

Messung der Erschütterungsabminderung bei Bodenschlitzen

Marcel Birchmeier, ZIEGLER CONSULTANTS, Zürich, CH

1 Einleitung

Der Schienenverkehr erfreut sich dank Effizienz und Umweltfreundlichkeit grosser Beliebtheit. Das Schienennetz und auch der Fahrplan werden stetig ausgebaut. Der Schienenverkehr hat aber auch negative Auswirkungen wie Lärm oder Erschütterungen und Körperschall. In der Schweiz wird viel in Lärmschutzmassnahmen investiert. Bei den Erschütterungen sucht man jedoch noch nach einer effizienten und verhältnismässigen Massnahme. Schwellenbohlung und Unterschottermatten reduzieren den Körperschall. Sie sind allerdings kostspielig und können in gewissen Fällen die Erschütterungen sogar verstärken. Wirkungsvolle schwere Feder-Masse-Systeme bei den Gleisen sind ebenfalls zu teuer für eine grossflächige Anwendung. Eine weitere Massnahme sind Bodenschlitze, welche die Ausbreitung der Erschütterungen im Erdreich einschränken sollen. Die Wirksamkeit dieser Massnahme wird in der Literatur zwar viel diskutiert, Anwendungsbeispiele gibt es jedoch nur wenige. Ziel dieses Beitrags ist anhand von Messungen bei temporären Bodenschlitzen mit realer Erschütterungsquelle erste Erkenntnisse aufzuzeigen und auf einige wichtige Zusammenhänge bezüglich der Wellenausbreitung hinzuweisen. Ausgehend von einer kurzen Einführung in die Wellenausbreitung in Festkörpern werden zwei Messungen der Erschütterungsabminderung bei Bodenschlitzen und eine einfache Finite Elemente Berechnung präsentiert und die Resultate im Anschluss diskutiert.



Bild 1.1 Temporärer Bodenschlitz an der Asylstrasse in Zürich

2 Wellen im elastischen Boden

In einem linear-elastischen, isotropen, homogenen Material können sich zwei Wellentypen ausbreiten: Einerseits die Longitudinalwelle (auch Druckwelle) mit einer Partikelbewegung in Ausbreitungsrichtung, andererseits – wegen der Schubsteifigkeit des Materials – die Transversalwelle (auch Scherwelle) mit einer Partikelbewegung quer zur Ausbreitungsrichtung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen hängt von der Dichte, dem Elastizitätsmodul und der Querkontraktionszahl des Materials ab und ist für die Druckwelle grösser als für die Scherwelle. Bei einem Empfänger trifft erst die Druckwelle dann die Scherwelle ein, weshalb erste auch P-Welle von „primary wave“ und zweite S-Welle von „secondary wave“ genannt wird.

An einer Oberfläche oder Schichtgrenze gelten bestimmte Rand- bzw. Übergangsbedingungen, die zu Reflektionen und Wellenumwandlungen führen. Auch können sich zusätzliche Wellenformen entlang der Oberfläche oder Schichtgrenze und innerhalb von Schichten ausbreiten. Die wichtigste Oberflächenwelle ist die nach ihrem Entdecker benannte Rayleighwelle, die sich im Boden nur unwesentlich langsamer ausbreitet als die S-Welle. Ein Bodenpartikel beschreibt in einer Rayleighwelle eine elliptische Bewegung, deren Amplitude mit der Tiefe abnimmt und in einer Tiefe entsprechend der doppelten Wellenlänge praktisch null beträgt. Der Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge ist für alle Wellenformen gegeben durch

$$c = f \cdot \lambda$$

mit c = Ausbreitungsgeschwindigkeit in m/s, f = Frequenz in Hz und λ in m. In Tabelle 2.1 sind für unterschiedliche Bodentypen die Wellenlängen bei verschiedenen Frequenzen aufgelistet. Bei der Problematik der Erschütterungen infolge Schienenverkehrs sind vor allem die vertikalen Bodenbewegungen (S- und Rayleighwellen) in einem Frequenzbereich zwischen 10 und 160 Hz von Interesse. Die Wellenlängen variieren dabei bei normalen Bodenverhältnissen zwischen 20 und 1.25 m.

Tabelle 2.1 Wellenlängen bei unterschiedlichen Bodentypen

	Ausbreitungsgeschwindigkeit c	Wellenlängen λ		
		$f = 10$ Hz	$f = 20$ Hz	$f = 50$ Hz
Weicher Boden				
P-Welle	ca. 200 m/s	20 m	10 m	4 m
S-Welle / Rayleighwelle	ca. 100 m/s	10 m	5 m	2 m
Normaler Boden				
P-Welle	ca. 400 m/s	40 m	20 m	8 m
S-Welle / Rayleighwelle	ca. 200 m/s	20 m	10 m	4 m
Steifer Boden				
P-Welle	ca. 1000 m/s	100 m	50 m	20 m
S-Welle / Rayleighwelle	ca. 500 m/s	50 m	25 m	10 m

Bild 2.1 zeigt das Wellenbild (dargestellt als Betrag der totalen Partikelverschiebung) in einem Querschnitt des Halbraums ausgehend von einer Linienlast (kurzzeitige Sinusschwingung) an der Oberfläche des elastischen Festkörpers. Im sogenannten Nahfeld bis zu einer Distanz von etwa 2 Wellenlängen von der Erschütterungsquelle müssen sich die verschiedenen Wellenformen zuerst bilden (nicht im Bild dargestellt). Nach einer gewissen Zeit separieren sich die P-, S- und Rayleighwellen aufgrund der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten und sind klar erkennbar.

