

# Admittanzbestimmung mit autoadaptiver Kraftaussteuerung beim Wienerwaldtunnel

Peter Steinhauser, Universität Wien, Wolfgang Steinhauser, TU Wien  
und Gerald Zwitter, ÖBB

## 1. EINLEITUNG

Die Größe von Erschütterungsimmissionen wird bekanntlich sowohl vom Erschütterungserreger selbst als auch von den geodynamischen Bedingungen entlang des Ausbreitungsweges im Untergrund sowie dem baulastdynamischen Verhalten des Gebäudes, in dem die Erschütterungsimmissionen wahrgenommen werden, zusammen mit den Wechselwirkungen zwischen diesen Teil-Schwingungssystemen und den zugehörigen Nichtlinearitäten bestimmt.

Hinsichtlich von Eisenbahnerschütterungen ist es daher bei Neubauvorhaben in Siedlungsnähe erforderlich, Immissionsprognosen zu erstellen. Es ist unvermeidlich, dass die Genauigkeit derartiger Prognosen begrenzt ist. Um die Unsicherheiten möglichst gering zu halten, ist es erforderlich, das dynamische Verhalten der verschiedenen Teilsysteme möglichst genau zu erfassen. Dazu eignen sich Untersuchungen mit Hilfe einer Ersatzanregung durch einen Schwingungsgenerator, wie etwa dem VibroScan.at Verfahren besonders gut, da damit auch die oben genannten Wechselbeziehungen integral mit erfasst werden können. Dadurch kann geklärt werden, ob die Immissionsschutzkriterien der jeweils anzuwendenden Norm (beispielsweise ÖNORM S 9012 oder DIN 4150-2) eingehalten werden können. Im Bedarfsfall werden dann auf die lokalen Bedingungen mit ihren vorhin angeführten wechselseitigen dynamischen Abhängigkeiten abgestimmte Unterschottermatten, Masse-Feder Systeme etc. auf der Bahnstrecke eingebaut.

Da – wie überall im Bauwesen – auch beim Bahnbau Bauformen, die leicht und einfach herstellbar sind, bevorzugt und andere Erfordernisse erst in zweiter Linie berücksichtigt werden, ist auch die Gestaltung von Bahnbauwerken, wie Tunnel oder Brücken, hinsichtlich der Schwingungseigenschaften zu berücksichtigen. Derartige Objekte müssen aus Gründen der Wechselwirkung noch der Erschütterungsquelle zugeordnet werden. Im folgenden sollen daher speziell die Möglichkeiten diskutiert werden, die Schwingungsgeneratoruntersuchungen bieten, um die Schwingungsempfindlichkeit von Bahnbauwerken, aber auch des Oberbaus zu beurteilen, die die Erschütterungsanregungen von Zügen frequenzabhängig beeinflussen.

Um bei diesen Untersuchungen Verzerrungen durch das nichtlineare Verhalten der gekoppelten Teilschwingungskreise zu vermeiden, die unter Umständen beträchtliche Größe erreichen können, ist die Form der Ersatzanregung entsprechend sorgfältig zu gestalten. Das bedeutet, dass sie nicht nur die Äquivalenzkriterien in Bezug auf den realen Erschütterungsverursacher erfüllen muss (bei Zügen sind dies ungefederte Radsatzmassen, dynamische Flächenlast, Frequenzband, maximale Achslast etc.), sondern auch die dynamische Kraft der Ersatzanregung über das gesamte zu untersuchende Frequenzband hin möglichst konstant bleiben muss, u.zw. unter Berücksichtigung der Rückkopplung mit dem Untergrund. Es ist somit der frequenzabhängige Widerstand des Bauwerks oder Untergrunds gegen die dynamische Krafteinwirkung, der als Impedanz bezeichnet wird, zu ermitteln.

Die Kenntnis dieser Impedanz ist unabhängig von der Prognosesicherheit auch in jenen Fällen wichtig, wo Gebäude überlappend mit dem Bahnbau geplant werden. Da einerseits zum Zeitpunkt der Errichtung der Strecke kein Bauwerk vorhanden ist, sind die Vorhersageverfahren von DIN 4150-2 oder ÖNORM S 9012 nicht anwendbar. Und da andererseits bei der Errichtung der Objekte noch kein Bahnverkehr existiert, sind auch umgekehrt Immissionsmessungen nicht

möglich. Die Impedanzfunktion bietet in diesem Fall ein Werkzeug, um das Neubauprojekt auf die zu erwartenden Immissionen besser abstimmen zu können.

Ausgehend von den Definitionen der Impedanz und Admittanz sowie den dabei gegebenen messtechnischen Anforderungen wird die Aussagekraft der Admittanz am Beispiel der Immissionsuntersuchungen beim Wienerwaldtunnel diskutiert.

## 2. IMPEDANZ UND ADMITTANZ

Die Impedanz  $Z$  beschreibt den Widerstand einer Struktur gegen eine dynamische Kraft  $F$  als Verhältnis von angeregter Schwinggeschwindigkeit  $v$  zur anregenden Kraft in Abhängigkeit von der Frequenz

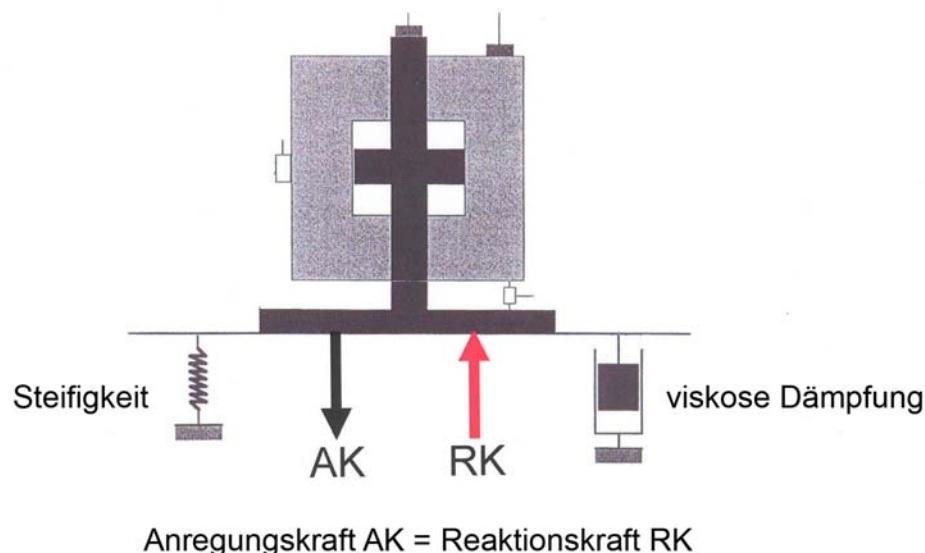
$$Z(f) = \frac{F(f)}{v(f)}$$

Gleichwertig ist es, die Anregbarkeit einer Struktur zu Schwingungen durch eine einwirkende Kraft zu beschreiben, was als Admittanz  $Y$  (mobility) bezeichnet wird und den Kehrwert der Impedanz darstellt.

$$Y(f) = \frac{v(f)}{F(f)}$$

Obwohl somit beide Größen gleichwertig sind, wird im Umweltschutz die Admittanz bevorzugt, da größere Admittanzbeträge auch größere Schwingungsempfindlichkeit eines Systems bedeuten und somit die kritische Kenngröße direkt widerspiegeln. Es handelt sich dabei um eine komplexe Größe, die von der Wechselwirkung der Schwingungsgeneratoranregung mit den viskoelastischen Eigenschaften der Auflagerfläche abhängt.

