

Schwingungsmessungen für die Beurteilung der Erdbebensicherheit eines Hochhauses

Peter F. Zwicky; Basler & Hofmann, Ingenieure und Planer AG Zürich

1. Problemstellung

Schwingungsmessungen zur experimentellen Bestimmung der Eigenfrequenzen von Gebäude und Boden

Im Rahmen der Beurteilung der Erdbebensicherheit eines Hochhauses im schweizerischen Mittelland wurden sowohl für das Gebäude als auch für den Boden Schwingungsmessungen durchgeführt. Ziel dieser Messungen war die experimentelle Bestimmung der massgebenden Eigenfrequenzen, welche in den Erdbeben-Berechnungen verwendet werden.

Messungen im Februar/März 2000

Die ersten Messungen wurden bei sonnigem, leicht bewölktem Winterwetter durchgeführt. Die Windanregung war schwach, aber doch deutlich spürbar.

Weitere Messserien erfolgten bei starkem Westwind. Die Gebäude-Eigenfrequenzen konnten dabei bestätigt werden. Die maximalen Gebäudeschwingungen betragen bis zum dreifachen der zuerst gemessenen Werte.

2. Schwingungsmessungen im Gebäude

Messkonzept, Geräte und Auswertesoftware

Die Schwingungen wurden mit dreiaxialen Geschwindigkeitssensoren aufgezeichnet, mit dem Registriergerät MR2002 der Bartec-Syscom registriert und mit der Auswertesoftware VIEW2002 ausgewertet.

Es wurden pro Messpunkt mindestens 10 Zeitfenster von 36 sec Länge mit einer Abtastrate von 200 Werten pro sec aufgezeichnet und gespeichert. Es wurden Zeitfenster mit und ohne vorbeifahrende Züge erfasst.

Messpunkte

Die Schwingungen wurden an je drei Stellen des obersten (15.) und des 7. Obergeschosses gemessen: jeweils im Treppenhaus zwischen den beiden Liften, dh. bei den Massenzentren der Geschosse, und auf je einem Balkon an der Süd- und der Nordfassade.

Zudem wurde auch bei den Liften und in den Kellerabteilen des Untergeschosses sowie auf der Dachterrasse gemessen.

Typische Zeitverläufe und Frequenzspektren der Schwinggeschwindigkeit

Die Figur 1 zeigt einen typischen Zeitverlauf für die Messung im Treppenhaus des 15. Obergeschosses. Die Grundschiwingung in den beiden horizontalen Hauptrichtungen x und y (dh. längs und quer) ist deutlich erkennbar.

Die Figuren 2 und 3 zeigen die aus den Messungen berechneten Amplitudenspektren, gemittelt über alle Messungen, im 15. Obergeschoss bzw. im 7. Obergeschoss.

Eigenfrequenzen

Die wichtigsten Eigenfrequenzen des Gebäudes sind in den Figuren 1 bis 3 erkennbar und können wie folgt charakterisiert werden:

- in Querrichtung (y) des Gebäudes:

$$f_{1,q} = 1.4 \text{ Hz} \quad (\text{enthält einen Torsionsanteil})$$

$$f_{2,q} = 4.3 \text{ Hz}$$

$$f_{3,q} = 4.9 \text{ Hz}$$

- in Längsrichtung (x) des Gebäudes:

$$f_{1,l} = 1.9 \text{ Hz}$$

$$f_{2,l} = 6.3 \text{ Hz}$$

Interpretation, Empfehlung für die Berechnung

In der Erdbebenberechnung werden die Schnittkräfte massgeblich durch die Grundfrequenzen $f_{1,q}$ und $f_{1,l}$ beeinflusst.

