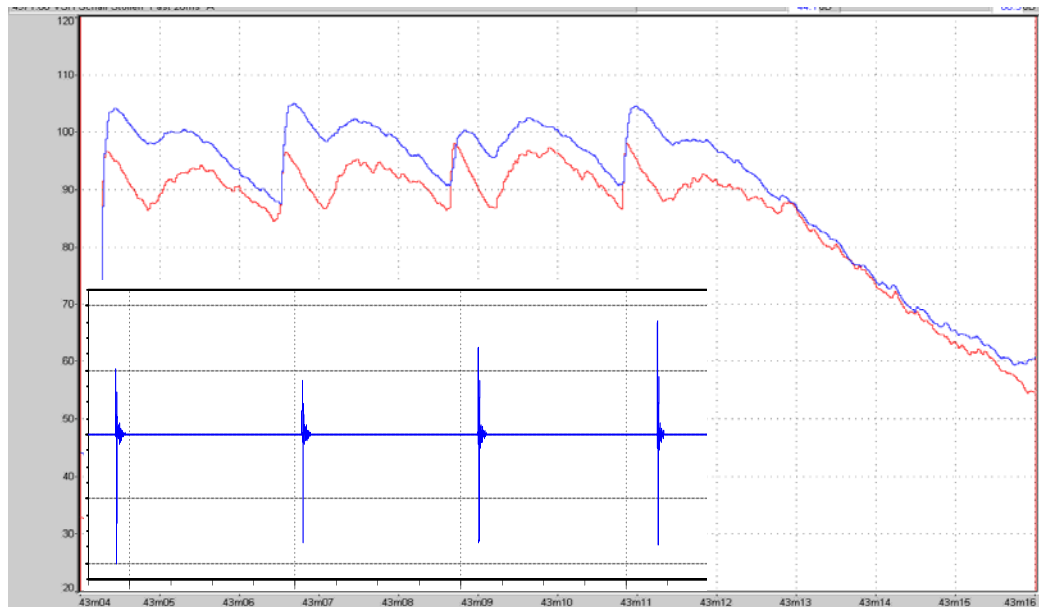


# Erschütterungs- und Körperschallprobleme beim Sprengen

## Sprengversuche Versuchs-Stollen Hagerbach



Zürich, 30. Mai 2008

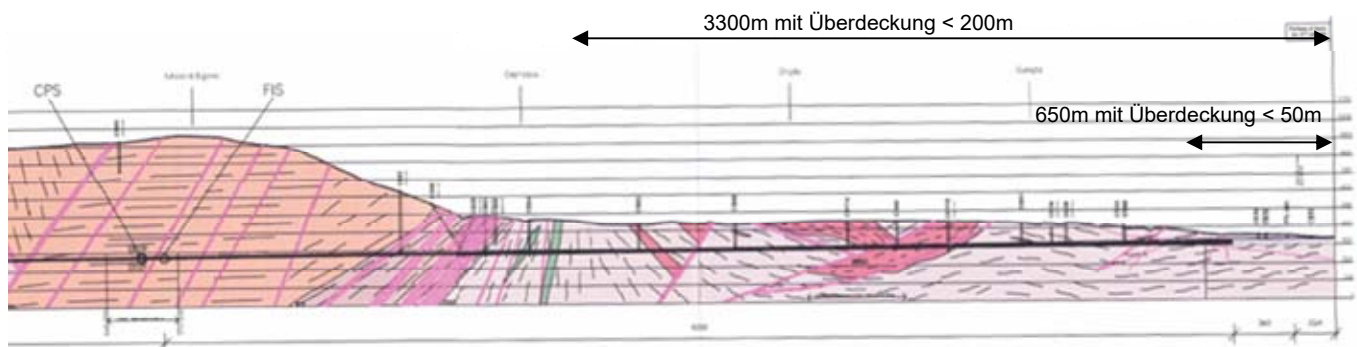
## 1 Ausgangslage

Auf zahlreichen Baustellen sind bei Bauüberwachungen die Erschütterungen infolge von Sprengarbeiten überwacht worden. In der Regel sind die wichtigsten Parameter der durchgeführten Sprengungen bekannt. Daraus resultieren die altbekannten Abklingkurven. Weil der Messdatenfundus sehr gross ist, können die aus Sprengungen resultierenden Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke relativ zuverlässig prognostiziert werden.

Bezüglich der Einwirkung von Sprengerschütterungen auf Menschen in Gebäuden sind die Kenntnisse wesentlich geringer. Ein Grund dafür könnte sein, dass eine klare Beurteilungsnorm erst vor 10 Jahren in Kraft gesetzt wurde (DIN 4150-2, Juni 1999) und deren Anwendung in der Schweiz noch kürzer zurückliegt.