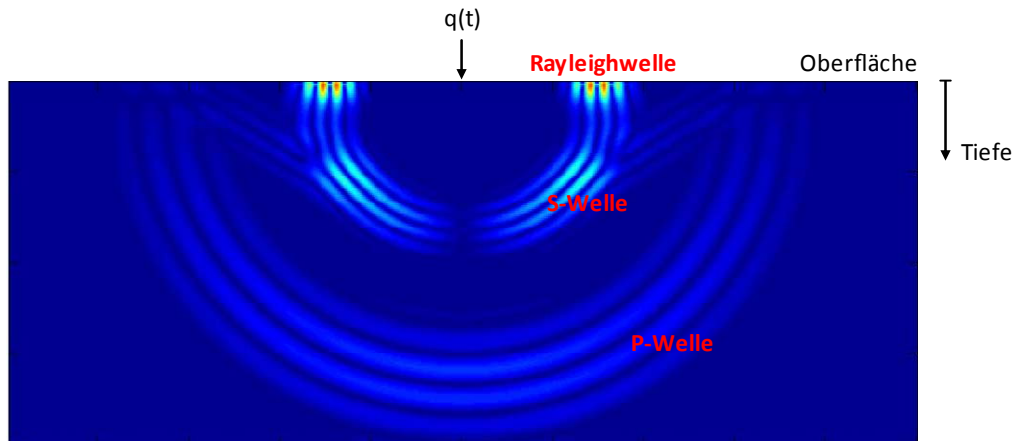


Bild 2.1 Wellenbild in einem Festkörper-Querschnitt ausgehend von einer kurzzeitigen Belastung an der Oberfläche (Linienlast senkrecht zur Bildfläche)

Die hier beschriebene und für die meisten praktischen Anwendungen interessierende Wellenausbreitung ist linear. Das heisst, dass die einzelnen Wellenformen und Ausbreitungswege separat betrachtet und am Ende wieder superponiert werden können. Auch breiten sich die Wellen in geraden Strahlen von der Quelle weg aus, sofern keine Diskontinuitäten im Medium vorhanden sind (Huygens Prinzip). Dies erlaubt mit einfachen geometrischen Überlegungen erste Abschätzungen über das zu erwartende Wellenbild. Bei der Eisenbahn kann je nach Betrachtung entweder von einer Linienlast oder von einer Reihe von örtlich und zeitlich gestaffelten Punktlasten ausgegangen werden. Bild 2.2 zeigt als Beispiel einen massstäblichen Querschnitt mit einem Gleis, einem Bodenschlitz, einer Schichtgrenze im Boden und einem

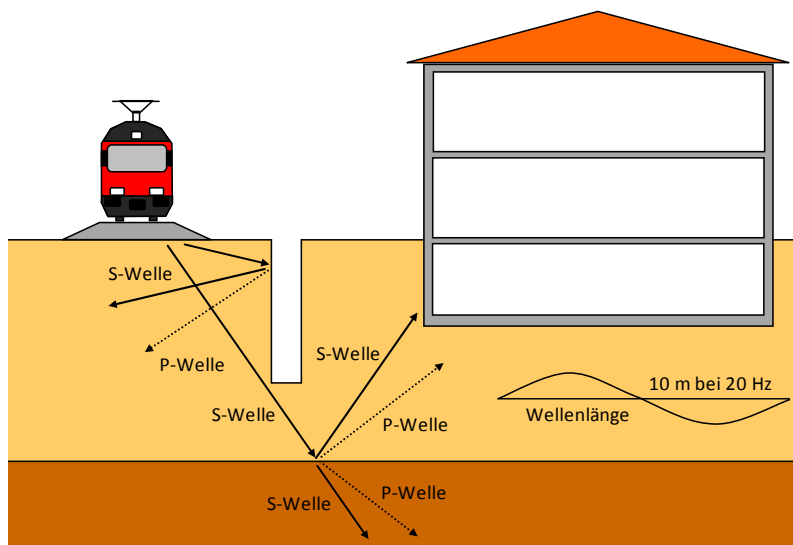


Bild 2.2 Massstäblicher Querschnitt mit verschiedenen Ausbreitungswegen der S-Welle

Gebäude. Eingezeichnet sind mögliche Ausbreitungswege der S-Welle ausgehend von der Eisenbahn als Linienlast. Der Bodenschlitz stellt für die Wellen ein Hindernis dar, an dessen Ränder und Ecken sich die Wellen reflektieren und beugen: In der Realität wird sich vor und hinter dem Schlitz ein diffuses Wellenbild ergeben, auch weil durch ein Schienenfahrzeug unterschiedliche Frequenzen gleichzeitig angeregt werden.

Aus dem Bereich der wellenbasierten, zerstörungsfreien Prüfverfahren (z.B. Ultraschall) ist bekannt, dass eine elastische Welle eine Fehlstelle nur „wahrnimmt“, d.h. sich die Welle nur verändert, wenn die Grösse der Fehlstelle mindestens in etwa der Wellenlänge λ entspricht. Dies dürfte auch bei Bodenschlitzen gelten. In verschiedenen Quellen der Literatur wird von einer Mindesttiefe der Bodenschlitze von ca. $0.6 \cdot \lambda$ oder grösser gesprochen. Will man nun die oft problematischen, eher tieffrequenten Erschütterungen bei z.B. 20 Hz in einem normalen Boden mit einem Schlitz abmindern, müsste dieser eine Tiefe von mindesten 6 m aufweisen.

3 Messung

Die in der Literatur dokumentierten Untersuchungen zu Bodenschlitzen basieren zumeist auf numerischen Simulationen mit der Finiten Elemente Methode (FE-Methode) oder ähnlichen Ansätzen. Die erforderlichen Messungen zur Verifikation der numerischen Resultate sind jedoch oft zu aufwändig, Laborversuche kaum realisierbar und Messungen im Feld weisen viele unbekannt Parameter auf.

Eine Möglichkeit ohne grossen Aufwand Messungen bei Bodenschlitzen durchzuführen, besteht darin, temporäre Bodenschlitze, wie sie zur Sanierung von Kanalisationsleitungen erstellt werden, zu betrachten. Man hat zwar keinen Einfluss auf die Lage und Geometrie des Schlitzes, dafür hat man die Möglichkeit mit geringem Aufwand mehrere Objekte in realistischer Umgebung zu untersuchen. Voraussetzungen für einen zur Erschütterungsabminderung geeigneten, temporären Bodenschlitz sind dessen genügend grosse Dimensionen relativ zur umgebenden Situation, das Vorhandensein einer realistischen Anregungsquelle in unmittelbarer Nähe und die Möglichkeit, ungestört Messungen durchführen zu können. Städte mit einer Strassenbahn bieten hier ideale Voraussetzungen, da die Platzverhältnisse eng sind und die Strassenbahn als Erschütterungsquelle genutzt werden kann. So konnte in Zürich in den vergangenen vier Monaten bei zwei temporären Bodenschlitzen deren Wirkung auf die Erschütterungsausbreitung untersucht werden.

