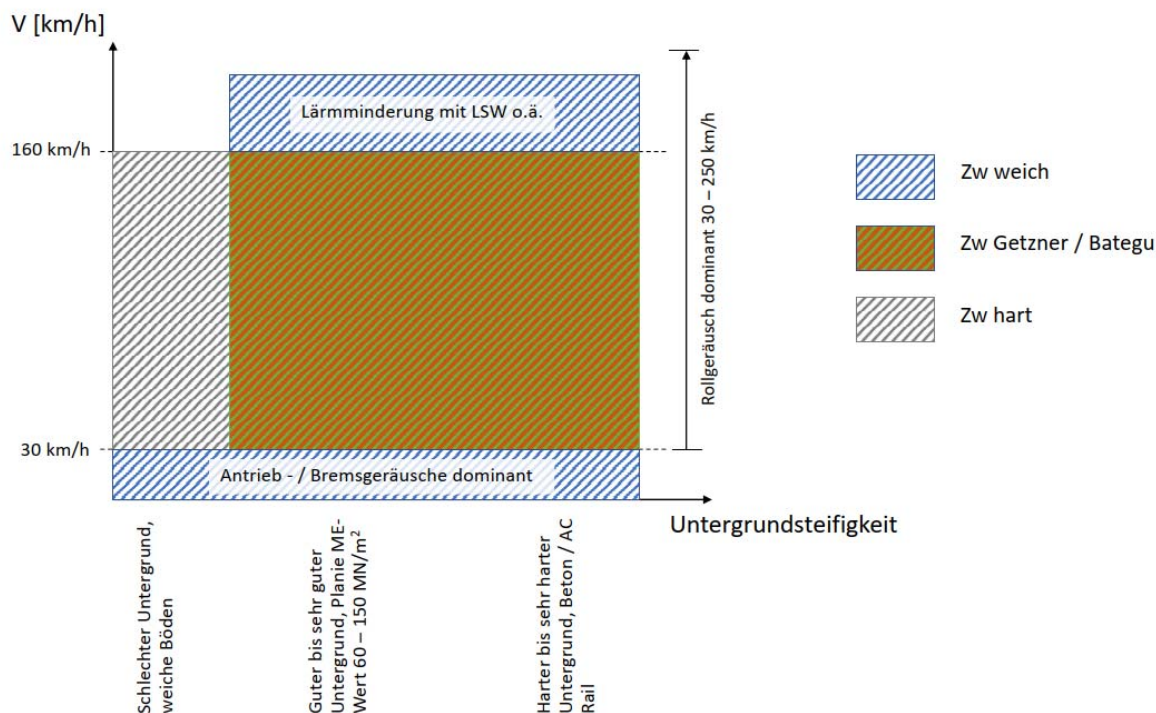


Abbildung 1: Einsatzbereich der Zwischenlagen

Für die harte Zwischenlage verbleibt als sinnvoller Einsatzbereich weiche Böden bzw. schlechte Untergrundverhältnisse im Geschwindigkeitsbereich 30 – 160 km/h. In diesem Fall beeinflusst die Zwischenlagensteifigkeit die LCC nur wenig. Die neuentwickelten Zwischenlagen von Getzner / Bategu sind gegenüber den harten Zwischenlagen insgesamt hinsichtlich Lärm / LCC für steifere Untergrundverhältnisse zu bevorzugen, da ihre niederfrequente Steifigkeit um 200 kN/mm (Getzner) bzw. 250 kN/mm (Bategu) etwa um den Faktor 5 kleiner ist als bei harten Zwischenlagen und sie damit die LCC reduzieren, hinsichtlich Lärm aber annähernd gleich gut sind.

Für den Geschwindigkeitsbereich < 30 km/h mit Anfahren und Bremsen (z.B. Bahnhöfe, Wendegleise) ist nicht das Rollgeräusch, sondern sind andere Lärmquellen massgebend. Daher eignet sich für diesen Fall die weiche Zwischenlage.

Bei hohen Geschwindigkeiten ab 160 km/h schreibt die SBB aufgrund ihrer Erfahrungen hinsichtlich LCC weiche Zwischenlagen vor. Dies macht Sinn, weil mit zunehmender Geschwindigkeit die Anregungsfrequenzen und damit auch die Steifigkeiten der Zwischenlagen steigen. Zudem steigen die Kraftspitzen bei lokalen Unebenheiten oder Schienenschäden. Weiche Zwischenlagen können solch hochfrequente Kräfte besser reflektieren, harte oder dämpfende Zwischenlagen, die mit der Frequenz stärker versteifen, transmittieren diese Kräfte eher in Schwelle und Schotter. Die Zunahme des Rollgeräusches mit zunehmender Geschwindigkeit und mit dem Einsatz weicher Zwischenlagen muss in diesem Fall anderweitig kompensiert werden, falls erforderlich (kleine, glatte Räder, glatte Schienen, Lärmschutzwände etc.).

## 2. Ausgangslage und Zielsetzung

Im Rahmen der beiden eidg. Forschungsprojekte "Akustisch optimierte Zwischenlage" und "Hochdämpfende Zwischenlage" wurden zwei Zwischenlagen getestet, die im hochfrequenten Bereich akustisch ähnlich gut wirken wie harte Zwischenlagen, andererseits im niederfrequenten Bereich annähernd Eigenschaften weicher Zwischenlagen aufweisen und somit den Oberbau schonen.

Basierend auf den Ergebnissen soll nun ein Vergleich angestellt werden, um den Bahnen eine Entscheidungshilfe zu liefern, welche Zwischenlage für welchen Einsatzbereich bzgl. LCC und / oder Lärmschutz geeignet ist. Dafür werden die Eigenschaften der Zwischenlagen hinsichtlich ihres nieder- und hochfrequenten Verhaltens analysiert und den herkömmlichen harten bzw. weichen Zwischenlagen gegenübergestellt. Eventuelle Grenzen der Optimierung sollen ebenfalls aufgezeigt werden. Der Vergleich bezieht sich dabei auf einen Schotteroberbau mit Betonschwellen in der Geraden.