Der von Sprengungen hervorgerufene Körperschall in Gebäuden ist nochmals weniger untersucht worden. Die Messtechnik wäre zwar schon lange verfügbar. Vermutlich sind die wenigen Messdaten darauf zurück zu führen, dass Rechtsvorschriften für die Beurteilung von Sprenglärm immer noch fehlen.

### Projekt AlpTransit Ceneri Basistunnel, Tunnelvortrieb nach Süden



Der Bau des Ceneri-Basistunnels war der Auslöser für die später geschilderten Versuche.

Für den Tunnelvortrieb war ursprünglich eine Tunnelbohrmaschine (kurz TBM) vorgesehen. Kurz vor der Fertigstellung der Ausschreibungsunterlagen wurde vom Bund verfügt, dass auch ein Vortrieb mittels Sprengen auszuschreiben sei. Dabei sollten die beiden Varianten bezüglich Bautechnik und Umweltauswirkungen möglichst auf den gleichen Stand gebracht werden.

Für uns Ingenieure eine grosse Herausforderung, vor allem weil wir unter grossem Zeitdruck standen (die Ausschreibung der Tunnelbaulose ist bereits erfolgt).

## 2 Problemstellung und Vorgehen

Im Wesentlichen stellten sich die beiden Hauptprobleme:

1. die Wirksamkeit von sprengtechnischen Massnahmen ist schlecht bekannt
2. die Prognose von Körperschall infolge Sprengens ist ungenügend abgesichert

Zur Klärung dieser beiden Sachverhalte wurde folgendes Vorgehen beschlossen:

1. Durchführen von Sprengversuchen, bei denen mit Variation der Sprengparameter verschiedene Hypothesen erhärtet oder verworfen werden sollen

*Die Sprengversuche im Versuchsstollen Hagerbach konnten zusammen mit dem Büro Amberg Engineering organisiert und vor Weihnachten 2007 durchgeführt werden. Im Stollensystem wurden zwei Versuchsserien durchgeführt, die detailliert in Kapitel 4 beschrieben werden.*

2. Durchführen von Körperschall- (und parallelen Erschütterungs)messungen bei einem SPV in ähnlicher Umgebung.

*Der Strassentunnel Vedeggio-Cassarate startet in Vezia praktisch beim Südportal des geplanten Ceneri-Basistunnels. Während Sprengarbeiten für diesen Tunnel konnte das Ingenieurbüro IFEC umfangreiche Körperschall- und Erschütterungsmessungen durchführen.*

Zum besseren Verständnis der Sprengversuche ist ein kleiner Exkurs in die Sprengtechnik sinnvoll.

## 3 Sprengtechnischer Exkurs

### 3.1 Entwicklung ziviler Sprengstoffe

Schwarzpulver als erster Sprengstoff war schon sehr früh in China bekannt. In Europa wurde das Schwarzpulver durch B. Schwarz ca. 1330 eingeführt. Schwarzpulver wurde mittels Funken oder Flamme entzündet, was sehr gefährlich war.

Um 1865 entdeckte A. Nobel den weniger gefährlichen Nitro-Sprengstoff. Das Risiko war auch deshalb wesentlich kleiner, weil die Entzündung mit dem nobelschen Zündhütchen erfolgte. Dieses Zündhütchen war Vorläufer der noch heute gebräuchlichen Sprengkapseln.

Die Sprengarbeit im Bergbau und Tunnelbau wurde durch die Einführung maschineller Bohr- und Abbautechniken sowie die Erfindung des Dynamits massiv gefördert. Erst mit diesen Hilfsmitteln war der Bau der grossen Alpentunnels möglich.

Als weiterer Schritt folgte die Entwicklung von wasserfesten Sprengstoffen. Untertag trifft man infolge der Gesteinsklüftung oftmals Wasser an und die wasserfesten Sprengstoffe erweiterten die Möglichkeiten des Sprengstoffeinsatzes.

Heute sind die Emulsionssprengstoffe beim zivilen Gebrauch sehr wichtig. Im Laufe der letzten Jahre wurde dem Umweltaspekt immer grössere Bedeutung zugemessen (Altlast-

problematik, Emissionen im Stollen, Immissionen in Umgebung). Interessanterweise unterscheiden sich heute die Rezepturen der Emulsionssprengstoffe weltweit nur minimal. Dies dürfte darauf hindeuten, dass die Optimierungsmöglichkeiten bei der Herstellung des Sprengstoffes weitgehend ausgereizt sind.

Heute wird Sprengstoff entweder patroniert oder lose eingesetzt.



Sprengstoff patroniert  
 Durchmesser 25mm bis 90mm, Länge 30cm bis 80cm, zur Detonation gebracht mit Sprengschnur



Pumpfahrzeug für Emulsionssprengstoff, volle Ausnützung des Bohrlochdurchmessers, Bohrloch auf ca. 2/3 Länge gefüllt

### 3.2 Heute gebräuchliche Zündsysteme

Das Zündsystem ist mitentscheidend für eine erfolgreiche Sprengung. Das Zündsystem muss zeitlich hochpräzise und auch zuverlässig sein. Früher wurde mit Verzögerern und unterschiedlich langen Zündschnüren operiert, was heute verboten ist.

