

Eisenbahnerschütterungen in Hochhäusern

Cosmas Savary
Ziegler Consultants
Gladbachstr. 121
CH-8044 Zürich
savary@z-c.ch
Tel +41 44 260 70 13

1 Einführung

Das Verständnis der Ausbreitung von Eisenbahnerschütterungen in Einfamilienhäusern und Mehrfamilienhäusern ist soweit vorhanden, dass Modellrechnungen mit vernünftiger Genauigkeit möglich sind. Für Hochhäuser ist die Lage weniger klar. In diesem Vortrag werden Messungen von Eisenbahnerschütterungen in Hochhäusern analysiert und nach verschiedenen Kriterien ausgewertet mit dem Ziel, die Ausbreitung von Erschütterungen in Hochhäusern besser zu verstehen und auch prognostizieren zu können. Im Vordergrund stehen die empirische Ermittlung von:

- Transferfaktoren oder -spektren für die Berechnung von Deckenschwingung in höheren Stockwerken,
- Schwingungen in horizontaler Richtung
- Ankoppelungsspektren für Hochhäuser

2 Messungen

2.1 Gebäude

2.1.1 Gebäude Bahnhof Altstetten

Das Gebäude ist ein 10 stöckiges Wohnhaus aus dem Jahre 1966, entworfen von Max Vogt, Chefarchitekt der SBB Kreisdirektion III.

Das ganze Gebäude ist in Sichtbeton gehalten. Das Gebäude wurde kürzlich renoviert und hat im Jahre 2005 den Wakkerpreis für die hochstehende Baukultur erhalten.

Die Sensoren wurden als vertikale Reihe im teilweise offenen Treppenhaus am Deckenrand auf der Seite der Bahngleise aufgestellt. Alle Sensoren messen in vertikaler Richtung, im obersten Stockwerk wurden auch die horizontalen Achsen gemessen.

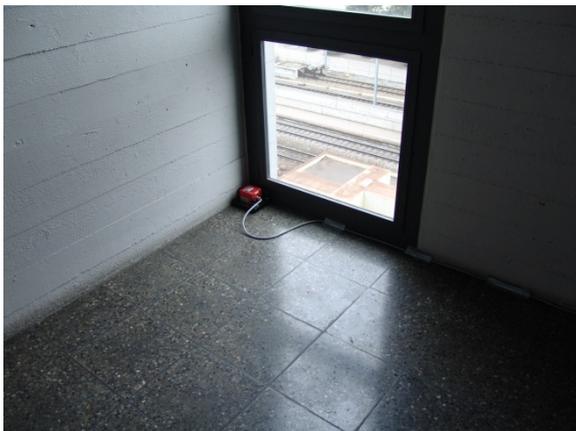


Bild 2.1.1-4 Ansicht eines vertikalen Sensors im Treppenhaus

Die Distanz zu den Bahngleisen beträgt zwischen 6 und 52 m. Es verkehren auf allen Gleisen sehr viele S-Bahn Züge, Personenzüge und Güterzüge.



Bild 2.1.1-1 Gebäude Bahnhof Altstetten



Bild 2.1.1-2 Anordnung der Sensoren (Ansicht von Seite Gleis)

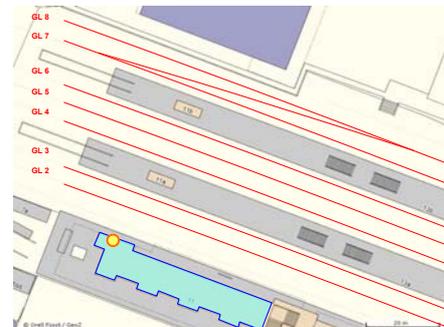


Bild 2.1.1-3 Situation

2.1.2 Gebäude „Obsidian“

Das 15-stöckige Gebäude beim Bahnhof Altstetten ist ein Bürogebäude aus dem Jahre 2005, entworfen vom Planungsteam Baumschlager und Eberle aus Vorarlberg.

Die vertikal messenden Sensoren wurden im Erschliessungskern auf der dem Bahngleise zugewandten Seite des Gebäudes beim Eingang zum Treppenhaus aufgestellt. Im obersten Stockwerk wurde ein triaxialer Sensor zur Messung der Horizontalbewegung verwendet.

Die Distanz zu den Bahngleisen beträgt zwischen 11 und 15 m. Auf den beiden Gleisen verkehren praktisch ausschliesslich S-Bahn Züge.

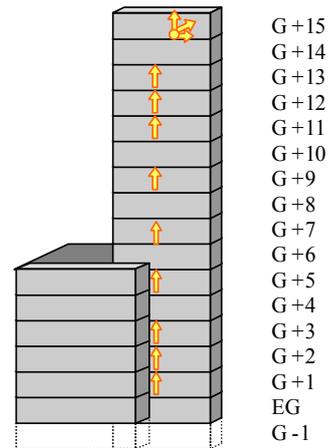


Bild 2.1.2-1 Gebäude „Obsidian“ – Anordnung der Sensoren

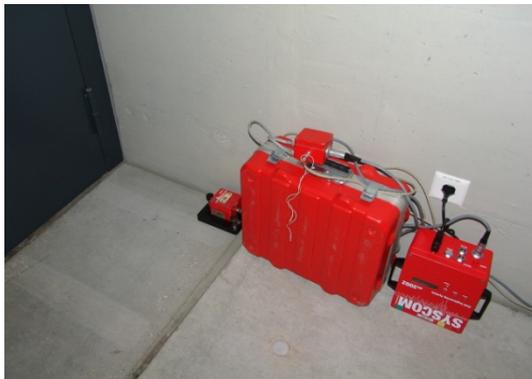


Bild 2.1.2-2 Ansicht eines vertikalen Sensors im Treppenhaus

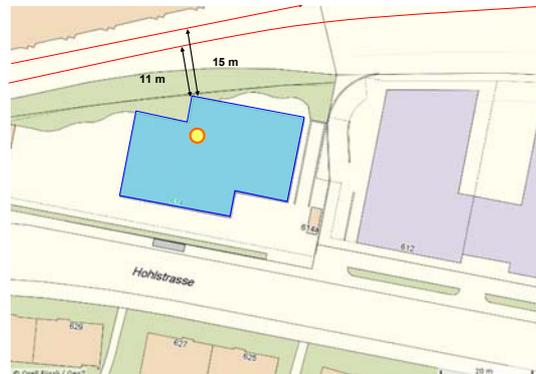


Bild 2.1.2-3 Situation mit Abstand der Gleise

2.1.3 Gebäude „Andreasark“

Das 13 stöckige Bürogebäude im Gebiet „Leutschenbach“ (Zürich Oerlikon), entworfen von Rolf Läubli und der Karl Steiner AG steht kurz vor der Fertigstellung.

Für dieses Gebäude wurde nach dem Start der Bauarbeiten eine Prognose für Erschütterung und Körperschall erstellt.

Die Sensoren der vertikalen Linie wurden im Erschliessungskern beim Eingang zum Treppenhaus aufgestellt. In diesem Gebäude war es auch möglich, in mehreren Stockwerken in Deckenmitte zu messen. Im obersten Stockwerk wurde ein triaxial messender Sensor in Deckenmitte installiert. Auch eine Messung im Freifeld konnte durchgeführt werden.