Da alle gemessenen Schwingungen bei – im Vergleich zum Bemessungserdbeben - kleiner Anregung aufgenommen wurden, sind sie für das elastische (ungerissene) Tragwerksverhalten repräsentativ. Auf dem Anregungsniveau des Bemessungserdbebens wird die Steifigkeit und somit auch die Eigenfrequenz infolge Rissbildung im Stahlbeton und Mauerwerk reduziert. Das Ausmass dieser Reduktion kann durch Berechnung der Trägheitsmomente an den gerissenen Gesamtgeschoss-Querschnitten bestimmt werden. Als vorsichtige (konservative) Schätzung darf eine Reduktion der Steifigkeit auf die Hälfte der gemessenen elastischen Steifigkeit und somit eine Verminderung der gemessenen Eigenfrequenzen $f_{1,q}$ und $f_{1,l}$ um den Faktor $\sqrt{2} = 1.41$ angenommen werden.

3. Schwingungsmessungen auf dem Boden

Eigenfrequenz der Bodenschichten

Das Bodenprofil am Standort des Hochhauses kann auf die Erdbebenanregung grundsätzlich einen massgebenden Einfluss haben. Es ist hier bezüglich Schichtstärken und Scherwellengeschwindigkeiten nicht genügend genau

bekannt, um eine aussagekräftige rechnerische Prognose der Boden-Eigenfrequenz und der Amplifikation der Anregung durchführen zu können. Dynamische Baugrunduntersuchungen für diese Parameter wären sehr aufwendig und würden sich kaum lohnen.

Methode Nakamura

Im vorliegenden Fall wurde deshalb versucht, mit der nach Nakamura benannten Methode die fundamentale Eigenfrequenz des Untergrunds experimentell zu bestimmen. Die Methode beruht auf der Erfahrung, dass aus der Messung der Bodenunruhe die Eigenfrequenz herausgearbeitet werden kann, sofern die verwendeten Sensoren genügend empfindlich sind und sofern tatsächlich eine prägnante Eigenfrequenz im Schichtaufbau des Bodens vorhanden ist. Empirisch wurde festgestellt, dass die massgebende horizontale Eigenfrequenz am deutlichsten durch "Polarisieren" der Frequenzspektren gefunden wird. Dazu wird das Verhältnis der horizontalen zu den vertikalen Schwingkomponenten im Frequenzbereich gebildet. Das Ergebnis wird umso deutlicher, desto mehr Messsignale registriert und statistisch gemittelt werden.

Signalverstärkung

Mit der im MR2002 eingebauten Verstärkerkarte können die registrierten Signale der Bodenunruhe um einen Faktor von 10 bzw. 100 verstärkt werden. Bei dieser Anwendung hat sich der Faktor 10 als notwendig und hinreichend erwiesen.

Messkonzept

Die Bodenunruhe wurde an drei Stellen gemessen, mit gutem Bodenkontakt und ausserhalb des Einflussbereiches des Hochhauses.

Pro Messort wurden 10 bis 30 Einzelsignale zu rund 30 Sekunden Dauer registriert. Nebst der natürlichen Bodenunruhe (Mikroseismik, Wind) sind als Anregungsquellen der Strassenverkehr, sowie die Züge der Regionalbahn (pro Richtung 2 Züge pro Stunde) vorhanden.

Ergebnis

Die Vergleiche der pro Messort ausgewerteten Signale zeigen systematische Gemeinsamkeiten. Die Figur 4 zeigt die aus allen total 68 Signalen gemittelten Spektren für die Verhältnisse der horizontalen zu den vertikalen Komponenten in den Richtungen x (längs zum Hochhaus) bzw. y (quer zum Hochhaus).

Innerhalb des hier interessierenden Frequenzbereichs zwischen 0 und 10 Hz ist eine deutliche Amplifikation bei 2.5 Hz für x/z und y/z sowie bei 3.8 Hz für y/z erkennbar.

Plausibilitätskontrolle

Die totale Mächtigkeit H_m der Lockergesteinsschichten am Standort beträgt im Mittel zwischen 30 und 40 m. Aus der gemessenen Eigenfrequenz von $f = 2.5$

bis 4 Hz ergibt sich somit eine mittlere Scherwellengeschwindigkeit $v_{s,m} = 4 \cdot f \cdot H_m$, welche im Bereich von 300 bis 640 m/s liegt. Mit dieser Abschätzung wird das Ergebnis als plausibel beurteilt.