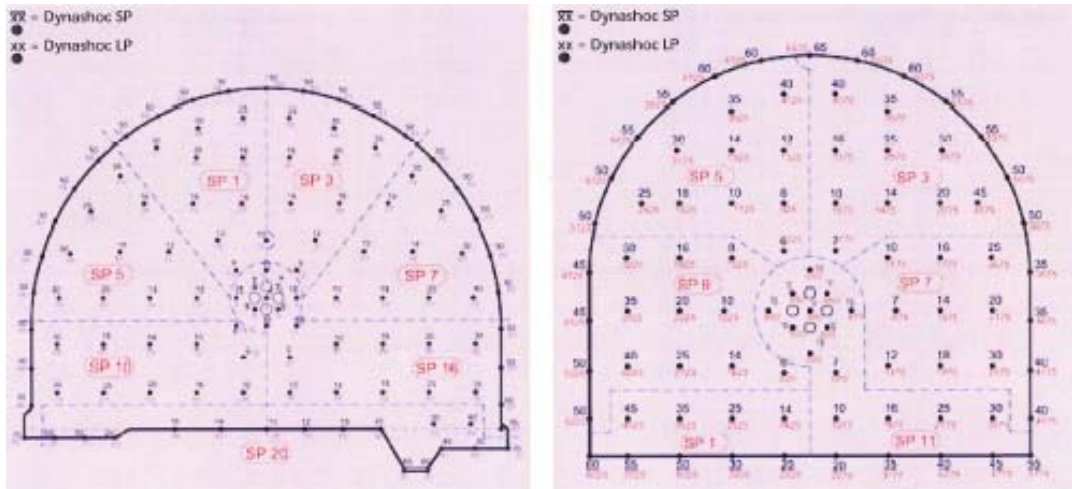
Heute stehen hauptsächlich drei moderne Zündsysteme zur Verfügung

- Elektrische Zündung: entweder Kurzzeitintervalle (25ms bis 40ms) oder Langzeitintervalle (80ms bis 500ms); Risiko von Fehlzündungen durch elektrische Anlagen oder Blitzschlag. Die Zündung wird mit zunehmenden Zündstufen immer ungenauer, was ein wesentlicher Nachteil ist und die Anzahl Zündstufen begrenzt.
- Schlauchzündung: Zündung mit Flammstrahl in Anzündschlauch; Kurzzeitserie mit 25ms oder Langzeitserie mit 100ms; Fehlzündung durch Ausseneinflüsse praktisch ausgeschlossen; die Schlauchzündung bietet fast unbegrenzte Möglichkeiten beim Erstellen von Zündschemas.
- Elektronische Zündung: Zündung mit integriertem Schaltkreis (Mikrochip); Intervalle im 1ms-Bereich wählbar, Zündungen können fast beliebig definiert werden.

### 3.3 Zündschemas

Bei einer Sprengung entscheiden die Anordnung der Bohrlöcher (geometrische Anordnung im Sprengprofil, aber auch Genauigkeit beim Bohren), der verwendete Sprengstoff und vor allem die Zündabfolge, ob eine Sprengung erfolgreich ist und wie hoch die Sprengimmissionen sind.

Die folgenden zwei Sprengschemas zeigen, dass ein Sprengabschlag zwar eine ziemlich geometrische Angelegenheit ist, aber keineswegs banal.



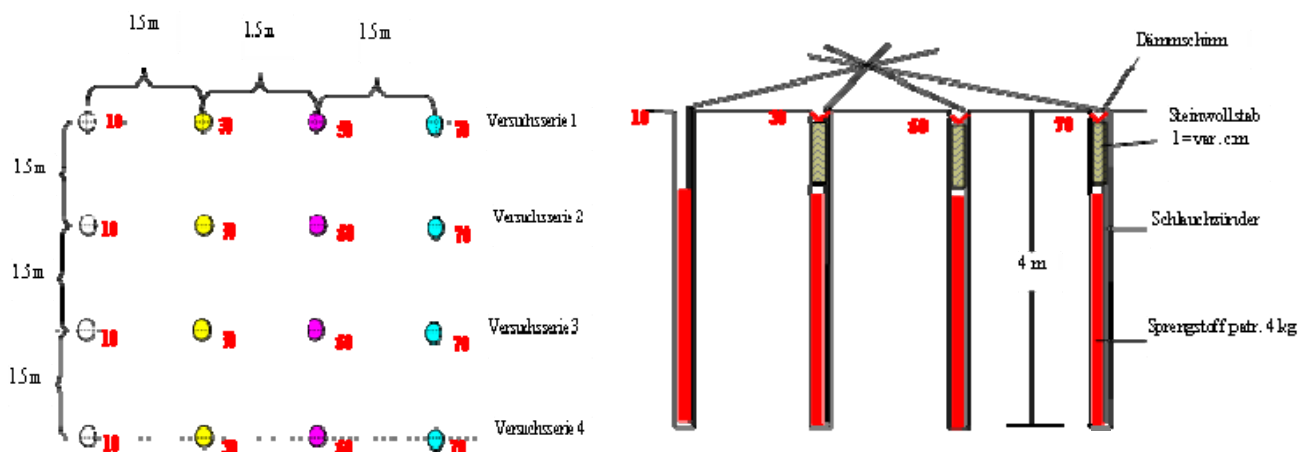
Sprengvortrieb bei zwei unterschiedlichen Profilen; Anordnung von Grossbohrlöchern im Zentrum, welche den Einbruch erleichtern; Zündung der um den Einbruch liegenden Bohrlöcher, so dass keine Zwängungen entstehen; am Ende folgen die Kranzschüsse, um das Ausbruchprofil möglichst genau zu erstellen und keine unerwünschten Auflockerungen oder Ausbrüche im anstehenden Gestein zu provozieren

