

Erschütterungsprognose nach dem VibroScan[®]-Verfahren am Koralmtunnel

Norbert Blaumoser, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien, A
Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Unterberger, iC consulenten ZT GmbH Wien, A
Mag. Michael Österreicher, iC consulenten ZT GmbH Wien, A

1. Einleitung

Erschütterungen, hervorgerufen durch Schienenverkehr, Autostraßen und Bautätigkeit können einerseits eine Beeinträchtigung der Lebensqualität bedeuten und andererseits ein Gefahrenmoment darstellen. Erschütterungsprognosen beruhen idealerweise auf einer Kombination von rechnerischen Überlegungen, Messungen und Erfahrungen. Die Genauigkeit der Prognosen wird in mehreren iterativen Schritten im Zuge der Entwicklung eines Projektes gesteigert. Je weiter das Projekt voranschreitet, desto mehr treten messtechnische Verfahren in den Vordergrund. Erschütterungsschutz erfordert ein hohes Maß an Flexibilität in der Planung und Umsetzung eines Projektes. Die endgültige Festlegung und Feinabstimmung des Erschütterungsschutzes kann erst durch Messungen nach Fertigstellung des Strecken- oder Tunnelrohbaus erfolgen. Besonders im Tunnelbau sind dementsprechend im Regelquerschnitt entsprechende Bautoleranzen für die Ausführung der Erschütterungsschutzmaßnahmen – meist Masse-Feder Systeme – vorzuhalten.

Als wesentliches Werkzeug zur Feinabstimmung des Erschütterungsschutzes hat sich der Einsatz von Großrüttlern etabliert. Mit derartigen Schwingungsgeneratoren können Übertragungsfunktionen von der künftigen Bahnstrecke in die umliegenden Gebäude ermittelt werden, um auf deren Basis detaillierte Prognosen der Immissionen bei den betroffenen Anrainern erstellt werden können. Anhand dieser Prognosen können die Maßnahmen möglichst exakt und effizient dimensioniert werden wodurch die Kosten der immissionsmindernden Maßnahmen deutlicher verringert werden können.

Eines der bekanntesten und wirksamsten Schwingungsgeneratorverfahren ist das VibroScan[®]-Verfahren, das im vorliegenden Artikel anhand eines großen Infrastrukturprojekts, dem Koralmtunnel, präsentiert wird.

Eines der Haupteinsatzgebiete des VibroScan[®]-Verfahrens liegt in der Prognose der Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall von Schienenstrecken. Hierbei können mit diesem Verfahren sowohl Freilandstrecken als auch Bahnstrecken in Tunnelbereichen abgedeckt werden. Im Bereich von Tunnelbauwerken kann der Schwingungsgenerator in Zusammenhang mit einer Kraftmessung zur Ermittlung der Admittanz des Tunnelbauwerks mit dem umgebenden Erdreich eingesetzt werden.

Zusätzlich kann das VibroScan[®] Verfahren in der Immissionsprognose des Straßenverkehrs von Industrie- und Gewerbeerschütterungen und von Bauerschütterungen eingesetzt werden.

Der im Rahmen des VibroScan[®] Verfahrens eingesetzte Schwingungsgenerator bietet zudem die Möglichkeit des Einsatzes im Bereich der Strukturdynamik, sei es an Hochbauten oder Brückbauwerken, zur Ermittlung von Resonanzfrequenzen und modalen Dämpfungszahlen. Bei Hochbauten besteht zudem durch die Anregung von außen die Möglichkeit zur Ermittlung von Übertragungsspektren ins Bauwerk bzw. von Ausbreitungsspektren innerhalb des Bauwerks.

Diese vielfältigen Einsatzbereiche zeigen, dass der Schwingungsgenerator in beinahe jedem Bereich der Dynamik sinnvoll einsetzbar ist und nachvollziehbare und reproduzierbare Daten liefern kann.

2. Das VibroScan[®] Verfahren

Das VibroScan[®]-Verfahren ist in diversen Arbeitsunterlagen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) auf der Hohen Warte in Wien beschrieben und wurde von Univ.-Prof. Dr. Peter Steinhauser in der 150 Jahre Festschrift der ZAMG veröffentlicht (Steinhauser, 2001).

2.1 Geschichte des Verfahrens

In den 50er-Jahren des 20. Jhdts wurde eine Arbeitsgruppe der Erdölfirma Conoco, USA, damit beauftragt, innovative und zukunftsweisende Untersuchungsmethoden für die Erdöl- und Gasexploration zu entwickeln. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde ausschließlich Sprengstoff als Energiequelle mit all den damit verbundenen Problemen, Gefahren, Risiken und Unzulänglichkeiten für Menschen und Umwelt verwendet. Ergebnis der jahrelangen Studien und Feldversuche waren sogenannte Schwingungsgeneratoren (Vibratoren) die als Energiequelle für seismische Messungen entwickelt („VIBROSEIS[®]“) und erfolgreich eingesetzt werden.

Erschütterungsexperten der Hohen Warte waren als Gutachter für den österreichischen Erdölkonzern OMV mit der Auswirkung der VIBROSEIS[®]-Schwingungsgeneratoren auf Gebäude und Bodeneinbauten betraut. Ende der Achtziger Jahre des 20. Jhdts halfen Gutachten der OMV bei der Entscheidungsfindung beim Einsatz der VIBROSEIS[®]-Schwingungsgeneratoren in der Nähe der Öl- und Gasleitungen (Lautner, pers. Mitt., 2004).

Dadurch konnten sich die Erschütterungsexperten ein Bild machen, welche Art von Erschütterungen die Schwingungsgeneratoren gezielt in welchem Frequenzbereich auslösen können. Naheliegender war der Umkehrschluss, das Auslösen der definierten künstlichen Erschütterungen, von denen man experimentell eruierte, dass sie im Bereich zum Beispiel der Bahnerschütterungen liegen, zur Simulation dieser Erschütterungen einzusetzen.

Die ZAMG entwickelte daraus unter der Leitung von Univ.-Prof. Dr. Peter Steinhauser ein Prognoseverfahren mit Erschütterungsanregung durch einen hydraulischen Schwingungsgenerator (Steinhauser, 2001). Dazu kaufte die ZAMG einen Schwingungsgenerator Mertz 10/601 von der OMV.

Die erste Publikation vor einem geophysikalischen Fachpublikum erfolgte 1994 bei der 56. Tagung der European Association of Exploration Geophysicists (EAEG) in Wien (Steinhauser, 1994). Im selben Jahr wurde „VibroScan“ beim Österreichischen Patentamt als geschützte Marke (Nr. 151 711) und 1998 beim Internationalen Patentamt - World Intellectual Property Organization (WIPO) der UNO in Genf, Schweiz (Nr. 697 457) angemeldet.

Ende 1997 erfolgte der erste Auslandseinsatz beim St.Aubin-Sauges Tunnel in der Schweiz. Seit den Anfängen im Jahr 1994 bis 2007 wurde das Erschütterungsprognoseverfahren in Österreich – ein spezielles Beispiel ist die U-Bahn-Erweiterung unter dem sensiblen Musikvereinsgebäude (Steinhauser et al., 2005) –, Deutschland, in der Schweiz (Rutishauser, 2001; Haag et al., 2005), Italien und Griechenland bei zirka 50 Projekten angewandt.

Anfang 2007 übertrug die ZAMG im Zuge einer Konzentration auf die Kernkompetenzen das Geschäftsfeld Vibroscan[®] an den langjährigen Kooperationspartner iC consulenten ZT GmbH in Wien, wo der Einsatz des Verfahrens nun fortgeführt wird. Das Verfahren wird auch vom ZT Büro Steinhauser, Wien, verwendet.

2.2 Methodik

Die Erschütterungen des Schienenverkehrs sind hinsichtlich der Emissionseigenschaften Intensität, Frequenz und Dauer so wirklichkeitsgetreu wie möglich nachzubilden. Dazu wird ein VibroScan[®]-Schwingungsgenerator der Type Mertz 10 eingesetzt. Konstruktiv erfolgt bei diesem Gerät die Schwingungsanregung des Tunnels und des Untergrunds ebenso durch eine Flächenbelastung, wie dies beim Bahnoberbau der Fall ist. Die statische und dynamische Flächenbelastung des Schwingungsgenerators erreicht zusammen maximal 6,2 N/cm², was der simulierten Radlast einer Vollbahn (Güterzug) entspricht. Das hydraulische Schwingungsgeneratorsystem kann mit einer Kraft von maximal 69 kN über den gesamten Arbeitsfrequenzbereich von 10 – 120 Hz Sinusschwingungen anregen.