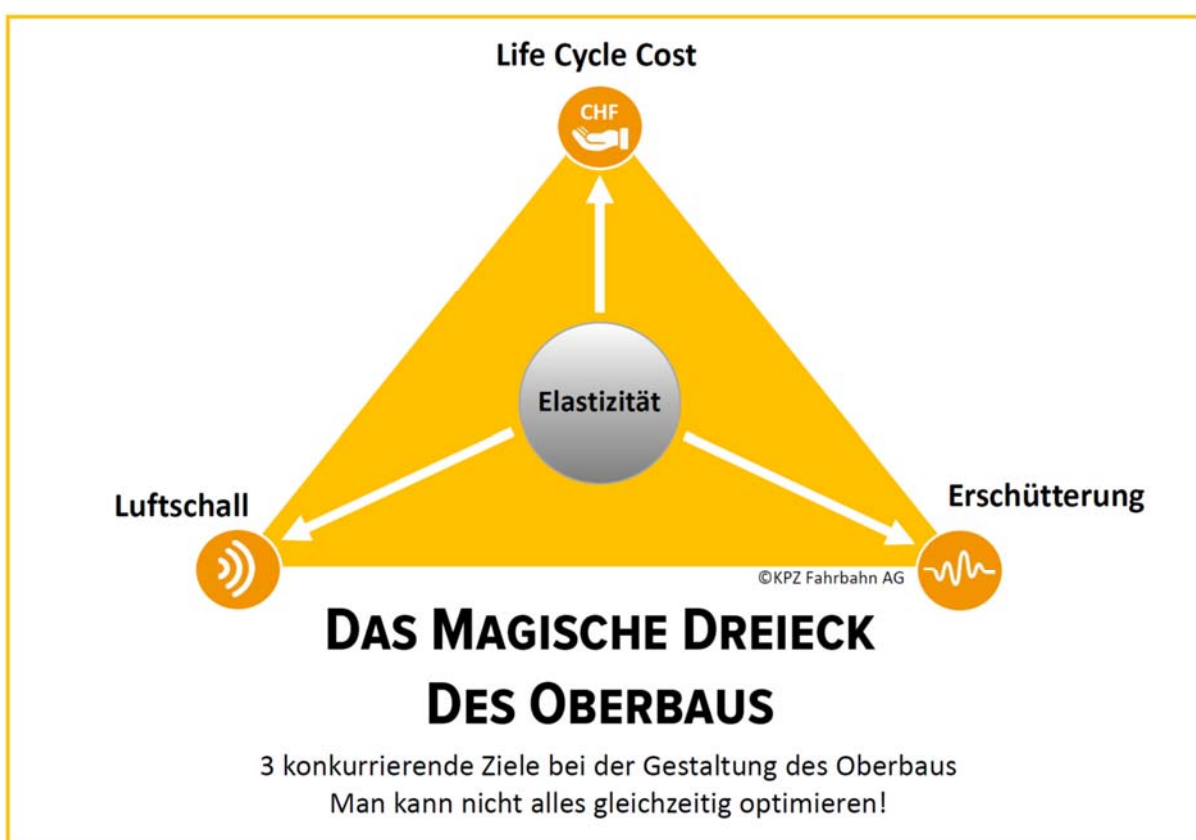


Abbildung 2: Grenzen der Optimierung des Oberbaus

Abbildung 2 zeigt die Ziele, welche man mit elastischen Zwischenlagen (neben der elektrischen Isolierwirkung) beim Betonschwellengleis beeinflussen möchte. Primäres Ziel des Einsatzes von Zwischenlagen war die Schonung von Schwelle und Schotter sowie eine dauerhaft gute Gleislage. Mit dem Einsatz unterschiedlicher Zwischenlagen hat man festgestellt, dass sich Zwischenlagen auch hinsichtlich Lärmemissionen unterscheiden. Ein drittes mögliches Ziel ist die Beeinflussung der Erschütterungsemissionen. Forschungsprojekte wie z.B. das EU-Forschungsprojekt RIVAS (Railway Induced Vibration Abatement Solutions) haben allerdings gezeigt, dass man beim Schotteroberbau auf der freien Strecke mit Zwischenlagen kaum Erschütterungsschutz betreiben kann, da die mitschwingenden Massen zu gering und die masgebenden Frequenzen zu tief sind.

Die bisherige Praxis der Bahnen bestand darin, entweder mit weichen Zwischenlagen den Oberbau zu schonen bzw. möglichst tiefe LCC zu erreichen oder mit harten Zwischenlagen die Lärmemissionen tief zu halten. Die neusten Entwicklungen von Zwischenlagen basieren auf der Idee, dass sich bei detaillierter Betrachtung die zwei Ziele LCC und Lärm eben nicht konkurrenzieren müssen, sondern beide erreichbar sind. Dies hat damit zu tun, dass es sich um unterschiedliche Frequenzbereiche und Belastungszustände handelt, bei denen die Zwischenlagen weich oder steif reagieren sollen.

### 3. Anforderungen an Zwischenlagen

Die Bahnen haben hinsichtlich LCC und Lärm qualitativ das Ziel, beide Größen soweit es geht zu reduzieren. Diese Ziele werden folgend mittels technischer Anforderungen definiert.

#### 3.1. Reduktion Stützpunktkräfte und Schotterpressungen (LCC)

Der Oberbau muss eine ausreichende Elastizität aufweisen, um die quasistatischen Achslasten auf mehrere Stützpunkte bzw. Schwellen verteilen zu können. Wären die Stützpunkte unendlich steif, so würde im Fall wo das Rad direkt über dem Stützpunkt ist, 100% der Radlast in diesem Stützpunkt eingeleitet. Eine ausreichende Elastizität sorgt dafür, dass nur um die 40% der Radlast beim darunterliegenden Stützpunkt eingeleitet wird, der Rest verteilt sich über die Schiene auf die weiteren Stützpunkte. Die langjährige Erfahrung zeigt, dass **eine Einsenkung von 1 -1,5 mm** unter dem rollenden Rad (unter der Annahme einer Radsatzlast von 20 t) eine ausreichende Elastizität sicherstellt und das Optimum hinsichtlich LCC darstellt. Diese gesamthafte Einsenkung verteilt sich normalerweise auf verschiedene Komponenten wie Zwischenlage, Schotter und Unterbau.

Im Extremfall, bei Tunnelstrecken mit Fester Fahrbahn z.B. Typ Rheda, verbleibt als einziges elastisches Element die Zwischenplatte, welche die gesamte gewünschte Einsenkung von 1 - 1,5 mm sicherstellen muss. Dies erfordert eine sehr weiche Zwischenplatte mit einer Steifigkeit  $c_{\text{stat}} \approx 22,5 \text{ kN/mm}$ .

Im anderen Extremfall bei Schotteroberbau auf eher weichem Unterbau genügt eine harte Zwischenlage, um die gewünschte Einsenkung zu erreichen. Die Zwischenlagensteifigkeit muss daher immer auf den vorhandenen Ober- und Unterbau abgestimmt werden.

Die aktuellen Empfehlungen der SBB für die elastischen Komponenten [13] geben für Geschwindigkeiten < 160 km/h harte Zwischenlagen vor, für Geschwindigkeiten > 160 km/h weiche Zwischenlagen in Kombination mit steif beschlachten Betonschwellen B91.

Diese SBB Anforderungen zeigen, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die dynamischen Radlasten steigen und versucht wird, mit weichen Zwischenlagen dagegen zu wirken.

Bei den Zwischenlagen wird oft noch von statischen Steifigkeiten gesprochen, obwohl diese bei Überfahrt eigentlich irrelevant ist. Die Lasteinwirkung auf die einzelne Zwischenlage erfolgt in Sekundenbruchteilen und verschwindet wieder. Die Belastung im Zeitbereich ist vergleichbar mit einem Dreiecksimpuls. Schwellenschwingungsmessungen zeigen bei Geschwindigkeiten um 120 km/h wie auf der BLS-Strecke bei Kerzers die Hauptfrequenz dieser impulshaltigen Einwirkung bei ca. 10 Hz. Daher ist auch die Elastizität bzw. Steifigkeit der Zwischenlage (und der weiteren Oberbaukomponenten) bei dieser Frequenz entscheidend für die Einsenkung.

Für Einsenkungsberechnung z.B. nach Zimmermann mit der Zielvorgabe 1 -1,5 mm sind daher die dynamischen Steifigkeiten anzusetzen.

### **3.2. Vermeidung des Schotterfliessens (LCC)**

Neben einer ausreichenden Elastizität im Oberbau gibt es eine weitere Anforderung hinsichtlich LCC:

**Um Schotterfliessen zu vermeiden, sollte der Schotter im Frequenzbereich 40 -100 Hz dynamisch möglichst wenig angeregt werden [12].**

Die hohe Mobilität des Schotters in diesem Frequenzbereich wird z.B. beim Schotterstopfen genutzt, bei dem mit Frequenzen um 40 Hz angeregt wird, um den Schotter zu bewegen. Oberbaueigenfrequenzen in diesem Frequenzbereich führen zu einer verstärkten Übertragung der Anregung im Rad-Schiene-Kontakt in den Schotter und sollten vermieden werden.

### **3.3. Dauerhaftigkeit der Zwischenlage (LCC)**

Die Auswirkung der Dauerbelastung muss durch das Verfahren nach EN 13146-4:2012 bestimmt werden.