## 4 Sprengversuche VersuchsStollen Hagerbach

### 4.1 Hypothese 1 „Bohrlochverdämmung“

Hypothese 1: „Bei der Verdämmung eines Bohrloches mit Steinwollstäben nehmen die Schallimmissionen ab“

Mittels Variation der Dichte und Länge der Steinwollstäbe soll eine Kombination mit optimaler Wirksamkeit bestimmt werden. Im Kieselkalk wurden vom Personal VSH an einer Stollenbrust 4m tiefe Bohrlöcher wie folgt erstellt.



Anordnung der Bohrlöcher bei Versuch 1

Schnitt Bohrlöcher/Ladung/Verdämmung

Mit einem Raster von 1.5 Metern wurde sichergestellt, dass sich die einzelnen Bohrlöcher nicht gegenseitig beeinflussten. Zündung 1 erfolgte immer ohne Verdämmung, in Intervallen von 2000ms folgten die weiteren Zündungen.



Folgende Verdämmungsarten wurden getestet: Steinwollstab 25 cm lang mit 3 Dichten 65 / 100 / 160 kg/m<sup>3</sup>, Steinwollstab 50 cm lang mit 3 Dichten, Ausschäumen gesamtes Bohrloch mit Bauschaum (Sprengung erst nach Aushärtung).



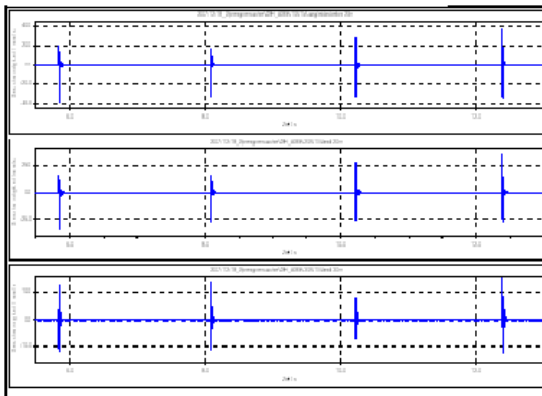
Laden der Bohrlöcher bei Versuch 1



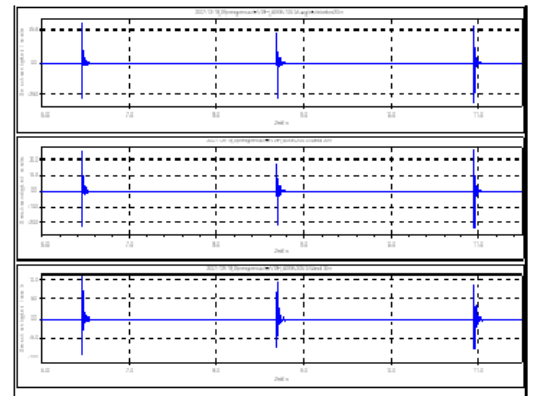
Steinwollstäbe für die Bohrlochverdämmung

Die folgenden Diagramme dokumentieren, dass die Verdämmung mit Steinwolle und Bauschaum die Erschütterungs- und Schallmissionen im Vergleich zur unverdämmten Sprengung kaum verändern.

