

Erschütterungs- und Körperschallimmissionen beim Schienenverkehr

Probleme und Lösungsmöglichkeiten

Peter Steinhauser
Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien

1. EINLEITUNG

Erschütterungen bilden eine für den Schienenverkehr typische Emissionsform, die beim Bau von Hochleistungsbahnen hinsichtlich des Immissionsschutzes der Anrainer zu berücksichtigen ist. Es ist daher erforderlich, Prognosen zu erstellen und bei Bedarf geeignete Maßnahmen zur Dämmung auszuarbeiten.

Dazu muss man die Emissionscharakteristik von Zug und Fahrweg, die geodynamischen Bedingungen für die Erschütterungsausbreitung und die Schwingungseigenschaften der betroffenen Gebäude berücksichtigen. Die Frequenzselektivität dieser gekoppelten, schwingungsfähigen Systeme steuert dabei in komplexer Weise die übertragenen Schwingungsfrequenzen und somit das Auftreten von Resonanzen. Deshalb gibt es bei dynamischen Fragestellungen „keine sichere Seite“, sondern dieselbe Maßnahme kann einmal erschütterungsmindernd und anderswo verstärkend wirken.

Ausgehend von der Erschütterungswahrnehmung des Menschen und den Problemen der Erschütterungsvorhersage, die sich aus der begrenzten Kenntnis der Untergrund- und Bauwerksstrukturen ergeben, werden verschiedene Möglichkeiten zur Prognosenverbesserung und zum Erschütterungsdämmung diskutiert.

2. ERSCHÜTTERUNGSWAHRNEHMUNG

Seismische Schwingungen werden von Menschen bekanntlich in zweifacher Weise wahrgenommen, und zwar direkt als fühlbare Erschütterungsimmissionen und indirekt in Form des durch die Bodenschwingungen angeregten sekundären Luftschalls als hörbare Körperabstrahlungsschallimmissionen.

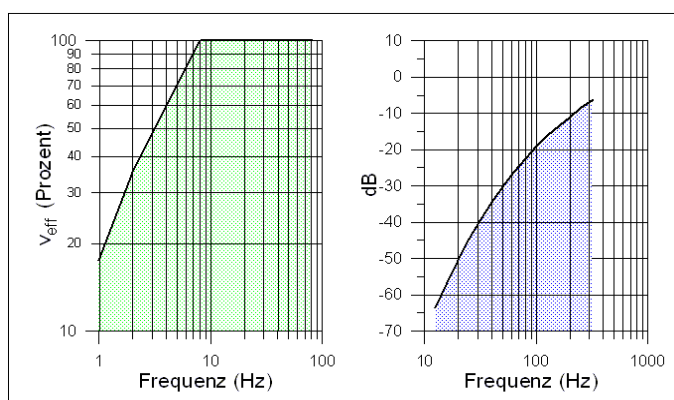


Abb. 1: Frequenzbereich und Bewertungsfunktion der menschlichen Wahrnehmung von Erschütterungen (links) und sekundären Luftschallimmissionen (rechts)

Um die menschliche Wahrnehmung dabei frequenzunabhängig zahlenmäßig erfassen zu können, sind spezielle Frequenzbewertungsfilter der Schwingungsmessgrößen erforderlich, die die Bewertete Schwingstärke K und A -bewerteten Schallpegel als Ergebnis liefern. Wie Abb. 1 außerdem zeigt, umfassen beide Immissionsformen unterschiedliche Spektralbereiche.

Qualitativ lässt sich aus der unterschiedlichen Frequenzabhängigkeit beider Wahrnehmungsformen ableiten, dass tieffrequente Schwingungen ($f < 20 - 30$ Hz) mit wachsender Intensität zuerst spürbar und höherfrequente zuerst hörbar werden.

Von den zukünftigen Anrainern werden oft erschütterungsmäßige Schwellwertkriterien, wie Spürbarkeit oder Aufwecken angesprochen, die leider nicht mit der gewünschten Eindeutigkeit beantwortet werden können.

Die Fühlbarkeit von Erschütterungsimmissionen hängt beispielsweise wesentlich von der Aufmerksamkeit der Betroffenen ab. Bei gespannter Aufmerksamkeit wird eine Erschütterung der Bewerteten Schwingstärke $K = 0,1$ wahrgenommen werden. Jede Ablenkung (Zuhören, Lesen, etc.) vermindert die Wahrnehmbarkeit von Erschütterungen bereits beträchtlich und eigene Aktivitäten (Reden, Essen, etc.) noch mehr. Dementsprechend kann die Fühlschwelle nicht als Schwellwert sondern nur als Schwellenband angegeben werden, das von mehreren Faktoren beeinflusst wird: häufig wird die Bewertete Schwingstärke dabei im Bereich von $K = 0,15$ bis $0,25$ liegen.

Abgestrahlte Körperschallimmissionen werden hörbar sobald sie den Grundgeräuschpegel überschreiten. Dieser ist in Wohngebieten verhältnismäßig niedrig anzusetzen: in geschlossenen Räumen wird er etwa den Bereich von 15 dB (A) bei Nacht und 25 dB (A) bei Tag erreichen. Es sind aber auch nächtliche Grundgeräuschpegel von lediglich 4 dB (A) im Bereich von Bahntunnelprojekten gemessen worden. Die Wahrnehmbarkeit von Bahnerschütterungen wird daher sowohl von persönlichen als auch von lagemäßigen Faktoren stark beeinflusst und besitzt somit eine große Bandbreite.

Hinsichtlich erschütterungsbedingter Schlafstörungen bereitet die Untersuchung unter Laborbedingungen verständlicherweise Schwierigkeiten, weshalb andere Methoden zu ihrer Erforschung verwendet werden müssen. Hierzu eignen sich die vom Erdbebendienst gesammelten Meldungen von nächtlichen Erdbeben besonders gut. Dabei kann die Wirkung von Erdbeben unterschiedlichen Stärkegrades auf außerordentlich viele Personen in ihrer natürlichen Umgebung ermittelt werden. Gleichzeitig liefern die seismischen Registrierungen die erforderlichen Angaben über Frequenzspektren und Bebenstärke. Nach der diesbezüglichen Auswertung des österreichischen Erdbebendienstes besitzen nächtliche Erdbeben entsprechend der in Tab. 1 angegebenen Intensitäten eine aufweckende Wirkung unterschiedlichen Grades.

Tab. 1: "Weckschwelle" bei Erdbeben

EMS-Intensität	Bewertete Schwingstärke K	Auswirkung auf Menschen
4°	0,8	einzelne erwachen (10 – 20 %)
5°	2,5	viele erwachen (50 – 60 %)
5,5°	4,2	alle erwachen

Da die Schlaftiefe eines Menschen im Laufe einer Nacht schwankt, kann dies so interpretiert werden, dass bei $K = 0,8$ Menschen aufwachen, die sich in einer Leichtschlafphase befinden, während bei $K = 4,2$ Menschen auch aus dem tiefsten Schlaf heraus geweckt werden.

Hinsichtlich der Aufwachreaktion infolge von Schallimmissions-Ereignissen hat Griefahn (1990) eine umfassende Untersuchung durchgeführt. Demnach ist in Abhängigkeit von der Zahl der Ereignisse ab einen Maximalpegel von 54 – 59 dB (A) mit einer Aufwachreaktion zu rechnen.

3. ERSCHÜTTERUNGS-AUSBREITUNG

Die dynamischen Übertragungseigenschaften für seismische Schwingungen werden durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Neben den elastischen Materialeigenschaften und der inelastischen Absorption beeinflussen Abmessung und Anordnung der verschiedenen geologischen Körper die Ausbreitung der Erschütterungsenergie über Brechung, Reflexion und Beu-

gung der seismischen Wellen maßgeblich und bestimmen gleichzeitig das Resonanzverhalten des Untergrundes. Im Gegensatz zur Akustik (nur Druckwellen) treten im Untergrund alle Arten von seismischen Wellen auf: neben Raumwellen vom Typ Druck- und Scherwellen existieren noch Oberflächenwellen vom Rayleigh- und Love Typ (vgl. Abb. 2). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Bodenerschütterungen ist nicht nur für alle Wellenarten unterschiedlich groß sondern variiert auch je nach den elastischen Eigenschaften der jeweiligen geologischen Körper in einem Bereich von etwa 60 – 6000 m/s.

Zusätzlich beeinflusst sowohl die Quellgeometrie wie auch das unterschiedliche Verhalten von Raum- und Oberflächenwellen die Erschütterungsausbreitung: die unterschiedliche räumliche Divergenz – auch geometrische Dämpfung genannt – führt zu verschiedenen Reichweiten der Erschütterungen. Während Erschütterungserreger an der Geländeoberfläche vor allem weitreichende Oberflächenwellen anregen, bilden bei der Tiefenanregung in einem Tunnel Raumwellen die bevorzugte Erschütterungsform, die eine deutlich geringere Reichweite besitzen.

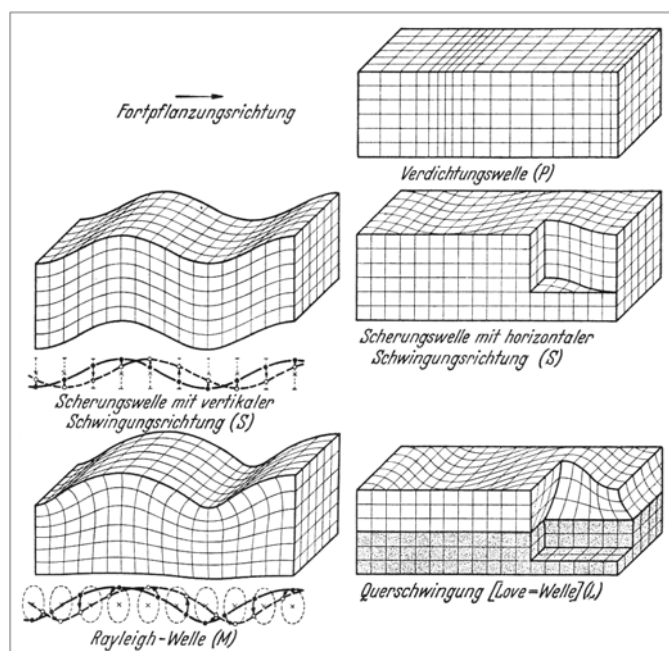


Abb. 2: Schwingungsbilder von Raum- und Oberflächenwellen (Jung, 1953)

Weitere Komplikationen bilden frequenzselektive Schwingungsdämpfung oder Verstärkung insbesondere als Folge des Eigenschwingungsverhaltens der Schichten und Schichtpakete. Gelegentlich werden auch geführte Kanalwellen beobachtet, die bei sandwichartig aufgebauten Untergrundstrukturen, beispielsweise in Störungen, außerordentlich große Erschütterungsreichweiten hervorrufen können. Kanalwellen dispergieren (d.h. ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist frequenzabhängig) und besitzen eine besonders auffällige Schwingungsgruppe am hochfrequenten Ende ihres Frequenzspektrums, die einem Überschallknall ähnliche sogenannte Airy-Phase; Abb. 3 veranschaulicht dies mit dem Wellenzug einer Kanalwelle, die zunächst mit stetig anwachsenden Frequenzen langsam an Intensität gewinnt und dann explosionsartig in dem hochfrequenten Energieausbruch der Airy-Phase endet. Da der Körperabstrahlungsschall hochfrequenter Erschütterungen nach Abb. 1 aber deutlich besser hörbar ist als tieffrequente führt dieses Phänomen dazu, dass die Körperschallimmissionen in diesem Fall wesentlich kräftiger verstärkt werden als die Erschütterungsimmissionen.