Nach EN 13481-2:2012 darf die Änderung vor und nach Dauerbelastung von Durchschubwiderstand und Spannkraft maximal 20% betragen.

**Die Änderung der vertikalen statischen Steifigkeit vor und nach Dauerbelastung darf maximal 25% betragen.**

### **3.4. Gleisabklingrate (Lärm)**

Die Zwischenlage hat einen wesentlichen Einfluss auf die Gleisabklingrate und damit auf die Lärmemission infolge Rollgeräusch. Mit einer hohen Gleisabklingrate kann der Schallanteil der Schiene, welcher i.d.R. die Lärmemission im Frequenzbereich von ca. 500 – 2,5 kHz dominiert, reduziert werden. Mit harten Zwischenlagen werden hohe Gleisabklingraten erreicht, weiche Zwischenlagen führen zu deutlich tieferen Gleisabklingraten.

**Das Ziel für eine Zwischenlage ist daher aus akustischer Sicht eine Gleisabklingrate im Bereich von harten Zwischenlagen (im Frequenzbereich von ca. 500 – 2,5 kHz).**

## 4. Eigenschaften und Vergleich der getesteten Zwischenlagen

Im folgenden Kapitel werden die Zwischenlagen (Zw686a, Zw700b, Zw Bategu und Zw 700b-HD) gemäss den Anforderungen in Kapitel 3 untersucht und beurteilt. In Kapitel 4.1 wird das Thema LCC hinsichtlich Schotterpressung und Schotterfliessen analysiert. Dazu werden die Eigenschaften der Zwischenlagen im niederfrequenten Bereich gegenübergestellt. Kapitel 4.2 vergleicht die Dauerhaftigkeit der Zwischenlagen mit Hilfe von Daten aus Laborprüfungen und Kapitel 4.3 untersucht die Lärmproblematik anhand der Gleisabklingratenmessungen.

### 4.1. Niederfrequente Eigenschaften

Um das Potenzial bzgl. einer Senkung der LCC (Schotterschonung) herauszuarbeiten, wird in einem ersten Schritt das elastische Verhalten der Zwischenlage im tieffrequenten Bereich untersucht. Grundsätzlich kann die Schotterbeanspruchung quasistatisch oder dynamisch analysiert werden. Quasistatisch wird für die Einsenkungsberechnung das Verfahren Zimmermann angewendet. Dynamisch kann wiederum zwischen harmonischer und impulshaltiger Einwirkung unterschieden werden. Bei der Anforderung hinsichtlich Schotterfliessen (Kap. 3.2) spielt die harmonische Anregung die entscheidende Rolle. Diese wird vereinfacht mit einem Zweimassenschwinger untersucht.

Diese Untersuchungen basieren auf den folgenden, in den Prüflabors ermittelten Zwischenlagensteifigkeiten und Dämpfungen:

Zwischenlage	Dyn. Steifigkeit bei 10Hz in [kN/mm]	Dyn. Steifigkeit bei 30Hz in [kN/mm]	Mechanischer Verlustfaktor
Zw686a (hart)	1071	1189	0.10
Zw700a (weich)	93	100*	0.11
Zw Bategu	239	254	0.30
Zw700a HD Getzner (Prototyp)	185	215*	0.425

Tabelle 1: Mechanische Kennwerte, Quelle: [6] und Herstellerangaben, \*abgeschätzt

Die Einsenkungsberechnung nach Zimmermann-Verfahren erfolgt, wie bereits in Kap. 3.1 erwähnt, basierend auf einer dynamischen Steifigkeit bei 10 Hz. Berechnet man mit den oben genannten Werten den Einsenkungsverlauf nach Zimmermann (Betonschwelle B91, Schienenprofil 60E1) bei harter ( $C_{\text{stat}} = 0.3 \text{ N/mm}^3$ ), sehr guter ( $C_{\text{stat}} = 0.15 \text{ N/mm}^3$ ) und schlechter ( $C_{\text{stat}} = 0.05 \text{ N/mm}^3$ ) Untergrundqualität kommt man zu folgenden Ergebnissen:



<b>Harte Untergrundqualität</b> z.B. Beton, AC-Rail	<b>Einsenkung</b> bei 20 t Achslast, 10 Hz in [mm]	<b>Stützpunktkraft</b> bei 20 t Achslast, 10 Hz in [kN]
Zw686a (hart)	0.58	45.1
Zw700a (weich)	0.88	39.1
Zw Bategu	0.68	42.6
Zw700a HD Getzner (Prototyp)	0.72	41.8
<b>Sehr gute Untergrundqualität</b>		
Zw686a (hart)	0.94	38.3
Zw700a (weich)	1.21	35.2
Zw Bategu	1.04	37.1
Zw700a HD Getzner (Prototyp)	1.07	36.7
<b>Schlechte Untergrundqualität</b>		
Zw686a (hart)	2.11	29.3
Zw700a (weich)	2.32	28.3
Zw Bategu	2.18	28.9
Zw700a HD Getzner (Prototyp)	2.21	28.8

Tabelle 2: Einsenkung und Stützpunktkraft nach Zimmermann

Das Ziel gem. Kapitel 3.1, eine Einsenkung von 1 – 1,5 mm zu erreichen, wird, abgesehen von der harten Zwischenlage, nur bei sehr guter Untergrundqualität erreicht (wie sie bei Neubaustrassen und Oberbauerneuerungen mit der Anforderung an den ME-Wert gewährleistet ist). Bei hartem Untergrund ist eine zusätzliche Massnahme erforderlich, entweder durch den Einsatz einer Schwellenbesohlung (Reduktion der Schotterpressung durch grössere Kontaktfläche), einer Schotterschutzmatte oder einer Übergangsschicht.

Wie zu erkennen ist, trägt die weiche Zwischenlage bei harter und sehr guter Untergrundqualität zu einer gewissen Entlastung der Stützpunktkraft und somit zu einer Reduzierung der Schotterpressung unter der Schwelle bei. Die weiche Zwischenlage reduziert die Schotterpressung um ca. 10%, die beiden Zwischenlagen Bategu / Getzner um ca. 5% gegenüber einer harten Zwischenlage. Bei schlechter Untergrundqualität geht der Effekt aufgrund der sehr weichen Fahrbahnbettung völlig unter.

Dies bedeutet gemäss nachfolgender Formel,

$$n_2 = n_1 * (p_1/p_2)^4$$

mit  $n_1$  = Lastwechselzahl alt  
 $n_2$  = Lastwechselzahl neu  
 $p_1$  = Schotterpressung alt  
 $p_2$  = Schotterpressung neu

eine mögliche Erhöhung der Lastwechselzahl um den Faktor 1.5 beim Einsatz weicher Zwischenlagen und eine Erhöhung um den Faktor 1.2 bei den neu getesteten Zwischenlagen gegenüber der harten Zwischenlage bei harten Untergrundbedingungen.

Dynamisch wird der Oberbau niederfrequent zwischen 5 und 30 Hz durch die Achsfolge des vorbeifahrenden Zuges angeregt. Dazu kommen langwellige Unebenheiten und Imperfektionen in der Gleislage. Auch eine Anregung durch langwellige Radunrundheiten wie dreieckige Räder findet in diesem Frequenzbereich statt. Die Anregung durch die Schwellenfachfrequenz (Wellenlänge 60 cm) erfolgt bei Fahrgeschwindigkeiten von 80 – 200 km/h zwischen 40 und 100 Hz und damit im kritischen Bereich für das Schotterfließen. Für die Betrachtung der dynamischen Schotterbeanspruchung ist es ausreichend sich auf den Frequenzbereich bis ca. 200 Hz zu beschränken. Frequenzen darüber dringen nicht bis zum Schotter durch, da die Schwellenmasse als Filter wirkt [18]. All diese tieffrequenten Anregungen sind geschwindigkeitsabhängig (d.h. sie nehmen mit zunehmender Geschwindigkeit in ihrer Intensität zu) und werden über Schwellen und Schotter in den Untergrund abgeleitet. Je nach Untergrundverhältnissen endet der Anstieg der Amplituden mit der Fahrgeschwindigkeit bei Erreichen der Fahrweg-Untergrund-Eigenfrequenz. Inwiefern mit Hilfe von elastischen Zwischenlagen diese Schwingungen abgemindert oder sogar verstärkt werden, zeigen die Analysen mittels Zweimassenschwinger.