3.1 Messkonzept

Ein temporärer Bodenschlitz erlaubt es, dieselbe Messung mit und ohne Bodenschlitz durchzuführen (Messung A bzw. Messung B). Aufgezeichnet wurden jeweils die vertikalen Erschütterungen während mehreren Tramdurchfahrten. Aus den gemittelten Terzbandspektren (TBS) der Messdaten bei jeweils demselben Messpunkt mit und ohne Bodenschlitz kann so das Transferspektrum (TF, auch Einfügespektrum) des Bodenschlitzes bestimmt werden zu

$$TF_{\text{Bodenschlitz}} = \frac{TBS_{\text{mit Bodenschlitz}}}{TBS_{\text{ohne Bodenschlitz}}}$$

Da zwischen der Messung mit Bodenschlitz und der Messung nach dem Schliessen des Schlitzes nur eine relativ kurze Zeitspanne lag, kann davon ausgegangen werden, dass sich an den Gleisen und im Untergrund mit Ausnahme des Bodenschlitzes nichts geändert hat. Um

mögliche Veränderungen bei den Tramfahrzeugen und deren Fahrgeschwindigkeiten berücksichtigen zu können, wurden zusätzlich zu den Messpunkten auf Höhe des Bodenschlitzes (Messreihe 2) gleichzeitig in einem möglichst nahen, jedoch ausserhalb des Einflussbereichs des Bodenschlitzes gelegenen Bereich die Erschütterungen während der Tramdurchfahrten aufgezeichnet (Messreihe 1).

3.2 Messung Asylstrasse Zürich

An der Asylstrasse in Zürich zwischen Hölderlinstrasse und Jupiterstrasse wurde zwecks Leitungssanierung ein 4 m tiefer, 1 m breiter und ca. 50 m langer Schlitz zwischen den Tramgleisen und den angrenzenden Gebäude ausgehoben (siehe Bild 1.1). Der Abstand zwischen dem nächstgelegenen Gleis und dem Gebäude beträgt ca. 8 m. Bild 3.1 zeigt die Situation und die Position der Messpunkte. Die Messpunkte MP 1a und MP 2a entsprechen einem Fundamentpunkt des jeweiligen Gebäudes, die anderen sind Frei-Feld-Messpunkte.

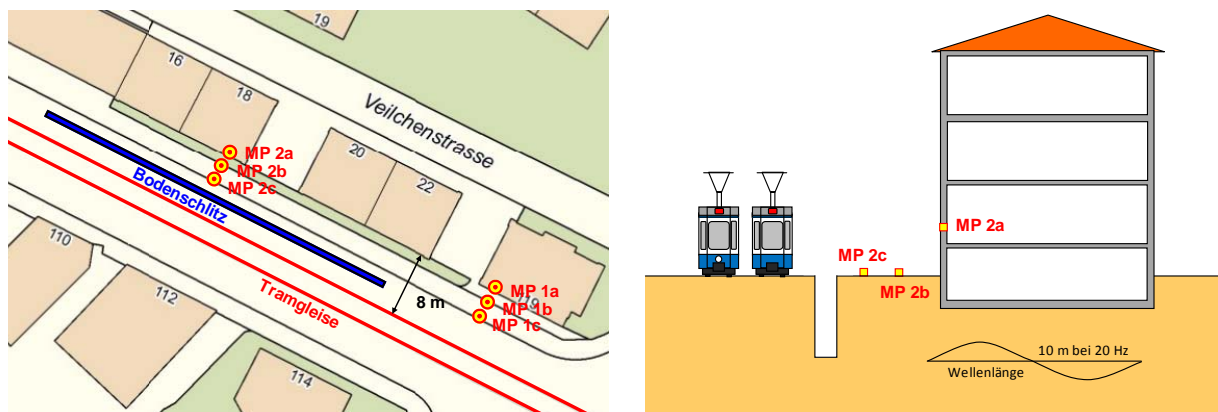


Bild 3.1 Situation und Position der Messpunkte (links) und massstäblicher Querschnitt (rechts)

Bild 3.2 zeigt die Mittelwert-Terzbandspektren für die drei Messpunkte MP 2a bis MP 2c (gemittelt über alle Tramdurchfahrten) für die Messung B (ohne Bodenschlitz). Die dominanten Frequenzen der Anregung liegen zwischen 10 und 200 Hz, was dem interessierenden Frequenzbereich entspricht.

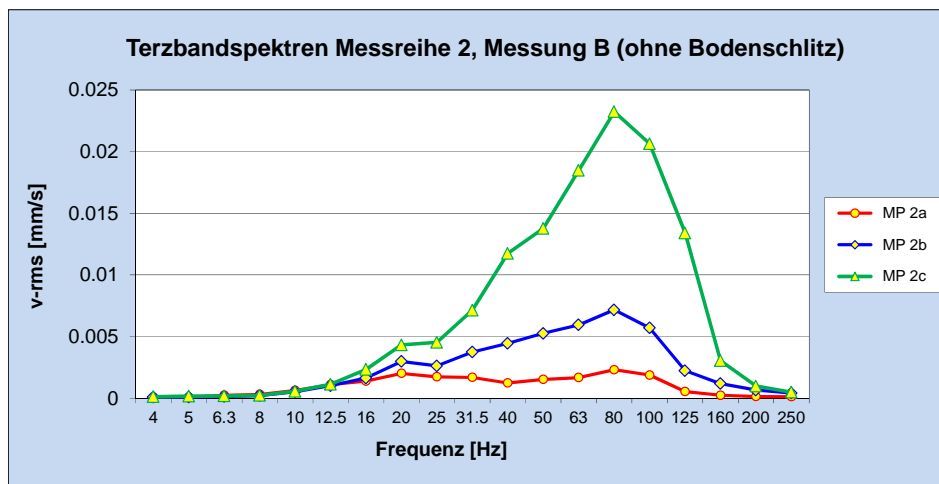


Bild 3.2 Mittelwert-Terzbandspektren für die Messpunkte MP 2a bis MP 2c

Bild 3.3 zeigt die gemittelten RMS-Werte bei der Messreihe 1 (beide Messungen ohne Bodenschlitz) und bei der Messreihe 2 (ohne und mit Bodenschlitz). Es zeigt sich, dass die Werte der beiden Messungen bei der Messreihe 1 nicht gleich gross sind. Der Grund dürfte die Fahrgeschwindigkeit der Trams sein, die wegen der Baustelle bei der Messung A kleiner war als bei der Messung B. Für die Darstellung der Werte bei der Messreihe 2 wurden die Werte der Messung A entsprechend korrigiert.