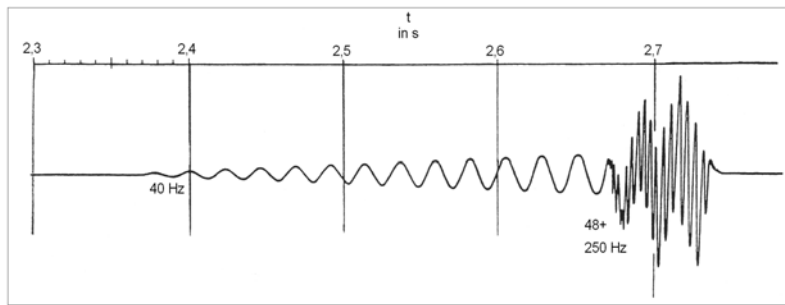


Abb. 3: Seismogramm einer Kanalwelle

Insgesamt wird somit die Erschütterungsausbreitung durch außerordentlich viele verschiedene Faktoren beeinflusst. Es ist daher nicht überraschend, dass selbst umfassende geologische und geotechnische Vorkundungen alleine nicht ausreichen, die Bedingungen für die lokale Erschütterungsausbreitung hinreichend genau berechnen zu können: Es sind vielmehr experimentelle Untersuchungen vor Ort erforderlich.

Eine weitere Schwingungsform sind Biegewellen (Abb. 4), die in Decken, Wänden sowie Platten aller Art und somit in Bauteilen auftreten. Da die Bewegungsrichtung dieser Wellenform senkrecht zur Ausbreitungsrichtung und damit auch senkrecht zur Plattenoberfläche erfolgt, neigen Biegewellen besonders zur Schallabstrahlung. Ebenso wie die Kanalwellen besitzen sie eine frequenzabhängige Ausbreitungsgeschwindigkeit.

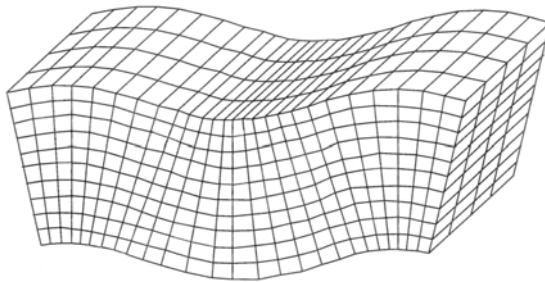


Abb. 4: Schwingungsbild einer Biegewelle

Aus den hier dargestellten Zusammenhängen ergibt sich, dass die Zugserschütterungen als dreidimensionaler Schwingungsvorgang gemessen werden müssen, wobei die Seismogramme sowohl im Zeitbereich (Spitzenwerte, Erschütterungsdauer) als auch im Frequenzbereich ausgewertet werden müssen.

Weiters sind die elastischen Bedingungen entlang des Übertragungsweges (elastische Moduli, Eigenfrequenzen) von Bedeutung, wofür Laufzeitmessungen erforderlich sind, die nach refraktionsseismischen Methoden bearbeitet werden.

4. MATERIALBEANSPRUCHUNG UND BAUWERKSVERHALTEN

Schwingungen wirken auf Gebäude ebenso wie auf jede andere Materie in Form von Druck- und Scherspannungen. In welchem Ausmaß Erschütterungen diese dynamische Spannungen hervorrufen, veranschaulicht Abb. 5 am Beispiel der Scherspannungen, deren Größe durch den Scherwinkel τ charakterisiert wird. Je größer dabei die Ausbreitungsgeschwindigkeit c der die Erschütterungen bewirkenden Scherwelle wird, desto kleiner wird der Scherwinkel und damit die dynamische Scherspannung bei gleicher Schwinggeschwindigkeit der Erschütterungen.

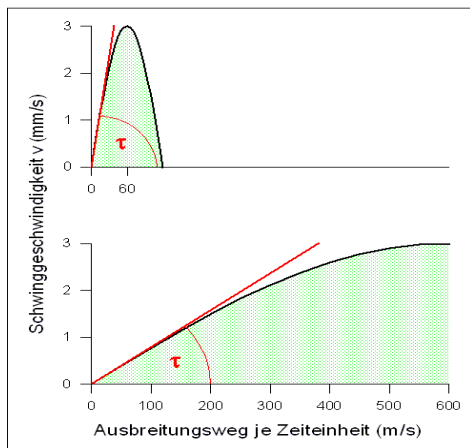


Abb. 5 Unterschiedliche Scherwirkung einer Erschütterung mit dem gleichen Schwinggeschwindigkeitsmaximum in Abhängigkeit von der Ausbreitungsgeschwindigkeit

oben: geringe Ausbreitungsgeschwindigkeit – kurzer Ausbreitungsweg – große Scherbeanspruchung

unten: hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit – langer Ausbreitungsweg - geringe Scherbeanspruchung

Selbstverständlich ist aber zu berücksichtigen, dass Bauwerke und Gebäudeteile ebenso der Untergrund als elastische Körper Eigenfrequenzen besitzen. Diese hängen von den Materialeigenschaften, den Dimensionen (Bauwerksabmessungen, Schichtmächtigkeiten im Untergrund etc.) und der Form ab. Bei einer Anregung im Eigenfrequenzbereich kommt es dann zu einer Schwingungsanfächerung und entsprechender Verstärkung der Erschütterungen.

Schließlich sind auch noch die Dämpfungseigenschaften der betroffenen Strukturen von Bedeutung wie sie insbesondere bei verschiedenen Deckenkonstruktionen sehr unterschiedlich sein können.

In diesem Sinn ist für eine erste Beurteilung des dynamischen Verhaltens eines Gebäudes die Angabe von Hausgröße, Alter, Bauweise, Fundamentierung, Geschosszahl, der Deckenausführung und des Bauzustands erforderlich.

Diese Größen sind für die Bauwerks- und Bauteileigenfrequenzen, die Steifigkeit, Duktilität, die Dämpfung und die allgemeine Stabilität eines Bauwerks maßgeblich.

Entgegen den Befürchtungen der Anrainer zeigen aber alle Erfahrungen, dass Zugserschütterungen nicht die Stärke erreichen um benachbarte Gebäude zu gefährden. Bei Immissionsmessungen in Gebäuden kann daher das Hauptaugenmerk auf das Schwingungsverhalten des Bauwerks, die hausinterne Schwingungsverstärkung und insbesondere auf die Deckenschwingungen samt Eigenfrequenzen und Dämpfungseigenschaften im Aufenthaltsbereich der Menschen konzentriert werden. In diesem Sinne ist bei der Erschütterungseinwirkung von Zügen nicht sosehr die Belastbarkeit eines Gebäudes von Interesse als das dabei auftretende Resonanzverhalten.

5. SCHIENENVERKEHRSERSCHÜTTERUNGEN

Prinzipiell übt jeder Zug als rollende Last einen zeitlich veränderlichen Druck auf den Untergrund aus. Dadurch wird unter jeder Achse eine geringfügige elastische Einsenkung des Untergrunds bewirkt, deren Größe somit sowohl von der Höhe der Last als auch vom E-Modul der tragenden Schicht (z. B. Fels oder Lockersediment) abhängt. Diese Einsenkungen breiten sich dann als seismische Schwingungen im Untergrund weiter aus.

Weiters können Störfaktoren die Erschütterungen im Einzelfall beträchtlich verstärken und das Frequenzspektrum verbreitern, sodass zahlreiche Parameter die Zugserschütterungen beeinflussen, insbesondere

- Eigengewicht und ungefederte Radmasse
- Fahrtgeschwindigkeit
- Schwellenabstand und Achskonfiguration
- Weichen und Schienenstöße
- Waggon- und Bauteilschwingungen
- Flachstellen und Unwuchten der Räder
- Trassenführung (Kurven, Neigung)
- Oberbau- und Unterbauausführung
- Trassenlage (Damm, Einschnitt, eben)
- freie Strecke oder Tunnelstrecke

Die Größe der von einem Zug ausgelösten Erschütterungen besitzt daher eine große Streubreite. Frequenzmäßig sind breitbandige Spektren charakteristisch. Im folgenden werden einige Effekte beispielhaft diskutiert.

Die steigende Verwendung von Scheibenbremsen wird die abnutzungsbedingten Abweichungen der Radlauflächen vom idealen Kreisprofil beträchtlich verringern (Thompson et al., 1997) und so zur Erschütterungsminderung beitragen. Abb. 6 zeigt dies am Beispiel charakteristischer Radumfangprofile eines klotzgebremsten Rades (links) und eines scheibengebremsten Rades (rechts). Die Fourier-Spektren besitzen beim klotzgebremsten Rad viermal so große Amplitudenmaxima wie beim scheibengebremsten und treten bei signifikant größeren Wellenlängen, d. h. niedrigeren Frequenzen auf. Dementsprechend ist die Auswirkung der Klotzbremsen auf die Erschütterungs- und Körperschallwahrnehmung größer als auf die des direkten Luftschalls (Lenhardt, 1999).

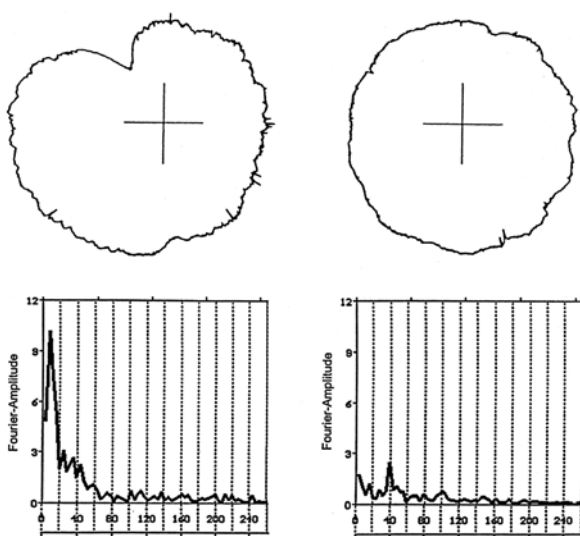


Abb. 6: Rauigkeit und Frequenzspektren der Radlauflächen in Abhängigkeit von Bremsystemen
links: Klotzbremsen
rechts: Scheibenbremsen
(Frequenzen für 90 cm Raddurchmesser und 80 km/h)

Bei Weichen bildet das offene Herzstück eine erschütterungsverstärkende Störquelle; Messungen haben dabei um bis zu 100 % größere Erschütterungsemissionen ergeben. Besonders ausgeprägt ist diese Erschütterungsverstärkung bei Zügen mit hoher Laufruhe. Je geringer die Laufruhe eines Zuges wird, umso weniger macht sich das offene Herzstück als zusätzliche Störstelle bemerkbar.

