

Tiefbauamt des Kantons Bern
Oberingenieurkreis IV

Autobahnzubringer Emmental
Erschütterungen durch Schmiedehammer
der Fa. Flükiger Co AG, Oberburg

Untersuchung der Erschütterungs- und Körperschall-Immissionen im Umfeld des Schmiedehammers „Lasco HO 1250“



Zürich 22.6.2011
Bericht Nr. 1764-2

 **ZIEGLER**
CONSULTANTS
DR. A. ZIEGLER - DIPL. ING. ETH/SIA/ASIC
GLADBACHSTR. 121 - CH-8032 ZÜRICH

1	Einführung	3
2	Mess-System	4
3	Messort	5
4	Messablauf	7
5	Erschütterungsmessungen	7
5.1	<i>MP 1: Hammer-Fundament</i>	7
5.2	<i>MP 2: Gebäudefundament</i>	9
5.3	<i>MP 3: Vorplatz 2 m</i>	10
5.4	<i>MP 4: Vorplatz 7 m</i>	11
5.5	<i>MP 5: Vorplatz 17 m</i>	12
5.6	<i>MP 6: Vorplatz 31 m</i>	13
5.7	<i>MP 7: Nachbargebäude</i>	14
6	Schallmessung	15
7	Auswertung der Daten	16
8	Erschütterungsprognose	17
9	Beurteilung	18
9.1	<i>Erschütterungen</i>	18
9.2	<i>Abgestrahlter Schall</i>	18

1 Einführung

Der Autobahzubringer „Emmental“ führt im Bereich „Vögeligt“ in Burgdorf unmittelbar neben dem Fabrikareal der Firma Flückiger & Co AG vorbei (Bild 1.1). In diesem Abschnitt wird die Strasse in einem im Tagbau erstellten Tunnel geführt. Wie in Bild 1.2 ersichtlich, führt dieser Tunnel neben dem Raum mit dem Schmiedehammer LASCO-H01250 vorbei.

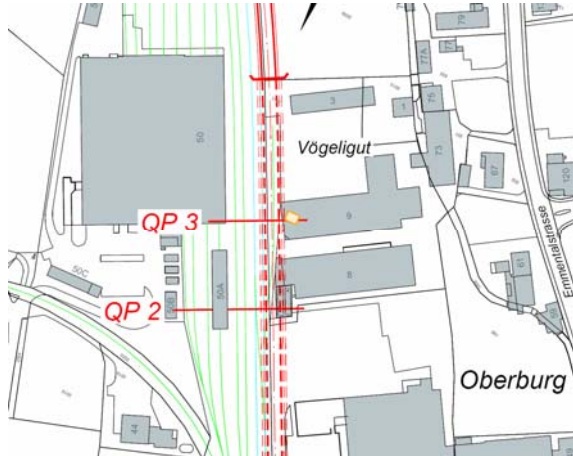


Bild 1.1 Situation mit Lage des Schmiedehammers neben dem Autobahzubringer Emmental beim QP 3

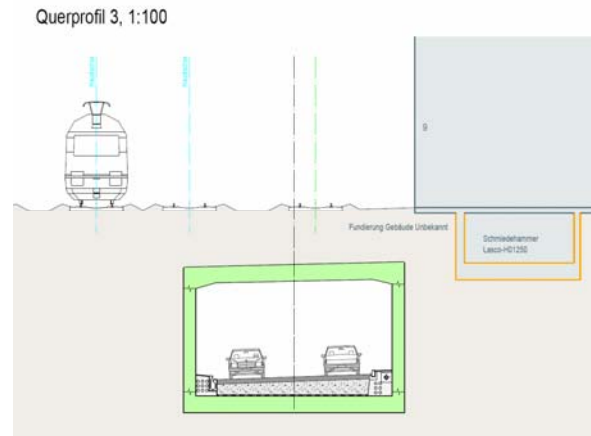


Bild 1.2 Schnitt QP 3

In diesem Zusammenhang stellen sich nun folgende Fragen:

- Wird die Sicherheit der Tunnel-Tragstruktur durch die vom Schmiedehammer erzeugten Erschütterungen beeinträchtigt.
- Wird durch die Wirkung der Schmiedehammer-Schläge im Tunnel ein sekundärer Schall (sog. Körperschall) erzeugt, der die Fahrzeuglenker beeinträchtigen könnte.

Als Grundlage für die Beantwortung dieser Fragen wurden Messungen im Umfeld des Schmiedehammers durchgeführt. Im vorliegenden Bericht sind diese Messungen beschrieben und die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

2 Mess-System

Für die Schwingungsmessungen wurden die Messgeräte MR2002 von SYSCOM verwendet. Die wichtigsten Kenndaten finden sich in Tab. 2.1. Für die Schallmessungen wurde der Präzisions-Schallpegelanalysator NORSONIC NOR121 verwendet (siehe Tab. 2.2). Erschütterungs- und Schallmessgerät sind gekoppelt, sodass die beiden Messungen synchron erfolgen.

Tabelle 2.1

Aufnehmer:	Uniaxiale Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer (Geophone)
Abtastfrequenz:	800 Messwerte pro Sekunde
Frequenz:	1 bis 320 Hz
Amplitude:	0.0001 bis 100 mm/s

Tabelle 2.2

NORSONIC NOR121 Präzisions-Schallpegelanalysator Klasse 1 (DINIEC und ANSI)
Echtzeitanalyse in Terzbändern



Fig. 2.1 Messgerät MR2002 von SYSCOM



Fig. 2.2 Schallanalysator NOR121 von NORSONIC

3 Messort

Die Messungen wurden an folgenden Messpunkten durchgeführt:

Messpunkt	Station	Messort	Distanz von Hammerfundament	Sensortyp
MP 1	ZC 704	Hammer-Fundament	0 m	MS2003+ Triaxial
MP 2	ZC 207	Gebäude-Fundament	1 m	MS2003+ Triaxial
MP 3	ZC 708	Vorplatz	2 m	MS2003+ Triaxial
MP 4	ZC 679	Vorplatz	7 m	MS2003+ Triaxial
MP 5	ZC 703	Vorplatz	17 m	MS2003+ Triaxial
MP 6	ZC 219	Vorplatz	31 m	MS2003+ Triaxial
MP 7	ZC 709	Keller Nachbargebäude	25 m	MS2003+ Triaxial
MP 8	Norsonic	Keller Nachbargebäude	25 m	Mikrophon

In den Bildern 3.1a bis f und im Plan von Bild 3.2 ist die Position der Sensoren dargestellt.



Bild 3.1a Messpunkt MP 1 (Hammerfundament)



Bild 3.1b Messpunkt MP 2 (Gebäudeschwelle)



