

# Erschütterungsemissionen – die Rückkopplung mit dem Untergrund

Peter Steinhauser, Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH, Wien

## 1. PROBLEMSTELLUNG

Erschütterungsemissionen entstehen durch die Einwirkung dynamischer Kräfte auf den Untergrund. Wie bei allen Kräften gelten auch hier die klassischen Newtonschen Gesetze, deren drittes in der Originalfassung lautet:

*„Lex III. Actioni contrariam semper et aequalem esse reactionem: sive corporum duorum actiones in se mutuo semper esse aequales et in partes contrarias dirigi.“*

D.h. es gilt das Wechselwirkungsprinzip zwischen der von einem Körper ausgehenden Kraft (actio) und der Reaktionskraft des davon betroffenen Körpers (reactio). Auch wenn diese Zusammenhänge bereits seit mehr als 300 Jahren bekannt sind, sind gerade bei Schwingungsemissionen Missverständnisse möglich, die hier an einigen Beispielen diskutiert werden sollen.

Für die Schallemissionen der Akustik bereitet dieses Newtonsche Gesetz keine Probleme, da die Luft einen weitestgehend homogenen Körper darstellt, dessen Antwortverhalten in Zeit und Raum praktisch unveränderlich ist und deshalb vernachlässigt werden kann. In der Akustik ist es daher ausreichend, die Kenngrößen des von der Oberfläche der Quelle ausgehenden Schalls unter Einhaltung einfacher Standardisierungen (Temperatur etc.) zu bestimmen.

Anders sieht dies bei den Erschütterungsemissionen aus. Die „reactio“ auf die dynamische Anregung kommt hier vom Untergrund. Dieser ist keinesfalls homogen, sondern aus verschiedenen geologischen Körpern, meist Schichten, unterschiedlicher Eigenschaften aufgebaut. Die Bandbreite reicht von hartem, massigen Festgestein bis zu extrem weichen Seesedimenten. Da diese Untergrundstrukturen elastische Körper sind, ist auch das Schwingungsverhalten des – einen Mehrmassenschwinger darstellenden – angeregten Untergrundbereichs bei der „reactio“ mit dem daraus folgenden nichtlinearen Frequenzverhalten zu berücksichtigen. Dies führt zur Frage, welcher Tiefenbereich des Untergrunds bei der Emission angeregt wird.

Einige Beispiele, die schwerpunktmäßig aus dem Bereich der Eisenbahnerschütterungen stammen, sollen diesen Einfluss des Untergrunds auf die Emissionen zeigen.

## 2. BANDBREITE DER REAKTIONSKRAFT

Um die Auswirkung unterschiedlicher Untergrundbedingungen beurteilen zu können, ist eine identische Anregungskraft erforderlich. Dieses Kriterium haben die durch Selbstzündung der korrodierten Säurezünder ausgelösten Detonationen von zwei 250 kg Blindgängern im Wiener Raum erfüllt. Der eine Blindgänger lag im trockenen Erdreich einer Gärtnerei in Wien Liesing und der andere im Flussbett der Donau auf Höhe der Freudenau. Beide Detonationen wurden im Conrad Observatorium des österreichischen Erdbebendienstes registriert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 inklusive der beim Erdbebendienst üblichen Magnitudenauswertung angegeben. Die Seismogramme sind in den Abbildungen 1 und 2 enthalten.

Tabelle 1: Erschütterungsvergleich zweier Blindgängerdetonationen nach den Seismogrammen vom Conrad Observatorium

Detonationsort	Blindgänger-Bettung	Distanz	$v_{Z,max}$	Magnitude
Liesing, 2008	Erdreich, trocken	45 km	80 nm/s	1,2
Donau, 2012	Flussbett, wassergesättigt	49 km	450 nm/s	2,0