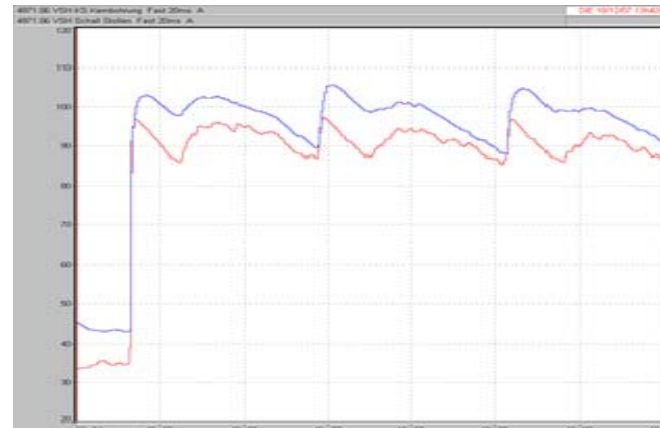
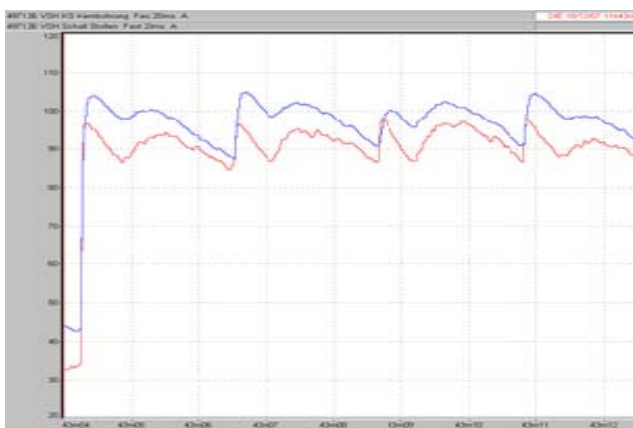
Darstellung der Erschütterungsmesspunkte: oberste Zeile Abstand 20m, mittlere Zeile Abstand 20m, unterste Zeile Abstand 35m



ohne 65 kg/m<sup>3</sup> 100 kg/m<sup>3</sup> 160 kg/m<sup>3</sup>  
Verdämmung mit Steinwollstab 50 cm lang



ohne Bauschaum Bauschaum  
Verdämmung mit Bauschaum



Darstellung der Schallmesspunkte: blaue Kurve Luftschall ca. 100m entfernt, rote Kurve Körperschall ca. 20m entfernt

## 4.2 Messtechnischer Exkurs

Die für AlpTransit Ceneri durchgeführten Schall- und Erschütterungsmessungen in Tunnels und Stollen haben gezeigt, dass vor allem für Schallmessungen ein grosses fachtechnisches Wissen erforderlich ist. Will man in einem Stollen zum Beispiel den Körperschall messen, dann bedingt dies aufwändige bauliche Vorkehrungen, wie die Messungen beim TBM-Vortrieb in Faido oder bei den Sprengversuchen im VSH gezeigt haben.

Eine Körperschallmessung kann infolge der hohen Luftschallpegel nur in einer Kernbohrung erfolgen. Deren Abmessungen und vor allem absorbierende Auskleidung sind nach schalltechnischen Aspekten festzulegen. Auf eine sorgfältige Luftschalldämmung ist besonders zu achten (Mehrschalenprinzip mit genügend Absorption). Um dies baulich sicherzustellen, wurde auf den anstehenden Fels ein Ausgleichspodest betoniert. Auf diese glatte Oberfläche konnte die zweite Schale (Kunststoffkiste mit Schwerfolie und inseitiger Auskleidung) schalldicht gestossen und anschliessend festgezurt werden. An diesem Podest konnten zudem einfach die Erschütterungssensoren befestigt werden. Das Büro IFEC hat für das Verschliessen der Kernbohrung einen Schallmesseinsatz entwickelt (siehe Bild unten) und uns freundlicherweise für die Sprengversuche VSH zur Verfügung gestellt.



Kernbohrung mit betoniertem Ausgleichspodest; ermöglicht gute Dämmung gegen Luftschall und einwandfreie Erschütterungsmessung

Schallgedämmter Messeinsatz für Körperschallmessung mit genügend Absorption in Kernbohrung drinnen





Verschluss Kernbohrung und Mikrofoneinsatz vor Anbringung äusserer Abdeckung



kombinierte Erschütterungs- und Schallmessung

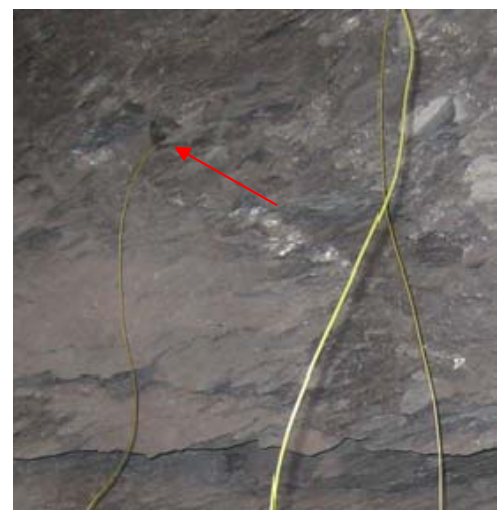
### 4.3 Hypothese 2 „abgelängte Sprengschnur bei Kranzsprengung“

Hypothese 2: „Bei den Kranzsprengungen wird durch eine abgelängte Sprengschnur und Bohrlochdämmung der Sprengknall wirksam reduziert“

Wie das untenstehende Bild links zeigt, schaut bei Kranzsprengungen die Sprengschnur in der Regel zum Bohrloch heraus und wird ins Bohrloch zurück verschlauft. Bei einem Ablängen der Sprengschnur (vergleiche Bild rechts) und Verdämmen des Bohrloches reduziert sich der Sprenglärm signifikant. Dies ist für die Tunnelarbeiter ein Vorteil und reduziert in Portalnähe den Sprengschall erheblich.



