

Erschütterungen beim Bau und Betrieb des Lötschberg Basistunnels

Peter Billeter, IUB Ingenieur-Unternehmung AG Bern, CH-3005 Bern

Zusammenfassung

Während des Vortriebs in den Portalbereichen des Lötschberg-Basistunnels (LBT) wurden die sprengbedingten Erschütterungen bei ausgewählten Gebäuden in St. German und in Frutigen Adelrain gemessen. Die Messungen dienten einerseits der Überwachung des Sprengausbruchs in Bezug auf Abschlagslängen und Lademengen. Sie erlaubten eine Kontrolle der Erschütterungsimmersionen auf Gebäude und Anwohner an der Oberfläche und lieferten den Nachweis, dass ein Auftreten grösserer Schäden unwahrscheinlich war.

Zudem liess sich mit den Messdaten eine Immissionsprognose für den späteren Bahnbetrieb vornehmen. Dazu wurden die Sprengerschütterungen zusätzlich in möglichst geringem Abstand zur Ortsbrust im Tunnel erfasst. Aus den Messdaten der Schwinggeschwindigkeiten an den Immissionsorten und in Emissionsnähe wurde die Ausbreitung elastischer Körperschallwellen vom LBT über das Erdreich zu den Gebäuden quantifiziert. Auswertung und Analyse der Messdaten infolge der Ausbruchssprengungen ergaben physikalisch plausible und reproduzierbare Übertragungsfunktionen für das Erdreich. Mit diesen Übertragungsfunktionen wurde eine Prognose für die infolge des Zugverkehrs im LBT zu erwartenden Erschütterungen und den dadurch abgestrahlten Körperschall vorgenommen. Zwei unterschiedliche Berechnungswege erlaubten das Abstecken oberer und mittlerer Prognosewerte für die Immissionen.

1. Einleitung und Zielsetzungen

Im Herbst 2001 wurde das Dorf St. German mit der Weströhre im Strengvortrieb unterfahren. Vom Herbst 2002 bis in den Sommer 2003 wurde das Gebiet Frutigen Adelrain in Richtung Nordportal ebenfalls im Sprengvortrieb unterquert. Die minimalen Abstände der Wohngebäude von den Tunnelröhren des Lötschberg Basistunnel betragen in St. German rund 120 m, in Frutigen Adelrain nur ca. 60 m, womit sich für Bau und Betrieb des Tunnels die folgenden Fragen stellten:

1. Welche Erschütterungsimmersionen treten beim Sprengvortrieb auf, sind Belästigungen und Bauschäden zu erwarten und wie sind diese mit baubetrieblichen Massnahmen zu mindern,
2. welche Erschütterungsimmersionen sind im späteren Betrieb des LBT zu erwarten und sind allenfalls Schutzmassnahmen im Tunnelbereich notwendig?

Die Fragen wurden mit einer ausgedehnten Erschütterungsüberwachung der unterquerten Räume beantwortet. Dabei wurde versucht die Messungen für die Immissionskontrolle und Beweissicherung während des Baus für die die Immissionsprognose im Betrieb zu verwenden.

Beim Tunnelbau sind Messungen während des Ausbruchs die früheste Möglichkeit und die einfachste Lösung einer experimentell gestützten Immissionsprognose. Die Sprenganregung (eine transiente, impulsartige Anregung) hat den Vorteil, dass das Anregungsspektrum sehr breit und energiereich ist. Zeitverlauf und Amplituden entsprechen aber der späteren Anregung im Bahnbetrieb nicht. Wird jedoch als Näherung angenommen, dass die Übertragung zwischen Emissions- und Immissionsort amplitudeninvariant ist, so ist die Verwendung von Sprengerschütterungen für die Immissionsprognose zulässig. Die plausiblen Resultate bestätigen diese Annahme.

Mit der Immissionsprognose sind die taktil wahrnehmbaren Erschütterungen sowie der von der vibrierenden Raumhülle abgestrahlte und akustisch wahrnehmbare Schall (abgestrahlter Körperschall oder sekundärer Luftschall) zu quantifizieren. Die Ausbreitung von Körperschallwellen ab der Fahrbahn bzw. den Gleisen via Tunnelsohle und Erdreich bis zu den Gebäuden und den Immissionsorten (z.B. Wohnräumen) ist insofern schwer zu prognostizieren, als dass sich das Übertragungsverhalten entlang des Ausbreitungswegs nicht immer gut bestimmen lässt. Für Berechnung der Wellenausbreitung durch das Erdreich werden meistens einfache analytische Funktionen der Distanz und geomechanischer Parameter angesetzt. Für eine zuverlässige Prognose der im Betrieb des LBT zu erwartenden Erschütterungen war die Wellenausbreitung experimentell zu ermitteln, da die Immissionen massgeblich durch die Dämmung / Dämpfung der Körperschallwellen auf dem relativ langen Ausbreitungsweg über mehrere Dekameter Erdreich beeinflusst werden.

2. Geologie

Im Raum Frutigen Adelrain verlaufen die beiden Röhren des LBT in den tertiären Sedimentdecken. Dabei wechseln sich Flysch in ungeklärter Stellung, bestehend aus sandigen oder siltigen Kalkmergelschiefern mit Sandsteineinlagen, mit der Taveyannaz-Serie (Taveyannaz Sandstein mit bis zu 60 % Dachschiefer) ab. Der Felsen reicht bis wenige Meter unter die Geländeoberfläche, die Überdeckung aus Lockergestein und Erde ist eher gering.

Das Dorf St. German liegt auf dem nach ihm benannten Bergsturz am Südhang des Rhonetals. Der Bergsturzkegel wird in Richtung Süd-Osten vom Maachi Graben begrenzt, an dessen Nordflanke das Altkristallin des Aare-Massivs bis an die Oberfläche tritt. Die Bergsturzdecke, die grösstenteils dicht gelagert ist, hat i.a. eine Mächtigkeit von mehreren Dekametern. In das Bergsturzmaterial sind oberflächennahe teilweise weiche Schichten mit organischen Resten und Torfbänder sowie im Fussbereich Moränenreste eingelagert. Unter dem Bergsturz folgt der Fels des Autochthons Gampel-Baltschieder, das in Richtung Raron aus den eher weichen Wechsellagerungen der Trias mit Quartarschiefer, Rauhwacke und Dolomit besteht und Richtung Norden in festere Kalke (Lias-Kalke und Lias-Schiefer) übergeht.