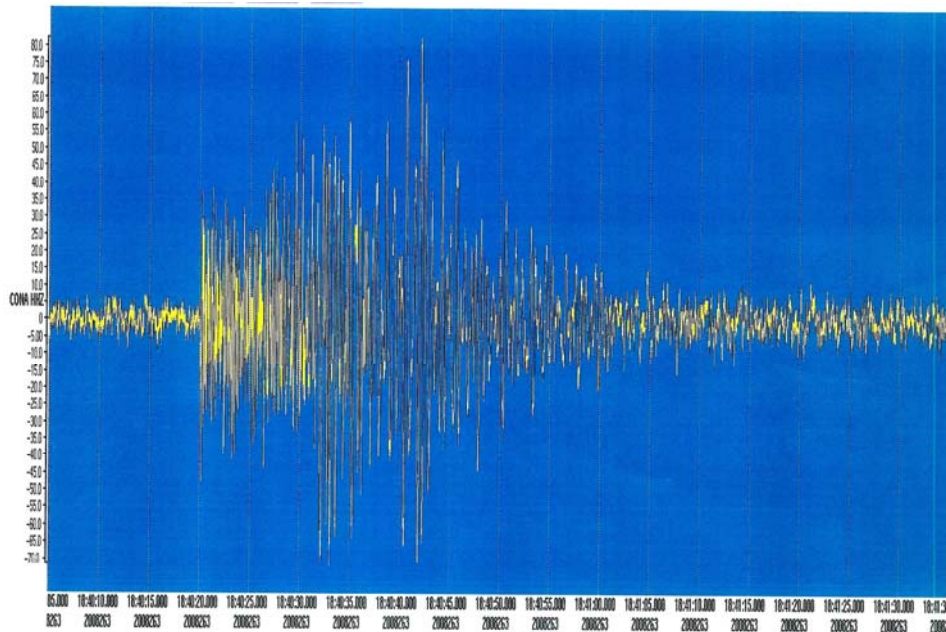


Abbildung 1: Seismogramm der Blindgängerdetonation in Liesing (ÖED, 2008) (x-Achse: Zeit; y-Achse: Schwinggeschwindigkeit in nm/s)

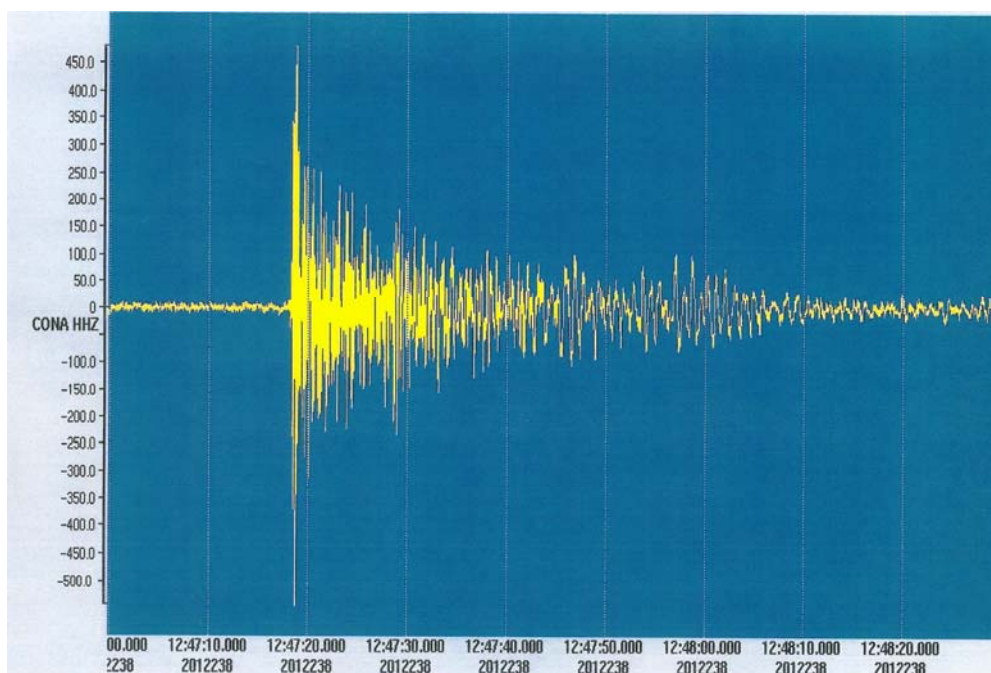


Abbildung 2: Seismogramm der Blindgängerdetonation im Flussbett (ÖED, 2012) (x-Achse: Zeit; y-Achse: Schwinggeschwindigkeit in nm/s)

Obwohl die Seismogramme Transmissionsmessungen darstellen, ermöglichen Sie Aussagen über das Emissionsverhalten, da der Ausbreitungsweg der Erschütterungen wenig unterschiedlich durch das Wr. Becken verläuft, die Unterschiede somit primär im Emissionsbereich zu suchen sind.

Wie die Abbildungen zeigen, unterscheidet sich der Seismogrammverlauf beider Detonationen signifikant. Die Detonation 2008 erreicht in 45 km Distanz das Schwinggeschwindigkeitsmaximum erst nach 12 Sekunden, während die Detonation 2012 sofort mit der Maximalerschütterung einsetzt, d.h. selbst in dieser großen Entfernung dominieren noch die Druckwellen. Dieses Maximum ist außerdem trotz etwas größerer Entfernung (49 km) bei gleicher Sprengstoffmenge etwa um den Faktor 6 größer als bei der Detonation 2008. Die Ursache für diesen Unterschied bildet offensichtlich die verschiedenartige Geologie der Blindgängerumgebung, da in beiden Fällen die gleiche Sprengstoffmenge in der gleichen Stahlummantelung explodiert ist.