Sprengschnur reicht zum Bohrloch heraus

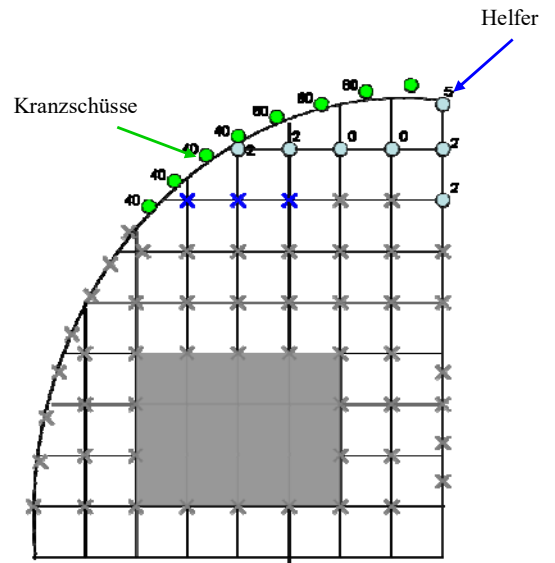
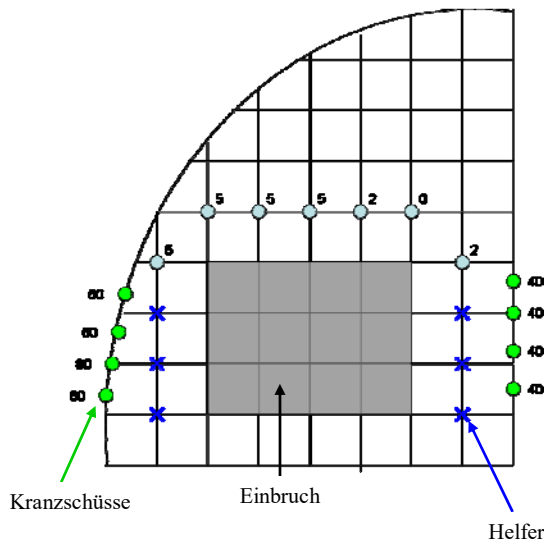


abgelängte Sprengschnur nicht sichtbar, Bohrloch zusätzlich verdämmt



Die Versuchsanordnung zeigt die Darstellung unten. Nach der Sprengung des Einbruches erfolgten 3 Runden mit Helfer-Kranz-Sprengungen. In der 1. Runde dienen die 4 Kranzsprengungen rechts als Referenz (Sprengschnur ausserhalb Bohrloch), die 4 Kranzsprengungen links waren abgelängt und mit Steinwolle 100 kg/m<sup>3</sup> verdämmt. In der 3. Runde waren alle abgelängt, die linken Kranzsprengungen zusätzlich mit Bauschaum, die rechten mit Steinwolle 160 kg/m<sup>3</sup> verdämmt.

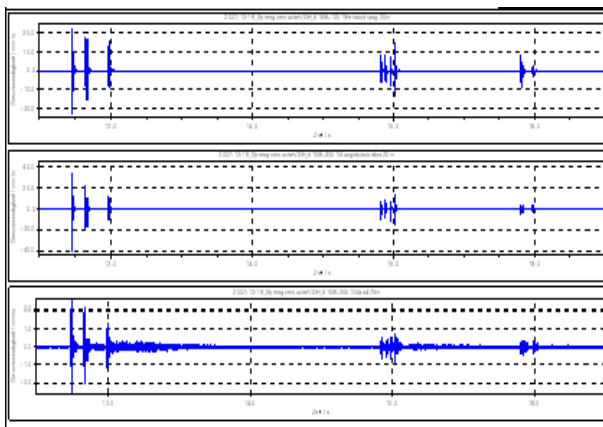
Unterschiede zwischen linken und rechten Kranzschüssen



1. Runde: Kranz rechts = Referenz (Sprengschnur ausserhalb Bohrloch, Kranz links abgelängt + verdämmt Steinw 100kg/m<sup>3</sup>

