

## **Verhältnismässigkeit von EKS-Massnahmen**

**Einordnung von Massnahmen zum Schutz vor Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall (EKS) an Eisenbahnlinien auf natürlichem Baugrund**

## Impressum



### Autoren

Roger Müller,  <https://orcid.org/0000-0001-5609-2045>

Yves Brechbühl,  <https://orcid.org/0009-0009-4104-6770>

Urs Schönholzer,  <https://orcid.org/0000-0001-4333-169X>

### Herausgeber

Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, <https://allianz-fahrweg.ch>

### ISBN

978-3-907456-02-6

### Lizenz

Solange nichts anderes angegeben ist, sind die Inhalte dieses Dokuments unter der Lizenz [CC-BY 4.0](#) freigegeben. Für die Nutzung von Teilen, die nicht der Allianz Fahrweg Normalspur gehören, kann die Erlaubnis des jeweiligen Rechteinhabers notwendig sein.

### Link

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456026.pdf>

### Zitierung

*Roger Müller, Yves Brechbühl, Urs Schönholzer, «Verhältnismässigkeit von EKS-Massnahmen», Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, 2025, ISBN 978-3-907456-02-6*

<https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456026.pdf>

### Version

1.1.0

### Interne Referenznummern

PRJ-100-087-201

FB 400-0602

## Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary .....	4
2	Ausgangslage & Ziel .....	6
3	Massnahmen an der Quelle .....	9
4	Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg .....	15
5	Massnahmen am Immissionsort .....	16
6	Übersicht der aktuell anwendbaren/nicht anwendbaren Massnahmen .....	17
7	Wirksamkeit der Massnahmen .....	19
8	Neubau oder Erneuerung, Anforderungen Bahnbetrieb .....	22
9	Verhältnismässigkeit .....	24
10	Fazit .....	30
11	Literaturverzeichnis .....	31

## 1 Management Summary

Für die Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Massnahmen zum Schutz vor Erschütterung und Körperschall aus dem Schienenverkehr fehlen in der Schweiz verbindliche gesetzliche Vorgaben. Bei der Beurteilung von Projekten im Rahmen von Plangenehmigungsverfahren von Normalspurbahnen haben sich seit Inkrafttreten des Umweltschutzgesetzes 1985 im Umgang der Bahnen mit den zuständigen Ämtern BAV und BAFU gewisse Usancen als sinnvoll erwiesen. So gibt es Massnahmen, die sich in der Vergangenheit in Bauprojekten konstant als klar nicht verhältnismässig erwiesen haben. Um die Planungskosten bei den Bahnen nicht unnötig zu steigern durch Expertisen von externen Ingenieurbüros zu Massnahmen, die ohnehin unverhältnismässig sind, wurden bisher gewisse theoretisch mögliche, aber teure Massnahmen jeweils im vornherein ausgeschlossen und in der Projektierung nicht vertieft untersucht.

Durch die in letzter Zeit gesteigerte Aufmerksamkeit hinsichtlich des Themas Erschütterungen gab es in Projekten verschiedentlich Diskussionen um Abklärungen zu sehr kostenintensiven Massnahmen mit erfahrungsgemäss schlechtem Kosten-/Nutzenverhältnis. Wie auch beim Thema Lärm wird der Nutzen nicht nur als Reduktion der Immission beziffert, sondern auch auf die Anzahl der davon profitierenden Personen bezogen. Ob eine Massnahme zwei oder zweihundert Personen schützt, ist relevant.

Das vorliegende Dokument dient als Leitfaden, damit im Rahmen von Projekten – für die Plangenehmigung und auch beispielsweise bei Einsprachen – unverhältnismässige Massnahmen ohne vertiefte Prüfung ausgeschlossen werden können und nur solche mit sinnvollem Kosten-/Nutzenverhältnis durch die Bahnen geprüft werden müssen. Damit wird der Schweizer Bundesverfassung (insbesondere Art. 5.2) bzw. dem Umweltschutzgesetz (Art. 17.1) Rechnung getragen. Die Betrachtung bezieht sich nur auf Projekte für Vollbahnen auf natürlichem Baugrund. In Tunneln sind die Zusatzkosten für Erschütterungsschutz gegenüber den übrigen Baukosten meist deutlich geringer als auf offener Strecke. Es gelten dort daher andere Massstäbe.

Die verschiedenen technischen Massnahmen zum Erschütterungsschutz werden im vorliegenden Dokument aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Verhältnismässigkeit für die Anwendung auf natürlichem Baugrund bewertet. Zusammengefasst ergibt sich folgendes Bild:

1. Massnahmen am Untergrund (inkl. Masse-Feder-Systeme) sind aufgrund der Kosten oder der geringen Wirksamkeit bei Neubau und Erneuerung fast nie verhältnismässig. Eine Ausnahme stellt der Betontrog mit Unterschottermatte im Rahmen eines Neubaus dar. Dieser Fall muss auf Verhältnismässigkeit geprüft werden.
2. Massnahmen am Unterbau (Unterschottermatten auf Asphalt-Tragschicht) müssen in den Projekten auf Verhältnismässigkeit geprüft werden.
3. Massnahmen am Oberbau (Schwellenbesohlung) sind praktisch immer verhältnismässig.
4. Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg (Bodenschlitz) sind teuer und wegen geringer Wirksamkeit mit dem heutigen Erfahrungsstand technisch nicht sinnvoll.
5. Ersatzmassnahmen am Immissionsort würden nachträglich in Gebäuden Dritter eingebaut und sind für die Bahnen als Bauherrn nicht praktikabel.

Das vorliegende Dokument wird bei der Erarbeitung von Projektunterlagen für die Prüfung der Verhältnismässigkeit als Praxisleitfaden der Bahnen dienen, bis verbindliche hoheitliche Vorgaben verfügbar sind.

Es sollen bei Projekten nur EKS-Massnahmen mit genügender technischer Reife und ausreichender Wirksamkeit geprüft werden (Stand 2026: Unterschottermatte mit Asphaltsschicht, steife Schwellenbesohlung. Bei Neubau: Schottertrog mit Unterschottermatte).

Experimentelle Massnahmen ohne gesicherte reproduzierbare Wirkung sind Teil der Forschung und Entwicklung, welche die Bahnbetreiber im Rahmen ihrer Möglichkeiten unterstützen, da Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht. Falls neue gesicherte Erkenntnisse vorliegen, werden die entsprechenden Massnahmen in künftige Versionen des vorliegenden Dokuments aufgenommen.

## 2 Ausgangslage und Ziel

### 2.1 Ausgangslage

Die Normalspurbahnen der Schweiz sind im Rahmen von Bauprojekten regelmässig mit Fragestellungen zum Schutz von bahnnahen Gebäuden vor Erschütterungen und Körperschall (EKS) konfrontiert. Der Schutz gegen EKS ist in der Schweiz nicht durch eine Verordnung geregelt. So gelten weiterhin die übergeordneten Grundsätze aus dem Umweltschutzgesetz (USG), das 1985 in Kraft gesetzt wurde. Das USG sagt aus, dass Massnahmen zum Schutz vor EKS, wie auch alle anderen Umweltschutzmassnahmen, verhältnismässig sein müssen<sup>1</sup>. Da diese Verhältnismässigkeit bezüglich EKS nicht weiter präzisiert wird, wie es beispielsweise für den Eisenbahnlärm im BGLE und in der VLE erfolgt ist, entsteht in der Praxis immer wieder die Diskussion, welche Massnahmen gegen EKS denn nun in Projekten als verhältnismässig angesehen werden sollen.

Die Bahnen sind bestrebt, den betroffenen Anwohnern möglichst wenig Immissionen zuzumuten. Das vorliegende Dokument soll einen Anhaltspunkt bieten, welche in der Praxis bewährten EKS-Massnahmen bestehen und welche ungefähren Kosten für diese Massnahmen anfallen. Je nach Anzahl Betroffener in Bahnnähe ergibt sich daraus abgeleitet die Verhältnismässigkeit. Die Verhältnismässigkeit wird über eine Analogie mit dem Eisenbahnlärm abgeschätzt.

Oberstes Ziel ist es immer, die Emissionen durch entsprechende Massnahmen an der Quelle (Emissionsort) gar nicht entstehen zu lassen. Falls dies nicht möglich ist, können Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg umgesetzt werden, um die entstandenen Emissionen nicht bei betroffenen Anwohnern ankommen zu lassen. Ist auch dies nicht möglich, gibt es Massnahmen am Immissionsort, um die störenden Auswirkungen innerhalb der betroffenen Gebäude zu minimieren.

### 2.2 Interaktion Rollmaterial-Infrastruktur

Die wahrnehmbaren Erschütterungen entlang von Eisenbahnstrecken entstehen im Kontakt von Rad und Schiene eines fahrenden Zuges. Sowohl das Rad als auch die Schiene haben gleichermaßen Einfluss auf diese Interaktion. Beim Rad sind die Einflussgrössen das Gewicht des Fahrzeugs an sich, die unabgefederte Radsatzmasse und der Radzustand (Radschäden, Flachstellen usw.). Trotz dieser Zusammenhänge macht der Gesetzgeber allein das Infrastrukturunternehmen für die Erschütterungen in bahnnahen Gebäuden verantwortlich. Es existieren heute auch keine gesetzlichen Anforderungen bezüglich Erschütterungen an das Rollmaterial im Neuzustand oder im Betrieb. Deshalb werden im vorliegenden Dokument Massnahmen am Rollmaterial nicht behandelt, obwohl diese sinnvoll sein können, wenn die Ursache und die effizientesten Massnahmen dort zu finden sind.

### 2.3 Abgrenzung

Das vorliegende Dokument betrachtet die Situation von EKS-Massnahmen auf natürlichem Baugrund («offene Strecke») im bebauten Gebiet. So sind beispielsweise Brücken nicht enthalten, Erdbauwerke wie Dämme werden hingegen berücksichtigt. EKS-Immissionen, die aus Tunneln an das umgebende Erdreich abgestrahlt werden und zu Immissionen in darüberliegenden Gebäuden führen, werden in der vorliegenden Betrachtung auch ausgeklammert, da dort andere Randbedingungen zu berücksichtigen sind. So sind Tunnel beispielsweise meist im Fels gebaut, und die Ausbreitung ist anders als im gewachsenen Boden auf offener Strecke.

---

<sup>1</sup> USG Art. 17.1: Wäre eine Sanierung nach Artikel 16 Absatz 2 im Einzelfall unverhältnismässig, gewähren die Behörden Erleichterungen.

## 2.4 Stand der Forschung und Stand der Technik

Die Bahnen haben in den letzten Jahrzehnten viel in Forschung und Entwicklung zur Minderung von EKS [1] investiert. Dabei gab es immer wieder erfolgreiche Massnahmen, aber auch Rückschläge. Der Stand der Forschung ist aber ein anderer als der Stand der Technik. In Projekten wird der Stand der Technik angesetzt, der aufzeigt, dass die Massnahme für verschiedene Situationen in der Praxis wirksam ist. Er beschreibt ebenso allfällige Einschränkungen des Anwendungsbereiches. Dies ist notwendig, um eine Kostenfolge von noch zu wenig erprobten Technologien zu vermeiden, die nach der Realisierung die ursprünglich angenommene Wirkung nicht erreichen. Massnahmen müssen sich in Projekten als geeignet und verhältnismässig erweisen, um dem Umweltschutzgesetz zu genügen.

