

Vezia: Sprengvortrieb, Erschütterungen und Körperschall

1 Einführung

1.1 Ausgangszustand

Der neue Ceneri-Basistunnel (CBT) des AlpTransit-Projekts erstreckt sich auf einer Länge von etwa 15 km mit zwei Röhren (10 m Durchmesser) vom Nordportal in Vigana bis zum Südportal in Vezia.

Die Vortriebsmethode sieht Folgendes vor:

- Sprengvortrieb (SPV) für den Gegenvortrieb (erste 300 m ab Vezia-Baustelle);
- SPV für Querstollen zwischen den Röhren;
- SPV oder TBM-Vortrieb für alle übrige Streckenabschnitte.

Besonders auf der Teilstrecke von der "Linea della Valcolla" bis Vezia ist die Überdeckung sehr gering (sie reicht von etwa 20 m bis max 200 m auf einer Länge von ca. 4km) und die Trasse verläuft unter verschiedenen Dörfern (Vezia, Cureglia, Origlio, Ponte Capriasca, ..) (Bild 1).

Ausserdem kreuzen sich CBT und der Vedeggio-Cassarate-Tunnel (PTL-Tunnel) in der Nähe des Südportals in Vezia, wobei der minimale Abstand zwischen beiden Röhren in diesem Fall nur knapp 4 m beträgt.

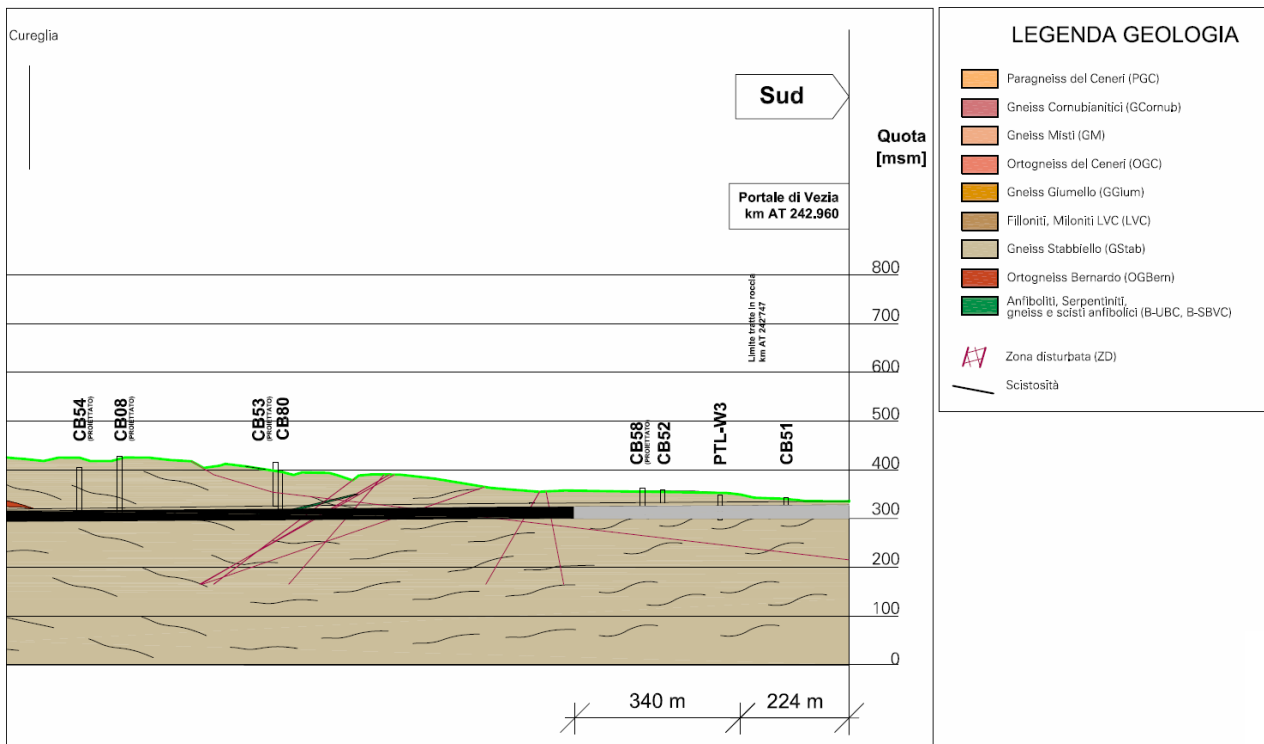


Bild 1 - Schnitt der letzten 1'800 m des CBT mit der entsprechenden geringen Überdeckung

Die vorgesehene Vortriebsmethode und die geringen Entfernungen zwischen CBT und den Wohnhäusern bzw. anderen Schutzobjekten (historische Objekte wie Denkmäler, Fresken oder Bauwerke wie der Tunnel Vedeggio-Cassarate) lassen gewisse Sorgen während der Bauphase entstehen hinsichtlich:

- Risiko von Bauschäden an Gebäuden, an Kulturobjekten und an Bauwerken;
- Störung der Bevölkerung durch Erschütterungen (ES) und insbesondere Körperschall (KS).