Wie aus dem Schema von Abbildung 1 ersichtlich ist, bilden die Erregermasse und die durch ihre Steifigkeit und viskose Dämpfung charakterisierte Unterlage einen Schwingkreis.

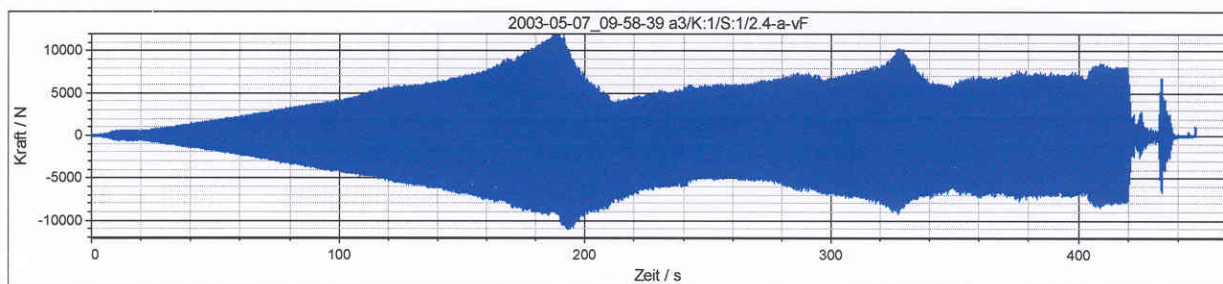


**Abb.1:** Schema der Wechselwirkung Schwingungsgenerator-Untergrund

Aus diesem Grund muss zwischen der frequenzunabhängig konstanten Anregungskraft des Schwingungsgenerators und der in den Untergrund eingeleiteten frequenzabhängig variierenden Kraft unterschieden werden. Infolge der dynamischen Charakteristik des schwingenden Systems Generator/Untergrund müssen dabei ausgeprägte Abweichungen des Vibrations-

nals vom Generator-Steuersignal auftreten und entsprechende Nichtlinearitäten entstehen. Als Schwingungssystem besitzt es zumindest eine von den beteiligten Elementen insgesamt gesteuerte Eigenfrequenz, die typischerweise im Bereich von 10-50 Hz liegt. In diesem Frequenzbereich erfordert die Schwingungsanregung des Untergrunds weniger Kraftaufwand als in entfernteren Frequenzbereichen.

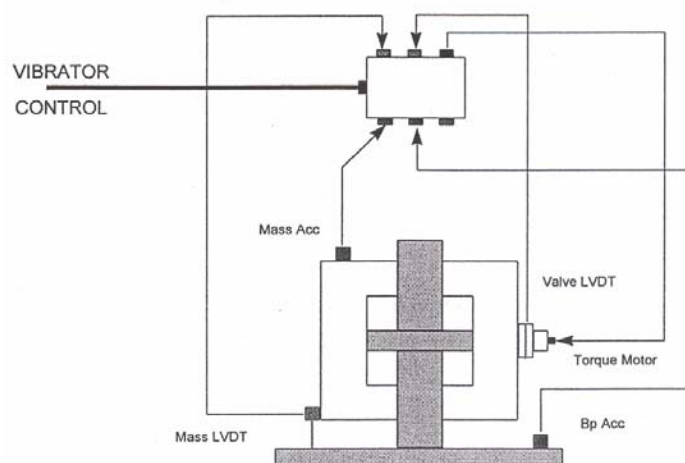
Abbildung 2 zeigt die Variation der vom Untergrund angenommenen Kraft, wenn nur die Anregungskraft des Generators konstant gehalten wird, ohne die Reaktionsantwort des Untergrunds auszugleichen. Im Frequenzbereich von 50-110 Hz (Sweep-Laufzeit ab 190 s) variiert demnach die eingeleitete Kraft um den Faktor 3,0, d.h. 10 dB.



**Abb.2** Kraftverlauf eines 10-110 Hz Sweeps auf der Tunnelsohle bei konstanter Anregungskraft des Generators ohne Aussteuerung für die dynamische Reaktion des Untergrunds

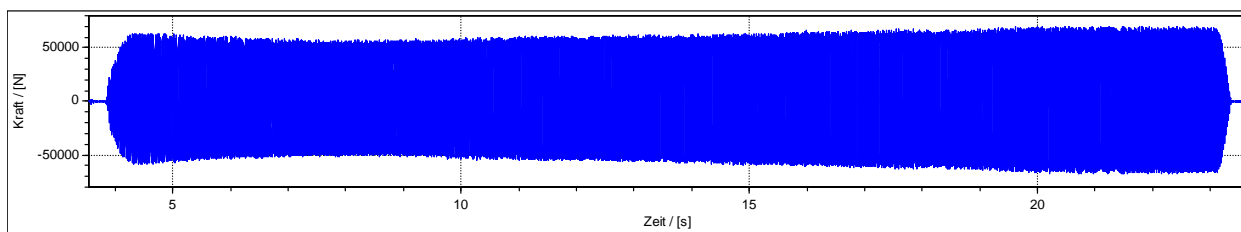
Eine frequenzunabhängig konstante Kraft kann auf den Untergrund nur dann übertragen werden, wenn entsprechende Echtzeit-Steuerungssysteme eingesetzt werden.

Die Kompensation der Phasenverzerrungen ist bei hydraulisch angetriebenen Generatoren relativ einfach durch eine hydro-mechanische Phasenregelung zu erreichen, die bei mechanisch mit Exzentermassen betriebenen Generatoren nicht möglich ist. Um den Amplitudengang zu beherrschen, muss die von der Erregermasse ausgeübte Anregungskraft laufend automatisch entsprechend der Untergrundreaktion ausgesteuert werden. Die hierfür notwendigen Eingangssignale liefern Beschleunigungs- und Kraftsensoren an der Erregermasse, der Grundplatte und dem Steuerventil (Abbildung 3) des VibroScan.at-Schwingungsgenerators.



**Abb.3:** Sensoranordnung des Schwingungsgenerators für die Kraftaussteuerung  
LVDT: Kraftsensor    Acc: Beschleunigungssensor

Für die Kraftmessung werden dabei LVDT (linear variable differential transducer)-Sensoren verwendet, da diese infolge ihrer extrem geringen Hysterese für dynamische Messungen sehr gut geeignet sind. Die Messwerte aller Sensoren werden als Zeitreihen in 250  $\mu$ s-Intervallen ermittelt und über einen Kalman Filter zur Prognose des nächsten Zeitschritts verwendet, womit die Anregungskraft des Schwingungsgenerators autoadaptiv angesteuert wird. Da die Frequenzänderungsraten der Sweeps im Regelfall niedrig sind (etwa 2-4 Hz/s), kann eine hohe Kraftkonstanz erzielt werden (Abbildung 4), da je Hertz Frequenzänderung 1000-2000 Kraftmess- und Aussteuerungszyklen erfolgen. Der entscheidende Fortschritt der Admittanz-Bestimmung nach dem VibroScan.at Verfahren besteht somit darin, dass die Anregungskraft während eines Frequenz-Sweeps nicht nur gemessen wird, sondern auch zur Stabilisierung der Kraft auf konstantem Niveau verwendet wird. Die Bandbreite der Kraftvariation sinkt somit auf den Faktor 1,2 oder 2 dB ab.