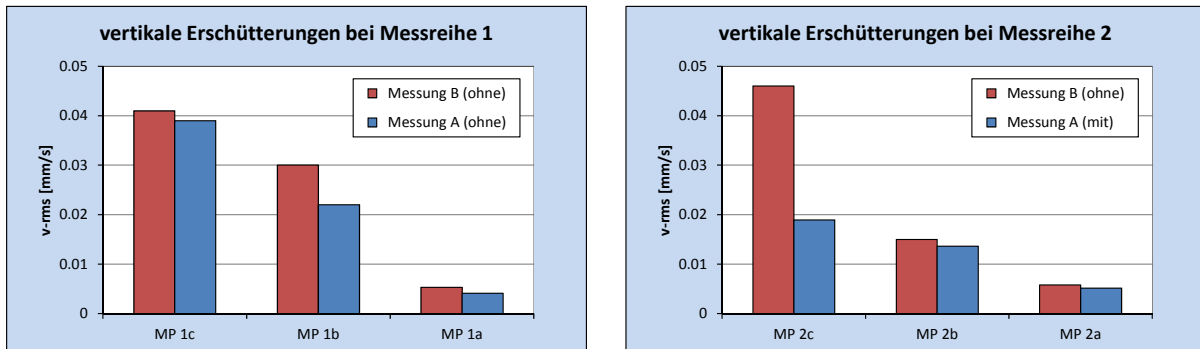


Bild 3.3 RMS-Werte der vertikalen Erschütterungen (gemittelt über alle Tramdurchfahrten)

In einem Abstand von 1.5 m vom Bodenschlitz (MP 2c) beträgt die Reduktion der Erschütterung 59 %, in 3 m Abstand noch 9 % und beim Fundamentpunkt im Abstand von 4.5 m 11 %. Ein ähnliches Resultat ergibt sich bei der Betrachtung der gemittelten maximalen Erschütterungen. Es zeigt sich, dass bereits ab einem relativ kleinen Abstand nur noch eine geringe Reduktion infolge des Bodenschlitzes beobachtet werden kann.

Bild 3.4 zeigt die Transferspektren bei der Messreihe 2, korrigiert mit den Werten aus Messreihe 1. Die Spektren zeigen, dass unterhalb 30 Hz die Erschütterungen durch den Bodenschlitz nicht reduziert werden, z.T. ist sogar eine Erhöhung zu beobachten. Grund könnte der wegen des Bodenschlitzes etwas weichere Boden sein. Oberhalb 30 Hz sind die Erschütterungen geringer mit Bodenschlitz als ohne Bodenschlitz. Diese Reduktion ist näher beim Bodenschlitz (MP 2c) grösser als weiter weg (MP 2b). Für das Gebäude (MP 2a) beträgt die Reduktion oberhalb 40 Hz zwischen 0.7 und 0.5. Dies ist in Anbetracht der Grösse des Eingriffs (siehe Bild 3.1) eher bescheiden.

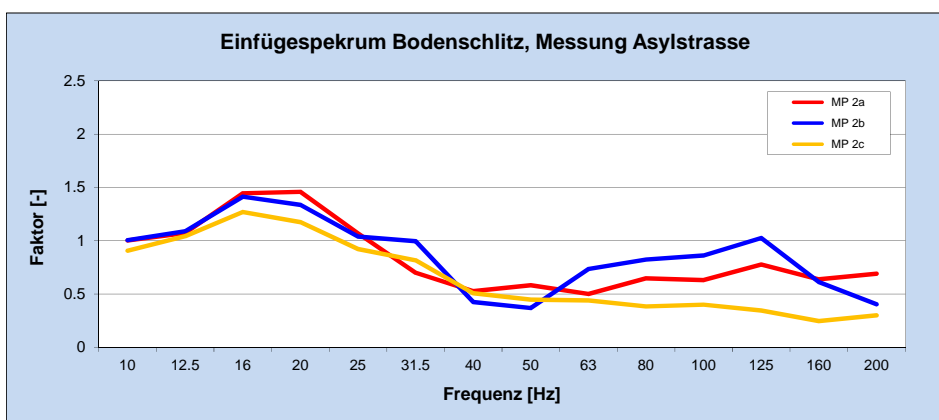


Bild 3.4 Gemessene Einfügespektren für den Bodenschlitz an der Asylstrasse

3.3 Messung Forchstrasse Zürich

Ähnlich zur Asylstrasse wurde an der Forchstrasse vor der Uniklinik Balgrist zwecks Leitungssanierung ein 3 bis 3.5 m tiefer, 1.5 m breiter und ca. 40 m langer Schlitz zwischen den Tramgleisen und einer Tiefgarage ausgehoben (Bild 3.5). Der Abstand zwischen dem nächstgelegenen Gleis und der Tiefgarage beträgt ca. 16 m. Bild 3.6 zeigt die Situation und die Position der Messpunkte. Die Messpunkte MP 1a und MP 2a entsprechen einem Fundamentpunkt der Tiefgarage, die anderen sind Frei-Feld-Messpunkte.