Bild 3.1c Vorplatz mit Messpunkten MP 3 bis 5



Bild 3.1d Messpunkt MP 6



Bild 3.1e Nachbargebäude



Bild 3.1f Messpunkt MP 7 und MP 8 im Nachbargebäude

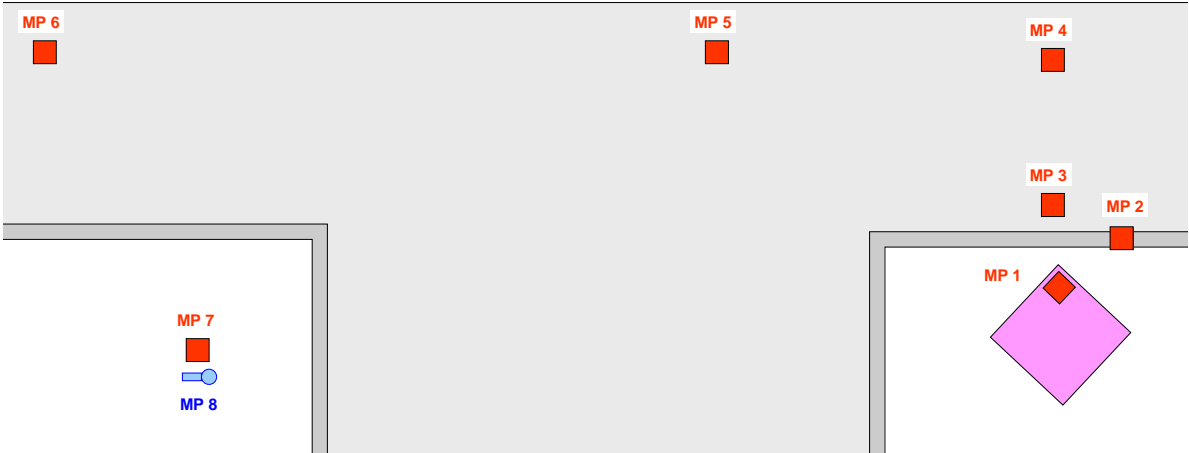


Bild 3.2a Position der Messpunkte im Grundriss

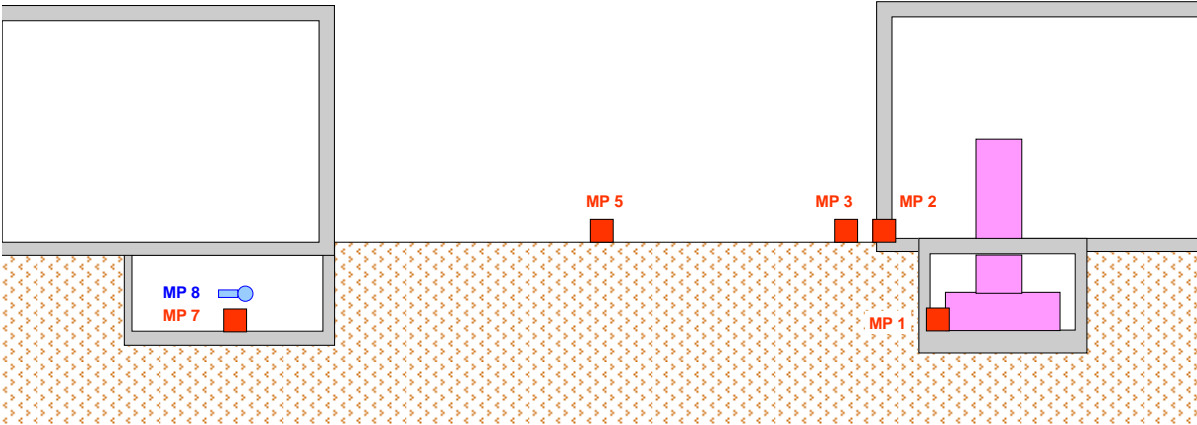


Bild 3.2b Position der Messpunkte im Schnitt

4 Messablauf

Die Messungen wurden am 26.5.2011 durchgeführt. Während 2 Stunden wurden die vom Schmiedehammer Lasco HO-U1250 verursachten Erschütterungen aufgezeichnet.

5 Erschütterungsmessungen

5.1 MP 1: Hammer-Fundament

Bild 5.1a zeigt die maximalen vertikalen Schwinggeschwindigkeiten während der gesamten Messzeit. Die Werte liegen in der Regel zwischen 25 und 30 mm/s. Der höchste Wert erreichte 35.9 mm/s. Die Werte um 10 mm/s stammen vom kleineren Schmiedehammer neben der Lasco HO-U1250.

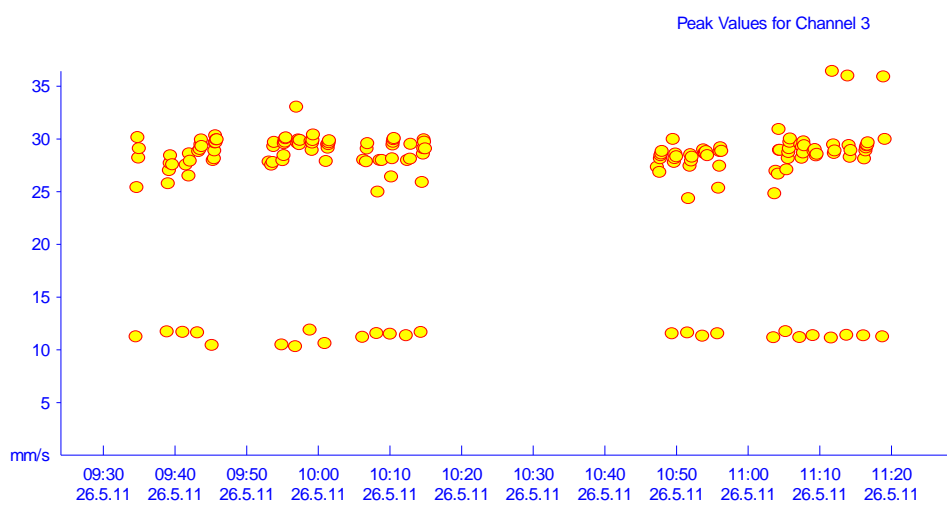


Bild 5.1a Maximale vertikale Schwinggeschwindigkeiten während der gesamten Messzeit

Bild 5.1b zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Hammerfundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 36 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 6 Hz.

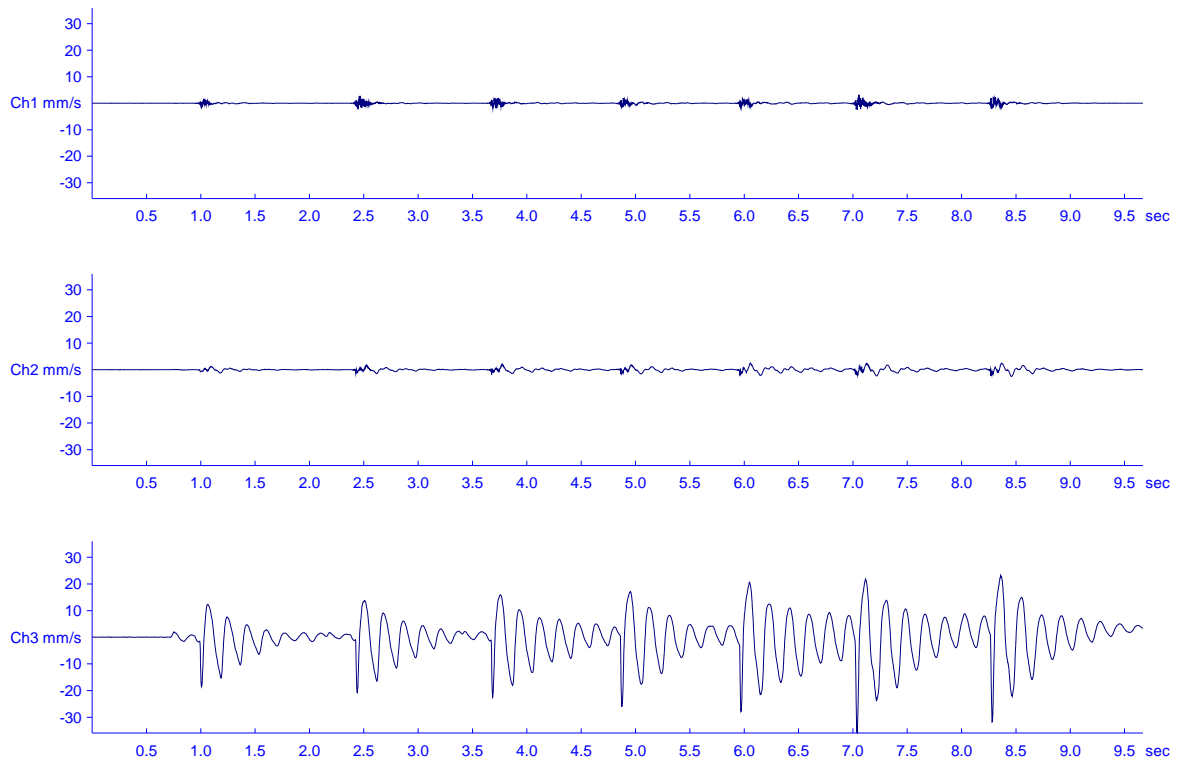


Bild 5.1b Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 167: 11:18:51 Uhr)