### 3. TIEFENREICHWEITE

Bei Erschütterungsuntersuchungen des Bahnverkehrs fällt auf, dass ein- und derselbe Zugtyp in verschiedenen Streckenabschnitten grundsätzlich verschiedene Emissionen auslösen kann, wie Abbildung 3 am Beispiel von Doppelgarnituren des ÖBB Zugtyps Rail Jet zeigt.

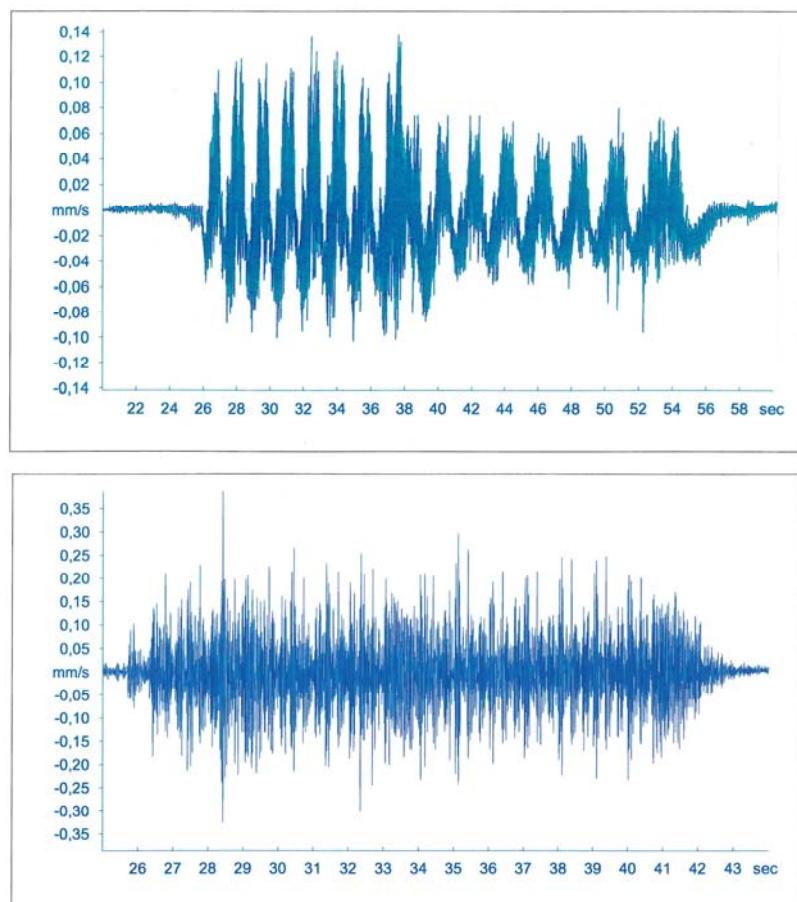


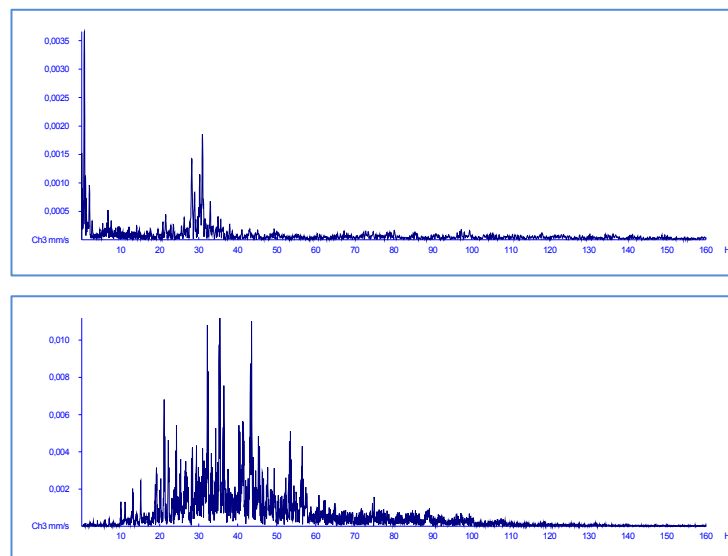
Abbildung 3: *Erschütterungsemissionen von Rail Jet Zügen in verschiedenen Streckenabschnitten der Westbahn  
oben: Salzburg-Mülln  
unten: Straßwalchen*

Dieses stammt aus zwei Streckenabschnitten im Alpenvorland, die etwa 30 km voneinander entfernt gelegen sind u.zw. in Salzburg-Mülln bzw. in Straßwalchen. Die Fahrtgeschwindigkeit weist mit knapp 70 km/h (Mülln) bzw. etwa 75 km/h (Straßwalchen) nur geringe Unterschiede auf, sodass als Ursache der Emissionsunterschiede nur die unterschiedliche Reaktionskraft beider Abschnitte in Frage kommt.