3. Vorgehen und Methode

Die Überwachung und Beweissicherung verlangte eine Instrumentierung der gefährdeten Häuser in der Nähe des Tunnels. Für die Immissionsprognose wurden Messungen einerseits bei bewohnten Gebäuden (Immissionsort) und andererseits möglichst nahe beim Sprengort (Emissionsort) benötigt. Die Messorte, deren Lage und Abstände zur Tunnelachse der Oströhre sowie deren Höhenkote sind für das Beispiel Frutigen Adelrain in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Verhältnisse in St. German waren vergleichbar. Die minimalen Abstände der nächstliegenden Gebäude zum Tunnel betragen in Frutigen rund 60 m (bewohnte Gebäude) bzw. 30 m (unbewohnte Gebäude), während sie in St. German bei ca. 120 m lagen.

Bei den massgebenden Gebäuden (Immissionsorte) wurden Schwinggeschwindigkeitssensoren im Fundamentbereich kraftschlüssig montiert (Abb. 1 und 2, blau und rot markierte Orte). Die Sensoren in Emissionsnähe befanden sich beim Vortrieb im Raum Frutigen-Adelrain auf der Sohle des Sondierstollens bzw. im Portalbereich (Vorlos) der Weströhre (in Abb. 2 und 3, grün bezeichnet). Beim Vortrieb der Weströhre unter St. German waren sie in der Oströhre installiert. Die emissionsnahen Sensoren wurden mit dem Sprengfortschritt verschoben, um den Abstand einigermassen klein und immer etwa in der gleichen Grösse zu halten (vgl. unten).

Für die Schwinggeschwindigkeitsmessungen in Frutigen wurden Messgeräte vom Typ Syscom / Bartek MR2002 mit je einem triaxialen Schwinggeschwindigkeitssensor MS2003 verwendet, in St. German kamen Geräte des Typs Minimate+ von InstanTel (ebenfalls mit triaxialem Schwinggeschwindigkeitssensor) zum Einsatz.

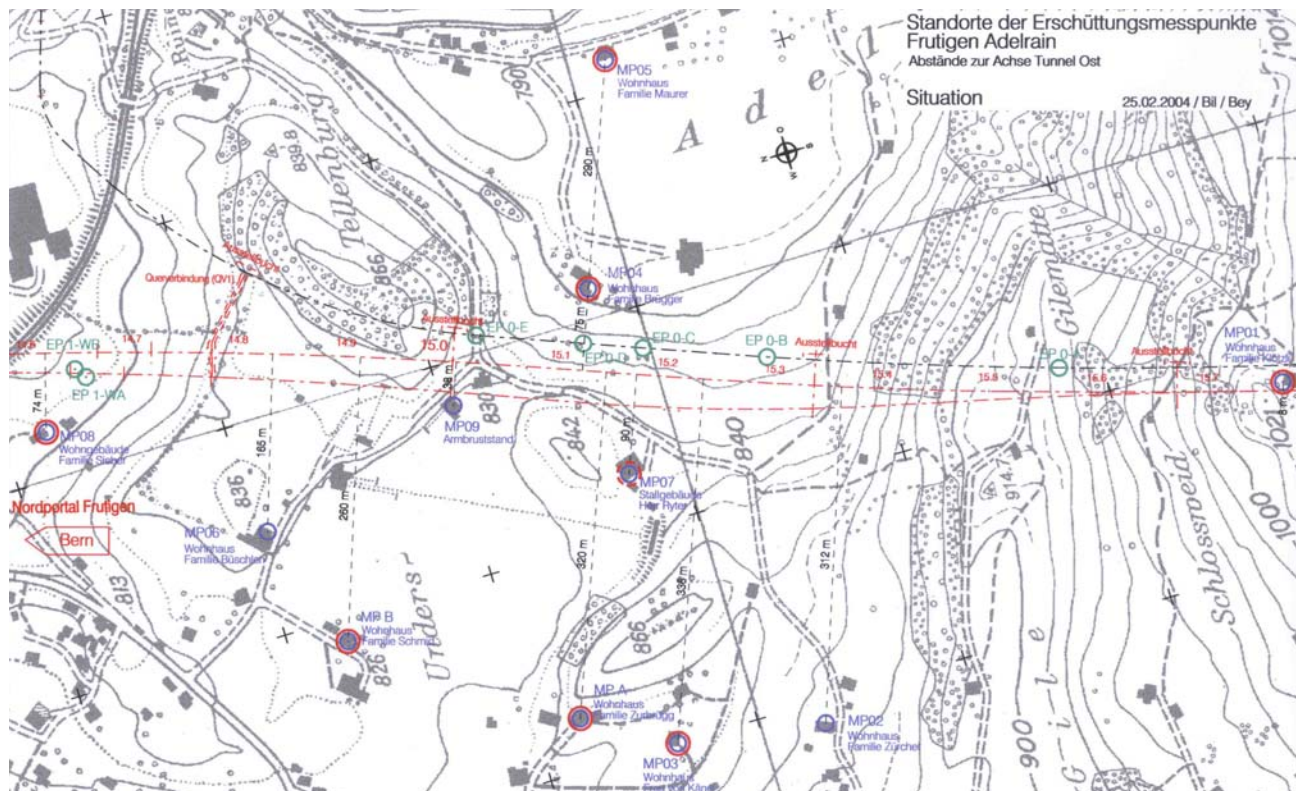


Abb. 1: Situation Frutigen Adelrain; Messorte mit Horizontalabständen zum Tunnel Ost (blau = Überwachung Sprengvortrieb, rot = Prognose Bahnbetrieb, grün = Messorte in Emissionsnähe).