Hinsichtlich der Frequenzen der Bahnerschütterungen ist zu berücksichtigen, dass infolge der verschiedenen Anregungsmechanismen breitbandige Spektren auftreten, die von Fahrtgeschwindigkeiten, konstruktiven Größen (unterschiedliche Abmessungen) und Störfaktoren im Rad-Schiene-Kontaktbereich abhängen. Die stärksten Anteile der Emissionsspektren von Zügen umfassen üblicherweise den Frequenzbereich von etwa 30 – 80 Hz. Beim VibroScan[®]-Verfahren besteht die Möglichkeit, nicht nur die Frequenz der Sinusschwingungen im gesamten Arbeitsfrequenzbereich stufenlos zu wählen, sondern auch Frequenzbänder vorzugeben, die gleitend durchfahren werden (sogenannte „Sweeps“), wodurch insbesondere Resonanzen bei der Erschütterungsausbreitung sicher erfasst werden. Das VibroScan[®]-Verfahren synthetisiert die breitbandigen Frequenzspektren der Zugserschütterungen somit umfassend durch eine zumindest ebenso breite konsekutive Frequenzfolge, wobei die kontinuierliche Frequenzabfolge die Auswertung wesentlich übersichtlicher gestaltet.

Die Dauer der Erschütterungen beträgt für einen Zug mit einer Länge von 500 m und einer Fahrtgeschwindigkeit von 100 km/h 18 Sekunden und bei 300 m Länge ca. 10 Sekunden. Die Dauer der VibroScan[®]-Sweeps kann im Bereich von 1 – 32 Sekunden vorgegeben werden.

Durch Schwingungsmessungen werden dabei auf der Tunnelsohle an einem oder mehreren Punkten die Erschütterungsemissionen und in den betroffenen Häusern an zumindestens zwei Punkten in verschiedenen Räumen, möglichst auf unterschiedlichen Geschoßebenen die Immissionen ermittelt. Mit dieser Anordnung der Sensoren können somit für jeden Immissionsmessort mehrere Transmissionsfunktionen ermittelt werden.

Für die Prognose maßgebend ist der geringste gemessene Ausbreitungsverlust. Die Positionen werden hauptsächlich aufgrund der bautechnischen und geologischen Gegebenheiten und nach der Lage der betroffenen Häuser gewählt. Indem die Immissionen am gleichen Ort von verschiedenen VibroScan[®]-Positionen im Tunnel gemessen werden, können Aussagen über die Ausbreitungsverluste in Längsrichtung des Tunnels gemacht werden. Dies ist von Bedeutung für die Festlegung der Länge allfälliger Erschütterungsschutzmaßnahmen. Die Immissionsmessorte werden im allgemeinen zusammen mit dem Auftraggeber genau festgelegt. Kriterien sind hauptsächlich die Lage der Häuser, deren Nutzung und eine aussagekräftige Verteilung im maßgeblichen kritischen Tunnelbereich. Soweit möglich werden in den Häusern übergreifend zwei bis drei Generatorpositionen gemessen. So können die Ergebnisse besser auf Plausibilität geprüft werden. Außerdem ist diese Messabfolge zweckmäßig um die Schwingungsausbreitung in Längsrichtung des Tunnels besser abzuschätzen.

Vergleich der Eigenschaften		
	Zug	VibroScan[®]
Ungefederte Radmasse/ Erregermasse (kg)	950 – 1600	1450
max. Erregerkraft (kN)	30 – 100	69
belastete Fläche (m ²)	4	2,9
Achslast / Last auf Grundplatte (kN)	160 – 240	107
mittl. maximaler Flächen- druck (N/cm ²)	4,8 – 8,5	6,7
Frequenzcharakteristik	Breitband	monofrequent gleitend
Bandbreite (Hz)	30 – 80	10 – 120

Tabelle 1: Vergleich der Eigenschaften von einem Zug und dem Schwingungsgenerator (Steinhauser, 2001):

Ein Beispiel für ein Messprogramm gibt Rutishauser (2001).

2.3 Funktionsweise des Schwingungsgenerators

Um zu verstehen, wie der Sweep erzeugt und über die Schwingungsgeneratormechanik als Sinusschwingung in den Boden abgegeben wird, muss man den Aufbau und die Technik eines Schwingungsgenerators kennen. Ein Schwingungsgenerator ist ein Sonderfahrzeug, das ausschließlich dazu dient, eine über Zeit, Amplitude und Frequenz definierte Sinusschwingung in den Boden einzubringen. Diese Vorgabe stellt hohe Anforderungen an die technische Ausstattung des Gerätes - sowohl an Elektronik, Hydraulik und die mechanische Robustheit und Zuverlässigkeit des Gerätes (Lautner, 2006).

Der Schwingungsgenerator besteht im wesentlichen aus der Fahreinheit, der Schwingungsgeneratormechanik, der Elektronik, Hydraulik, dem Lift und Massesystem und der Bodenplatte.

Der Schwingungsgenerator ist ein geländegängiges Fahrzeug, dessen Vorder- und Hinterachse über Hydraulikmotoren angetrieben werden. Der notwendige Hydraulikdruck für den Betrieb des Schwingungsgenerators wird über eine Hydraulik Triplex Pumpe erzeugt und versorgt sowohl die Niederdruckseite für das Lenk- und Liftsystem, als auch die Hochdruckseite für die Reaktionsmasse. Das Lenksystem ist so ausgelegt, dass sowohl die Vorder- als auch die Hinterachse unabhängig voneinander eingelenkt werden können und somit diesem 13 t Gerät eine maximale Beweglichkeit auf engem Raume bieten. Dieser Vorteil ist vor allem beim Befahren von engen Bereichen von Tunneln von großem Nutzen.



Abbildung 1: VibroScan[®] Schwingungsgenerator

In der Elektronik wird ein elektrisches Signal (Sweep genannt) erzeugt. Die Parameter für Frequenz und Amplitude werden vom Projektleiter je nach Anforderung der Aufgabenstellung bestimmt und an der Elektronik eingestellt. Diverse Rückmeldungen geben permanent Informationen über die Qualität des Outputsignals. Feinjustiermöglichkeiten bieten den Vorteil, den Vibrator auch unter schlechten Einsatzbedingungen optimal einzusetzen. Der Torque Motor ist die Schnittstelle von elektrischem Signal zur hydraulischen Ansteuerung und Anregung der Schwingungsgenerator - Reaktionsmasse, die letztendlich das vorerst elektrische Signal als mechanische Schwingung über die Bodenplatte an den Untergrund abgibt. Diese Schwingungen entsprechen den vorgegebenen Parametern an der Elektronik und werden je nach Projektanforderung so eingestellt, dass das bestmögliche Messergebnis erreicht werden kann.

Ganz entscheidend für die Qualität des abgehenden Signals ist die gute Ankopplung der Bodenplatte des Schwingungsgenerators an die Untergrundoberfläche. Ob die über die Bodenplatte übertragene Sinusschwingung auch tatsächlich in den Boden abgegeben werden kann, ist unter anderem von der Ankopplung der Bodenplatte an den Untergrund, der Oberflächen- und Bodenbeschaffenheit abhängig.

Fahrgestell: M10/601 Type: Buggy Antrieb: 4x4, hydraulisch Gesamtgewicht: 13,11 t Achslast: vorn: 6,2 t Achslast hinten: 6,9 t Gewicht auf Bodenplatte: 10,86 t Reifen: 23,1 – 26, 10 PLY Gesamtlänge: 7,32 m Breite: 2,44 m Höhe: 2,77 m Achsabstand: 4,19 m Höchstgeschwindigkeit: 35 km/h Stromversorgung: 12 V	Schwingungsgenerator: Mertz M10 max. Kraft (theor.): 68800 N Dämpfung: air bag Bodenplatte: Gewicht: 0,95 t Fläche: 2,90 m² max. Auslenkung: 9,53 cm Kolbenfläche: 33,32 cm ² min. Frequenz: 8 Hz max. Frequenz: 120 Hz Gewicht der Masse: 1,45 t Bodenfreiheit: 0,48 m
--	--

Tabelle 2: Technisches Datenblatt Schwingungsgenerator Mertz M10 (Lautner, 2006)

3. Der Koralmtunnel

Der Koralmtunnel ist das Kernstück der 125 km langen Koralmbahn, die ab 2018 Graz und Klagenfurt miteinander verbinden wird. Die Fahrzeit zwischen den beiden Städten wird dann von über 3 Stunden auf knapp 1 Stunde sinken. Die Koralmbahn ist eine Neubaustrecke und wird für eine Entwurfsgeschwindigkeit von 200 km/h ausgelegt. Der Koralmtunnel selbst ist 33 km lang und besteht aus zwei eingleisigen Röhren, die mit Querschlägen alle 500 m verbunden sind. In der Mitte des Tunnels befindet sich eine Nothaltestelle. Die Tunnelröhren werden teils im konventionellen, teils im TVM Vortrieb aufgeföhren. Der Aussendurchmesser der Einzelröhren betröhgt ca. 10 m.