Eine Emissionsverminderung ist durch Weichen mit beweglichen Herzstück möglich; deren Erschütterungsemissionen unterscheiden sich im Rahmen der Messgenauigkeit nicht mehr von denen normaler Streckengleise, wie Messungen beim Bahnhof Lambach ergeben haben.

Die Fahrtgeschwindigkeit der Züge besitzt entscheidenden Einfluss auf die ausgelösten Erschütterungen. Bei den Versuchsfaktoren in Markersdorf konnte gleich der Einfluss der Fahrtgeschwindigkeit bis $u = 250$ km/h auf die Erschütterungsemissionen untersucht werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 wiedergegeben.

Die Regressionsanalyse ergibt dabei eine funktionale Abhängigkeit der Form

$$V_{R,max} = a \sqrt{u^3}$$

Demnach steigen die Erschütterungsemissionen mit wachsender Fahrtgeschwindigkeit progressiv an. Dieses Ergebnis steht allerdings im Widerspruch zu den beim normalen Bahnverkehr beobachteten Erschütterungsemissionen, die bei breiter Streuung der Einzelwerte nur degressiv gemäß der Beziehung

$$V_{R,max} = a \sqrt{u}$$

mit der Fahrtgeschwindigkeit zunehmen.

Die Ursache hierfür ist möglicherweise darin zu suchen, dass beim Regelverkehr Güter- und Reisezüge mit unterschiedlichen Fahrtgeschwindigkeiten verkehren, wobei die schnelleren Reisezüge auch höhere Laufruhe besitzen.

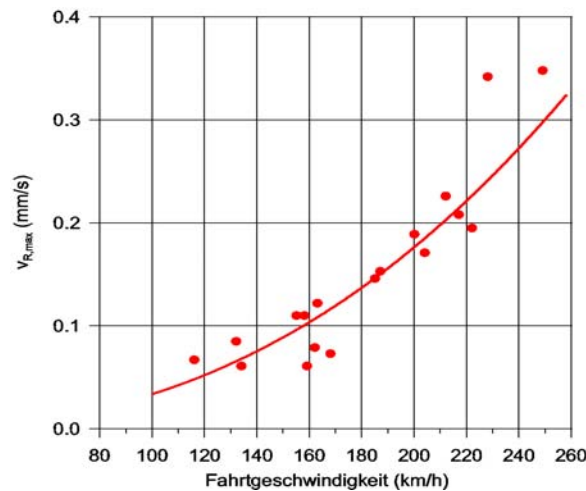


Abb. 7: Abhängigkeit der maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit am Emissionsmesspunkt von der Fahrtgeschwindigkeit

6. GEODYNAMISCHE MESSMETHODEN

Der Erschütterungs- und Körperschallschutz beim Schienenverkehr erfordert aus den vorhin dargelegten Gründen neben Zugserschütterungsmessungen auch in-situ Versuche zur Bestimmung der lokal vorhandenen dynamischen Eigenschaften und Strukturen. Als geodynamische Messverfahren haben sich dabei die Refraktionsseismik und Durchschallungsversuche in Erkundungsbohrungen bewährt (Steinhauser, 1996). aber auch die mikroseismische Bodenunruhe kann für dynamische Analysen verwendet werden (Wenzel et al., 1999).

Zur Bestimmung der elastischen Eigenschaften von geologischen Strukturen eignet sich das Verfahren der Refraktionsseismik am besten, da bei dieser Methode die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der seismischen Wellen in den einzelnen Untergrundschichten und die Tiefenlage der Schichtgrenzen direkt ermittelt werden können. Dies gilt zunächst für Longitudinalwellen (P-Wellen), kann aber mit Hilfe spezieller Erschütterungs-Anregungstechniken auch für Scher- oder Transversalwellen (S-Wellen) erweitert werden.

Aus den Ausbreitungsgeschwindigkeiten können dann die dynamischen Elastizitätskonstanten der Untergrundschichten berechnet werden.

Schwierigkeiten bereitet die Vorhersage der Ausbreitung von unterirdischen Erschütterungsquellen wie einem projektierten Eisenbahntunnel aus. Um nun die lokalen Ausbreitungsbedingungen der Erschütterungen von einer zukünftigen Tunneltrasse aus zu erfassen, besteht nur die Möglichkeit, in bestehenden Erkundungsbohrungen Durchschallungsversuche mit Hilfe von Kleinstsprengungen vom Tunnelniveau aus durchzuführen und bei den Anrainergebäuden die ankommenden Erschütterungen zu messen. Da Sprengerschütterungen ein sehr breites Frequenzspektrum besitzen, wird jenes von Bahnerschütterungen jedenfalls vollständig umfasst.

Bei diesen Durchschallungsversuchen wird sowohl die geometrische Divergenz als auch die inelastische Absorption der Erschütterungen entlang jenes Ausbreitungsweges unmittelbar bestimmt, den auch die zukünftigen Bahnerschütterungen nehmen werden, ohne dass der Ausbreitungsweg selbst im Detail bestimmt werden muss: die direkte Messung ersetzt wirkungsvoll schwer erhältliche Informationen über geologische Strukturen.

7. MÖGLICHKEITEN ZUR PROGNOSEVERBESSERUNG

Im folgenden wird diskutiert, welche Möglichkeiten zur Verminderung der Prognoseunsicherheit sich durch die Verwendung eines analytischen Geodynamik-Modells ergeben, aber auch welche Aussagen durch die synthetische Schwingungsanregung mittels Schwingungsgenerator möglich werden.

7.1 Einfügungsdämmmaß-Modell

Die spektrale Dämmwirkung von Unterschottermatten (USM) und Masse-Feder-Systemen (MFS) kann mit Hilfe des bekannten Verfahrens von Wettschureck und Kurze (1985) ermittelt werden. Dieses Verfahren behandelt die Schwingungsausbreitung als Übertragungskette von mechanischen Zweitoren, die das Schwingungsverhalten dünner Schichten gut erfassen. Als maßgebliche Einflussgrößen berücksichtigt das Modell die Radsatzmasse sowie die Schotterbett- und die Mattensteife. Die Abschlussimpedanz der Mattenunterlage kann in diesem Modell vernachlässigt werden, wenn sie groß zur Quellimpedanz (Impedanz des Systems Radsatz – Schiene – Schwelle - Schotterbett) wird, was bei einer Tunnelsohle aus Beton im erforderlichen Ausmaß erfüllt ist. Dies bestätigt auch der Vergleich von Vorhersageberechnungen nach diesem Verfahren mit den tatsächlichen Messergebnissen, wie dies in Abb. 8 am Beispiel des Römerbergtunnels, wo ein MFS mit 6 Tonnen je Laufmeter und 13 Hz-Eigenfrequenz eingebaut worden ist.

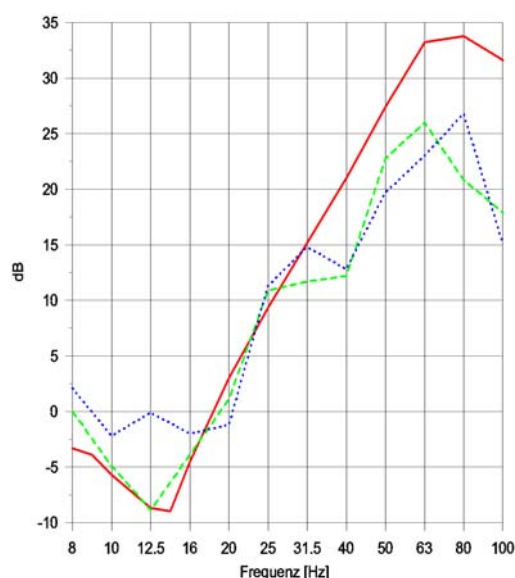


Abb. 8: Vergleich der MFS-Prognose (rot) für den Römerbergtunnel mit Meßergebnissen (blau und grün)

Bei geringerer Steifigkeit der USM-Bettung, wie dies etwa auf der freien Strecke beim Bahnunterbau im allgemeinen der Fall ist, muss zusätzlich die Abschlussimpedanz berücksichtigt werden (Wettschureck, 1997). Damit geht der Untergrund mit den elastischen Eigenschaften der Unterbau-Deckschicht ins Modell ein. Diese Steifigkeitsverminderung bewirkt eine – an sich – positive Verschiebung des Dämmbereichs zu den niederen Frequenzen hin, aber bei gleichzeitiger beträchtlicher Reduktion der Dämmwirkung, die außerdem mit steigender Frequenz rasch weiter abnimmt.

Trotz dieser sehr aussagekräftigen Ergebnisse ist zu beachten, dass dieses Modell nur das elastische Verhalten der Schicht erfasst, auf der die USM aufliegt. Der gesamte Untergrund ist durch tiefreichende, wesentlich komplexere geologische Strukturen gekennzeichnet. Diese können aber durch die Zweitoren-Theorie nicht mehr adäquat erfasst werden, weil Impedanzen über die Verhältnisse von Kraft zu Schwinggeschwindigkeit an sehr kleinen Flächen definiert sind, während nun ein dynamisches Untergrundmodell dicker Schichten großer Ausdeh-

nen über die Verhältnisse von Kraft zu Schwinggeschwindigkeit an sehr kleinen Flächen definiert sind, während nun ein dynamisches Untergrundmodell dicker Schichten großer Ausdeh-

nung erforderlich ist, um die Wechselwirkung USM-Untergrund umfassend behandeln zu können. Als hierfür geeigneter Ausgangspunkt bietet sich die Theorie von Roesset (1970) an, um die Mächtigkeit und die elastischen Eigenschaften der einzelnen Schichten gesondert zu berücksichtigen und somit ein Modell zu entwickeln, das auch ausgeprägt gegliederte Eigenfrequenzspektren der Untergrundstrukturen erfassen kann (Horn, 2002).