1.2 Fragestellungen und Ziele

Die rechnerisch ermittelten Erschütterungs- und Körperschallimmissionen sind mit hohen Unsicherheiten behaftet, welche die konkrete Anwendung dieser Prognosen erschweren. Eine korrekte Erfassung der ES- und KS-Immissionen erlaubt nämlich, gewisse Submissionsbedingungen richtig festzulegen und somit Zusatzkosten und Terminverzögerungen zu verhindern.

Somit wollte der Auftraggeber (ATG) Dank experimenteller Untersuchungen folgende Ziele erreichen:

- Die bestehenden Unsicherheiten bei der Modell-Vorhersage der ES- und KS-Immissionen deutlich zu reduzieren;
- Die Störung des KS besser zu verstehen und in den Griff zu bekommen.

Die Fragenstellungen lauteten:

- Wie nehmen, auf der kritischen Strecke des CBT, die ES- und KS-Immissionen mit der Entfernung ab?
- Wie gross ist das Risiko für Bauschäden?
- Wie gross ist die Belästigung durch KS?
- Welche Massnahmen sind sowohl zweckmässig als tragbar?

1.3 Messobjekte

Es lag nahe, diese Fragestellungen aus der Erfahrung und Dank zusätzlicher Messungen bei den Bauarbeiten des PTL-Tunnels in Vezia zu beantworten. Die Ähnlichkeiten zwischen CBT und PTL-Tunnel sind zahlreiche:

- z.T. gleiche geologische Verhältnisse (mindestens auf dem ersten Teil der Strecke);
- ähnliche Überdeckungen (jedoch im allgemeinen geringer als beim CTB, welcher ca. 4 m höher als der PTL-Tunnel verläuft);
- z.T. gleiche Bevölkerung wird betroffen (Einwohner von Vezia).

Die Messungen in Vezia hatten das Ziel, die Beziehung zwischen der ES- bzw. KS-Immissionen und Entfernung bei SPV zu untersuchen. Weitere Messungen wurden im Hagerbach-Tunnel geplant, um die Wirkung von gewissen vorgeschlagenen Massnahmen an der Quelle bei Sprengungen zu quantifizieren.

Die Ausbreitung der elastischen Wellen bei TBM-Vortrieb wurden im ATG-Tunnel in Erstfeld untersucht und mit den Resultaten in Vezia verglichen. Dort könnte auch die vom TBM-Vortrieb verursachte Störung auf Menschen besser verstanden werden. Die Auswirkung von möglichen Massnahmen an der Quellen beim TBM-Vortrieb wurden im ATG-Tunnel in Faido untersucht (Anpresskraft- und Drehzahl-Reduktion).

2 Grundlagen

2.1 Grundbegriffe

Die vom SPV oder TBM-Vortrieb verursachten mechanischen Schwingungen breiten sich im Boden aus und erleiden eine Dämpfung, welche sowohl auf dissipative Vorgänge als auch auf geometrische Gründe und auf Reflexionen/Brechungen beim Impedanzwechsel im Material zurückzuführen sind.

Die Wellen werden beim Gebäudefundament normalerweise um ca. einen Faktor 2 (oder mehr) reduziert, dann verbreiten sie sich in allen festen Teilen des Gebäudes. Die somit erzeugten Schwingungen können bei eher flexiblen Elementen wie z.B. Decken um einem Faktor 3 bis 4 verstärkt werden (aber Verstärkungen bis etwa 30 sind bei Resonanzerscheinungen durchaus möglich). In allgemeinen ist eine Verstärkung der Schwinggeschwindigkeiten zwischen einem Messpunkt auf der Bodenoberfläche, kurz ausserhalb des Gebäudes und einem anderen Messpunkt in der Mitte einer Decke zu beobachten (siehe Bild 2).

Die Schwingungen aller umhüllenden Flächen eines Raumes verursachen eine teilweise Abstrahlung von Schallwellen (für Frequenzen > 20 Hz): man spricht in diesem Fall von "abgestrahltem Körperschall".