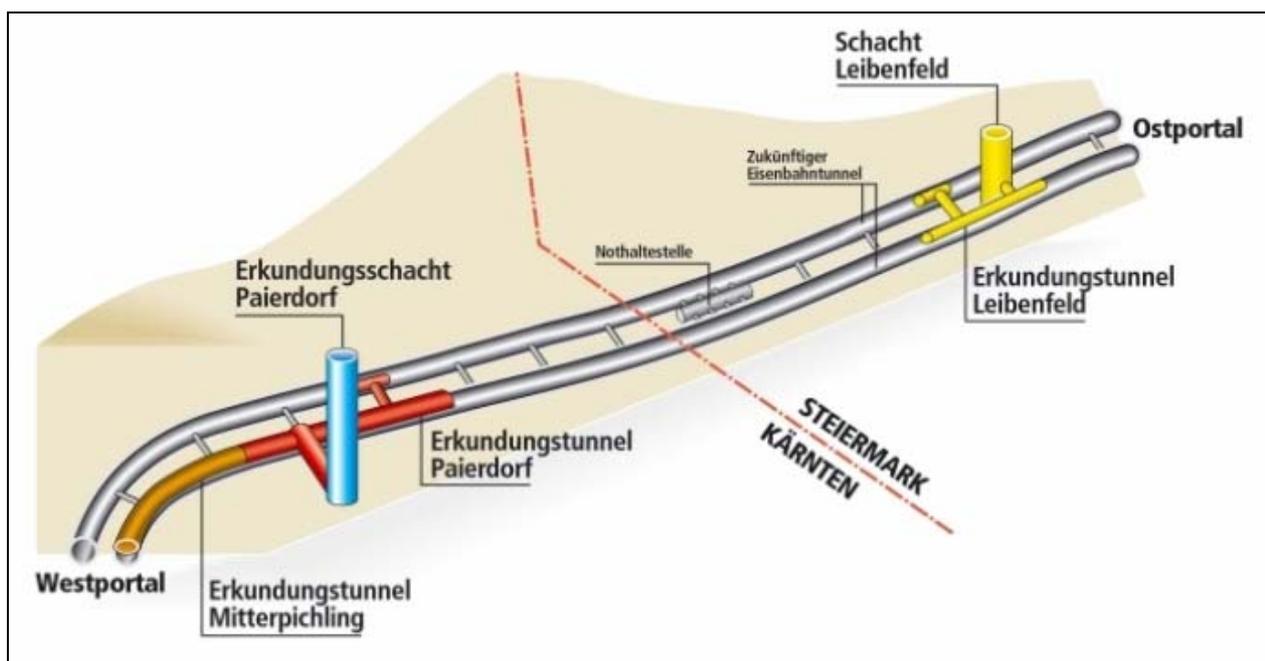


Abbildung 2: Übersichtsdarstellung des Koralmtunnelprojekts (entnommen aus Unterlagen der ÖBB Bau AG)

Der Tunnel durchquert das Kristallin der Koralpe mit Überlagerungen von bis zu 1280 m. Auf beiden Seiten sind aber auch längere Lockergesteinsstrecken mit deutlich niedrigeren Überlagerungen zu durchhörtern. In diesem Bereich sind auch erschütterungstechnische Untersuchungen anzustellen, auf der Kärntner Seite im Bereich der Ortschaft Lindhof und auf der steirischen Seite im Bereich des Leibenfeldes.

Seit Mai 2002 sind Erkundungsstollen in Bau, von denen auch erschütterungstechnische Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Auf der steirischen Seite erfolgt der Zugang zum Erkundungsstollen über den 60 m tiefen Schacht Leibenfeld, auf der Kärntner Seite über den Zwischenangriff Mitterpichling und den Schacht Paierdorf (Harer et al., 2007).

Die nachfolgende Tabelle zeigt einige Kenndaten des Koralmtunnels:

Gesamtlänge	32,8 km
Anzahl der Tunnelröhren	2
Tunnel-Ausbruchquerschnitt mit Sohlgewölbe	2 x 82 m ²
Tunnelquerschnitt Endausbau	2 x 51 m ²

Tabelle 3: Zusammenfassung der wichtigsten Kenndaten

4. Aufgabenstellung - Untersuchungsmethodik

Die grundsätzlichen Aufgabenstellungen sind die Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall des Schienenverkehrs hinsichtlich der Intensität, Frequenz und Andauer so wirklichkeitsgetreu wie möglich nachzubilden.

In den beiden Anfahrbereichen, sowohl auf der steirischen wie auch auf der Kärntner Seite des Koralmtunnels befinden sich Wohngebäude in geringem Abstand zum Tunnelbauwerk. Um die gesetzlichen Anforderungen der Umweltverträglichkeit erfüllen zu können war es notwendig, den Einfluss des Betriebs des Koralmtunnels auf diese Wohnobjekte zu ermitteln bzw. falls notwendig Gegenmaßnahmen zu planen. Insbesondere waren die zu erwartenden Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall zu untersuchen.

Die Untersuchung der erschütterungstechnischen Auswirkungen der Errichtung der Neubaustrecke erfolgt in einem mehrstufigen Verfahren. Zunächst werden die Immissionen aus dem Betrieb der Anlage unter der Voraussetzung, dass keine besonderen erschütterungsmindernden Maßnahmen gesetzt werden, prognostiziert. Werden im Vergleich mit den Grenzwerten bzw. behördlich festgelegten Richtwerten diese eingehalten, ist kein weiterer Begutachtungsschritt erforderlich. Im Falle einer Überschreitung werden erschütterungsabmindernde Maßnahmen gesetzt, um die Einhaltung der Grenzwerte zu gewährleisten.

Oft ergeben sich hierbei in bautechnischer bzw. verfahrenstechnischer Sicht mehrere Möglichkeiten, die dann gegenübergestellt werden müssen (etwa: schwerer Erschütterungsschutz am Fahrweg – Ablöse des Gebäudes – Neuerrichtung des Gebäudes).

Die Aufgabenstellung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Prognose der zu erwartenden Erschütterungen bzw. des sekundären Luftschalls in den exponiertesten Anrainerobjekten
- Erarbeitung von Gegenmaßnahmen zur Abminderung der Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall (z.B. Masse-Feder System)
- Prognose der zu erwartenden Immissionen aus Erschütterungen und sek. Luftschall nach Einbau der Schutzmaßnahmen (z.B. Masse-Feder System)

Wie aus der oben angeführten Auflistung zu sehen ist, stellt die Prognose der Immissionen bei den Anrainern den Kern der Untersuchungen dar. Die Prognose hat die gesamte Übertragungskette Fahrzeug – Oberbau – Unterbau – (Tunnelkonstruktion) – Untergrund – Fundament – Gebäude zu berücksichtigen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine schematische Darstellung der Übertragungskette:

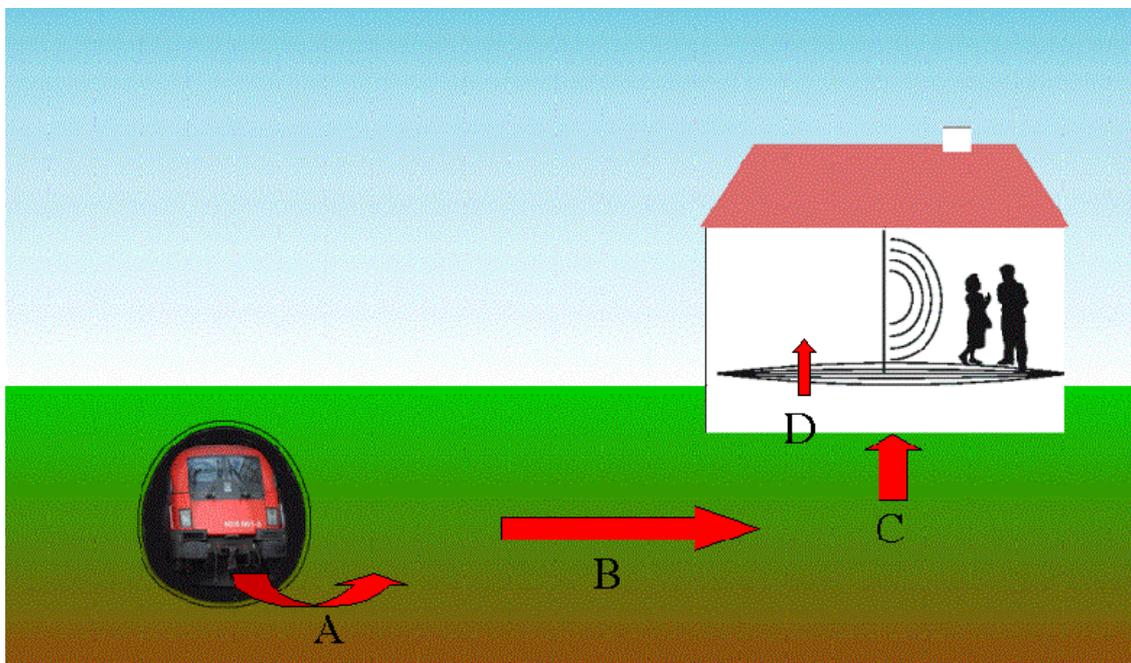


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Übertragungskette

- A: Übertragung der Emissionen vom Tunnel in das umgebende Erdreich
- B: Übertragung durch den Untergrund
- C: Gebäudeankopplung – Einleitung der Schwingungen ins Gebäude
- D: Ausbreitung der Schwingungen im Gebäude bzw. auf die einzelnen Geschossdecken

Für das Projekt Koralmtunnel wurde folgendermaßen vorgegangen:

Als Emissionsspektren wurden Spektren vergleichbarer Tunnelprojekte herangezogen, welche mittels numerischer Methoden an die im Projektgebiet vorherrschende Geologie angepasst wurden. Hierfür standen insbesondere Emissionsmessungen aus dem Tunnel Melk zur Verfügung.