Interpretation, Empfehlung
für die Berechnung

Die gefundene horizontale Boden-Eigenfrequenz liegt also höher als die massgebenden Gebäude-Eigenfrequenzen. Im Erdbebenfall wird somit das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems massgeblich vom Gebäude bestimmt. Die Boden-Eigenfrequenz von mindestens $f = 2.5$ Hz liegt in dem Frequenzbereich, der durch das Bemessungsspektrum der Norm SIA 160 als amplifizierte Bodenanzregung berücksichtigt wird, da das Bemessungsspektrum für mittelsteifen Boden eine Eckfrequenz von 2 Hz aufweist. Für die weiteren Berechnungen wird deshalb empfohlen, das Bemessungsspektrum "mittelsteif" von SIA 160 ohne weitere Modifikationen zu verwenden.

Figuren

- Figur 1 Typische gemessene Geschwindigkeits-Zeitverläufe im 15. Obergeschoss
- Figur 2 Frequenzspektrum der berechneten Fourieramplituden: Mittelwertspektrum aus 42 Messungen im 15. Obergeschoss
- Figur 3 Frequenzspektrum der berechneten Fourieramplituden: Mittelwertspektrum aus 45 Messungen im 7. Obergeschoss
- Figur 4 Gemittelte Frequenzspektren der Bodenunruhe, total 68 Messungen an drei Messorten: Verhältnisse x/z und y/z , dargestellt über den Frequenzbereich 0 bis 50 Hz (oben) und 1 bis 10 Hz (unten)

MR2002 - Vibration Data Evaluation

Evaluation Date: 28.2.00

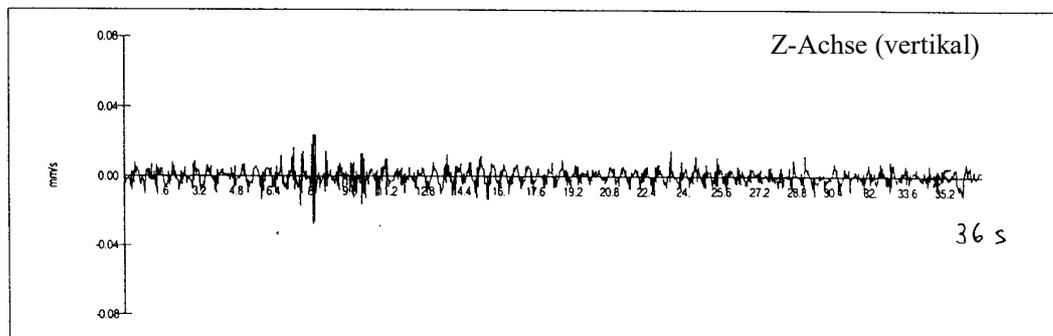
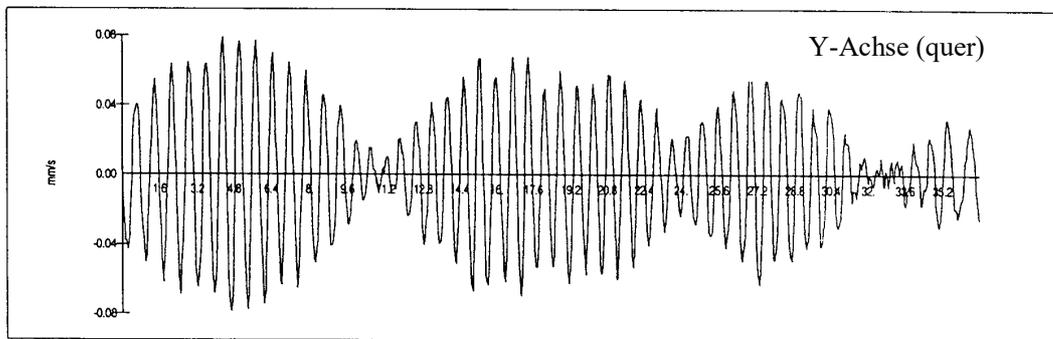
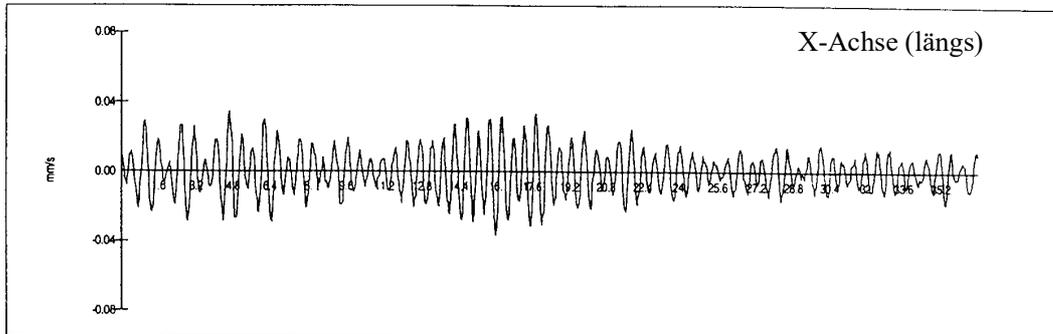
File Name:

Recording Date: 23.02.00

Station:

Recording Time: 10:11:48

Note: Figur 1 15. OG, Balkon Nord



Velocity Signal in mm/s for Event Nr. 41

Fig. 1: Channel 1: Maximum = 0.034 mm/s Minimum = -0.036 mm/s

Fig. 2: Channel 2: Maximum = 0.075 mm/s Minimum = -0.076 mm/s

Fig. 3: Channel 3: Maximum = 0.025 mm/s Minimum = -0.027 mm/s

Long File! Only every 8. value has been plotted.

Figur 1

MR2002 - Vibration Data Evaluation

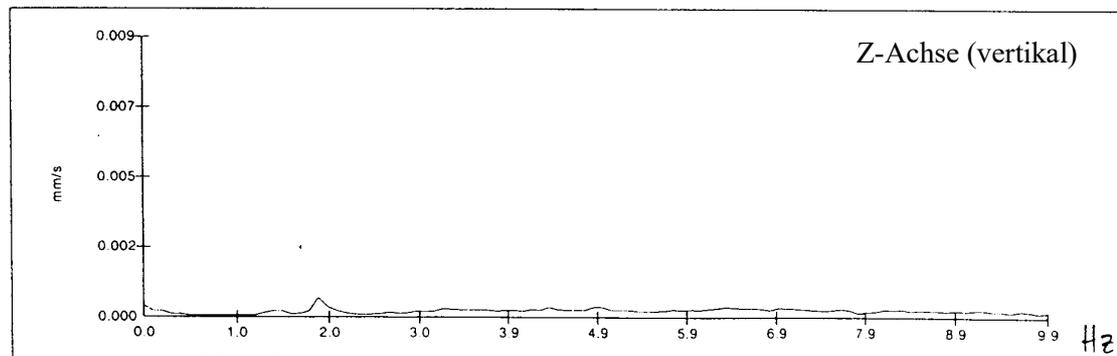
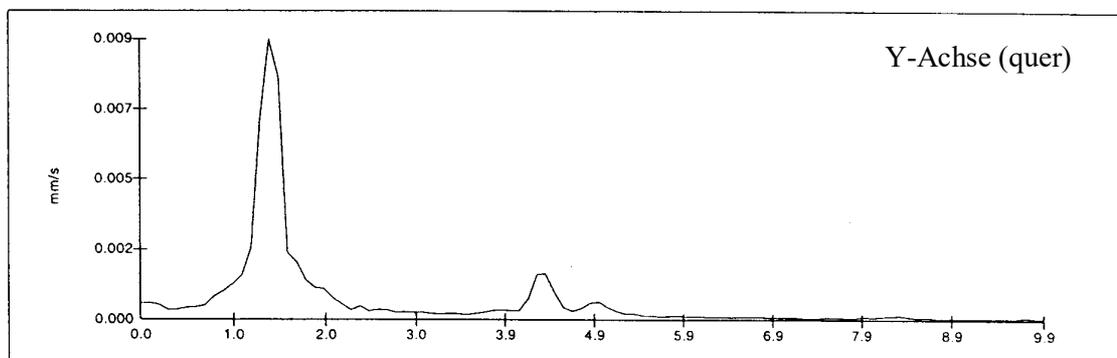
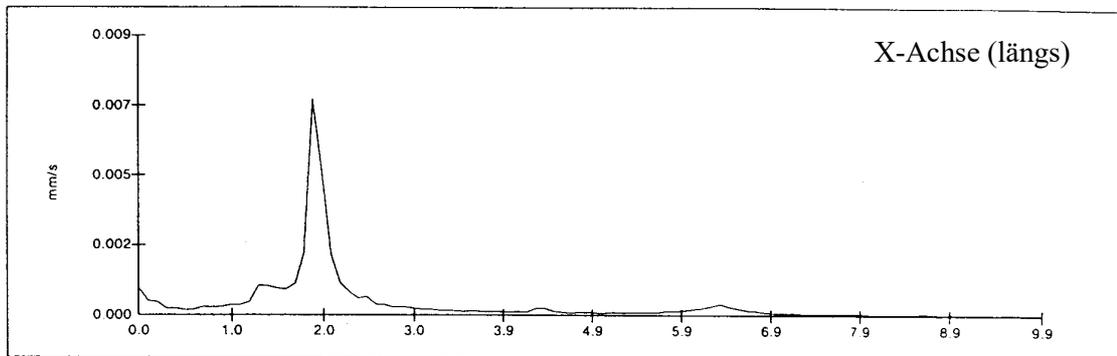
Evaluation Date: 28.2.00