Bild 2.1.3-4 Ansicht eines vertikalen Sensors im Treppenhaus



Bild 2.1.3-5 Ansicht eines vertikalen Sensors in Raummitte



Bild 2.1.3-1 Gebäude Andreasark

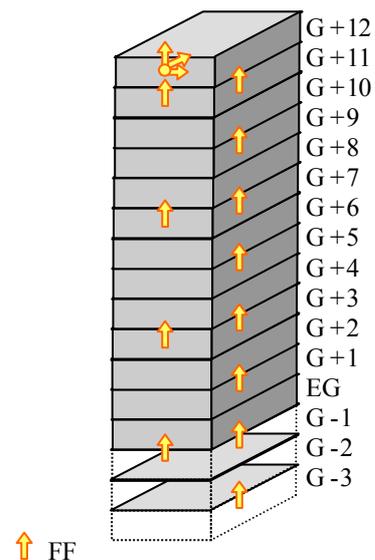


Bild 2.1.3-2 Anordnung der Sensoren (Ansicht von Seite Gleis)



Bild 2.1.3-3 Situation mit Abstand der Gleise

Die Distanz zu den Bahngleisen beträgt 35 m. Die Bahnlinie verläuft auf einem etwa 5 m hohen Damm. Es verkehren S-Bahn Züge und 1-2 Güterzüge pro Tag.

2.1.4 Gebäude „Haltaweg“

Das Gebäude „Haltaweg“ ist ein 10 stöckiges Wohnhaus.

Je ein uniaxialer Sensor wurde am Fundament, im 3. Und im 7. OG in Deckenmitte aufgestellt. Die Messung erfolgte im Rahmen einer Immissionsprognose für eine geänderte Streckenführung.



Bild 2.1.4-1 Gebäude Haltaweg



Bild 2.1.4-4 Ansicht des vertikalen Sensors am Fundament

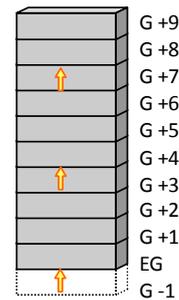


Bild 2.1.4-2 Anordnung der Sensoren



Bild 2.1.4-5 Ansicht des vertikalen Sensors im 7. OG in Deckenmitte

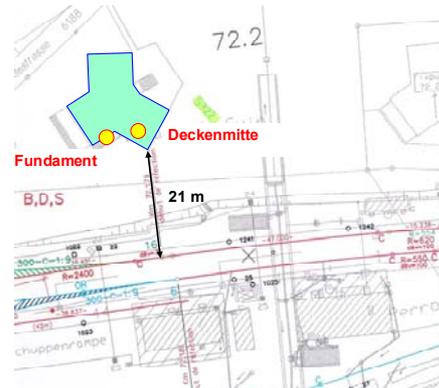


Bild 2.1.4-3 Situation mit Abstand der Gleise

Die Distanz zu den Bahngleisen beträgt 21 m. Es verkehren S-Bahnzüge, Personenzüge und Güterzüge.

2.1.5 Gebäude „Blumenweg“

Das Gebäude „Blumenweg“ ist ein 5 stöckiges Wohnhaus.

Je ein triaxialer Sensor wurde im untersten Stockwerk (EG) und im obersten Stockwerk (5 OG) am Deckenrand aufgestellt.



Bild 2.1.5-4 Ansicht des triaxialen Sensors am Deckenrand im 5. OG

Die Distanz zu den Bahngleisen beträgt 150 m. Es verkehren S-Bahn Züge, Personenzüge und viele Güterzüge.



Bild 2.1.5-1 Gebäude Blumenweg

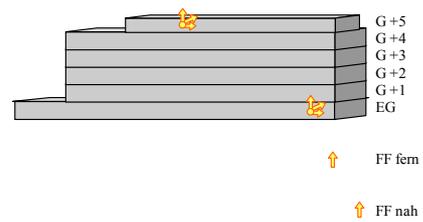


Bild 2.1.5-2 Anordnung der Sensoren (Ansicht von Seite Gleis)



Bild 2.1.5-3 Situation mit Abstand der Gleise

2.2 Messresultate - vertikale Richtung

2.2.1 Bahnhof Altstetten

Die Bilder 2.2.1-1 und 2 zeigen die Vorbeifahrt eines Zuges im Untergeschoss (G -1) und im zweitobersten Stockwerk (G +8) in vertikaler Richtung. Die Erschütterung im obersten Stockwerk ist kaum stärker als im UG.

Die Erschütterungen in horizontaler Richtung sind bei diesem Gebäude kein Problem. Sie liegen in der gleichen Grössenordnung wie die Erschütterungen in vertikaler Richtung. Die Eigenfrequenz des Gebäudes ist in Längsrichtung bei 3.2 Hz, in Querrichtung bei 2.7 Hz

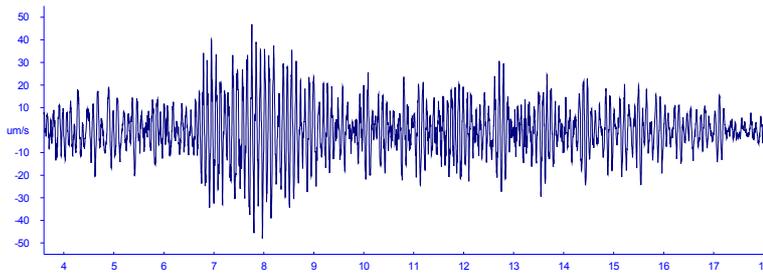


Bild 2.2.1-1 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugdurchfahrt im 1. UG (G -1)

$$V_{\text{peak}} = 48 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 11 \mu\text{m/s}$$

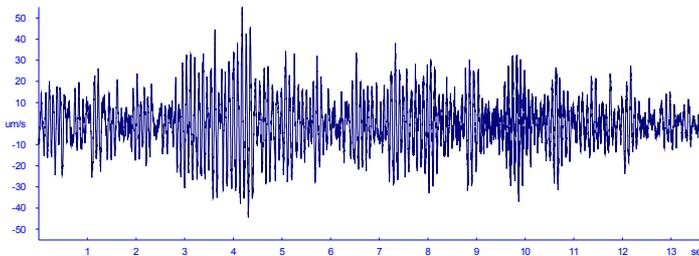


Bild 2.2.1-2: Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugdurchfahrt im 8. OG (G +8)

$$V_{\text{peak}} = 55.1 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 12.5 \mu\text{m/s}$$

Bild 2.2.1-3 zeigt eine Darstellung des Mittelwerts von v_{RMS} von allen Zugdurchfahrten, gemessen im Treppenhaus. Eine Verstärkung der Erschütterungen um den Faktor von 1.3 ist erst ab dem 5. OG zu beobachten.

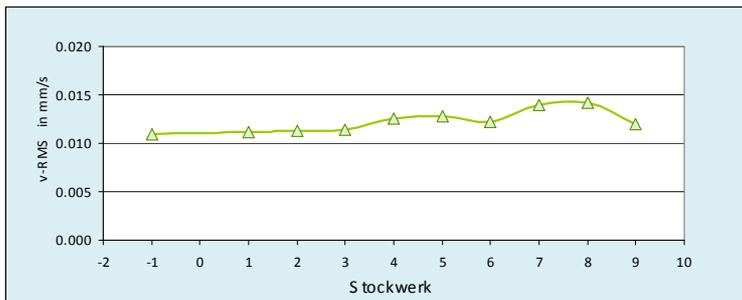


Bild 2.2.1-3:
Mittelwert der RMS Werte von allen Zugdurchfahrten, gemessen am Deckenrand in Abhängigkeit des Stockwerks

Bild 2.2.1-4 zeigt die Spektren auf den verschiedenen Etagen. Eine leichte Zunahme erfolgt in den Bereichen um 12.5 Hz, eine stärkere Zunahme bei 25 Hz.

