

VIBRO-SCAN-Anregung beim neuen Weinbergtunnel

1 Einleitung

Kurz vor Weihnachten 2010 konnte in Zürich ein grosses Ereignis gefeiert werden: Der Durchschlag des Neuen Weinbergtunnels. Damit war eine wichtige Etappe in der Realisierung der neuen Durchmesserlinie abgeschlossen. Diese Durchmesserlinie verbindet den Hauptbahnhof im Zentrum von Zürich mit dem im Norden von Zürich gelegenen Bahnhof Oerlikon. Der Tunnel beginnt unter dem bestehenden Hauptbahnhof Zürich, taucht unter der Limmat durch, unterquert das Hochschulquartier und erreicht in einer S-förmigen Schleife den Bahnhof Oerlikon.

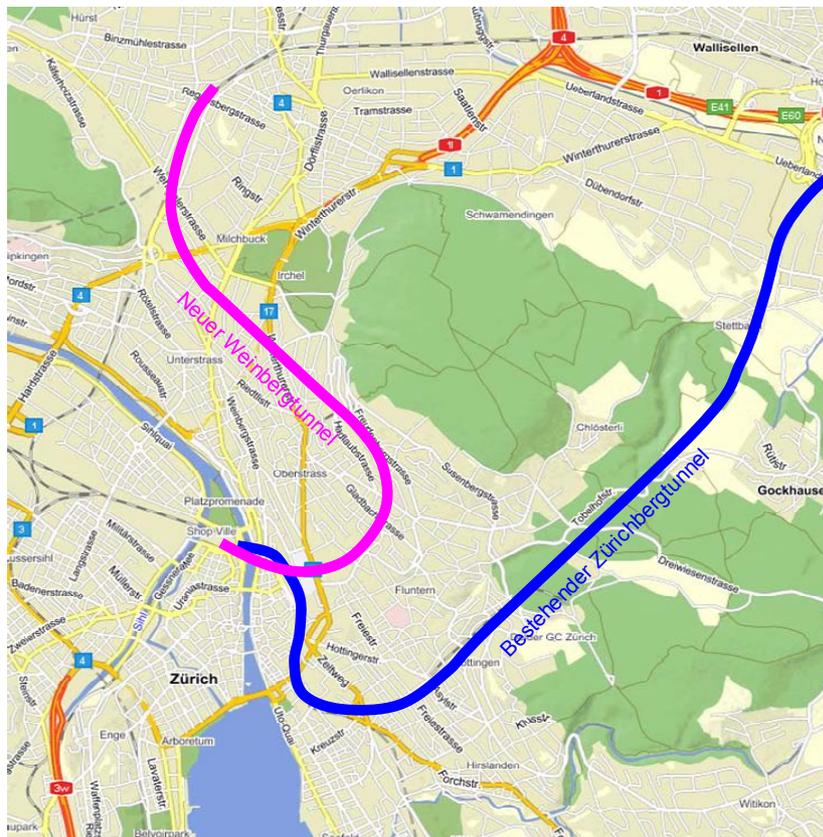


Bild 3.1 Uebersichtplan mit Zürichbergtunnel und Weinbergtunnel

Wie bei solchen Projekten üblich, wurden auch hier die zu erwartenden Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen untersucht. In der Projektierungsphase wurde für die Gebäude über dem Tunnel eine Immissionsprognose erstellt. Auf dieser Grundlage wurde dann bestimmt, in welchen Abschnitten des Tunnels welche Massnahmen erforderlich sein werden. Um die Richtigkeit der gewählten Massnahmen zu verifizieren, wurde nach dem Durchschlag, d.h. sobald der Tunnel durchgängig befahrbar war, eine Simulation der Zugserschütterungen mit Hilfe von VIBRO-SCAN, einem 20 t schweren dynamischen Erreger vorgenommen.

Ein interessanter Aspekt bei der Immissionsprognose für dieses Tunnelprojekt war, dass in unmittelbarer Nachbarschaft bereits ein Eisenbahntunnel in Betrieb war. Dies ermöglichte sowohl in der Projektierungsphase als auch bei der Simulation mit VIBRO-SCAN Messdaten aus dem bestehenden Zürichbergtunnel für die Prognose beim neuen Weinbergtunnel einzusetzen. Im vorliegenden Beitrag soll aufgezeigt werden, wie diese Daten für die Prognose verwendet wurden und welche Unsicherheiten trotzdem blieben.

2 Ein „ideales“ Prognose-Modell

Unter „idealen“ Verhältnissen liesse sich die Prognose der Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen für die Häuser über dem Tunnel nach dem in Bild 2.1 dargestellten Verfahren durchführen. Ausgangsgrösse für die Berechnung ist das Quellspektrum im Tunnel. Aufgrund von Messungen an einem „repräsentativen“ Punkt im Tunnel (was immer man auch hier unter repräsentativ verstehen mag) würden Zugdurchfahrten gemessen und daraus eine Mittelwert-Quellspektrum gebildet, welches dann als Quellspektrum verwendet wird. Die Abminderung zwischen dem Tunnel und dem Frei-Feld-Punkt neben dem Gebäude wird durch das Transferspektrum Tunnel → Freifeld definiert. Der Ankopplungseffekt bewirkt, dass die mittleren Frequenzen d.h. die Frequenzen zwischen 10 und 100 Hz, abgeschwächt werden, was durch das Ankopplungstransferspektrum berücksichtigt wird. Die Eigenschwingung der Geschossdecke wiederum bewirkt eine Verstärkung im Bereich der Eigenfrequenz der Geschossdecke, was durch das Transferspektrum zwischen Fundament und Geschossdecke erfasst wird.

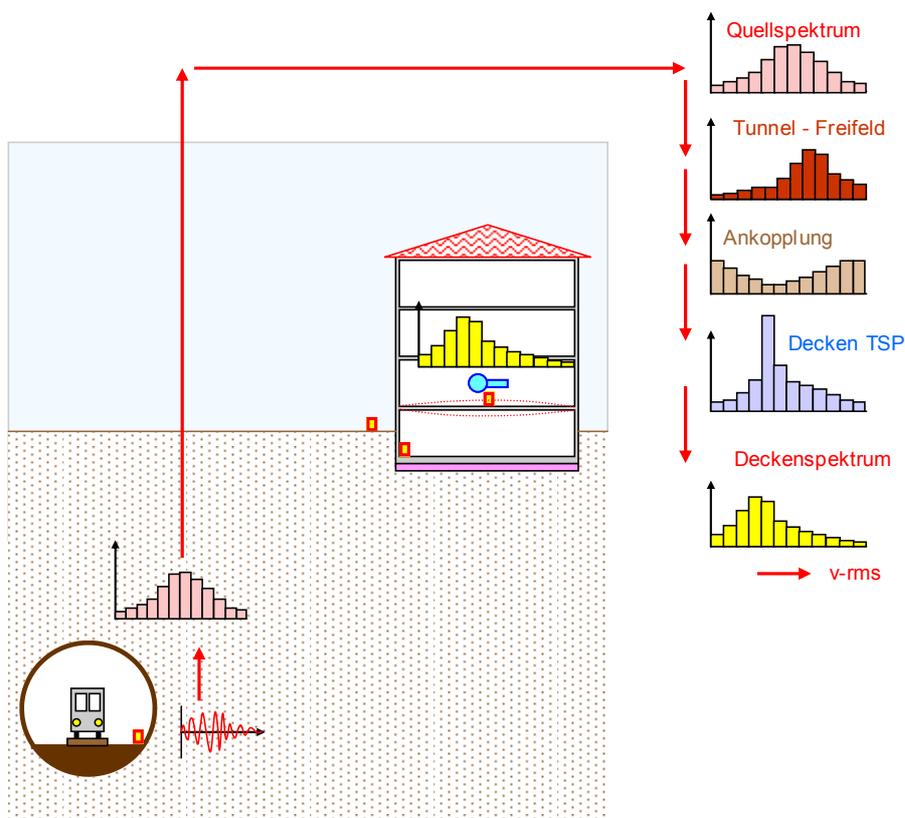


Bild 2.1 Schematischer Ablauf der Immissionsberechnung nach VIBRA-2

Durch Multiplikation des Quellspektrums mit allen erforderlichen Transferspektren erhalten wir schliesslich das gesuchte Deckenspektrum. Damit haben wir zwar noch nicht das Erschütterungssignal auf der Geschossdecke aber wir können den RSS-Wert (RSS = Root of the Sum of the Squared values) des Deckenspektrums bilden, der wiederum dem RMS-Wert (RMS = Root of the Mean of the Squared values) des Erschütterungssignals entspricht. Aufgrund des RMS-Wertes können wir die gesuchten charakteristischen Grössen wie v_{\max} , KB_{FT_r} oder K-Wert berechnen.

Das gewählte Vorgehen ist bis zur Berechnung des RMS-Wertes mathematisch exakt. Die Berechnung der übrigen charakteristischen Grössen wie v_{\max} , KB_{FT_r} oder K-Wert ist allerdings nur eine Approximation. Sie basiert auf der Annahme, dass die Korrelationen zwischen den charakteristischen Grössen, wie wir sie neben dem Gleis bestimmen, auch im Gebäude gelten. Umfangreiche statistische Untersuchungen zeigen, dass der hier eingeführte Fehler im Bereich von 5 bis 10 % liegt und somit neben den übrigen Unsicherheiten nicht ins Gewicht fällt.

Um den Körperschall zu berechnen, wird das Verfahren weitergeführt mit einem Transferspektrum zwischen der Erschütterung auf der Geschossdecke und dem Schalldruck im Raum. Dieses Transferspektrum stellt die Beziehung zwischen der Schwinggeschwindigkeit und dem Schalldruck her und hat die Einheiten [Pa / (mm/s)]. Wir erhalten auf diese Weise das unbewertete Schalldruck-Spektrum und können – mit Hilfe der A-Bewertung und der Summation der einzelnen Terzbänder – den bewerteten Schallpegel bestimmen.