**Abb.4:** Kraftverlauf eines 36-96 Hz Sweeps auf einer bituminösen Tragdeckschicht mit autoadaptiver Kraftaussteuerung

Zusammenfassend ergibt sich, dass in Erweiterung des klassischen Admittanzbestimmungskonzepts die Anregungskraft nach dem Prinzip der autoadaptiven Aussteuerung nicht nur gemessen wird, sondern im Zeitfaktor von wenigstens 1000:1 auch zur konstanten Aussteuerung der in den Untergrund tatsächlich eingeleiteten Kraft verwendet wird, wodurch Nichtlinearitäten der Kraftanregung wirkungsvoll unterdrückt werden.

Der Frequenzbereich, für den die Admittanz zu untersuchen ist, ergibt sich aus der Aufgabenstellung und wird für Erschütterungsuntersuchungen des Schienenverkehrs in ISO 14837-1 wie in Tabelle 1 angegeben, festgelegt. Dieser wird vom VibroScan.at-Schwingungsgenerator in vollem Umfang abgedeckt.

**Tab.1:** Frequenzbereich für Erschütterungs- und Sekundärschalluntersuchungen des Schienenverkehrs

Ziel	Frequenzband
Erschütterungswahrnehmung des Menschen	1-80 Hz
Sekundärschallwahrnehmung des Menschen	16-250 Hz
Bauwerksbelastung	1-150 Hz
erschütterungsempfindliche Geräte/Arbeiten	1-200 Hz

### 3. UNTERSUCHUNGSMETHODIK

Das Ziel einer Erschütterungsprognose ist es, die Stärke der zu erwartenden Immissionen vorherzusagen und darüber hinaus die Immissionseigenschaften (insbesondere Frequenzspektren) so genau angeben zu können, dass erforderlichenfalls geeignete Maßnahmen zur Dämmung getroffen werden können. D.h., dass das Schwingungsverhalten folgender Teilsysteme zu berücksichtigen ist:

- Emissionseigenschaften der Quelle (Fahrzeug, Rad, Oberbau)
- Antwortreaktion der Tragstruktur auf die Emission (Admittanz)
- geodynamische Bedingungen der Erschütterungsausbreitung (Transmission)
- baudynamisches Verhalten der betroffenen Gebäude

Um möglichst aussagekräftige Positionen für die Ersatzanregung mittels Schwingungsgenerator im Tunnel auswählen zu können, ist es notwendig, kritische Trassenabschnitte (z.B. Weichen), Änderungen der Geologie (z.B. Störungen) vor allem aber die baudynamischen Eigenschaften der obertägigen Gebäude zu berücksichtigen. Da es unmöglich ist, alle Gebäude messtechnisch zu erfassen, muss zunächst die Schwingungsfreudigkeit nach bautechnischen Kriterien klassifiziert werden. Dabei ist zwischen Erschütterungs- und Sekundarschallanfälligkeit zu unterscheiden, wobei folgende bautechnische Parameter berücksichtigt werden:

- Gebäudegröße (Keller, Geschoßzahl)
- Bauweise des Hauses
- Fundamentgestaltung
- Deckenausführung
- Baualter und Baugeschichte

Diese Voruntersuchungen gestatten es dann, einerseits die Vibro-Positionen im Tunnel und die zu untersuchenden Anrainergebäude auszuwählen. Kriterien zur Auswahl der letzteren sind Abstand zum Tunnel, Ähnlichkeit der Bauweise mit benachbarten Häusern, Nutzungsart, Zugänglichkeit für Messungen u.dgl.

Bei der Durchführung der Ersatzanregungsversuche ist dann hinsichtlich der Emissionseigenschaften darauf zu achten, dass die Äquivalenzkriterien zur Erschütterungsanregung eines Zuges eingehalten werden, was beim Schwingungsgenerator des VibroScan.at Verfahrens in hohem Ausmaß erfüllt ist (P.u.W.Steinhauser, 2007). Wie vorhin ausgeführt, kann mit diesem Generator die Admittanz des Tunnels für das gesamte erforderliche Frequenzband (siehe Tab.1) untersucht werden.

Um die Transmission durch den Untergrund und schließlich die in den Anrainergebäuden auftretenden Immissionen erfassen zu können, sind Messungen an den Hausfundamenten und im Aufenthaltsbereich der Bewohner erforderlich. Um die stärksten Immissionen sicher zu erfassen, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Immissionsmessungen von 2-3 verschiedenen Tunnel-Vibro-Positionen aus durchzuführen. Ebenso sind 3-Komponenten Messungen erforderlich, da die Horizontalkomponenten wiederholt ein von der Vertikalkomponente unterschiedlichen Verhalten bei durchaus vergleichbarer Größe aufweisen. Zusätzlich können im Zuge der Immissionsmessungen auch baudynamische Kennwerte wie Gebäudeeigenfrequenzen oder die Deckendämpfung ermittelt werden.

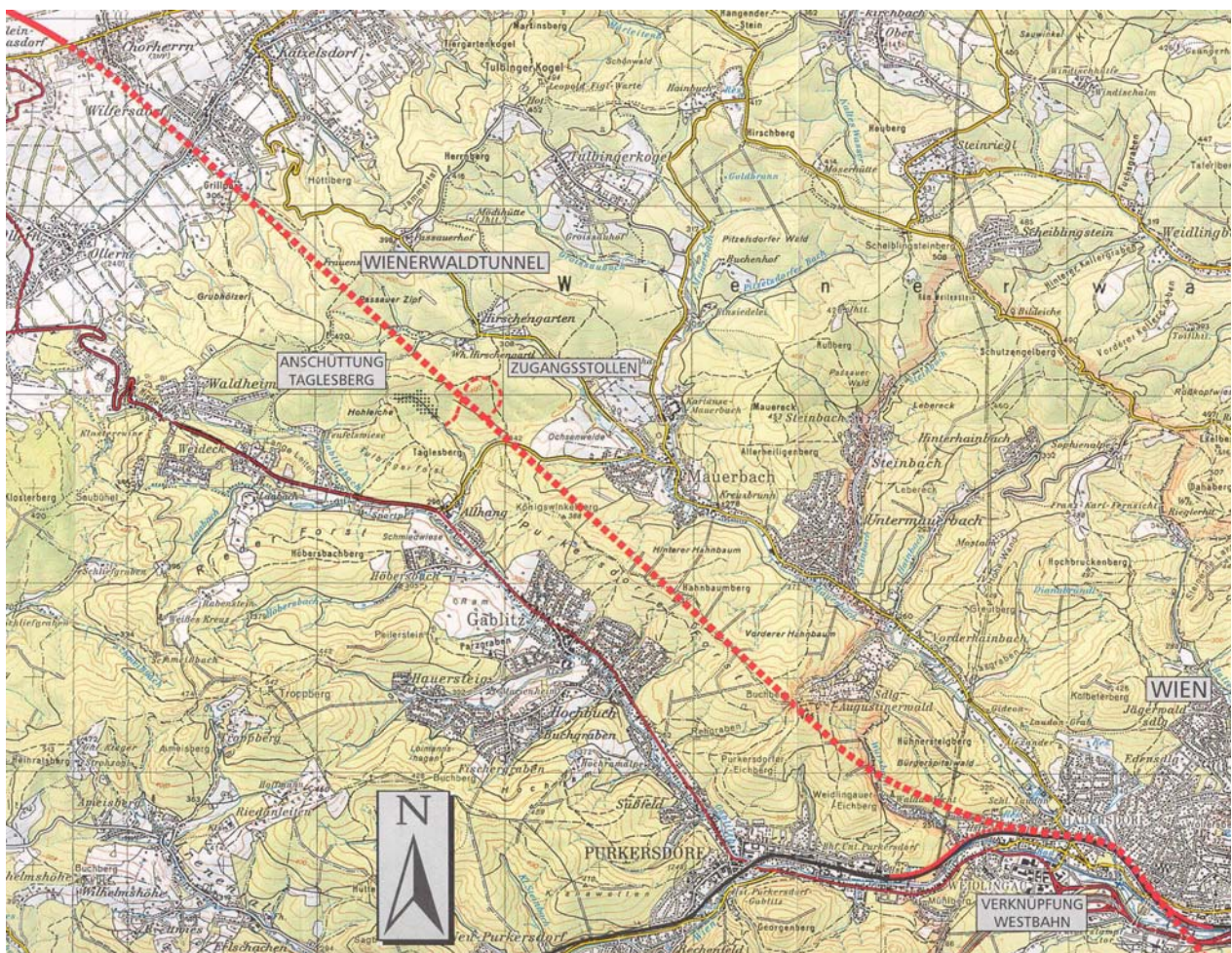
### 4. WIENERWALDTUNNEL DER NBS WIEN-ST.PÖLTEN