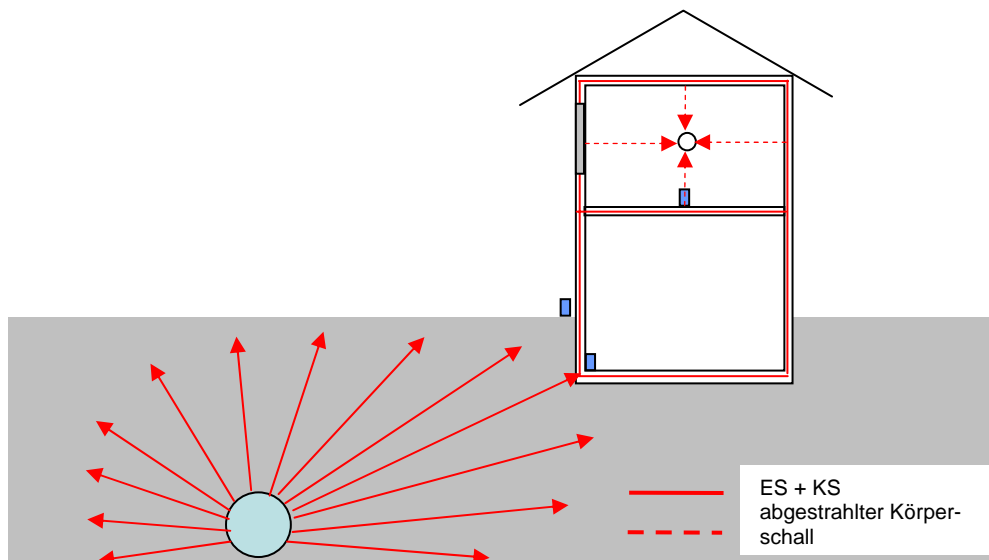


Bild 2 - Schematische Darstellung der Ausbreitung von Erschütterungen und Körperschall, von der Quelle (Tunnel) bis zum Gebäudefundament und den Wohnräumen.

2.2 Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall

Während der Bauphase kommen die Normen zur Anwendung, welche die negativen Einwirkungen (Störungen) auf Menschen und das Schadenrisiko an Gebäuden regeln.

| | | Schadenrisiko an Bauten | Störung der Bevölkerung |
|-----------------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Erschütterungen | Sprengvortrieb | VSS 640312a | DIN 4150-2 |
| | TBM-vortrieb | VSS 640312a | DIN 4150-2 |
| Abgestrahlter Körperschall | Sprengvortrieb | | - |
| | TBM-vortrieb | | SIA-Norm 181 (?) |

Bild 3 - Überblick über die in der Schweiz gültigen oder in der Praxis angewendeten Normen betreffend Erschütterungen und Körperschall.

Wie aus Bild 3 ersichtlich ist, decken die schweizerischen Normen nur das Schadenrisiko an Bauten, nicht die Störung der Bevölkerung. In diesem letzten Fall bezieht man sich in der Praxis auf die deutsche Norm DIN 4150-2. Für den abgestrahlten Körperschall fehlen weitgehend die gesetzlichen Rahmenbedingungen in der Schweiz. Es liegt jedoch nahe, mindestens im Fall der TMB-Vortrieb, sich auf die SIA-Norm 181 (2006) zu beziehen, wo die Dauergeräusche von haustechnischen Anlagen geregelt werden. Die Dauergeräusche haustechnischer Anlagen (z.B. der Lärm eines Brenners, eines Kühlaggregates oder einer Lüftungsanlage) sind z.T. (von der Wahrnehmung her) dem abgestrahlten KS einer TBM sehr ähnlich, welcher auch ein Geräusch mit tiefen Frequenzen darstellt. Man wird somit die mögliche Störung der Bevölkerung durch Anwendung dieser SIA - Norm abschätzen.

In der SIA-Norm 181 unterscheidet man zwischen Dauergeräusche, welche nur tagsüber vorhanden sind (07.00 - 19.00 Uhr), von denjenigen, welche auch teilweise nachts (19.00 - 07.00 Uhr) spürbar sind. Es gelten somit die im Bild 4 wiedergegebenen Anforderungswerte L_H für den Beurteilungspegel, $L_{r,H}$ (für die Definitionen wird auf die SIA-Norm 181 verwiesen).

| Lärmempfindlichkeit des Raumes | Anforderungswerte (Tag) (dB(A)) | Anforderungswerte (Nacht) (dB(A)) |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| gering | 38 | 33 |
| mittel | 33 | 28 |

Bild 4 - Anforderungswerte für Dauergeräusche von Haustechnische Anlagen (SIA-Norm 181, 2006)

Bemerkung: Die Norm SIA 181 wird auf Dauergeräusche angewendet, welche ohne Periodenbegrenzung vorhanden sind. Im Fall einer Tunnelbohrung dagegen dauert die Wahrnehmung der Störung der TBM nur eine begrenzte Zeit, darum wäre es denkbar, von einer geringen Lärmempfindlichkeit der Gebäuden auszugehen, um die annehmbare Störung zu beurteilen.

3 Messungen

3.1 SPV beim Tunnel Vedeggio-Cassarate in Vezia

Die Messungen in Vezia wurden in der Zeitspanne vom 8. bis zum 12. Oktober 2007 durchgeführt, haben insgesamt 9 Sprengungen nach Bauprogramm (3 in der Kalotte und 6 in der Strosse) und 6 Häuser betroffen (siehe Bild 5). Die Messungen geschahen gleichzeitig in jeweils 3 Gebäuden und erfassten die ES bei der tragenden Struktur (Schwinggesch.-Vektor, normalerweise im Keller) und in der Mitte der Decke bei einem Wohnraum (z-Komponente der Schwinggeschw.). An dieser letzten Stelle wurde auch der Pegelverlauf mit Tonaufnahme des abgestrahlten Körperschalls registriert.