Der Untergrund besteht in Mülln aus weichen Seesedimenten, die auf eiszeitlichen Moränen lagern, und in Straßwalchen aus fluvioglazialen Sedimenten auf Flysch.

Im Abschnitt Mülln ist ein seismisches Profil vermessen worden, sodass die Horizontgliederung und die elastischen Materialeigenschaften bis zu der die Basis bildenden Moräne verfügbar sind. Um die relevante Tiefenreichweite der dynamischen Anregung zu ermitteln, wurde von dem Ansatz ausgegangen, dass jener Tiefenbereich ausschlaggebend ist, für den die modellmäßig berechneten Eigenfrequenzspektren und die gemessenen Emissionsspektren am besten übereinstimmen.

Die bereits aus dem Seismogrammverlauf erkennbaren Unterschiede des Emissionsaufbaus bestätigen sich in den Frequenzspektren (Abbildung 4).



*Abbildung 4: Frequenzanalysen der Zugs-Emissionen von Abbildung 3  
oben: Emissionsspektrum auf Seesedimenten (Mülln)  
unten: Emissionsspektrum auf fluvioglaziale Sedimente (Straßwalchen)*

Bei den Emissionen auf den Seesedimenten sind im Spektrum nur zwei Frequenzbänder im Bereich um 1 Hz und im Bereich um 30 Hz erkennbar, während bei jenen auf den fluvioglazialen Sedimenten breitgefächerte Frequenzbänder von etwa 15-60 Hz dominieren.

Anregungsseitig werden die Frequenzen durch konstruktive Faktoren (Schwellenabstand, Achsgeometrie, Wagenreihung) und durch die Fahrtgeschwindigkeit bestimmt. Abbildung 5 zeigt derartige Anregungsfrequenzen für den Zugtyp RailJet in Abhängigkeit von der Fahrtgeschwindigkeit.

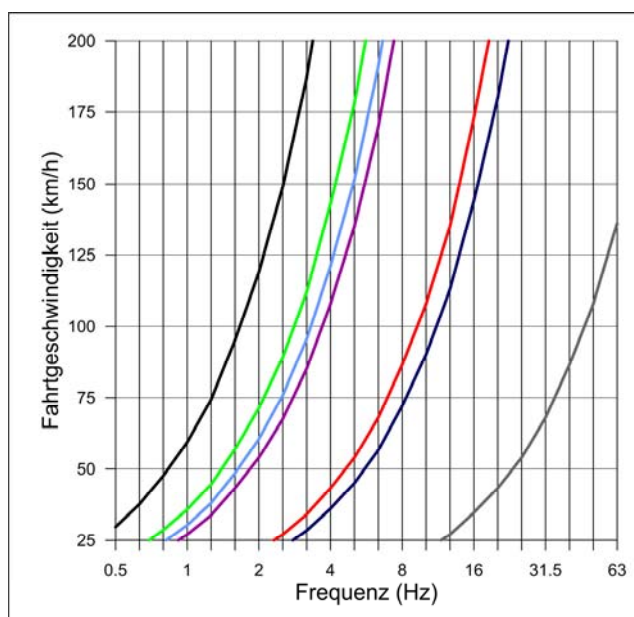


Abbildung 5: Abhängigkeit der RailJet-Anregungsfrequenzen von der Fahrtgeschwindigkeit im Terz Diagramm

- schwarz: Drehgestellabstand Reisewagen
- grün: Drehgestellabstand Taurus
- hellblau: Achsabstand Taurus-Reisewagen ü. Puffer
- violett: Achsabstand Reisewagen ü. Puffer
- rot: Achsabstand Taurusd Drehgestell
- dunkelblau: Achsabstand Reisewagen-Drehgestell
- grau: Schwellenabstand

Beim Untergrund aus weichen Seesedimenten (Abbildung 4 oben) tritt demnach als Emissionsfrequenz dominant die von dem Drehgestellabstand der Reisewagen ausgehende Frequenz (ca. 1 Hz) hervor. Sekundär ist die vom Abstand der Schwellen bewirkte Frequenz (ca. 31 Hz) zu beobachten. Auf den steiferen fluvioglazialen Sedimenten (Abbildung 4 unten) herrscht hingegen die Anregungsfrequenz des Schwellenabstandes (35 Hz) vor.