Die Neubaustrecke (NBS) Wien – St. Pölten ist ein wesentlicher Bestandteil des Ausbaus zur viergleisigen Westbahn zwischen Wien und Wels. Die Investitionen in diesem Bereich sind auch vor dem Hintergrund der überregionalen Bedeutung der Donauachse als prioritärer Korridor der Transeuropäischen Netze (TEN) zu sehen.

Herzstück der NBS ist der 13,35 km lange Wienerwaldtunnel (Abbildung 5), der von der „Verknüpfung Westbahn“ in Hadersdorf-Weidlingau im Osten aus den zwischen Gablitz und Mauer-

bach liegenden Höhenrücken im nördlichen Teil des Wienerwaldes bis ins Tullnerfeld bei Chorgherrn/Klein Staasdorf im Westen unterfährt.

Konstruktiv besteht der Tunnel aus zwei Abschnitten. Der Ostabschnitt wird über eine Länge von 1827 m als zweigleisiger Tunnel geführt, da hier zwei Weichenverbindungen zwischen den Gleisen erforderlich sind. Danach erfolgt in einer stufenweisen, 409 m langen Aufweitungsstrecke der Übergang auf zwei eingleisige Tunnel. Nach ca. 120 m sind ein Notfallentlüftungsschacht und eine quer zu den Tunnelachsen liegende Notfallentlüftungskaverne angeordnet. Die beiden eingleisigen Streckenröhren des Westabschnitts verlaufen danach parallel in einem Regelabstand der Gleisachsen von 31 m weiter nach Nordwesten. Beginnend vom Westportal bis unmittelbar vor die Notfallentlüftungskaverne wurden die Tunnel auf eine Länge von 10730 m mittels zweier Tunnelvortriebsmaschinen aufgeföhren.



**Abb.5:** Lageplan des Wienerwaldtunnels der NBS Wien-St.Pölten

Der Regelquerschnitt der maschinell vorgetriebenen eingleisigen Tunnelröhren ist in Abbildung 6 dargestellt. Es handelt sich dabei um einen Zweischaligen Aufbau, bestehend aus einer Segmentauskleidung mittels Tübbing (5 Regelsteine, 1 Schlussstein), welche die Außenschale darstellt. Nach Einbau eines Abdichtungssystems im Bereich des Gewölbes erfolgt durchgehend die Herstellung einer konventionellen, 30 cm starken Innenschale aus grundsätzlich unbewehrtem Ortbeton.



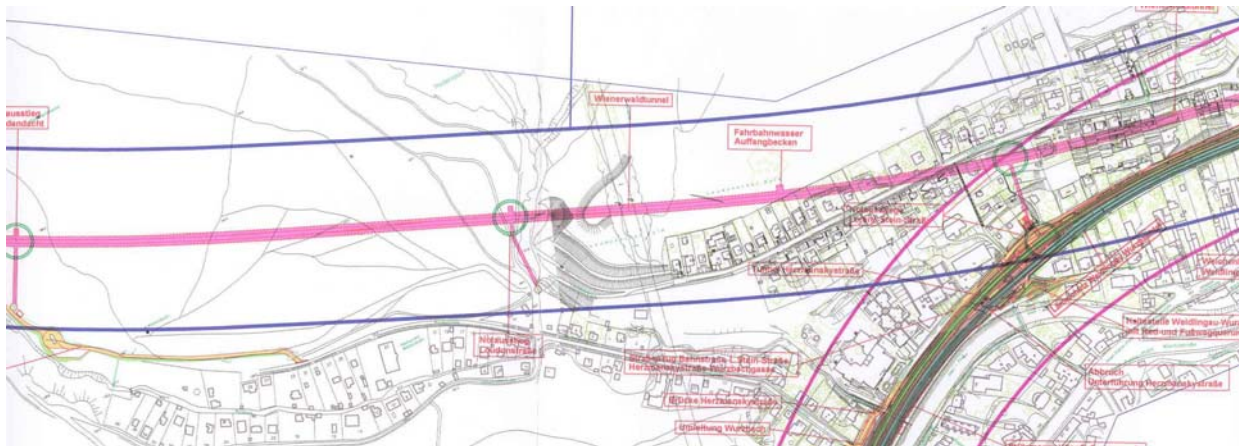
In Abständen von 500 m sind die beiden Tunnelröhren durch Querschläge verbunden. Die Querschläge wurden im Bagger- und Sprengvortrieb aufgeföhren.

Der zweigleisige Abschnitt inkl. Aufweitung und Notfallentlüftung wurde im Bagger- und Sprengvortrieb errichtet. Der Regelquerschnitt der zweigleisigen Tunnelröhre (Abbildung 7) erfordert der NÖT-Bauweise entsprechend eine zweischalige Auskleidung mit einer Außenschale aus Spritzbeton und einer Gewölbebeton-Innenschale >30 cm.

Die minimale Überlagerung am Westportal sowie im Anfangsbereich des Ostabschnittes beträgt etwa 8 m, die maximale Überlagerung liegt bei etwa 240 m.