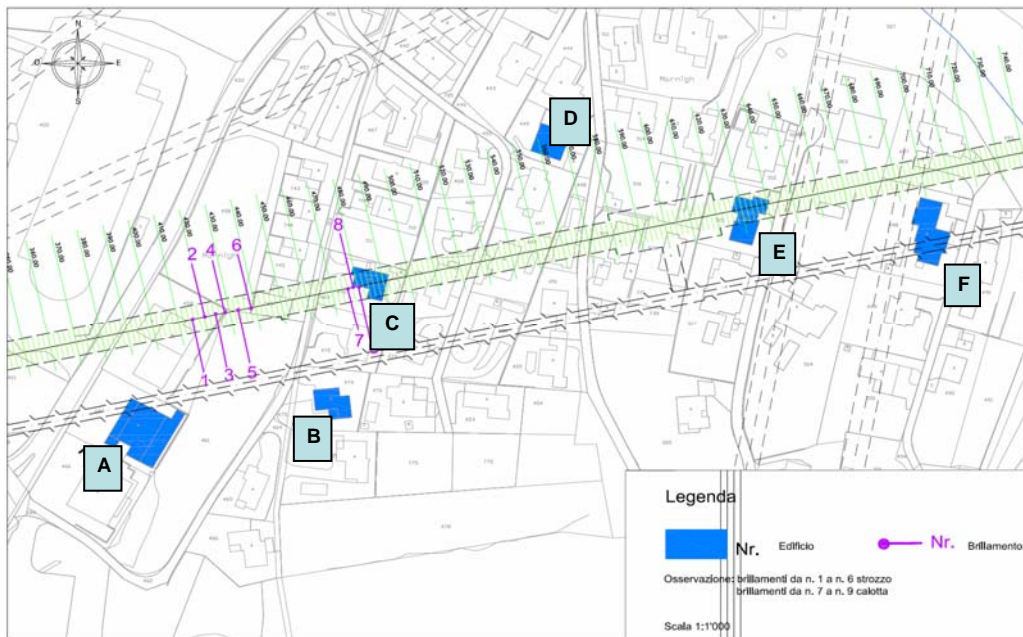


Bild 5 - Trasse des Haupttunnels + Sicherheitstunnel in Vezia: gemessene Häuser und Sprengorte

Die Messungen der ES und KS waren vollkommen automatisiert, indem der ES-Sensor im Keller als "Master" und der ES-Sensor zusammen mit dem Pegelmesser im Wohnraum als "Slave" arbeiteten. In den Bildern 6, 7 und 8 sind die Messbeispiele der Erschütterungen (wobei die Verstärkung zwischen Keller und Wohnraum klar ersichtlich ist) und dem abgestrahlten Körperschall wiedergegeben.

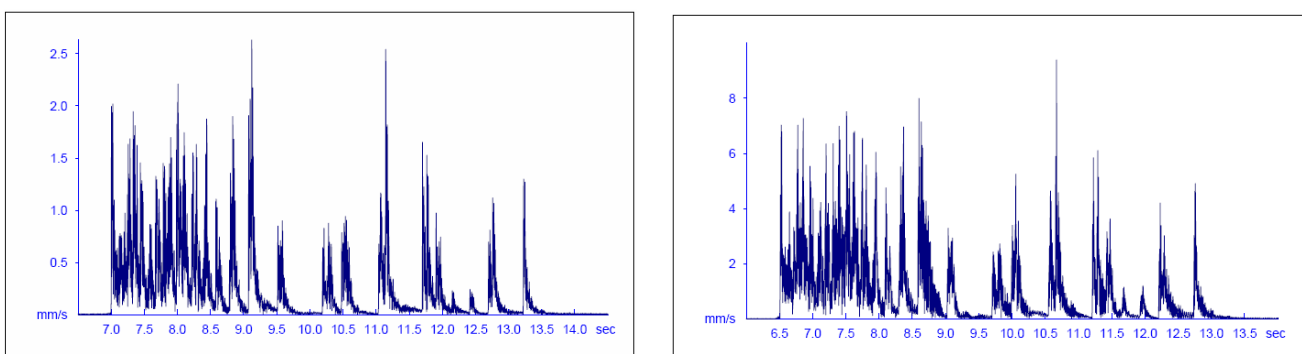


Bild 6 - Beispiel eines Schwinggeschwindigkeitsvektors im Keller (links) und im Wohnraum (rechts) bei Sprengungen in Vezia (Verstärkung der Erschütterung von ca. einem Faktor 3,5).