Es ist zu beachten, dass dieser letzte Schritt des Transferspektren-Modells „nur“ eine Approximation darstellt, da der Körperschall nicht durch die Schwingung des Fussbodens allein erzeugt wird, sondern auch durch die Schwingungen der Zimmerdecke und der Wände. Deren Schwingverhalten wird bei diesem Vorgehen nicht explizit berücksichtigt.

Dieses „Ideale Modell“ lässt sich allerdings in der Realität nicht ohne weiteres einsetzen, denn manche der benötigten Daten sind einfach nicht vorhanden. Das grösste Problem stellt die Beschaffung eines realistischen Quellspektrums im Tunnel dar. Die Wahl des Referenzpunktes im Tunnel spielt hier eine entscheidende Rolle. Wir wissen nicht, ob das Quellspektrum aus Messungen neben dem Gleis, auf dem Bankett oder in der Tunnelwand gewonnen werden soll. Wie wir weiter unten noch sehen werden, ergeben sich je nach gewähltem Messpunkt ganz unterschiedliche Ergebnisse. Für das Transferspektrum zwischen Tunnel und Oberfläche spielt die Wahl des Referenzpunktes allerdings eine entscheidende Rolle. Das Modell, wie es in Bild 2.1 dargestellt ist, dürfte deshalb kaum realisierbar sein.

3 Ein „realistisches“ Prognose-Modell

3.1 Immissionsprognose in der Projektierungsphase

Im Rahmen der Projektierung des Weinbergtunnels wurde durch ZC eine Immissionsprognose für die Gebäude über dem Weinbergtunnel erstellt. Da zu diesem Zeitpunkt die Tunnelröhre des Weinbergtunnels natürlich noch nicht existierte, wurde für die damalige Prognoserechnung das Quellspektrum vom praktisch identischen – bereits existierenden – Zürichberg-Tunnel übernommen. Als Quellpunkt wurde allerdings nicht ein Punkt im Tunnel sondern ein Frei-Feld-Messpunkt über dem Zürichberg-Tunnel mit einer Überlagerung von 25 m gewählt. Das Quellspektrum wurde als Mittelwert-Spektrum von 200 Zugdurchfahrten gebildet. Mit diesem Quellspektrum wurden, durch sukzessive Multiplikation mit den verschiedenen Transferspektren des Übertragungsweges, die Erschütterungs- und - Körperschallspektren an den Immissionspunkten berechnet.

Es ist zu beachten, dass bei diesem Vorgehen nicht die Erschütterung im Tunnel selbst, sondern die Erschütterung an der Oberfläche über dem Tunnel verwendet wird, d.h. die Prognose folgt – wie in Bild 3.1 schematisch dargestellt – nicht dem blauen Pfad, sondern dem roten Pfad. Der Einfluss unterschiedlicher Überdeckungen wurde durch ein empirisches frequenzabhängiges Abstandgesetz berücksichtigt.

Die Wahl des Referenzpunktes an der Oberfläche über einem Tunnel mag zwar im ersten Moment erstaunen, doch entspricht es der gleichen Logik, wie die Wahl des Referenzpunktes bei Eisenbahnlinien an der Oberfläche. Auch hier wählen wir den Referenzpunkt für das Quellspektrum nicht unmittelbar neben dem Gleis oder sogar auf einer Schwelle, sondern in einem Abstand von 8 oder 16 m, wo lokale Einflüsse nicht mehr stören.

gleich stark ist wie die Erschütterung im danebenliegenden Tunnel bei der Durchfahrt eines realen Zuges. Diese Kalibration müsste vom Betreiber des VIBRO-SCAN vorgängig durchgeführt werden.

Bei der zweiten Methode werden zur Kalibrierung der VIBRO-SCAN-Anregung Erschütterungsmessungen von einem bestehenden Tunnel verwendet. Da das Quellspektrum aus dem bestehenden Tunnel von einer Linienquelle stammt, während der dynamische Erreger eine Punktquelle darstellt, muss dieses Quellspektrum allerdings noch modifiziert werden.

Für die Herleitung dieser „Modifikation“ lässt sich das in Bild 3.2a bis c dargestellte Gedankenmodell verwenden: Der Zug besteht aus einer grösseren Anzahl gleichartiger Wagen, die über die Räder Erschütterungen an den Tunnel abgeben (Bild 3.2a). Dieser fahrende Zug kann durch stationäre dynamische Erreger ersetzt werden, welche die gleiche Anregung erzeugen wie der fahrende Zug. Für das Gebäude ändert sich dadurch nichts. Wird jedoch nur ein dynamischer Erreger eingesetzt, so muss dessen Erregerkraft um einen gewissen Faktor erhöht werden, um im Gebäude über dem Tunnel die gleiche Erschütterung zu erzielen wie der fahrende Zug.

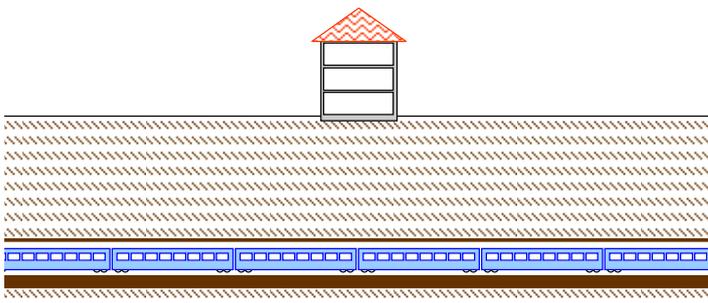


Bild 3.2a Realer fahrender Zug in einem Tunnel mit $n + 1$ Wagen

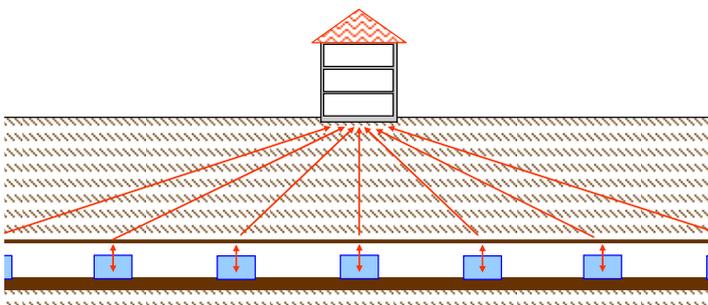


Bild 3.2b Ersatzanregung durch n stationäre dynamische Erreger

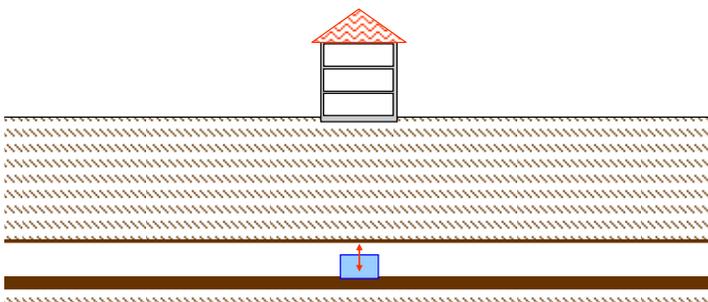


Bild 3.2c Ersatzanregung durch einen stationären dynamischen Erreger

Für die Berechnung dieses Faktors sind folgende Gesetzmässigkeiten zu berücksichtigen:

- Abminderung der Schwingungsamplituden von Raumwellen bei Punktquellen nach der Formel:

$$v = v_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{n(f)} \quad (3.1)$$

- Überlagerung von mehreren nicht-synchronen Erschütterungsquellen nach der Formel:

$$v_{tot} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2} \quad (3.2)$$

Im Folgenden sind diese Gesetzmässigkeiten für eine Wagenlänge von 25 m dargestellt. Bild 3.3 zeigt der Zuwachs der Erschütterung bei zunehmender Anzahl Wagen für verschiedene Überlagerungshöhen für einen Abminderungsexponenten von $m = 1.5$. Daraus können wir entnehmen, dass bei einer Überlagerung von 30 m die Berücksichtigung von 3 Wagen bereits ausreicht und dass gegenüber der Punktquelle eine Verstärkung von etwa 1.5 einzuführen ist.

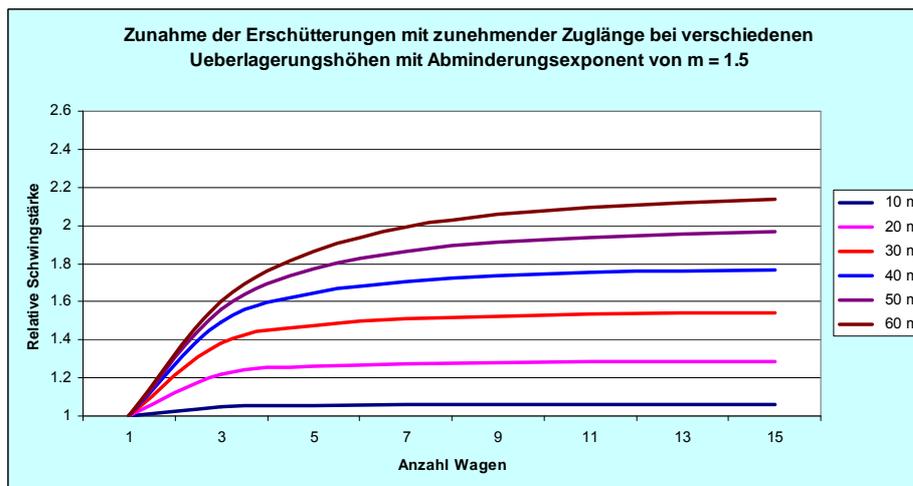


Bild 3.3 Zuwachs der Erschütterung bei zunehmender Anzahl Wagen für verschiedene Überlagerungshöhen für einen Abminderungsexponenten von $m = 1.5$

Bild 3.4 zeigt den Einfluss des Abminderungsexponenten. Je kleiner dieser Exponent ist, desto mehr Wagen müssen berücksichtigt werden und desto höher ist der Verstärkungsfaktor gegenüber der Punktquelle. Da der Hauptteil der Erschütterungsenergie im Tunnel bei 60 Hz liegt und in diesem Frequenzbereich ein Abminderungsexponent von 1.5 als realistisch angenommen werden kann, ist der bereits oben erwähnte Verstärkungsfaktor von 1.5 für die Erschütterung als Gesamtes sicher gerechtfertigt. Für die einzelnen Terzbänder jedoch sind unterschiedliche Verstärkungsfaktoren angebracht.