Eine alternative Weise der Klassierung von Massnahmen ist der Technologie-Reifegrad.<sup>2</sup> Ab einem bestimmten Reifegrad werden neue Technologien in praktischen Anwendungsfällen erprobt, was unerlässlich ist, um Erfahrungen zu sammeln und Verbesserungen zu identifizieren. Solche Tests werden meist kommunikativ begleitet, um die Innovationskraft der beteiligten Unternehmen sichtbar zu machen und erhalten oft Resonanz in der Fachpresse. Solche Berichte lassen sich einfach im Internet finden. Einzelne Einbauten sind aber noch kein Garant für den nachhaltigen Erfolg und die Serienreife der Massnahme.

Im vorliegenden Dokument wird ausschliesslich der Stand der Technik vertieft behandelt. Die Aktivitäten zur Erprobung neuartiger Massnahmen werden getrennt betrachtet.

## 2.5 Verantwortung Dritter

Bei Neubauten in Bahnnähe, die dem längeren Aufenthalt von Menschen dienen, ist der EKS-Schutz seit Inkrafttreten des USG im Jahr 1985 in der Verantwortung der jeweiligen Bauherren und muss in der Planung entsprechend berücksichtigt werden. Bei den betroffenen Bauherren und ihren ausführenden Planern sind die Kenntnisse zu EKS jedoch sehr unterschiedlich. Die Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (SGEB) hat deshalb eine Broschüre zu deren Sensibilisierung entwickelt.

[https://www.baudyn.ch/download\\_file/view/380/191](https://www.baudyn.ch/download_file/view/380/191)

Die Stadt Bern hat Merkblätter für das «Bauen im erschütterungsbelasteten Gebiet» veröffentlicht:

<https://www.bern.ch/themen/umwelt-natur-und-energie/larm/downloads-und-links>

Der Kanton Zürich und der Kanton Aargau erklären die Situation jeweils auf ihrer Homepage:

<https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/laerm-schall/erschuetterungen.html>

<https://www.ag.ch/de/themen/umwelt-natur/laerm-schall/erschuetterungen-und-koerperschall>

## 2.6 Hoheitliche Arbeiten

Im Auftrag des BAFU wurde 2019 ein externer Bericht zur wirtschaftlichen Verhältnismässigkeit von EKS-Massnahmen erstellt [2]<sup>3</sup>. Das BAFU hat im Jahr 2023 einen Bericht<sup>4</sup> mit Fallbeispielen der SBB zusammenstellen lassen [3] mit dem Ziel, die favorisierte Methodik [2] zur Bestimmung der Verhältnismässigkeit weiter zu vertiefen. Diese erste Projektphase wurde bereits

<sup>2</sup> <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Projektfoerderung/Innovationen/Merkblatt-Technologiereifegrade.pdf>

<sup>3</sup> <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/lnG3jaRUUpKDU/wirtschaftliche-verhaeltnismaessigkeit-von-baulichen-massnahmen-gegen-erschuetterungen-und-abgestrahlten-koerperschall-im-schiienenverkehr.pdf>

<sup>4</sup> <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/arEB3h7v1KX2/wirtschaftliche-verhaeltnis-maessigkeit-von-baulichen-massnahmen-gegen-erschuetterungen-und-abgestrahlten-koerperschall-im-schiienenverkehr.pdf>

abgeschlossen. Es bedarf jedoch weiterer Arbeiten, bevor die Methode weit genug konkretisiert ist, um sie im Vollzug einzusetzen.

Das vorliegende Dokument soll bei der Erarbeitung von Projektunterlagen als Praxisleitfaden der Bahnen dienen, bis hoheitliche Vorgaben verfügbar sind.

## **2.7 Anwendungsbedingungen der Massnahmen**

Die im vorliegenden Dokument beschriebenen EKS-Massnahmen müssen in konkreten Projekten jeweils einzeln auf ihre Anwendbarkeit geprüft werden. Nicht alle Massnahmen können überall gleichermassen eingesetzt werden. Dies betrifft namentlich die Verhältnisse in Gleisbögen mit Überhöhung oder bei anderen spezifischen Trassierungsbedingungen. Die grundlegenden Erfordernisse an ein sicheres und gebrauchstaugliches Gleis können je nach örtlichen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen am Einsatzort die dort technisch möglichen Massnahmen und deren Wirkung entsprechend einschränken. Zum Beispiel muss beim Einsatz von elastischen Elementen (Zwischenlagen, Schwellensole, Unterschottermatten und dergleichen) mit geringen Steifigkeiten und damit grossem Federweg bei Zugüberfahrt den Aspekten betreffend übermässigen Schieneneinsenkungen und möglicher Schotterdestabilisierungen/-auflockerungen besonders Rechnung getragen werden. Nicht jede Massnahme ist überall technisch möglich oder verträglich für das Gleis. So darf beispielsweise nach AB-EBV die Schieneneinsenkung unter einer Achslast von 20 Tonnen im Allgemeinen nicht mehr als rund 2 mm betragen.

## 3 Massnahmen an der Quelle

### 3.1 Massnahmen am Untergrund

#### 3.1.1 Prinzipielle Funktionsweise

In Bereichen mit EKS-empfindlichen Böden bzw. Gebäuden muss die Ankopplung des Gleises an den Boden verändert werden, um die Abstrahlung der Energie in den Untergrund zu reduzieren. Dabei werden Massnahmen gemäss dem Masse-Feder-Prinzip umgesetzt. Deren Funktionsweise ist grundsätzlich immer gleich: Durch die fahrenden Züge wird eine Masse in Schwingung versetzt, welche die Energie aufnimmt. Diese Masse ist auf Federn isoliert gelagert, damit sich die Schwingungen nicht in den Untergrund ausbreiten können. Je nach Ausgestaltung und der benötigten Dämmung und Dämpfung sind unterschiedliche Bauformen möglich, abhängig von der Oberbauart. So gibt es für die Vollbahn die Oberbauarten Feste Fahrbahn (FF) und Schotteroberbau. Es existiert das Masse-Feder-System (MFS) und der Betontrog mit/ohne Unterschottermatte (UBM: «Under Ballast Mat»). Allen Varianten ist gemeinsam, dass ein definierter Unterbau in Form eines Betontrogs als Basis für das Gleis gebaut werden muss. Je nach Baugrund muss dieser Betontrog mit Pfählen tief im Erdreich auf der nächsten stabilen Felsschicht verankert werden, damit eine genügend hohe Steifigkeit in Längsrichtung erreicht wird.

Für die Anwendung in Tunneln sieht das Kosten-/Nutzenverhältnis für das MFS anders aus als im offenen Gleis, da im Tunnel der erforderliche Betontrog schon besteht und nicht als zusätzlicher massiver Kostenfaktor zu Buche schlägt.

Das Herzstück in der Weiche erzeugt punktuell störende Erschütterungen, die mit den gleichen EKS-Massnahmen wie für die normale Strecke reduziert werden können. Die konzeptionelle Überprüfung der Wirksamkeit der Massnahmen bei diesem komplexen Bauteil ist jedoch deutlich schwieriger. Sowohl in der Schweiz als auch auf internationaler Ebene konnten kaum Erfahrungen und Nachweise der Wirksamkeit für Massnahmen am Unterbau/Untergrund bei Weichen gesammelt werden. In einer frühen Planungsphase ist auch das Verschieben der Weiche an einen Ort ohne bahnahe Gebäude zu prüfen. Dies ist aber aus betrieblichen Gründen oft nicht möglich.

#### 3.1.2 Schweres Masse-Feder-System mit Fester Fahrbahn

Die Maximalvariante für die Erschütterungsminderung ist ein sogenanntes schweres MFS. Dabei wird in einem Betontrog eine Betonplatte auf elastischen Elementen gelagert. Auf dieser Betonplatte wird dann wiederum das Gleis als Feste Fahrbahn gebaut. In dieser Bauweise können die Dicke der Betonplatte und damit deren Gewicht und die schwingungstechnischen Eigenschaften der Federelemente in einem weiten Bereich frei gewählt werden. So ist eine individuelle Abstimmung auf die lokal zu schützenden Gebäude möglich.

**BEMERKUNG:** Aufgrund der Schallhärte einer Festen Fahrbahn wird gemäss Richtlinie Lärmschutz bei Eisenbahnanlagen (2023) eine Lärmzunahme von 3 dB definiert, was bei einer Linienquelle einer Verdoppelung des Schallpegels gleichkommt. Dies gilt für alle Varianten der Festen Fahrbahn.

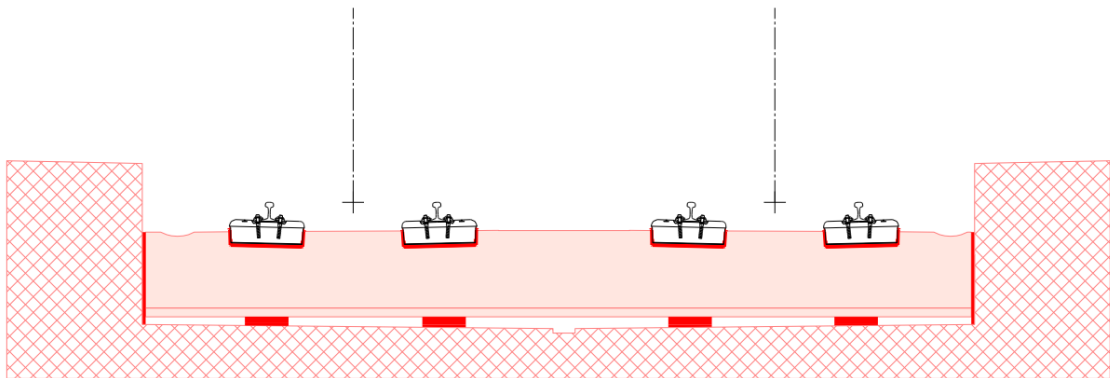


Abbildung 3.1: Prinzipdarstellung Schweres Masse-Feder-System mit Fester Fahrbahn. Die baulichen Elemente, die zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich sind, sind die elastischen Stützpunkte der Schwellen (rot, siehe auch 3.2), die Fahrbahnplatte (hellrot), die elastische Lagerung der Fahrbahnplatte (rot), die seitliche elastische Trennung der Fahrbahnplatte gegenüber dem festen Betontrog (rot) sowie der Betontrog an sich (rot schraffiert). Der Unterschied zu einem leichten Masse-Feder-System liegt in der Dimensionierung der Masse oberhalb der elastischen Lagerung sowie in der meist anders ausgestalteten elastischen Lagerung.

### 3.1.3 Leichtes Masse-Feder-System mit Fester Fahrbahn

Beim leichten MFS ist die Betonplatte von geringerer Mächtigkeit als beim schweren MFS und wird durch ein flächiges elastisches Element gelagert. Die Dämmwirkung ist wesentlich kleiner als beim schweren MFS.

### 3.1.4 Feste Fahrbahn mit elastischen Stützpunkten

Wenn die Erschütterungsminderung etwas weniger gross sein muss, um die erforderliche Wirkung zu erzielen, reicht es aus, wenn die einzelnen Stützpunkte des Schienenaufagers (z.B. die Schwellen) in der festen Fahrbahn elastisch gelagert werden. So werden die Schwingungen teilweise durch die Betonplatte der festen Fahrbahn ähnlich dem Schottertrog mit Unterschottermatte (3.1.6) gedämpft. Gleichzeitig wird mit den elastischen Stützpunkten sozusagen eine Etage höher als beim schweren MFS gedämpft, was baulich einfacher herzustellen ist. Zudem sind die aktiven Elemente so üblicherweise einfacher zugänglich für Unterhalt und Wartung. In der Schweiz kommen ausschliesslich Systeme mit elastischer Lagerung zum Einsatz.