Die Eigenfrequenzen von Körpern aller Art hängen aber von ihren elastischen Eigenschaften und den Körperdimensionen ab. Sedimentäre Untergrundstrukturen, wie sie vielfach vorhanden sind, werden dabei durch übereinander gelagerter Schichten charakterisiert, wobei Grund- und Oberschwingungen das Schwingungsverhalten jeder Schicht beschreiben, sodass die Schichtdicke den bestimmenden Parameter darstellt (Abbildung 6).

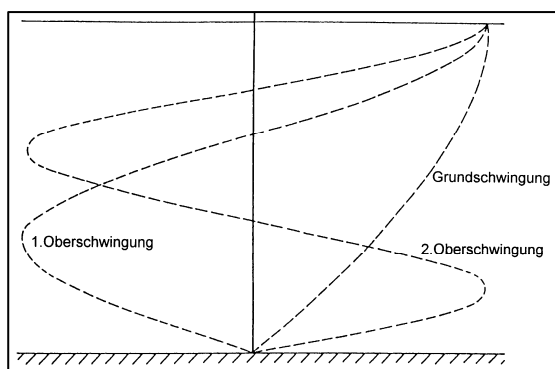


Abbildung 6: Grund- und Oberschwingungen einer elastischen Schicht des Untergrunds



Die Eigenfrequenz des Schichtkomplexes, der für die Schwingungsantwort auf eine dynamische Anregung verantwortlich ist, hängt aber davon ab, bis zu welcher Tiefe die Schichtfolgen des Untergrunds überhaupt dynamisch angeregt werden und in Wechselwirkung treten können. Aus der Übereinstimmung der Emissionsspektren mit den Frequenzen der Taktanregung der Züge kann auf dynamisch relevante Tiefenbereiche geschlossen werden.

Zur Abschätzung des Schwingungsverhaltens von Untergrundstrukturen bei begrenzter Mächtigkeit der angeregten Tiefe eignet sich das analytische Rechenmodell von Roesset. Dieses geht von einer parallelen Schichtung über einem elastischen Halbraum aus. Für jede dieser Schichten werden als elastische Parameter die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der P- und S-Wellen sowie die Tiefe von Schichtober- und unterkante benötigt. Es werden somit nur Größen benötigt, die mit seismischen Profilen einfach bestimmt werden können. Mit diesen Angaben werden die Verschiebungen im Frequenzspektrum Schicht für Schicht ermittelt und schrittweise die Transferfunktion über dem elastischen Halbraum berechnet.

Die seismischen Messdaten im Streckenabschnitt Mülln ermöglichen es, das Eigenfrequenzverhalten des Untergrunds für verschiedene Tiefenbereiche rechnerisch abzuschätzen. Diese Abschätzung erfolgt iterativ für einen zunehmenden Tiefenbereich, soweit seismische Daten vorliegen.

In Tabelle 2 ist das aus Kernbohrungen ermittelte geologische Profil wiedergegeben.

Tabelle 2: Geologischen Profil Mülln

Tiefenbereich	Beschreibung
0 - 3 m	Anschüttung
3 - 6 m	quartäre Kiese
6 - 18 m	obere Seetone
18 - 44 m	untere Seetone
ab 44 m	eiszeitliche Moräne

In Tabelle 3 sind dazu die nach dem Roesset Verfahren berechneten vorherrschenden Eigenfrequenzen der P- und S-Wellen in Abhängigkeit von dem als dynamisch angeregten Tiefenbereich des Modells angeführt.

Tabelle 3: Iterative Eigenfrequenzanalyse Profil Mülln

Unterkante des dynamisch wirksamen Bereichs	dominante Eigenfrequenz	
	P-Wellen	S-Wellen
6 m	16,3 Hz	6,7 Hz
10 m	8,0 Hz	3,2 Hz
18 m	4,2 Hz	1,7 Hz
30 m	2,6 Hz	1,0 Hz
44 m	1,8 Hz	0,7 Hz

Abbildung 7 zeigt die Eigenfrequenzspektren des Modells für einen dynamisch angeregten Tiefenbereich von 44 m.