7.2 Geodynamisches Untergrund-Modell

7.2.1 Modell-Aufbau

Bei den Veränderungen, die Zugserschütterungen bei ihrer Ausbreitung durch den Untergrund erfahren, handelt es sich um einen Filtereffekt mit Schwingungsverstärkung im Bereich der Eigenfrequenzen der jeweils vorhandenen Untergrundstrukturen und Dämpfung außerhalb dieser Frequenzbereiche. Diese Eigenfrequenzen hängen von den elastischen Moduli und den Schichtmächtigkeiten ab, wie dies für den einfachsten Fall der Eigenschwingungen aus Abb. 9 ersichtlich ist. In diesem Fall sind die Resonanzfrequenzen direkt proportional zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen und indirekt proportional zur Schichtmächtigkeit.

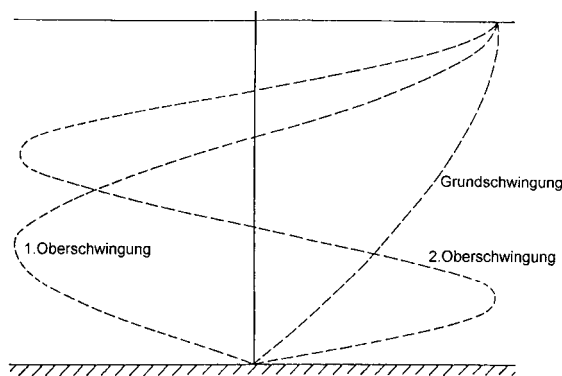


Abb. 9: Eigenschwingungen einer elastischen Schicht.

Infolge des Liniencharakters der Erschütterungsquelle "Zug" ist es zulässig, die Schwingungsausbreitung insgesamt als zweidimensionalen Vorgang zu behandeln und im Falle polarisierter Transversalwellen und Longitudinalwellen sogar auf ein eindimensionales Problem zu reduzieren. Der typische Aufbau des oberflächennahen Untergrunds besteht aus einer Reihe unterschiedlicher Sedimentschichten, die letztlich auf einem Grundgebirge aus Festgestein lagern. Dabei weisen die Schichtgrenzen häufig nur ein geringes Relief auf

und verlaufen in erster Näherung horizontal. Dabei ist außerdem die horizontale Ausdehnung der einzelnen Schichten meistens sehr viel größer als die jeweilige Schichtmächtigkeit. Daher kann der Untergrundaufbau im allgemeinen mit ausreichender Genauigkeit durch eine Folge ausgedehnter, ebener Schichten modellmäßig erfasst werden, wobei das Modell nach unten durch einen elastischen Halbraum abgeschlossen wird.

Für homogenen und isotropen Aufbau der Schichten existiert nach Roesset eine analytische Lösung für die Berechnung der frequenzabhängigen Übertragungsfunktion der Erschütterungen. Die Anzahl der auftretenden Schwingungsordnungen wird dabei durch die Viskosität des Materials nach oben hin begrenzt.

Wenn der Untergrund aus mehr als zwei Schichten aufgebaut ist, so überlagern sich die Resonanzfrequenzen der einzelnen Schichten, wobei die Bedeutung der Oberwellen beträchtlich zunimmt und oft dominant wird. Auch für komplexe Schichtfolgen ist die Berechnung der Frequenz-Übertragungsfunktion nach diesem Verfahren möglich.

Während die Resonanzfrequenzen unter den genannten Voraussetzungen mit den tatsächlich beobachteten Erschütterungsfrequenzen im allgemeinen gut übereinstimmen, sind die nach diesem Verfahren berechneten Übertragungsfaktoren als obere Abschätzung zu verstehen, da das plastische Materialverhalten insbesondere der Lockersedimente nicht ausreichend genau erfasst werden kann.

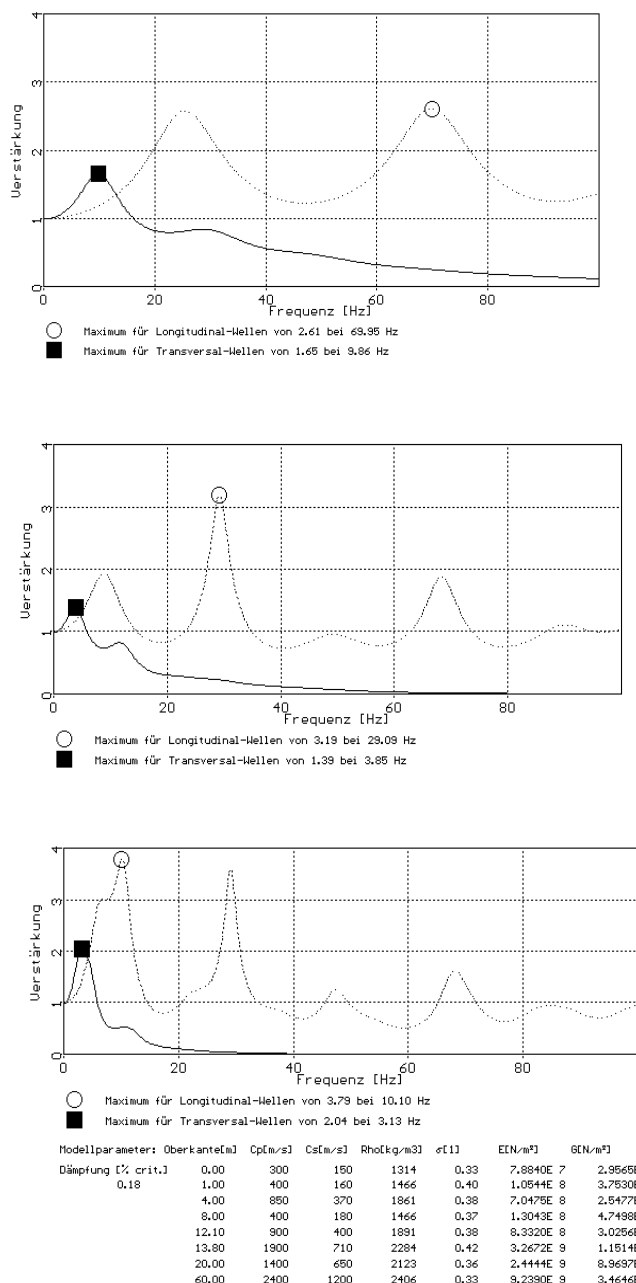


Abb. 10: Frequenzauflösung der Übertragungsfunktionen eines geodynamischen Modells in Abhängigkeit von der Tiefenauflösung des Modells
 oben: geringer Tiefgang (3 Schichten):
 höherfrequente Spektralanteile
 Mitte: mittlerer Tiefgang (5 Schichten):
 mittlere und höherfrequente Spektralanteile
 unten: großer Tiefgang (8 Schichten): Gesamtspektrum

7.2.2 Tiefenerstreckung des Modells

Dynamische Beanspruchungen rufen Wellen hervor, die sich im Untergrund mit entsprechend großen Wellenlängen ausbreiten. Die Folge davon ist, dass die Größe des Einflussbereichs in der Geodynamik wesentlich größer ist als beispielsweise bei statischen Fragestellungen (Studer u. Koller, 1997). Um den gesamten Frequenzbereich der Übertragungsspektren von seismischen Schwingungen zu erfassen, muss deshalb ein geodynamisches Modell den ganzen zur Schwingung angeregten Untergrundbereich berücksichtigen. Diesbezügliche Untersuchungen haben ergeben, dass dazu ein Tiefenbereich von etwa 70 – 100 m erforderlich ist, um insbesondere den niederfrequenten Spektralbereich vollständig im Modell zu erfassen. Abb. 10 zeigt dies am Beispiel eines Profilschnitts, der bei einer Schichtauflösung bis etwa 7 m Tiefe ein $f_{max} = 70$ Hz ergibt, das sich bei einer Auflösung bis 70 m Tiefe auf 10 Hz herunter verschiebt.

Da aber gerade die Dämmung tiefer Frequenzen schwierig ist, bekommt die sichere modellmäßige Erfassung dieses Spektralbereichs große Bedeutung. Seismische Profile für geodynamische Untersuchungen müssen daher aufwendiger angelegt werden als für andere ingenieurgeophysikalische Fragestellungen.

7.3 USM und Geodynamik

Um die elastische Rückkopplung des Untergrundmodells mit dem Einfügungsdämmmaß der USM ermitteln zu können, ist die Faltung der beiden Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich erforderlich.

Als Beispiel mit extremen Auswirkungen zeigt Abb. 11 das Einfügungsdämmmaß einer USM auf Planum. Während die Einfügungsdämmmaßberechnung eine Dämmwirkung oberhalb von 50 Hz prognostiziert, ergibt sich bei zusätzlicher Verwendung des Geodynamik Modells erst eine Dämmwirkung ab 90 Hz, die für die Zugserschütterungen nur noch geringe Bedeutung besitzt, wobei gleichzeitig die Prognose im Frequenzbereich von 12 – 50 Hz eine ausgeprägte Erschütterungsverstärkung ergibt.

Der Vergleich der Vorhersagerechnung mit und ohne Geodynamik-Korrektur mit tatsächlichen Messergebnissen am Beispiel des Zammer Tunnels, wo ein MFS mit 10,5 Tonnen je Laufmeter und 7,5 Hz Eigenfrequenz eingebaut worden ist, zeigt Abb. 12.

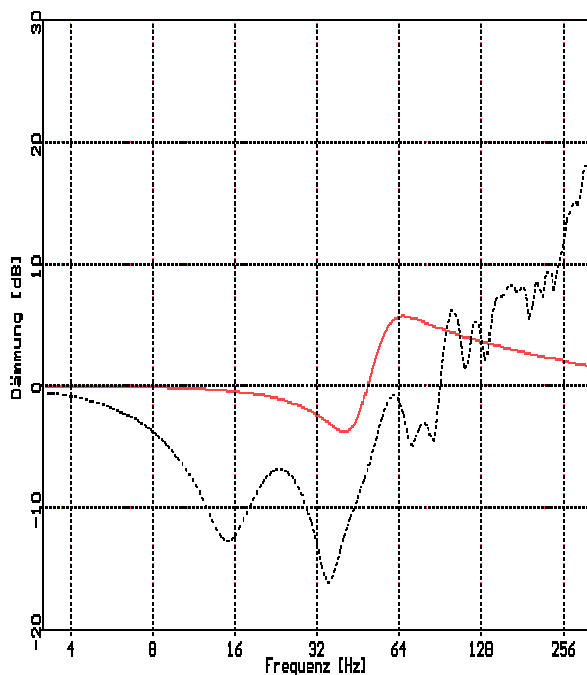


Abb. 11: Auswirkung der geodynamischen Rückkopplung auf das Einfügungsdämmmaß einer USM
rot: USM auf Planum, $E_{v2} = 110 \text{ MN/m}^2$
schwarz: Einfügungsdämmmaß einschl. geodynamischer Rückwirkung

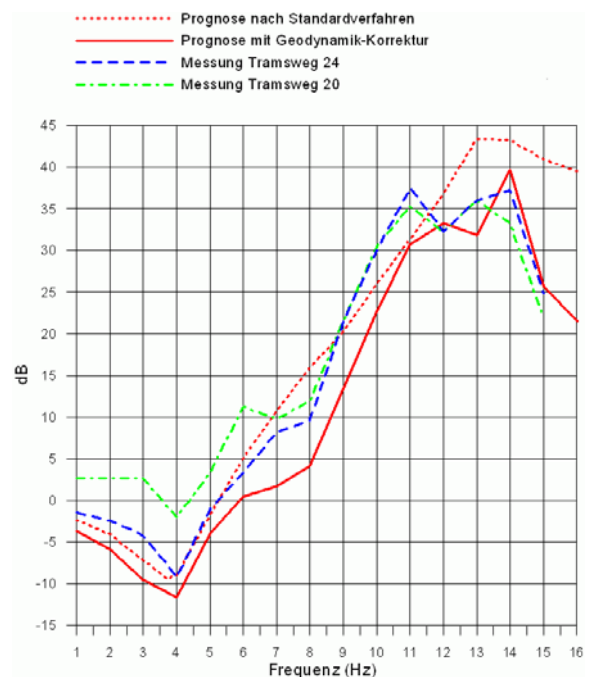


Abb. 12: Vergleich der MFS-Prognosevarianten für das 7,5 Hz MFS im Zammer Tunnel mit Messergebnissen.