Die baodynamischen Eigenschaften der naheliegenden Wohnbebauung wurden aus Messungen ermittelt, bei welchen zum Einen die Eigenfrequenz der einzelnen Geschossdecken und zum Anderen die Übertragungseigenschaften vom Erdreich in die einzelnen Geschosse gemessen wurde.

Die eigentliche Kernaufgabe der Prognose bei diesem Projekt besteht jedoch darin, die Eigenschaften des Übertragungswegs vom Tunnel zum Gebäude hin zu quantifizieren. Im Wesentlichen sind hierbei die spektralen Übertragungsfunktionen, welche das Verhalten der Schwingungen vom Tunnel zum Gebäude beschreiben, zu finden. Für das hier beschriebene Projekt Koralmtunnel wurden unterschiedliche Verfahren eingesetzt, deren Ergebnisse im Weiteren beschrieben sind.

5. Messungen

Die Immissionsmessorte bzw. die Messpunkte im Tunnel wurden zusammen mit dem Auftraggeber festgelegt. Kriterien waren hauptsächlich die Lage der Häuser, deren Nutzung und eine aussagekräftige Verteilung in maßgeblichen kritischen Tunnelbereichen. Ein weiteres maßgebendes Kriterium für die Auswahl der Messpunkte war die geologische Situation, im Hinblick auf die Schwingungsausbreitung, im Projektsgebiet.

Zur Ermittlung der Übertragungseigenschaften wurden folgende Versuchsreihen sowohl auf der steirischen als auch auf der Kärntner Seite des Koralmtunnels in den Erkundungsstollen Leibenfeld bzw. Mitterpichling durchgeführt und ausgewertet:

- a) Sprengversuche
- b) VibroScan[®] Messungen

Sprengversuche

Im Erkundungsstollen Mitterpichling, auf der Kärntner Seite, wurden insgesamt 60 Bohrlöcher im Abstand von 10 m gebohrt und besprengt. Die Bohrlöcher befanden sich im Ulmenbereich, waren leicht nach unten geneigt und etwa 1 m tief. Besprengt wurden die Bohrlöcher mit jeweils 60 g Austro Gel G1. Die Zündung erfolgte elektrisch. Die Verdämmung der Bohrlöcher erfolgte mit Wasser, welches bis zum Bohrlochmund aufgefüllt wurde. Im Erkundungsstollen Leibenfeld auf der steirischen Seite wurden insgesamt 50 Bohrlöcher im Abstand von 15 m gebohrt und besprengt.

Um die Schwingungen im Tunnel zu ermitteln, wurde für jede Sprengung ein Geophon (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer) im Abstand von 2 Bohrlöchern, d.h. auf der steirischen Seite im Abstand von 20 m bzw. auf der Kärntner Seite im Abstand von 30 m aufgestellt. Das Geophon wurde auf einem Dreibein aus Stahl aufgestellt, sodass eine ausreichende Ankopplung an den Untergrund sichergestellt werden konnte.

VibroScan[®] Messungen

Im Gegensatz zu den Sprengversuchen wurden bei den VibroScan[®] Messungen in den beiden Erkundungsstollen jeweils an 3 Anregungspunkten entlang der vorhandenen Erkundungsstollen Messungen durchgeführt. Die Auswahl der Anregungspunkte erfolgte, wie bereits beschrieben, auf Grund der Lage der Anrainerhäuser, der geologischen Situation und den örtlichen Gegebenheiten in den vorhandenen Erkundungsstollen. Zudem wurden die Anregungspunkte jeweils so ausgewählt, dass die Lage der einzelnen Anregungspunkte jeweils mit der Lage des jeweiligen Bohrlochs des Sprengversuchs übereinstimmte. Die Lage des Schwingungsaufnehmers wurde ebenfalls analog zu den Parametern bei den Sprengversuchen gewählt.

An jedem der Anregungspunkte wurden die folgenden Sweeps durchgeführt:

Frequenzbereich	Sweepdauer	Sweeptrate $\Delta f/s$
10 Hz – 55 Hz	12 s	3,75 Hz/s
45 Hz – 90 Hz	12 s	3,75 Hz/s
75 Hz – 120 Hz	12 s	3,75 Hz/s
10 Hz – 120 Hz	12 s	9,17 Hz/s

Tabelle 4: Kenndaten der durchgeführten Sweeps

6. Messergebnisse

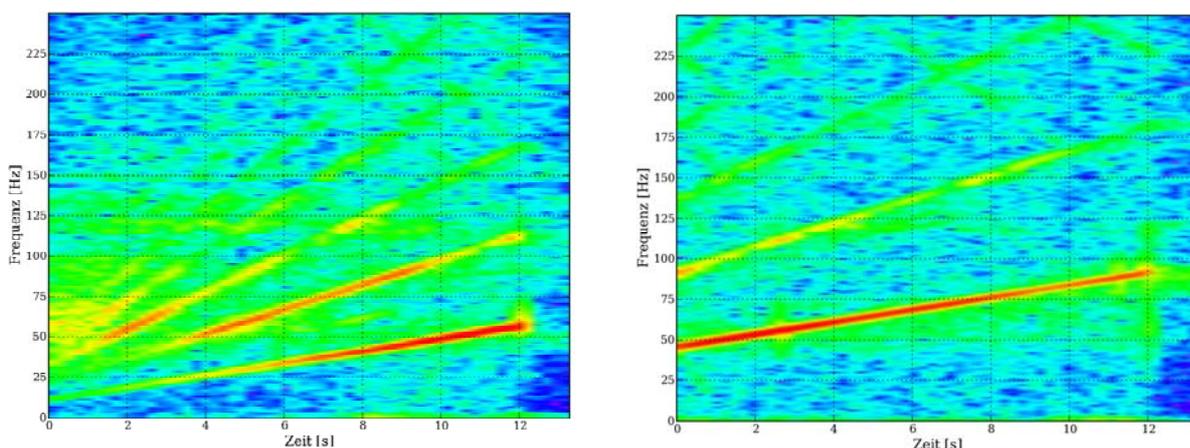
6.1 Vibroscan® Messungen

Weder bei den Messungen noch bei den Auswertungen traten größere Schwierigkeiten oder nicht plausible Ergebnisse auf. Im Nachfolgenden werden die wichtigsten Resultate beschrieben und dargestellt.

In den nachfolgenden Darstellungen wird bewusst eine Frequenzskalierung von 10 Hz bis 200 Hz gewählt, um mit den Ergebnissen sowohl den maßgebenden Frequenzbereich für Erschütterungen als auch den sekundären Luftschall abzudecken. Obwohl bei den Versuchsreihen mit dem VibroScan® Messungen lediglich Sweeps mit Frequenzen bis 120 Hz ausgeführt wurden, ist aus den Frequenzspektren ersichtlich, dass auf Grund von Oberschwingungen auch Frequenzen bis 200 Hz angeregt wurden.

Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt eine Spektrogrammanalyse der durchgeführten Sweeps im Rahmen der VibroScan®-Messungen. In diesen Darstellungen stellt die x-Achse die Zeitachse, die y-Achse die Frequenz, und die Farbe gibt den Energieinhalt in den einzelnen Frequenz/Zeitbereichen wieder. Wie aus der Darstellung für die einzelnen Sweeps zu sehen ist, liegt der größte Energieinhalt erwartungsgemäß in der eigentlichen Frequenzkurve des Sweeps. Es ist jedoch deutlich aus den Darstellungen zu sehen, dass zusätzlich Oberschwingungen mit Frequenzen bis zu 200 Hz auftreten.