Bild 3.5 Temporärer Bodenschlitz an der Forchstrasse in Zürich

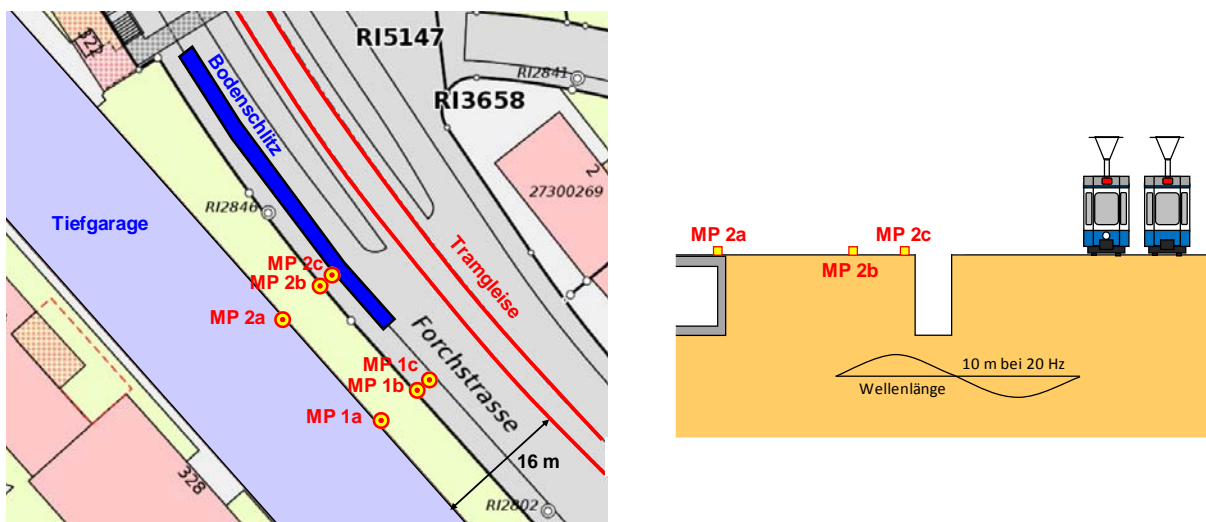


Bild 3.6 Situation und Position der Messpunkte (links) und massstäblicher Querschnitt (rechts)

Bild 3.7 zeigt die Mittelwert-Terzbandspektren für die drei Messpunkte MP 2a bis MP 2c (gemittelt über alle Tramdurchfahrten) für die Messung B (ohne Bodenschlitz). Die dominanten Frequenzen der Anregung liegen zwischen 10 und 200 Hz, was dem interessierenden Frequenzbereich entspricht.

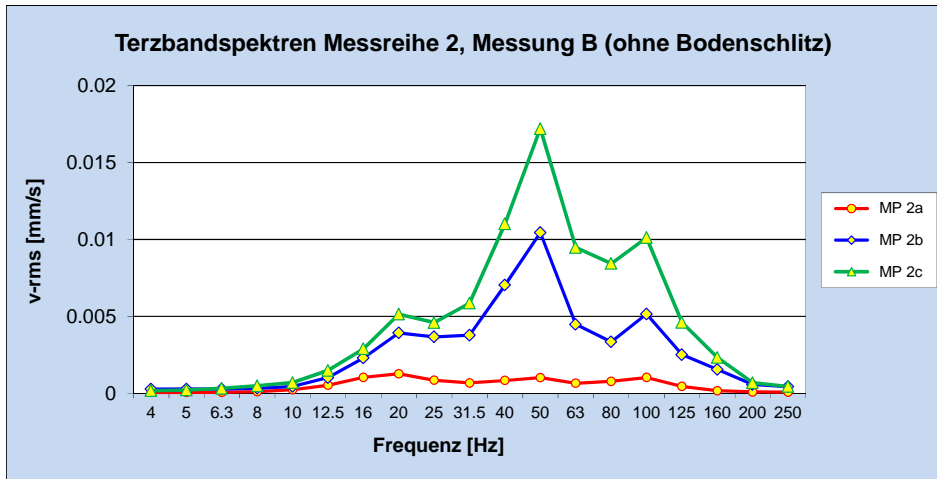


Bild 3.7 Mittelwert-Terzbandspektren für die Messpunkte MP 2a bis MP 2c

Bild 3.8 zeigt die gemittelten RMS-Werte bei der Messreihe 1 (beide Messungen ohne Bodenschlitz) und bei der Messreihe 2 (ohne und mit Bodenschlitz). Es zeigt sich, dass die Werte der beiden Messungen ausser bei MP 1b in etwa gleich gross sind. Dennoch wurde für die Darstellung der Werte bei der Messreihe 2 die Werte der Messung A entsprechend korrigiert.

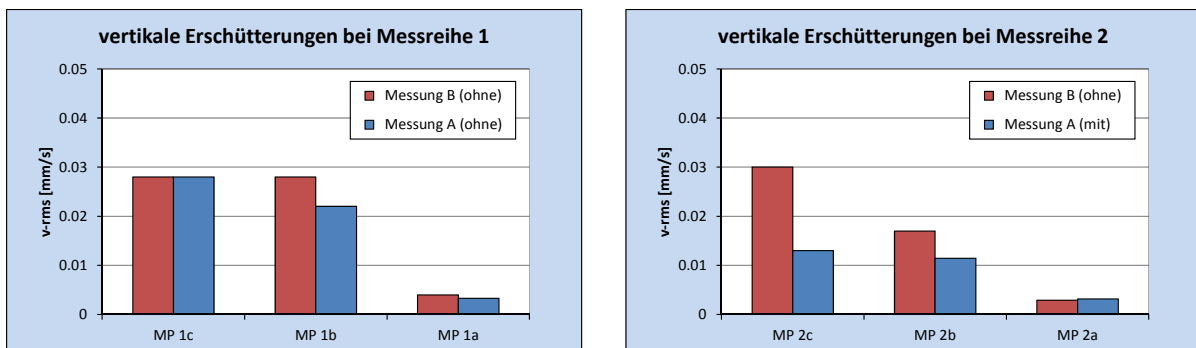


Bild 3.8 RMS-Werte der vertikalen Erschütterungen (gemittelt über alle Tramdurchfahrten)

In einem Abstand von 0.5 m vom Bodenschlitz (MP 2c) beträgt die Reduktion der Erschütterung 57 %, in 2.5 m Abstand noch 33 % und beim Fundamentpunkt im Abstand von 8.5 m ergibt sich eine leichte Zunahme von 9 %. Ein ähnliches Resultat ergibt sich bei der Betrachtung der gemittelten maximalen Erschütterungen. Es zeigt sich wiederum, dass bereits ab einem relativ kleinen Abstand nur noch eine geringe Reduktion infolge des Bodenschlitzes beobachtet werden kann.