## 5. UMGEBUNGSSITUATION DES WIENERWALDTUNNELS

Wie bereits aus Abbildung 5 ersichtlich ist, verläuft der Tunnel zum weitaus überwiegenden Teil durch nicht besiedelte Forste des Wienerwalds. Der Tunnel beginnt jedoch im Wiener Stadt- rand-Siedlungsgebiet, wo er von der Westbahn-Bestandsstrecke nach NW abzweigt und nach 800 m bereits das bebaute Gebiet selbst verlässt, diesem aber für weitere 700 m in etwa 150-200 m Distanz folgt (Abbildung 8). Erst etwa 2 km vor dem Westportal werden wieder Häuser eines Dorfes in etwa 30 m Tiefe unterfahren.

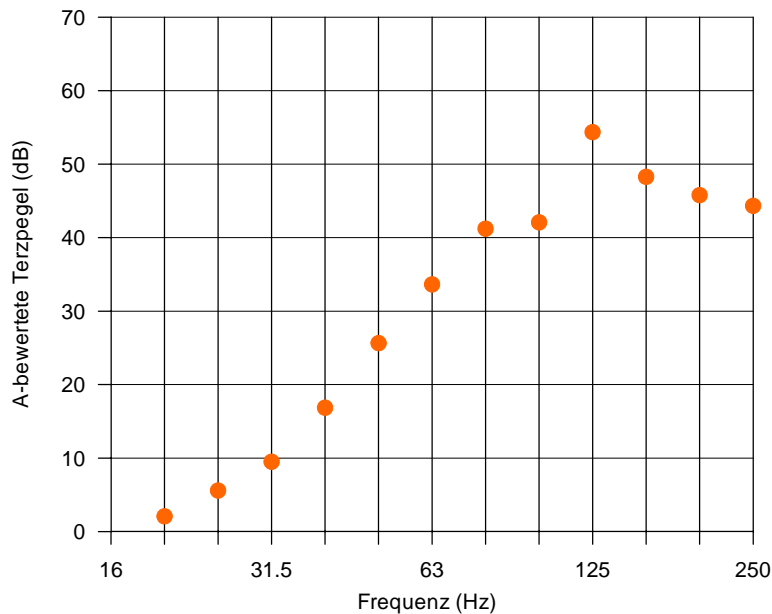


**Abb.8:** Tunnel-Ostabschnitt nahe der Wohnbebauung

Die erschütterungstechnische Voruntersuchung im Zuge des Baubewilligungsverfahrens hat für die beiden Abschnitte im unmittelbaren Siedlungsgebiet ergeben, dass der Einbau von Masse-Feder Systemen (MFS) erforderlich sein wird. Qualitativ wurde die Richtigkeit dieser Vorhersage durch die Stärke der vom Tunnelvortrieb bei den Anrainern hervorgerufenen Immissionen bestätigt.

Im maschinell vorgetriebenen Westabschnitt lösten die relativ leichten und nur langsam fahrenden Bauzüge Sekundärschallimmissionen aus, deren Pegelspitzen den Grundgeräuschpegel um etwa 20 dB(A) überschritten haben, der in dieser abseits der Hauptverkehrswege gelegenen, nicht industrialisierten Region in der Nacht allerdings sehr niedrig ist. Dementsprechend massive Anrainerproteste waren die Folge.

Ähnliche Proteste löste auch der Vortrieb auf der Wiener Seite des Tunnels aus, wie dies im bebauten Gebiet auch zu erwarten war. Überraschenderweise hielten die Proteste aber an, als der Vortrieb den Tunnelabschnitt erreichte, wo die Wohnhäuser bereits mehr als 150 m vom Tunnel entfernt waren (Abb.8 links). Immissionsmessungen bestätigten Pegelspitzen von 55-60dB(A) und bewertete Schwingstärken bis zu  $K_{Bmax} = 0,4$  bei den Vortriebssprengungen in 150-250 m Distanz, wie Abb.9 beispielsweise zeigt.



**Abb.9:** Terzpegel der Sekundärschallimmissionen einer Vortriebs-sprengung in ca. 200 m Entfernung

Die VibroScan.at Untersuchungen zur Dimensionierung der MF-Systeme sind aus diesen Gründen zuerst in diesen beiden kritischen Tunnelabschnitten durchgeführt worden, wovon im folgenden die die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt werden.

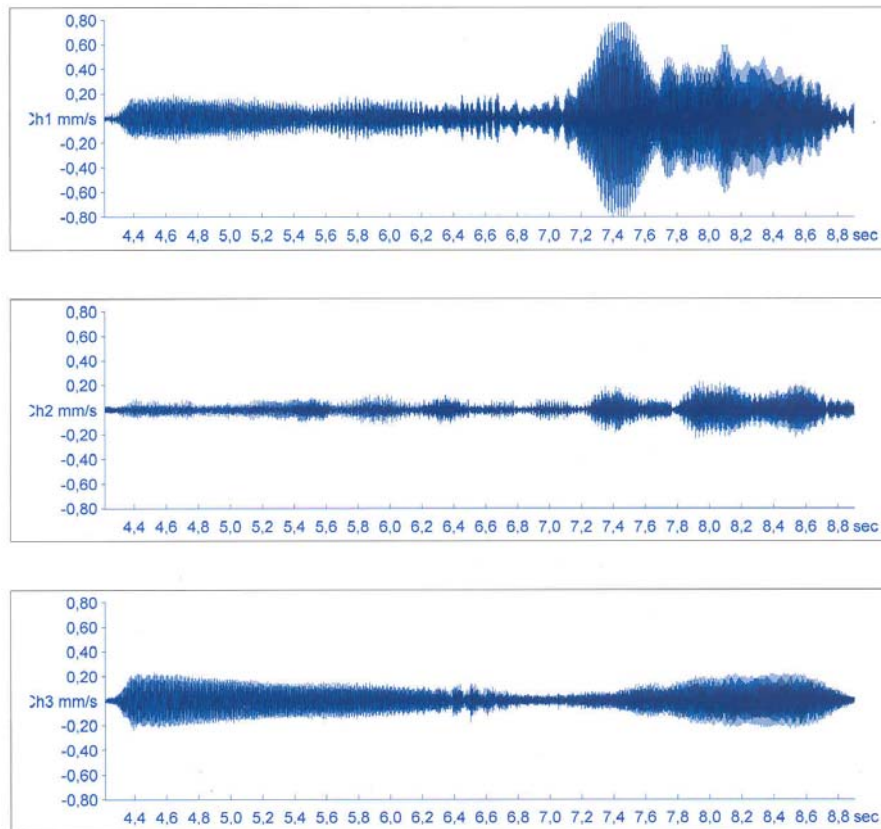
## 6. UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Für die beiden Untersuchungsabschnitte, von denen einer im Westabschnitt und der andere im Ostabschnitt des Tunnels gelegen ist und die zusammen etwa 900 m lang sind, wurden wie vorhin dargestellt unter Berücksichtigung der geplanten Weichenverbindungen, der Geologie und insbesondere der baulastdynamischen Bewertung und Einstufung von zusammen rund 120 Objekten in der Tunnelumgebung insgesamt 15 Vibro-Positionen für die Ersatzanregung und 26 Anrainergebäude für die Transmissions- und Immissionsmessungen festgelegt. An zwei Vibro-Positionen wurde die Admittanz des Tunnels bestimmt. In beiden Tunnelbereichen war jeweils nur die Außenschale (Tübbingsteine bzw. Spritzbeton) fertiggestellt, sodass in dieser Hinsicht „worst case“ Bedingungen gegeben waren.