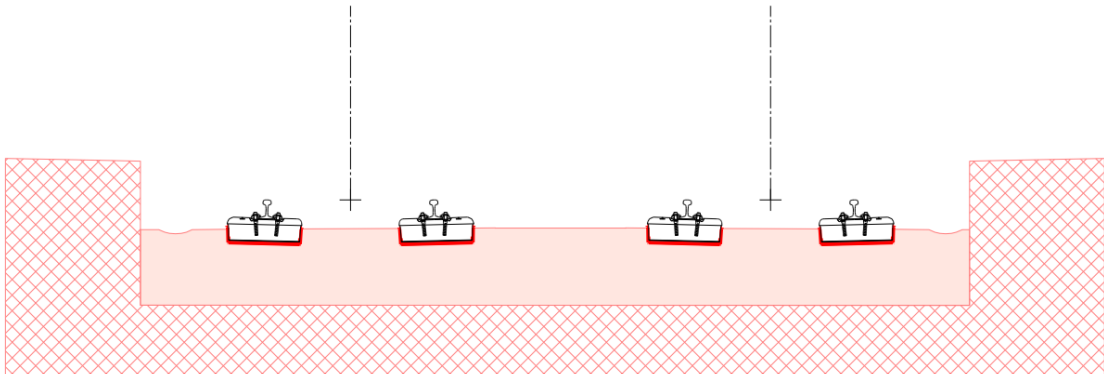


Abbildung 3.2: Prinzipdarstellung Feste Fahrbahn mit elastischen Stützpunkten. Die baulichen Elemente, die zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich sind, sind die elastischen Stützpunkte der Schwellenblöcke (rot), die Fahrbahnplatte (hellrot) sowie der Betontrug (rot schraffiert).

### 3.1.5 Elastisch gelagerter Schottertrog (MFS)

Der Vollständigkeit halber wird ebenfalls der elastisch gelagerte Schottertrog (MFS) erwähnt. Er besteht aus einem Betontrug auf natürlichem Boden, elastischen Elementen oberhalb dieses Betontrugs und einem weiteren, nunmehr elastisch gelagerten Betontrug, der mit Schotter gefüllt ist. Die Prinzipdarstellung in Abbildung 3.1 kann dazu betrachtet werden, aber die Fahrbahnplatte (hellrot) als Gesamtes ist als Schottertrog analog zu Abbildung 3.3 ausgestaltet, ohne die dort dargestellte Unterschottermatte.

### 3.1.6 Schottertrog mit Unterschottermatte

Je nach Anwendung ist es auch möglich, auf den Bau einer Festen Fahrbahn zu verzichten und einen regulären Schotteroberbau als Masse für das Masse-Feder-System zu verwenden. Der Betontrug (oder Betonplatte, Bodenversteifung) wird mit Unterschottermatten (UBM, under ballast mat) ausgekleidet, welche die Feder bilden. Anschliessend wird Schotter eingefüllt und normale Schwellen werden eingebaut. Die Masse des Schotteroberbaus pro Längeneinheit ist durch die Bauform gegeben und nicht justierbar wie beim MFS mit einer Fahrbahnplatte.

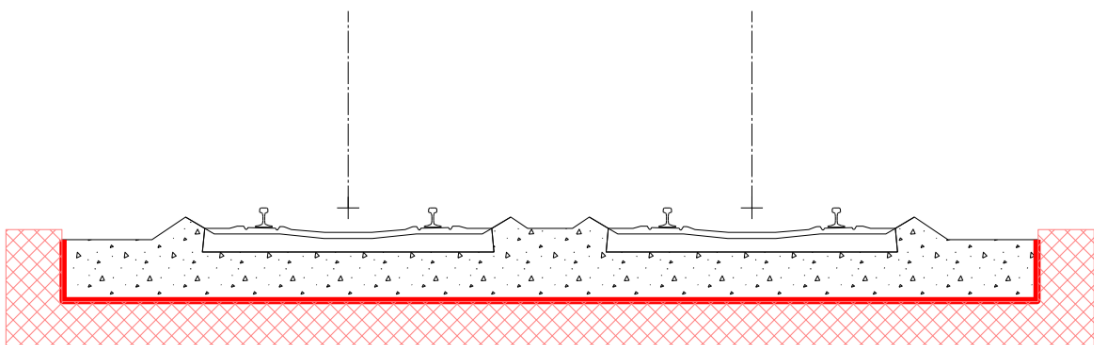


Abbildung 3.3: Prinzipdarstellung Schottertrog mit Unterschottermatte. Die baulichen Elemente, die zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich sind, sind die Unterschottermatte (rot) sowie der Betontrug (rot schraffiert).

### 3.1.7 Schottertrog mit Schwellenbesohlung statt Unterschottermatte

Es ist auch möglich, auf eine UBM zu verzichten und die in den Boden abgestrahlten Erschütterungen ohne elastische Lagerung über die hohe Längssteifigkeit und die Masse eines Betontrogs mit Schotteroberbau (oder Betonplatte, Bodenversteifung) zu reduzieren. Die steife Schwellenbesohlung soll den Schotter schonen und damit eine weitere EKS-Reduktion bewirken. Der Löwenanteil der Kosten wird durch den notwendigen Betontrug an sich generiert, der Aufpreis für den Einbau einer steifen USP oder einer UBM (siehe 3.1.5) ist vor diesem Hintergrund meist vernachlässigbar.

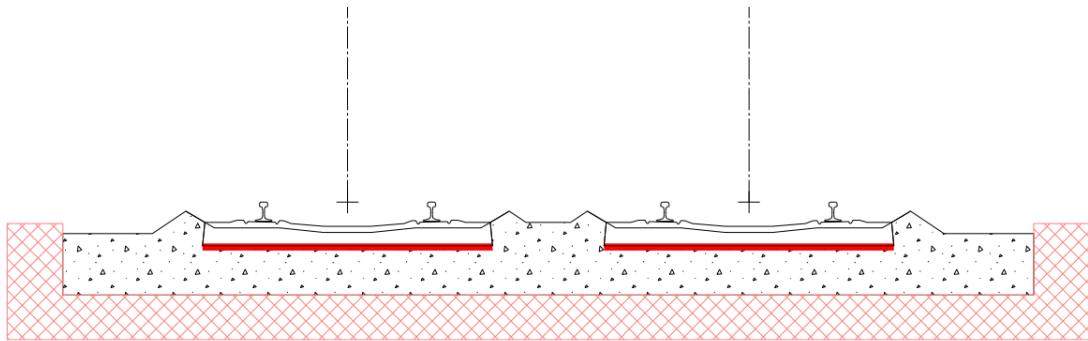


Abbildung 3.4: Prinzipdarstellung Schottertrog mit Schwellenbesohlung. Die baulichen Elemente, die zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich sind, sind die steife Schwellenbesohlung (rot) sowie der Betontrug (rot schraffiert).

### 3.1.8 Bauliche Randbedingungen für Massnahmen am Untergrund

Die in den oben beschriebenen Massnahmen schematisch gezeichneten Betonkonstruktionen entfalten ihre Wirkung als EKS-Massnahme dadurch, dass sie dem Gleis eine deutlich höhere Längssteifigkeit verleihen. So wird die durch die Schienenfahrzeuge eingetragene Energie über eine deutlich grössere Fläche abgeleitet und somit lokal reduziert. Deswegen ist die Steifigkeit der Konstruktion in Längsrichtung ein zentraler Faktor der Konstruktion (abhängig u.a. von der Mächtigkeit der Betonplatte). Dies erfordert den Bau der Betonplatte an Ort mit entsprechend durchgehender Armierung über das ganze Bauwerk, so dass Risse überbrückt werden können. Der Einsatz aneinandergereihter vorgefertigter Betonelemente mit Fugen quer zur Gleisachse ist bei EKS-Massnahmen nicht zielführend.

## 3.2 Massnahmen am Unterbau: Unterschottermatte

Die Kosten können im Vergleich zu den Massnahmen am Untergrund drastisch reduziert werden, sobald auf den Betontrug als definierten starren Unterbau verzichtet werden kann. Bei dieser Lösung werden die mechanischen Eigenschaften des Untergrundes nicht verändert. Auf das bestehende Erdreich wird eine definierte Unterlage aus Asphalt aufgebracht, vergleichbar mit dem Aussehen einer Strasse. Auf diese Asphalt-Tragschicht (AC-Rail) wird eine Unterschottermatte verlegt, auf welche das Schottergleis gebaut wird. Das System ist vom Aufbau her vergleichbar mit einem Schottertrog mit UBM, jedoch ohne die durch den Betontrug generierte Längssteifigkeit. Bei dieser Variante muss üblicherweise noch eine seitliche Schotterhalterung gebaut werden, um ein mögliches Wegfliessen des Schotters aufgrund von Resonanzeffekten bei Zugsüberfahrt zu verhindern.

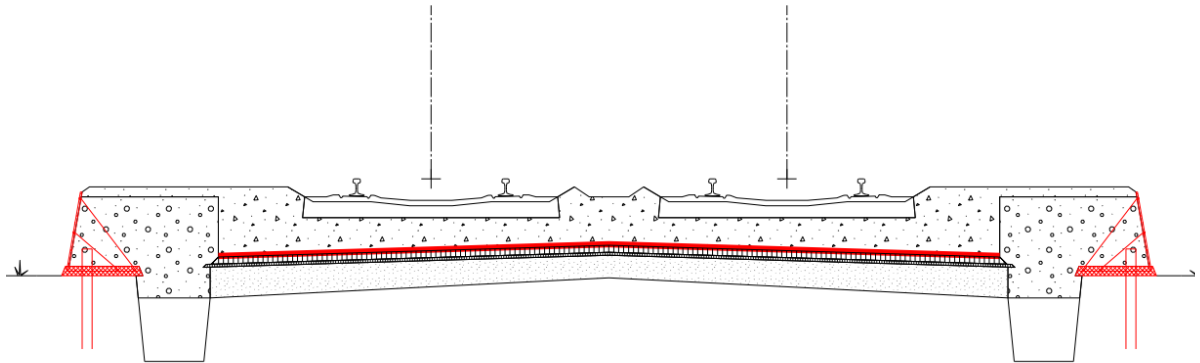


Abbildung 3.5: Prinzipdarstellung Unterschottermatte mit Schotteroberbau. Die baulichen Elemente, die zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich sind, sind die Unterschottermatte (rot) und eine seitliche Schotterhalterung zur Verhinderung von Schotterfließen (hellrot).

### 3.3 Massnahmen am Oberbau: Schwellenbesohlung

Noch kostengünstiger ist eine Massnahme an der Quelle, wenn eine Optimierung der Lagerung der Schwelle<sup>5</sup> im Schotter ausreicht, um die Erschütterungen wirksam zu reduzieren. Dabei werden Betonschwellen auf ihrer Unterseite mit einer elastischen Schicht versehen, die als Schwellenbesohlung (USP) bezeichnet wird. Im Gegensatz zu allen obenstehenden Massnahmen kann dies auch nachträglich mit einem Schwellenwechsel geschehen und erfordert einen vergleichsweise kleinen Eingriff in den Bahnbetrieb.