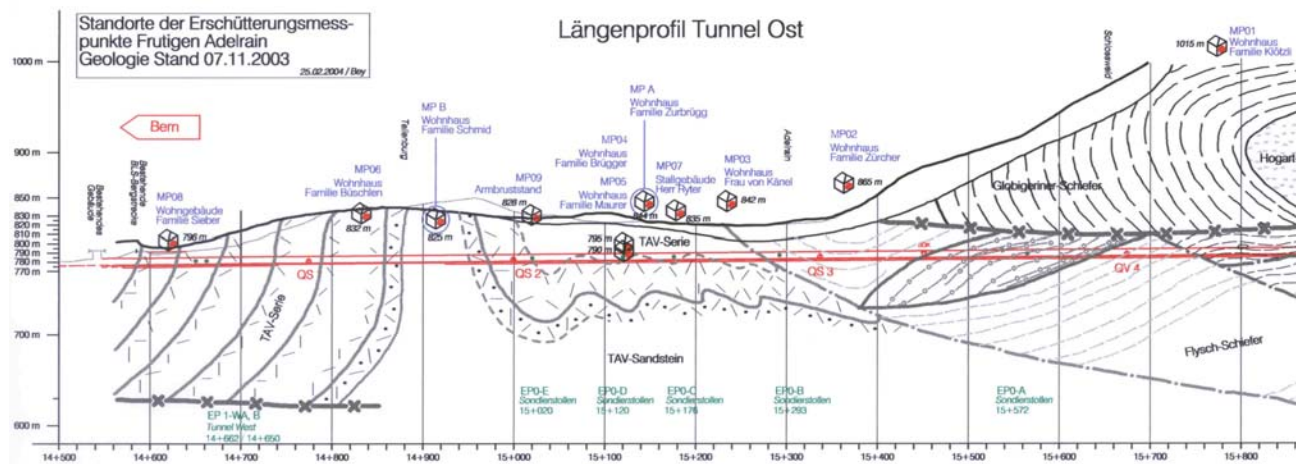


Abb. 2: Längenprofil LBT Tunnel Ost im Raum Frutigen-Adelrain mit den Messorten

Wie einleitend erwähnt, liegt eine der Unsicherheiten bei der Prognose der Wellenausbreitung und Erschütterungseinwirkung bei der Modellierung des Übertragungsverhaltens des Erdreichs. Dieses Übertragungsverhalten kann mit der Auswertung von nahezu gleichzeitig registrierten Schwingungsmessdaten von Messpunkten in Emissionsnähe und am Immissionsort bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt die Messkonfiguration für die Situation in Frutigen Adelrain. Wichtig ist, dass einerseits die Abstände R_1 und R_2 stark differieren ($R_2 > 2 \times R_1$) und andererseits R_1 nicht zu nahe am Emissionsort liegt (Nahfeldeffekte). Das Messgerät in Emissionsnähe muss deshalb von Zeit zu Zeit mit dem Sprengfortschritt verschoben werden.

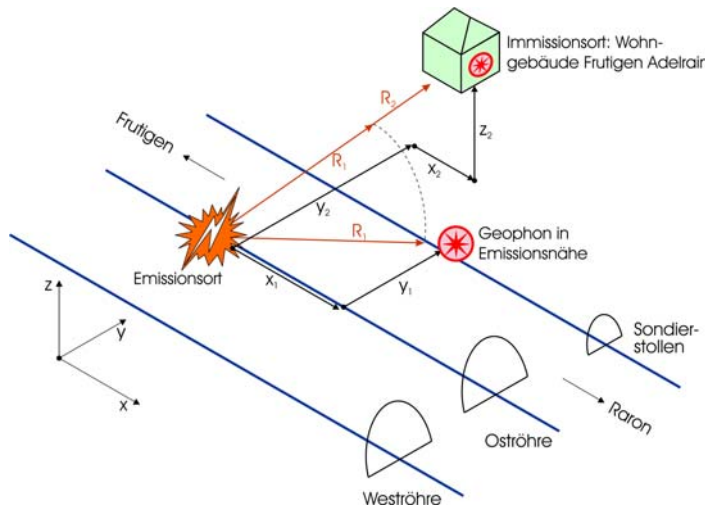


Abb. 3: Prinzipskizze zum Messkonzept für die Wellenübertragung vom Messort in Emissionsnähe zum Immissionsort in Frutigen Adelrain.

Das Messkonzept zielt darauf ab, aus den Messdaten am Immissionsort (R_2) und in der Nähe (R_1) zum Emissionsort (=Sprengort) experimentelle Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ der Wellenausbreitung zu ermitteln. Werden aus den gemessenen Erschütterungen die Leistungsspektren $S_{GG}(f)_{R1}$ in Emissionsnähe (Tunnel) und $S_{HH}(f)_{R2}$ bei den Immissionsorten (Gebäude) berechnet, so schreibt sich die frequenzabhängige Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ zu:

$$|H_{GH}(f)| = \sqrt{\frac{S_{HH}(f)_{R2}}{S_{GG}(f)_{R1}}} \quad \text{mit} \quad \overline{S_{GG}} = \overline{S_{gg,x}} + \overline{S_{gg,y}} + \overline{S_{gg,z}} \quad \text{und} \quad \overline{S_{HH}} = \overline{S_{hh,x}} + \overline{S_{hh,y}} + \overline{S_{hh,z}}$$

Die Auswertung basiert auf den Methoden der Analyse zufälliger Signale (Random data) (vgl. z.B. Bendat & Piersol, 1980, 1986). Verwendet werden die heute gängigen Instrumente der digitalen Signalanalyse mit der Verknüpfung des Zeit- und des Frequenzraums via die Fourier-Transformation. Zur Trennung von deterministischen und stochastischen Signalanteilen werden eine blockweise Signalbearbeitung und die anschliessende Mittelung eingesetzt (blockwise averaging). Das eingesetzte Verfahren geht davon aus, dass zwischen den gemessenen Eingangs- und Ausgangsgrössen, - den Vibrationen im Tunnel, d.h. in Emissionsnähe, und den Erschütterungen an den Gebäuden in Frutigen - ein physikalischer Zusammenhang, die sogenannte Übertragungsfunktion existiert, die als linear (d.h. in diesem Fall amplitudeninvariant) angenommen wird. Näheres zum methodischen Vorgehen ist in Billeter & Berger (2001) zu finden.

Die Prognose der Erschütterungen und des abgestrahlten Körperschalls an den Immissionsorten, d.h. in bewohnten Räumen der Gebäude in Frutigen und St. German ist nachfolgend beschrieben. Sie basiert darauf, dass sich aus dem Emissionsspektrum der Schwinggeschwindigkeiten im Fahrbahnbereich durch sukzessive Multiplikation mit den einzelnen Übertragungsfunktionen der Wellenausbreitung und Schwingungsübertragung das Immissionsspektrum am Immissionsort berechnen lässt. Die einzelnen Phasen und Faktoren der Prognose sind untenstehend erklärt:

I) Emission: Als Emissionsspektrum $v_E(f)$ für die Prognose wurde die Enveloppe der vorhandenen Schwinggeschwindigkeitsspektren im Bereich Tunnelbankett / Anschluss Tunnelgewölbe verwendet. Dazu wurde eine grosse Anzahl Messdaten von Zugdurchfahrten bei unterschiedlichem Unter- und Oberbau ausgewertet (vgl. Billeter, 2004; BLS AT, 2002, 2004).