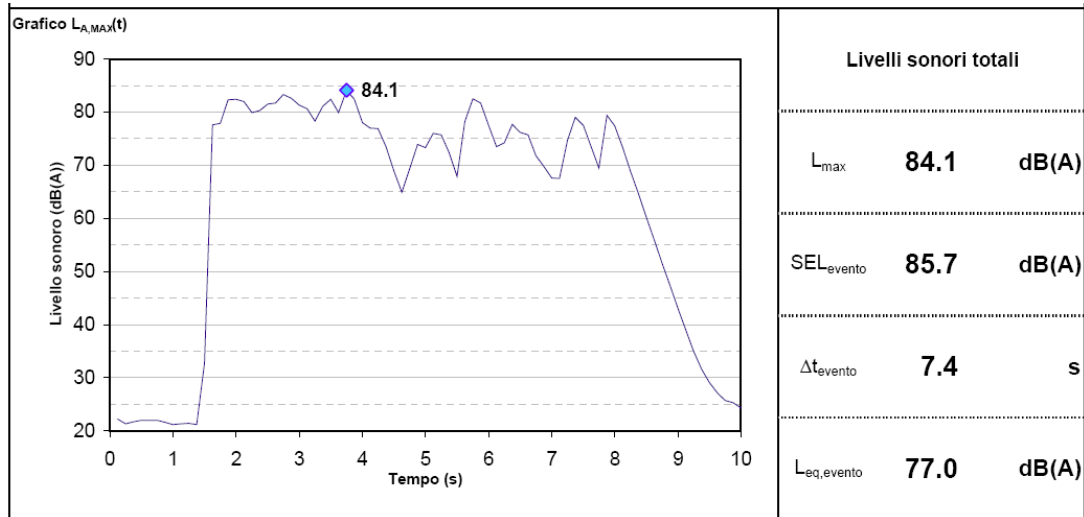


Bild 7 - Beispiel des maximalen Schallpegelverlaufs $L_{A,max}$ bei einem Sprengereignis in Vezia (Entfernung von ca. 60 m zwischen Sprengort und Gebäude)

Die Auswertung der Messungen hat folgende Resultate ergeben (bei Überdeckungen > 50 m und Sprengstoffmengen von etwa 3 kg pro Zündstufe):

- Erschütterungen:
 - die SN 640 312a (für Bauschadenrisiko) und die DIN 4150-2 (für die Störung von Sprengungen in der Bauphase) werden eingehalten;
 - die maximalen Schwinggeschwindigkeiten nehmen mit der Entfernung im Quadrat ab (siehe Bild 8, links);
- Abgestrahlter Körperschall:
 - besonders beim abgestrahlten Körperschall fällt es auf, dass sowohl der absolute Schallpegel, als auch die Schallpegeldifferenzen zum Grundgeräusch sehr hohe Werte für eine Zeitdauer von ca. 8 s annehmen können. In diesen Fällen ist eine Vorwarnung der betroffenen Bevölkerung unentbehrlich, um eine Erschreckung zu verhindern (siehe Bild 8, rechts);
 - der maximale Schallpegel nimmt exponentiell jedoch langsam ab, etwa 10 dB(A) jede Verdoppelung der Entfernung zum Sprengort (siehe Bild 9), das bedeutet, dass die Sprengungen auch bei grossen Entfernungen (über 300 m) gut hörbar sind.

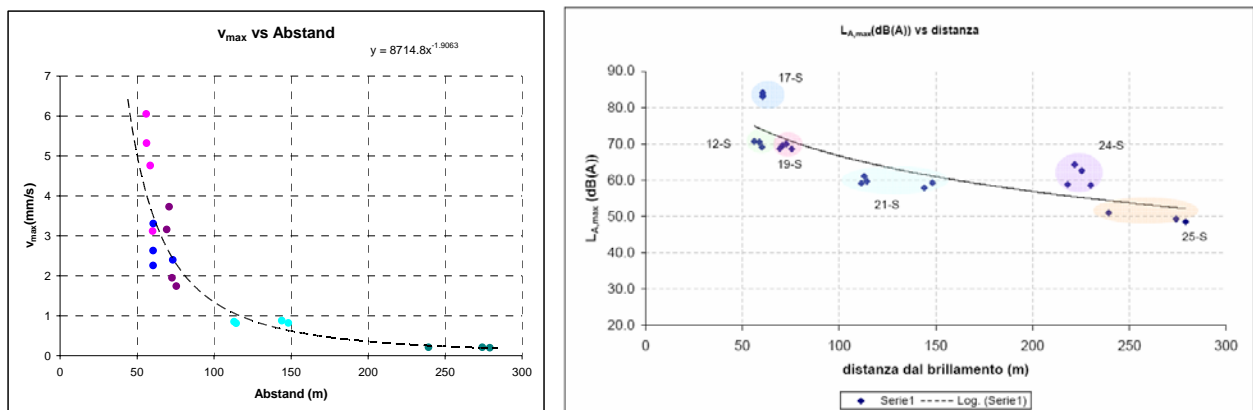


Bild 8 - Zusammenhang zwischen max. Schwinggeschwindigkeit auf dem Fundament (links) bzw. max. Schallpegel im Wohnraum (rechts) und Entfernung des Sprengort-Immissionspunktes. Es sind die Unterschiede zwischen verschiedenen Gebäuden und die Streuung der Messwerten beim gleichem Gebäude gut erkennbar.