7.4 Schwingungsgenerator

Trotz der vorhin dargestellten Untersuchungsmethoden bleibt eine rein modellmäßige Prognose von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen insbesondere in der Umgebung von Eisenbahntunneln mit großen Unsicherheiten behaftet. In solchen Fällen hat es sich bewährt, auf die künstliche Anregung von Schwingungen mittels eines Schwingungsgenerators zurückzugreifen und die Ausbreitung dieser Schwingungssignale zu untersuchen. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik hat deshalb das VibroScan-Prognoseverfahren mit Erschütterungsanregung durch einen schweren hydraulischen Schwingungsgenerator (Abb. 13) entwickelt. Dabei wird der spätere Betrieb im Tunnel mittels künstlicher Schwingungsanregung simuliert und gleichzeitig sowohl im Tunnel als auch in den betroffenen Häusern gemessen (Steinhauser, 2001).



Abb. 13: VibroScan Schwingungsgenerator

7.4.1 Prinzip der VibroScan-Schwingungssimulation

Das Ziel des VibroScan Verfahrens ist es, die Erschütterungen des Schienenverkehrs bezüglich Anregungsform, Frequenzspektrum und Dauer so wirklichkeitsgetreu wie möglich nachzubilden. Die Stärke der VibroScan Schwingungsemissionen sollte keinesfalls geringer sein als die der Zugserschütterungen, um auch bei gestörten Messbedingungen (Baubetrieb) gut auswertbare Immissionssignale im Anrainer-Entfernungsbereich zu erhalten.

Konstruktiv erfolgt mit diesem Schwingungsgenerator die Schwingungsanregung des Untergrunds ebenso durch eine Flächenbelastung, wie dies bei einem Zug durch den Bahnoberbau bewirkt wird.

Hinsichtlich der Frequenzen der Bahnerschütterungen wird berücksichtigt, dass infolge der verschiedenen Anregungsmechanismen breitbandige Spektren auftreten. Das VibroScan-Verfahren synthetisiert die breitbandigen Frequenzspektren der Zugserschütterungen umfassend durch eine konsekutive Frequenzfolge (10-120 Hz), wodurch insbesondere Resonanzen bei der Erschütterungsausbreitung sicher erfasst werden (Rutishauser, 2002). Da sich sowohl die Erschütterungswahrnehmung als auch der Schalldruck im wesentlichen proportional zur Schwinggeschwindigkeit verhält, ist eine frequenzunabhängige konstante Schwinggeschwindigkeitsanregung anzustreben. Diese wird dann erreicht, wenn die Kraft des Generators mit der

Frequenz hochgefahren wird. In der Praxis wird die Aussteuerung zusätzlich durch die dynamischen Eigenschaften des Untergrunds beeinflusst, da der linear-elastische Bereich nicht überschritten werden soll, um saubere Sinusschwingungen zu übertragen.

Andererseits besteht die Möglichkeit, durch gezielte Übersteuerung Oberwellen mit Frequenzen bis 300 Hz hinauf anzuregen und dadurch die Bandbreite des für Untersuchungen verfügbaren Frequenzspektrums beträchtlich zu erweitern.

Die Vorbeifahrtsdauer beträgt für einen Zug bei 100 km/h Fahrtgeschwindigkeit und 500 m Länge 18 Sekunden und bei 90 km/h mit 300 m Länge ca. 12 Sekunden. Die Dauer der VibroScan Sweeps wird daher aus Gründen der Vergleichbarkeit mit der Andauer von Zugserschütterungen (Anregungszeit für Gebäuderesonanzen) mit 15 Sekunden gewählt.

Der Schwingungsgenerator regt im Untergrund primär Druckwellen in vertikaler Richtung an – ebenso wie dies bei einem Zug der Fall ist. Aus theoretisch leicht einsichtigen Gründen müssen dadurch aber auch Scher- und Oberflächenwellen mit horizontalen Schwingungsanteilen ange-regt werden, deren Stärke von den lokal vorhandenen geodynamischen Eigenschaften abhängt.

7.4.2 Vergleichbarkeit unterschiedlicher Erschütterungsquellen

Wie wichtig es ist, die Versuchsparameter der Schwingungserzeugung möglichst jenen realer Züge anzupassen zeigt ein Versuch, bei dem neben einer Bahnstrecke die Ausbreitung der Zugserschütterungen, die des VibroScan Schwingungsgenerators und die eines anderen Schwingungserregers am selben Messprofil bestimmt worden sind.

In Tab. 2 sind dazu Kerndaten des VibroScan Schwingungsgenerators sowie des Vergleichs-Schwingungserregers zusammengefasst und Literaturangaben von Zügen gegenübergestellt.

Tab. 2: Eigenschaftsvergleich dynamischer Parameter

Parameter	VibroScan	Zug	Vergleichs-Schwingungserreger
Ungefederte Radmasse/Erreger	1450 kg	ca 900 -1600	max 1430 kg
max. Erregerkraft	69 kN	ca 30 - 100 kN	25 kN
belastete Fläche	2,9 m ²	Minimum: 2,6 m ²	3 x 0,062 = 0,185 m ²
mittlere max. Bodenpressung	6,7 N/cm ²	ca. 4,8 - 8,5 N/cm ²	33 N/cm ²
Frequenzband	10 -120 Hz	ca. 30 - 80 Hz	10 -100 Hz

Die VibroScan Kenndaten entsprechen den Zugdaten verhältnismäßig gut. Beim Vergleichs-Schwingungserreger ergeben sich signifikante Unterschiede bei der belasteten Fläche und der Bodenpressung.

Die Regressionsanalyse ergibt den in Abb. 14 wiedergegebenen Vergleich der Erschütterungsausbreitung von den verschiedenen Quellen wieder. Die Ausbreitung der VibroScan Erschütterungen entspricht somit im Rahmen der Messgenauigkeit jenen der Zugserschütterungen. Der Ausbreitung der Erschütterungen des Vergleichs-Schwingungserregers besitzt hingegen eine signifikant geringere entfernungsabhängige Dämpfung. Hiefür dürften zwei Effekte maßgeblich sein. Einerseits wirkt die Masse des belasteten Untergrunds als Systemdämpfung, wobei diese Dämpfung umso geringer ausfällt, je kleiner die belastete Fläche und je höher die Bodenpressung ist. Andererseits bewirkt das kleinere „Quellvolumen“ eine seichtere Lage des Ausgangspunkts der Erschütterungsausbreitung, weshalb die Anregung von Oberflächenwellen geringer Dämpfung begünstigt wird. Der Vergleich der Terzspektren beider Schwingungsgeneratoren mit

denen der gemessenen Züge in Abb. 15 für 30 m Distanz zeigt auch, dass der Vergleichsschwingungserreger praktisch ausschließlich Erschütterungen in 16-20 Hz Band ausstrahlt. Derart niedere Frequenzen sind für Oberflächenwellen charakteristisch. Die Zugserschütterungen hingegen dürften sich ebenso wie die VibroScan Schwingungen auch in tiefer gelegenen Untergrundsschichten ausbreiten, wo der höheren Festigkeit entsprechend auch höhere Frequenzen angeregt werden.

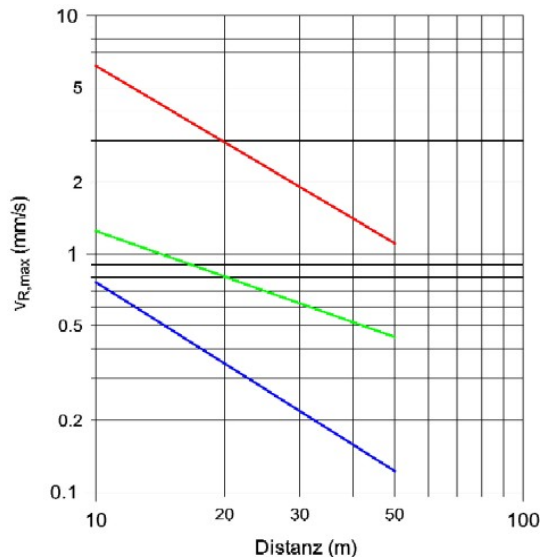


Abb. 14: Vergleich der Entfernungsabhängigkeit der resultierenden Schwinggeschwindigkeitsmaxima für drei verschiedene Erschütterungsquellen am selben Profil

rot: VibroScan Schwingungsgenerator
 grün: Vergleichs-Schwingungserreger,
 blau: Schienenverkehr

Bisher wurden in fünf Staaten VibroScan-Untersuchungen zu rund 50 Bahnbauprojekten durchgeführt, darunter 5 in der Schweiz (Rutishauser, 2001).

Der Vorteil des VibroScan Verfahrens besteht nicht nur darin, dass es Immissionsvorhersagen auch ohne Voruntersuchung der Untergrundverhältnisse (Geodynamik) und des Bauwerksverhaltens (Baudynamik) ermöglicht, sondern auch die aktuellen Übertragungsbedingungen nach Tunnelerrichtung mit allen baubedingten Veränderungen erfasst. Abb. 16 zeigt dies am Beispiel der Immissionen in zwei benachbarten Häusern, von denen eines durch Zementinjektionen unbeabsichtigt mit der Tunnelröhre direkt verbunden worden ist.

Obwohl beide Objekte gleich weit vom Tunnel entfernt sind, bewirkt die aus dem Injektionskörper gebildete Schwingungsbrücke zu einem Haus doppelt so hohe Erschütterungsimmissionen wie im anderen Objekt. Hinsichtlich der Frequenzspektren bewirkt die Körperschallbrücke eine breitbandige Erschütterungsübertragung.