Mit Hilfe der Betrachtung des Gesamtsystems am Zweimassenschwinger kann die Dämmung der anregenden Kräfte im niederfrequenten Bereich genauer untersucht werden.

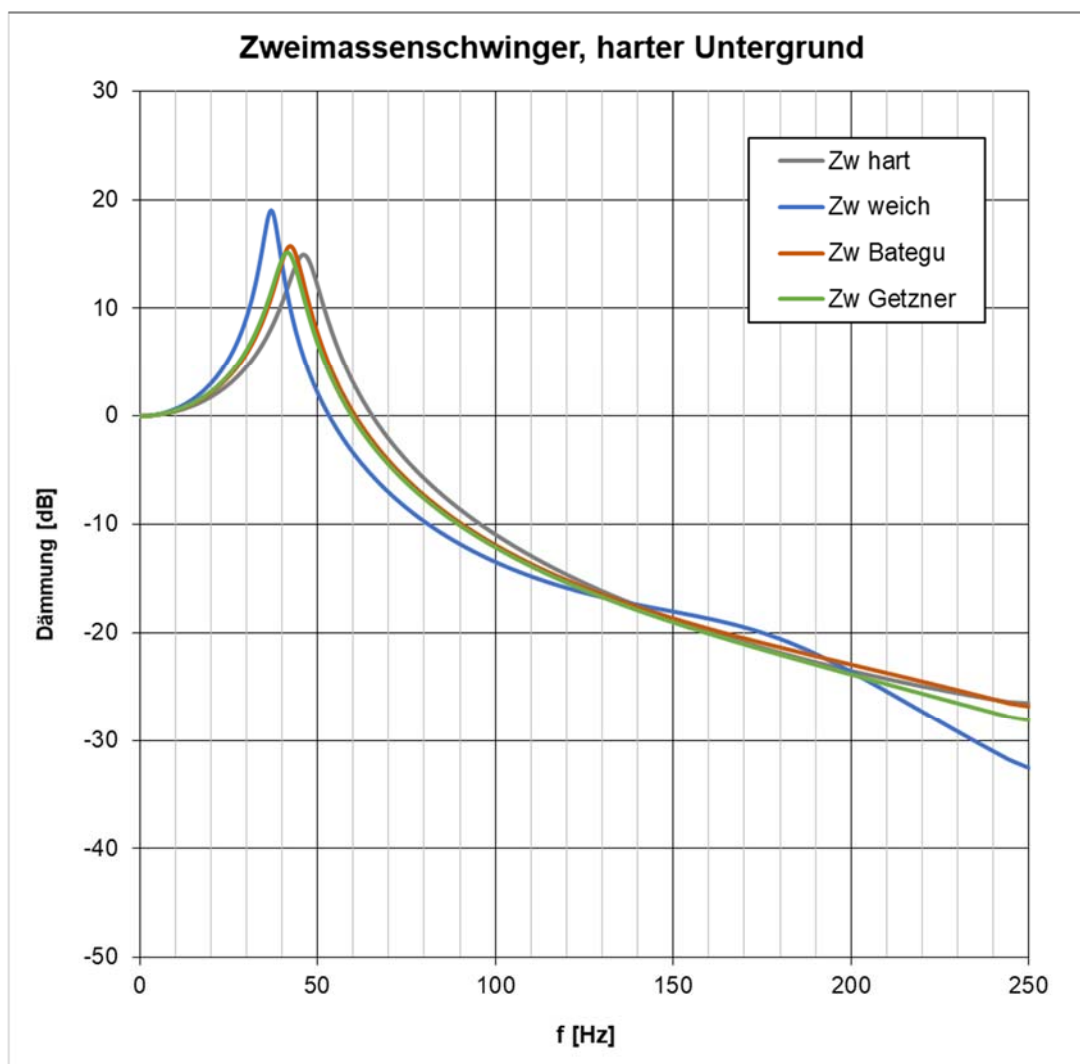


Abbildung 3: Übertragungsfunktion unterschiedlicher Zwischenlagen mit  $C = 0.3 \text{ N/mm}^3$

Wie zu erkennen ist, können niederfrequente Anregungen (5 – 30 Hz) durch Zwischenlagen generell nicht abgemindert werden. Im Gegenteil, der gesamte Oberbau verstärkt dieses Signal, unabhängig von dessen Untergrundsteifigkeit. Bei harter Lagerung auf Beton oder AC-Rail haben die unterschiedlichen Zwischenlagen einen wesentlichen Einfluss auf die Oberbaudynamik. Mit den weichen Zwischenlagen liegt die erste Eigenfrequenz knapp unterhalb 40 Hz. Die Dämmkurven der Zw Getzner und Bategu verlaufen sehr ähnlich mit Resonanzverstärkung im kritischen Frequenzbereich für Schotterfließen knapp über 40 Hz. Bei harten Zwischenlagen liegt die erste Eigenfrequenz noch leicht höher. Bezogen auf den kritischen Frequenzbereich 40 – 100 Hz besitzt die weiche Zwischenlage insgesamt Vorteile und ist in diesem Fall zu empfehlen. Die weiteren analysierten Zwischenlagen führen zu einer ersten Eigenfrequenz im kritischen Frequenzbereich und sollten vermieden werden.