Dies lässt für die weiteren Auswertungen und Darstellungen die Untersuchung der Übertragungseigenschaften der Ausbreitungskette bis in einen Frequenzbereich von 200 Hz zu. Zudem zeigt dies, dass die vom Schwingungsgenerator erzeugten Frequenzen ausreichend sind, um auch Untersuchungen im Bereich des sekundären Luftschalls durchzuführen.



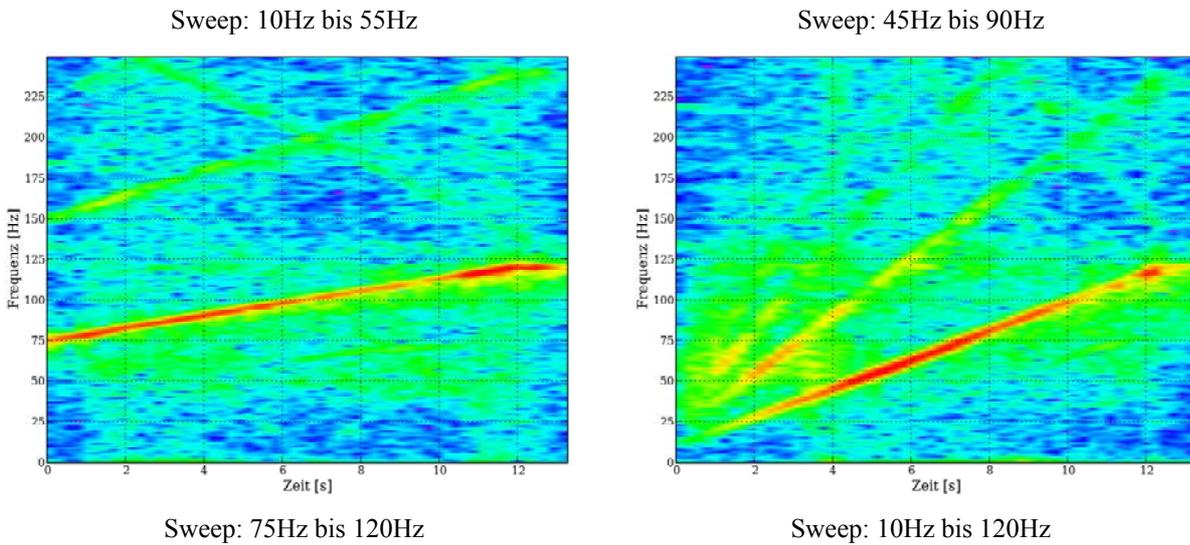


Abbildung 4: Spektrogrammanalyse der durchgeführten Sweeps

Die nachfolgende Darstellungsweise der Abbildung 5 zeigt eine Gegenüberstellung des Zeitverlaufs mit dem zugehörigen Frequenzspektrum als Wasserfalldiagramm.

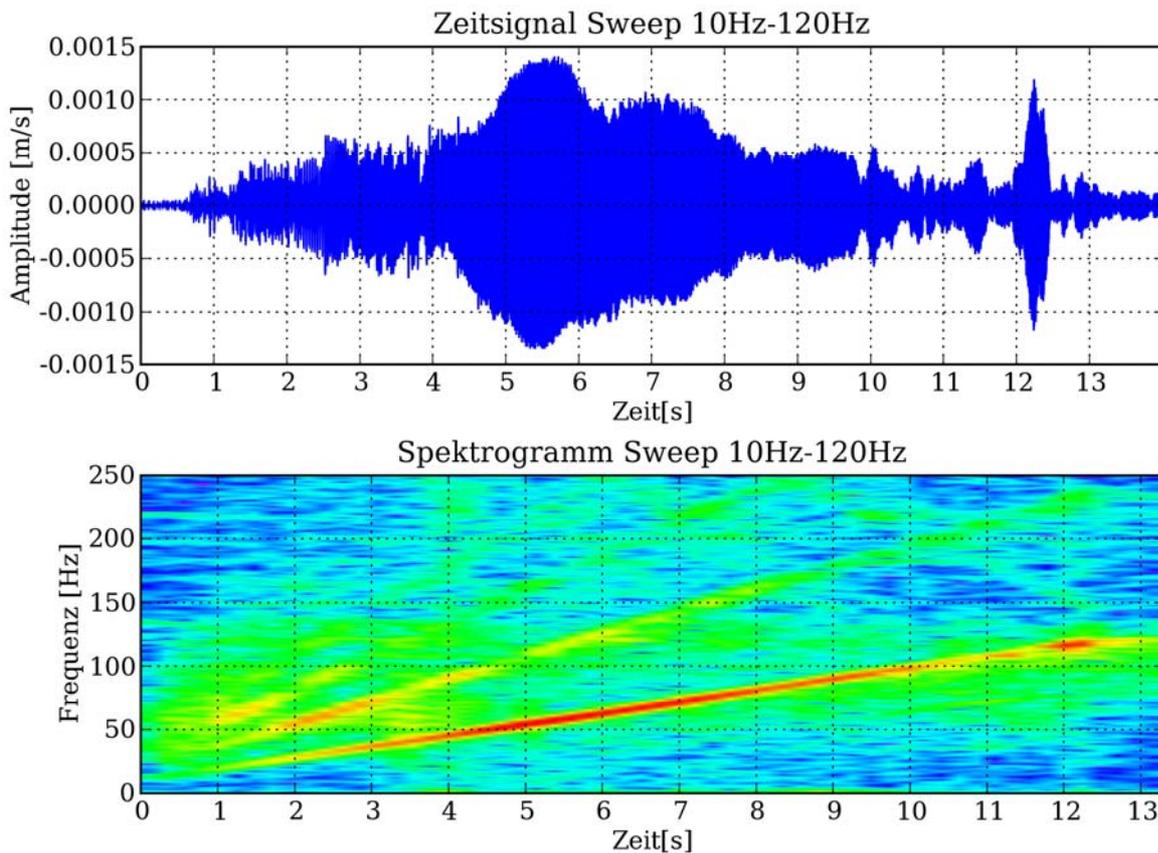


Abbildung 5: Vergleich Zeit-Frequenzverlauf für eine Sweep 10 Hz bis 120 Hz

Wie bereits die Farben der Wasserfalldarstellung vermuten lassen, liegt die größte eingebrachte Energie in den Boden im Bereich von etwa 50 Hz bis 70 Hz. Dies ist vermutlich auf die Interaktion zwischen dem Schwingungsgenerator und dem Untergrund im Bereich des Aufstellungspunktes zurückzuführen.

Vielmehr zeigt dies jedoch, dass erwartungsgemäß nicht in allen Frequenzbereichen die gleiche Schwingungsenergie in den Untergrund eingebracht werden kann. Diese Darstellung kann jedoch im Einzelfall einen ersten Hinweis auf maßgebende Frequenzen für die Interaktion der Anregung mit dem Tunnelbauwerk geben.

Zur eigentlichen Prognose der zu erwartenden Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall zufolge der Zugsvorbeifahrten im zukünftig ausgebauten Tunnelbauwerk sind Transmissionsspektren zwischen den Emissionen im Tunnel und den Immissionen in den naheliegenden Anrainerobjekten notwendig. Diese können mit Hilfe von VibroScan[®] Messungen verhältnismäßig einfach und nachvollziehbar gewonnen werden.

Das Verfahren zur Ermittlung der Transmissionsspektren kann wie folgt zusammengefasst beschrieben werden:

- Messung der Emissionen im Tunnel zufolge der Anregung mit dem Schwingungsgenerator
- Zeitgleiche Messung der Immissionen im zu untersuchenden Gebäude an der Oberfläche
- Ermittlung der Frequenzspektren für beide Messreihen
- Durch die Division des Spektrums (Quotient in jedem Terzband) an der Oberfläche durch jenes Spektrum aus der Tunnelmessungen kann die Übertragungsfunktion ermittelt werden

Die nachfolgenden (Abbildungen 5 und 6) zeigen die ermittelten Übertragungsfunktionen an den untersuchten Messpunkten sowohl auf der steirischen Seite (Erkundungsstollen Leibenfeld) sowie auf der Kärntner Seite (Erkundungsstollen Mitterpichling) des Koralmtunnels.