File Name:

Recording Date: 23.02.00

Station:

Note: 15. OG Mittelwertspektrum aus 42 Messungen



Velocity - Averaged Amplitude Spectrum in mm/s

Fig. 1: Channel 1: Main Frequency = 1.9 Hz

Fig. 2: Channel 2: Main Frequency = 1.4 Hz

Fig. 3: Channel 3: Main Frequency = 1.9 Hz

Figur 2

MR2002 - Vibration Data Evaluation

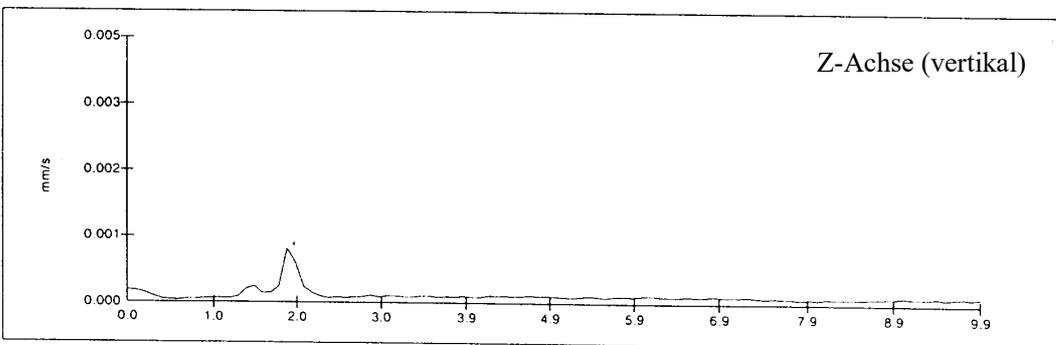
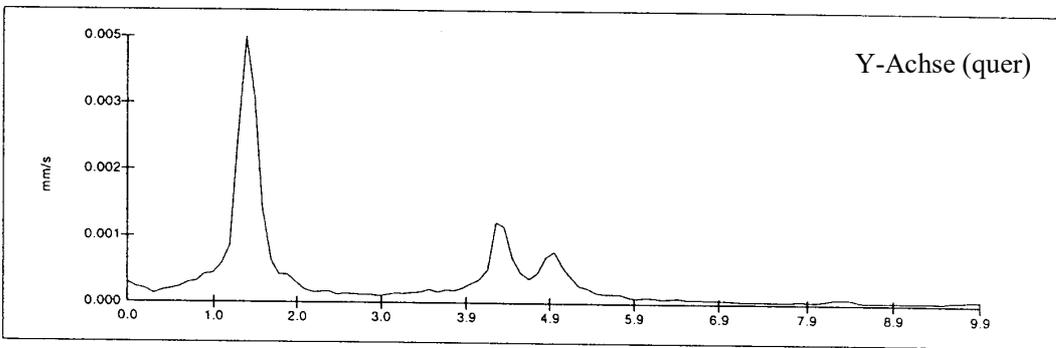
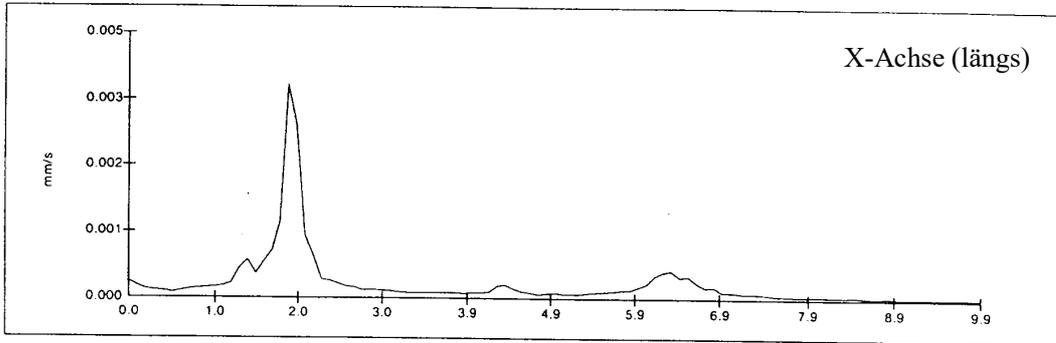
Evaluation Date: 28.2.00

File Name:

Recording Date: 23.02.00

Station:

Note: Figur 3 7. OG, Mittelwertspektrum aus 45 Messungen



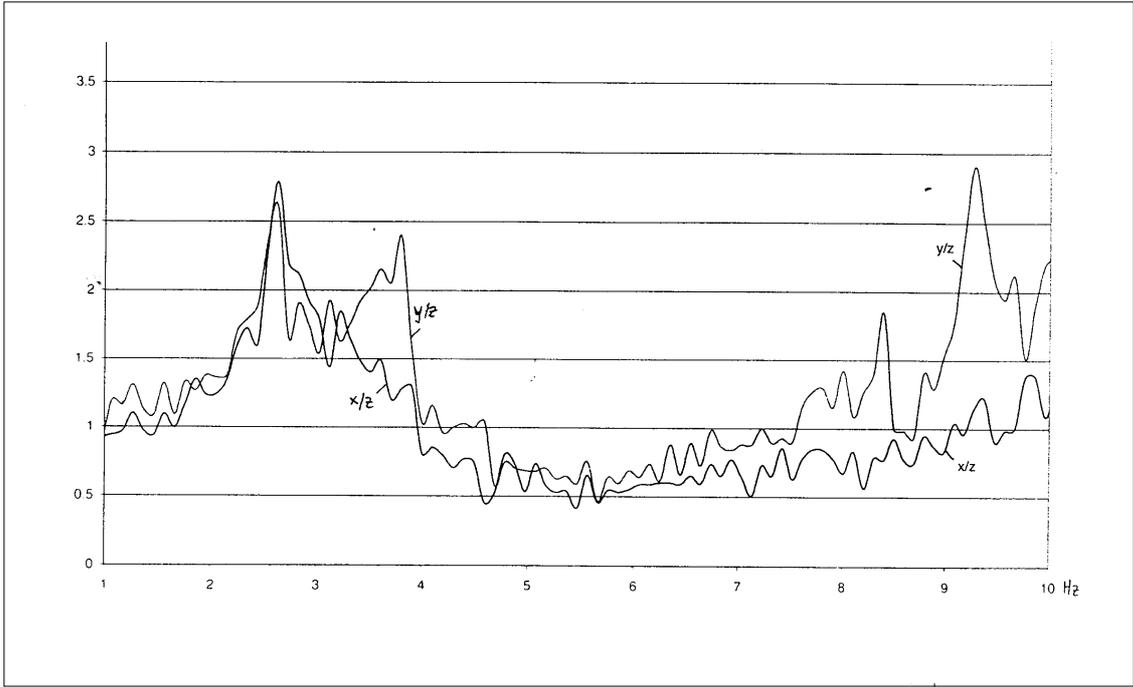
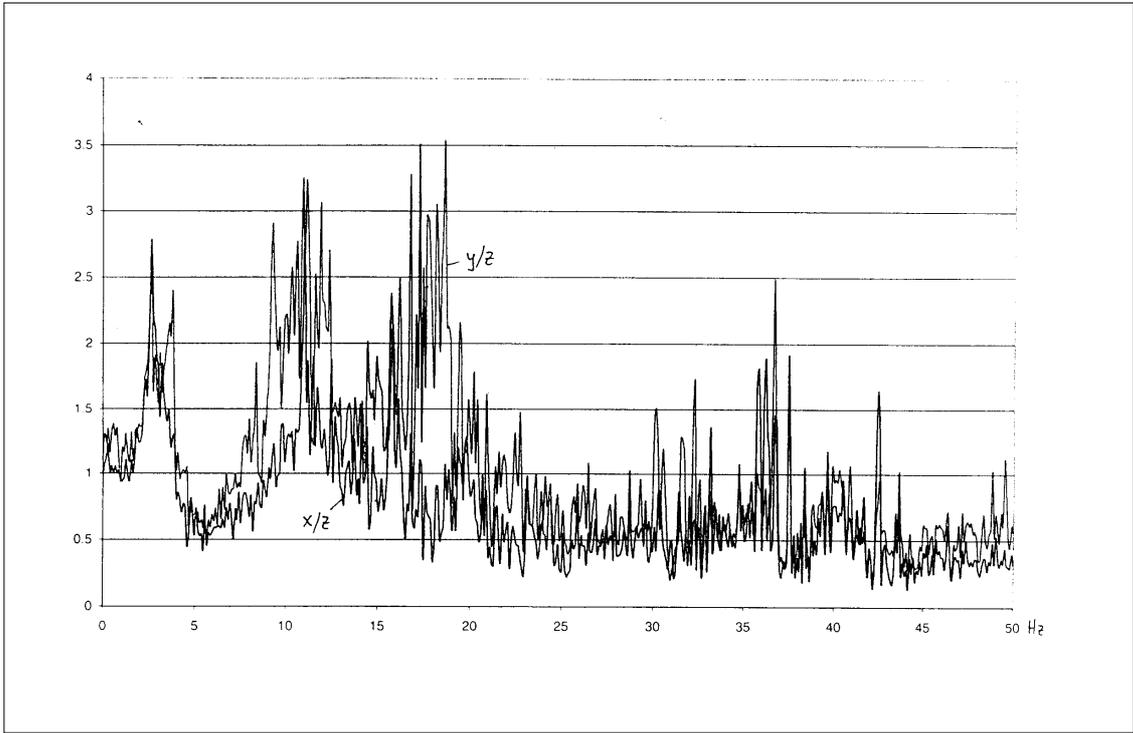
Velocity - Averaged Amplitude Spectrum in mm/s

Fig. 1: Channel 1: Main Frequency = 1.9 Hz

Fig. 2: Channel 2: Main Frequency = 1.4 Hz

Fig. 3: Channel 3: Main Frequency = 1.9 Hz

Figur 3



Figur 4