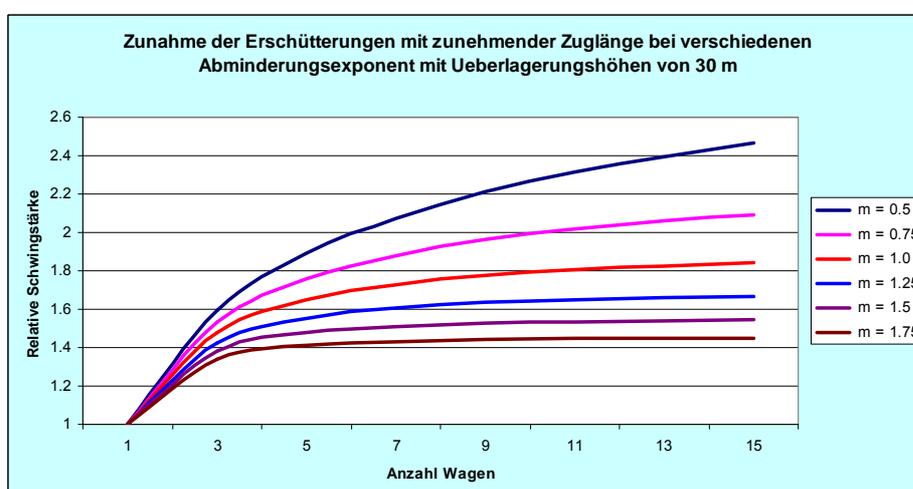


Bild 3.4 Zuwachs der Erschütterung bei zunehmender Anzahl Wagen für verschiedene Überlagerungshöhen für einen Abminderungsexponenten von $m = 1.5$

Aufgrund dieser Überlegungen kommt man zum Schluss, dass eine Punktquelle mit einem Faktor von 1.5 bis 1.8 verstärkt werden muss, um eine Linienquelle realistisch zu simulieren.

4 Messungen im bestehenden Eisenbahntunnel

Für die Simulation der Zugerschütterungen im neuen Weinbergtunnel war man – wie wir gesehen haben – auf eine realistische Definition der Anregung angewiesen. Der Weg zu dieser realistischen Definition waren Messungen im und über dem benachbarten Zürichbergtunnel, denn dieser hatte die gleiche Geologie, den gleichen Tunnelquerschnitt und auch die gleichen Zugtypen. Überdies waren die Überlagerungshöhe und die Bauweise der Gebäude durchaus vergleichbar. In Bild 4.1 sind die Positionen der Messpunkte im Tunnel und die Lage der Gebäude dargestellt.

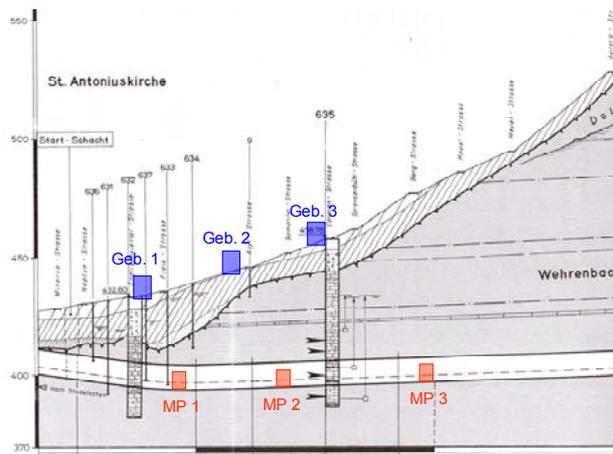


Bild 4.1 Positionen der Messpunkte im Längsschnitt

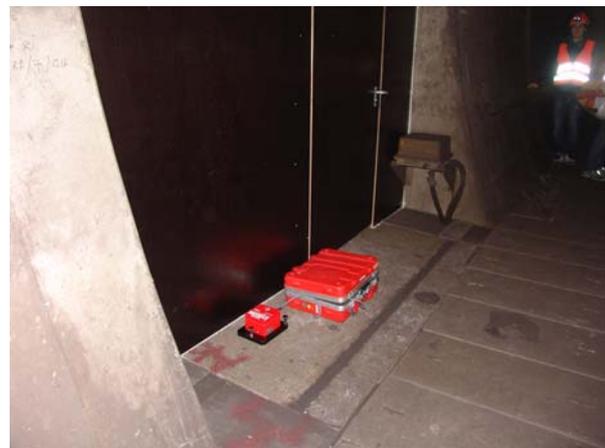


Bild 4.2 Messpunkt MP 3 auf der Schwelle zur Trafonische

Bild 4.3 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen zusammen mit dem Abminderungsmodell in VIBRA-1. Die blaue und die rote Linie stellen den in VIBRA-1 verwendeten mittleren RMS-Wert der Schwinggeschwindigkeit für Reisezüge mit 80 km/h mit und ohne Weiche dar, die Punkte die Mittelwerte der Messungen. Als Distanz wurde die Distanz zwischen Tunnelmitte und Messpunkt gewählt.

Die Messungen im Frei-Feld (MP 1c, MP 2c und MP 3c) weisen konsistente Ergebnisse auf: Die Messpunkte MP 1c und MP 3c liegen auf der blauen Linie während der Messpunkt MP 2c, der über einer Weiche liegt, auf der roten Linie liegt. Bei den Messungen im Tunnel waren die Ergebnisse nicht konsistent. Obwohl alle drei Messpunkte in identisch gestalteten Nischen platziert waren, ergaben sich recht widersprüchliche Ergebnisse. Beim Messpunkt MP 3 stimmten die Ergebnisse recht gut mit dem Modell von VIBRA-1 überein, bei den Messpunkten MP 1 und MP 2 lagen die Werte wesentlich tiefer.

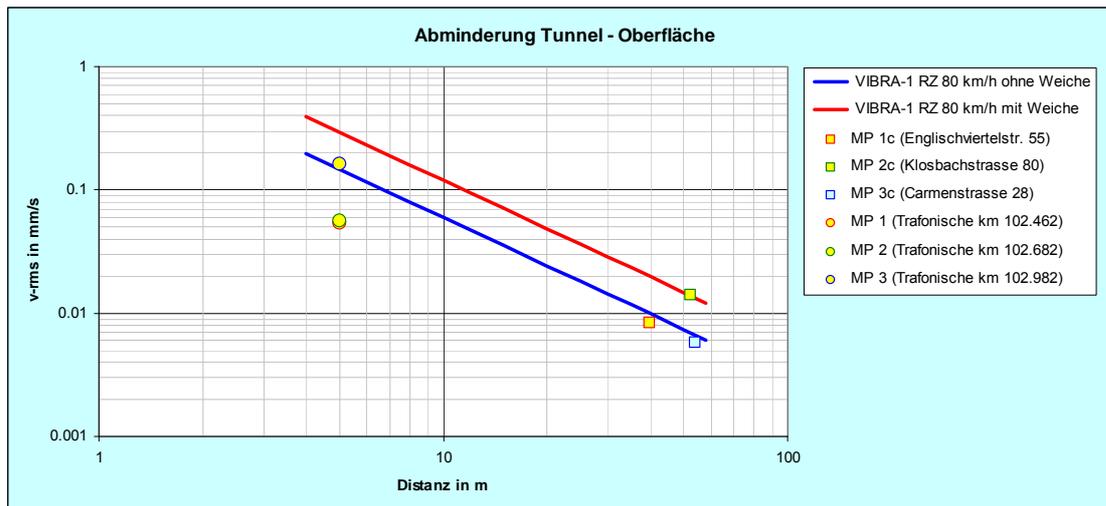
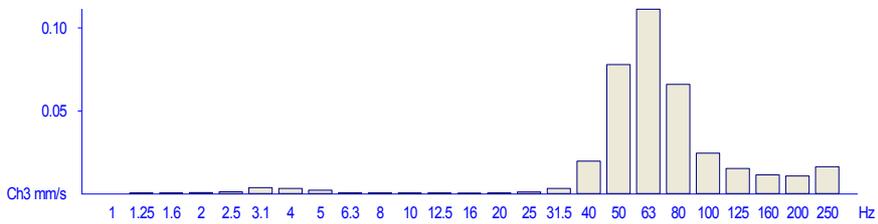


Bild 4.3 Vergleich der Messdaten mit dem Abminderungsmodell in VIBRA-1

Als Grundlage für die Definition der Anregungsstärke mit VIBRO-SCAN wurden deshalb die Daten des Messpunktes MP 3 als geeignet erachtet. Aus diesen Messungen ergeben sich die in Tabelle 4.1 zusammengestellten charakteristischen Grössen.