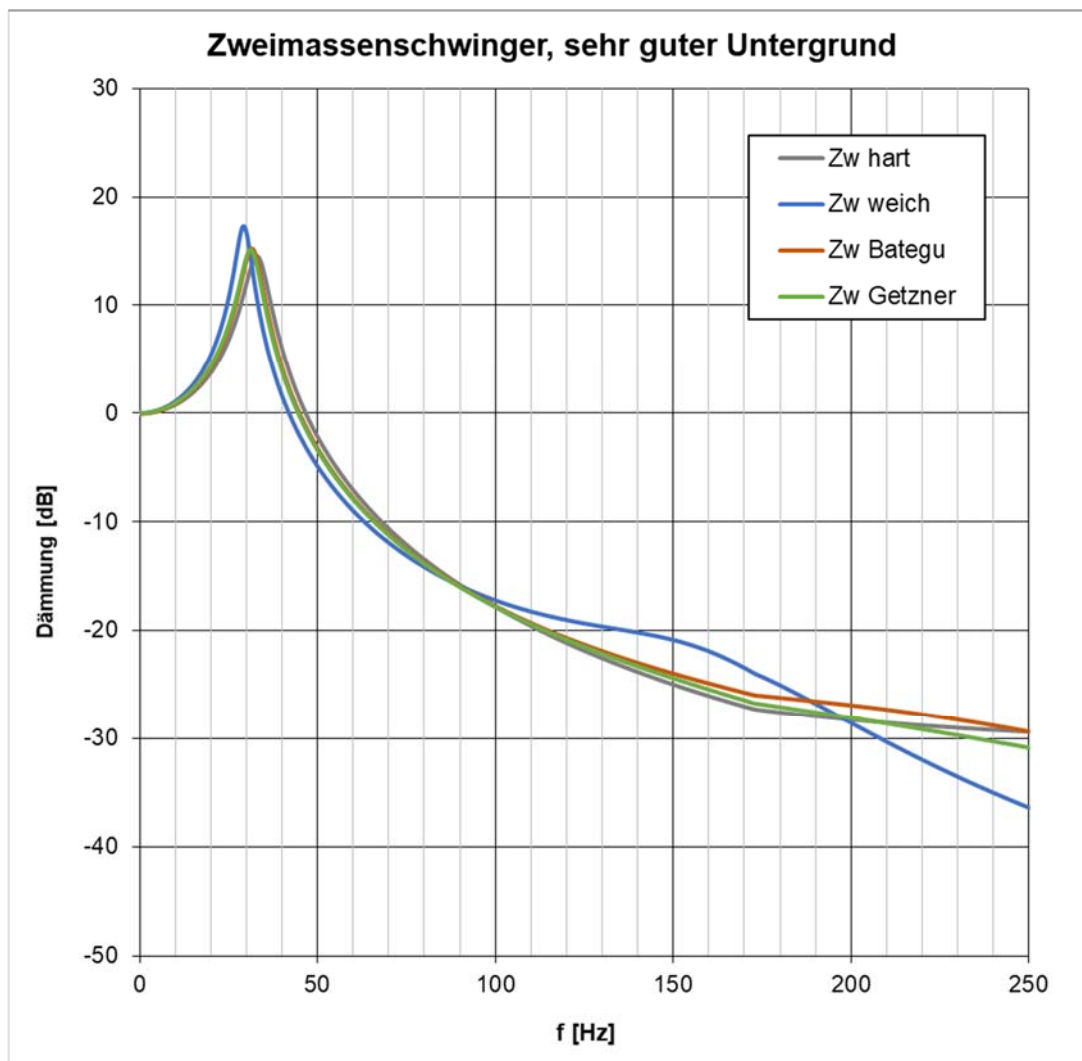


Abbildung 4: Übertragungsfunktion unterschiedlicher Zwischenlagen mit  $C = 0.15 \text{ N/mm}^3$

Bei sehr gutem Untergrund liegen die Dämmkurven der unterschiedlichen Zwischenlagen bereits sehr nahe beieinander. Die erste Eigenfrequenz liegt für alle Zwischenlagen ausserhalb des kritischen Frequenzbereichs 40- 100 Hz. Die Dämmkurve liegt für die weiche Zwischenlage ab 40 – 90 Hz etwas tiefer als die anderen, hat also auch in diesem Fall leichte Vorteile. Wie schon bei der Analyse der Einsenkungen und Stützpunktkräfte gilt auch aufgrund dieser Analyse mittels Zweimassenschwinger: Je weicher der Untergrund, umso geringer der Einfluss der Zwischenlage. Umgekehrt kann man sagen: Je steifer der Untergrund, umso grösser ist der Einfluss der Zwischenlage.

Neben den harmonischen Anregungen gibt es, wie bereits oben erwähnt, auch stossartige Anregungen. Hier sollte man zwischen lokal zuordenbar und nicht zuordenbar unterscheiden. Störeffekte durch unrunde Räder treten nicht immer an derselben Stelle auf der Schiene auf. Störstellen im Fahrweg wie z.B. Hohllagen, Übergänge, Schweisstösse, etc. treten lokal auf und führen zu einer lokalen Beanspruchung des Fahrwegs. Der für den Oberbau schädliche Effekt ist bei den lokal zuordenbaren Anregungen deutlich höher. Um diese dynamischen Kraftspitzen des vorbeifahrenden Zuges besser abzufedern, ist der Einsatz von weichen Zwischenlagen sinnvoll. Durch den längeren Federweg, die elastische Nachgiebigkeit und die kleine Trägheitsmasse der Schiene werden die Kraftamplituden der dynamischen Impulse abgemindert. Die weiche Zwischenlage verursacht entsprechend der Theorie der Wellenausbreitung einen hohen Impedanzsprung und reflektiert die Welle. Eine lokale Überbeanspruchung des Oberbaus wird somit reduziert.

Die Bewertung bezieht sich auf die Dämmwirkung bei harmonischen und stossartigen Anregungen sowie auf die Reduzierung der Schotterpressung durch eine vergrösserte Biegelinie. Hat die Zwischenlage keinen oder nur geringen Einfluss auf die Bewertungskriterien, werden keine Punkte vergeben. Der grösstmögliche Einfluss wird mit 2 Punkten bewertet. Gemäss dem Einfluss der Effekte auf die LCC (von links nach rechts aufsteigend) werden die Beurteilungskriterien noch gewichtet (Harmonische Anregung Faktor 1, Stossartige Anregung Faktor 2 und Biegelinie Faktor 3). In Tabelle 4 wurde der Bewertungsfaktor für die Stützpunktkraftreduzierung etwas angepasst (von 3 auf 2), da der Effekt nicht mehr so dominant ist.

Zusammenfassend lassen sich die untersuchten Zwischenlagen je nach Untergrundverhältnissen bezüglich LCC qualitativ folgendermassen bewerten:

Zwischenlage	Harmonische Anregung	Stossartige Anregung	Biegelinie	Bewertung Summe
Zw, hart	0	0	0	<b>0</b>
Zw, weich	2	4	6	<b>12</b>
Zw, Bategu	0	2	3	<b>5</b>
Zw, Getzner (Prototyp)	0	2	3	<b>5</b>

Tabelle 3: Bewertungsmatrix der untersuchten Zwischenlagen bei harten Untergrundverhältnissen

Zwischenlage	Harmonische Anregung	Stossartige Anregung	Biegelinie	Bewertung Summe
Zw, hart	1	0	0	<b>1</b>
Zw, weich	2	4	4	<b>10</b>
Zw, Bategu	1	2	2	<b>5</b>
Zw, Getzner (Prototyp)	1	2	2	<b>5</b>

Tabelle 4: Bewertungsmatrix der untersuchten Zwischenlagen bei sehr guten Untergrundverhältnissen

Zwischenlage	Harmonische Anregung	Stossartige Anregung	Biegelinie	Bewertung Summe
Zw, hart	0	0	0	<b>0</b>
Zw, weich	0	4	0	<b>4</b>
Zw, Bategu	0	2	0	<b>2</b>
Zw, Getzner (Prototyp)	0	2	0	<b>2</b>

Tabelle 5: Bewertungsmatrix der untersuchten Zwischenlagen bei schlechten Untergrundverhältnissen

Wie zu erkennen ist, haben weiche Zwischenlagen bei hartem sowie guten bis sehr guten Untergrund gewisse Vorteile, was LCC betrifft.

#### 4.2. Dauerhaftigkeit der Zwischenlagen

Um die Langlebigkeit der Produkte im Gleis bewerten zu können, wären Erfahrungen aus der Praxis am aussagekräftigsten. Da mit den neu entwickelten Zwischenlagen jedoch diesbezüglich keinerlei Langzeiterfahrungen vorhanden sind, wird der Vergleich der statischen Steifigkeit vor und nach dem Dauerschwingversuch (DSV) gemäss EN 13146-4:2012+A1:2014 für eine erste Beurteilung herangezogen. Der prozentuale Unterschied gibt einen Hinweis darauf, wie sich das Material bei wiederkehrenden Belastungen („Dauerschwingversuch“) hinsichtlich seines Langzeitverhalten im Zusammenspiel mit dem Befestigungssystem verhält. Entsprechende Prüfzeugnisse liegen für die weiche Zwischenlagen sowie die Bategu Zwischenlage vor. Für den Prototyp der Firma Getzner wurde zum Zeitpunkt des Einbaus noch kein offizieller Test durchgeführt, da sich das Produkt noch in der Entwicklungsphase befunden hat. Die unten angeführten Versuchsergebnisse beziehen sich auf einen ersten Test in Anlehnung an den Dauerschwingversuch mit adaptierten Testparametern (siehe auch Tabelle 7). Nach Abschluss der Entwicklungsphase wurde mittlerweile ein bestandener Dauerschwingversuch [21] von der Universität Innsbruck nachgereicht. Für die harte Zwischenlage liegen keine Daten vor, da gemäss EN 13146-4 die Anforderung der Änderung der vertikalen Steifigkeit für Befestigungssysteme mit einer statischen Steifigkeit  $\geq 300$  kN/mm nicht anwendbar ist. Allerdings kann man davon ausgehen, dass harte Zwischenlage eine durchaus akzeptable Lebensdauer aufweisen. Die nachfolgende Tabelle 6 gibt einen Überblick der statischen Steifigkeit vor und nach dem DSV.