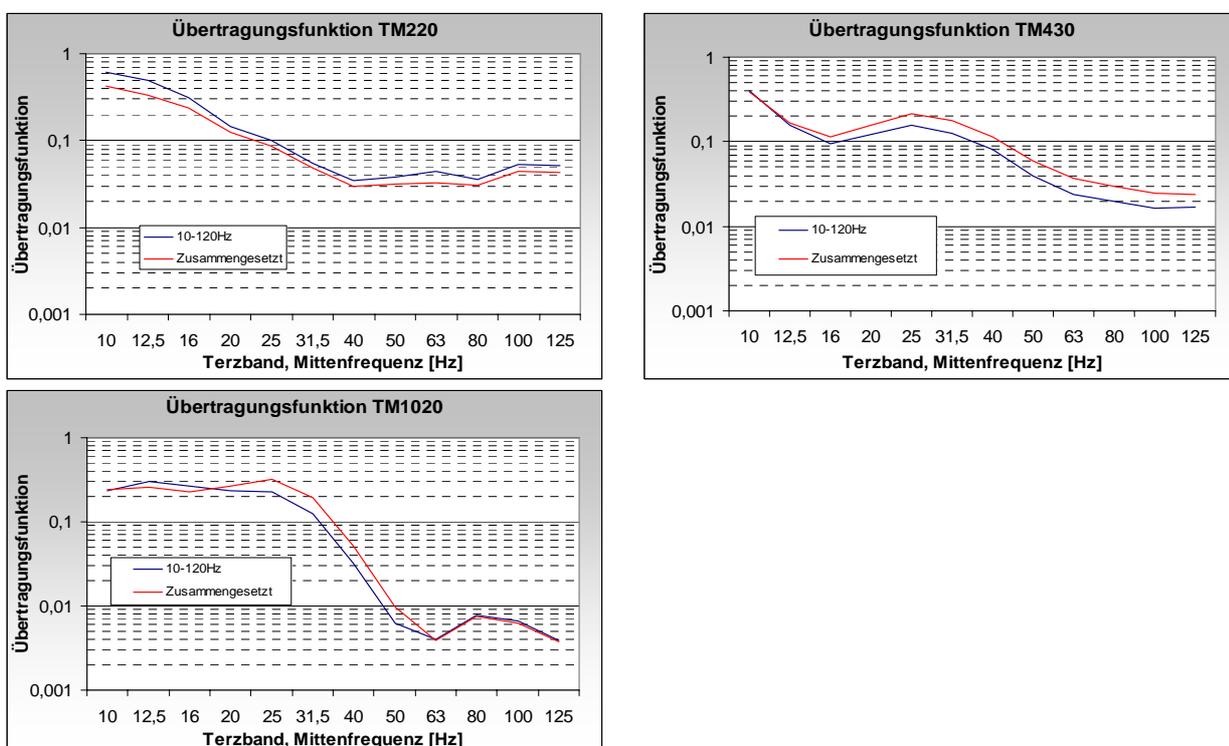


Abbildung 6: Übertragungsfunktionen an den untersuchten Messpunkte auf der steirischen Seite

Wie die Ergebnisse der Abbildung 6 darstellen, zeigen die Transmissionsspektren im Bereich von TM220 bzw. TM430 ein, im Rahmen der Messgenauigkeit, vergleichbares Bild. Das Transmissionsspektrum im Bereich von TM1020 zeigt, vor allem im Frequenzbereich oberhalb von etwa 40 Hz, eine deutlich höhere Abnahme der Schwingungen vom Emissionspunkt zum Immissionspunkt.

Dies hat im vorliegenden Fall 2 Ursachen:

Zum Einen ist die Überlagerung zwischen Tunnelfirste und Geländeoberkante bei TM220 bzw. TM430 im Bereich von 50 m bzw. 55 m, im Gegensatz zur Überlagerung bei TM1020 mit 120 m, vergleichbar. Zum Anderen befindet sich etwa bei TM900 der geologische Übergang in den Kristallinbereich. Das bedeutet, dass die Schwingungsausbreitung bzw. die daraus resultierende Transmissionsfunktion im Bereich von TM1020 vorwiegend vom Kristallin und dessen dynamischen Eigenschaften beeinflusst wird.

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die aus den VibroScan[®]-Messungen ermittelten Transmissionsfunktionen für die Kärntner Seite des Koralmtunnels, den Erkundungsstollen Mitterpichling.

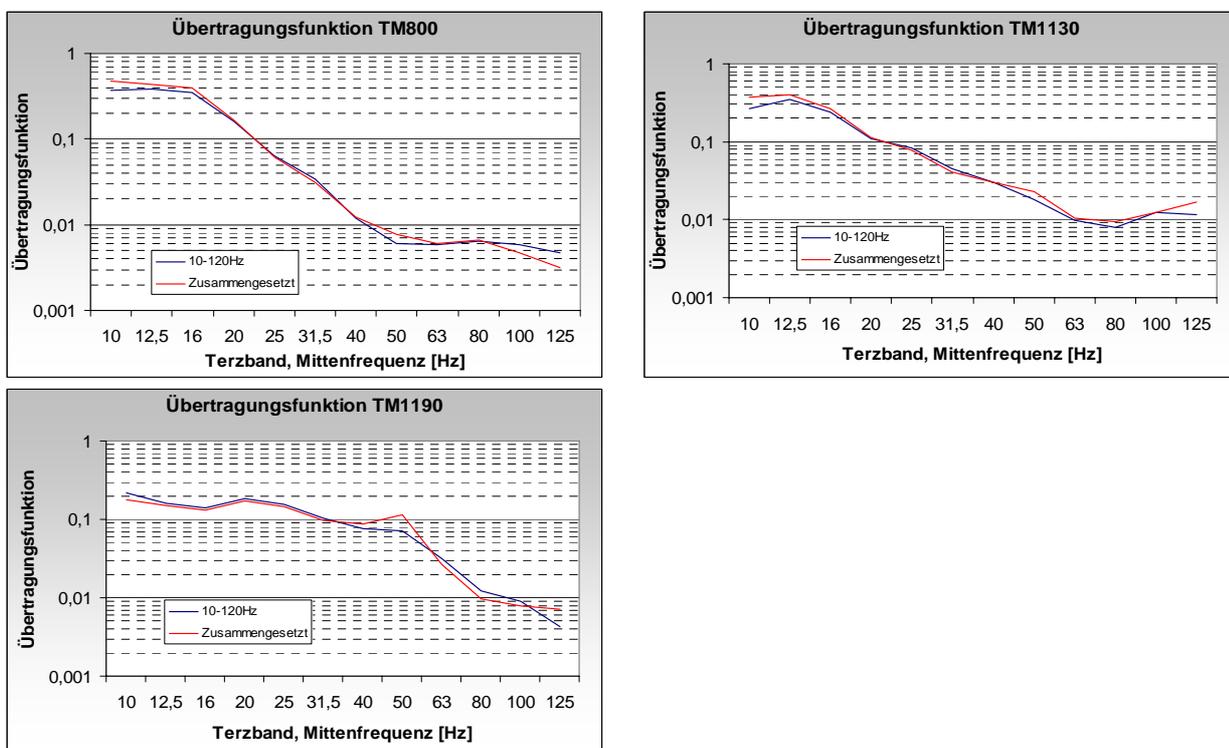


Abbildung 7: Übertragungsfunktionen an den untersuchten Messpunkte auf der Kärntner Seite

Wie die Ergebnisse der Abbildung 7 darstellen, zeigen die Transmissionsspektren im Bereich von TM800 bzw. TM1130 ein, im Rahmen der Messgenauigkeit, vergleichbares Bild. Das Transmissionsspektrum im Bereich von TM1190 zeigt, vor allem im Frequenzbereich oberhalb von etwa 25 Hz, eine geringere Abnahme der Schwingungen vom Emissionspunkt zum Immissionspunkt. Da die Distanz zwischen Tunnelfirste und Geländeoberkante für alle 3 untersuchten Messpunkte mit etwa 40 m vergleichbar ist, und aus geologischer Sicht keine markanten Änderungen in den dynamischen Parametern des Untergrunds entlang des untersuchten Bereichs auftreten, sind die unterschiedlichen Transmissionsspektren auf die Bausubstanz zurückzuführen. Das Objekt bei TM1190 ist ein mehr als 100 Jahre altes Bauernhaus, wo hingegen die beiden Objekte an TM800 bzw. TM1130 herkömmliche Einfamilienhäuser mit „normalen“ Deckenaufbau sind.

Zusätzlich ist aus den Graphiken in der Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen, dass jeweils 2 Kurven für das Transmissionsspektrum eingetragen sind. Diese Kurven sind folgendermaßen zu verstehen:

Die blaue Linie stellt jeweils das Ergebnis der Auswertung der Sweeps mit den Eigenschaften 10 Hz bis 120 Hz in 12 s dar. Die rote Linie, als „zusammengesetzt“ bezeichnet, ergibt sich aus den Ergebnissen von 3 Sweeps, welche wie folgt definiert sind:

1. 10 Hz – 55 Hz Sweepdauer: 12 s
2. 45 Hz – 90 Hz Sweepdauer: 12 s
3. 75 Hz – 120 Hz Sweepdauer: 12 s

Aus den Ergebnissen dieser 3 Sweeps wurden jeweils die für das Frequenzband der Anregung maßgebenden Terzbänder des Transmissionsspektrums herangezogen und zu einer Linie zusammengefügt. In den Überlappungsbereichen wurden die Terzbänder der einzelnen Sweeps energetisch gemittelt.