Bild 3.9 zeigt die Transferspektren bei der Messreihe 2, korrigiert mit den Werten aus Messreihe 1. Unmittelbar hinter dem Bodenschlitz ergibt sich bis auf das Terzband 12.5 Hz eine Reduktion von etwa 0.5, jedoch bereits 2 m weiter weg zeigt sich wiederum, dass unterhalb 30 Hz die Erschütterungen durch den Bodenschlitz nicht reduziert werden. Oberhalb 30 Hz sind die Erschütterungen geringer mit Bodenschlitz als ohne Bodenschlitz. Für die Tiefgarage ergibt sich praktisch keine Reduktion. Dies ist in Anbetracht der im Vergleich zum Bodenschlitz eher grossen Dimensionen des Baukörpers (siehe Bild 3.6) nicht weiter erstaunlich.

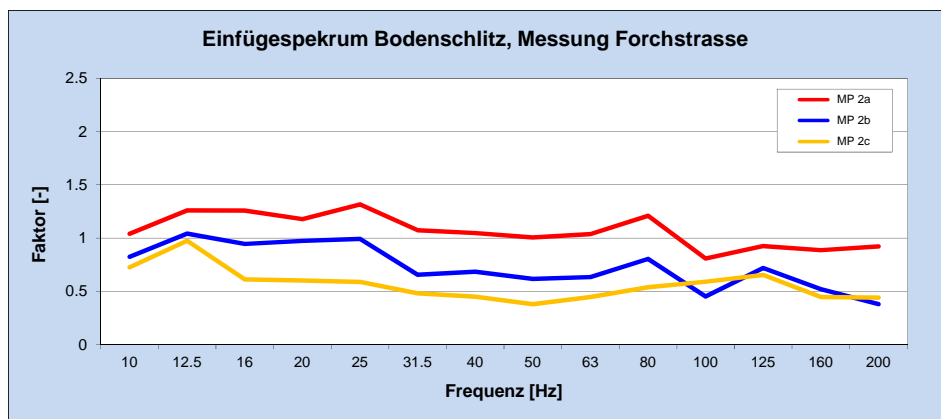


Bild 3.9 Gemessene Einfügespektren für den Bodenschlitz an der Forchstrasse

4 FE-Modellierung

Neben der Messung wurde eine FE-Berechnung mit der Software PLAXIS durchgeführt. Bild 4.1 zeigt schematisch die Geometrie des betrachteten Bodenausschnitts, die ungefähr jener der Messung bei der Asylstrasse entspricht. Betrachtet wird ein Ausschnitt von 30 m Länge und 10 m Tiefe bei einer Breite von 1 m. Die Oberfläche entspricht einem freien Rand, die linke Begrenzungsfläche einer Symmetrieebene und an den beiden grossen Flächen dürfen keine Verschiebungen senkrecht dazu auftreten. Die untere und die rechte Begrenzungsfläche sind als absorbierende Ränder definiert, um ungewollte Reflektionen der Wellen zu unterdrücken. Die Anregung an der Oberfläche (siehe auch Bild 4.1) wurde als eine harmonische Spannungsbelastung mit Frequenzen von 8 Hz, 16 Hz, 32 Hz, 64 Hz und 128 Hz gewählt. Der Bodenschlitz hat eine Tiefe von 5 m und eine Breite von 1 m. Im Bodenschlitz wurden die Dichte, der Elastizitätsmodul und der Schubmodul sehr viel kleiner gewählt als im umgebenden Boden. Für die Wellenausbreitung entspricht dies in etwa einem leeren Schlitz.

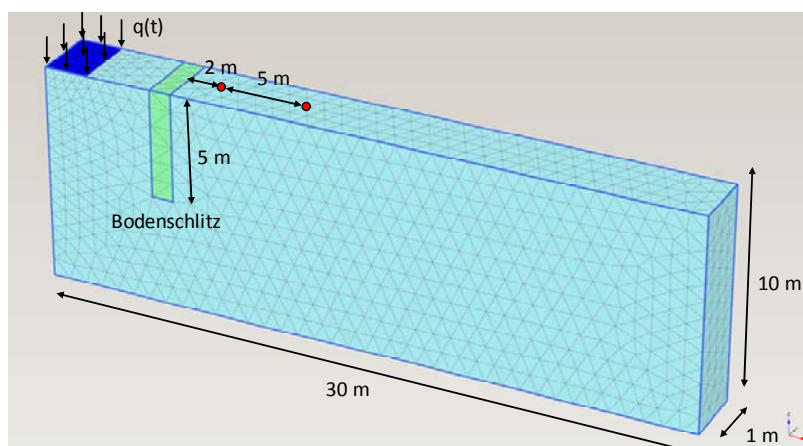


Bild 4.1 Situation

Bild 4.2 zeigt qualitativ das Verschiebungsfeld im "eingeschwungenen" Zustand bei der Anregung mit einer Frequenz von 16 bzw. 64 Hz jeweils ohne und mit Bodenschlitz. An der Oberfläche ist klar die sich ausbreitende Welle ersichtlich mit einer Wellenlänge von etwa 11 m bei 16 Hz und 2.6 m bei 64 Hz. Der Bodenschlitz hat auf die Form der Welle selbst bei 64 Hz keinen ersichtlichen Einfluss. Dies dürfte einerseits am eingeschwungenen Zustand liegen, d.h. sich die Energie infolge Streuung, Beugung und Reflektionen im gesamten Bereich verteilt hat, andererseits am nicht vollkommen leeren Schlitz, d.h. sich doch ein kleiner Anteil der Energie durch den Schlitz ausgebreitet hat.