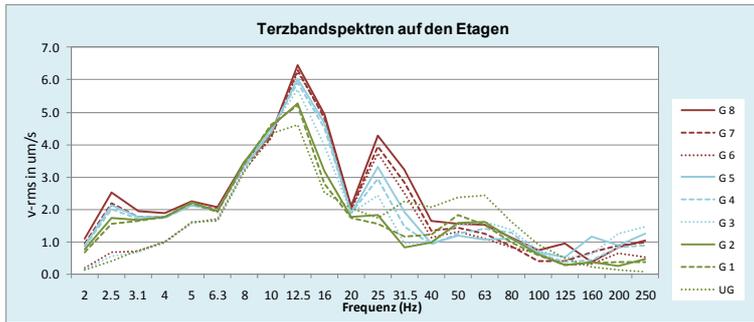


Bild 2.2.1-4:
Mittelwert der Terzbandspektren von allen Zugsdurchfahrten, gemessen am Deckenrand.

rot: obere Etagen,
blau: mittlere Etagen,
grün: untere Etagen

2.2.2 Gebäude Obsidian

Die Bilder 2.2.2-1 und 2 zeigen die Vorbeifahrt eines Zuges im ersten Stockwerk (G +1) und im obersten Stockwerk (G +15) in vertikaler Richtung mit der gleichen Skalierung. Die Erschütterung im obersten Stockwerk ist etwa anderthalb mal so stark.

Die Erschütterungen in horizontaler Richtung sind etwa gleich stark wie die Erschütterungen in vertikaler Richtung. Die Eigenfrequenz des Gebäudes in den beiden horizontalen Richtungen liegt bei ca. 0.9 Hz und wird nicht angeregt.

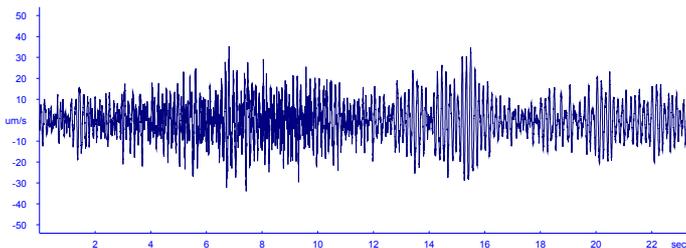


Bild 2.2.2-1 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugsdurchfahrt im 1. OG (G +1)

$$V_{\text{peak}} = 35.4 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 9.1 \mu\text{m/s}$$

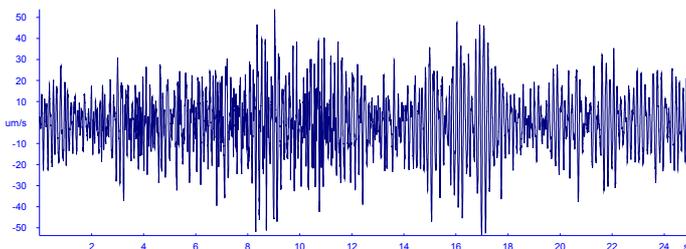


Bild 2.2.2-2 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugsdurchfahrt im 15. OG (G +15)

$$V_{\text{peak}} = 53.7 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 14.9 \mu\text{m/s}$$

Bild 2.2.2-3 zeigt eine Darstellung des Mittelwerts von V_{RMS} von allen Zugsdurchfahrten, gemessen im Erschliessungskern, bei der Türe zur Treppe. Die Verstärkung der Erschütterungen vom EG zum obersten Geschoss beträgt in diesem Gebäude 50 %.

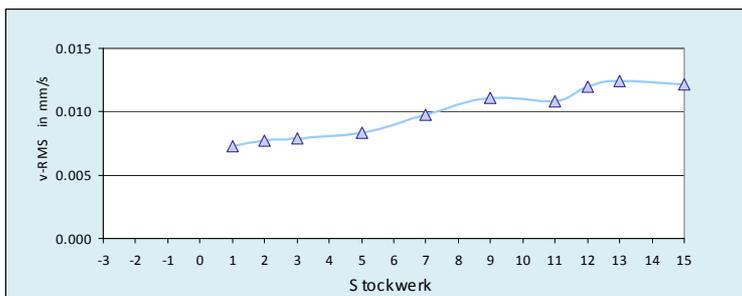


Bild 2.2.2-3:
Mittelwert der RMS Werte von allen Zugsdurchfahrten, gemessen am Deckenrand in Abhängigkeit des Stockwerks

Bild 2.2.2-4 zeigt die Spektren auf den verschiedenen Etagen. Die Zunahme erfolgt in den Bereichen um 8 Hz, 16 Hz und 25 Hz, wobei die Zunahme bei 16 Hz doppelt so stark ist wie bei 8 und bei 25 Hz.

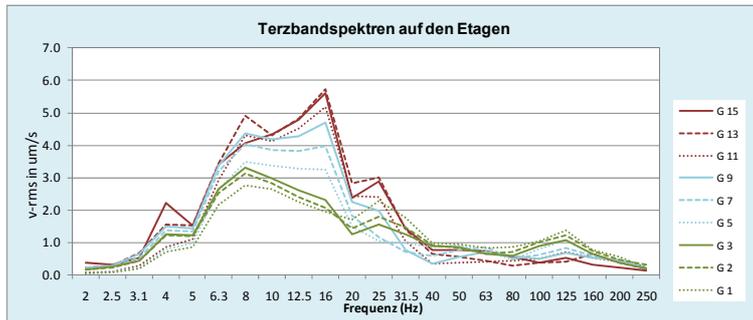


Bild 2.2.2-4:
Mittelwert der Terzbandspektren von allen Zugdurchfahrten, gemessen am Deckenrand.
rot: obere Etagen,
blau: mittlere Etagen,
grün: untere Etagen

2.2.3 Gebäude Andreaspark

Die Bilder 2.2.3-1 und 2 zeigen die Vorbeifahrt eines Zuges im untersten Stockwerk (G -3) und im zweitobersten Stockwerk (G +11) mit der gleichen Skalierung. Die Erschütterung im zweitobersten Stockwerk ist doppelt so stark.