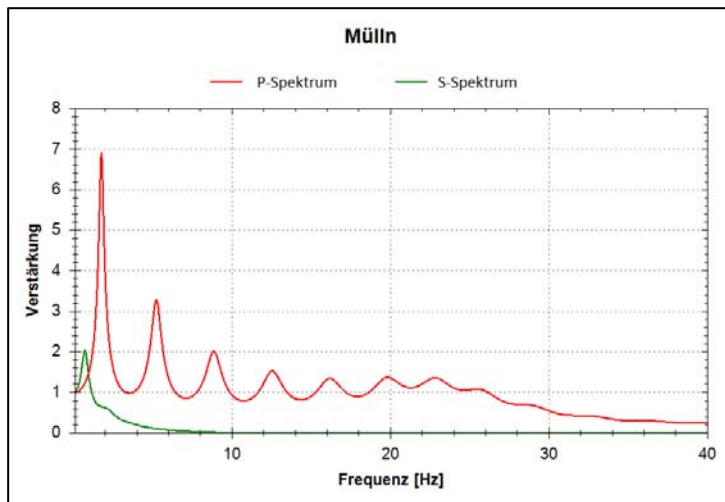


Abbildung 7: Seismisch berechnete Untergrundspektren unter Berücksichtigung des Schichtaufbaus bis 44 m

Der Vergleich dieser Untergrundspektren mit dem Emissionsspektrum von Abbildung 4 oben zeigt, dass die niederfrequente Emissionsspitze durch die Rückkoppelung der Anregung durch den Drehgestellabstand der Reisewagen mit der Frequenzspitze des Untergrundspektrums entsteht. Die anderen von der RailJet Geometrie bestimmten Anregungsfrequenzen werden hingegen vom Untergrund mangels Frequenzübereinstimmung nicht angenommen.

Die Tiefenreichweite der Rail Jet Erschütterungsemissionen erreicht unter den in Mülln bestehenden geologischen Bedingungen somit etwa 40-50 m. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die maximalen Radlasten beim Rail Jet mehr als 21 t erreichen.

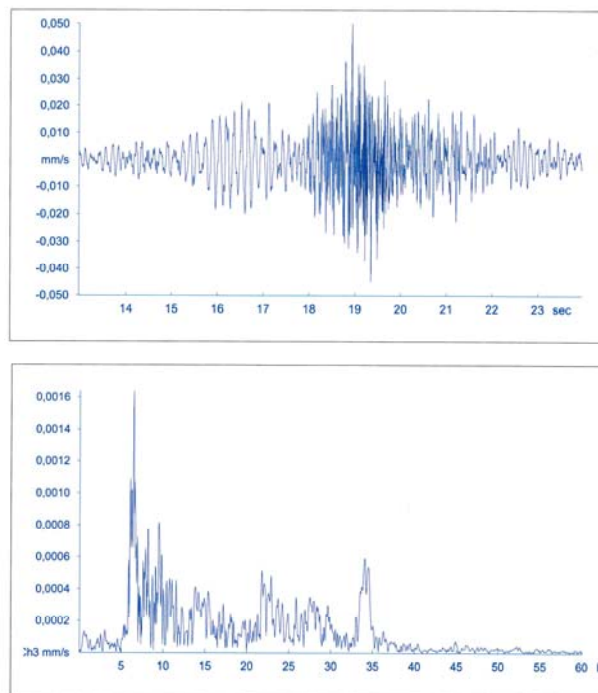


Abbildung 8: Erschütterungsemission eines Schnellbahnzugs Talent im Streckenabschnitt Mülln  
oben: Erschütterungsemissionen, Vertikalkomponente  
unten: Frequenzspektrum

Bei leichten Zügen, wie dem Schnellbahn Triebwagen vom Typ Talent, wo die maximale Achslast bei etwa 11 t liegt, sehen die Emissionen völlig anders aus, wie Abbildung 8 beispielhaft zeigt.

In diesem Fall dominieren Frequenzen von 6,5 Hz, die der Fahrtgeschwindigkeit von knapp 75 km/h entsprechend vom Achsabstand im Drehgestell hervorgerufen werden. Diese Frequenz entspricht der Eigenfrequenz des Untergrunds bis 12 m Tiefe. D.h., dass der Untergrund bis zu dieser Tiefe dynamisch angeregt wird und daher für die Reaktionskraft maßgeblich ist. Die Tiefenreichweite der Emissionen hängt somit von der Stärke der dynamischen Anregung ab und kann bei entsprechenden Untergrundbedingungen einen sehr großen Teufenbereich umfassen, der den der statischen Lastabtragung bei weitem übersteigt.

#### 4. VARIABILITÄT

Es ergibt sich die Frage, wieweit die Variabilität der Reaktionskraft des natürlichen Untergrundes bei dynamischer Anregung durch massive Baustrukturen reduziert werden kann, wie beispielsweise Tunnel.