Eine dichte Folge von Vibro-Positionen gestattet es auch, die nachteiligen Auswirkungen von seltenen geologischen Strukturen zu erkennen. Abb. 17 zeigt diesen Verstärkungseffekt einer geologischen Störung am Beispiel eines Tunnels, der im Stationierungsbereich 530 – 610 m schleifend eine Großstörung durchquert. Bei einer Erschütterungsanregung im Tunnel an verschiedenen Positionen sind bei einem Oberlieger am Störungsrand die in der Abbildung mit Sternsymbolen gekennzeichneten A-bewerteten Schallpegelspitzen gemessen worden, deren Größe bei homogenen Gebirgsverhältnissen entfernungsabhängig im Bereich der punktierten Kurve liegen sollte, was für die Anregungsposition außerhalb der Störung auch zutrifft. Die Erschütterungsanregung in der Störung bewirkt in 200 m Distanz eine Pegelverstärkung um etwa 6 dB (A).

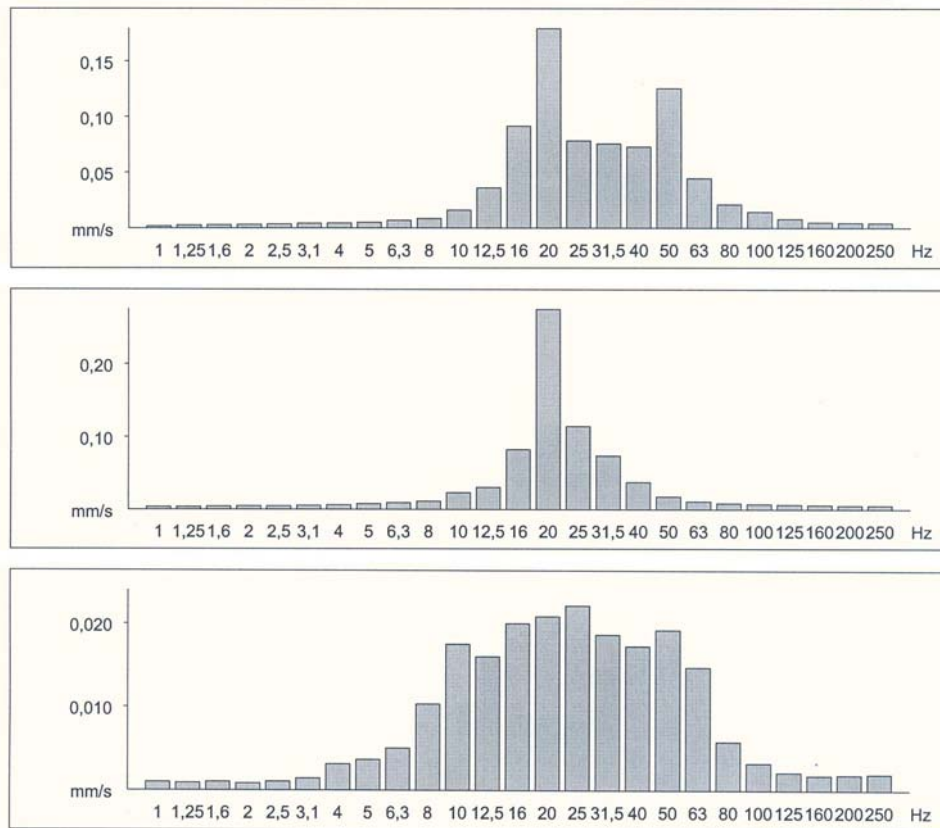


Abb. 15: Vergleich der Terzspektren der V_z -Komponente in 30 m Distanz für die drei Erschütterungsquellen
 oben: VibroScan Schwingungsgenerator
 Mitte: Vergleichs-Schwingungserreger
 unten: Schienenverkehr

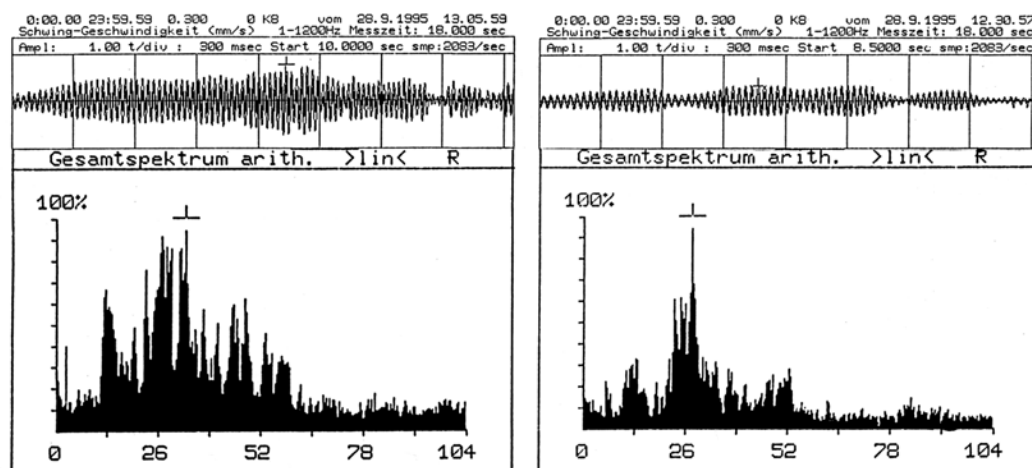


Abb. 16: Auswirkung beim Tunnelvortrieb entstandener Schwingungsbrücken auf die Größe der Erschütterungsimmissionen (oben) und die Transmissionsspektren (unten) im Vergleich zweier gleichweit vom Tunnel entfernter Häuser
 links: Haus mit direkter Verbindung zum Tunnel (Injektionskörper)
 rechts: Haus ohne Kontakt zum Tunnel

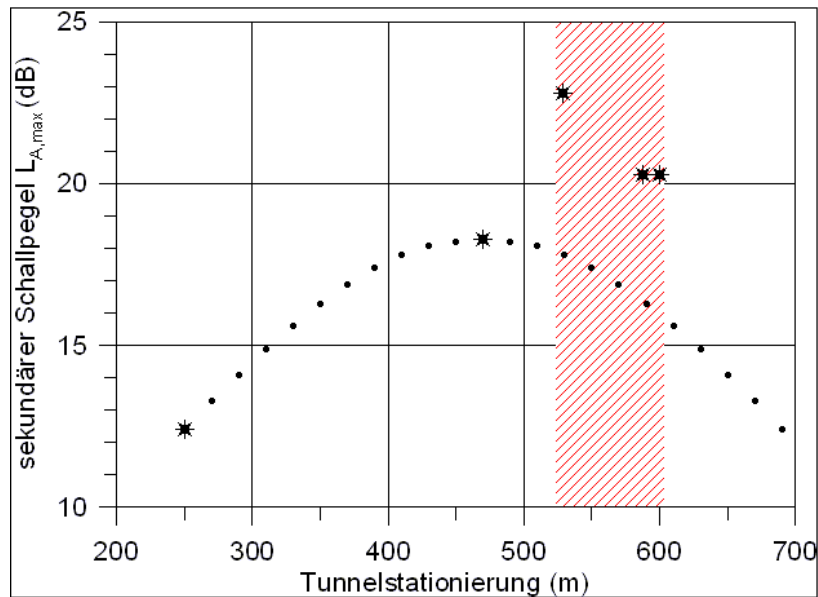


Abb. 17 Verstärkung des Körperschallpegels in einer Störung (schraffiert) infolge Kanalwellenanregung
 Punkt: Soll-Schallpegel für homogene Gebirgsverhältnisse
 Stern: gemessene Schallpegel

8. MASSNAHMEN ZUR ERSCHÜTTERUNGSREDUKTION

Tunneltrassen führen grundsätzlich zu geringeren Erschütterungsimmissionen, da die Anregung von energiereichen Oberflächenwellen mit zunehmender Tieflage der Erschütterungsquelle rasch abnimmt. Weil zusätzlich die geometrische Dämpfung bei Raumwellen stärker ist als bei Oberflächenwellen, vermindert sich die Reichweite der Erschütterungsemissionen mit zunehmender Tieflage. Dieser Effekt wird durch den negativen Distanzexponenten ausgedrückt, der mit anwachsender Tieflage rasch an negativer Größe gewinnt, wie das Beispiel von Abb. 18 aus dem Grazer Raum zeigt. Ähnlich immissionsdämmend wirkt auch die Streckenführung in Einschnitten.

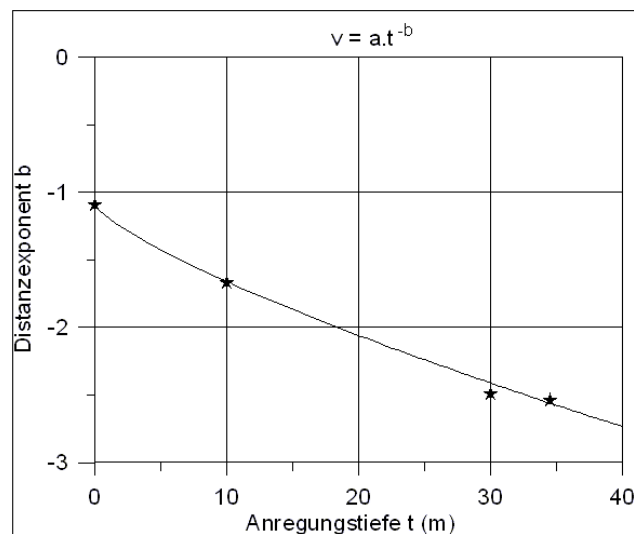


Abb. 18 Erschütterungsdämpfung in Abhängigkeit von der Tiefenlage einer Erschütterungsquelle im Quartär und Tertiär bei Graz

Der entscheidende Vorteil eines Tunnels aus der Sicht des Erschütterungsschutzes ist jedoch in der steifen Betonsohle zu sehen, die die volle Entfaltung der Wirksamkeit von Unterschottermatten bzw. Masse-Feder Systemen ermöglicht.

Aber auch bei Bahnlagen an der Erdoberfläche sind die Möglichkeiten zur Erschütterungsreduktion mit der Ausführung des Fahrwegs verknüpft.

Wie stark die Ausführung des Oberbaus die Erschütterungsemission beeinflusst, zeigt ein Beispiel von Salzburg-Taxham, wo ein Gleis auf Holzschwellen (zu 110 kg) und eines auf Betonschwellen (zu 280 kg) im Schotterbett verlegt sind. Wie aus Abb. 19 ersichtlich ist, treten beim Gleis mit Betonschwellen nur halb so große Erschütterungsemissionen auf, wie beim Gleis mit Holzschwellen. Die Spektralanalyse (Abb. 20) zeigt, dass im tieffrequenten Spektralbereich bis 30 Hz von Holzschwellen deutlich größere Erschütterungen ausgehen als vom Betonschwellengleis. Oberhalb von 100 Hz nehmen bei beiden Gleisbauformen die Emissionen rasch ab.