$v_{x,max} = 3.17 \text{ mm/s}$, $v_{y,max} = 2.54 \text{ mm/s}$, $v_{z,max} = 35.9 \text{ mm/s}$

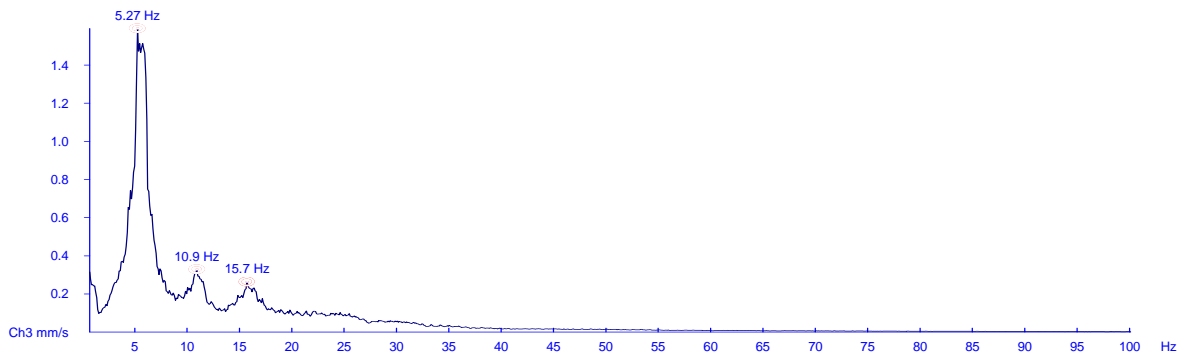


Bild 5.1c Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.2 MP 2: Gebäudefundament

Bild 5.2a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Gebäudefundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 14.7 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 20 Hz.

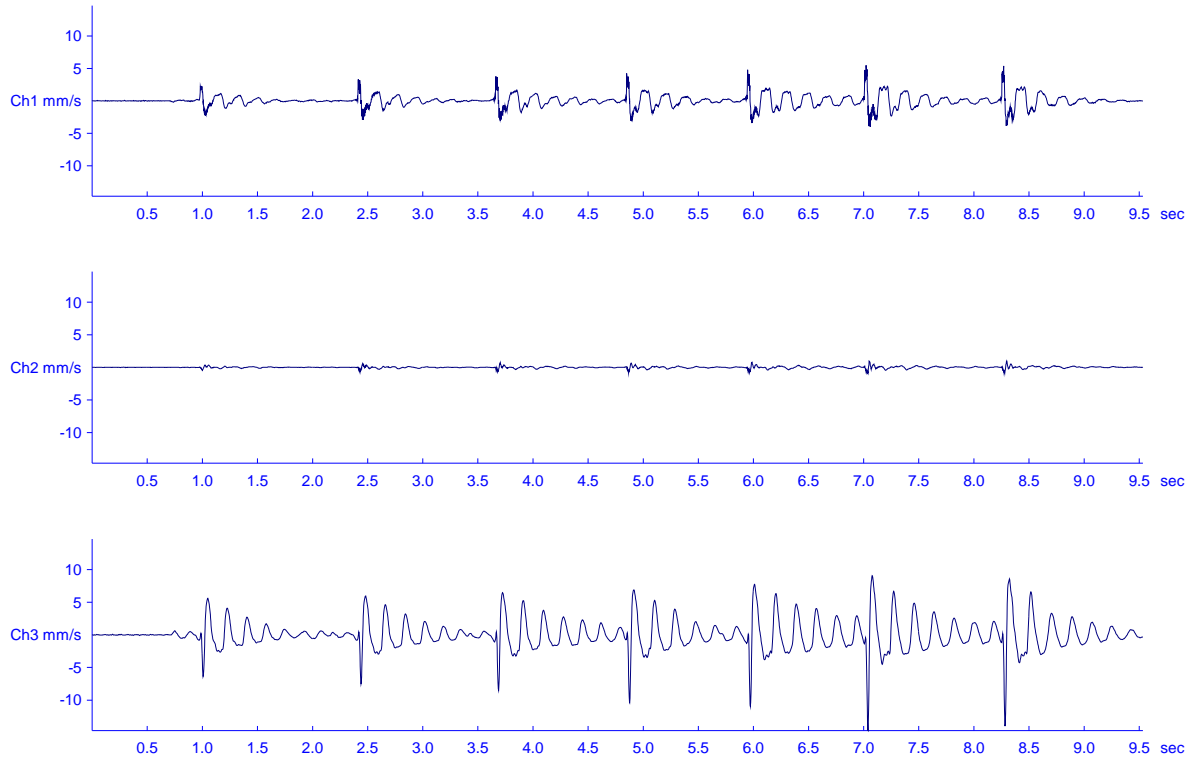


Bild 5.2a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 229: 11:18:51 Uhr)

$v_{x,max} = 5.50$ mm/s, $v_{y,max} = 1.00$ mm/s, $v_{z,max} = 14.7$ mm/s

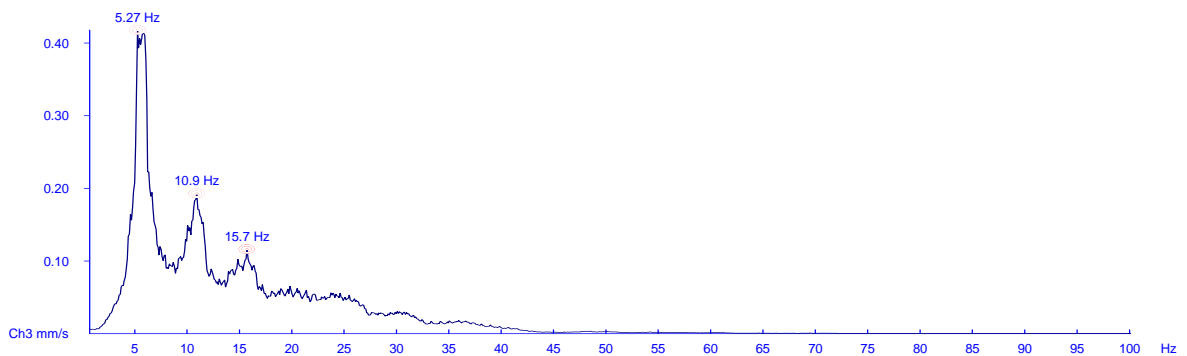


Bild 5.2b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.3 MP 3: Vorplatz 2 m

Bild 5.3a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Vorplatz in 2 m Entfernung vom Fundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 16 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 30 Hz.