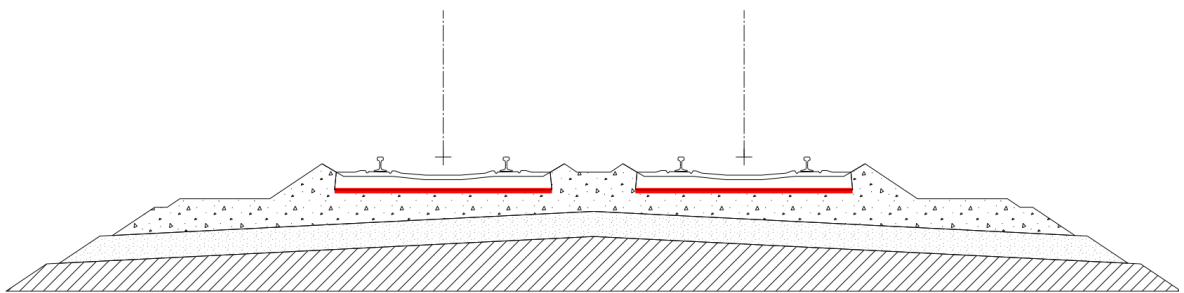


Abbildung 3.6: Prinzipdarstellung Schwellenbesohlung. Das bauliche Element, das zur Entfaltung der physikalischen Dämmwirkung erforderlich ist, ist die Schwellenbesohlung (rot).

<sup>5</sup> Es ist auch denkbar, die elastische Lagerung bei der Zwischenlage anzubringen. Jedoch wird die elastische Einsenkung der Schiene erhöht gegenüber einer Schwellenbesohlung mit etwa gleicher EKS-Wirksamkeit, und es werden kostenintensive Schienenbefestigungen benötigt. Zusätzlich kann es zu Problemen in der Schiene führen und zu zusätzlichem Lärm. Deshalb ist diese Massnahme nur für den Tunnel anwendbar.

### **3.4 Weichen: Bewegliches Herzstück**

Bei normalen Weichen stellen die beiden beweglichen Zungen den Fahrweg des Fahrzeugs ein, entweder geradeaus oder über die Ablenkung. Das Herzstück, dort wo sich die Schienen durchschneiden, ist starr ausgeführt. Für Schnellfahrweichen wird zusätzlich zu den beweglichen Zungen auch ein Teil des Herzstücks beweglich ausgeführt. Dies geschieht, weil dort durch die notwendige gestreckte Geometrie für die hohen Fahrgeschwindigkeiten die Durchschneidung beider Gleise unter einem sehr flachen Winkel geschieht. Bei einer konventionellen Bauweise führt dies zu einer hohen Beanspruchung und zu hohem Verschleiss der Herzstückspitze. Deswegen werden diese Weichen mit beweglicher Herzstückspitze ausgeführt, um den Verschleiss zu minimieren. Das zusätzliche bewegliche Teil hat aber hohe Kosten zur Folge, namentlich für die notwendigen Anpassungen an der Sicherungstechnik im Stellwerk. Es braucht zusätzliche Einrichtungen, die sicherstellen, dass die Zungen und das bewegliche Herzstück immer in die gleiche Richtung weisen, um die Sicherheit gegen Entgleisen zu gewährleisten.

Als Massnahme gegen Erschütterungen auf dem Netz im konventionellen Geschwindigkeitsbereich bis 160 km/h sind Weichen mit beweglichem Herzstück aufgrund der Auswirkungen auf die notwendige Sicherungstechnik unverhältnismässig.

### **3.5 Übergänge und Länge von Massnahmen**

#### **3.5.1 Übergänge zum Gleis auf natürlichem Baugrund**

Die Übergänge vom Gleis auf natürlichem Baugrund ohne EKS-Massnahme auf eine der oben beschriebenen Varianten sind technisch anspruchsvoll. Diese Übergänge sind wartungsintensiv, da sich die elastischen Eigenschaften unter dem fahrenden Zug ändern und dies im Betrieb zu Abnutzung und schliesslich zu Schäden führt. Durch die technisch sinnvolle Ausgestaltung der Übergänge mit den notwendigen Gradienten in der Steifigkeit, um Sprünge zu verhindern, verlängert sich die notwendige bauliche Massnahme im Gleis deutlich, was neben dem erhöhten Unterhalt auch zu höheren Baukosten führt.

Die Regeln für die Gestaltung von Übergängen stammen aus gesammelter Erfahrung und aus internationalen Normen (SN EN 16432). So ist es technisch notwendig, die einzelnen Zonen der Übergangsbereiche auf einer Länge zu bauen, die einer Fahrzeit von mindestens 0,5 Sekunden entspricht. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h entspricht dies einer Länge von 14 m. Bei höheren oder tieferen Geschwindigkeiten verändert sich die erforderliche Länge entsprechend linear. Die Einsenkung des Gleises soll sich an einem dieser Übergänge zudem nicht um mehr als 0,5 mm ändern, um eine gleichmässige Zunahme der Einsenkung zu erreichen und Unstetigkeiten zu vermeiden. Falls beispielsweise ein MFS zu einer zusätzlichen Einsenkung von 2 mm führt und die Streckengeschwindigkeit 120 km/h beträgt, erfordert dies auf beiden Seiten des MFS je einen Übergangsbereich von  $3 \times 17 \text{ m} = 51 \text{ m}$  Länge. Durch die kleinräumigen Baulängen der einzelnen unterschiedlichen Steifigkeitsklassen liegen die in den Übergangsbereichen anfallenden Laufmeterkosten im Bereich der Massnahme an sich.

#### **3.5.2 Länge der Massnahme**

Die unerwünschten Schwingungen im Boden breiten sich nicht nur genau rechtwinklig zum Gleis aus. Deswegen reicht eine Massnahme direkt vor dem Gebäude nicht aus. Die erforderliche Länge ist auf jeder Seite um typischerweise 25 m zu verlängern, um eine ausreichende Wirkung am baulichen Ende der Gebäude zu erzielen.

Die gesamte Länge der EKS-Massnahme ist nachfolgend exemplarisch an einem Beispiel zusammengestellt.

Massnahme mit 2 mm zusätzlicher Einsenkung (drei Übergangsbereiche auf jeder Seite), Streckengeschwindigkeit 100 km/h, zu schützende Gebäude von 100 m Länge.

Die Baulänge für 100 m zu schützende Gebäude beträgt 250 m, siehe auch Abbildung 3.5.

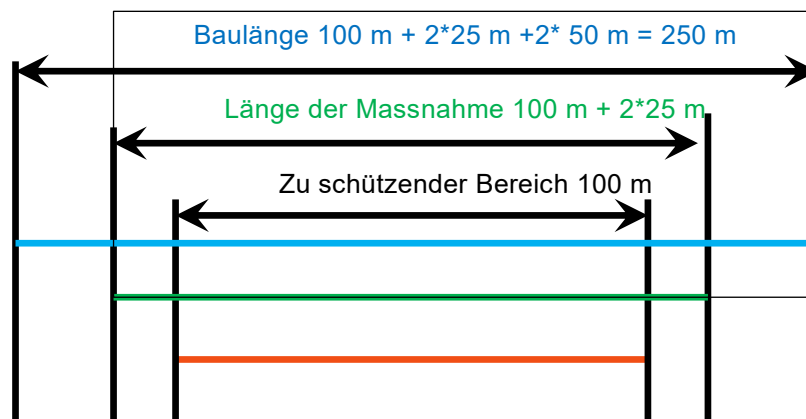


Abbildung 3.5: Beispiel der Gesamtlänge einer Massnahme am Untergrund.

## 4 Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg

### 4.1 Generelles

Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg können heute durch stark widersprüchliche Erfahrungen in realisierten Projekten nicht als Stand der Technik angesehen werden. Durch ihre technischen Unsicherheiten werden diese Massnahmen im Rahmen des vorliegenden Dokumentes der Vollständigkeit halber kurz erwähnt, aber nicht weiter behandelt. Die Bahnen beobachten die Situation im Rahmen der Forschung, für Projekte sind diese Massnahmen aber nicht anwendbar.

### 4.2 Bodenschlitz

Sind Massnahmen an der Quelle nicht möglich, kann die Ausbreitung der Erschütterungswellen aus dem Gleisbereich unterbunden werden. Das geschieht, indem der Transmissionsweg im Boden mit einem Bodenschlitz unterbrochen wird. Dabei wird parallel zum Gleis ein langes, schmales und tiefes Loch gegraben. Idealerweise bleibt es leer, alternativ wird es mit geeignetem Material verfüllt. So können sich die Wellen im Boden nicht vom Gleis weg ausbreiten, beispielsweise in ein bahnahes Gebäude. In der Theorie ist diese Massnahme eine sehr wirksame Lösung. Die Praxis zeigt ein anderes Bild. Der Bodenschlitz ist nur effektiv, wenn der Ausbreitungsweg der Wellen komplett unterbrochen wird. Das kann einen sehr tiefen Bodenschlitz bedingen (10 m Tiefe oder mehr). Die Kosten dieser Massnahme steigen mit der Tiefe überproportional an. Die Gefahr besteht, dass für erhebliche Kosten ein nicht tief genug ausgehobener und somit nicht wirksamer Bodenschlitz gebaut wird.

### 4.3 Metamaterialien und andere (Wave Impedance Blocks)

Es gibt Grundlagenversuche, die Ausbreitung von Erschütterungswellen durch regelmässig platzierte Fremdkörper oder durch auf dem Boden platzierte grosse Massen zu beeinflussen. Dabei spricht man von Metamaterialien. Diese Techniken sind aber noch weit von einer Serienreife entfernt, insbesondere die Wirksamkeit ist unsicher. Sie zeichnen sich oft durch einen relativ grossen

Flächenbedarf seitlich der Bahnlinie aus, was in der Schweiz kaum je vorhanden ist, um bahnahe Gebäude zu schützen.

## **5 Massnahmen am Immissionsort**

### **5.1 Vergleich Lärm**

Im Vergleich zum Lärm, wo durch das Öffnen eines Schallschutzfensters die Wirkung des Lärmschutzfensters aufhört, ist normalerweise die Wirkung einer EKS-Massnahme am Immissionsort dauerhaft.

### **5.2 Neubau**

Beim Neubau von Gebäuden nahe der Bahn kann auch am Gebäude das Prinzip des Masse-Feeder-Systems angewandt werden. Dabei wird beim Bau das gesamte Gebäudefundament elastisch gelagert und das ganze Gebäude wirkt anschliessend selbst als Masse. So können Erschütterungen und Körperschall wirksam gedämmt werden.

Für die Massnahme und Kostenübernahme ist der Bauherr verantwortlich (siehe USG Art. 21). Diese Massnahme wird in diesem Bericht nicht weiter behandelt.

### **5.3 Nachträglich zu bauende Massnahmen**

Massnahmen am Immissionsort sind immer Einzelfälle in Projekten der Bahnen, da sie das Einverständnis für einen Eingriff in Eigentum Dritter bedingen.