Die Erschütterungen in horizontaler Richtung sind auch bei diesem Gebäude kein Problem. Sie liegen in der gleichen Größenordnung wie die Erschütterungen in vertikaler Richtung. Die Eigenfrequenz des Gebäudes ist in Längsrichtung bei 1.3 Hz, in Querrichtung bei 0.9 Hz

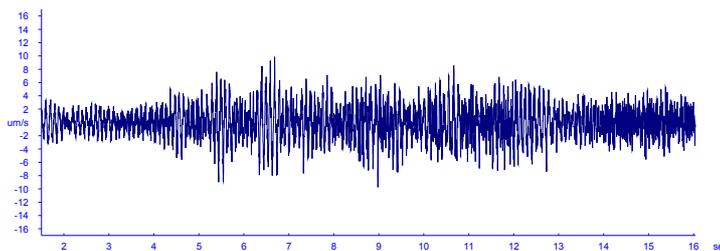


Bild 2.2.3-1 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugdurchfahrt im 3. UG (G -3)

$$V_{\text{peak}} = 9.8 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 2.3 \mu\text{m/s}$$

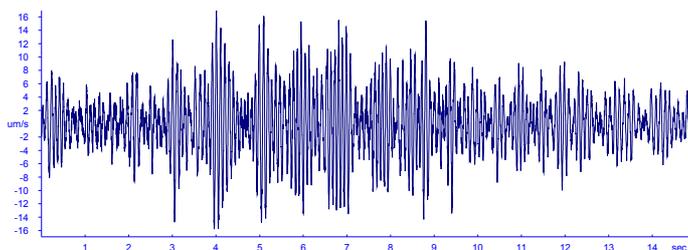


Bild 2.2.3-2 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugdurchfahrt im 11. OG (G +11)

$$V_{\text{peak}} = 18.3 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 4.7 \mu\text{m/s}$$

Bild 2.2.3-3 zeigt eine Übersicht der RMS Werte von allen Zugdurchfahrten, gemessen im Erschliessungskern, bei der Türe zur Treppe. Bei diesem Gebäude zeigt sich sogar eine Verdoppelung der Erschütterungen im obersten Geschoss gegenüber dem Fundament.

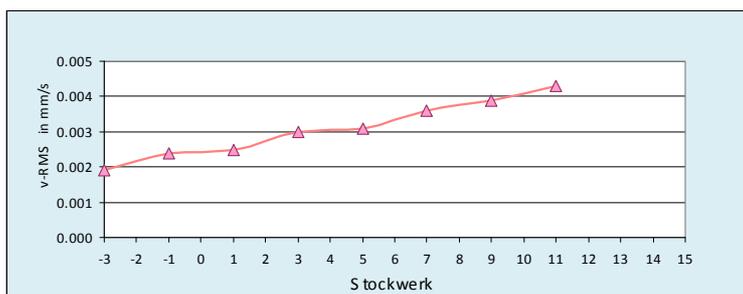


Bild 2.2.3-3:
Mittelwert der RMS Werte von allen Zugdurchfahrten, gemessen am Deckenrand in Abhängigkeit des Stockwerks

Bild 2.2.3-4 zeigt die Spektren auf den verschiedenen Etagen. Die Zunahme erfolgt ausschliesslich im Bereich um 10 Hz.

Eine Analyse dieser Verstärkung findet sich im Kapitel 3.1.

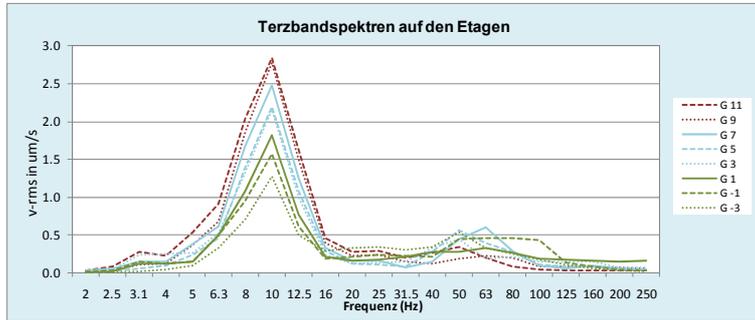


Bild 2.2.3-4:
Mittelwert der Terzbandspektren von allen Zugsdurchfahrten, gemessen am Deckenrand.
rot: obere Etagen,
blau: mittlere Etagen,
grün: untere Etagen

In diesem Gebäude konnten auch Messungen in Deckenmitte durchgeführt werden. Bild 2.2.3-5 zeigt die Vorbeifahrt des gleichen Zuges wie bei 2.2.3.-1 und 2 in Deckenmitte im obersten Stockwerk (G +12). Die maximale Schwinggeschwindigkeit v_{max} ist 30 mal stärker als am Fundament und liegt knapp unter der Wahrnehmungsgrenze.

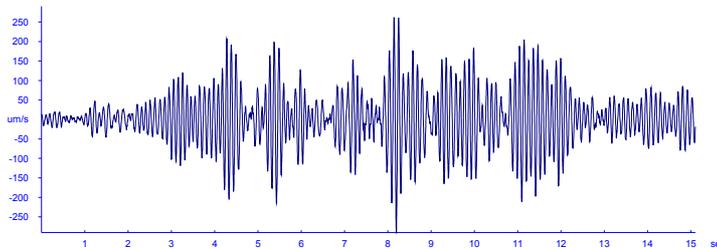


Bild 2.2.3-5 :
Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugsdurchfahrt im 12. OG (G +12) in Deckenmitte

$$V_{peak} = 290 \mu\text{m/s}$$

$$V_{RMS} = 69 \mu\text{m/s}$$

Bild 2.2.3-6 zeigt, dass die maximale Schwinggeschwindigkeit in Deckenmitte nicht linear, sondern sprunghaft zunimmt. Die Anregung am Deckenrand nimmt – wie oben gesehen – zu mit zunehmender Höhe. Die Reaktion der Decke auf die Anregung ist abhängig von der Eigenfrequenz der Decke und der Dämpfung. Die beiden Phänomene – Zunahme in der Höhe und Deckenverstärkung können nur durch gleichzeitige Messung am Deckenrand und in Deckenmitte auseinandergehalten werden.

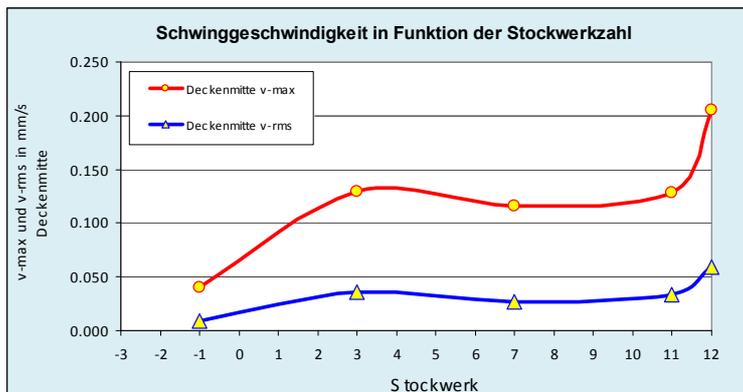


Bild 2.2.3-6:
Schwinggeschwindigkeiten v_{max} und v_{RMS} in Funktion des Stockwerks, gemessen in Deckenmitte

Abbildung 2.2.3-7 zeigt das gemessene Transferspektrum Fundament – Geschossdecke und im Vergleich dazu die im VIBRA-2 Modell verwendeten Transferspektren. Die Eigenfrequenzen der Decken betragen 24 Hz für das Untergeschoss (G -1), 12-13 Hz für die normalen Geschossdecken (G +3, G +7 und G +9) sowie 5.8 Hz für das oberste Geschoss (G +12).