Zwischenlage	vor DSV	nach DSV	Änderung	Zulässige Änderung
Zw, hart	-	-	-	-
Zw 700AT	132,9	149,3	12%	< 25% [19]
Zw Bategu 60E1	234,4	288,7	23,1%	< 25% [6]
Zw Bategu 54E2	340	446	31,2%	keine Bewertung [6]
Zw Getzner (Prototyp)	68.9*	79.3*	15%*	< 25% [20]
Zw Getzner 60E1	117.3	141.7	20.8%	< 25% [21]

Tabelle 6: Statische Steifigkeit vor/nach Dauerschwingversuch gemäss DIN 13481-2

\*Anmerkung: Werte in Anlehnung an EN 13146-4:2012+A1:2014

Die Schienenzwischenlage Zw 700 AT der Firma Vossloh entspricht einer weichen Zwischenlage, welche in ein Befestigungssystem mit Kippschutz eingebaut wird. Wie bereits erwähnt, wurden die Kennwerte der Getzner Zwischenlage vorab aus Zeit- und Kostengründen mit einer ersten Prüfung in Anlehnung an EN 13146 intern durchgeführt. Die abweichenden Prüfparameter sind in Tabelle 7 aufgeführt und entsprechen einer Belastung in der Geraden. Offensichtliche Schädigungen wurden laut Herstellerangaben nach dem Dauerschwingversuch nicht festgestellt. Im Mai 2021 wurde für die weiterentwickelte Zwischenlage ein bestandener Dauerschwingversuch nachgereicht [21].

Bezeichnung	DSV interne Prüfparameter	EN 13146-4:2012+A1:2014
Unterlast	18 kN	5 kN
Oberlast	68 kN	75 kN
Frequenz	10 Hz	4 ± 1 Hz
Lastwechsel	3 Mio.	3 Mio.
Lasteinleitungswinkel	0° (vertikal)	33° (schräg)

Tabelle 7: Abweichung der Prüfparameter für den intern durchgeführten DSV (Zw Getzner)

Insgesamt kann gemäss den in Tabelle 6 aufgeführten Werten folgende Bewertung durchgeführt werden. (Die maximal erreichbare Punktzahl wäre 9 für  $\Delta c = 0\%$ . Keine Punkte werden vergeben bei  $\Delta c > 25\%$ . Dazwischen wird interpoliert. Für einen bestandenen Dauerschwingversuch gibt es zusätzliche 3 Punkte.)

Zwischenlage	Änderung der stat. Steifigkeit nach DSV	Bewertung
Zw, hart	Einschätzung der Autoren	6
Zw, weich	12%	7.5
Zw, Bategu	23%	3.7
Zw, Getzner 60E1	21%	4.4

Tabelle 8: Bewertungsmatrix gemäss Dauerfestigkeit

### 4.3. Gleisabklingraten der Zwischenlagen

Die Zw Bategu und Getzner wurden im BLS-Abschnitt Kerzers – Müntschemier eingebaut, angrenzend an Abschnitte mit harten und weichen Zwischenlagen. Beim Oberbau handelt es sich um einen Schotteroberbau mit Schienenprofil 60E1, Schienenbefestigung W14 und Betonschwellen B91. Die Gleisabklingraten wurden für die weiche und harte Zw von Prose im Dezember 2019, die Zw Bategu im März 2020 gemessen. Weiter wurden Anfang November 2020 von Müller BBM die Gleisabklingraten für die Zw Getzner wie auch diejenige für die weiche Zw gemessen. Die gemessenen vertikalen und horizontalen Gleisabklingraten sind folgend dargestellt:

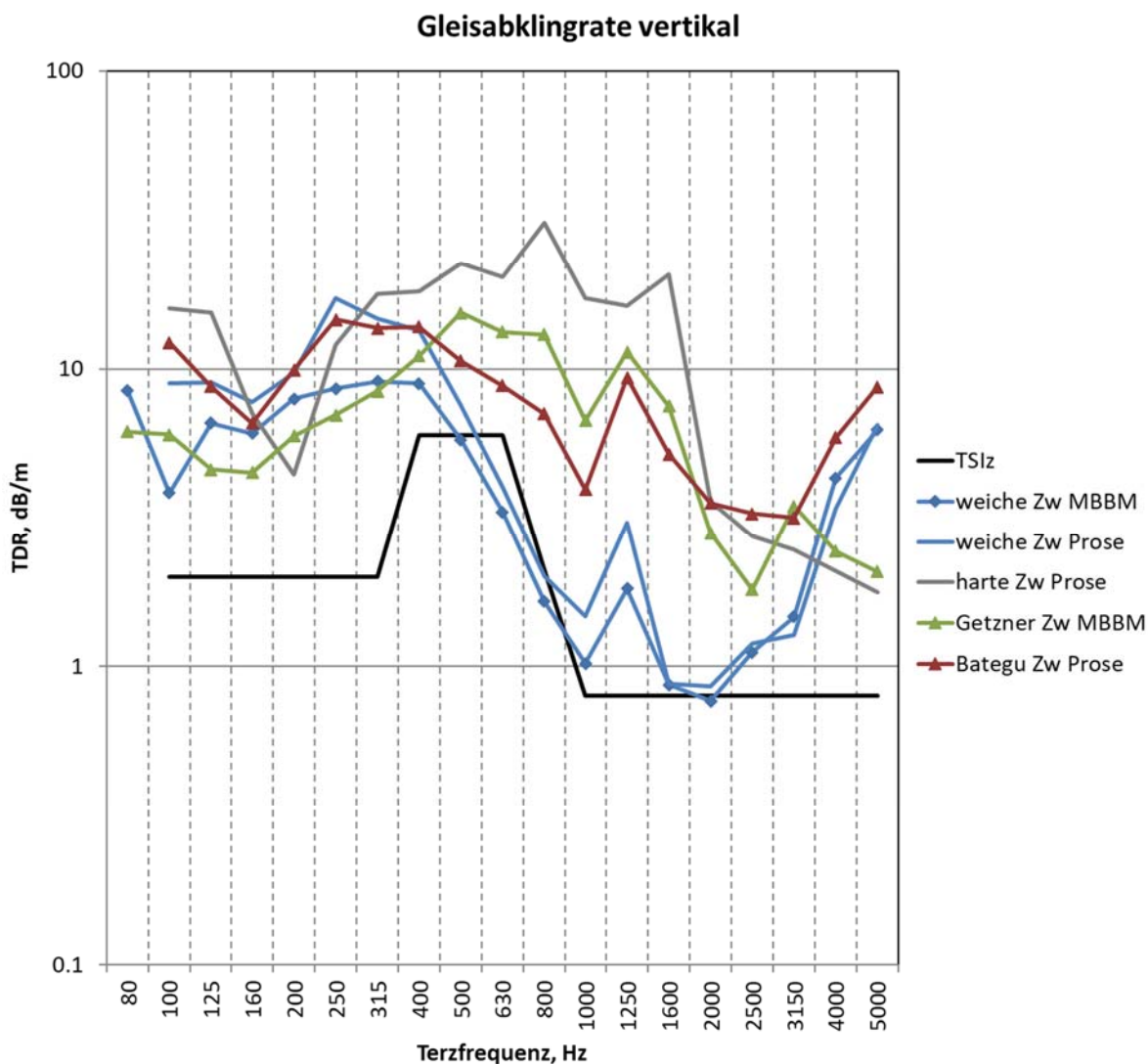


Abbildung 5: Gemessene Gleisabklingraten im BLS-Abschnitt Kerzers-Müntschemier aus [6], [10]