#### **5.3.1 Schwingungstechnische Abstimmung (Erschütterungen und Körperschall)**

In jedem Gebäude gibt es charakteristische Eigenfrequenzen von Holz- oder Betondecken, je nach Bauform. Je nachdem ist es möglich, auftretende Schwingungsmoden zu beeinflussen und störende Effekte (Resonanzphänomene) zu reduzieren. Beim Aufenthalt im Bereich von Schwingungsknoten wird die von den Bewohnern empfundene Immission reduziert. Durch Platzieren von Möbelstücken im Bereich von Schwingungsmaxima kann insbesondere bei Holzdecken teilweise eine Dämpfung erzielt werden. Dasselbe kann durch eine Versteifung von Decken in Stockwerken erreicht werden. Die Elemente des Gebäudes werden dabei verstimmt und eine Resonanz mit den Erschütterungen des Schienenverkehrs wird verhindert bzw. minimiert.

#### **5.3.2 Massnahmen an empfindlichen Stellen (Erschütterungen)**

Lokal ist es in Gebäuden auch möglich, beispielsweise empfindliche Maschinen oder Möbel elastisch zu lagern, um unerwünschte Schwingungen zu dämpfen. Es ist auch möglich, empfindliche Zimmer mittels eines speziell elastisch abgestimmten schwimmenden Bodens zu schützen. Meistens wird dabei jedoch der Boden erhöht (die Raumhöhe wird verkleinert) und dadurch die Funktionsfähigkeit der Türen durch den Einbau beeinträchtigt.

#### **5.3.3 Nachträglicher Einbau elastischer Lagerung des Gebäudes**

Es wurde auch bereits angedacht, bestehende Gebäude nachträglich elastisch zu lagern, indem ein elastisches Material in den tragenden Wänden im Kellergeschoss eingefügt wird. Das Verfahren ist jedoch bezüglich seiner baulichen Machbarkeit an einem bestehenden Gebäude sehr unsicher und sehr aufwändig.

## 6 Übersicht der aktuell anwendbaren/nicht anwendbaren Massnahmen

Massnahmentyp (M)	Bemerkungen zur Anwendbarkeit	anwendbar?
<b>Emission</b>		
1. Schweres MFS bei FF	Die Kosten sind unverhältnismässig hoch. MFS und Systemwechsel Schotter/Feste Fahrbahn (inkl. EKS-Schutz) nicht etabliert.	Nein
2. Leichtes MFS bei FF	Die Kosten sind zu hoch (siehe M1). MFS und Systemwechsel Schotter/Feste Fahrbahn (inkl. EKS-Schutz) nicht etabliert.	Nein
3. FF mit elastischen Stützpunkten	Wirkung für EKS ist noch nicht validiert. Systemwechsel Schotter/Feste Fahrbahn für EKS-Schutz nicht etabliert. Es ist eine Lärmerhöhung zu erwarten.	Nein
4. Elastisch gelagerter Schottertrog	Keine Erfahrungen vorhanden.	Nein
5. Schottertrog (oder Betonplatte, Bodenversteifung) mit UBM	Wirksamkeit nur in gewissen Frequenzen bei vorhandenem weichem Boden. Kosten sind unverhältnismässig hoch. <b>Nur Neubau:</b> weil lange Sperrung nötig.	Nein <b>Ja für Neubau</b>
6. Schottertrog (oder Betonplatte, Bodenversteifung) ohne UBM, mit steifer USP	Trog verursacht mehr Körperschall, deshalb ist auf UBM, bzw. steife USP, nicht zu verzichten. Lange Totalsperre nötig.	Nein
<b>7. Unterschottermatte mit Asphalt-schicht (AC-Rail)</b>	<b>Die Wirkung entfaltet sich nicht über den gesamten Frequenzbereich (nur KS).</b>	<b>Ja</b>
<b>8. Schwellenbesohlung, USP steif</b>	<b>Die Wirkung entfaltet sich über den gesamten Frequenzbereich (E+KS).</b>	<b>Ja</b>
9. Schwellenbesohlung, USP soft	In der Schweiz ist eine Lärmerhöhung der soft USP gegenüber dem Standardoberbau festzustellen -> nicht anwendbar. Zudem Sicherheitsbedenken durch Schotterfliessen.	Nein
<b>Transmission</b>		
10. Bodenschlitz	Kosten hoch und Wirkung meistens klein.	Nein
<b>Immission</b>		
11. Schwingungstechnische Abstimmung Decken	Kaum Erfahrung in der Schweiz. Nicht Stand der Technik und z.T. massiver Eingriff auf Nutzbarkeit des darunter liegenden Raumes.	Nein
12. Massnahmen an empfindlichen Stellen	Schwimmender Boden: Stand der Technik. Machbarkeit jedoch unklar, z.B. bzgl. erhöhter Bodenfläche. Kosten unklar.	Nein
13. Nachträglicher Einbau elastischer Lagerung unter dem Gebäude	Machbarkeit unklar: nicht Stand der Technik. Kosten unverhältnismässig.	Nein

Tabelle 6.1: Übersicht der aktuell anwendbaren/nicht anwendbaren EKS-Massnahmen für Vollbahnen auf natürlichem Baugrund.

In Tabelle 6.1 wird die Massnahmenübersicht aus den Kapiteln 3 bis 5 dargestellt und auf Anwendbarkeit für Erschütterungsprojekte bei Eisenbahnen auf natürlichem Baugrund bewertet, Stand Februar 2026. Die Anwendbarkeit ist dadurch definiert, dass die Massnahme dem Stand der Technik für die spezifische schweizerische Situation der Vollbahnen gilt. Die zu prüfenden Massnahmen in Projekten sind fett markiert. Für die Projektierung muss zwischen EKS-Massnahmen für das Gleis bzw. für die Weiche unterschieden werden. Bei der Weiche ist insbesondere das Herzstück (Punktquelle) die Hauptursache für die Störwirkung.

## 7 Wirksamkeit der Massnahmen

Die Wirksamkeit der im Fokus stehenden anwendbaren Massnahmen wird in den folgenden drei Unterkapiteln 7.1 bis 7.3 dargestellt. Massnahmen mit Unklarheiten bezüglich deren Wirksamkeit können im Bericht [1] nachvollzogen werden. Es handelt sich im vorliegenden Kapitel um typische Daten von Freifeldmessungen (Emission).

Für Abklärungen in Projekten liegen üblicherweise konkrete Messdaten für repräsentative Gebäude vor, die verwendet werden können (Immission), deshalb sind die Angaben für VIBRA-1 Parameter nur indikativ für eine mögliche erste Abschätzung.

### 7.1 Unterschottermatten mit AC-Rail als Schutz vor Körperschall

In der Schweiz werden aus verschiedenen technischen Überlegungen überwiegend UBM mit  $c_{dyn}=0.08 \text{ N/mm}^3$  für den EKS-Schutz eingebaut. Die Hintergründe wurden im Rahmen einer internationalen Studie durch die UIC ermittelt [UIC Report: «Under Ballast Mats (UBM): Insertion Loss», 8.4.2008, Berne, unpublished].

Aus den empirischen Untersuchungen hat die SBB folgende Dämmwirkungswerte generiert [4], siehe Tabelle 7.1:

$C_{dyn}^6$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$C_{stat}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
$\approx 0.08$	0.06	0	0	0	-0.5	-0.8	2.5	5.4	10	13	13	13

Tabelle 7.1: Wirksamkeit<sup>7</sup> von Unterschottermatten mit  $c_{dyn}\approx 0.08 \text{ N/mm}^3$ , steifer Untergrund<sup>8</sup>: Wirksamkeit pro Terzband (in dB), offene Strecke. Werte kleiner als Null bedeuten eine Verstärkung und grösser Null eine Verminderung der Erschütterungen. +6 dB (Dezibel) entsprechen einer Reduktion der Erschütterungen um Faktor 2.

Aufgrund der EKS-Messungen im Gebäude und der Anwendung der Terzbandspektren gemäss Tabelle 7.1 kann die EKS-Wirksamkeit der UBM für das Projekt berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass es je nach Gebäude durch eine Resonanzwirkung der Terzbänder mit Verstärkung (negative Werte in der Tabelle) zu einer Verstärkung der Erschütterung (12 bis 50 Hz) kommt, welche die positiven Effekte der UBM im Körperschall (50 bis 125 Hz) in der Gesamtbetrachtung überlagern kann.

Wenn noch keine Messungen vorliegen, kann mit der VIBRA-1 Rechnung eine erste Abschätzung der EKS-Wirksamkeit der UBM vorgenommen werden:

Erschütterungswirkung («Terzband 32 Hz»): 0 dB.

Körperschallwirkung («Terzband 63 Hz»): 10 dB.

<sup>6</sup> Laborwerte Vorlast 0,06 N/mm<sup>2</sup>, bei 20 Hz – FP (Flat Plate).

<sup>7</sup> Werte aus Studie UIC zu Wirksamkeiten von UBM von 2008 leicht angepasst.

<sup>8</sup> Der Untergrund soll mit  $M_{E1} \geq 75 \text{ MN/m}^2$  gut verdichtet sein und als steif betrachtet werden (Erfahrung NBS Rothrist). Die Verdichtung des Untergrundes soll, wenn möglich,  $M_{E2}/M_{E1} \leq 2,5$  erfüllen. Ein «weicher Untergrund» unter der AC-Rail und unter der Fundationsschicht wird bis auf weiteres nicht mit reduzierten Wirksamkeiten ausgewiesen. Denn die Datengrundlage für eine Validierung ist noch ungenügend. Es ist u.a. auch noch nicht untersucht, wie die verbesserte Verdichtung des oberen Teils des Untergrundes und die AC-Rail die Planiesteifigkeit von «weichem Untergrund» erhöht.

## 7.2 Steife Schwellenbesohlung als Schutz gegen Erschütterungen und Körperschall

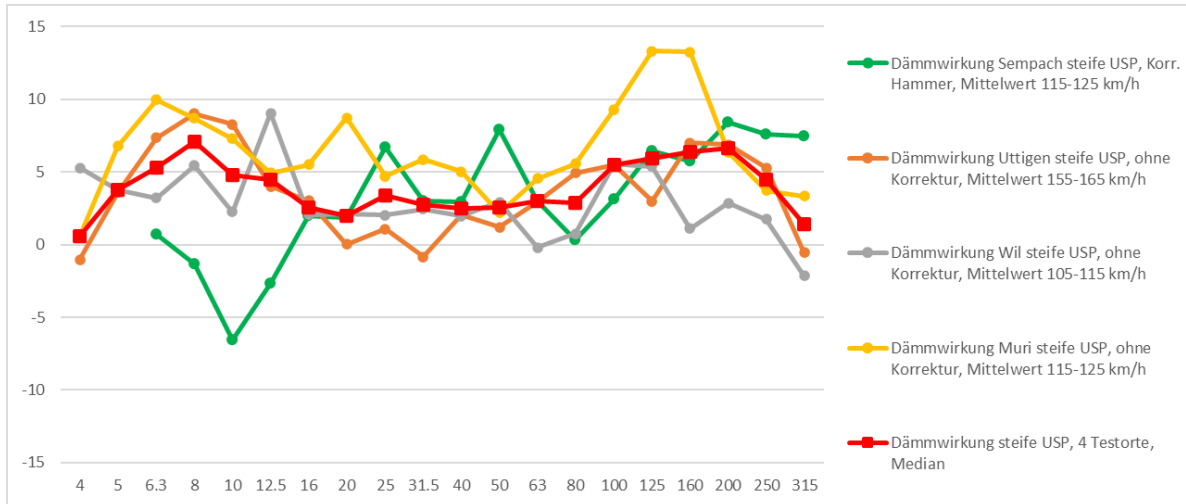


Abbildung 7.1: Mittelwerte der Differenzspektren für Sempach, Uttigen, Wil und Muri in 8 m Distanz (Sempach enthält 8 m, 16 m, 24 m) für steife USP für Züge mit verschiedenen Fahrgeschwindigkeitsbereichen. Mittelwert als Median der Dämmwirkung der steifen USP über alle vier Messstandorte. Werte kleiner als Null bedeuten eine Verstärkung und grösser als Null eine Verminderung der Erschütterungen. +6 dB (Dezibel) entsprechen einer Reduktion der Erschütterungen um Faktor 2, +3 dB reduzieren um rund einen Faktor 1,4.