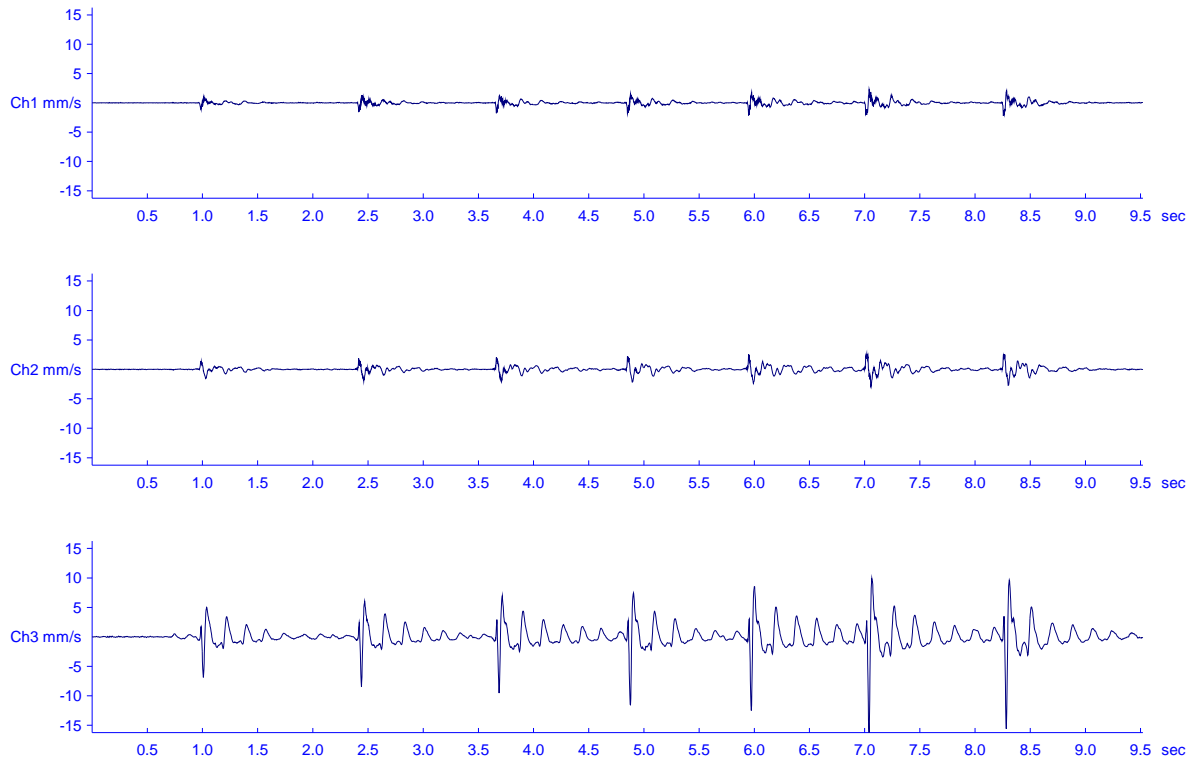


Bild 5.3a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 230: 11:18:51 Uhr)

$v_{x,max} = 2.30 \text{ mm/s}$, $v_{y,max} = 2.86 \text{ mm/s}$, $v_{z,max} = 16.2 \text{ mm/s}$

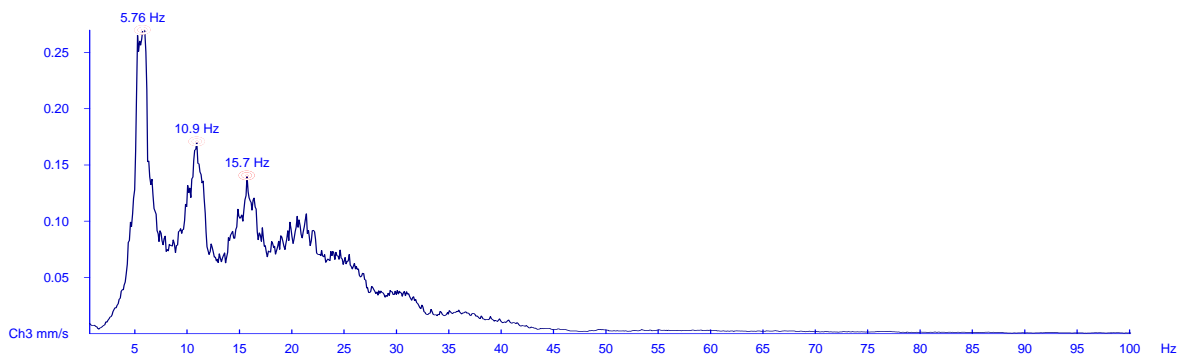


Bild 5.3b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.4 MP 4: Vorplatz 7 m

Bild 5.4a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Vorplatz in 7 m Entfernung vom Fundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 10 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 30 Hz.

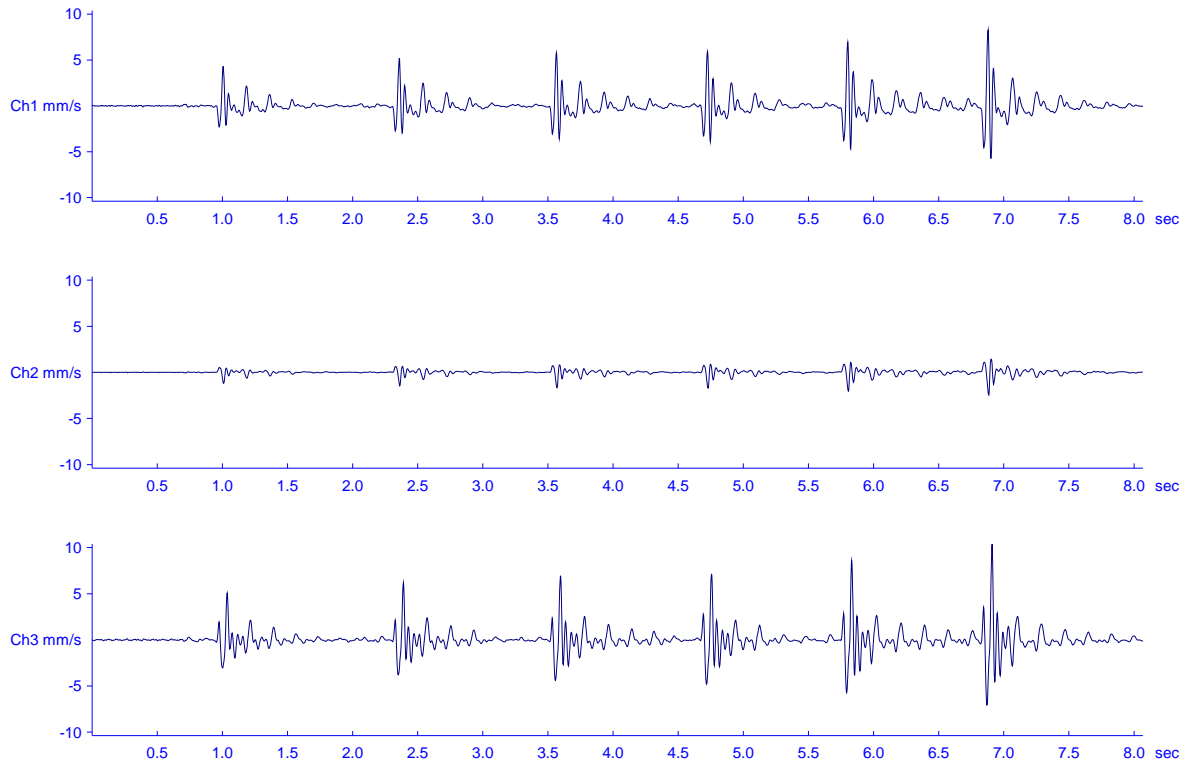


Bild 5.4a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 247: 11:13:51 Uhr)

$v_{x,max} = 8.28 \text{ mm/s}$, $v_{y,max} = 2.47 \text{ mm/s}$, $v_{z,max} = 10.4 \text{ mm/s}$

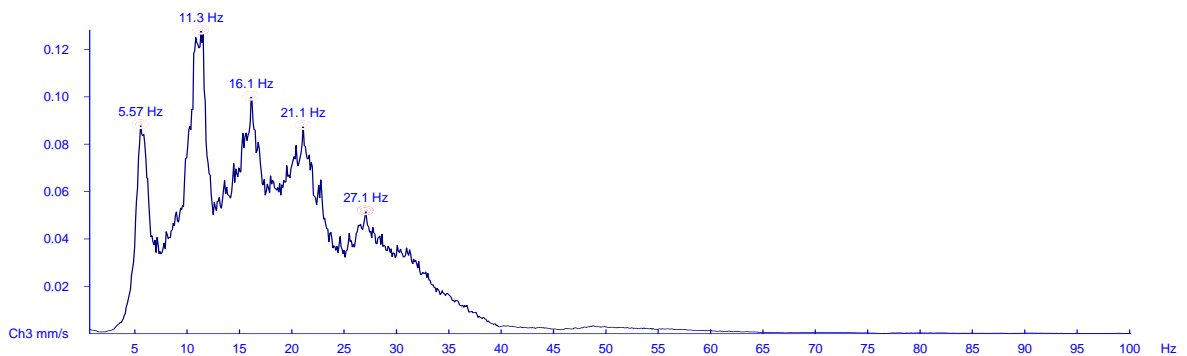


Bild 5.4b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.5 MP 5: Vorplatz 17 m

Bild 5.5a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Vorplatz in 17 m Entfernung vom Fundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 5 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 30 Hz.