II) Wellenübertragung im Erdreich und Einkopplung in Gebäude am Immissionsort: Die messtechnisch ermittelten Übertragungsfunktionen für die Wellenausbreitung durch das Erdreich zwischen dem Tunnel und den Gebäuden können für die Prognose auf zwei Arten verwendet werden (siehe u.a. Melke, 1992):

A) Die gemessene Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ wird direkt verwendet, wobei sie noch mit dem Verhältnis des Abstands der Messorte (Abstand $R_2 - R_1$ in Abbildung 3) zum minimalen Abstand zwischen Tunnelgleisen und Immissionsort skaliert wird.

B) Wenn die gemessenen Übertragungsfunktionen mit der Frequenz zumindest stückweise mehr oder weniger stetig abnehmen, so kann die (gemessene) Übertragungsfunktion mit folgendem analytischen Ansatz angenähert werden:

$$|H_{GH}(f)| = \left(\frac{R_2}{R_1} \right)^n \cdot e^{-\alpha(R_2-R_1)} \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{2\pi \cdot f \cdot D}{c_s} \quad (1)$$

Der Exponent n repräsentiert die sogenannte geometrische Wellendämpfung und beträgt je nach Emissionsquelle und Wellenart zwischen -0.5 und -2. Der Exponent α berücksichtigt den mit der Frequenz zunehmenden Einfluss der Materialdämpfung über das Lehr'sche Dämpfungsmass D und die Scherwellengeschwindigkeit c_s . Die Parameter n und α lassen sich über eine Regressionsanalyse aus den gemessenen Übertragungsfunktionen bestimmen.

III) Wellenausbreitung und Schwingungsübertragung im Gebäude: Die Übertragung von Schwinggeschwindigkeiten v_H im Fundamentbereich auf Schwinggeschwindigkeiten v_D der Decken (bzw. Wände) eines Immissionsraums über dem Fundament wurde als Verstärkungsfaktor V_V eines Einmassenschwingers mit Eigenfrequenzen im Bereich von 20 Hz bis 40 Hz und Lehr'schen Dämpfungsmassen im Bereich von 2 % bis 5 % angenommen (typische Holzbalken- bzw. Betondecken). Zur Überprüfung der angenommenen Eckwerte für die Gebäudeübertragung wurde das Übertragungsverhalten von ausgewählten Gebäuden in St. German experimentell bestimmt. Die Messungen haben die Eckwerte der Prognose weitgehend bestätigt (BLS AT, 2003).

IV) Erschütterungen im Immissionsraum: Die Prognosewerte der Schwinggeschwindigkeiten $v_D(f)$ auf dem Boden eines Immissionsraums betragen dann:

$$v_D(f) = v_E(f) \times H_{GH}(f) \times V_V(f)$$

Die Umrechnung von $v_D(f)$, dem energieäquivalenten Terzbandspektrum der Schwinggeschwindigkeiten am Immissionsort, auf die gemäss DIN 4150-2 zu beurteilende Schwingstärke KB_{Fmax} geschieht mit einem empirischen Faktor (es wurde ein konservativer Wert von 2.5 angesetzt).

V) Schallabstrahlung der Raumphülle: Der Schalldruckpegel $L_p(f)$ des in einen geschlossenen Raum abgestrahlten Körperschalls infolge einer vibrierenden Raumphülle mit dem Schwinggeschwindigkeitspegel $L_v(f)$ wurde über den sogenannten Abstrahlgrad $\sigma(f)$ der Raumphülle (Decken und Wände) und die Hallraumeigenschaften bestimmt (Cremer & Heckl, 1996).

4. Resultate der Überwachung während dem Vortrieb

Die an den Messorten in Frutigen Adelrain erfassten Schwinggeschwindigkeitsmaxima und die 95 %-Fraktile sind in Abbildung 4 in Funktion der Abstände Sprengort bis Immissionsort aufgetragen (minimale Abstände bzw. Abstände beim Auftreten der Maximalwerte). Die maximalen Schwinggeschwindigkeiten lagen gerade im Bereich der möglichen Schadensgrenze. Die wenigen Schadenmeldungen bestätigen im wesentlichen diese Einschätzung: Im grossen Ganzen konnte der Sprengvortrieb unter dem Gebiet Frutigen Adelrain ohne namhafte Schäden oder Auswirkungen an Bauwerken an der Oberfläche ausgeführt werden.

Ebenfalls in Abb. 4 eingezeichnet sind die prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten infolge des Sprengvortriebs. Die Prognose wurde nach Westine (1978) erstellt, eine Formel, welche nebst der Lademenge und dem Abstand zum Sprengort auch noch die Sprengenergie des Sprengstoffes und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Untergrund berücksichtigt. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, liegen die gemessenen Schwinggeschwindigkeitsmaxima und die 95 %-Fraktile in oder unterhalb eines Bereichs, der bei Sprengungen mit den Lademengen von 10 kg bis 40 kg pro Zündstufe in Kalkgesteinen zu erwarten ist. Wird berücksichtigt, dass die Schwinggeschwindigkeitsmaxima bei allen Messorten im Raum Frutigen Adelrain, d.h. an Orten mit unterschiedlichen Eigenschaften der Wellenausbreitung, zusammengestellt sind, so kann eine gute Übereinstimmung zwischen Prognose und Messwerten festgestellt werden.

Dies lässt sich mit Abbildung 5 bestätigen, in welcher in dimensionsloser Form die Abnahme der Geschwindigkeitsmaxima in Funktion des Abstands für die emissionsnahen Messorte im Sondierstollen bei Frutigen sowie im Portalbereich Nord dargestellt sind. Die Exponenten n der Potentialfunktion $v/v_{\max} = f(R/R_{\min})$ liegen im Bereich von $n = -2$, was gut mit der Theorie übereinstimmt (vgl. z.B. Melke, 1992).