Tab. 4.1 Charakteristische Grössen für die künstliche Anregung im Weinbergtunnel

Parameter	Wert	Variationskoeffizient																																																					
Mittelwert von v_{max}	1.6 mm/s	0.58																																																					
Mittelwert von v_{rms}	0.16 mm/s	0.42																																																					
Dauer	13 sec	0.43																																																					
Terzspektrum																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency Hz</th> <th>Chan 3 / Z mm/s</th> <th>Frequency Hz</th> <th>Chan 3 / Z mm/s</th> <th>Frequency Hz</th> <th>Chan 3 / Z mm/s</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.0003487</td> <td>6.3</td> <td>0.0008733</td> <td>50</td> <td>0.0779200</td> </tr> <tr> <td>1.25</td> <td>0.0007430</td> <td>8</td> <td>0.0007662</td> <td>63</td> <td>0.1112000</td> </tr> <tr> <td>1.6</td> <td>0.0006766</td> <td>10</td> <td>0.0005948</td> <td>80</td> <td>0.0660300</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.0009109</td> <td>12.5</td> <td>0.0006196</td> <td>100</td> <td>0.0246600</td> </tr> <tr> <td>2.5</td> <td>0.0014410</td> <td>20</td> <td>0.0007026</td> <td>125</td> <td>0.0153500</td> </tr> <tr> <td>3.1</td> <td>0.0039440</td> <td>25</td> <td>0.0012970</td> <td>160</td> <td>0.0115800</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>0.0033500</td> <td>31.5</td> <td>0.0033380</td> <td>200</td> <td>0.0108800</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>0.0022830</td> <td>40</td> <td>0.0198200</td> <td>250</td> <td>0.0164500</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s	Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s	Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s	1	0.0003487	6.3	0.0008733	50	0.0779200	1.25	0.0007430	8	0.0007662	63	0.1112000	1.6	0.0006766	10	0.0005948	80	0.0660300	2	0.0009109	12.5	0.0006196	100	0.0246600	2.5	0.0014410	20	0.0007026	125	0.0153500	3.1	0.0039440	25	0.0012970	160	0.0115800	4	0.0033500	31.5	0.0033380	200	0.0108800	5	0.0022830	40	0.0198200	250	0.0164500
Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s	Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s	Frequency Hz	Chan 3 / Z mm/s																																																		
1	0.0003487	6.3	0.0008733	50	0.0779200																																																		
1.25	0.0007430	8	0.0007662	63	0.1112000																																																		
1.6	0.0006766	10	0.0005948	80	0.0660300																																																		
2	0.0009109	12.5	0.0006196	100	0.0246600																																																		
2.5	0.0014410	20	0.0007026	125	0.0153500																																																		
3.1	0.0039440	25	0.0012970	160	0.0115800																																																		
4	0.0033500	31.5	0.0033380	200	0.0108800																																																		
5	0.0022830	40	0.0198200	250	0.0164500																																																		

5 Simulation mit VIBRO-SCAN im Weinbergtunnel

Nach der Fertigstellung des Rohbaus für den Weinbergtunnel wurden – zur Überprüfung der Annahmen in den Immissionsberechnungen – Erschütterungsmessungen mit künstlicher Erschütterungsanregung durchgeführt. In 20 Gebäuden sollten die von VIBRO-SCAN erzeugten Erschütterungen gemessen werden. Für eine solche Messkampagne, die ja unter enormem Zeit-

druck stattfindet, ist die Planungsphase der wichtigste und auch der aufwändigste Teil der Übung.

5.1 Planung

Bei der Planung der Messkampagne stand *eine* Randbedingung von Anfang an fest:

- Für die Durchführung der Messungen stehen nur die zwei letzten Tage vor Weihnachten zur Verfügung. Eine Verschiebung oder Verlängerung war absolut ausgeschlossen.

Die Konsequenzen aus dieser Randbedingung waren Folgende:

1. Es musste ein vollautomatisch arbeitendes Mess-System eingesetzt werden. Die Aufgabe des betreuenden Personals hat während der Messung nicht in der Bedienung der Messgeräte zu bestehen sondern lediglich in deren Kontrolle.
2. Es musste ein 100 % zuverlässiges und bestens bewährtes Mess-System verwendet werden. Neue Technologien oder „raffinierte“ Kommunikationsmittel waren nicht gefragt.
3. Der Messablauf war so zu konzipieren, dass alle Messungen in einem Tag durchgeführt werden konnten, sodass - für den zwar unwahrscheinlichen Fall einer Panne - noch genügend Reservezeit zu Verfügung stand.

Als optimale Lösung für diese Messaufgabe bot sich die Verwendung von 20 autonom arbeitenden Mess-Stationen mit GSM-Kommunikation an. Für jedes Gebäude wurde eine Mess-Station MR2002 mit Massenspeicher und mit GSM-Modul installiert. Die GSM-Module bildeten keinen essentiellen Bestandteil der Messung. Sie gaben nur die Möglichkeit zu kontrollieren, ob alles richtig abläuft. Jede Mess-Station war so programmiert, dass sie alle 20 Minuten während 90 Sekunden aufzeichnet. Eine ebenso programmierte Mess-Station wurde im Tunnel eingesetzt und eine weitere wurde - quasi als Taktgeber - dem Maschinisten auf dem VIBRO-SCAN mitgegeben. Somit wusste der Maschinist auf dem VIBRO-SCAN, dass er alle 20 Minuten ein Fenster von 90 Sekunden zur Verfügung hat, um die Erschütterungsanregung durchzuführen und dass in diesem Zeitfenster alle Mess-Stationen die Erschütterungen aufzeichnen. Eine gelbe Leuchte auf dem MR2002 zeigte ihm an, wann dieses Zeitfenster läuft.

Dieses Vorgehen hatte entscheidende Vorteile: Alle Vorbereitungsarbeiten, wie das Installieren und das Programmieren der Mess-Stationen und das Überprüfen der Funktionsweise konnte in aller Ruhe vor dem Messtag vorgenommen werden. Die Messungen in den Gebäuden liefen vollautomatisch ab, sodass die für die Messungen in den Gebäuden verantwortliche Person weitgehend entlastet war. Während den Messungen mussten die Gebäude nicht betreten werden. Die Erschütterungsanregung im Tunnel konnte nach einem starren Fahrplan ablaufen, ohne dass es zu zeitlichen Engpässen kommen konnte. Dauerte die Verschiebung des VIBRO-SCAN länger als geplant, konnte einfach das nächste Zeitfenster genutzt werden.

5.2 Erschütterungsanregung

Als Erschütterungsanregung wurde das VIBRO-SCAN.AT – Verfahren mit dem Schwingungsgenerator P23 eingesetzt. Die technischen Daten und der Vergleich mit den entsprechenden Daten eines Zuges sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1 Vergleich dynamischer Parameter Zug - Schwingungsgenerator P23

Parameter	P23	Zug
-----------	-----	-----

ungefederte Radsatzmasse/Erregermasse	3505 kg	2000-4000 kg
maximale Erregerkraft	227 kN	100 kN
belastete Fläche	2,2 m ²	2,1 m ²
Last auf Planum/Grundplatte	193 kN	ca. 140-225 kN
maximale Flächenlast	≤ 19 N/cm ²	≤ 15 N/cm ²
Frequenzband	1-250 Hz	3-230 Hz
Frequenzcharakteristik	Sweep	breitbandig



Bild 5.1 Schwingungsgenerator P23



Bild 5.2 Schwingungsgenerator P23

An jedem Erregerpunkt wurden 4 Sweeps von 20 Sekunden Dauer durchgeführt. Während diesen 20 Sekunden wurde die Anregungsfrequenz kontinuierlich von 10 Hz auf 125 Hz angehoben.

5.3 Mess-System

Für die Schwingungsmessungen wurden die Messgeräte MR2002 von SYSCOM verwendet, für die Schallmessungen der Präzisions-Schallpegelanalyzer NORSONIC NOR121. Erschütterungs- und Schallmessgerät waren gekoppelt, sodass die beiden Messungen synchron erfolgten.



Bild 5.3 Messgerät MR2002 von SYSCOM



Bild 5.4 Schallanalysator NOR121 von NORSONIC

5.4 Messanordnung

In Bild 5.5 ist die grundsätzliche Anordnung der Messpunkte dargestellt. Für spezielle Gebäude wie das Radiostudio, das Universitätsspital oder die ETH-Gebäude, war eine spezielle Konfiguration erforderlich. Auf diese Weise konnte die Ausbreitung der Erschütterung in der Tunnelröhre, die Übertragung von der Tunnelsohle zum Frei-Feld-Punkt an der Oberfläche, die Ankopp-

lung des Gebäudes an den Baugrund und die Übertragung zwischen Fundament und Geschossdecke gemessen werden.

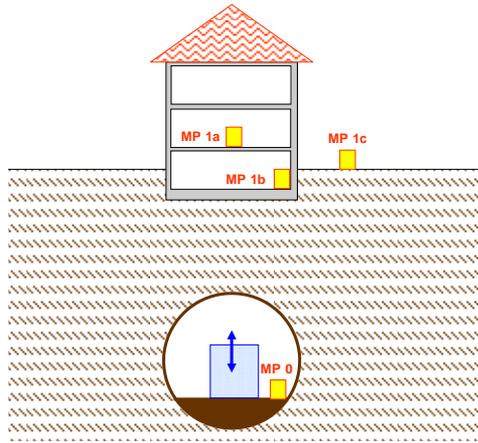


Bild 5.5 Anordnung der Messpunkte im Querschnitt



Bild 5.6 Gebäude über dem Weinbergtunnel



Bild 5.7 Fundament-Messpunkt



Bild 5.8 Frei-Feld-Messpunkt

Tabelle 5.2 enthält als Beispiel die charakteristischen Grössen aus den Messungen für das Gebäude in Bild 5.6. Wie bei Eisenbahnerschütterungen treten auch bei VIBRO-SCAN-Anregung die stärksten Erschütterungen beim Messpunkt in Mitte Fussboden auf. Die Erschütterungen auf dem Fundament sind etwa 5 mal kleiner und die Frei-Feld-Erschütterungen wiederum 2-mal grösser.