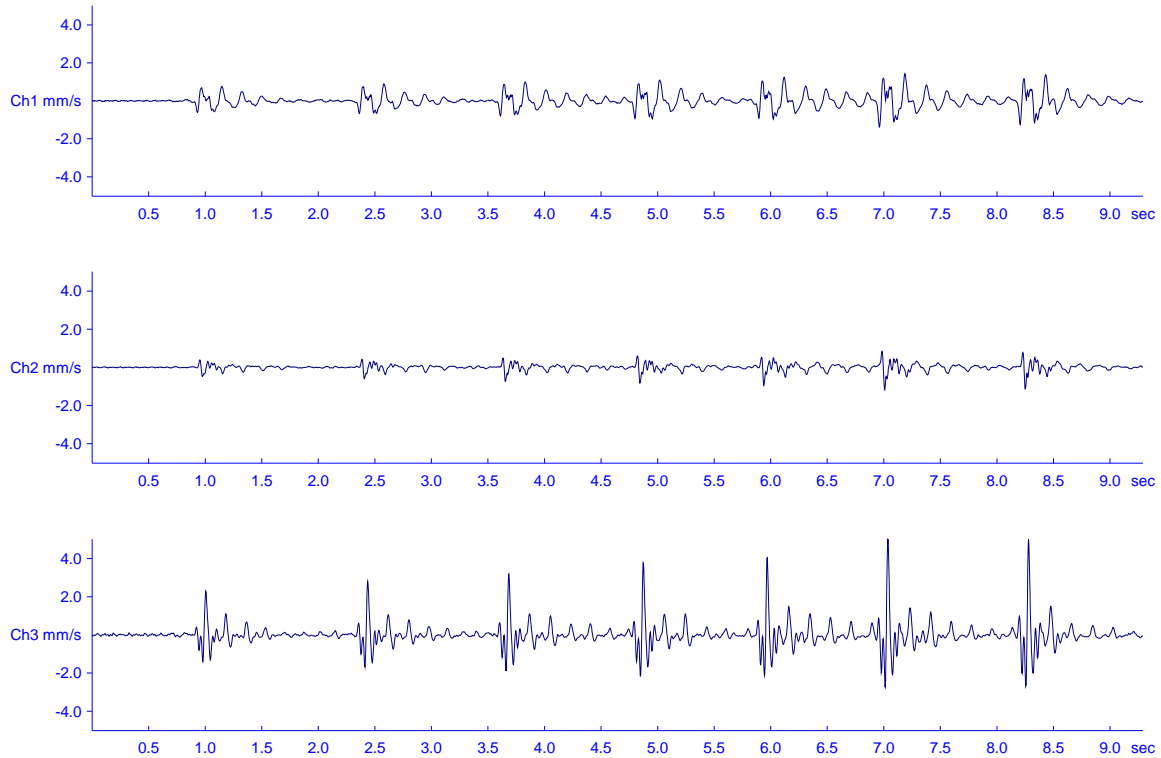


Bild 5.5a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 194: 11:18:51 Uhr)

$v_{x,max} = 1.43$ mm/s, $v_{y,max} = 1.16$ mm/s, $v_{z,max} = 5.02$ mm/s

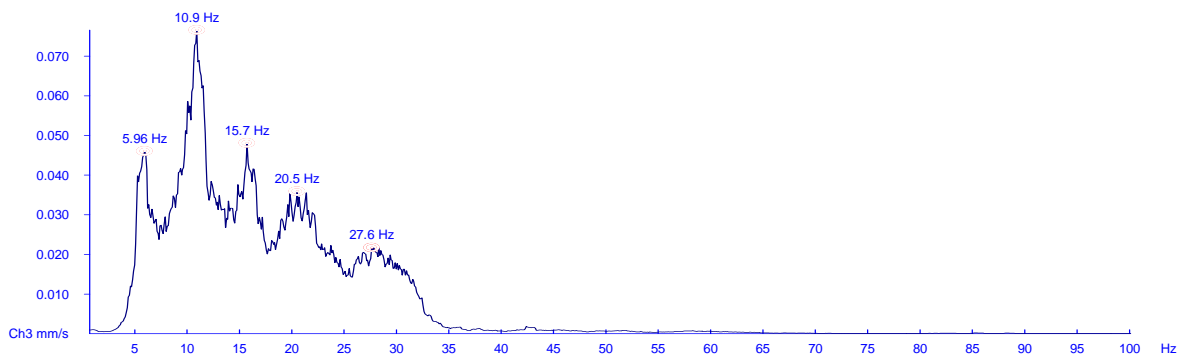


Bild 5.5b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.6 MP 6: Vorplatz 31 m

Bild 5.6a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Vorplatz in 31 m Entfernung vom Fundament. Die maximale Schwinggeschwindigkeit erreicht 2.7 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 20 Hz.

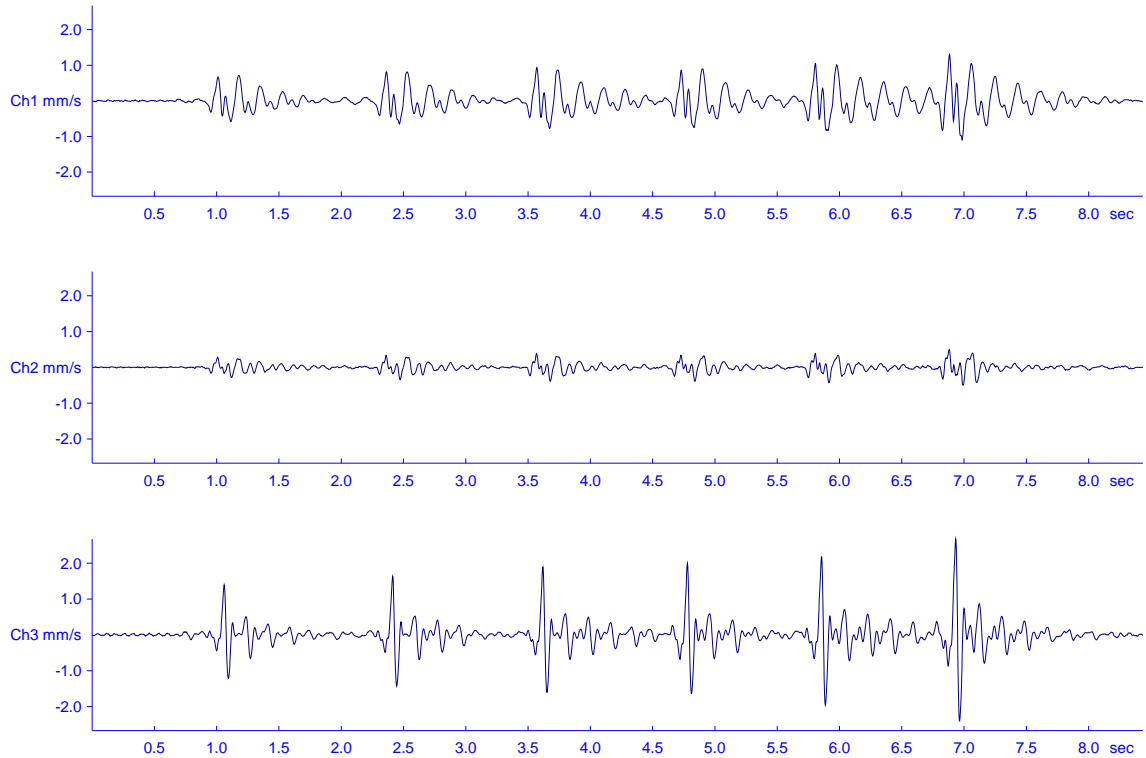


Bild 5.6a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 247: 11:13:51 Uhr)