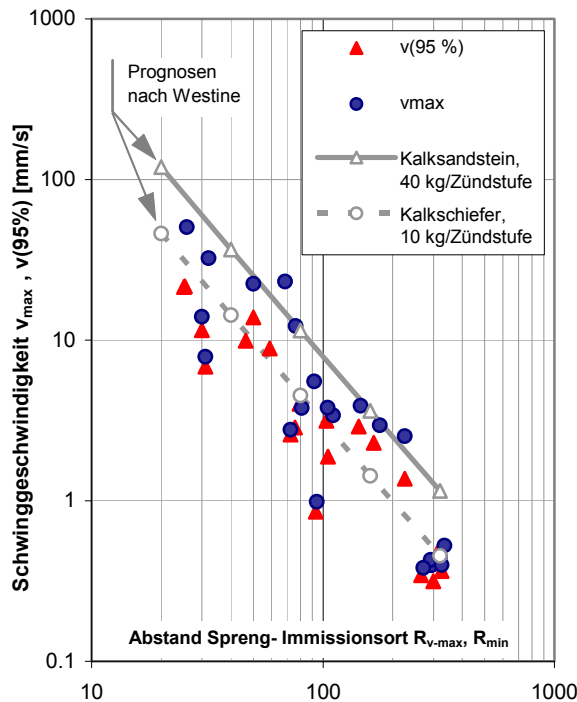


Abb. 4: Schwinggeschwindigkeitsmaxima und 95 %-Fraktile in Funktion des minimalen Abstands Sprengort - Messort. Werte aller Messorte, Regressionsfunktionen und Prognose nach Westine.

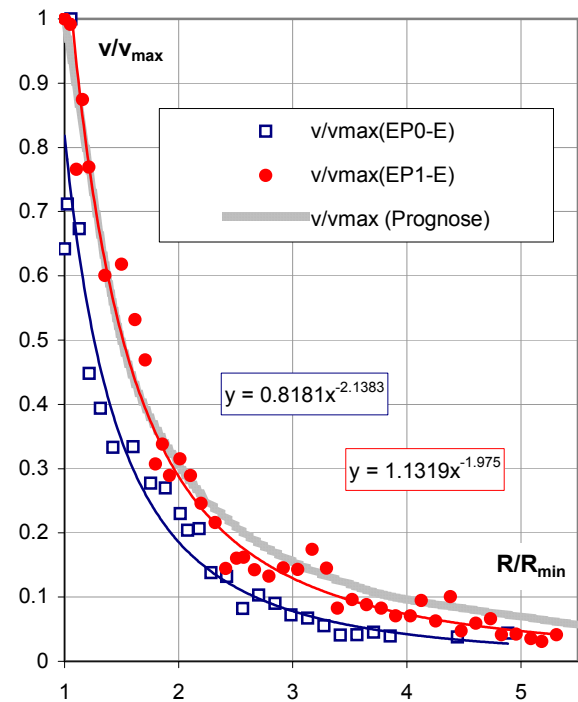


Abb. 5: Beispiel der Abnahme der Schwinggeschwindigkeitsmaxima in Funktion der Distanz (dimensionslose Darstellung), Regressionsfunktionen der Messdaten und Prognose nach Westine.

5. Resultate der Übertragungsmessungen

In den Abbildungen 6 und 7 sind als Beispiele die Messresultate der Schwinggeschwindigkeitsspektren in Emissionsnähe (Sondierstollen Frutigen bzw. Tunnel Ost unter St. German) und bei zwei nahe liegenden Gebäuden (Abstände ca. 80 m bzw. 120 m) sowie die daraus berechneten Übertragungsfunktionen dargestellt. Wie die Resultate der Einzelmessungen (feine Linien) und die Mittelung (fett) zeigen, sind die spektralen Eigenschaften der Wellenübertragungen trotz unterschiedlicher Sprengereignisse sehr gut reproduzierbar. Folgendes kann festgestellt werden:

- Die maximale Wellenübertragung zwischen Tunnel und Gebäude findet im Bereich von 10 bis 50 Hz statt. Wellen dieser Frequenz werden durch die Ausbreitung z.T. nur wenig gedämpft oder es treten gar Resonanzeffekte in den bei der Wellenausbreitung durchlaufenen Schichten auf. Im Frequenzbereich über ca. 20 Hz bis 50 Hz (je nach Übertragungsort) nimmt die Schwinggeschwindigkeitsleistung bei den Gebäuden mit zunehmender Frequenz stetig ab.
- Im Bereich von einer unteren Grenze von ca. 20 Hz bis 50 Hz bis zu einer oberen Grenze von 150 Hz bis 200 Hz ist die Abnahme der Schwinggeschwindigkeiten bei den Gebäuden und die Abnahme der Übertragungsfunktionen in logarithmischer Darstellung näherungsweise linear. Der Einfluss der frequenzabhängigen Ausbreitungsdämpfung stimmt gut mit dem theoretischen Modell IIB (Gl. 1) überein.

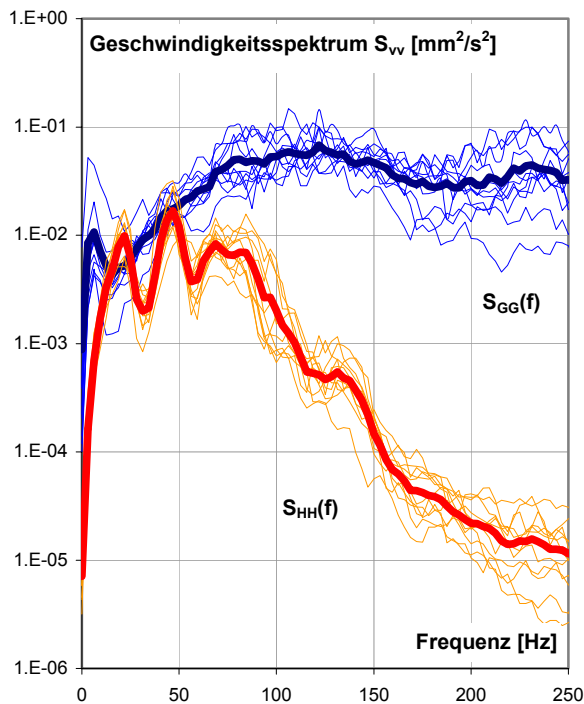


Abb. 6a: Leistungsspektren der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten im Sondierstollen (blau) und beim Haus MP04 in Frutigen (rot). Die Mittelwerte der Leistungsspektren $S_{GG}(f)$ und $S_{HH}(f)$ sind fett hervorgehoben.