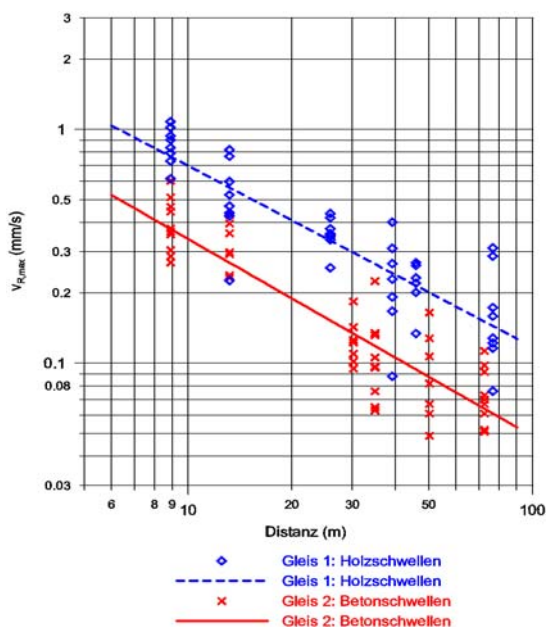


Abb. 19: Erschütterungsemission und Erschütterungsausbreitung in Abhängigkeit von der Oberbau-Ausführung

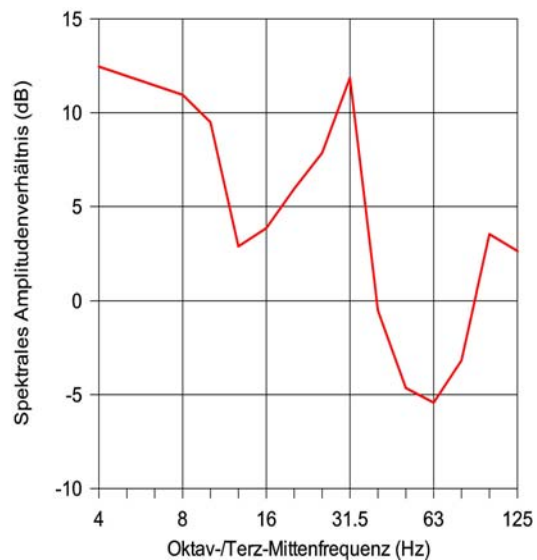


Abb. 20: Spektrales Amplitudenverhältnis der Emissionsspektren von Holzschwellen- (Verstärkung positiv) und Betonschwellenoberbau (Verstärkung negativ)

Die geringe Steifigkeit des üblichen Unterbauplanums macht im allgemeinen den Einbau von USM problematisch. Dass trotz dieser ungünstigen Voraussetzungen bei sorgfältiger Abstimmung von Unterbau-Steifigkeit und dynamischer Bettungsziffer der USM eine Immissionsminderung möglich ist, zeigt das Beispiel von Abb. 21 aus Nüziders, Vorarlberg, wo eine USM auf hochverdichtetem Unterbau ($E_{v2} = 180 \text{ MN/m}^2$) zur Anwendung kam. Allerdings bereitete danach die Schotterbettstabilisierung Schwierigkeiten, die nur durch Verkleben der Schotterbettflanken beherrschbar wurde.

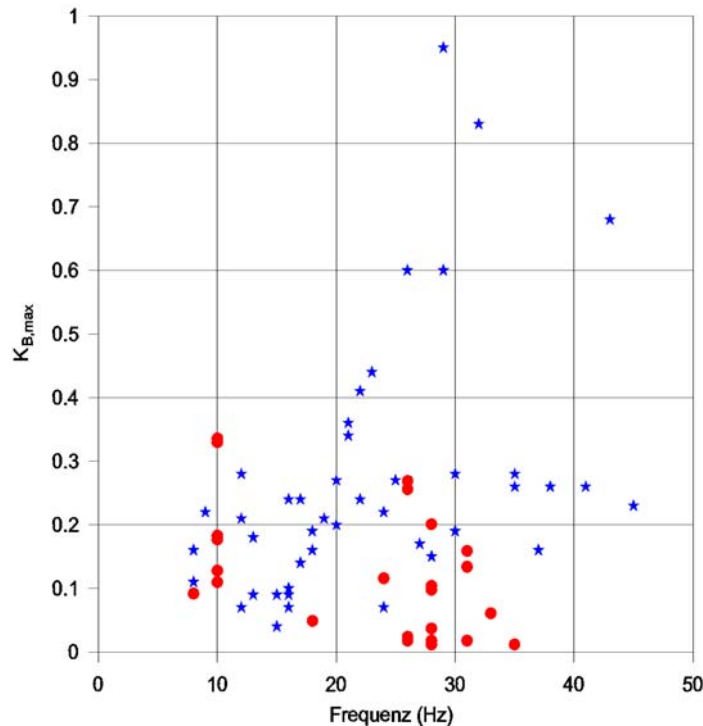


Abb. 21: Immissionsverminderung durch USM auf Planum in Nüziders, Vorarlberg
 Stern: $K_{B,max}$ – Werte vor Umbau
 Punkt: $K_{B,max}$ – Werte nach USM Einbau

Für die Wirksamkeit einer USM bedeutet die Steifigkeit des Planums, auf der sie liegt den maßgeblichen Faktor. Neben einer Höhverdichtung des ungebundenen Planums bestehen dafür folgende Möglichkeiten der Unterbau-Deckschichtausführung, die in verschiedenen Abschnitten von Bahnstrecken versuchsweise erprobt werden:

- gebundene zementstabilisierte Kiestragschicht
- bituminöse Tragdeckschicht (BTD)
- Stahlbetonplatten

Bereits die zementstabilisierte Kiestragschicht alleine bewirkt im Vergleich zum normalen Unterbauplanum eine merkliche Reduktion der Erschütterungsemission, wie Abb. 22 am Vergleich der Terzspektren zeigt, die bei Schwingungsanregung mit dem VibroScan Schwingungsgenerator hervorgerufen worden sind. Die Erschütterungsverminderung ist insbesondere in den Horizontalkomponenten stark ausgeprägt, wozu noch die Transformation zu höheren Frequenzen kommt.

Die Kombination BTD-Planum mit elastomerbesohlenen Schwellen führt als Nebeneffekt ebenfalls zu einer Erschütterungsverminderung in bereits merklichen Ausmaß. Abb. 23 zeigt dies am Beispiel der Versuchsstrecke Markersdorf, NÖ, wo 4 Bauformen verglichen worden sind.

- Bauform 1: besohlte Schwellen, 30 cm Schotter, BTD-Planum
- Bauform 2: besohlte Schwellen, 20 cm Schotter, BTD-Planum
- Bauform 3: Normalschwellen 30 cm, Bestandsunterbau
- Bauform 4: Normalschwellen 30 cm, Bodenauswechslung

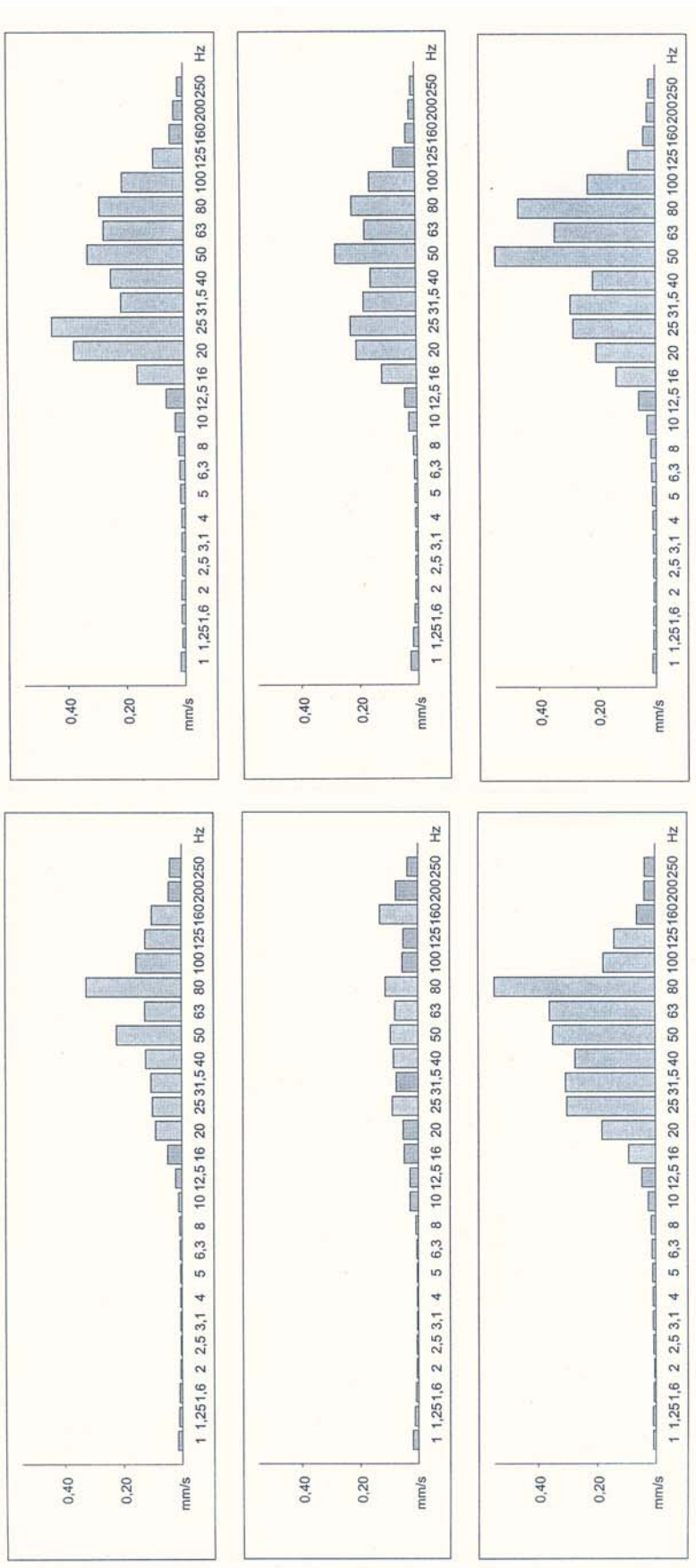


Abb. 22: Mittlere Terzspektrale der VibroScan Erschütterungsemission in 10 m Distanz auf zementstabilisierter Kiestragschicht (links) und ungebundenen Unterbauplanum (rechts) (x-, y-, z-Komponente von oben nach unten)