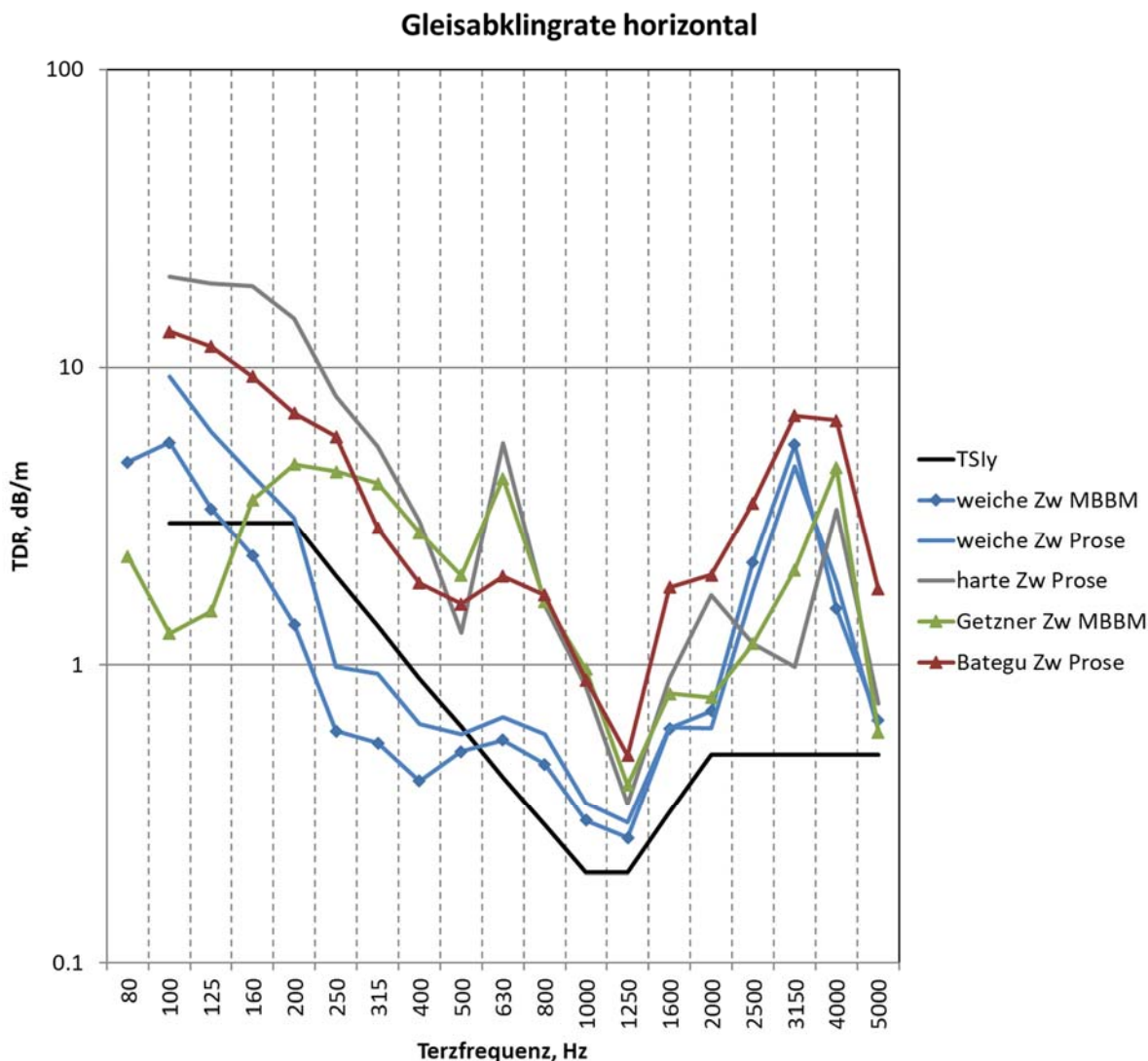


Abbildung 6: Gemessene Gleisabklingraten im BLS-Abschnitt Kerzers-Müntschemier aus [6], [10]

Die vertikalen Gleisabklingraten, dargestellt in Abbildung 5, zeigen in den für die Schallabstrahlung lärmrelevanten Terzbändern von 500 Hz bis 2,5 kHz deutliche Unterschiede. Die harten Zwischenlagen weisen die höchsten, die weichen Zwischenlagen die niedrigsten Gleisabklingraten auf. Dazwischen liegen die neu entwickelten Zwischenlagen von Bategu und Getzner. Die Kurven für die weichen Zwischenlagen, gemessen von unterschiedlichen Mess-teams (Prose, MBBM), verlaufen ähnlich. Die Werte bei den Prose-Messungen (Anfang Dezember 2019) sind etwas höher als diejenigen von Müller BBM (gemessen Anfang November 2020). Vergleicht man die neu entwickelten Zwischenlagen, so schneidet die Getzner Zw bei der vertikalen Gleisabklingrate etwas besser ab, horizontal werden sie als ebenbürtig eingeschätzt mit Vorteilen bei der Getzner Zw im Frequenzbereich < 1 kHz und Vorteilen der Bategu Zw im Frequenzbereich > 1 kHz. Das Niveau der Gleisabklingrate einer harten Zw wird von den neuentwickelten Zwischenlagen in Vertikalrichtung nicht ganz erreicht. In Horizontalrichtung liegen die Gleisabklingraten auf vergleichbarem Niveau.

Die Plausibilität der Unterschiede zwischen den Gleisabklingraten kann anhand der Schallemissionsmessungen überprüft werden. Gemäss Tabelle 8-5 [6] ergibt sich anhand von 12 Zugvorbeifahrten eine Einfügedämmung (Differenz zur Referenz vorher / nachher) der neu entwickelten Bategu Zw gegenüber der weichen Zw von 2,9 – 3,2 dB(A). Bei den Schallmes-



sungen von KPZ Fahrbahn liegt dieser Wert für die Getzner Zw, ermittelt anhand von 20 Zugsvorbeifahrten, bei 3,6 – 3,8 dB(A). Unter Berücksichtigung von Messunsicherheiten kann davon ausgegangen werden, dass die beiden hochdämpfenden Zwischenlagen akustisch in etwa gleichwertig sind.

Insgesamt werden die Gleisabklingraten, basierend auf den Untersuchungen an der BLS Strecke Kerzers – Müntschemier wie folgt bewertet:

Zwischenlage	Bewertung
Zw, hart	12
Zw, weich	0
Zw, Bategu	9
Zw, Getzner	9

*Tabelle 9: Bewertungsmatrix Lärm - Gleisabklingrate*

### 5. Zusammenfassung der Bewertung

Die in Kapitel 4 vorgenommenen Bewertungen sind nachfolgend in der Tabelle 10 und Abbildung 7 zusammengefasst. Die Bewertung bezieht sich auf den Fall «sehr gute Untergrundverhältnisse», welcher den Normalfall darstellt und angenommen werden kann, wenn es um Neubaustrecken und Oberbauerneuerungen bzw. um die Wahl der optimalen Zwischenlage geht. Für die Fälle harter und schlechter Untergrund sind die Werte in Klammern in dieser Reihenfolge in der Tabelle 10 angegeben.