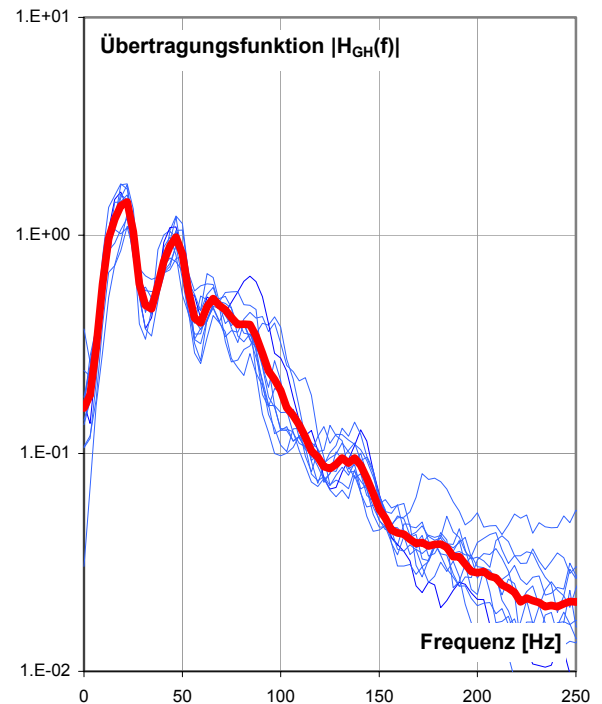


Abb. 6b: Berechnete Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ zwischen dem Tunnel und dem Haus MP04 in Frutigen ($\Delta R \approx 50$ m). Der weiter verwendete Mittelwert von $|H_{GH}(f)|$ ist fett rot hervorgehoben.

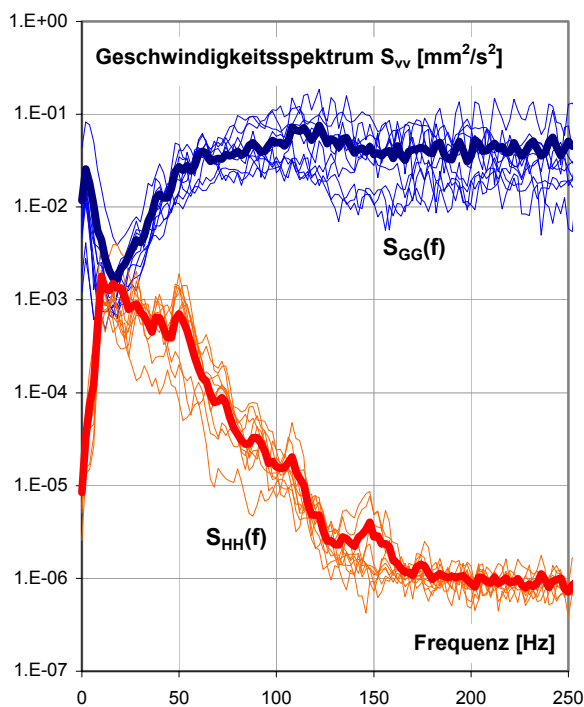


Abb. 7a: Leistungsspektren der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten im Tunnel Ost (blau) und beim Haus Schmid in St. German (rot). Die Mittelwerte der Leistungsspektren $S_{GG}(f)$ und $S_{HH}(f)$ sind fett hervorgehoben.

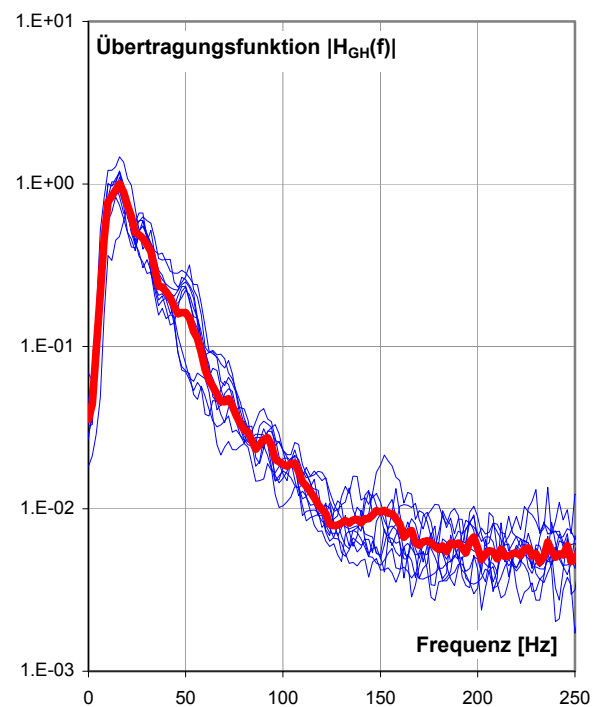


Abb. 7b: Berechnete Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ zwischen dem Tunnel und dem Haus Schmid (Haus 1) in St. German ($\Delta R \approx 90$ m). Der weiter verwendete Mittelwert von $|H_{GH}(f)|$ ist fett rot hervorgehoben.

Bei der Immissionsprognose wird die Wellenübertragung zwischen dem Tunnel und den Gebäuden in Frutigen Adelrain auf zwei Arten berechnet (Abschnitt 3). Nach der Methode IIA werden die messtechnisch erfassten und für die einzelnen Terzbänder gemittelten Übertragungsfunktionen nach der Skalierung mit den Distanzverhältnissen direkt verwendet. Die zur Prognose verwendeten Übertragungsfunktionen in den Terzbändern sind in Abbildung 8 dargestellt. Der meist stetige und in der logarithmischen Darstellung näherungsweise lineare Abfall der Übertragung mit zunehmender Frequenz ist wiederum deutlich erkennbar.