In welchem Ausmaß die Betonsohle eines Tunnels die Bettungsverhältnisse homogenisiert, ist durch Impedanzmessungen beim Bau des Lainzer Tunnels in Wien untersucht worden. Dabei erfolgten im bebauten Abschnitt auf 5 km Länge an insgesamt 37 Positionen Bestimmungen der Punktimpedanz auf der zumindest 1 m starken Betonsohle des Tunnels. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

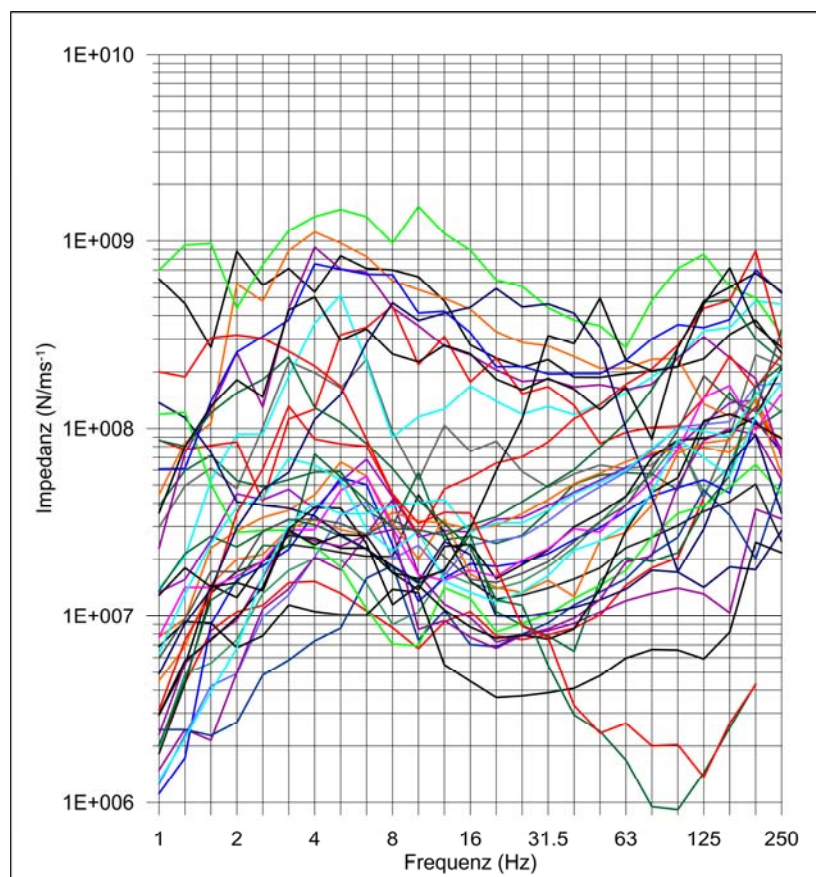


Abbildung 9: Übersicht der Terzspektren der Punktimpedanz auf der Betonsohle des Lainzer Tunnels



Aus Abbildung 9 ist ersichtlich, dass die Impedanzen eine Streubreite von 2 - 3 Größenordnungen besitzen. Trotz einheitlich steifer Tunnelröhre macht sich offensichtlich die Einbettung in verschiedene geologische Strukturen, die von pleistozänen und miozänen Sedimenten bis zu harten Flyschgesteinen reichen, durch unterschiedliche Steifigkeiten bemerkbar. Der unterschiedliche Verlauf der Impedanz - Terzspektren in Abbildung 9 stellt einen deutlichen Hinweis dafür dar, dass die Reaktionskraft der Untergrundstrukturen das Emissionsverhalten der Tunnelstrecke merklich variieren lässt. Eine Vereinheitlichung der Emissionen wird nicht erreicht.

## 5. ERSCHÜTTERUNGSANREGUNG

Die Wirkung der Reaktionskraft des Untergrunds ist auch zu berücksichtigen, wenn die Erschütterungsausbreitung experimentell untersucht wird. Als Anregungskraft können Hammerschläge, Fallgewichte, Schwingungsgeneratoren etc. verwendet werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Anregungs- und Reaktionskraft frequenzabhängig sind.

Daraus folgt, dass das Frequenzverhältnis aus Anregungsfrequenz  $f$  und der Eigenfrequenz  $f_0$  des Untergrundes das Ausmaß bestimmt, in dem Kraft tatsächlich als dynamische Anregung in den Untergrund eingeleitet wird, wobei das Maximum im Bereich der Frequenzübereinstimmung  $f=f_0$  (Resonanz) liegt. Das Ausmaß der Resonanzüberhöhung wird dabei durch den Dämpfungsgrad dieses Schwingkreises bestimmt. Da der Widerstand des Untergrunds gegen eine elastische Verformung vom Druck je Flächeneinheit, und somit bei einer gegebenen Kraft von der Größe der Fläche der Einwirkung abhängt, ergibt sich, dass die Größe der Dämpfung von der Größe der Kontaktfläche der Anregung mit dem Untergrund ebenso abhängt, wie von den elastischen Eigenschaften.