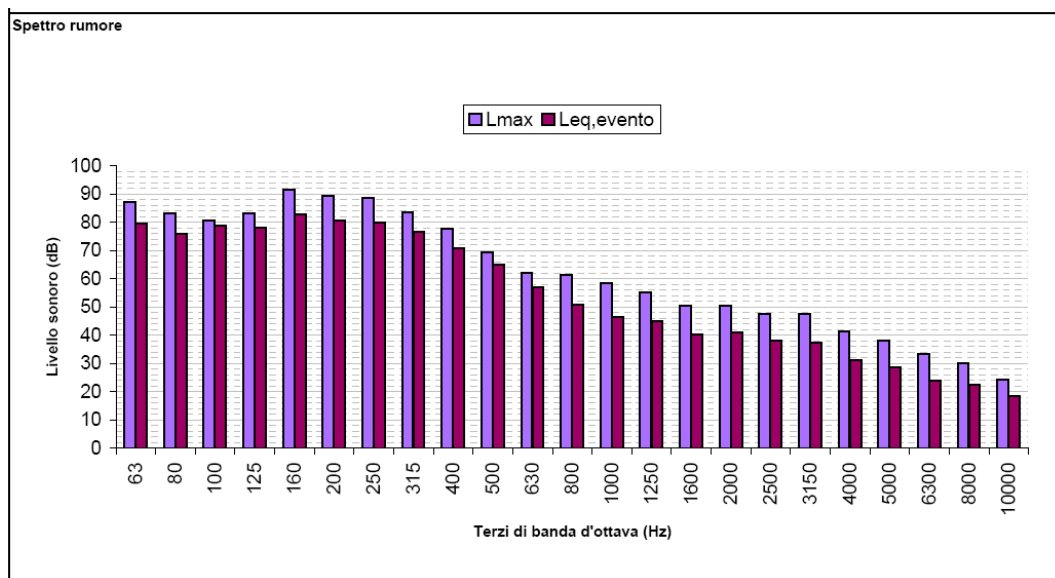


Bild 9 - Beispiel des linearen Spektrums von L_{eq} und $L_{A,max}$ bei einem Sprengereignis in Vezia

3.2 SPV im Versuchstollen Hagerbach

Im Versuchstollen Hagerbach wurden ES- und KS-Messungen in einem zum Sprengort benachbarten Tunnelarm und in einem weit entfernten Haus durchgeführt, um mögliche Massnahmen an der Quelle (Bohrloch) zur Senkung der Erschütterungen und des Körperschalls zu testen.

Die Messresultate zeigten, dass eine Bohrlochdämmung mit Steinwollestäben keine messbare Wirkung hatte, dagegen konnte bei Kranzschüssen mit einer abgelängten Sprengschnur und Bohrlochdämmung (Steinwollgedichte $> 100 \text{ kg/m}^3$) eine Reduktion der Erschütterungen (Schwinggeschwindigkeit) auf etwa die Hälfte festgestellt werden. Beim Körperschall wurde die Reduktion auf etwa 4-6 dB(A) abgeschätzt.

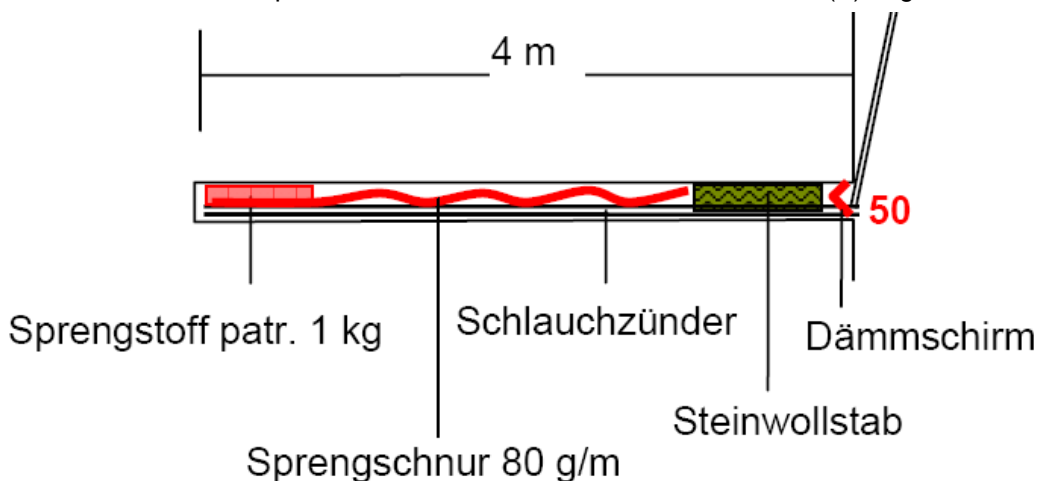


Bild 10 - Sprenganordnung bei Kranzschüssen im Versuchstollen Hagerbach

3.3 TBM-Vortrieb beim ATG-Tunnel in Erstfeld

In Erstfeld konnte die Ausbreitung der Erschütterungen und des Körperschalls in Abhängigkeit der Entfernung zwischen TBM und Empfangsort getestet werden. Die TBM hatte einen Durchmesser von ca. 9,5 m und eine mechanische Nennleistung von 3,5 MW. Die Messungen wurden in einem Bauernhaus bei drei verschiedenen Lagen der TBM (Entfernungen von 75 m, 150 m und 225 m) durchgeführt (siehe Bild 11).