Wie aus den Kurven des 10 Hz - 120 Hz Sweeps bzw. des „zusammengesetzten“ Sweeps zu sehen ist, stimmen diese im Rahmen der Messgenauigkeit gut überein. Es ist daher durchaus zulässig, das gesamte Frequenzspektrum der künstlichen Anregung in einem Sweep abzudecken. Dies hat zudem den Vorteil, dass die Verweildauer an den einzelnen Frequenzen kürzer wird und so die Anregung erzwungener Schwingungen größtenteils vermieden werden kann.

Mit diesen aus den so durchgeführten und ausgewerteten Messungen kann, unter Zuhilfenahme von Emissionsspektren der Zugsvorbeifahrten an vergleichbaren Tunnelbauwerken, eine Immissionsprognose der untersuchten Bauwerke durchgeführt werden. Diese besteht im Wesentlichen in weiterer Folge aus einer Addition der einzelnen Teilspektren wie Emissionsspektrum – Transmissionsspektrum – ev. Gebäudetransmissionsspektrum. Aus dem auf diese Weise gewonnenen Immissionspektrum kann der Immissionswert für Erschütterungen gemäß ÖN 9010 bzw. ÖN ISO 2631-2 bzw. der Immissionswert für sek. Luftschall gemäß ÖN S 9012 ermittelt werden.

6.2 Sprengversuche

Zusätzlich wurden für die Immissionsprognose aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall am Koralmtunnel bzw. die weitere Planung und Abstimmung der Immissionsschutzmaßnahmen umfangreiche Sprengversuche in beiden Erkundungsstollen, wie unter Punkt 4 beschrieben, durchgeführt.

Hierzu wurde entlang der Erkundungsstollen in regelmäßigen Abständen gesprengt. Im Rahmen der Sprengungen wurden sowohl die Schwingungen im Tunnel (Emissionen) als auch die Schwingungen in den jeweils nächstgelegenen Anrainerobjekten gemessen.

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt eine Zusammenfassung der Messergebnisse in Abhängigkeit von der Entfernung des Objekts von der Sprengstelle. Die dargestellten Schwingungsgeschwindigkeiten stellen jeweils einen Amplitudenfaktor dar, der durch Quotientenbildung der Messung an der Oberfläche durch die Messung im Tunnel definiert ist. So können die unterschiedlichen Emissionen und damit auch die gemessenen Immissionen, welche durch Faktoren wie Verdämmung, kleinräumige geologische Gegebenheiten bzw. Unterschiede in der Sprengstoffzusammensetzung bestimmt werden, vergleichbar gemacht werden.

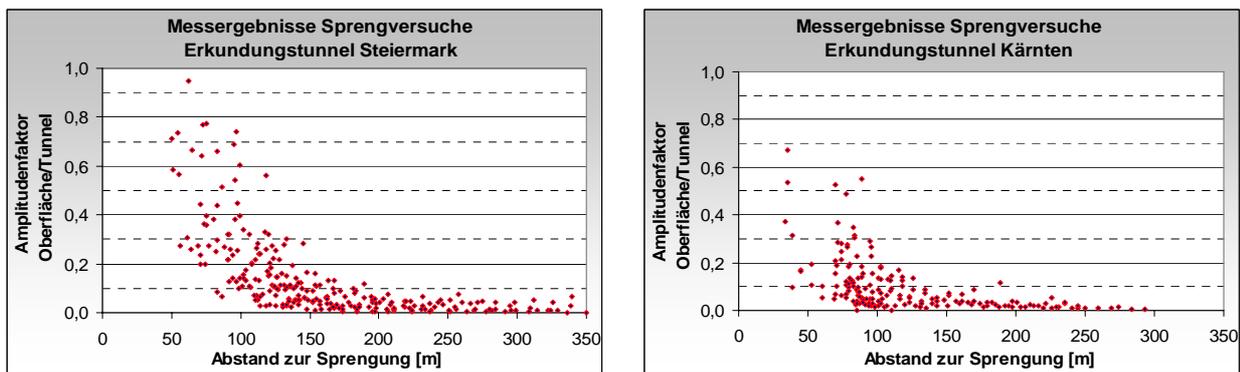


Abbildung 8: Abhängigkeit der Erschütterungsabnahme von der Sprengdistanz für die Objekte in der Steiermark und in Kärnten

Wie den Graphiken der Abbildung 8 zu entnehmen ist, zeigen die Ergebnisse für beide Erkundungstollen erwartungsgemäß eine eindeutige Abnahme der Erschütterungen mit zunehmender Distanz zur Sprengstelle. Zudem ist in den Graphiken zu erkennen, dass im Bereich des Erkundungstollens Mitterpichling (Kärnten) selbst im Nahbereich geringere Amplitudenfaktoren gegenüber den Ergebnissen aus dem Erkundungstollen Leibenfeld (Steiermark) auftreten. Dies ist vor allem aus der unterschiedlichen Geologie zu erklären, wengleich der Tunnelquerschnitt (vgl. Punkt 2) an den einzelnen Erkundungstollen ebenso Einfluss auf den Amplitudenfaktor hat.

Diese Ausbreitungsfunktionen der Erschütterungen über die Distanz weg vom Tunnelbauwerk stellen jedoch ein wichtiges Hilfsmittel für die Prognose weiter entfernter Anrainerobjekte dar. Dies vor allem deshalb, da die Sprengversuche aus wirtschaftlichen Gründen in einem wesentlich dichteren Raster eingesetzt werden können als die VibroScan[®]-Messungen. Zudem liefern die Sprengversuche und die daraus ermittelten Ausbreitungsexponenten eine wichtige Datengrundlage für die Beurteilung der zu erwartenden Bauerschütterungen zufolge des Vortriebs, unabhängig davon ob der Vortrieb maschinell mittels TVM oder konventionell erfolgen wird.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Prognose der Immissionen aus Erschütterungen und sekundärem Luftschall bzw. in weiterer Folge der Festlegung der Maßnahmen und deren Ausdehnung ist die Ermittlung eines Einflussbereichs der Schwingungen aus dem Tunnelbauwerk auf die Wohnbebauung an der Oberfläche. Insbesondere aus technisch-wirtschaftlichem Interesse von Bedeutung bei der Auslegung von Maßnahmen ist die Ausdehnung (Einbaulänge) der anzubringenden Maßnahmen. Hierbei können die Sprengversuche zusammen mit den VibroScan[®]-Messungen wertvolle Ergebnisse liefern.

Die nachfolgende Abbildung 9, und die darin enthalten Graphiken, zeigen die Amplitudenfunktion aufgetragen über die Lage der Sprengung für 2 ausgewählte Objekte. Die rote senkrechte Linie in den Diagrammen stellt die Lage des Objekts bezogen auf die Station der Sprengung dar.

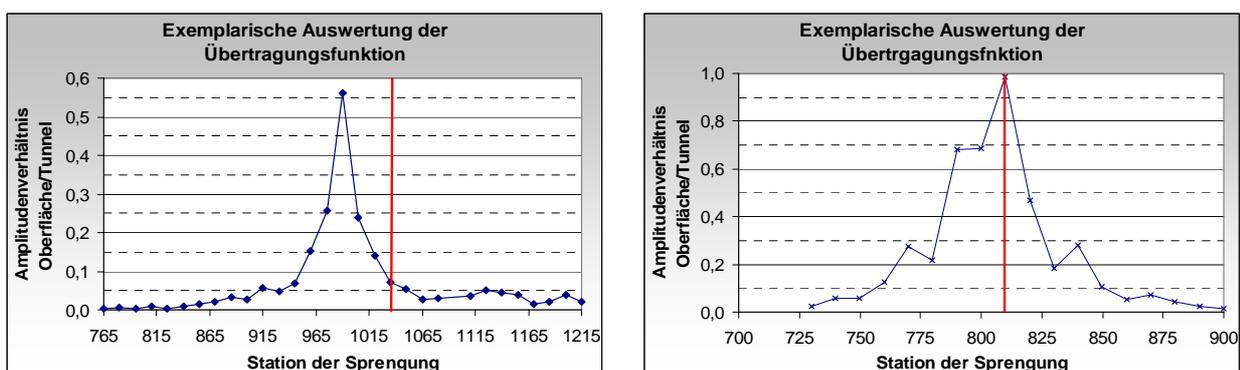


Abbildung 9: Amplitudenverhältnis Oberfläche/Tunnel für 2 ausgewählte Objekte

Die rechte Graphik der Abbildung 9 zeigt, dass die maximalen Schwingungen im untersuchten Objekt bei minimaler Distanz zur Sprengstelle auftreten. Beim Entfernen von der minimalen Distanz nehmen die Schwingungen erwartungsgemäß, annähernd symmetrisch in beide Richtungen, ab.