Die Abbildung 7.1 aus [5] enthält Dämmwirkungen für die steife Schwellenbesohlung. Insbesondere interessiert die rote Linie, die dem Median der vier Standorte entspricht. Es ist zu beachten, dass nur für die Dämmwirkungsberechnung in Sempach Korrekturen vorgenommen wurden. Aus den Messungen ergibt sich folgende Dämmwirkung in Tabelle 7.2:

5	6.3	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
3.8	5.3	7.1	4.8	4.5	2.5	2.0	3.4	2.7	2.5	2.6	3.0	2.9	5.5	5.9

Tabelle 7.2: Wirksamkeit von steifer USP pro Terzband (in dB), offene Strecke.

Wenn noch keine Messungen vorliegen, kann mit der VIBRA-1 Rechnung eine Abschätzung der EKS-Wirksamkeit der steifen USP vorgenommen werden:

Erschütterungswirkung beim Terzband 32 Hz: 2,5 dB.

Körperschallwirkung beim Terzband 63 Hz: 3,0 dB.

### 7.3 Schottertrog mit UBM gegen Erschütterungen

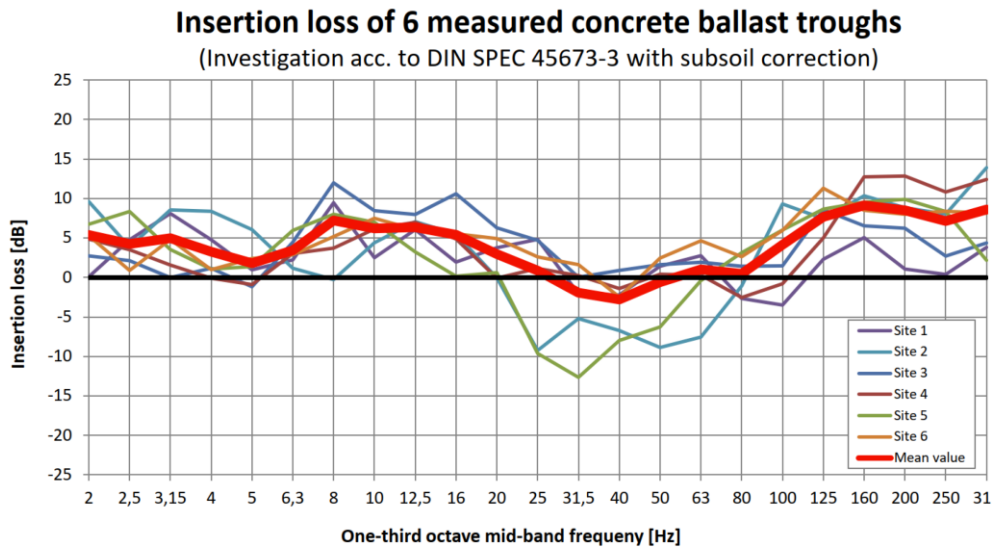


Abbildung 7.2: Gemessene Einfügedämmungen an sechs Standorten mit Betontrög (Sohldicke 0,5 – 0,6 m) und UBM, inkl. Bodenkorrekturen [6].

Die Abbildung 7.2 aus [6] enthält Dämmwirkungen für den Schottertrog mit UBM. Insbesondere interessiert die rote Linie, die dem Mittelwert der sechs Standorte entspricht. Es ist zu beachten, dass für die Dämmwirkungsberechnung Bodenkorrekturen vorgenommen wurden. Zu erkennen ist, dass von 25 Hz bis 80 Hz eher von einer Verstärkung der EKS als von einer Abnahme auszugehen ist. Eine Dämmwirkung des Schottertrogs ist von etwa 3 bis 6 dB zwischen 6,3 – 20 Hz zu erreichen. Die Tabelle 7.3 enthält die Massnahmenwirkung. Zu beachten: Bei der Massnahme Bodenversteifung gibt es noch zu wenig Messungen für eine Bestimmung der Wirksamkeit.

6.3	8	10	12	16	20	25	32	40	50	63	80	100	125
3.5	6.5	6	6	5	3	0	-2	-3	0	0.5	0.5	4	8

Tabelle 7.3: Wirksamkeit von Schottertrog mit UBM pro Terzband (in dB), offene Strecke, weicher Untergrund<sup>9</sup>.

Es ist zu vermuten, dass je härter der Untergrund ist, die Wirksamkeit des Schottertrogs stark abnimmt, und die Werte der Tabelle 7.3 entsprechend reduziert werden sollten<sup>10</sup>. Hierzu fehlen Messuntersuchungen an Objekten und die dazugehörige Bewertung (Verifikation) mit entsprechenden Modellen. Grundsätzlich ist deshalb die Massnahme Schottertrog mit UBM vorsichtig und nur bei weichen Böden einzusetzen, und wenn die Probleme primär bei  $\leq 20$  Hz auftreten.

Wenn noch keine Messungen vorliegen, kann mit der VIBRA-1 Rechnung eine Abschätzung der EKS-Wirksamkeit des Schottertrogs mit UBM vorgenommen werden:

Erschütterungswirkung beim Terzband 32 Hz: 0 dB.

Körperschallwirkung beim Terzband 63 Hz: 0,5 dB.

<sup>9</sup> Der Untergrund bei den sechs getesteten Standorten ist aufgrund der Berichte nicht geklärt. Wegen der schlechten Dämmwirkung der UBM bei 63 und 80 Hz ist davon auszugehen, dass der Boden unter dem Schottertrog ziemlich weich ist.

<sup>10</sup> Modellrechnungen in Norbert Breitsamer: «Zur erschütterungsmindernden Wirkung von Betontrögen mit Schotteroberbau auf Unterschottermatte», DAGA München, 2018.

## 8 Neubau oder Erneuerung, Anforderungen Bahnbetrieb

### 8.1 Neubau

Unter Neubau wird im vorliegenden Dokument die Erstellung einer Bahnlinie verstanden, die komplett unabhängig von der in Betrieb befindlichen Bahnanlage gebaut werden kann. Sämtliche Bauarbeiten können ohne Einfluss auf den bestehenden Bahnbetrieb ausgeführt werden und es ist kein Bahnersatzverkehr notwendig. Dies ist in der Schweiz eher selten der Fall, zuletzt für den Bau der langen Tunnel im Rahmen der Neuen Alpentransversalen (NEAT).

### 8.2 Erneuerung und Umbau

Sobald der fahrplanmässige Bahnbetrieb betroffen ist, handelt es sich um eine Erneuerung (Ersatz der Anlage mit gleicher Funktionalität) oder einen Umbau (teilweise auch Ausbau genannt: neue Funktionalität, beispielsweise Anschluss an eine Neubaustrecke). Bei Erneuerung oder Umbau gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten der Vorgehensweise: Bauen unter Betrieb oder Totalsperre. Beim Bauen unter Betrieb wird ein Gleis einer doppelspurigen Strecke jeweils in der Nacht für die Bauarbeiten gesperrt. Auf dem Nachbargleis wird der Verkehr während der Sperre einspurig geführt, die Züge beider Fahrtrichtungen verkehren über dasselbe Gleis. Für das deutlich höhere Verkehrsaufkommen tagsüber wird das im Umbau befindliche Gleis mit reduzierter Geschwindigkeit für den Verkehr wieder geöffnet. So ist kein Bahnersatz notwendig, oder allenfalls nur für die letzten paar Züge in den Nachtstunden mit reduziertem Passagieraufkommen. Alternativ können ein oder beide Gleise einer Strecke auch für mehrere Wochen komplett gesperrt werden, um ohne Bahnbetrieb in mehreren Schichten zu bauen. Hier fallen ganztägig Kosten für Bahnersatz an.

Planung und Kosten einer Sperrung:

Falls die Teilsperrung eines Gleises oder eine Streckensperrung über mehrere Tage, Wochen oder gar Monate nötig ist, wird der Planungsaufwand gross. Für die Vorbereitung einer neuen oder zusätzlichen Totalsperre ist eine Vorlaufzeit von 3 bis 5 Jahren erforderlich und die Kosten betragen, abhängig von der Strecke rund 1.5 Mio. CHF pro Woche. Die Hauptkosten entfallen auf den Bahnersatz mit Bussen. Diese Kosten werden teilweise auch Betriebserschwerungskosten genannt. Für den in der Praxis häufigsten Fall von Erneuerung oder Umbau ist demnach relevant, ob eine Massnahme unter Betrieb gebaut werden kann, oder ob eine längere Sperre auch tagsüber notwendig ist:

Massnahme	Machbar unter Betrieb in Nachtsperren?
UBM	Teilweise: A. Nein, falls keine PSS geplant. B. Eventuell ja: Ist abzuklären bei geplantem Umbau mit der Methode Planumsschutzschicht (PSS), d.h. ohne Asphaltsschicht. Es wird zusätzlich eine mehrtägige Sperre benötigt für den Einbau der Asphaltsschicht. Eventuell mit Wochenendsperrung realisierbar.
Steife USP	Ja
Schottertrog mit UBM	Nein. Benötigt Totalsperre für mehrere Wochen.

Tabelle 8.1: Machbarkeit unter Betrieb für die zu berücksichtigenden Massnahmen.

### **8.3 Massnahme nur mit Neubau realisierbar**

Die Massnahmen am Untergrund sind aus betrieblicher Sicht nur für den Neubau geeignet. Dort fällt die im Vergleich zur Realisierung des Bauprojekts ohne EKS-Massnahme verlängerte Bauzeit üblicherweise nicht ins Gewicht. Die diesbezügliche Erfahrung basiert aber einzig auf bisher realisierten Massnahmen in Tunneln, die für das vorliegende Dokument nicht betrachtet werden.

### **8.4 Massnahmen für Erneuerung oder Umbau der bestehenden Gleisanlage**

UBM: Falls im Projekt ohnehin der Einbau einer Asphalttschicht (AC-Rail) als Unterbau geplant ist, gibt es oft wenig Betriebserschwernisse für den zusätzlichen Einbau einer UBM als EKS-Massnahme. Wenn die Asphalttschicht jedoch fehlt, dann ist gemäss den Erfahrungen der letzten 20 Jahre ein Einbau einer UBM (mit dazu notwendiger Asphalttschicht) unverhältnismässig. Der Bau einer Asphalttschicht ist unter Betrieb in Nachtsperren nicht möglich. Falls für die UBM eine zusätzliche seitliche Schotterhalterung notwendig wird, sind diese Kosten aufzurechnen. Üblicherweise muss aber eine vorhandene Sperre dadurch nicht verlängert werden.