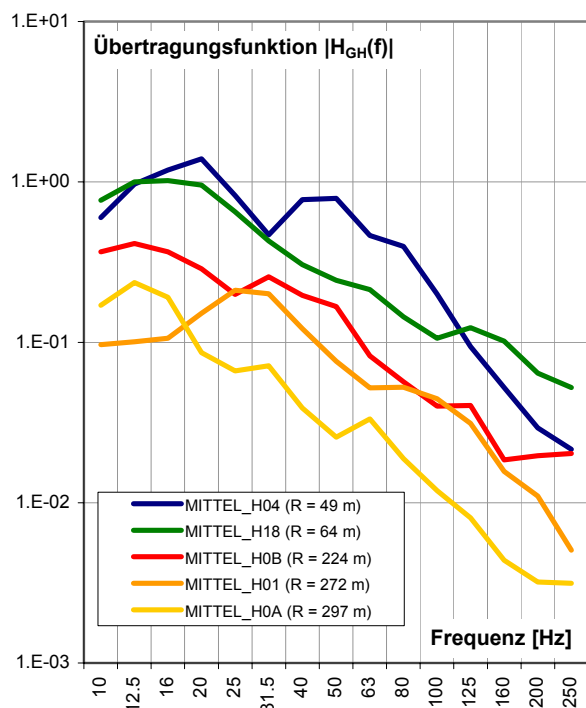


Abb. 8a: Für die Immissionsprognose nach der Vorgehensart IIA verwendete Terzband-Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ zwischen dem Tunnel und den Gebäuden im Raum Frutigen Adelrain.

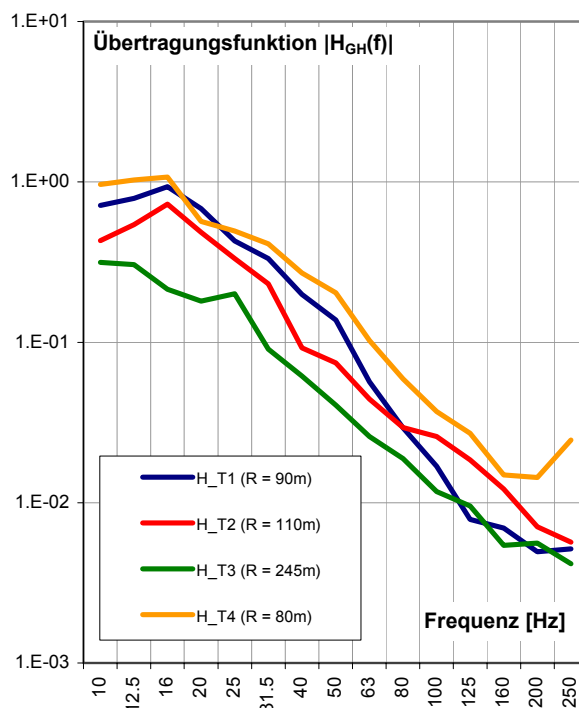


Abb. 8b: Für die Immissionsprognose nach der Vorgehensart IIA verwendete Terzband-Übertragungsfunktionen $|H_{GH}(f)|$ zwischen dem Tunnel und den Gebäuden in St. German.

Die gemessenen Übertragungsfunktionen stimmen in einem mittleren Frequenzbereich recht gut mit dem theoretischen Modell einer mit zunehmender Frequenz abnehmenden Wellenübertragung gemäss Vorgehensart IIB bzw. Gleichung (1) überein. Mittels linearer Regressionen der logarithmierten Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich zwischen ca. 20 - 40 Hz und 120 - 200 Hz (je nach Verlauf der jeweiligen Übertragungsfunktion) wurden die Exponenten α der Gl. (1) und damit die Scherwellengeschwindigkeit c_s und das Lehr'sche Dämpfungsmass D aus den gemessenen Übertragungsfunktionen ermittelt.

Abbildung 9 zeigt ein typisches Beispiel für die Regression auf die Übertragungsfunktion zwischen dem Tunnel und dem Haus Schmid (H1) in St. German. Die Regressionsfunktion für Gl. (1) stimmt im Bereich von 15 bis 125 Hz hervorragend mit der Messung überein. Eine vergleichbare wenn auch infolge von Resonanzeffekten bei der Wellenausbreitung manchmal etwas weniger gute Übereinstimmung der theoretischen und gemessenen Übertragungsfunktionen konnte bei allen Gebäuden festgestellt werden (vgl. dazu indikativ Abb. 8a und 8b).

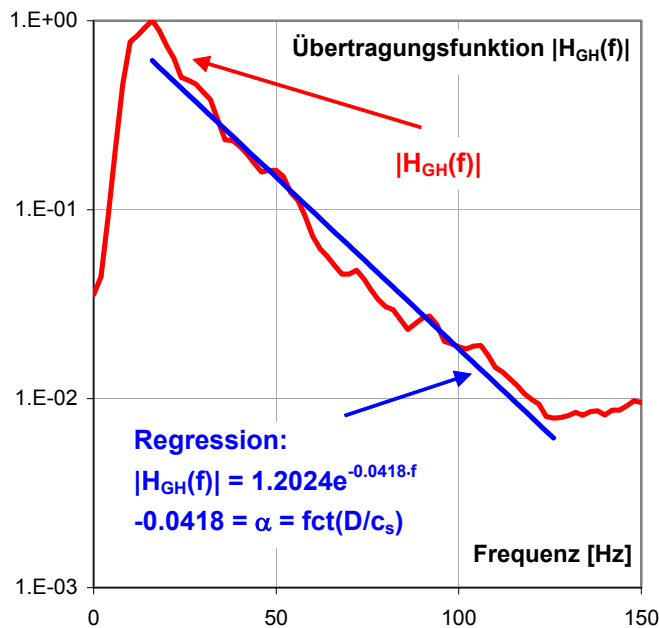


Abb. 9: Regression auf die Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ zwischen dem Tunnel und dem Haus Schmid (H1) in St. German. Die Übereinstimmung im Bereich von 15 Hz bis 125 Hz ist hervorragend ($R^2 = 97\%$)

Aus den Regressionen ergaben sich folgende Werte für die Scherwellengeschwindigkeit c_s und das Lehr'sche Dämpfungsmass D . Die Werte entsprechen sehr gut Literaturangaben für die vorhandenen Gesteinsschichten (teilweise stark tektonisierte Sedimente, Sandsteine, Kalk- und Ton-schiefer, vgl. Abschnitt 2):

- Frutigen-Adelrain: $c_s = 1'260 - 1'810$ m/s, $D = 0.015 - 0.03$
- St. German: $c_s = 1'050 - 1'560$ m/s, $D = 0.03 - 0.06$