Um neben den Erschütterungen auch die Sekundärschallimmissionen erfassen zu können, wurden die Sweeps der Schwingungsgeneratoranregung so gewählt, dass das gesamte Frequenzband entsprechend den Anforderungen von Tabelle 1 angeregt worden ist.

Als Beispiel für die Erschütterungsanregung des Schwingungsgenerators zeigt Abbildung 10 die in 10 m Entfernung gemessene Emission eines Sweeps von 157-241 Hz vom Tunnel-Westabschnitt im Tübbingausbaubereich. Entsprechend der Rückkopplung Generator-Tunnel-Untergrund werden einzelne Frequenzbänder bevorzugt, wobei die Emissionen der Horizontal-komponente mit  $f_{\max} = 210$  Hz dominant sind. Dies bestätigt die Notwendigkeit einerseits der hochfrequenten Anregung und andererseits der Dreikomponentenmessung.

Die Admittanzuntersuchung wurde wegen der erwarteten deutlichen Sekundärschallimmissionen breitbandig für das gesamte von ISO 14837-1 geforderte Spektralband von 1-250 Hz ausgelegt und erfolgte im Westabschnitt (Abb.6) im zu diesem Zeitpunkt noch einschaligen Tübbingtunnel. Für den Ostabschnitt (Abb.7) wurde der Ausgangspunkt des Tunnels, den die unterirdische „Verknüpfung Westbahn“ des Lainzer Tunnels bildet, mit einem massiven Rechteckquerschnitt gewählt.

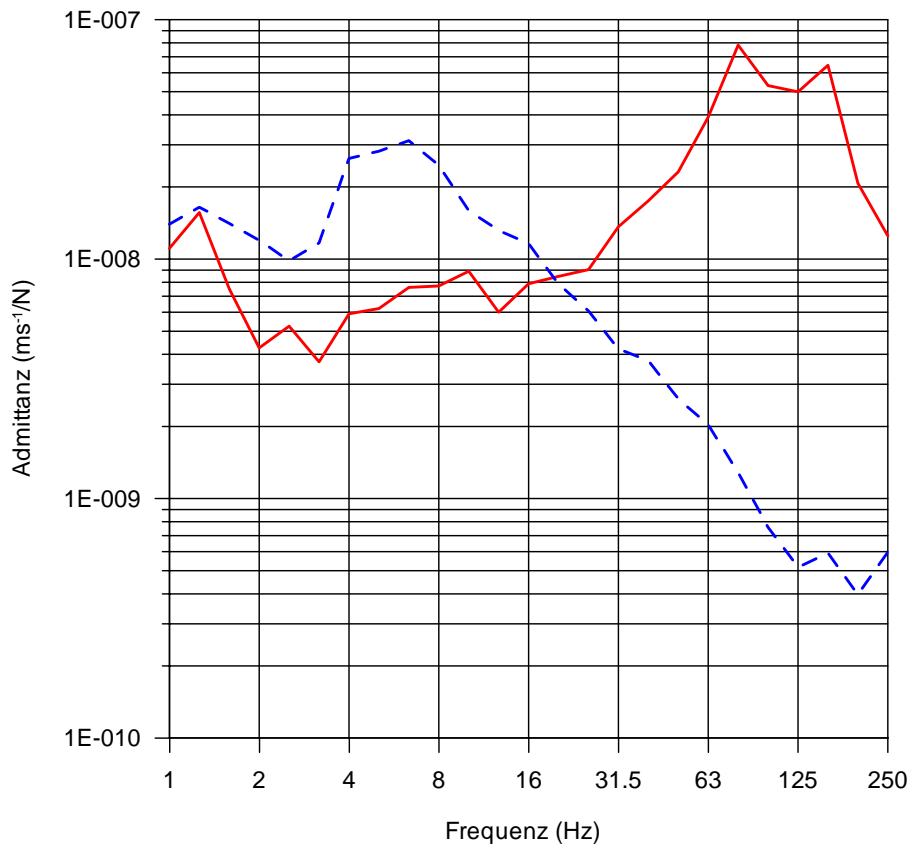


**Abb.10:** Erschütterungsemissionen eines 157-241 Hz Sweeps an der Vibro-Position 745 im Tunnel-Westabschnitt bei einschaligem Tübbingausbau

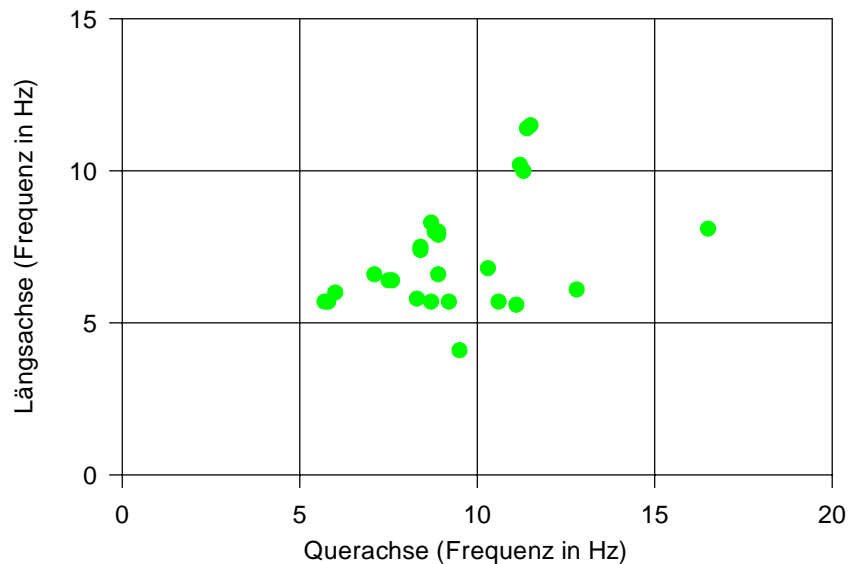
Abbildung 11 gibt die Admittanzfunktion für die Tunnelwand in 1 m Distanz wieder. Demnach besitzt der einschalige Tübbingtunnel im Westabschnitt (rot) die geringste Admittanz bei 3 Hz. Mit zunehmender Frequenz nimmt dann die Mobilität bis zur 80 Hz-Terz zu und wird erst bei 200 Hz wieder kleiner. Somit begünstigt dieser Frequenzverlauf der Admittanz insbesondere die Übertragung der höherfrequenten Emissionen, die für die Sekundärschallimmissionen maßgeblich sind. Ein ähnliches Admittanzverhalten ist auch bei den Tübbingröhren des Nord-Süd Tunnels Berlin beobachtet worden (Jaquet u. Garburg, 2007), wo allerdings nur das Frequenzband von 10-110 Hz untersucht worden ist. Im Vergleich zum Nord-Süd Tunnel ist die Admittanz beim Wienerwald-Tübbingtunnel um etwa 6-10 dB geringer, was als Hinweis darauf gedeutet werden kann, dass auch die Umgebungs-Geologie sich als Glied der Rückkopplungskette bemerkbar macht. Während die Tunnel in Berlin durch wassergesättigte Lockersedimente verlaufen, befinden sie sich im Wienerwald-Westabschnitt in verhältnismäßig kompakten tertiären Molassesedimenten.