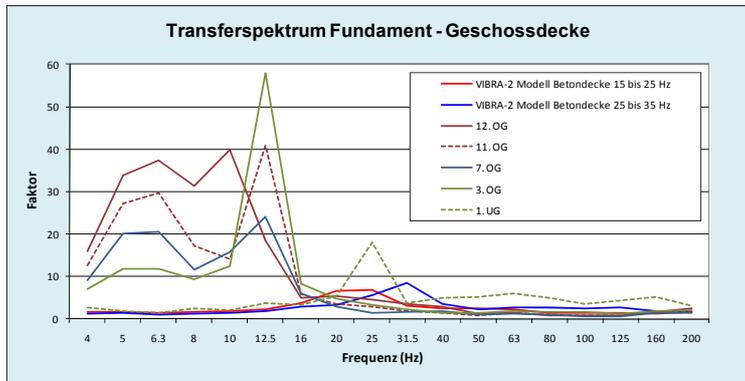


Bild 2.2.3-7: Transferspektren Fundament – Geschossdecke im Vergleich mit den Normspektren aus VIBRA-2

rot: obere Etagen,
blau: mittlere Etagen,
grün: untere Etagen

2.2.4 Gebäude Haltaweg

Die Bilder 2.2.4-1 und 2 zeigen die Vorbeifahrt eines Zuges im 3. und 7. Stockwerk (G +3 und G +7) mit der gleichen Skalierung. Die Erschütterung im 7. OG Stockwerk ist 40 % stärker.

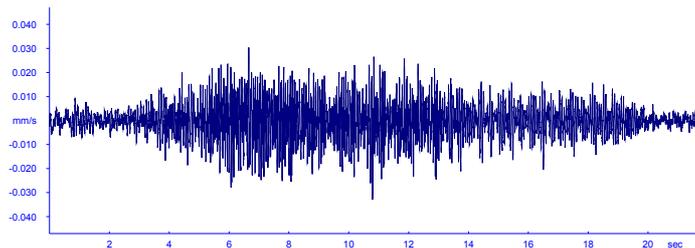


Bild 2.2.4-1 : Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugsdurchfahrt im 3. OG

$$V_{\text{peak}} = 33 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 7 \mu\text{m/s}$$

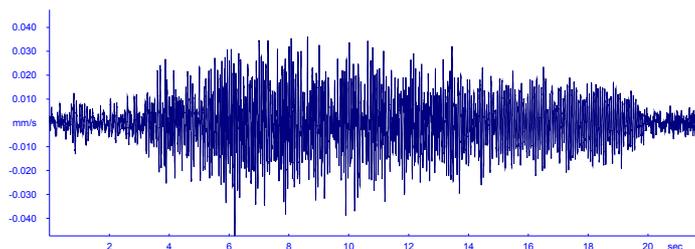


Bild 2.2.4-2 : Zeitverlauf der Erschütterung bei einer Zugsdurchfahrt im 7. OG

$$V_{\text{peak}} = 47 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 10 \mu\text{m/s}$$

Bild 2.2.4-3 zeigt die Spektren auf den 3 Etagen. Die Zunahme erfolgt ausschliesslich im Bereich um 12.5 - 16 Hz.

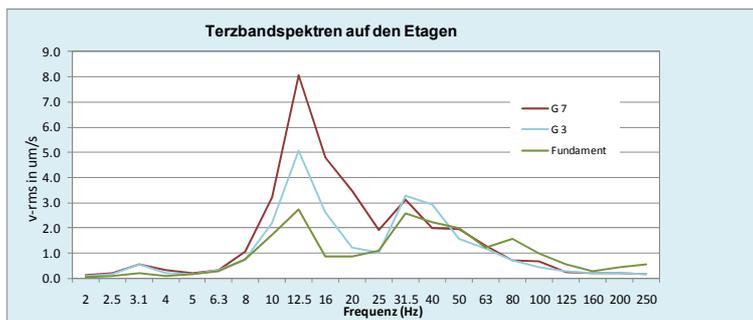


Bild 2.2.4-3: Mittelwert der Terzbandspektren von allen Zugsdurchfahrten, gemessen am Deckenrand.

rot: obere Etagen,
blau: mittlere Etagen,
grün: untere Etagen

2.3 Messresultate - horizontale Richtung

2.3.1 Gebäude Blumenweg

Die Bilder 2.3.1-2 und 3 zeigen die Vorbeifahrt eines Zuges am Fundament (EG) und im obersten Stockwerk (G +5) in horizontaler Richtung mit der gleichen Skalierung. Die Erschütterungen im 5. OG sind etwa 6 mal stärker. Es wurden Erschütterungen bis 2 mm/s in horizontaler Richtung gemessen. Diese werden von den Bewohnern als störend empfunden.

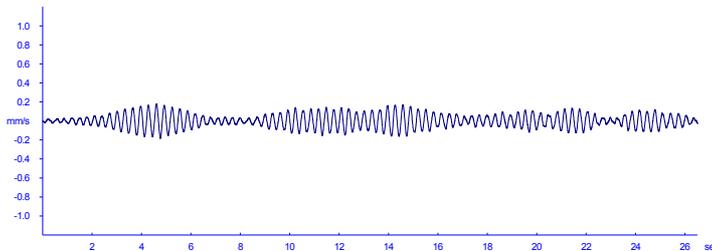


Bild 2.3.1-1 :
Zeitverlauf der Erschütterung
bei einer Zugsdurchfahrt am
Fundament (EG) in
horizontaler Richtung

$$V_{\text{peak}} = 185 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 68 \mu\text{m/s}$$

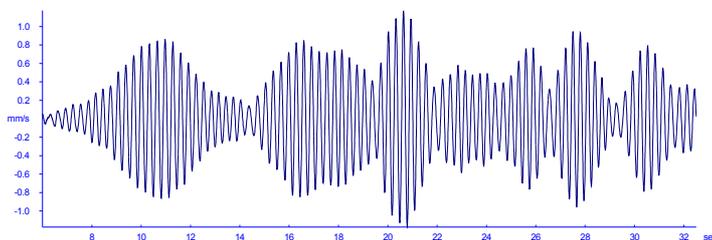


Bild 2.3.1-2 :
Zeitverlauf der Erschütterung
bei einer Zugsdurchfahrt im
5. OG (G +5) in horizontaler
Richtung

$$V_{\text{peak}} = 1117 \mu\text{m/s}$$

$$V_{\text{RMS}} = 420 \mu\text{m/s}$$

Das Bild 2.3.1-3 zeigt die Terzbandspektren in den beiden horizontalen Richtungen (quer und längs zum Bahngleise – gleichzeitig auch quer und Längsachse des Gebäudes). Es zeigt sich, dass die Anregung im 3.1 Hz Terzband um den Faktor 7 verstärkt wird.

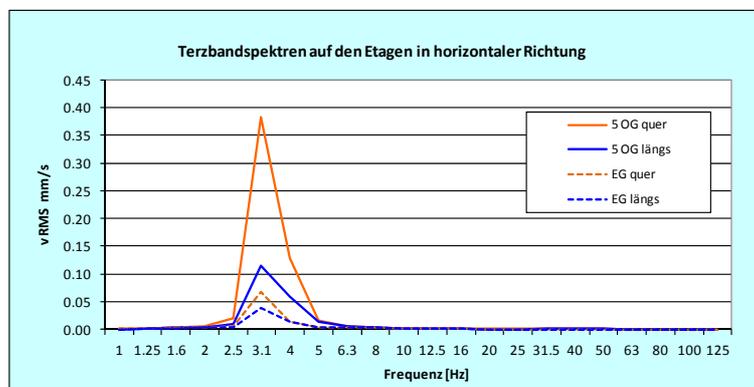


Bild 2.3.1-3:
Mittelwert der
Terzbandspektren von allen
Zugsdurchfahrten, gemessen
am Deckenrand.

rot: horizontal - längs zur
Eisenbahn,
blau: horizontal - quer zur
Eisenbahn,

Das Bild 2.3.1.-4 zeigt die Transferspektren EG > 5. OG in horizontaler und vertikaler Richtung. In horizontaler Richtung längs zur Eisenbahn findet im 4 Hz Band eine Verstärkung um den Faktor 9.5 statt, quer dazu beläuft sich die Verstärkung auf einen Faktor 4. Offenbar regt die Erschütterung die Eigenfrequenz des Hauses an. In vertikaler Richtung findet bei diesem Objekt keine Verstärkung statt – die Zunahme bei 40-50 Hz erfolgt auf allen Achsen und dürfte mit anderen Erschütterungen im Gebäude zu tun haben.