Die stabilen und gut reproduzierbaren Übertragungsfunktionen und deren gute Übereinstimmung mit dem theoretischen Verhalten gemäss Gleichung (1) deuten darauf hin, **dass die hier eingesetzte Methode der Messung von Sprengvibrationen während des Tunnelvortriebs eine zuverlässige Erfassung der Wellenübertragung durch das Erdreich erlaubt.**

6. Immissionsprognosen und Folgerungen

Die Immissionsprognose für die Gebäude in Frutigen Adelrain und in St. German wurde mit zwei Modellen für die Übertragung durch das Erdreich sowie für zwei Gebäudetypen vorgenommen. Die beiden Modelle der Wellenübertragung - ein empirisches und ein semi-empirisches - stimmen i.a. gut überein und die ermittelten Parameter des semi-empirischen Modells entsprechend den Literaturwerten für vergleichbare Ausbreitungsmedien. Die Spannweite der Prognosewerte infolge der beiden unterschiedlichen Modelle für die Übertragung durch das Erdreich betrug ca. ± 3 dBA, was am unteren Rand der typischen Unschärfe einer empirisch abgestützten Prognose liegt.

Die Prognose mit der aus den Messungen ermittelten Übertragungsfunktion $|H_{GH}(f)|$ (Vorgehensart IIA) lieferte eine *obere Grenze* der zu erwartenden Immissionen, da sie die reale Ausbreitung im Erdreich (mit allen Resonanzeffekten) berücksichtigt, aber den Nahbereich des Tunnel mit dem (i.a. dämpfenden) Übergang Fahrbahn - Tunnelschale - Erdreich gänzlich vernachlässigt.

Das analytisch-empirische Modell (Vorgehensart IIB) unterschätzt die Wellenübertragung in Frequenzbereichen, in denen der Wellendurchgang durch Resonanzphänomene (Gebäudeeinkopplung, Untergrund) begünstigt sein kann (so z.B. die gute Wellenübertragung bei ca. 15 - 50 Hz in Abb. 6 bis 8). Mit den ermittelten Werten für die Scherwellengeschwindigkeit und die Lehr'sche Dämpfung sind aber noch immer realitätsnahe (mittlere) Prognosen zu erwarten.

Mit der konservativeren Prognosemethode (IIA) wurden für die Immissionen einer einzelnen Zugdurchfahrt im LBT in den nächstliegenden Gebäude in Frutigen Adelrain im Abstand von weniger als 80 m maximale Schwingstärken im Bereich von $KB_{Fmax} \approx 0.2$ und maximale Schalldruckpegel von 35 - 40 dBA ermittelt (näheres siehe Billeter, 2004). Dies bedeutet, dass im Einzelfall besonders erschütterungsintensive Zugdurchfahrt von empfindlichen Personen wahrgenommen werden können. Bei Gebäuden mit grösseren Abständen vom LBT sind die zu erwartenden Immissionen schon deutlich tiefer und auch im ungünstigsten Fall kaum mehr wahrnehmbar. Dies gilt auch für die Gebäude in St. German, wo nebst der Distanz zum LBT noch zusätzlich die relativ gute Dämpfung der Wellenausbreitung im Bergsturzmaterial die Immissionen mindert.

Für Beurteilung der Immissionen über Bahntunnel massgebend ist die Richtlinie zur Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS, 1999). Darin wird zur Beurteilung von Erschütterungen auf die DIN 4150-2 (1999) abgestellt, für den abgestrahlten Körperschall werden Richtwerte einer SBB-Weisung angesetzt. Die Prognosewerte für die einzelne Zugdurchfahrt werden mit der Einwirkungszeit auf die effektiven Beurteilungsgrössen hochgerechnet. Die Prognose mit den *Maximalwerten der zu erwartenden Immissionen* (konservative Annahme für Emission und Übertragung) zeigten, dass in den nächstliegenden Gebäuden ($R_{min} = 60$ m) auch im Vollausbau des LBT die Beurteilungsschwingstärken der Erschütterungen den Anhaltswert um mindestens 40 % unterschreiten und die Beurteilungspegel des abgestrahlten Körperschalls um mindestens 2 - 3 dB unter den Planungswerten nach EKS liegen werden.

Die heute geltenden Grenzwerte bezüglich Erschütterungen und abgestrahltem Körperschall werden also sowohl im derzeitigen Teilausbau, wie auch in einem späteren Vollausbau längst eingehalten. Daraus folgt dann auch, dass weitergehende erschütterungsmindernde Massnahmen auf der Seite des Rohbaus oder bei der Fahrbahn in den Portalbereichen des LBT (Frutigen-Adelrain und St. German) als nicht notwendig erachtet werden.

Literaturverzeichnis

- BEKS** (1999). *Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen*. BUWAL / BAV, 20.12.1999
- Bendat, J.S. & Piersol, A.G.** (1986) *Random Data – Analysis and Measurement Procedures*. (2nd Ed.), John Wiley & Sons, New York.
- Billeter** (2004). Erschütterungsfragen im Bau und Betrieb. Proc. alpTransit Tagung 2004 Interlaken, SIA Dokumentation D 0202 Bd. 3, SIA-FGU, pp. 93 - 102.
- Billeter, P & Berger, W.** (2001). Die Wirksamkeit von Unterschottermatten im eingebauten Zustand. *Proc. 4. MR2002 Symposium*, EMPA Dübendorf.
- BLS AT** (2002). Betriebsbedingte Erschütterungen in St. German. IG LBT (unveröffentlicht).
- BLS AT** (2003). Betriebsbedingte Erschütterungen in St. German - Zusatz. IG LBT (unveröffentlicht).
- BLS AT** (2004). Erschütterungen Frutigen Adelrain. IG E+B/IUB (unveröffentlicht).
- DIN 4150-2** (1999) *Erschütterungen im Bauwesen, Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden*. Juni 1999.
- Cremer, L. & Heckl, M.** (1996). *Körperschall*. (2nd Ed.) Springer, Berlin.
- Melke, J.** (1992). Durchführung von Immissionsprognosen für Schwingungs- und Körperschalleinwirkungen. LIS-Bericht Nr. 107. Landesanstalt für Immissionsschutz Nordrhein-Westfalen, Essen.
- Westine, P.S.** (1978). Ground Shock from the Detonation of Buried Explosives. *J. of Terramechanics*, Vol. 15/2, pp. 69 - 79.