Steife USP: Bei einer Oberbauerneuerung kann die Massnahme steife USP ohne Betriebserschwernisse eingebaut werden. Es fallen lediglich die Mehrkosten der Schwellenbesohlung an.

Schottertrog mit UBM: Die Totalsperre der Strecke ist bei einer Erneuerung zu kurz. Normalerweise ist die Breite des Schottertrogts passend für zwei Gleise (wegen Gleisachsabstand für Schottertrog). Das heisst, der ganze Zugverkehr ist für eine lange Zeit gesperrt (mehrere Wochen), da eine Sperre eines einzigen Gleises einer doppelspurigen Strecke nicht genügt. Deshalb ist diese Massnahme bei Erneuerung immer unverhältnismässig.

## 9 Verhältnismässigkeit

Das Umweltschutzgesetz (USG) beinhaltet nur wenig konkrete Aussagen zur Verhältnismässigkeit. Grundsätzlich hat das USG die Bundesverfassung der schweizerischen Eidgenossenschaft (insbesondere Art. 5.2) zu befolgen, nämlich das Gesetz darf nicht zu unverhältnismässigen Massnahmen führen.

Nur in seltenen Fällen sind die erforderlichen Massnahmen für einen genügenden Erschütterungsschutz bei bestehenden Anlagen mit verhältnismässigem Zusatzaufwand realisierbar (siehe BEKS Erläuterungen A.2.). Der Zusatzaufwand ist beispielsweise für die Massnahme UBM unverhältnismässig, wenn keine Fahrbahnerneuerung mit AC-Rail geplant ist.

Für zu erstellende Projekte ist es sinnvoll, über einheitliche Grundsätze und Massstäbe zu verfügen, die belegen, dass die Bevölkerung in den Projekten in etwa gleichbehandelt wird. Konzeptuell gilt es auch sicherzustellen, dass mit den verfügbaren Mitteln der beste Nutzen, also die grösstmögliche Reduktion der schädigenden oder störenden Einwirkung, erzielt wird. Unverhältnismässige Massnahmen können durch eine Methode erkannt und vermieden werden (siehe Kapitel 9.2).

### 9.1 Kosten

Die Kosten werden in diesem Kapitel nur für die Investition ausgewiesen (ohne Kosten für späteren Unterhalt) und basieren auf Erfahrungswerten realer Projekte bzw. Kalkulationen. Dabei wird von einer Standardlänge von 100 m Doppelspur ausgegangen. Es ist zu beachten, dass die Kosten für Massnahmen «Stand der Technik» häufig variieren, insbesondere sich aus den folgenden Gründen erhöhen können:

1. Eine zusätzliche Sperrung (Teil- oder Totalsperre) ist nötig.
2. Es braucht vor und nach der Massnahme einen Übergang, um den Oberbauwechsel zu realisieren.
3. Die Projektierung, inklusive vorbereitende Messungen, ist insbesondere bei UBM teuer, da auch mehrere Messungen an verschiedenen Gebäuden nötig sind, um mögliche Decken-Resonanzverstärkungen ausschliessen zu können.
4. Ist keine Unterbausanierung mit Asphalttschicht geplant, dann führt eine UBM oder ein Schottertrog zu massiven baulichen Änderungen, die je nach Projekt zu ungeplanten Zusatzkosten führen.
5. In gewissen Fällen kann eine EKS-Massnahme im Vergleich zum Standard-Oberbau zu zusätzlichem Unterhalt führen.

#### A. UBM mit AC-Rail

Die Kosten für eine UBM bei vorhandener bzw. geplanter Asphalttschicht betragen rund 160 000 CHF für 100 m Doppelspur bei einer Fahrbahnerneuerung. Der Einbau erfordert normalerweise keine zusätzliche Sperrungszeit.

Die Kosten für eine UBM bei fehlender, nicht geplanter Asphalttschicht, die eigens für die UBM-Installation eingebaut werden muss, betragen rund 400 000 CHF für 100 m Doppelspur. Nicht berücksichtigt ist dabei die Sperrungszeit bei einer Fahrbahnerneuerung.

**B. Schottertrog mit UBM**

Die Kosten für einen Schottertrog mit UBM sind je nach Sperrungszeit und Länge sehr unterschiedlich. Die Kosten betragen beim Neubau (exkl. Sperrungszeit) rund 600 000 CHF für 100 m Doppelspur.

**C. Steife USP**

Die Kosten für steife USP betragen bei einer Fahrbahnerneuerung 20 000 CHF für 100 m Doppelspur.

In der folgenden Tabelle 9.1 sind die Mehrkosten für EKS-Massnahmen, die in der Schweiz für EKS-Schutz bei Eisenbahnen gebaut wurden, abgebildet:

<b>Massnahmentyp</b>	<b>Mehrkosten pro 100 m Doppelspur (Referenz jeweils in Klammern)</b>	<b>Übergangsbereiche (pauschal)</b>	<b>Evtl. Bahnersatz</b>
4. Schottertrog (oder Betonplatte) mit UBM	600 000 CHF (Neubau, AC-Rail nicht geplant)	100 000 CHF	1 500 000 CHF pro Woche (verlängerte Bauzeit)
<b>6. Unterschottermatte mit Asphaltsschicht (AC-Rail) und Schotterhalterung</b>	160 000 CHF (AC-Rail bereits geplant für Erneuerung) 400 000 CHF (AC-Rail nicht geplant, muss gebaut werden) 100 000 CHF (Neubau, AC-Rail bereits geplant)	100 000 CHF	300 000 CHF
<b>7. Schwellenbesohlung, USP steif</b>	20 000 CHF (Gleis ohne Besohlung)	-	-

Tabelle 9.1: Mehrkosten für EKS-Massnahmen: Stand der Technik und machbar bei einer Fahrbahnerneuerung bzw. einem Neubau.

**9.2 Quantifizierung des Nutzens**

Der Vorschlag für die Quantifizierung des Nutzens beruht auf der bewährten Methode, die für die Lärmsanierung der Eisenbahnen in der Schweiz verwendet wurde. Die Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Umweltprojekten und -massnahmen (insbesondere Lärm) sind von Interesse im Hinblick auf die «Gleichbehandlung».

Der Nutzen ist dabei als Produkt von der Einfügedämmung (in dB, für Erschütterungen und Körperschall separat zu bestimmen und addierbar, s. Kapitel 9.3) multipliziert mit der Anzahl geschützter Personen zu berechnen. Da die Dämmwirkungen eher klein sind, wird auf die Gewichtung der Einfügedämmung verzichtet.

Gegenüber dem Lärm ist für EKS die Ausbreitung wesentlich vom Untergrund abhängig, der sich entlang der Bahnlinien in der Schweiz häufig ändert. Auch der Gebäudetyp hat einen starken Einfluss auf die Dämmwirkung. Massnahmen müssen deshalb individuell mittels Messungen dimensioniert werden. Eine Massnahme kann in einem Gebäude wirken, im Nachbargebäude aber nicht

oder gar zu einer Verschlechterung führen. Deshalb kommt es häufig zu einer wichtigen Abwägung, die zum Beispiel im Lärmschutz nicht nötig ist.

### 9.3 Verhältnis Kosten-Wirkung

Eine Kosten-Wirkungs-Betrachtung ist in jedem Fall durchzuführen, wenn für ein Projekt Massnahmen zur Einhaltung der Richtwerte nötig sind, um abzuschätzen, ob eine Massnahme verhältnismässig ist oder nicht. Die folgende Methode erlaubt eine objektive Beurteilung und Bewertung. Es wird hier aber bewusst keine scharfe Grenze, kein Schwellenwert für die Verhältnismässigkeit eingeführt, z.B. ein Kosten-Wirkungs-Index (KWI), mit dem die Effizienz der Massnahme genau bewertet werden kann. Es soll vielmehr die Wirtschaftlichkeit der Schutzmassnahmen (Kosten-Wirkung: KW) bzgl. Klassen der Verhältnismässigkeit bewertet werden. Die vorgeschlagene Berechnungsmethode sieht wie folgt aus:

$$KW = \frac{\text{Kosten}}{\text{Wirkung}} = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{Reduktion [dB]} \times \text{Anzahl Betroffene}}$$

**KW:** Die Kosten-Wirkung KW (dimensionslos) kann nach verschiedenen Methoden ermittelt werden. Normalerweise ist die Bewertung abhängig davon, ob sie für eine netzweite Betrachtung oder projektspezifisch verwendet werden soll.

Für eine neue Strecke kann allenfalls ein höherer KW-Wert noch verhältnismässig sein. Denn die Richtwerte für eine neue Strecke sind strenger, und die Störauswirkung kann als grösser angenommen werden als bei einer bestehenden Strecke. Dies wurde bei der Lärmsanierung durch eine Gewichtung der Einfügedämmung vorgenommen, die hier nicht verwendet wurde. Zudem fallen beim Bau einer neuen Strecke keine Kosten für Bahnersatz an.

**Investitionskosten:** Die Investitionskosten enthalten nur die Investitionen und keine Unterhaltskosten, die wegen der Massnahme zusätzlich entstehen. Die Kosten für Betriebserschwerisse (Sperrungen usw.), die durch den EKS-Schutz entstehen, sind dazuzurechnen, falls sie erheblich sind.

**Anzahl Betroffene:** Die Berechnung und die Erfassung der betroffenen Personen erfolgen für alle empfindlichen Gebäude gesamthaft. Es wird mit drei Personen pro Wohneinheit (Wohnung) gerechnet. Dieser Ansatz für Wohnnutzungen ist unabhängig von zeitlichen Veränderungen und gewährleistet die Gleichbehandlung aller betroffenen Gebäude.

**Reduktion Erschütterungen/Körperschall:** Die Wirkung der Massnahme, d.h. die Reduktion der Beurteilungswerte, kann aus dem Bericht des auf Erschütterungen spezialisierten Ingenieurbüros herausgelesen werden, sofern die Massnahmenwirkungen für die spezifischen Situationen im Gebäude berechnet wurden. Es ist dabei die kritischere Beurteilungszeit, Tag oder Nacht, zu wählen. Für Erschütterungen ist allenfalls nachträglich die Wirkung für die Anwohner mit der folgenden Formel in Dezibel (dB) umzurechnen:

$$\text{Reduktion} = 20 \times \log\left(\frac{KB_{\text{Ftr ohne Massnahme}}}{KB_{\text{Ftr mit Massnahme}}}\right) \text{ dB}$$

**Reduktion für Körperschall und Erschütterungen gleichzeitig:** Reduziert eine Massnahme sowohl Körperschall als auch Erschütterungen, so können die beiden Reduktionen arithmetisch addiert werden, sofern beide Störwirkungen erheblich sind.

**Beurteilung der Kosten-Wirkung für eine Erneuerung:**

Für die Beurteilung der Kosten-Wirkung sind keine scharfen Grenzen für die Verhältnismässigkeit «ja-nein» gesetzt. Es wird vorgeschlagen, dass drei Klassen bestimmt werden. Ziel ist es, sicher verhältnismässige Massnahmen zu klassieren (grün) und sicher unverhältnismässige Massnahmen auszuschliessen (rot). Diejenigen Fälle (orange, Verhältnismässigkeit unsicher), welche die Bahnen nicht netzweit verbindlich regeln können, ohne die Verordnung und Ausführungsvorschriften bzgl. Verhältnismässigkeit, sollen durch die EKS-Fachleute projektweise geprüft werden, insbesondere auch auf die projektspezifischen Kosten.