Ganz anders ist die Situation im Ostabschnitt (blau) des Tunnels, wo im niederfrequenten Teil des Spektrums die Mobilität zunächst zwar größer ist als im Tübbingtunnel, ihr Maximum aber bereits bei etwa 6 Hz erreicht und danach kontinuierlich abnimmt, sodass von 80 Hz aufwärts die Differenz fast zwei Größenordnungen zu Ungunsten der Tübbingbauweise beträgt.

Hinsichtlich des baulastdynamischen Verhaltens der Anrainergebäude haben die Messungen die in Abbildung 12 wiedergegebenen Gebäudeeigenfrequenzen um Quer- und Längsachse ergeben. Den verhältnismäßig geringen Bauwerksabmessungen entsprechend sind diese Frequenzen relativ hoch. Die Deckeneigenfrequenzen variieren je nach Deckenspannweite und Bauweise im Bereich von 10-37 Hz. Hingegen liegen die Beträge des Dämpfungsmaßes vorwiegend in dem schmalen Band von 3-5%.



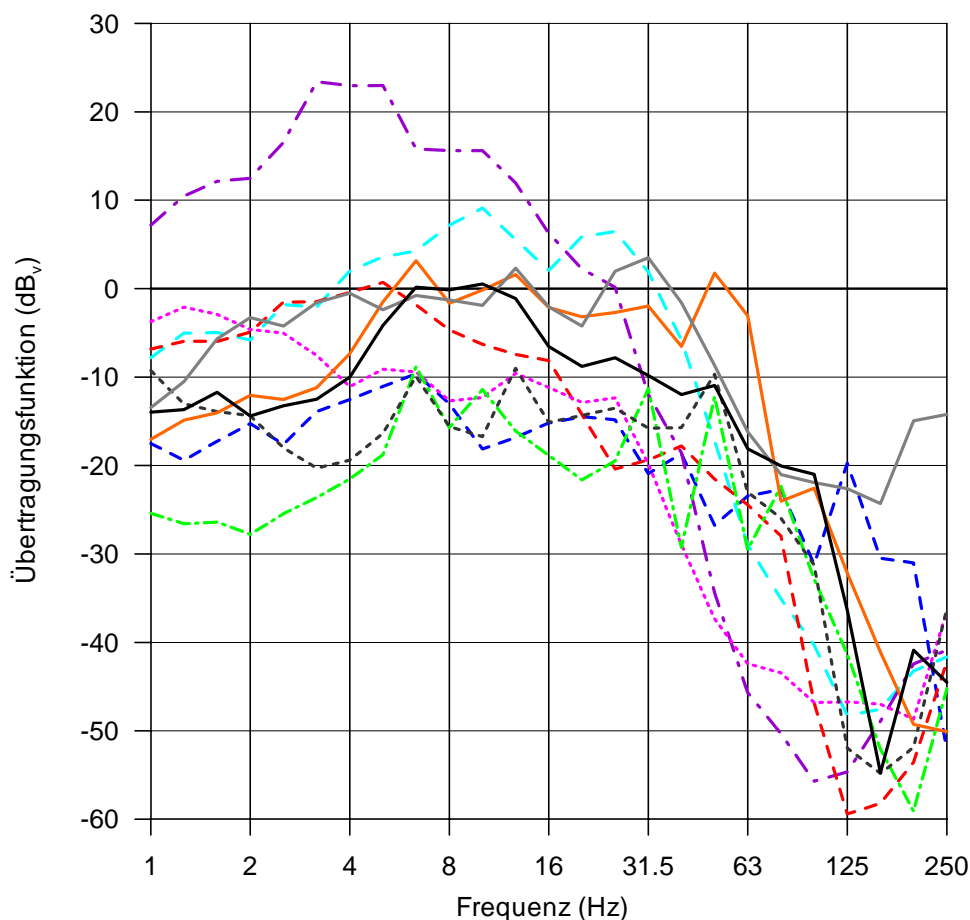
**Abb.11:** *Terzspektren der Admittanz beim Wienerwaldtunnel*  
 rot: Westabschnitt  
 blau: Ostabschnitt



**Abb.12:** *Gemessene Eigenfrequenzen der untersuchten Wohngebäude*

Wie stark die von den Sweep-Emissionen hervorgerufenen Immissionen in den Wohnräumen der Anrainer sind, ist für die jeweils näher gelegenen Objekte in Abbildung 13 in Form von Übertragungsfunktionen wiedergegeben. Demnach ist im niederfrequenten Bereich im Extremfall sogar Verstärkung um bis zu 23 dB zu erwarten. Oberhalb von 50 Hz tritt generell Dämpf-

fung auf, die aber im Frequenzbereich von 125 Hz ein Maximum erreicht, wonach mit zunehmender Frequenz nur noch kleinere Dämpfungsbeträge erreicht werden.