Tabelle 5.2 Charakteristische Grössen für Anregung mit VIBRO-SCAN-Sweep

Gebäudetyp:	3-geschossig / Betondecken		
Sweep:	08:40 Uhr		
Messpunkt:	MP 15a: Mitte Fussboden im EG	MP 15b: Fussboden neben Aussenmauer im 1. UG	MP 15c: Frei-Feld (Garten)
$v_{\max, \text{vertikal}}$	0.0641	0.0200	0.0241
$v_{\text{rms}, \text{vertikal}}$	0.0140	0.00293	0.00630

Bild 5.9a zeigt die 4 Sweeps à 20 Sekunden. Je nach Frequenz treten stärkere oder schwächere Verstärkungen auf. In Bild 5.9b sind die zugehörigen Terzspektren dargestellt. Man erkennt sehr gut die Verstärkung bei 31.5 Hz, die durch die Eigenfrequenz der Geschossdecke bedingt ist.

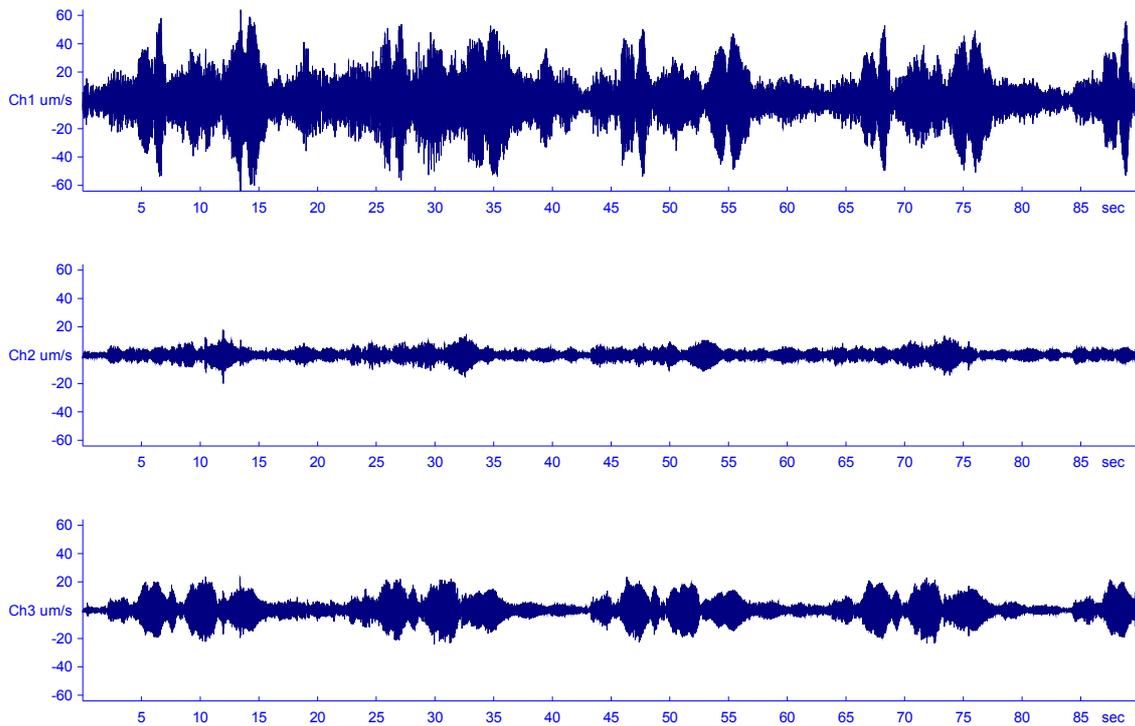


Bild 5.9a Schwingungszeitverlauf für Geschossdecke, Fundament und Frei-Feld

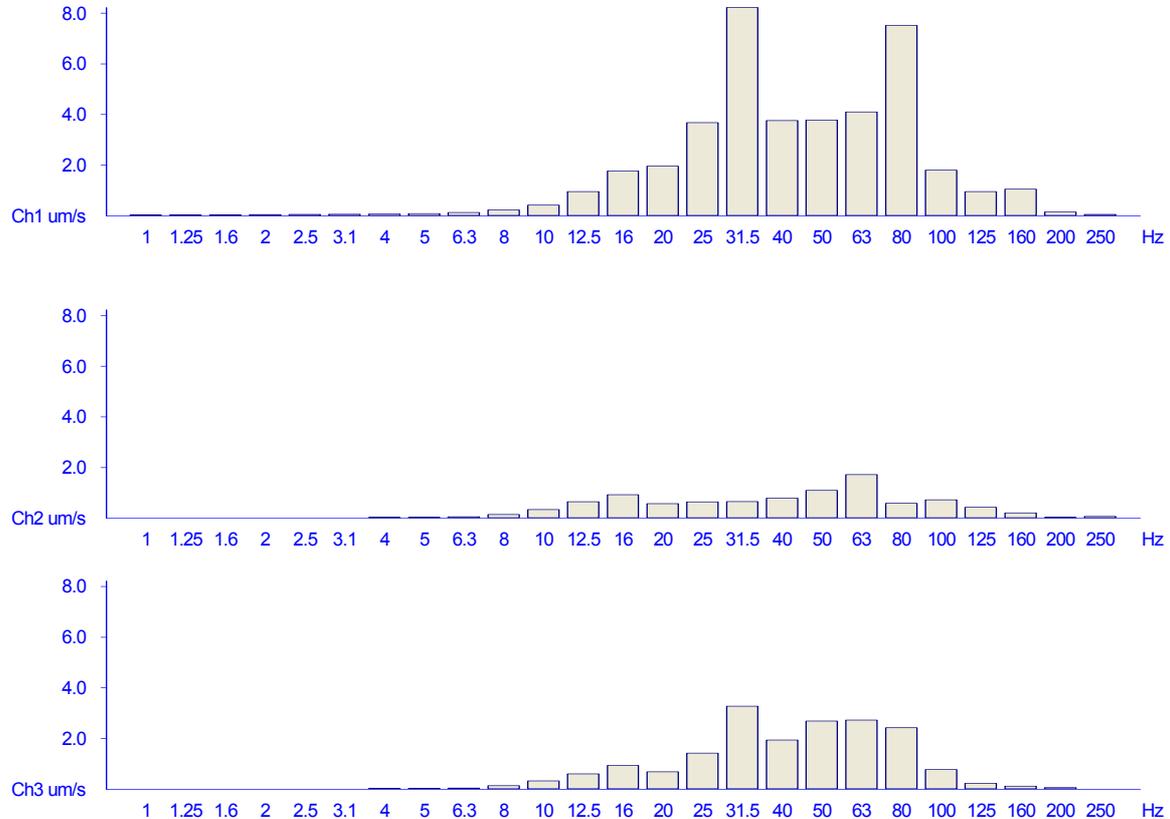


Bild 5.9b Terzbandspektrum für Geschossdecke, Fundament und Frei-Feld

5.5 Anordnung der Messpunkte im Tunnel

Für die Positionierung der Sensoren im Tunnel boten sich – wie in Bild 5.10 dargestellt – drei Möglichkeiten an: Position „Fahrbahn“, Position „Mauer“ und Position „Tübing“. In den Bildern 5.11a bis c sind diese drei Positionen dargestellt. Diese drei Positionen weisen ein sehr unterschiedliches Schwingverhalten auf. Soweit möglich wurde die Position Mauer verwendet. War dies nicht möglich, wurde die Position „Fahrbahn“ oder „Tübing“ gewählt. Bei diesen Messungen waren die Messpunkte – wie in Bild 5.12 dargestellt – in einer Linie parallel zur Tunnelachse mit den Distanzen 10 m, 30 m und 50 m vom Erregerpunkt angeordnet. Bei 4 Erregerpunkten wurden alle drei Positionen gleichzeitig gemessen, um die Korrelation zwischen den drei Messorten zu bestimmen. Bei diesen Messungen waren die Messpunkte in einem Querschnitt in einer Distanz von 10 m vom Erregerpunkt entfernt angeordnet.