Der Bereich KW für die Beurteilung mit Standardkosten wurde dabei angelehnt an die langjährige Beurteilungspraxis von Erschütterungsprojekten mit einer Obergrenze von 2000 CHF/dB/Person, siehe Tabelle 9.2.

Klasse der Verhältnismässigkeit	Bereich KW
Wahrscheinlich verhältnismässig	KW < 500 CHF/dB/Person
Verhältnismässigkeit unsicher, zu prüfen	500 < KW < 2000 CHF/dB/Person
Sicher nicht verhältnismässig	KW > 2000 CHF/dB/Person

Tabelle 9.2: Vorschlag zur Klassierung der Verhältnismässigkeit bei Erschütterungsprojekten für Standardkosten, angelehnt an die Beurteilungspraxis bisheriger Erschütterungsprojekte.

**9.4 Rechenbeispiele**

Nachfolgend werden einige Szenarien zur Ermittlung der Anzahl Betroffener beschrieben, um diese anschliessend mit den Kosten der Massnahmen zu vergleichen. Es wird von jeweils drei Personen pro Wohneinheit ausgegangen: Der Flächenbedarf der Gebäude wird eher klein angenommen. Die Betrachtung stellt einen Fall dar, der eher eine Massnahme rechtfertigt.

**9.4.1 Rechenbeispiel Einfamilienhäuser**

Für die Situation einer Bahnlinie an einem Einfamilienhausquartier rechnen wir exemplarisch mit einer Grundstückfläche von 25 x 25 m. Damit sind entlang von 100 m Bahnlinie vier Grundstücke mit 12 Menschen von den Erschütterungen betroffen.

Es wird die Situation für Holz- und Betondecken betrachtet.

**9.4.2 Rechenbeispiel Zweigeschossig oder Doppel Einfamilienhaus**

Zweigeschossige Belegung oder Doppel Einfamilienhäuser nebeneinander: Die Anzahl Betroffener pro 100 m wird gegenüber den Einfamilienhäusern verdoppelt, 24 pro 100 m.

Es wird die Situation für Holz- und Betondecken betrachtet.

**9.4.3 Mehrfamilienhäuser gebaut vor 1985, dreigeschossig**

Klassische Mehrfamilienhäuser aus den 1960er oder 1970er Jahren, drei Wohngeschosse, drei Eingänge, je zwei Parteien pro Boden: insgesamt 18 Wohnungen mit jeweils drei Personen.

Grundfläche 40 x 12 m, Gebäudeabstand auf allen Seiten rund 10 m.

Es werden nur Betondecken betrachtet.

Bebauung längs zur Bahn zwei Gebäude pro 100 m, ergibt  $3 \times 6 \times 3 \times 2 = 108$  Personen pro 100 m

Bebauung quer zur Bahn vier Gebäude pro 100 m: Distanz zur Bahn nimmt innerhalb des Gebäudes zu. → Annahme, dass nur 50% der Bewohner des Gebäudes betroffen sind, somit Situation identisch zur Bebauung längs zur Bahn.

#### **9.4.4 Rechenbeispiel Hochhaus**

12 Stockwerke mit jeweils vier Wohnungen, Grundstück 50 x 50 m

144 Personen pro Gebäude, 288 Personen pro 100 m

Es werden nur Betondecken betrachtet.

Das Hochhaus wird für den Vergleich der Verhältnismässigkeit der teuren Massnahmen verwendet. Der praktische Einsatz einer Massnahme bei einem solchen Gebäude ist aber unwahrscheinlich, da dieses oft erst nach der Inkraftsetzung des USG gebaut wurde und somit keine Sanierungspflicht besteht. Zudem ist durch die übliche Bauweise hoher Gebäude deren Empfindlichkeit für EKS eher gering. Das Eigengewicht ist hoch, die Foundation ist tiefer und muss auf einer stabilen Schicht geschehen.

Die Betrachtung in VIBRA 1 geht für ein solches Gebäude von einer um den Faktor 1,7 tieferen Ankopplung aus als bei einem Einfamilienhaus.

#### **9.4.5 Moderner Holzbau**

Die in den Vorgabedokumenten genannten Eigenschaften für Holzdecken beziehen sich auf Bauten, die typischerweise vor 1985 erstellt wurden. Moderne Holzbauten ab ungefähr Baujahr 2000 wurden noch nicht untersucht.

#### **9.4.6 Modellrechnungen**

Die modellhaften Berechnungen der Verhältnismässigkeit ergeben für die in den Unterkapiteln 9.4.1 bis 9.4.4 beschriebenen Fälle folgende Ergebnisse, dargestellt in Abbildung 9.1.

		Untergrund	Unterbau	Oberbau
Kosten für 100 + 2* 25 m		900'000	600'000	20'000
Übergangsbereiche		600'000	100'000	-
Bahnersatz		3'000'000	400'000	-
Kosten total		4'500'000	1'100'000	20'000
Einzahlwert Einfügedämmung [dB]		5	10	5.5
EFH				
	Personen/100m	12	12	12
	dB x Personen	60	120	66
	Kosten/dB/Pers	75'000	9'167	303
DEFH				
	Personen/100m	24	24	24
	dB x Personen	120	240	132
	Kosten/dB/Pers	37'500	4'583	152
MFH				
	Personen/100m	108	108	108
	dB x Personen	540	1080	594
	Kosten/dB/Pers	8'333	1'019	34
Hochhaus				
	Personen/100m	288	288	288
	dB x Personen	1440	2880	1584
	Kosten/dB/Pers	3'125	382	13
Mindestanzahl Personen pro 100 m		450	55	2

Abbildung 9.1: Modellhafte Berechnungen der Verhältnismässigkeit in spezifischen Situationen für Massnahme am Untergrund: Schottertrogt mit UBM, Massnahme am Unterbau: UBM (AC-Rail nicht geplant, deshalb in den Kosten ausgewiesen), Oberbau-Massnahme: steife USP.

### 9.5 Schlussfolgerungen Verhältnismässigkeit

Die unterschiedlichen Massnahmen für den Erschütterungsschutz werden im vorliegenden Dokument aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Verhältnismässigkeit und dem technischen Reifegrad für die Anwendung auf offener Strecke bewertet. Es ergibt sich folgendes Bild:

1. Massnahmen am Untergrund (inkl. Masse-Feder-Systeme) sind aufgrund der Kosten oder geringer Wirksamkeit, bzw. wegen des Systemwechsels Schotter/Feste Fahrbahn, nie verhältnismässig (siehe Tabelle 6.1). Eine Ausnahme stellt der Betontrogt mit Unterschottermatte im Rahmen eines Neubaus dar. Dieser Fall muss auf die Verhältnismässigkeit geprüft werden.
2. Massnahmen am Unterbau (UBM) müssen auf Verhältnismässigkeit geprüft werden.
3. Massnahmen am Oberbau (steife USP) sind praktisch immer verhältnismässig.
4. Massnahmen auf dem Ausbreitungsweg (Bodenschlitz) sind wegen geringer Wirksamkeit nie verhältnismässig (siehe Tabelle 6.1).
5. Nachträglich eingebaute Ersatzmassnahmen am Immissionsort sind unpraktikabel.

## 10 Fazit

Das vorliegende Dokument kann als Leitfaden benutzt werden, damit im Rahmen von Projekten, beispielsweise bei potenziellen Einsparungen, unverhältnismässige Massnahmen ohne vertiefte Prüfung ausgeschlossen werden können und nur solche mit sinnvollem Kosten/Nutzen-Verhältnis geprüft werden müssen. Die Betrachtung bezieht sich nur auf Projekte für Vollbahnen auf natürlichem Baugrund.

Die verschiedenen technischen Massnahmen zum Erschütterungsschutz werden im vorliegenden Dokument aufgezeigt und hinsichtlich ihrer Verhältnismässigkeit für die Anwendung auf offener Strecke bewertet.

Von den aufgeführten EKS-Massnahmen sind im Moment, Stand 2026, nur zwei Massnahmen (Emission) bei einer Erneuerung auf der offenen Strecke anwendbar: Unterschottermatten auf Asphalttschicht und steife Schwellenbesohlung. Der Betontrog ist nur bei einem Neubau anwendbar. Massnahmen der Transmission und Immission sind nicht anwendbar.

Für diese drei anwendbaren Massnahmen kann die Massnahmenwirkung für ihren Einsatzbereich ziemlich genau angegeben werden.

Die Betriebserschwerisse werden kurz diskutiert. Insbesondere bei aufwändigen Massnahmen wie Schottertrogl, feste Fahrbahn und MFS fallen die Totalsperren bezüglich Kosten und Planhorizont bei Arbeiten unter laufendem Bahnbetrieb zu stark ins Gewicht und verhindern eine genügende Verhältnismässigkeit.

Es wird eine Möglichkeit der Beurteilung der Verhältnismässigkeit beschrieben. Es wird aber auf die Bestimmung eines präzisen Grenzwerts der Verhältnismässigkeit verzichtet. Dafür wird ein Bereich angegeben, wo eine Prüfung der Verhältnismässigkeit durchzuführen ist. Die steife USP ist bei einer Fahrbahnerneuerung meistens verhältnismässig. UBM (auch mit zusätzlich einzubauender Asphalttschicht) muss auf Verhältnismässigkeit geprüft werden. Der Betontrog muss nur in der Situation Neubau auf Verhältnismässigkeit beurteilt werden, bei einer Erneuerung ist er unverhältnismässig.

Die Infrastrukturbetreiber unterstützen die Forschung und Entwicklung weiterer Massnahmen zum EKS-Schutz im Rahmen ihrer Möglichkeiten, da Forschungs- und Entwicklungsbedarf vorhanden ist.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Laurence Conreux, Roger Müller, Urs Schönholzer (2023): «Stand der Technik zu Erschütterungen und Körperschall auf dem Schweizer Normalspur-Eisenbahnnetz», Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, ISBN 978-3-907456-00-2, <https://www.allianz-fahrweg.ch/9783907456002.pdf>.
- [2] Ecoplan / Gruner / Swiss TPH (2019): Wirtschaftliche Verhältnismässigkeit von baulichen Massnahmen gegen Erschütterung und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr (im Auftrag des BAFU).
- [3] Ecoplan (2023): Wirtschaftliche Verhältnismässigkeit von baulichen Massnahmen gegen Erschütterungen und abgestrahlten Körperschall im Schienenverkehr, Eignung von Fallbeispielen zur Entwicklung einer Beurteilungsmethodik (im Auftrag des BAFU).
- [4] Roger Müller (2022). FB 400-0510, Unterschottermatten als Schutz vor Erschütterung und Körperschall (EKS), Weisung SBB Infrastruktur, Bern.
- [5] Roger Müller (2026): Kurzbericht zu den Erschütterungsmessungen bei steifen Schwellenbohlungen, Allianz Fahrweg Normalspur, Bern, ISBN 978-3-907456-07-1, <https://www.allianz-fahrweg.ch/publications/9783907456071.pdf>
- [6] Rüdiger Garburg, Christian Frank, and Michael Mistler (2021): Investigation of Vibration Mitigation by Concrete Trough with Integrated Under Ballast Mats for Surface-Railways, in *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, ed. Geert Degrande et al., Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design (Cham: Springer International Publishing), 563–570, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70289-2\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70289-2_61).