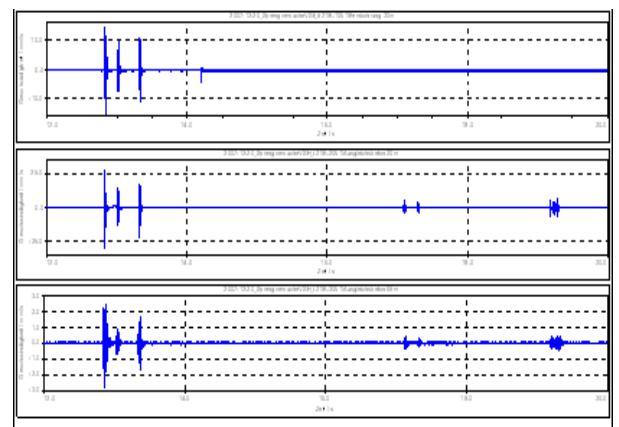
3. Runde: Kranz links abgelängt + Bauschaum  
Kranz rechts abgelängt + Steinw 160 kg/m<sup>3</sup>

Darstellung der Erschütterungsmesspunkte: oberste Zeile in Kernbohrung 20m, mittlere Zeile Aufbeton 20m, unterste Zeile Aufbeton 65m



Helfer 1

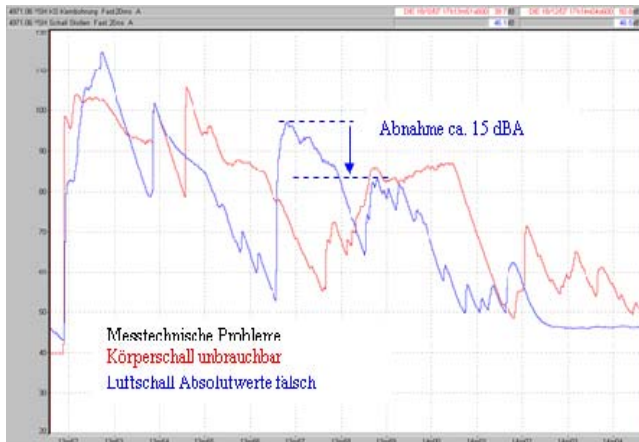
Referenz abgel+Steinw100



Helfer 3

Bauschaum Steinw160  
beide Kranzsprengungen abgelängt

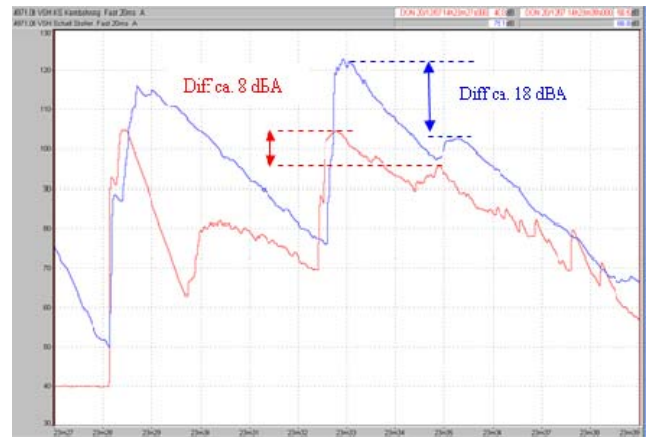
Darstellung der Schallmesspunkte: blaue Kurve Luftschall ca. 90m entfernt, rote Kurve Körperschall ca. 20m entfernt



Helfer 1      Referenz      abgel+Steinw100

Messwerte Luftschall (Abstand ca. 90 m)

Referenz 115 – 120 dBA (geschätzt)  
abgelängt + Steinw 102 – 105 dBA  
abgelängt + Bauschaum ca. 123 dBA



Helfer 3      Bauschaum      Steinw160  
beide Kranzsprengungen abgelängt

Messwerte Körperschall (Abstand ca. 20 m)

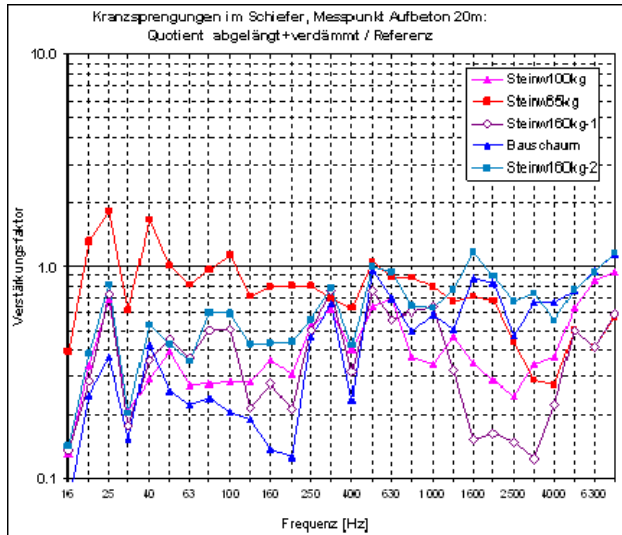
Referenz ausgefallen  
abgelängt + Steinw 94 - 96 dBA  
abgelängt + Bauschaum ca. 105 dBA