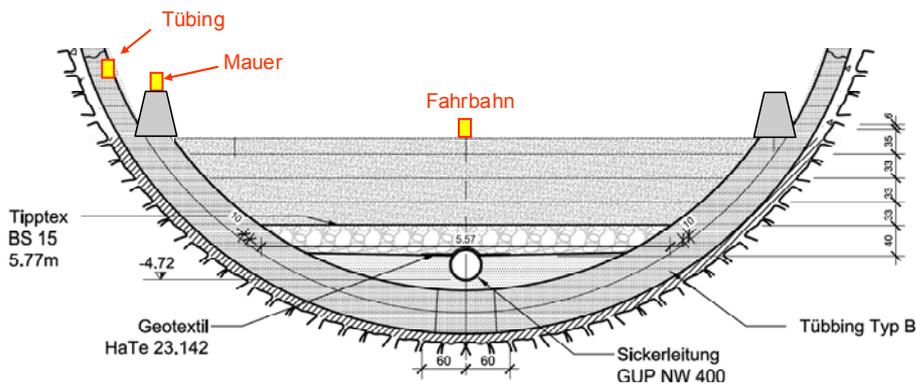


Bild 5.10 Tunnelquerschnitt mit Positionen der Sensoren



Bild 5.11a Position Mauer



Bild 5.11b Position Tübing



Bild 5.11c Position Fahrbahn

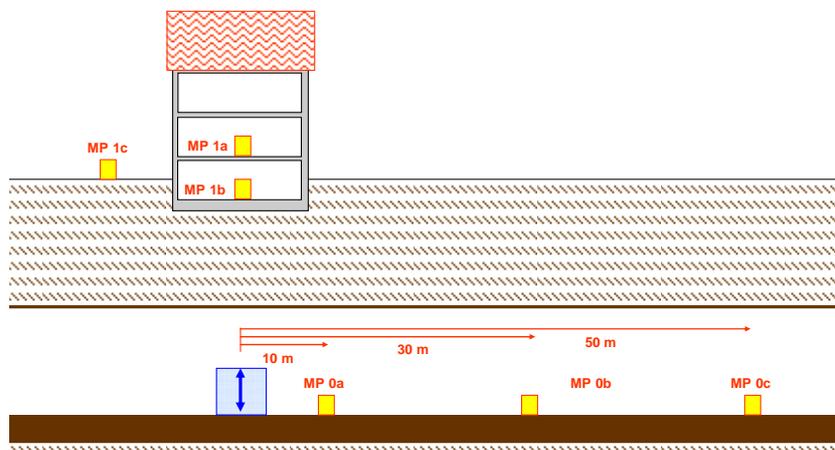


Bild 5.12 Anordnung der Messpunkte im Längsschnitt

Die Messungen zeigten, dass Schwingstärke und Frequenzgehalt sehr stark von der Wahl des Messpunktes abhängt. Die Erschütterungen beim Messpunkt „Fahrbahn“ sind etwa 10-mal höher als bei den anderen zwei Messpunkten. Es scheint sich hier um ein Resonanzphänomen des Bo-

dens in der Tunnelröhre zu handeln. Der Messpunkt „Fahrbahn“ dürfte somit für die Übertragung der Erschütterungen auf den umgebenden Boden bzw. Fels nicht relevant sein. Zwischen Position „Mauer“ und „Tübing“ sind die Unterschiede nicht sehr gross.

Bild 5.13a zeigt die Aufzeichnung der Anregung beim Erregerpunkt EP 2. Sie besteht aus 4 Sweeps von 20 Sekunden Dauer mit Frequenzen von 10 bis 125 Hz. Die drei Signale zeigen die Erschütterungen an den drei Positionen „Tübing“, „Mauer“ und „Fahrbahn“. Das dritte Signal von Bild 5.13a, d.h. die Messung auf der Fahrbahn, zeigt sehr gut die Verstärkung in einem schmalen Frequenzband, die durch den Resonanzeffekt zustande kommt. Bei den Messpunkten „Mauer“ und „Tübing“ tritt dieser Effekt nicht auf.

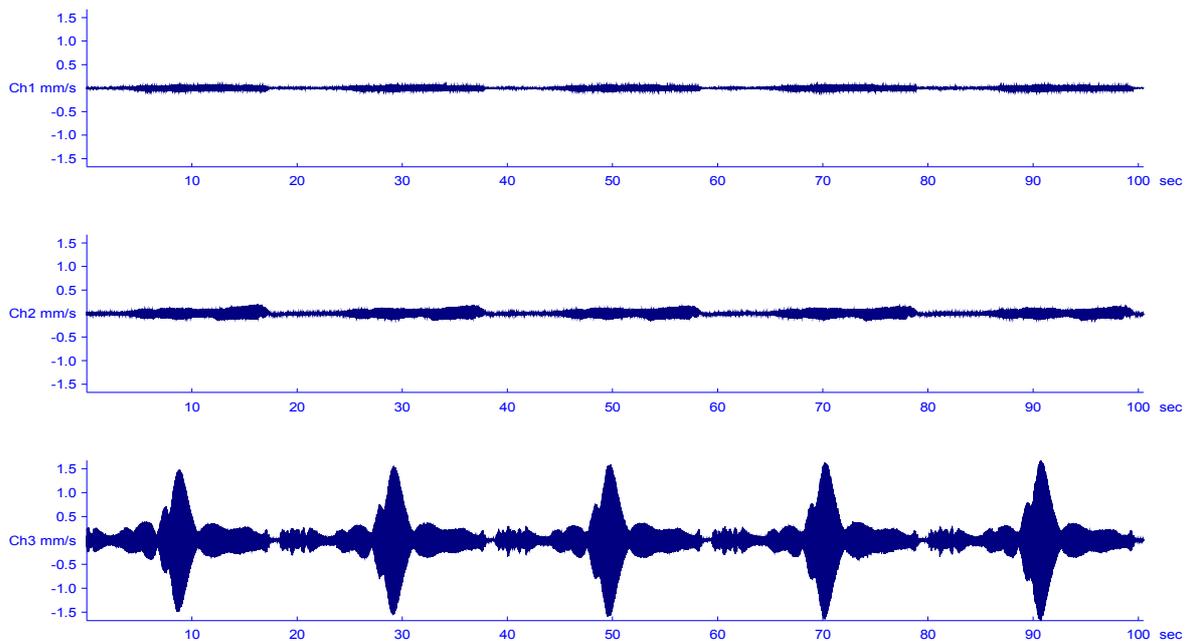


Bild 5.13a Aufzeichnung einer Gruppe von 4 Sweeps an den Messpunkten MP 2a, MP 2b und MP 2c (Tübing, Mauer, Fahrbahn).

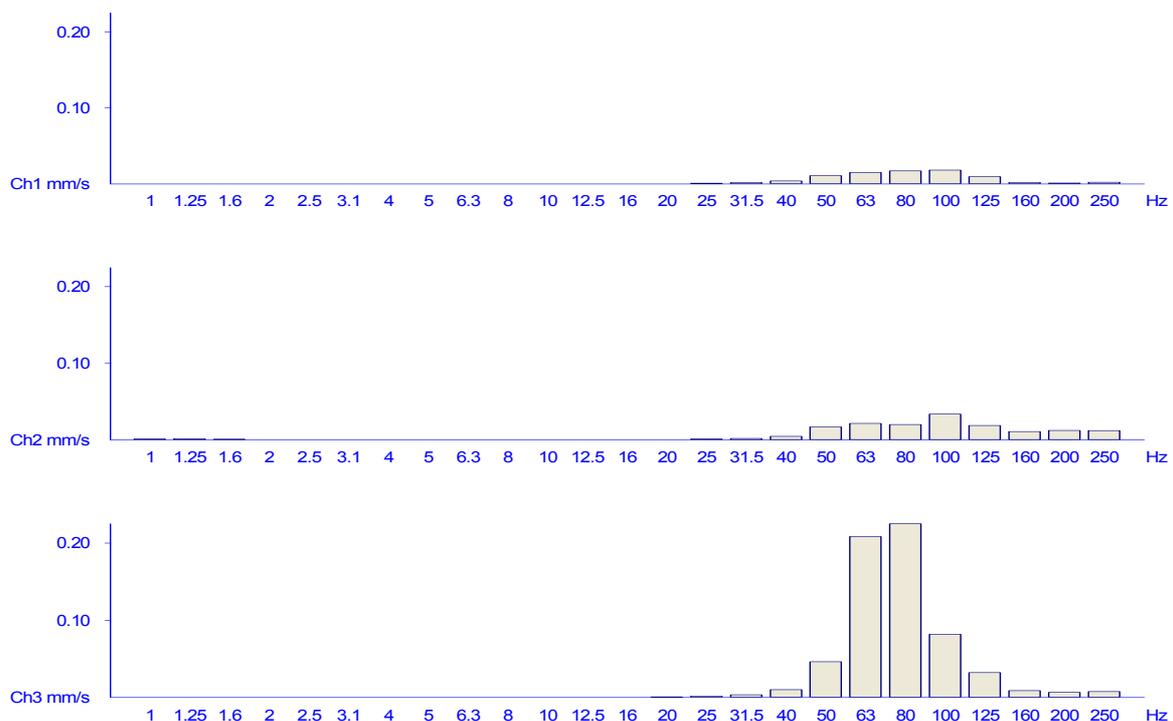


Bild 5.13b Terzbandspektren für die Aufzeichnungen in Bild 5.13a (Messpunkte MP 2a, MP 2b und MP 2c).

6 Auswertung der VIBRO-SCAN-Messungen

Die wichtigste Voraussetzung für eine korrekte Auswertung der VIBRO-SCAN-Simulation ist – wie bereits erwähnt – dass die Anregungsstärke und der Frequenzgehalt wirklich der Anregung eines Zuges entspricht, der später einmal durch diesen Tunnel fahren wird. Zur Überprüfung der Richtigkeit der Anregung durch VIBRO-SCAN standen beim Projekt Weinbergtunnel drei Möglichkeiten zur Verfügung:

- Der Spektral-Vergleich mit den Messungen im Zürichbergtunnel
- Der Spektral-Vergleich mit den Messungen über dem Zürichbergtunnel
- Der Amplituden-Vergleich mit den Messungen über dem Zürichbergtunnel.

In Bild 6.1 sind die Terzspektren im Weinbergtunnel mit den Messungen im Zürichbergtunnel verglichen. Die von VIBRO-SCAN erzeugten Terz-Spektren stimmen zwar recht gut mit den Spektren der Messpunkte MP 1 und MP 2 im Zürichbergtunnel überein. Doch die Amplituden des Messpunktes MP 3 sind wesentlich höher. Dabei war ausgerechnet der Messpunkt MP 3 der Messpunkt, der am besten mit dem VIBRA-1-Modell kompatibel war. Somit hilft uns dieser Vergleich nicht viel weiter. Das einzige, was aus diesem Vergleich mit Sicherheit entnommen werden kann, ist dass die Anregung mit VIBRO-SCAN zu starke hochfrequente Anteile aufweist. Im Zürichbergtunnel liegen die dominanten Frequenzen zwischen 50 und 80 Hz mit einem Maximum bei 63 Hz während die VIBRO-SCAN-Anregung ihre dominanten Frequenzen zwischen 50 und 125 Hz hat mit einem Maximum bei 100 Hz.