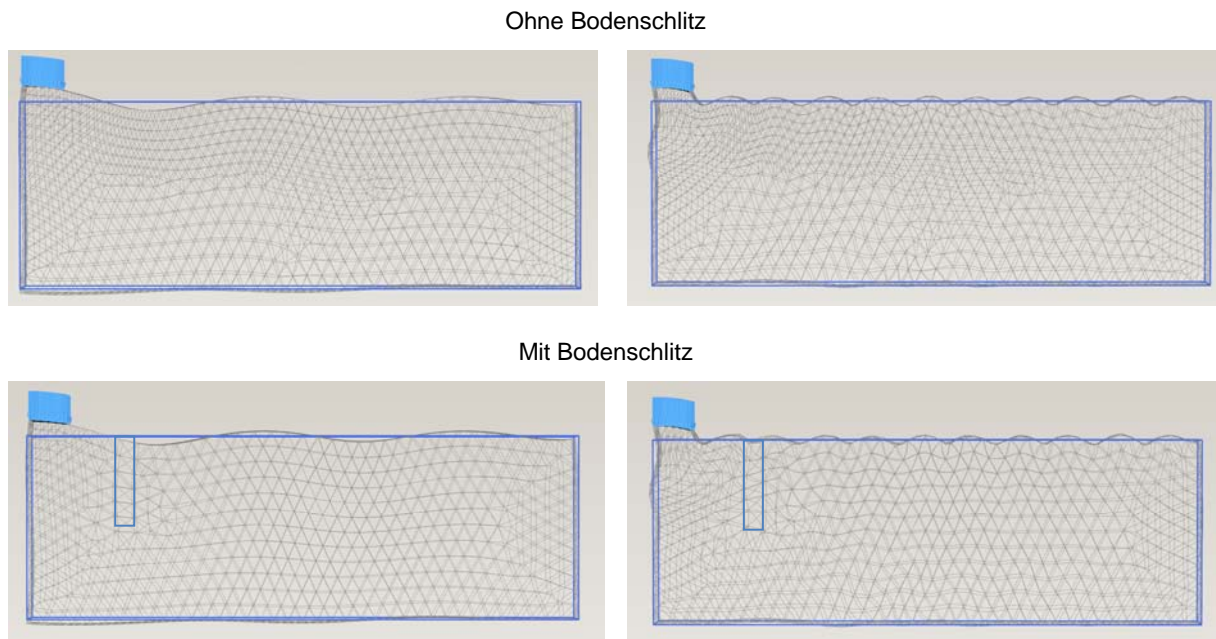


Bild 4.2 Verschiebungsfeld ohne und mit Bodenschlitz bei 16 Hz (links) und 64 Hz (rechts)

Bild 4.3 zeigt die Reduktionsfaktoren für die maximalen Partikelgeschwindigkeiten bei verschiedenen Frequenzen in einem Abstand von 2 m und 7 m hinter dem Bodenschlitz. Eingezeichnet sind ebenfalls die gemessenen Einfügespektren (Messung Asylstrasse) in einem Abstand von 1.5 m und 3.0 m hinter dem Bodenschlitz. Bei der FE-Berechnung zeigt sich unterhalb 30 Hz keine Reduktion der Vibrationen. In einem Abstand von 7 m hinter dem Schlitz ergibt sich auch bei höheren Frequenzen keine Reduktion. Der Vergleich mit den Messungen

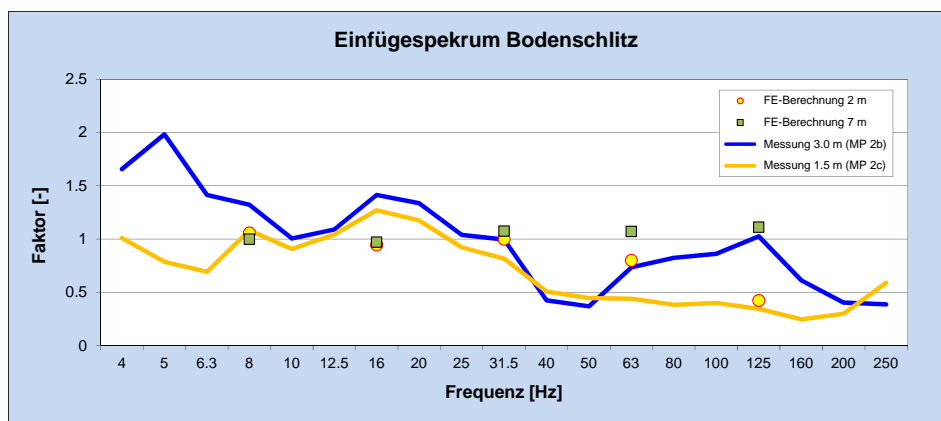


Bild 4.3 Einfügespektren für Bodenschlitz berechnet mit FE-Modell und aus Messung Asylstrasse

zeigt qualitativ eine gute Übereinstimmung. Dieses Resultat ist jedoch mit Vorsicht zu geniessen, da einerseits bei der Messung viele unbekannte Einflussfaktoren, wie z.B. der Bodenaufbau, vorhanden waren, andererseits auch bei der FE-Berechnung Annahmen z.B. bezüglich Bodeneigenschaften getroffen werden mussten. Auch konnte bei 128 Hz wegen der beschränkten Rechenkapazität die Netzeinteilung im Vergleich zur Wellenlänge nicht genügend klein gewählt werden. Weiter sind im Modell Effekte, die sich aus der räumlichen Geometrie und der endlichen Länge des Bodenschlitzes ergeben, nicht berücksichtigt. Dennoch zeigt die Untersuchung, dass nicht nur das Zeitsignal (z.B. in Form der maximalen Amplitude), sondern unbedingt auch das dazugehörige Amplitudenspektrum im Frequenzbereich betrachtet werden muss, um die Wirksamkeit eines Bodenschlitzes zu beurteilen.

5 Diskussion

Die Messungen zeigten, dass sich bei tiefen Frequenzen unterhalb 30 Hz keine Abminderung der Erschütterungen durch das Einbringen eines Bodenschlitzes beobachten lässt. Dies bestätigt, dass die Schlitztiefe in etwa der Wellenlänge entsprechen sollte, um die sich ausbreitenden Wellen beeinflussen zu können. Bei 30 Hz und mit einer Schlitztiefe von 4 m (entspricht der Wellenlänge) ergibt sich für die S-Welle eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 120 m/s, was einem „durchschnittlichen“ Boden entspricht. Dies bedeutet umgekehrt, dass die Tiefen der untersuchten Bodenschlitze a priori zu gering waren, um die Amplituden bei tiefen Frequenzen wirksam reduzieren zu können. Dennoch stellen die betrachteten Bodenschlitze einen sehr grossen Eingriff dar, der mit entsprechendem baulichem Aufwand verbunden war. Die Messungen zeigten weiter, dass bei hohen Frequenzen, d.h. wenn die entsprechenden Wellenlängen viel kleiner sind als die Bodenschlitztiefe, ein Reduktionsfaktor von höchstens 0.5 erreicht wurde. Dies ist für eine gezielte Massnahme klar zu wenig.