Zwischenlage	LCC Schotterbeanspruchung / Schotterfließen	LCC Dauerfestigkeit Zw	Lärm Gleisabklingrate
Zw, hart	1 (0 / 0)	6	12
Zw, weich	10 (12 / 4)	7.5	0
Zw, Bategu	5 (5 / 2)	3.7	9
Zw, Getzner	5 (5 / 2)	4.4	9

Tabelle 10: Bewertung der untersuchten Zwischenlagen bei sehr guten Untergrundverhältnissen (harter / schlechter Untergrund);

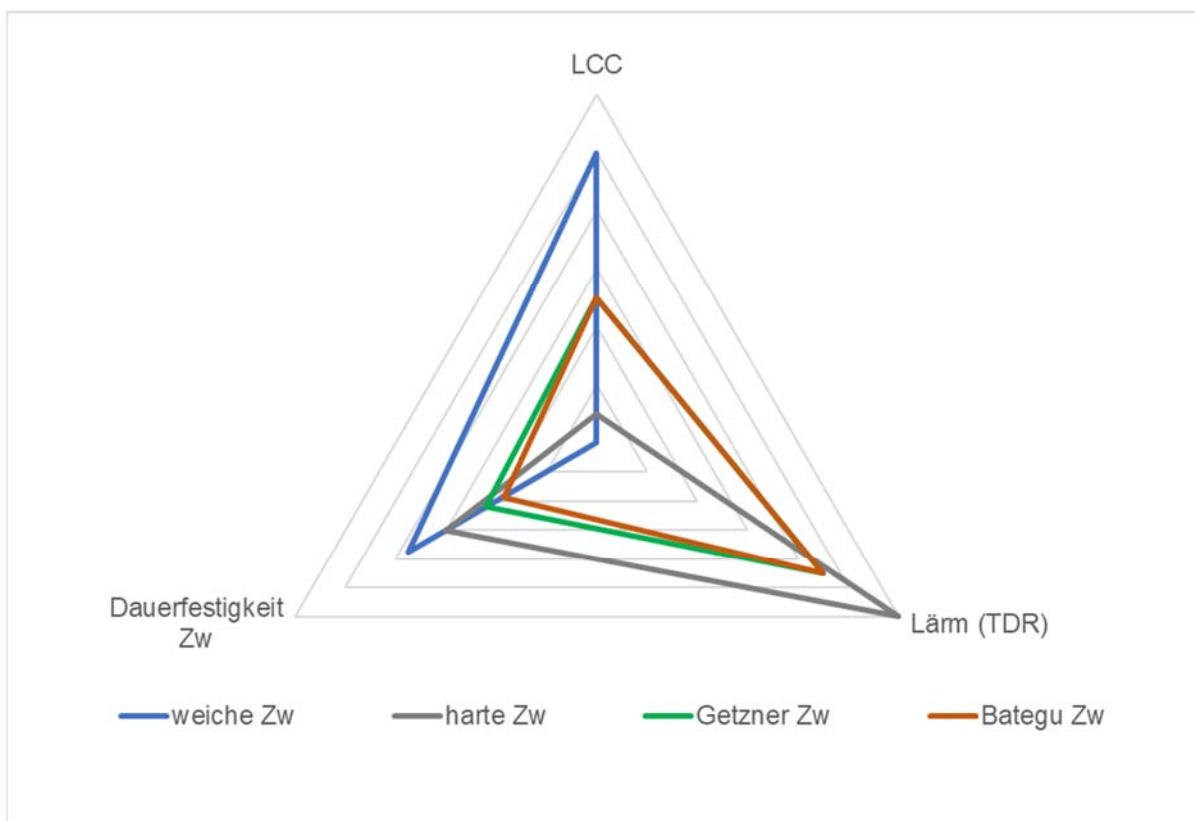


Abbildung 7: Bewertung der untersuchten Zwischenlagen bei sehr guten Untergrundverhältnissen

Die zusammenfassende Bewertung zeigt die klaren Präferenzen der bisher eingesetzten weichen und harten Zwischenlagen. Die weichen Zwischenlagen schonen den Schotter, sind langlebig, aber führen zu erhöhten Lärmemissionen. Die harten Zwischenlagen sind dagegen für geringe Lärmemissionen geeignet. Die neuentwickelten Zwischenlagen von Getzner und Bategu sind ausgewogener. Sie sind hinsichtlich LCC deutlich besser wie die harte Zwischenlage und hinsichtlich Lärm deutlich besser wie die weiche Zwischenlage.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] EN ISO 3095 (2013): Akustik – Bahnanwendungen – Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen (ISO 3095:2013), Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, August 2013
- [2] EN 13146-4:2012 (2012): Bahnanwendungen – Oberbau – Prüfverfahren für Schienenbefestigungssysteme – Teil 4: Dauerschwingversuch, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, April 2012
- [3] EN 13481-2:2012 (2012): Bahnanwendungen – Oberbau – Leistungsanforderungen für Schienenbefestigungssysteme – Teil 2: Befestigungssysteme für Betonschwellen, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Mai 2012
- [4] EN 15461:2008+A1 (2010): Railway applications – Noise emission – Characterisation of the dynamic properties of track sections for pass by noise measurements, European Committee for Standardization, Brüssel, November 2010
- [5] EN 15610 (2009): Bahnanwendungen – Geräuschemission – Messung der Schienenrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräusch, Europäisches Komitee für Normung, Brüssel, Mai 2009
- [6] Czolbe, C. (2020): Akustisch optimierte Schienenzwischenlage, Bericht Nr. 04-03-02153, PROSE AG, Winterthur
- [7] Gramowski, Christoph (2013): Gleisseitige Schallemission – Experimentelle Quantifizierung und Bewertung konstruktiver Massnahmen, Dissertation, TU Berlin, Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme, Berlin
- [8] Heckelmüller, H. / Kendl, F. / Krump, G. (2016): Entwicklung eines TDR Einzahlwertes zur Charakterisierung der dynamischen Steifigkeit des Oberbaus, DAGA 2016 Aachen
- [9] 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
- [10] Kneib, Guido (2020): Bestimmung der Schienenabklingrate zwischen Kerzers und Müntschemier, Bericht Nr. C90649/01, Müller-BBM Schweiz AG, Muttenz, 06. November 2020
- [11] 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
- [12] Nottbeck, Alexander B. (2016): Untersuchung zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken in Bestand, Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Verkehrswegebau
- [13] SBB IMS Infrastruktur (2020): Weisung FB 400-0507, Elastische Komponenten für Betonschwellen im Gleis: Zwischenlagen und Schwellenbesohlung
- [14] Thompson, David (2009): Railway Noise and Vibration. Mechanisms, Modelling an Means of Control, Elsevier
- [15] Venghaus, Helmut (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, Helmut (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] Wolfgang Fengler / Ulf Gerber (2014): Auslegung elastischer Zwischenlagen, Beeinflussung der Schleif- und Stopfzyklen durch elastische Zwischenlagen – Auswahl der Zwischenlagendicke in Abhängigkeit vom Material, EI – Eisenbahningenieur
- [18] Matthias Baeßler (2008): Lageveränderungen des Schottergleises durch zyklische und dynamische Beanspruchungen, Dissertation, TU Berlin

- [19] Freudenstein, Stephan (2012): Forschungsbericht 2885, Prüfung des Schienenbefestigungssystems W14 AT gemäss DIN EN 13481-2
- [20] Huber P. / Werner S. (2020): Forschungsprojekt hochdämpfende Zwischenlage, Schlussbericht, KPZ Fahrbahn AG, Zürich
- [21] Steiner, E. (2021): Effect of Repeated Loading on a High-Attenuation Rail Pad Prototype according to EN 13481-2:2012+A1:2017, Category C