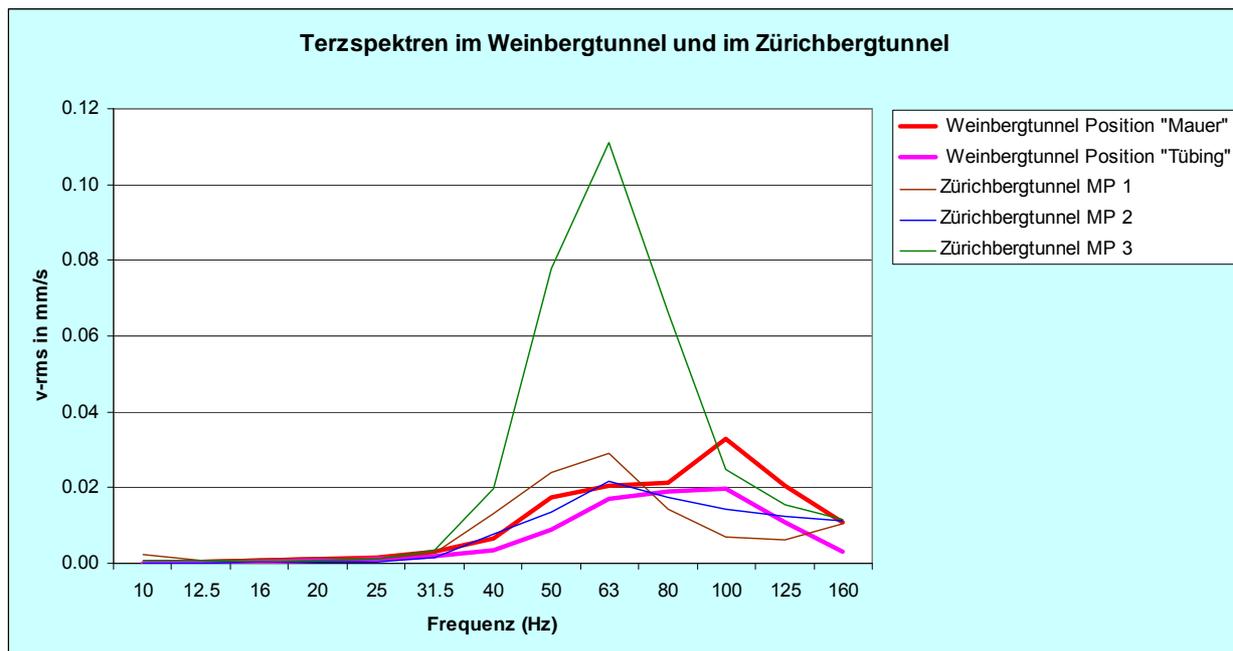


Bild 6.1 Vergleich der Terzspektren im Weinbergtunnel und im Zürichbergtunnel

Bild 6.2 zeigt den Vergleich zwischen den Frei-Feld-Spektren über dem Weinbergtunnel und den Frei-Feld-Spektren über dem Zürichbergtunnel. Der Vergleich zeigt, dass die Anregung durch VIBRO-SCAN breitbandiger ist und – wie bereits aufgrund der Messungen im Tunnel festgestellt – insbesondere im Frequenzband von 100 Hz zu viel Energie hat.

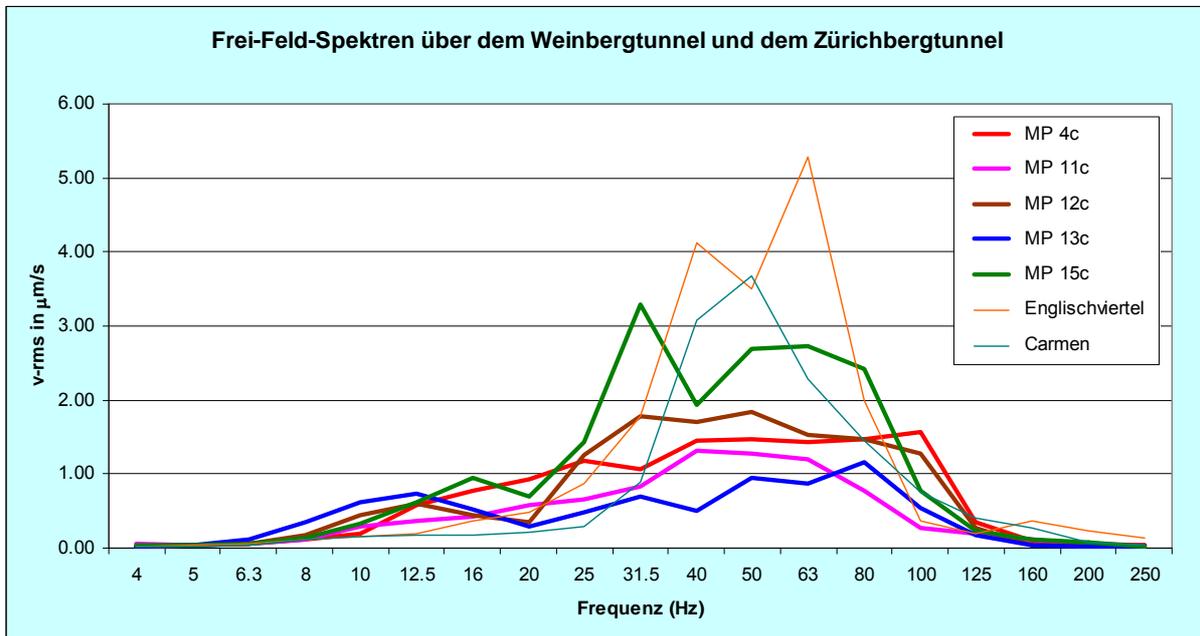


Bild 6.2 Frei-Feld-Spektren über dem Weinbergtunnel und dem Zürichbergtunnel

In Bild 6.3 sind – als runde Symbole – die Messwerte für die Frei-Feld-Messpunkte über dem Weinbergtunnel in Funktion der Distanz von der Tunnelröhre dargestellt. Zum Vergleich sind – als Quadrate – die Messwerte aus den Messungen beim Zürichbergtunnel eingezeichnet. Die blaue Linie stellt das im VIBRA-1-Modell verwendete Abminderungsgesetz mit $v_{8m} = 0.08$ mm/s und $m = 1.3$ dar. Dieser Vergleich zeigt, dass die Anregung im Weinbergtunnel mit VIBRO-SCAN etwa um einen Faktor 1.6 tiefer ist als die Anregung durch die Züge im Zürichbergtunnel.

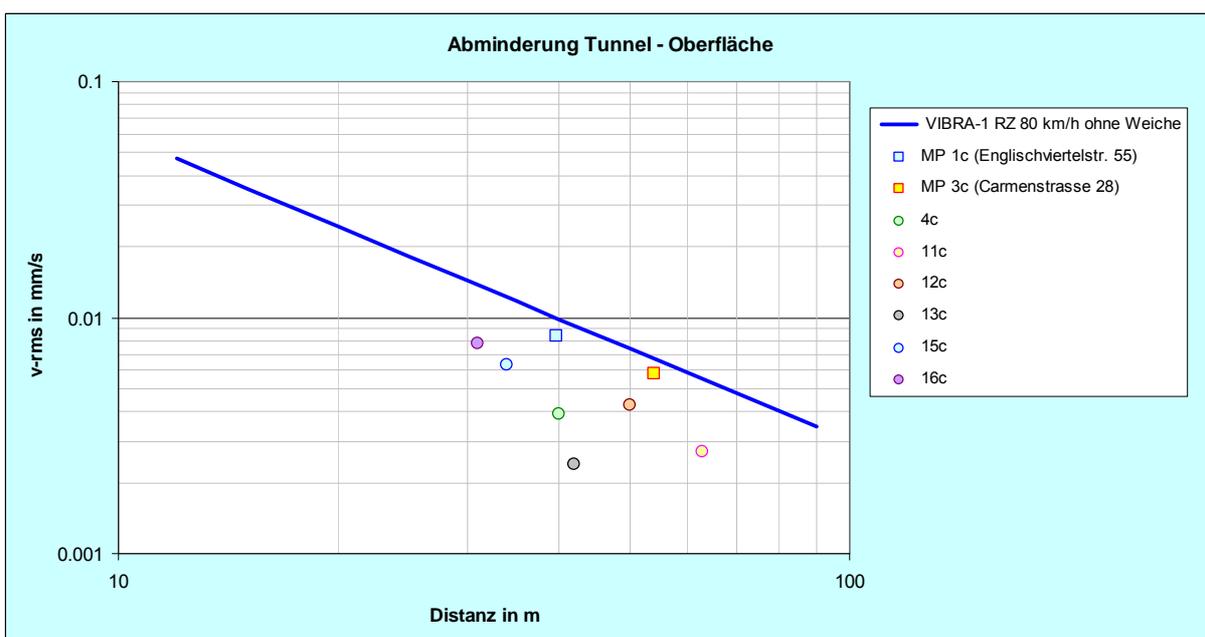


Bild 6.3 Frei-Feld-Messpunkte in Funktion der Distanz von der Tunnelröhre

Aufgrund der durchgeführten Messungen und Auswertungen und durch den Vergleich mit den Messungen beim bestehenden Zürichbergtunnel kommt man zu folgender Beurteilung:

- Die durch VIBRO-SCAN erzeugte künstliche Anregung stellt grundsätzlich eine gute Simulation der Anregung durch Eisenbahnverkehr dar.
- Der Vergleich der Frei-Feld-Messungen über dem Weinbergtunnel (bei VIBRO-SCAN-Anregung) mit den Frei-Feld-Messungen über dem Zürichbergtunnel (bei Anregung durch Zugverkehr) zeigen eine gewisse Diskrepanz bezüglich Anregungsstärke und Frequenzgehalt.
 - Bezüglich Anregungsstärke zeigt sich, dass die VIBRO-SCAN-Anregung etwa um einen Faktor 1.6 geringer ist als die Anregung durch den Zugverkehr.
 - Hinsichtlich Frequenzgehalt weist die VIBRO-SCAN-Anregung etwas zu viel Energie in den hohen Terzbändern (100 und 125 Hz) auf.
- Für die Prognoserechnung stellen diese Abweichungen kein grundsätzliches Problem dar, da die Anregung bei der Prognoserechnung entsprechend skaliert werden kann.