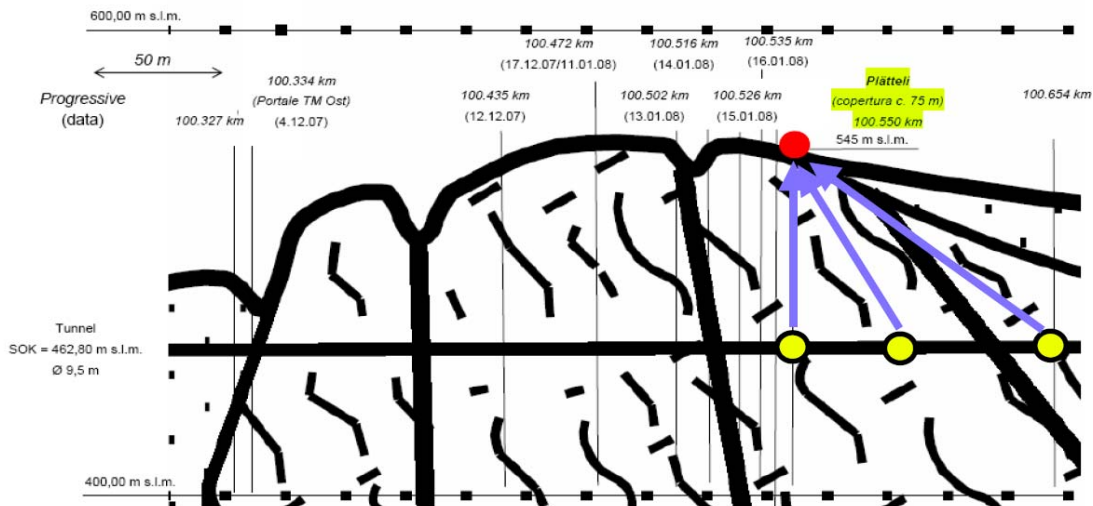
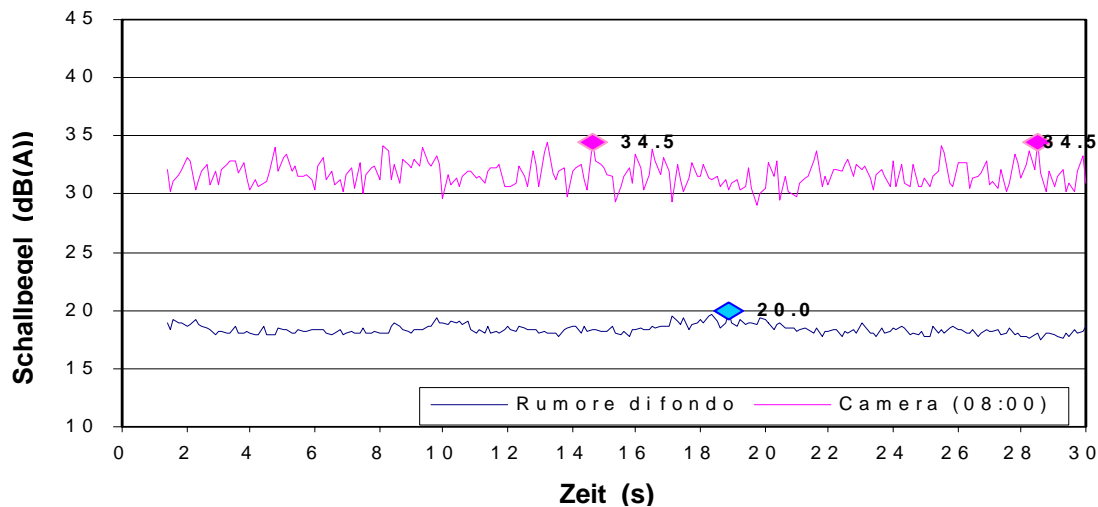


Bild 11 - Lage der TBM bei der ES- und KS-Immissionsmessungen in einem Bauernhaus (Entfernungen von 75 m, 150 m und 225 m)

Die Resultate zeigen dass:

- das Abklingen der von der TBM in einem Wohnraum verursachten KS-Immissionen fast die gleiche Gesetzmässigkeit folgt wie diejenige, welche in Vezia bei SPV gemessen wurde (siehe Bild 13);
- mögliche Störungen während der Nachtsperiode bei Entfernungen < 140 m zu erwarten sind, besonders dann, wenn das Grundgeräusch klein ist (im gemessenen Fall < 20 dB(A));
- die massgebenden Frequenzen des KS-Spektrums zwischen 80 und 200 Hz liegen (siehe Bild 12).



■ Rumore di fondo ■ Camera (senza RF)