$v_{x,max} = 1.30$ mm/s, $v_{y,max} = 0.501$ mm/s, $v_{z,max} = 2.67$ mm/s

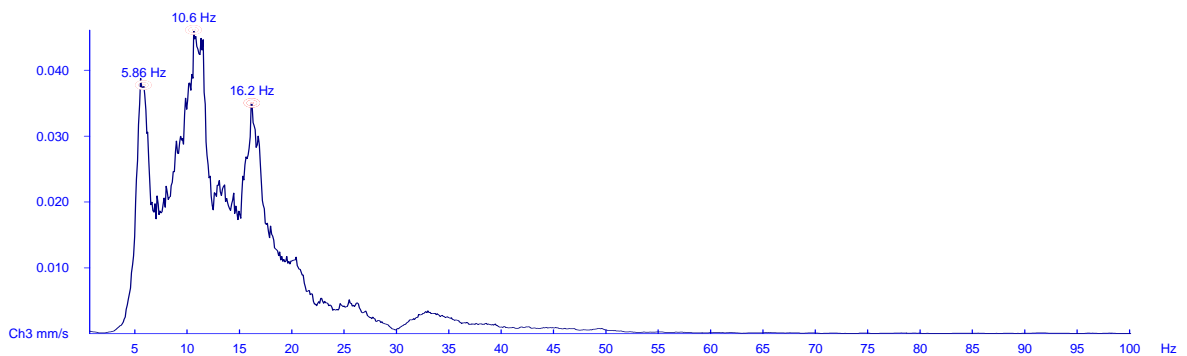


Bild 5.6b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

5.7 MP 7: Nachbargebäude

Bild 5.7a zeigt die stärkste Erschütterungs-Sequenz auf dem Kellerboden des Nachbargebäudes. Die maximale Schwingungsgeschwindigkeit erreicht 2.85 mm/s. Die dominante Frequenz liegt zwischen 5 und 30 Hz.

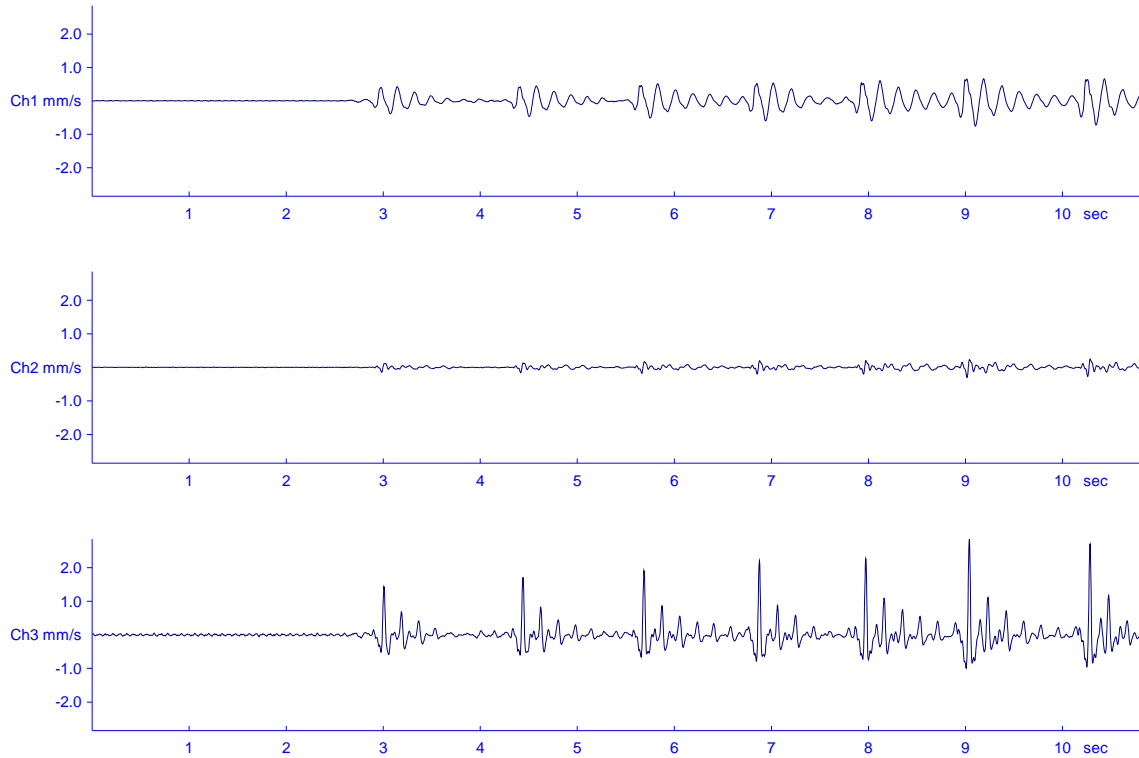


Bild 5.7a Stärkste Schwingungsaufzeichnung für X-, Y- und Z-Richtung (File 110: 11:18:51 Uhr)
 $v_{x,max} = 0.758$ mm/s, $v_{y,max} = 0.306$ mm/s, $v_{z,max} = 2.85$ mm/s

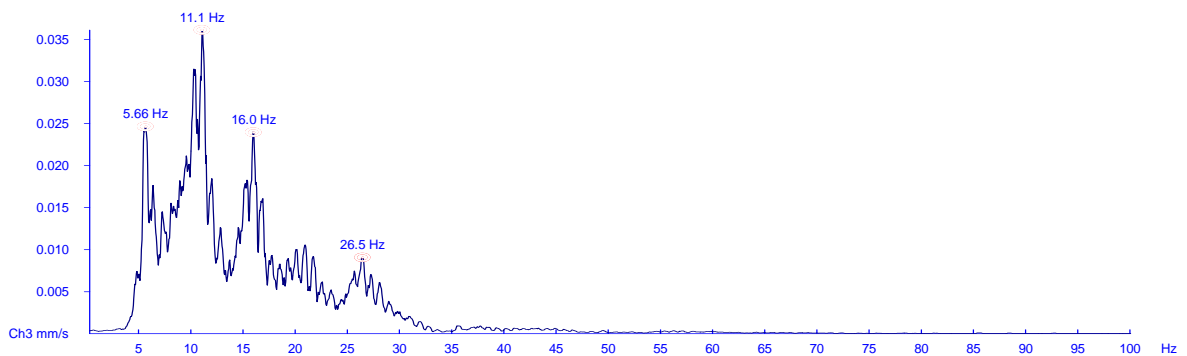


Bild 5.7b Amplitudenspektrum für Z-Richtung

6 Schallmessung

Bild 6.1 zeigt den Schallpegel im Keller des Nachbargebäudes von 11:00 bis 11:30 Uhr. Der Grundpegel liegt bei 57 dBA. Die einzelnen Spitzen stammen nicht vom Schmiedehammer sondern von Aktivitäten im Gebäude selbst. In Bild 6.2 und 6.3 sind Erschütterungsverlauf und Schallpegelverlauf für den gleichen Zeitausschnitt von 11 Sekunden dargestellt. Durch die Erschütterungen des Schmiedehammers wird kein sekundärer Schall erzeugt, der höher ist als der bereits vorhandene Schallpegel im Keller des Nachbarhauses.