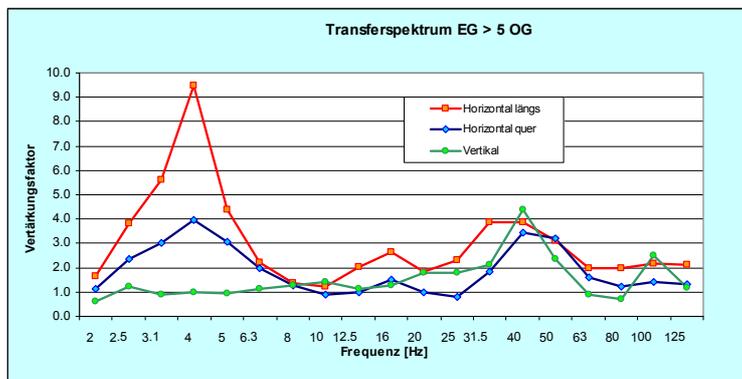


Bild 2.3.1-4:
Transferspektren EG > 5. OG
(Verstärkungsfaktor in jedem
Terzband) in horizontaler und
vertikaler Richtung.

rot: horizontal - längs zur
Eisenbahn,

blau: horizontal - quer zur
Eisenbahn,

grün: vertikal

3 Analyse der Messungen

3.1 Verstärkung in vertikaler Richtung

Die Messungen (siehe Bild 3.1-1) in den 4 Hochhäusern zeigen, dass mit einer erheblichen Zunahme der Erschütterungen in den oberen Stockwerken gerechnet werden muss.

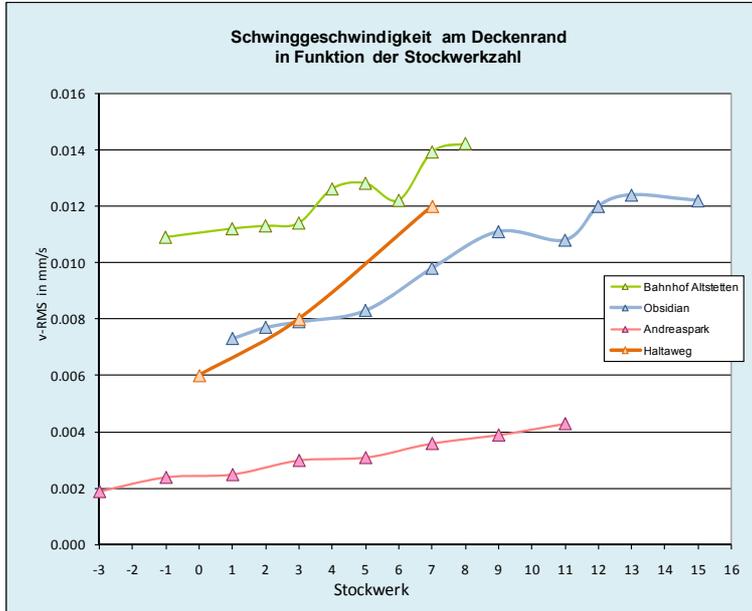


Bild 3.1-1 Schwinggeschwindigkeit am Deckenrand in Funktion der Stockwerkzahl

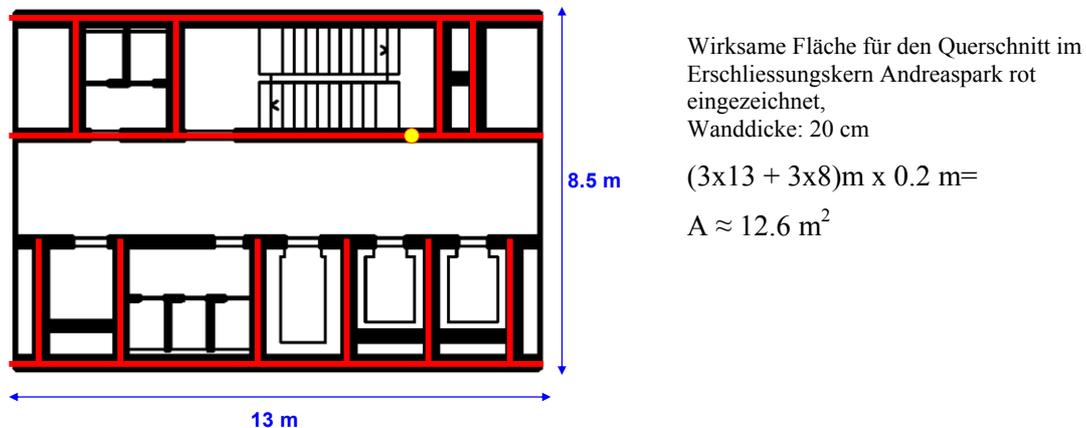
Im Folgenden wird für die Gebäude Andreaspark und Obsidian versucht, die vertikalen Hauptfrequenzen als Längsschwingungen im Stab darzustellen. Die generelle Formel für Längsschwingungen im Stab lautet:

$$f_1 = \frac{1}{4L} \left(\frac{EA}{\bar{m}} \right)^{1/2}, \text{ wobei}$$

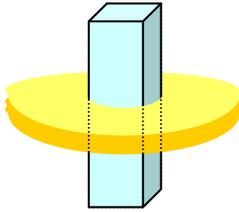
L = Länge des Stabs in m, im Fall des Gebäudes Andreaspark: ≈ 50 m

E = Elastizitätsmodul von Beton, in unserem Fall $E_{dyn} = 4.2 \cdot 10^7$ kN/m²

A = Querschnitt des Stabs in m² gemäss untenstehender Skizze:



\bar{m} = verteilte Masse in t/m^3 :



verteilte Masse in für den Erschliessungskern Andreasark: Fläche des Erschliessungskern und des halben angrenzenden Deckenfeldes, Deckendicke: 30 cm

$$16m \times 26m \times 0.3m \times 2.5t/m^3 \times 16 / 50 m =$$

$$\bar{m} \approx 100 t/m$$

Dies ergibt für f_1 eine Frequenz von ca. 11.5 Hz.

Für das Gebäude Obsidian ergeben sich folgende Werte:

$$L = 50 m$$

$$A = (15m + 12 m) \times 0.3 m = 8.1 m^2$$

$$\bar{m} \approx 12m \times 10m \times 0.3m \times 2.5t/m^3 \times 15 / 50 m = 27 t/m$$

Dies ergibt für f_1 eine Frequenz von ca. 17.8 Hz.

Dies stimmt gut überein mit der in Bild 2.2.3-4 dargestellten Verstärkung in den einzelnen Terzbändern.