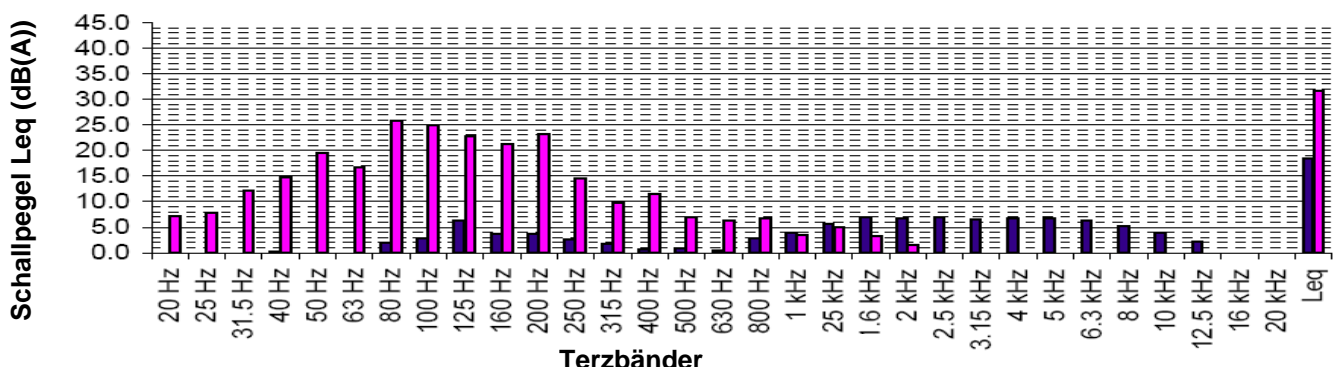


Bild 12 - Abgestrahlter Körperschallpegelverlauf und Spektrum ($L_{eq} = 32,0$ dB(A) in einem Schlafzimmer bei einem Grundgeräusch von 18,5 dB(A) - TBM in einer Entfernung von 75 m).

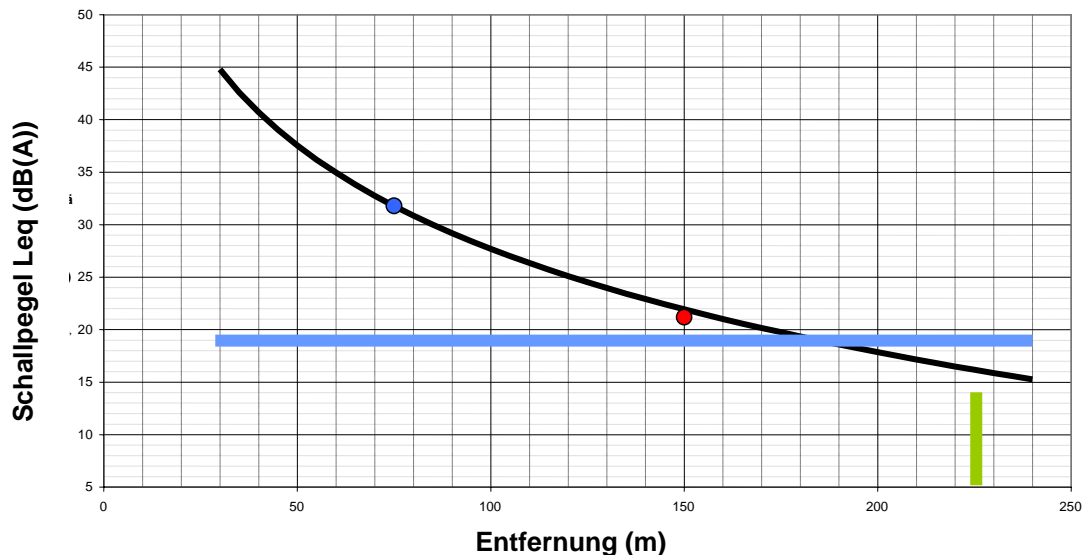


Bild 13 - Messpunkte des von einer TBM verursachten Körperschalls in Erstfeld, verglichen mit dem erwarteten Pegelverlauf (nach den SPV-Messungen in Vezia). Waagrechte Linie = Grundgeräuschpegel.

Um besser zu verstehen, was überhaupt ein im Schlafzimmer gemessener Geräuschpegel der TBM von 32 dB(A) entspricht (wie bei der Messung in 75 m Entfernung, Bild 12), konnte im vorliegende Fall ein Vergleich mit dem Lärm eines normalen Kühlschranks gemacht werden, welcher in der Küche vorhanden war. Resultat: der abgestrahlte KS-Pegel entsprach der Geräusche von 4,5 Kühlschränke, welche gleichzeitig im Betrieb waren.

3.4 TBM-Vortrieb beim ATG-Tunnel in Faido

In den zwei Tunnelröhren des ATG-Projektes in Faido wurden Versuche durchgeführt, um die Wirkung von möglichen Massnahmen an der Quelle (TBM) zu testen. Es hat sich herausgestellt, dass sich der abgestrahlte Körperschall bei Verringerung (innerhalb von vernünftigen Grenzen) der TBM-Anpresskraft und Drehzahl um etwa 3 bis max 6 dB(A) reduzieren lässt.

4 Schlussfolgerungen

Aus den Messungen der Erschütterungen und des Körperschalls in Vezia, Hagerbach, Erstfeld und Faido wurden wertvolle Erkenntnisse über die Ausbreitung von ES und KS gewonnen, welche sich am Projekt GbC anwenden liessen. Es war besonders wichtig, aus den Resultaten der Versuchen die vorgesehenen Massnahmen und Randbedingungen in den Ausschreibungen zu präzisieren, um sowohl das Risiko von Bauschäden klein zu halten als auch die Störung der Bevölkerung zu beschränken und somit die öffentliche Annehmbarkeit des Projektes zu stärken.

Autor:
 Dario Bozzolo
 Dipl. Phys. ETHZ, dr. sc. nat.
 IFEC Consulenze SA
 c.p.505
 CH - 6802 Rivera
dario.bozzolo@ifec.ch
www.ifec.ch