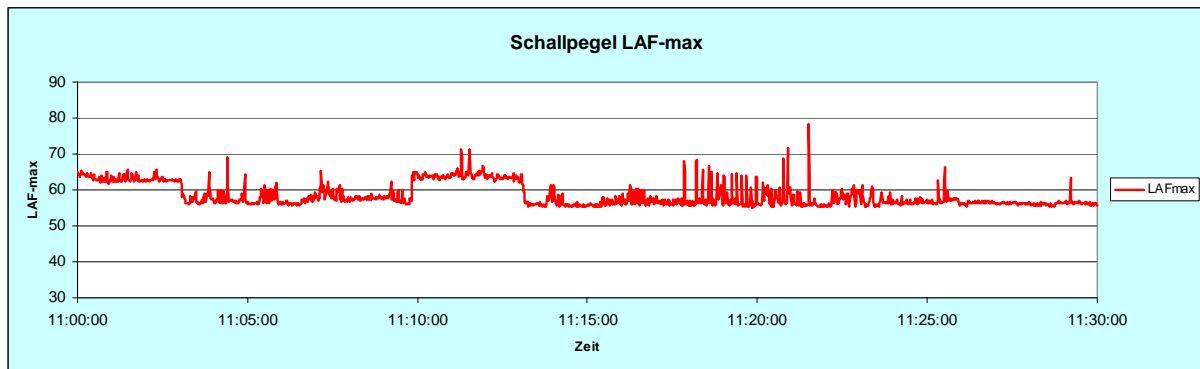


Bild 6.1 Schallpegel im Keller des Nachbargebäudes

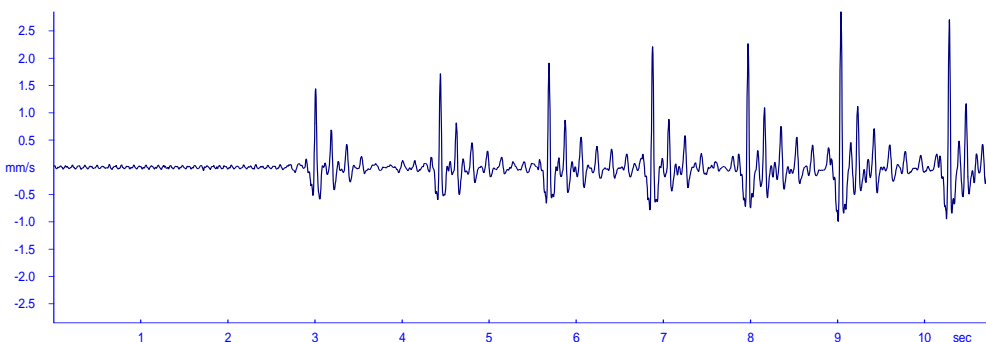


Bild 6.2 Erschütterungsverlauf von 11:18:50 bis 11:19:01

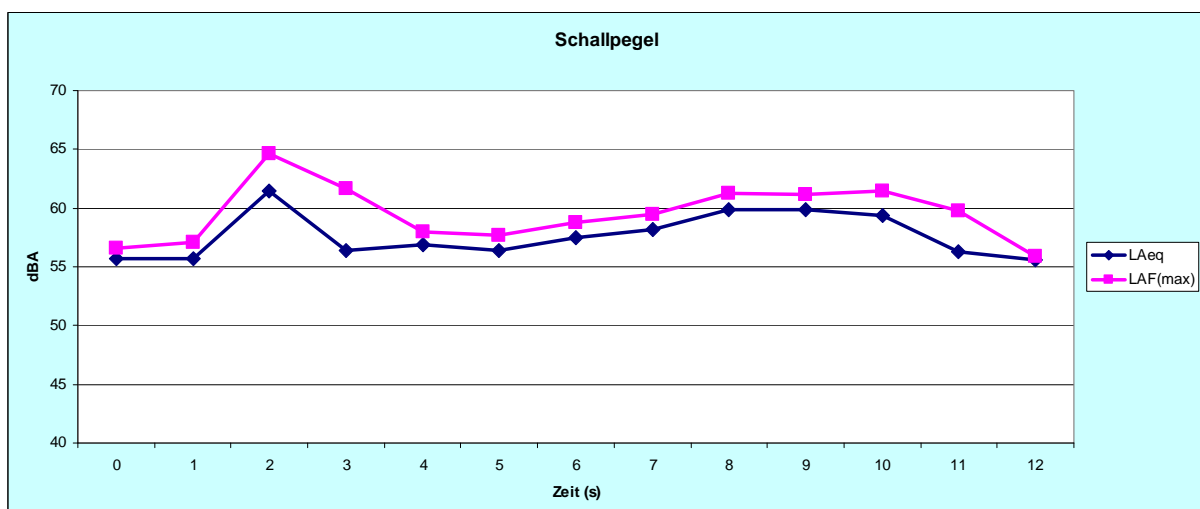


Bild 6.3 Schallpegel während des Ereignisses von Bild 6.2

7 Auswertung der Daten

Bild 7.1 zeigt die Maximalwerte der Erschütterungen in Funktion der Distanz von der Mitte des Schmiedehammerfundamentes. Die Messwerte korrespondieren sehr gut mit dem theoretischen Abminderungsgesetz:

$$v = v_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^m$$

mit: $v_0 = 35 \text{ mm/s}$
 $r_0 = 4 \text{ m}$
 $m = -1.1$

Der Wert für MP 2 und MP 3 (5 m bzw. 6 m) liegen tiefer als die theoretische Kurve. Dies hängt damit zusammen, dass diese Punkte sehr nahe beim Fundament liegen. Korrekterweise müsste man für diese Punkte die schräge Distanz einsetzen und nicht die horizontale Distanz.

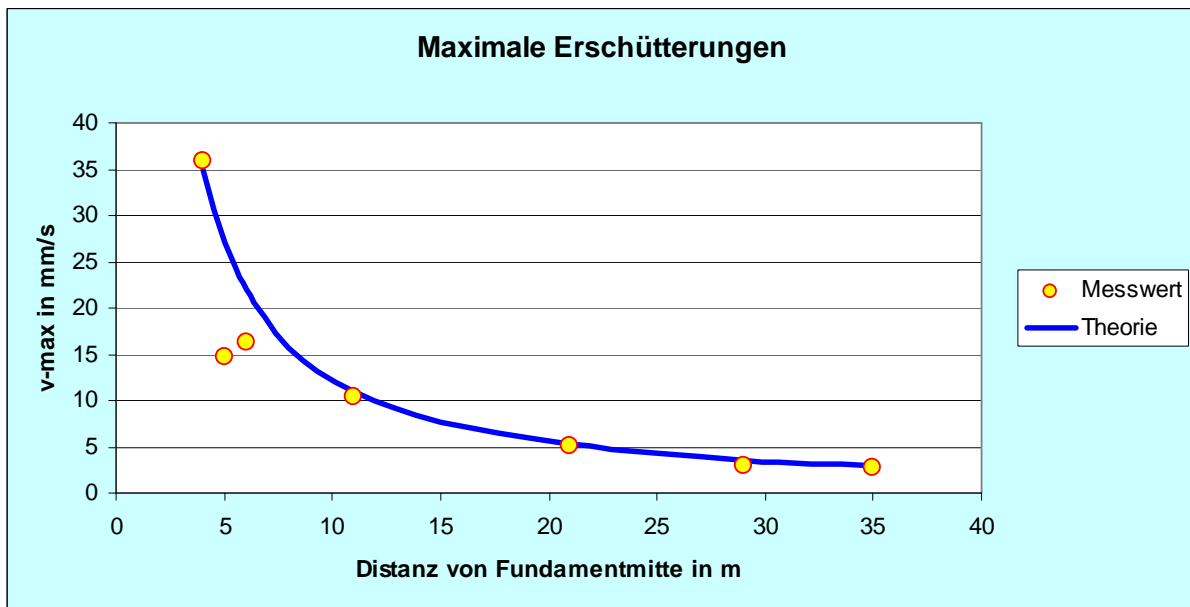


Bild 7.1 Maximale Erschütterungen in Funktion der Distanz vom Schmiedehammer

Bild 7.1 zeigt, dass die Abminderung der Erschütterungen sehr gut dem theoretischen Ansatz mit der exponentiellen Abminderung mit $m = -1.1$ entspricht.