7 Immissionsprognose aufgrund von VIBRO-SCAN-Messungen

Die Immissionsprognose aufgrund der VIBRO-SCAN-Messung konnte im Prinzip wiederum nach dem Verfahren von VIBRA-2 durchgeführt werden. Allerdings wurde als Quellspektrum nicht das Spektrum im Tunnel sondern die in den Gebäuden gemessenen „VIBRO-SCAN-Spektren“ verwendet. Diese mussten allerdings – da ja Frequenzgehalt und Amplitude nicht ganz stimmen – angepasst werden.

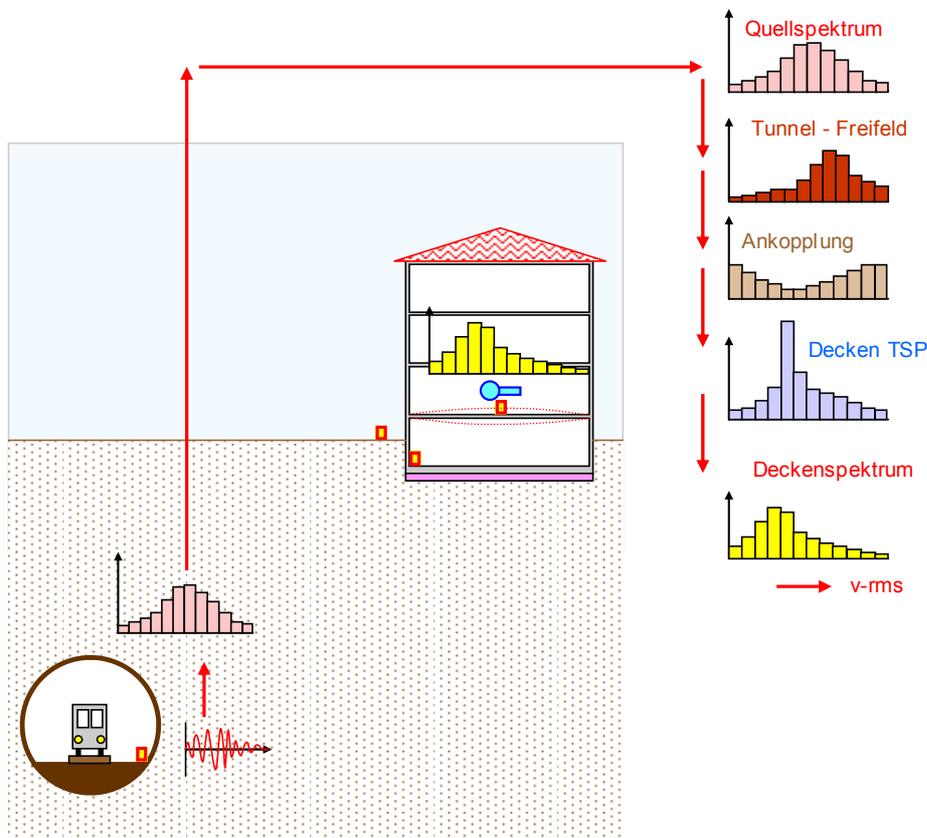


Bild 7.1 Immissionsberechnung nach VIBRA-2

In Bild 7.2 ist die erforderliche Skalierung dargestellt. Bei dieser Skalierung wird der Anteil der höheren Frequenzen (Terzband 100 und 125 Hz) reduziert und der Anteil der tieferen Frequenzen zwischen 10 und 80 Hz um einen Faktor 1.6 erhöht.

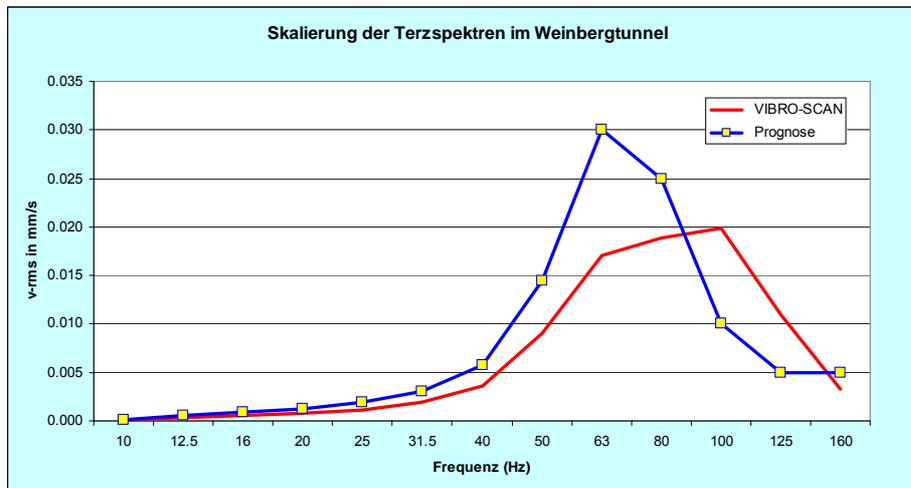


Fig. 7.2 Skalierung der Terzspektren im Weinbergtunnel

Als Beispiel ist in Bild 7.3 die Prognose für den Körperschall im Auditorium D 7.1 der ETH dargestellt. Die hellgrünen Säulen stellen das gemessene Spektrum dar, die dunkelgrünen das skalierte Spektrum. Durch die Skalierung nach Bild 7.2 werden die höheren Frequenzen reduziert und die tieferen verstärkt.

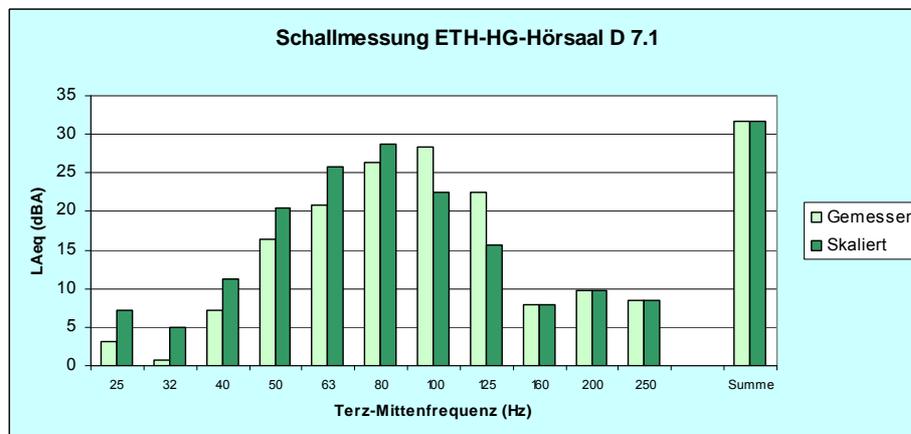


Bild 7.3 Terzbandspektrum (gemessen und skaliert) für ETH-HG-Hörsaal D 7.1

8 Schlussbemerkungen

Die Durchführung einer VIBRO-SCAN-Messkampagne für einen Eisenbahntunnel ist ein sehr anspruchsvolles Unterfangen. Der Umfang der Messaufgabe, das Zusammenspiel der Mitarbeiter im Tunnel und an der Oberfläche und der enorme Zeitdruck stellen sehr hohe Anforderungen an alle Beteiligten. Die Messkampagne für den neuen Weinbergtunnel konnte ohne jegliche Panne durchgeführt werden. Die Aspekte, die ganz wesentlich zum Gelingen beigetragen haben, sind sicher die Folgenden:

- *Eine konservative Planung:* Mit genügend zeitlichem Vorlauf wurde das ganze Mess-System installiert, getestet und dokumentiert. 24 Stunden vor Messbeginn war die gesamte Mess-Anlage betriebsbereit.

- *Ein vollautomatisches Mess-System:* Einmal installiert, war das verwendete Mess-System für das einwandfreie Funktionieren nicht abhängig von Personen. Die Aktivitäten im Tunnel waren weitgehend unabhängig von den Aktivitäten an der Oberfläche.
- *Ein bestehender Tunnel:* Dank dem Umstand, dass bereits ein Eisenbahntunnel mit sehr ähnlichen Eigenschaften in unmittelbarer Nähe vorlag, konnten viele Informationen zum Erschütterungsverhalten durch Messungen in diesem Tunnel gewonnen werden. Dies erlaubte letzten Endes eine gute Kalibration der VIBRO-SCAN-Anregung.

Der Einsatz des VIBRO-SCAN zur Verifikation der Prognose-Rechnung und damit zur Überprüfung der gewählten Isolationsmassnahmen scheint uns eine sehr sinnvolle Methode. Bei der Beurteilung dieser Methode darf man allerdings nicht ausser acht lassen, dass diese Methode – da die „richtige“ Anregungsstärke nicht absolut vorgegeben war, sondern bezüglich Amplitude und Frequenz kalibriert werden musste – zu einem hohen Masse von den Messungen im benachbarten Zürichbergtunnel beeinflusst war. Und dieser Einfluss ist ja auch in der VIBRA-1-Prognose vorhanden gewesen.