In der linken Graphik der Abbildung 9 ist ein deutlich unterschiedliches Verhalten zu beobachten. Diese Graphik zeigt, dass die maximalen Schwingungen im untersuchten Objekt nicht bei der Minimaldistanz zur Sprengstelle auftreten. Vielmehr treten die maximalen Schwingungen schon etwa 50 m vor Erreichen der Minimaldistanz auf.

Eine Erklärung hierfür kann in der vorherrschenden Geologie gefunden werden. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt einen geologischen Längenschnitt im Untersuchungsgebiet dieses Messpunkts.

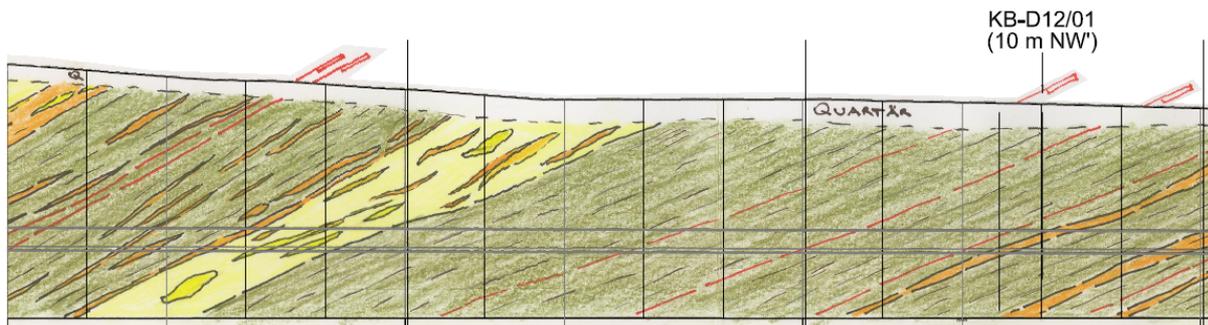


Abbildung 10: Geologische Situation im Projektgebiet (baugeologische Dokumentation)

Wie aus der Abbildung 10 zu erkennen ist, fallen die Schichten in diesem Teil des Projektgebiets in einem Winkel von etwa 45° ein. In diesen Schichtwechselfolgen entstehen auf Grund der unterschiedlichen dynamischen Parameter Kanalwellen. Dies ist auch die Erklärung für das Auftreten der maximalen Schwingungen vor Erreichen der Minimaldistanz zwischen Sprengstelle und Anrainerobjekt.

Die Sprengversuche zusammen mit den VibroScan[®]-Messungen können wie oben gezeigt hervorragend zur Bemessung der Längenausdehnung der Erschütterungsschutzmaßnahmen herangezogen werden und dienen daher im Weiteren einer wirtschaftlichen Bemessung des Immissionsschutzes.

7. Zusammenfassung

Weder bei den Messungen noch bei den Auswertungen traten größere Schwierigkeiten oder nicht plausible Ergebnisse auf. Vielmehr zeigen die Messungen, Auswertungen und Interpretationen der durchgeführten Sprengversuche und VibroScan[®]-Messungen in sich schlüssige und nachvollziehbare Ergebnisse.

Mit den vorliegenden Messungen konnte erneut gezeigt werden, dass das VibroScan[®] eine adäquate Methode zur Schwingungsprognose im Bereich von geplanten Eisenbahnstrecken darstellt. Anhand des vorliegenden Projekts konnte zudem demonstriert werden, dass die Kombination von VibroScan[®]-Untersuchungen zusammen mit anderen Verfahren, im vorliegenden Fall Sprengversuchen, eine lösungsorientierte Methode zur Durchführung von Schwingungsprognosen an Bahnstrecken ist.

Zusammen mit den Sprengversuchen kann eine optimale Dimensionierung der Erschütterungsschutzmaßnahmen erarbeitet werden, die technisch und wirtschaftlich dem Stand der Wissenschaft und Technik genügen.

Im Rahmen der VibroScan[®]-Messungen, Auswertungen und Interpretationen für das beschriebene konnte zudem gezeigt werden, dass die Wahl des Sweeps, sofern alle zu untersuchenden Frequenzen angeregt werden, von untergeordneter Bedeutung ist. Es konnte gezeigt werden, dass eine Aufteilung des gesamten Frequenzspektrums, welches durch den Schwingungsgenerator abgedeckt werden kann, in einzelnen Teilbänder (z.B. 10 Hz – 55 Hz) zu vergleichbaren Resultaten führt, sofern die Ergebnisse der einzelnen Teilbänder zusammengesetzt werden. Dies entspricht den theoretischen Vorhersagen unter der Voraussetzung eines linear-elastischen Bodenmodells.

8. Ausblick

Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, dass das VibroScan[®]-Verfahren gut geeignet ist, Transmissionsspektren für die Prognose der Eisenbahnerschütterungen und des sekundären Luftschalls zu ermitteln. Ein weiterer Kernpunkt der Prognose ist jedoch die Annahme geeigneter Emissionsspektren, welche im Tunnel angesetzt werden können.

Hierbei ist anzustreben, dass durch geeignete Versuche der Zusammenhang zwischen den durch den Schwingungsgenerator am Immissionspunkt erzeugten Schwingungen und den durch den tatsächlichen Zugverkehr erzeugten Schwingungen hergestellt wird. Dazu ist anzustreben, dass an im Rahmen der Prognose mit dem VibroScan[®]-Verfahren untersuchten Tunnels auch nach Inbetriebnahme Messungen der Schwingungen an den bereits in der Prognose untersuchten Immissionspunkten durchgeführt werden. Durch solche Messungen könnte ermittelt werden, inwiefern die vom Schwingungsgenerator erzeugten Schwingungen direkt, im Sinne der Absolutwerte, für die Prognose herangezogen werden können.

9. Literatur

Haag, J., Gloor, M., Rutishauser, G.: Erschütterungsschutz im Tunnel der SBB-Neubaustrecke Zürich–Thalwil. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, H. 6, S. 363 – 370, Hamburg, 2005.

Harer, G.; Lehner, W.; Frankhauser, M.; Hagenhofer, H.: Weiterführende Erkundung Koralm-tunnel – Erkundungsarbeiten mit komplexen tunnelbautechnischen und bauleistungsanforderungen. Felsbau, 25/Nr. 2, S. 49 – 57, Essen, 2007.

Lautner, F.: persönliche Mitteilung, 2004

Lautner, F.: Technische Studie VibroScan®-Schwingungsgenerator Mertz 10/601. TBS/ZAMG, unveröffentlichter Bericht, Wien, 2006.

Rutishauser, G.: Optimierung von Erschütterungsprognosen mit VibroScan®. Tagungsbericht 4. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. EMPA Dübendorf, 2001.

Steinhauser, P.: VibroScan – A special seismic method for environmental vibration protection projects. Proceedings, 56th EAEG Meeting, I052, Vienna, 1994.

Steinhauser, P.: Die Untersuchung technischer Erschütterungen – ein Beitrag der Geophysik zum Umweltschutz. Aus: Hammerl, Ch., Lenhardt, W., Steinacker, R. und Steinhauser, P. (Hg.): Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851 – 2001. 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich. 744 – 763, Leykam Graz, 2001.

Steinhauser, P.: Erschütterungs- und Körperschallimmissionen beim Schienenverkehr. Probleme und Lösungsmöglichkeiten. Tagungsbericht 7. Symposium Bauwerksdynamik und Erschütterungsmessungen. EMPA Dübendorf, 2004.

Steinhauser, P.; Lang, J.; Österreicher, M.; Berger, P.: Schutz des Wiener Musikvereins-Gebäudes gegen Schall- und Erschütterungsimmissionen der U-Bahn. ETR - Eisenbahntechnische Rundschau, H. 4, S. 216 – 226, Hamburg, 2005.

Schutzmarken:

VibroScan® ist eine eingetragene Schutzmarke der iC consulenten ZT GesmbH, Österreich.
VIBROSEIS® ist eine eingetragene Schutzmarke der CONOCO Inc., USA.

Anschrift der Autoren:

Norbert Blaumoser, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, A-1190 Wien, Hohe Warte 38, Email: norbert.blaumoser@zamg.ac.at, ☎ +43-1-36026/2509

Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Unterberger, iC consulenten ZT GmbH, A-5101 Bergheim, Zollhausweg 1, Email: W.Unterberger@ic-vienna.at ☎ +43-662-450 773

Mag. Michael Österreicher, iC consulenten ZT GmbH, A-1070 Wien, Kaiserstrasse 45, Email: m.oesterreicher@ic-vienna.at ☎ +43-1-521 69