Bei den Schallmessungen in dieser 2. Versuchsserie traten grössere messtechnische Probleme auf, die eine Interpretation erschwerten. So war z.B. bei der Helfer-Kranz-Sprengung 1. Runde der Körperschall gänzlich unbrauchbar und die Absolutwerte beim Luftschall stimmten nicht. Durch Quervergleiche und Ableitungen der Erschütterungsmessungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

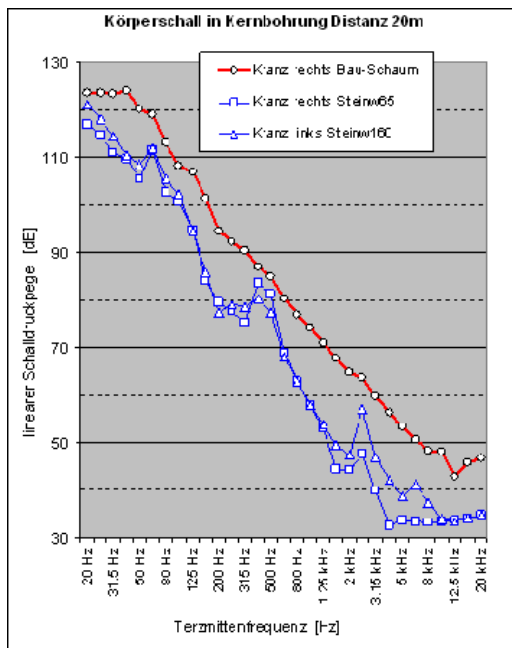
1. mit abgelängter Sprengschnur und Verdämmung reduzieren sich die Erschütterungen deutlich um etwa 50 %. Die Versuche erlauben keine abschliessenden Aussagen zur optimalen Verdämmart
2. bei abgelängten Kranzschüssen führt die Verdämmung mit Bauschaum zu etwa 8 dB höherem Körperschall als bei einer Verdämmung mit kompakter Steinwolle
3. bei abgelängten Kranzschüssen erhöht die Verdämmung mit Bauschaum den Luftschall um ca. 18 dB (im Vergleich zu Verdämmung mit kompakter Steinwolle); das Ausschäumen macht somit den positiven Einfluss des Ablängens der Sprengschnur zunichte.

Das bedeutet, dass ein Ablängen der Sprengschnur zu einer Reduktion von der Erschütterungen und Luft-/Körperschall führt. Aus schalltechnischen Gründen darf die Verdämmung des Kranzbohrloches nicht mit Bauschaum erfolgen, vielmehr ist kompakte Steinwolle zu verwenden.

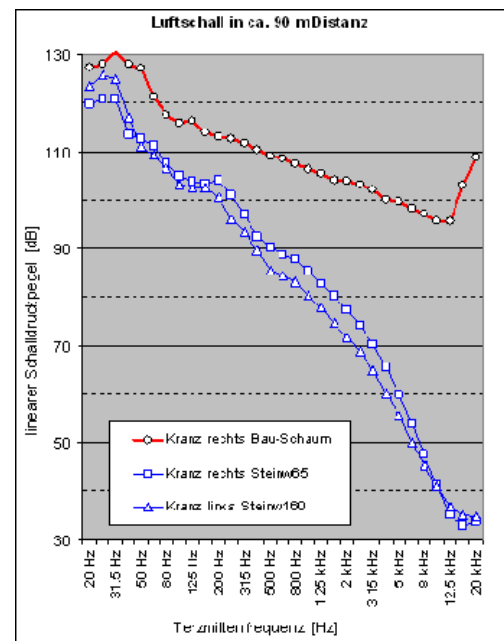
Die folgenden Diagramme zeigen die frequenzabhängigen Veränderungen, wenn bei Kranzschüssen die Sprengschnur abgelängt. Das Diagramm oben zeigt für die Erschütterungen keine klare Abhängigkeit zur Verdämmung des Bohrloches. Demgegenüber zeigen die beiden Diagramme unten, dass beim Körperschall und Luftschall die Verdämmung mit Bauschaum wesentlich ungünstiger ist als eine Verdämmung mit Steinwolle.



Differenzspektren Erschütterungen für Aufbeton 20m entfernt  
Ablängen Sprengschnur und ein Verdämmen bei Kranzsprengungen reduzieren die Erschütterungen praktisch über den ganzen Frequenzbereich



Körperschallpegel in Kernbohrung



Luftschallpegel aussen vor Kernbohrung

In beiden Fällen führt eine Verdämmung des Bohrloches mit Bauschaum zu einer wesentlichen Pegelerhöhung. Vorzuziehen ist ein Verdämmen des Bohrloches mit (kompakter) Steinwolle.