Die untersuchten Bodenschlitze waren seitlich mit Stahlwänden und quer mit Spriessen ausgebaut, um die Stabilität zu gewährleisten. Auch ein Bodenschlitz als Massnahme gegen Erschütterungen muss stabil sein, insbesondere dürfen sich die nahen Gleise durch die Massnahme nicht einsenken. Dies bedeutet, dass bezüglich Steifigkeit dieselben Anforderungen gelten und somit die betrachteten Schlitze durchaus als repräsentativ angesehen werden können. Auch dürften die Spriessen wegen ihrer gelenkigen Lagerung die vertikalen Bewegungen der S- und Rayleighwelle nicht übertragen.

Ein Bodenschlitz entspricht auch einem Übergang von einem Medium in ein anderes. Je nach Eigenschaften der Materialien wird an der Grenze mehr oder weniger Energie reflektiert. Entscheidend für die S-Welle ist der Unterschied des Produkts aus Dichte und Schubmodul der beiden Materialien. Ist der Unterschied gross, wird mehr Energie reflektiert, ist er klein, wird mehr Energie transmittiert. Bei Luft ist diese Produkt Null, folglich ist ein luftgefüllter Schlitz optimal. Ein Beton gefüllter Schlitz könnte allenfalls in einem sehr weichen Material reflektierend wirken.

Die zum Teil geringe Wirkung eines Bodenschlitzes hat auch mit der räumlichen Geometrie zu tun. Die Weglänge zwischen Quelle und Empfänger über eine Reflektion an einer tieferliegenden Bodenschicht ist oft nur wenig grösser als der direkte Weg (siehe Bild 2.2). Auch in der Aufsicht und der Betrachtung eines Zuges als wandernde Punktquelle ergeben sich je nach Anordnung nur geringe Distanzunterschiede (siehe Bild 5.1). Um die Erschütterungen beim Empfänger zu halbieren, müsste die Weglänge in etwa verdoppelt werden. Hinzu kommt, dass sich die Wellen um Ecken beugen und so den Wirkungsbereich eines Bodenschlitzes verkleinern.

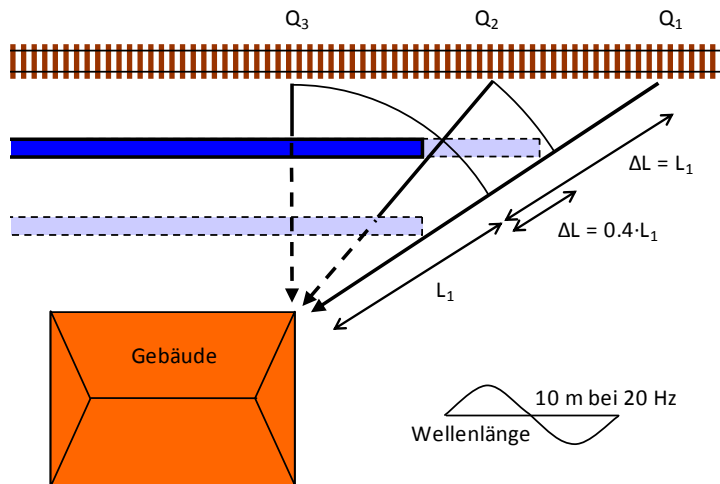


Bild 5.1 Situation mit Zug als Punktquelle und verschiedenen Lagen eines Bodenschlitzes (blau)

Mit einer 3D-Modellierung mit einem kommerziellen FE-Programm, die die gesamte räumliche Geometrie adäquat abbildet, stösst man mit normalen Computern schnell an Grenzen. Insbesondere wenn die für den Körperschall entscheidenden Frequenzen bis 160 Hz betrachtet werden, muss die Netzeinteilung so klein gewählt werden, dass mit der zur Verfügung stehenden Anzahl Elemente nicht mehr der gesamte interessierende Bereich abgebildet werden kann. Auch stellt sich hier die Frage nach dem genauen Bodenaufbau und den Bodeneigenschaften, die oftmals nur grob abgeschätzt werden können, aber einen grossen, auf die Abminderungswirkung des Bodenschlitzes auch negativen Einfluss haben können.

6 Schlussbemerkung

Die vom Schienenverkehr verursachten Erschütterungen breiten sich über das Erdreich bis zum Gebäude aus. Dieser Vorgang der Wellenausbreitung ist sehr komplex, einerseits wegen der unterschiedlichen Wellenformen und andererseits wegen der Effekte wie Reflektionen, Beugung oder Wellenumwandlungen an Materialgrenzen. Analytische Lösungen gibt es nur in stark vereinfachten Betrachtungen und numerische Simulationen benötigen schnell sehr grosse Rechenkapazitäten. Weiter kommt hinzu, dass sowohl Bodenaufbau wie auch Bodeneigenschaften oftmals nicht hinreichend bekannt sind. Dennoch kann mit einigen einfachen Überlegungen das Verständnis für die Vorgänge bei der Wellenausbreitung aufgebaut werden. Ein erster wichtiger Schritt dabei ist die Betrachtung der tatsächlichen Länge der sich im Boden ausbreitenden Welle im Vergleich zu den anderen geometrischen Dimensionen. Für einen Bodenschlitz oder auch andere erschütterungsreduzierende Massnahmen im Boden zwischen Quelle und Empfänger bedeutet dies, dass die relevanten Abmessungen der Massnahme mindestens in etwa einer Wellenlänge entsprechen sollten. Bei grösseren Wellenlängen und somit tieferen Frequenzen verschwindet der Einfluss des eingebauten Hindernisses und somit auch die Wirksamkeit der Massnahme. Mit der hier vorgestellten Untersuchung wird dies bestätigt.

Ein Bodenschlitz wie hier betrachtet bewirkt somit bei tiefen Frequenzen unterhalb 30 Hz keine Erschütterungsabminderung, es kann sogar eine Verstärkung der Erschütterung auftreten. Oberhalb 30 Hz werden die Erschütterungen durch den Bodenschlitz zwar reduziert, die Abminderung liegt jedoch lediglich zwischen 0 % und 50 %. Bei einer erschütterungsreduzierenden Massnahme muss dies als klar nicht genügend betrachtet werden.