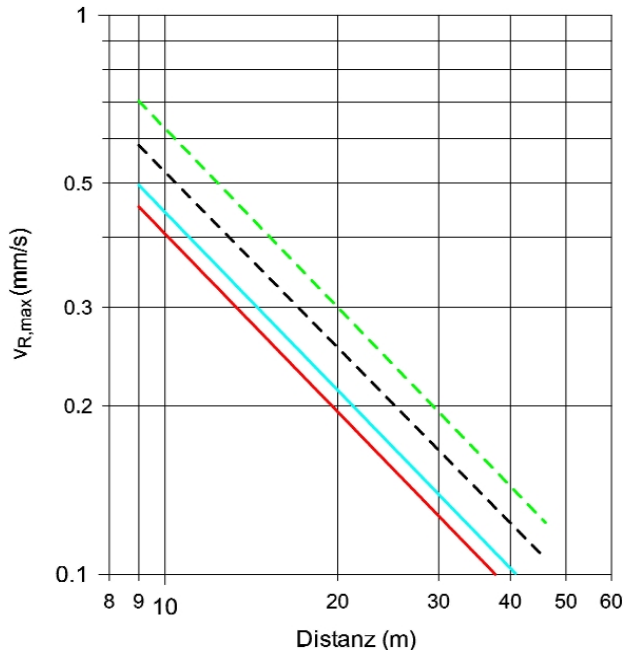


Abb. 23: Vergleich der Erschütterungsausbreitung bei verschiedenen Fahrwegformen

- rot: Schwellensolehlen, 30 cm Schotter, BTD
- blau: Schwellensolehlen, 20 cm Schotter, BTD
- schwarz: Standardober- und Unterbau
- grün: Standardoberbau und Bodenauswechslung

Wie Abb. 24 am Vergleich der Emissionsspektren zeigt, bewirkt die BTD-Besohlungskombination erwartungsgemäß eine Verminderung der Erschütterungsanteile von etwa 40 Hz aufwärts, während die niederfrequenten Anteile merklich zunehmen.

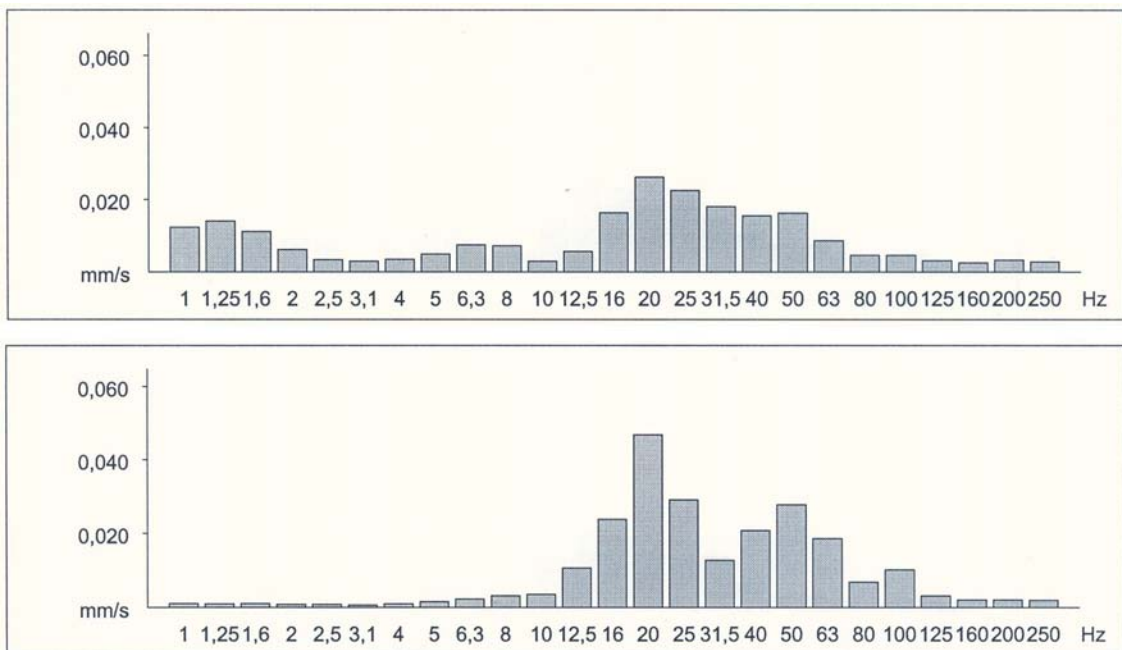


Abb. 24: Vergleich der mittleren Terzspektren der Zugschütterungen in 10 m Distanz für verschiedene Fahrwegformen

- oben: Schwellensolehlen, 30 cm Schotter, BTD
- unten: Standardoberbau und Bodenauswechslung

Am wirksamsten aber dürfte die USM-Lagerung auf einer Stahlbetonplatte sein, wie dies bei der Flughafenschnellbahn in Schwechat versuchsweise erfolgt ist. Die aus Abb. 25 ersichtliche Dämmwirkung umfasst das gesamte Frequenzspektrum und könnte mehrere Ursachen haben. Teils reduziert die Steifigkeit der Stahlbetonplatte die Erschütterungsanregung an sich, teils kann – ebenfalls steifigkeitsbedingt – eine Spektralverschiebung zu höheren Emissionsfrequenzen hin erfolgen und schließlich ist eine erschütterungsmindernde Rückkopplung der USM mit den Bahnfahrzeugen möglich (Krüger et al., 2001). Im Vergleich zu Nüziders (Abb. 21), wo eine extrem weiche USM ($c_{\text{dyn}} = 0,035 \text{ N/mm}^3$) verwendet wurde, erreicht in Schwechat eine wesentlich härtere USM ($c_{\text{dyn}} = 0,115 \text{ N/mm}^3$), die daher hinsichtlich der Schotterbettstabilität keine Probleme bereitet, eine deutlich bessere Dämmwirkung.

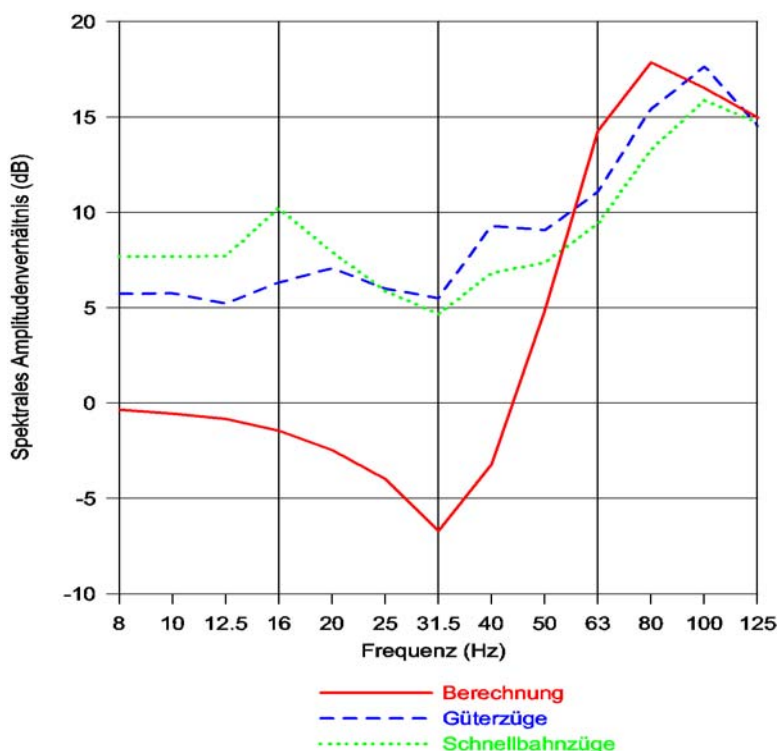


Abb. 25: Vergleich der USM-Prognose (rot) auf 40 cm Stahlbetonplatte für die S7 in Schwechat mit Messergebnissen von Güterzügen (blau) und Schnellbahnzügen (grün)

Danksagung:

Wesentliche Teile der hier vorgelegten Untersuchungsergebnisse wurden durch das Forschungsprojekt LEO (Lärm- und erschütterungsarmer Oberbau) der österr. Bahnbaugesellschaft der BEG, HL-AG und ÖBB gefördert.

LITERATURVERZEICHNIS

- Griefahn, B.: Präventivmedizinische Vorschläge für den nächtlichen Schallschutz. Z. f. Lärmb. 37, 7 – 14, 1990.
- Horn, N.: Verstärkungsspektren eines geschichteten Untergrunds. ZAMG, interner Bericht, 2002.
- Krüger, F. et al.: Schall- und Erschütterungsschutz im Schienenverkehr. Expert Verlag, Renningen, 2001
- Lenhardt, W.A.: Emittierte Erschütterungsfrequenzen von Zügen. ZAMG, Interner Bericht, 1999.
- Roesset, J. M: Fundamentals of Soil Amplification. in Hansen: Seismic Design for Nuclear Power Plants. 188 – 213, 1970.
- Rutishauser, G.: Optimierung von Erschütterungsprognosen mit VibroScan. Tagungsbericht 4. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. EMPA, 2001.
- Rutishauser, G.: Verkehrserschütterungen – von der Quelle zum Empfänger. Das Problem der Resonanzen. Felsbau 20, 156 – 161, 2002.
- Said, A., D. Fleischer, H. Fastl, H.P. Grütz u. G. Hölzl: Laborversuche zur Ermittlung von Unterschiedsschwellen bei der Wahrnehmung von Erschütterungen aus dem Schienenverkehr. DAGA – Tagungsbericht, 2000.
- Steinhauser, P. und S.: Zur Vorhersage und Beurteilung von Erschütterungs- und Körperschallimmissionen des Schienenverkehrs. ÖIAZ, 141, H. 1, 7 – 12, 1996.
- Steinhauser, P.: Die Untersuchung technischer Erschütterungen – ein Beitrag der Geophysik zum Umweltschutz. Aus: 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich, 744 – 763, Leykam Graz, 2001.
- Studer, I.A. und M.G. Koller: Bodendynamik. Springer V., Berlin, 1997.
- Thompson, D., M. Janssens und M. Dittrich: Rollgeräusche durch den Rad/Schiene-Kontakt – Beurteilung von Lärminderungsmaßnahmen. ZEV + DET Glas. Ann. 121, 226 – 233, 1997.
- Wenzel, H., D. Pichler und R. Schedler: Ambiente Schwingungsmessungen zur System- und Schadenserkenkung an Tragwerken. Bauingenieur 74, 115 – 123, 1999.
- Wettschureck, R.: Measures to reduce structure-borne noise emissions, induced by above-ground, open railway lines. Rail Engineering International. Edition 1997/1, 12 – 16, 1997.
- Wettschurek, R. und U. Kurze: Einfügungsdämmmaß von Unterschottermatten. Acustica, 177 – 182, 1985.

Schutzmarke

VibroScan® ist eine eingetragene Schutzmarke der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

Autor: Univ. Prof. Dr. Peter Steinhauser
Zentralanstalt für Meteorologie
und Geodynamik
A-1190 Wien, Hohe Warte 38
E-mail: peter.steinhauser@univie.ac.at