Aus Abbildung 10 wird dazu die Resonanzcharakteristik von Anregung und Reaktion für drei unterschiedlich große Anregungsflächen bei konstanter Anregungskraft über alle Frequenzen  $f$  dargestellt.

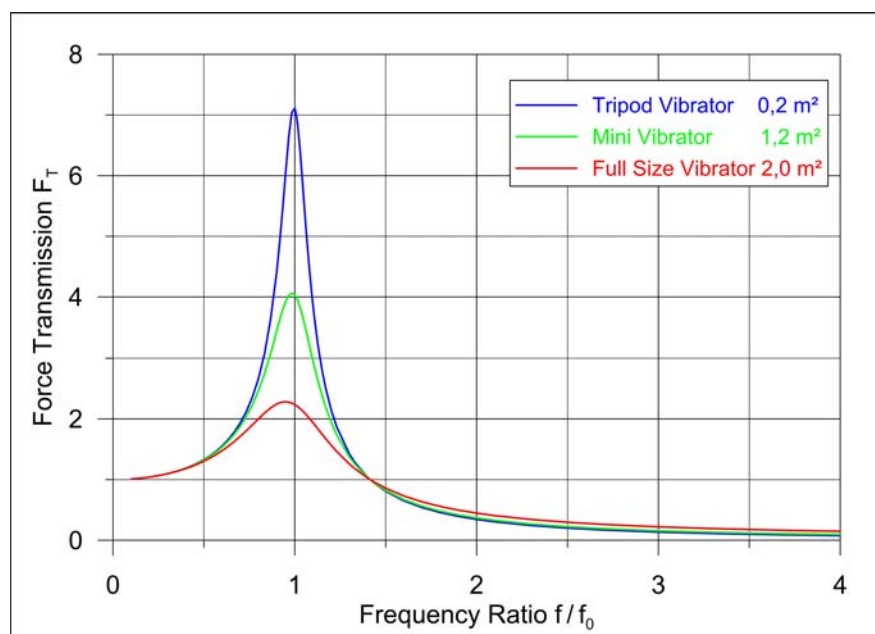


Abbildung 10: Resonanzcharakteristik der in den Untergrund eingeleiteten Kraft in Abhängigkeit von der Anregungsfläche

Wie aus Abbildung 10 ersichtlich ist, hängt die Resonanzüberhöhung sehr stark von dieser Fläche ab. Bei einer Punktanregung kann praktisch nur im Eigenfrequenzbereich des Untergrunds Kraft eingeleitet werden. Erst bei großen Anregungsflächen kann breitbandig Kraft in den Untergrund eingeleitet werden.

Es ist daher erforderlich, bei derartigen Versuchen das Äquivalenzprinzip zwischen Experiment und tatsächlicher Erregerquelle zu berücksichtigen. Mit Hammerschlägen kann man beispielsweise Zugserschütterungen nicht simulieren.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zusammenfassend ergibt sich:

- Die bei der Erschütterungsemission wirksam werdende Reaktionskraft des Untergrundes besitzt eine sehr große Bandbreite. Bei gleicher Anregungskraft kann dadurch die Stärke der Emission um etwa eine Größenordnung variieren.
- Die Tiefenreichweite der dynamischen Anregung kann bei schweren Reisezügen größenordnungsmäßig bis zu 50 m erreichen.
- Selbst unter Berücksichtigung der ausgleichenden Wirkung massiver Bauwerke, wie Tunnel, kann sich die Impedanz der Sohle auf Strecken von wenigen Kilometern um 2-3 Größenordnungen ändern.
- Wenn bei Erschütterungsschutzprojekten vom Auftraggeber Emissionsspektren vorgegeben werden, so müssen diese auf die Anwendbarkeit bei den lokalen Untergrundbedingungen geprüft werden.
- Bei der experimentellen Erschütterungsanregung für Ausbreitungsuntersuchungen u.dgl. ist auf die Äquivalenz der Versuchsanregung zur tatsächlichen Erregerquelle zu achten.

## AUTOR

Univ.Prof.Dr.Peter Steinhauser  
STCE Steinhauser Consulting Engineers ZT GmbH  
Delugstraße 6, 1190 Wien, Österreich  
+43 1 3205451  
[peter.steinhauser@stce.at](mailto:peter.steinhauser@stce.at)  
[www.stce.at](http://www.stce.at)