3.2 Verstärkung in horizontaler Richtung - „Weiche Böden“

Beim Haus Blumenweg besteht der Baugrund aus einer Seeablagerung, an der Oberfläche ist das Gelände sumpfig. Die Fundation des Hauses besteht aus Pfählen.

Bild 3.2.-1 zeigt die beim Haus Blumenweg gemessene Erschütterung im Freifeld v_{RMS} im Vergleich mit dem in VIBRA-1 verwendeten Abminderungsmodell. Die gemessenen Erschütterungen sind um einen Faktor 4 höher.

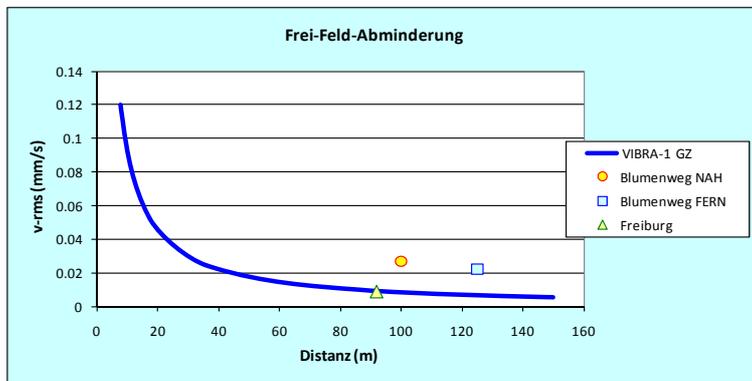


Bild 3.2-1:
Freifeldabminderung

blau: Modell VIBRA-1
Güterzüge, 80 km/h,

Bild 3.2.-2 zeigt ein Vergleich der Freifeldspektren beim Haus Blumenweg mit einem „normalen“ Freifeldspektrum in einem Kies-Sandboden. Die Spitzen im 3.1 Hz Band sind 3-4 mal höher als gewöhnlich.

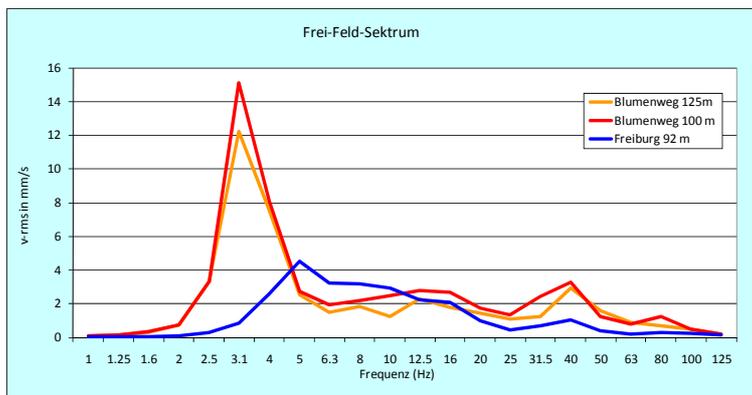


Bild 3.2-2:
Freifeldspektrum

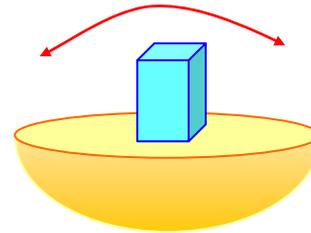
rot: Blumenweg
blau: Freiburg

Das vertikale Spektrum am Fundament des Hauses ist mit dem Frei-Feld Spektrum praktisch identisch (Ankoppelungsfaktor = 1 bei Frequenzen bis zu ca. 8 Hz). Dies entspricht dem in VIBRA-2 verwendeten Modell für Ankoppelungsspektren für Mehrfamilienhäusern. Es findet also keine Abminderung statt.

Wir versuchen auch hier eine einfache Handrechnung zur Berechnung der horizontalen Eigenfrequenz des Gebäudes. Wir verwenden dazu das Modell des Fundamentblocks auf dem elastischen Halbraum (siehe dazu Vortrag „Grundlagen der Baugruddynamik“ am letzten Symposium).

Die Eigenfrequenz ist gegeben durch die Gleichung

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$



Wobei:

K = Steifigkeit des Bodens bei Kippbewegung, gemäss Formel $K = \frac{8Gr^3}{3(1-\nu)}$, in unserem Fall:

$$K = 2.3 \cdot 10^7 \text{ kNm/rad}$$

M = Trägheitsmoment des Baukörpers (bestehend aus effektiver Masse des Gebäudes und einer fiktiven Masse, welche die Abnahme der Steifigkeit bei dynamischer Beanspruchung ausdrückt). Wir haben angenommen, dass die gesamte Masse im Schwerpunkt des Gebäudes im 3. OG konzentriert ist. In unserem Fall:

$$M = 5.5 \cdot 10^4 \text{ tm}^2$$

Als Resultat der Berechnung erhält man eine Eigenfrequenz von 3.2 Hz.

Fazit:

Um das Problem mit dem „weichen“ Boden vor dem Bau erkennen zu können, müsste man eine Freifeldmessung durchführen, auch wenn die Distanz zum Bahngleise 150 m beträgt. Zusätzlich müsste man auch die Frequenz der Kippbewegung abschätzen.

Es muss betont werden, dass die Horizontalschwingungen in diesem Gebäude auch für einen Spezialisten unerwartet hoch sind.

3.3 Vergleich Prognose - Messung

Für das Gebäude Andreaspark wurde nach dem Start der Bauarbeiten eine Prognose für Erschütterung und Körperschall erstellt. Zu diesem Zeitpunkt war die Erschütterungsüberwachung für die Baustelle bereits in Betrieb (siehe Bild 3.3.-1-5). Mit diesen Messgeräten wurden die Zugsdurchfahrten während der Nacht aufgezeichnet.



Bild 3.3-1: Blick auf die Baustelle



Bild 3.3-2: Freifeldsensor MP4 - Dammfuss



Bild 3.3-3: 7-Stöckiges Wohnhaus mit Fundamentsensor



Bild 3.3-4: Fundamentsensor MP 5

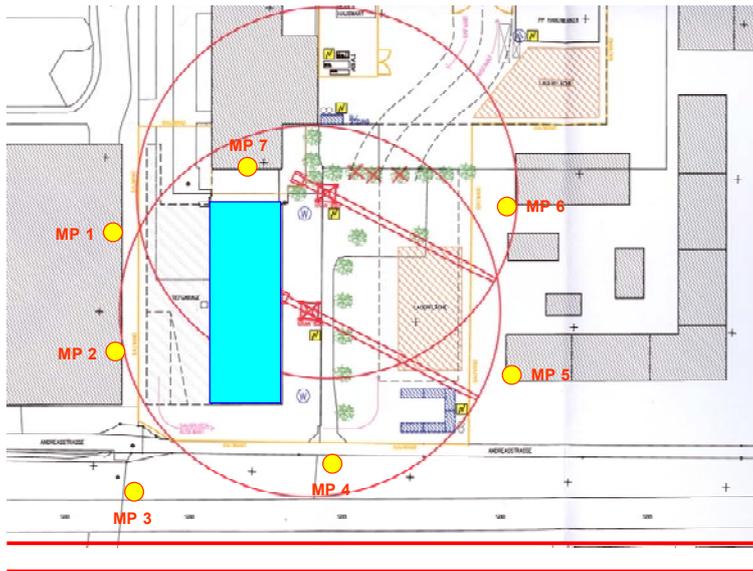


Bild 3.3-5:
Erschütterungsüberwachung
Andreaspark

MP 3
Bahndamm
Distanz zu Gleise ca. 7 m

MP 4
Am Fuss des Bahndamms
Distanz zu Gleise ca. 11 m

MP 5
Fundament eines 7 stöckigen
Wohnhauses
Distanz zu Gleise ca. 35 m

Das Freifeldspektrum am Standort des neuen Gebäudes wurde aus den Messungen bei MP 3 und MP 4 extrapoliert. Wie die Nachmessung im Freifeld vor dem Neubau in Bild 3.3-6 zeigt, war dieses Vorgehen korrekt und die Messung entspricht exakt dem prognostizierten Wert.