Der Messwert im Nachbargebäude liegt nicht viel tiefer als der Frei-Feld-Wert. Offensichtlich ergibt sich durch die Ankopplung zwischen Boden und Gebäude keine starke Reduktion.

8 Erschütterungsprognose

Die Messdaten von Bild 7.1 lassen sich – wie in Bild 8.1 dargestellt – zusammen mit dem projizierten Tunnel darstellen. Die rote Linie gibt die Erschütterungen an der Oberfläche als Funktion der Distanz vom Schmiedehammer-Fundament an. Diese Werte gelten auch für die Tunnelsohle. Allerdings dürfte der Wert für die dem Schmiedehammer zugewandte Ecke in Wirklichkeit etwas tiefer sein als im Diagramm angegeben, da die schiefe Distanz und nicht der horizontale Abstand massgebend ist.

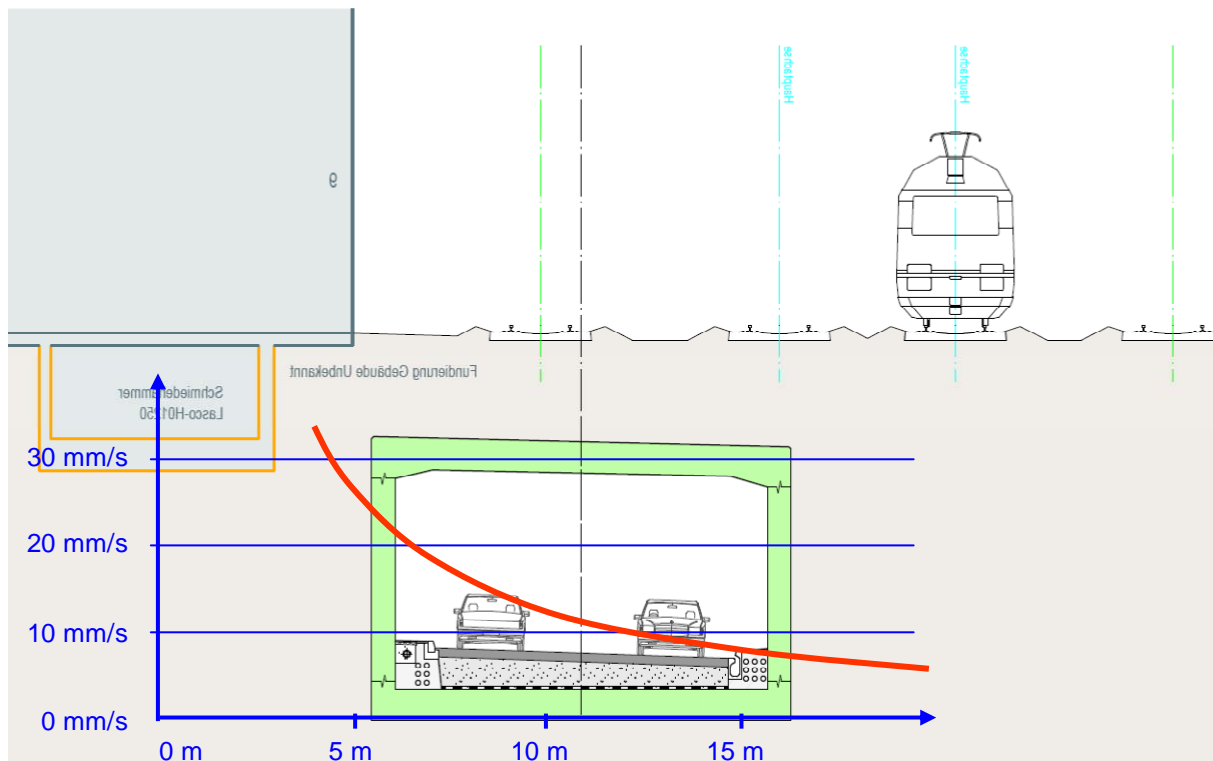


Bild 8.1 Darstellung der Frei-Feld-Erschütterungen zusammen mit dem projizierten Tunnel

Aufgrund dieser Überlegungen kommt man zum Schluss, dass die maximalen Erschütterungen am linken Tunnelrand bei 15 mm/s liegen wird und am rechten Tunnelrand bei 8 mm/s. Da sich der Tunnel als starrer Körper bewegt werden sich die Erschütterungen ausgleichen, d.h. es dürfte sich ein maximaler Wert von 10 bis 13 mm/s ergeben.

Dieser Ausgleich wirkt natürlich auch in Tunnellängsrichtung, da der Tunnel auch in Längsrichtung wie ein steifer Balken wirkt. Nimmt man an, dass die für den Ausgleich massgebende Länge bei 20 m liegt, ergibt sich ein Mittelwert von **8 bis 10 mm/s**.

Ein Ankopplungsfaktor wird in der Prognose bewusst nicht eingeführt, da bei den Messungen im Nachbargebäude nur eine sehr geringe Reduktion infolge Ankopplungseffekts festgestellt worden ist.

9 Beurteilung

9.1 Erschütterungen

Für die Beurteilung der Erschütterungen gilt die Norm SN 640 312a. Dabei sind die Empfindlichkeit des Bauwerks und die Häufigkeit der Erschütterungen festzulegen.

- Tunnels im Lockergestein gehören zu Empfindlichkeitsklasse 2, d.h. „Wenig empfindlich“.
- Die Zuordnung der Häufigkeitsklasse basiert auf den Angaben zum zeitlichen Einsatz der Hammerschmiede von Herrn Flükiger (Flükiger & Co): „Die Maschine ist praktisch immer in Betrieb“. Bei dauerndem Einsatz des Schmiedehammers ist die Häufigkeitsklasse „Permanent“ zu wählen. Für die Häufigkeitsklasse „Permanent“ gilt der Grenzwert 6 mm/s.

Daraus ergibt sich, dass bei „Permantem“ Betrieb der Hammerschmiede die Grenzwerte der Norm SN 640 312a nicht eingehalten sein werden.

9.2 Abgestrahlter Schall

Die Messungen zeigen, dass die dominanten Frequenzen unter 30 Hz liegen. Erschütterungen unter 30 Hz erzeugen keinen hörbaren Schall.

9.3 Weiteres Vorgehen

Für die weitere Planung ist Folgendes zu beachten:

- Die Erschütterungen gefährden den Tunnel nicht in seiner Tragsicherheit sondern es könnten sich Risse bilden. Der Tunnel ist so auszubilden, dass durch die Erschütterungen keine störenden Risse entsteht.
- Die Fa. Flükiger & Co plant den Einbau von weicheren Federn. Damit könnte sich die Situation etwas entschärfen.

Zürich, 22.6.2011

ZIEGLER CONSULTANTS

Dr. A. Ziegler