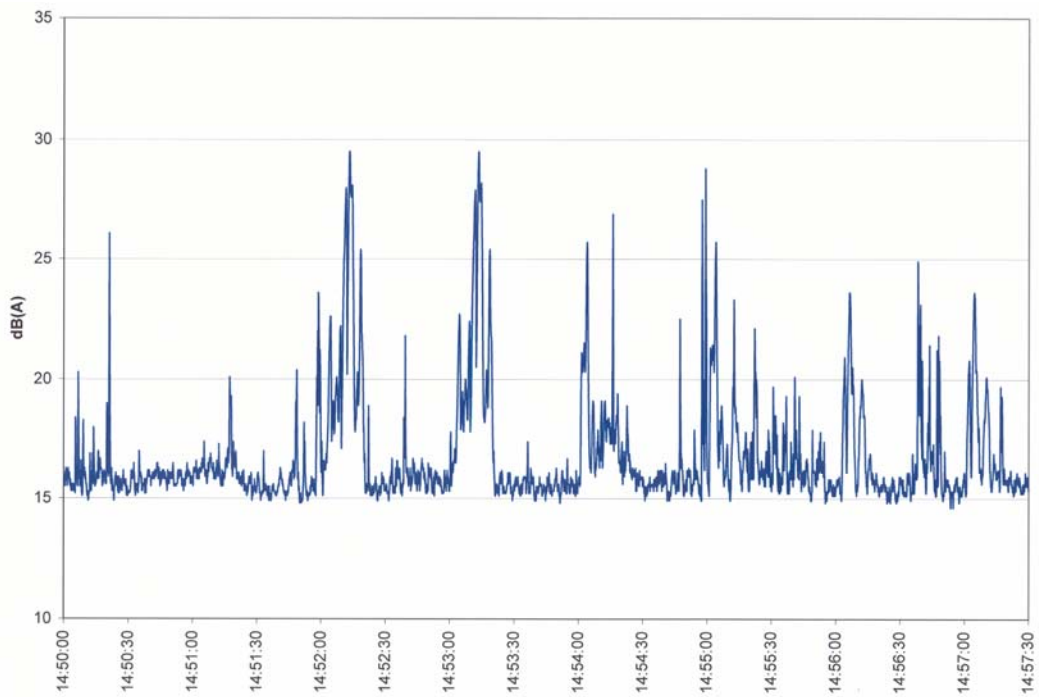


**Abb.13:** Übertragungsfunktionen der Sweep-Emissionen zu den Wohnräumen nahegelegener Anrainergebäude

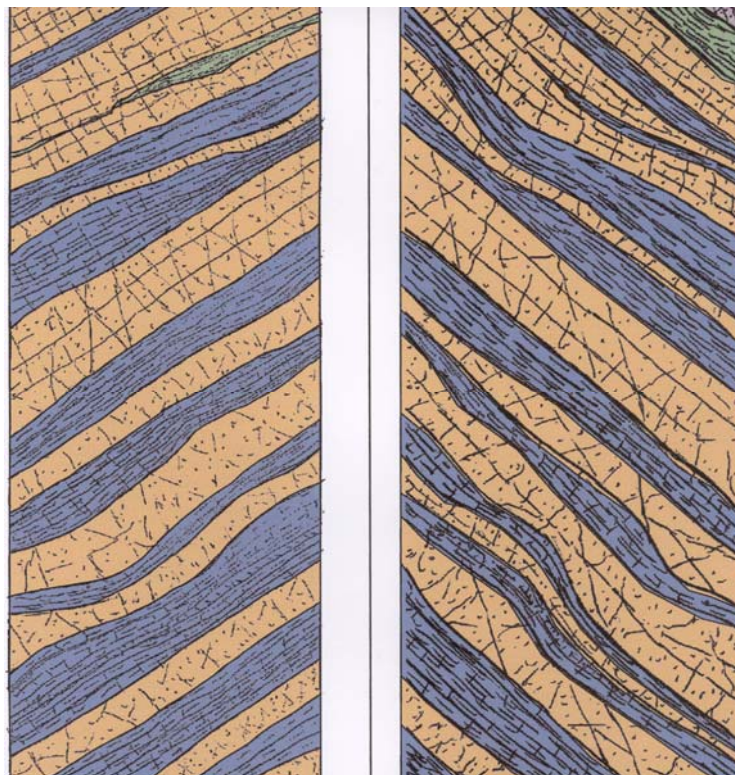
Überraschend war bei den VibroScan.at Untersuchungen die Höhe der durch die Sweeps hervorgerufenen Sekundärschallimmissionen, wie das Beispiel von Abbildung 14 zeigt. Dabei ist der Sekundärschall in einem Wohnhaus von einer 230 m entfernten Vibro-Position wiedergegeben: die A-bewerteten Pegelspitzen liegen um rund 14 dB über dem Grundgeräuschpegel zum Zeitpunkt der Messung, wobei dieser in der Nacht mit Sicherheit noch deutlich tiefer liegen wird.

Die bereits beim Sprengvortrieb für den Wienerwaldtunnel-Ostabschnitt beobachteten guten Übertragungsbedingungen für hochfrequente Erschütterungen haben sich somit bestätigt. Dies war nur deshalb erkennbar, weil die Schwingungsgenerator-Anregung bis 250 Hz aufwärts erfolgte und somit das Transmissions-Minimum des Untergrunds im Bereich um 125 Hz überschritten hat.

Derartig hochfrequente Erschütterungsimmissionen werden vom Menschen nicht mehr verspürt, dafür aber umso stärker als Sekundärschall gehört. Die Ursache dieser außergewöhnlich starken und weit reichenden Erschütterungsimmissionen ist in der lokalen Geologie im Tunnel-Ostabschnitt zu suchen. Wie aus Abbildung 15 beispielhaft zu ersehen ist, wird das Gebirge aus Wechselfolgen von sehr harten, mäßig zerlegten Gesteinen und mürben bis mäßig harten, zumeist stark zerlegten Gesteinen gebildet, in diesem Fall einerseits Sandstein und andererseits Schluff- und Tonstein.



**Abb.14:** Schallpegelregistrierung der Sweeps in einem Wohnhaus in 230 m Entfernung von dem Anregungspunkt. Startzeitpunkt der 20-Sekunden-Sweeps minütlich von 14:50 bis 14:57



**Abb.15:** Baugeologisches Tunnelband TM 770-800  
links: Vertikalschnitt  
rechts: Horizontalschnitt

In derartigen, nicht sehr häufig auftretenden, gebankten Strukturen breiten sich Erschütterungen in der Form von Kanalwellen aus. Sie besitzen dabei eine sehr große Reichweite, da die Schwingungsenergie aus strahlengeometrischen Gründen im jeweiligen Kanal kaum Verluste erfährt (keine Abstrahlung). Zusätzlich begünstigt die vergleichsweise dünne Schichtung die Ausbildung hochfrequenter Schwingungen – wodurch sich letztlich das Sekundärschallproblem ergibt.

Infolge der aus Abbildung 15 beispielhaft erkennbaren Orientierung der Schichtfolgen, ergibt sich die ungünstige Situation, dass die Erschütterungsausbreitung nicht auf dem kürzesten Weg, sondern – in Vortriebsrichtung des Tunnels gesehen – schräg nach rückwärts gerichtet erfolgt. Es ist daher erforderlich, die benötigten Immissionsschutzmaßnahmen über die Höhe der Bebauung hinaus in den Tunnel auszudehnen.

Auf Basis der Ergebnisse dieser Untersuchung hinsichtlich der Tunneladmittanz, der Baudynamik der Anrainergebäude und der Erschütterungs-Übertragungsfunktionen sind die erforderlichen Masse-Feder Systeme dimensioniert worden. Im Westabschnitt wurde dabei eine MFS-Eigenfrequenz von 8 Hz und im untersuchten Teil des Ostabschnitts eine von 21 Hz ermittelt.

## 7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Admittanzbestimmung des Tunnelbauwerks liefert wichtige Informationen über sein Emissionsverhalten.
- Die autoadaptive Aussteuerung der Anregungskraft bewirkt eine wirkungsvolle Stabilisierung der in den Untergrund eingeleiteten Kraft.
- Die lokalen geologischen Bedingungen beeinflussen erwartungsgemäß als Rückkopplungselement die Admittanz.
- Die Beobachtung der Erschütterungsimmissionen der Bauarbeiten liefert wertvolle, ergänzende Informationen für den Immissionsschutz.
- Die Bekämpfung von Überreichweiten der Immissionen infolge von Kanalwellenanregung erfordert die Berücksichtigung der Orientierung der „Kanäle“ (Störungen, Schichtung etc.).

## LITERATURVERZEICHNIS

Jaquet, Th. und R. Garburg: Measurements and Investigations at the Floating-Track-Bed System in the North-South Tunnel in Berlin. 9<sup>th</sup> International Workshop on Railway Noise. München, 2007.

Steinhauser, P. und W.: Neue Möglichkeiten zur Erschütterungsuntersuchung durch das VibroScan advanced technology Verfahren. 10. Symposium über Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen, EMPA 2007.

## AUTOREN

Univ.Prof.Dr.Peter Steinhauser  
Delugstraße 8, 1190 Wien, Österreich  
Dipl.Ing.Wolfgang Steinhauser  
Heiligenstädter Straße 9/42, 1190 Wien, Österreich  
Dipl.Ing.Gerald Zwitnig  
ÖBB Infrastruktur Bau AG, PLWO1  
Sparkassaplatz 6, 1150 Wien, Österreich

e-mail: [office@steinhauser.eu](mailto:office@steinhauser.eu)  
[gerald.zwitnig@bau.oebb.at](mailto:gerald.zwitnig@bau.oebb.at)