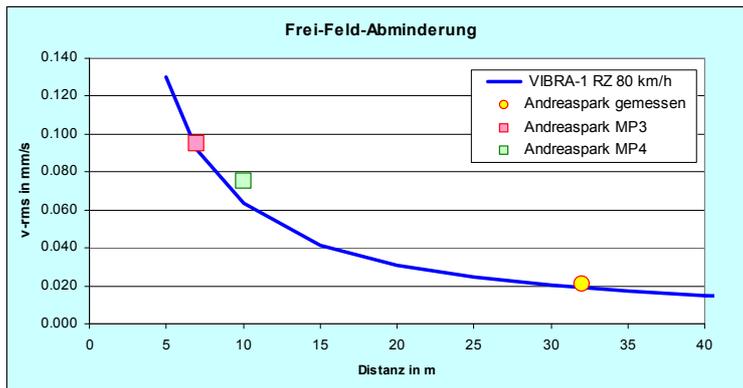


Bild 3.3-6:
Freifeld-Abminderung

Blaue Kurve: Modell
VIBRA-1 Reisezüge 80 km/h

Messungen für Prognose:
rosa: 7 m
grün: 11m

Nachmessung:
gelb: 32 m

Für die Modellierung der Immissionen im Gebäude wurden die Messungen am Fundament des bestehenden 7-stöckigen Wohnhauses (MP 5) verwendet. Wie Bild 3.3-7 zeigt, ist die Ankoppelung für ein 15-stöckiges Hochhaus anders wie für ein 7-stöckiges Wohnhaus. Die Prognose hat massiv überschätzt.

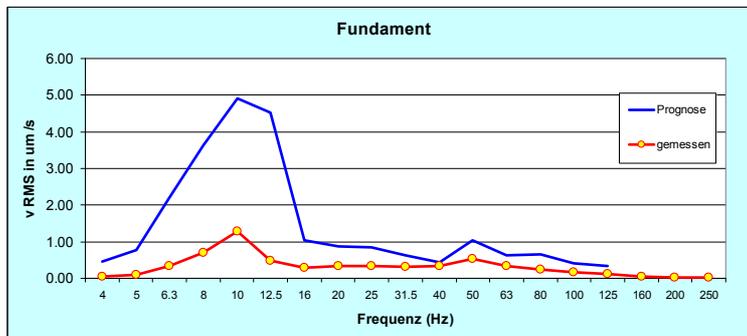


Bild 3.3-7:
Fundamentspektrum

Blaue Kurve:
Prognose (Fundamentspektrum von 7-stöckigem Wohnhaus)

Rote Kurve:
Gemessenes Spektrum im 3. UG

Die Prognose für die Schwingungen in Deckenmitte erfolgte für verschiedenen Deckentypen (nach Eigenfrequenz), gemäss Bild 3.3-8. Der effektiven Situation am nächsten kommt die Prognose für den Deckentyp 15-25 Hz. Gemessen wurden im Gebäude Andreasark tatsächlich Eigenfrequenzen von 24 Hz, 12.5 Hz und 5.8 Hz.

Für die 24 Hz Decke im 1. UG ist die Prognose gut. Die anderen Decken werden von der Prognose schlecht abgebildet, da die Eigenfrequenzen nicht übereinstimmen (effektiv 12 Hz, Prognose 15-25 Hz). Für die oberen Geschosse wird zum Vergleich auch die mit dem Faktor 2 multiplizierte rote Kurve (Prognose VIBRA-2 für 15-25 Hz Decken) als rot strichlierte Linie dargestellt.

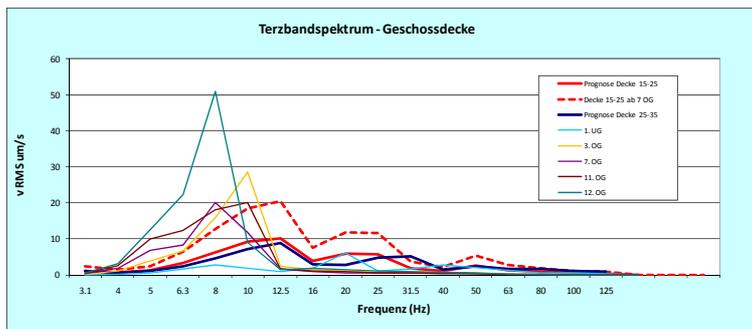


Bild 3.3-8:
Terzbandspektren für die Geschossdecken laut Prognose (rot und blau ausgezogen), modifiziert mit Berücksichtigung der Verstärkung um den Faktor 2 in den oberen Geschossen (rot strichliert) und effektiv gemessene Spektren

Die Prognose gibt für 15-25 Hz Decke einen $KB_{90\%}$ Wert von 0.061 (90 Perzentile), gemessen wurden bis zu 4 mal stärkere Erschütterungen.

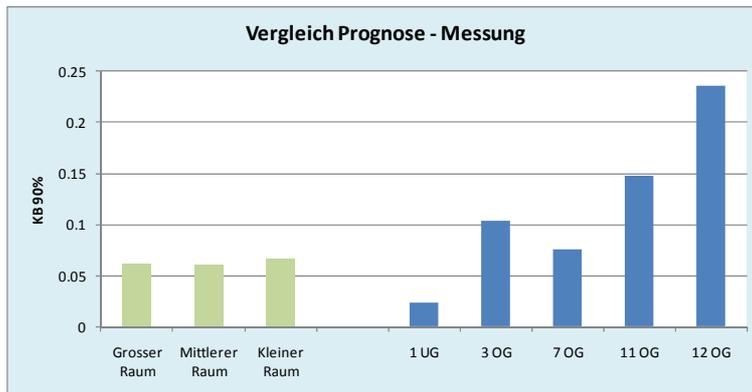


Bild 3.3-9:
Vergleich der Prognose mit den effektiven Werten ($KB_{90\%}$):

1 UG	0.024
3 OG	0.104
7 OG	0.076
11 OG	0.148
12 OG	0.236

Fazit:

- Das charakteristische Ankoppelungsspektrum von Hochhäusern muss mit weiteren Messungen ermittelt werden. Die Verwendung des Ankoppelungsspektrums für Mehrfamilienhäuser überschätzt die effektiven Erschütterungen.
- Die Eigenfrequenzen der Decken im geplanten Gebäude müssen genauer ermittelt werden, damit kann im VIBRA-2 Modell ein passendes Deckentransferspektrum ausgesucht werden.
- In den oberen Etagen muss mit einer zusätzlichen Verstärkung aufgrund der Vertikalschwingungen gerechnet werden.