Erdbebennachweise
von Starkstromkomponenten

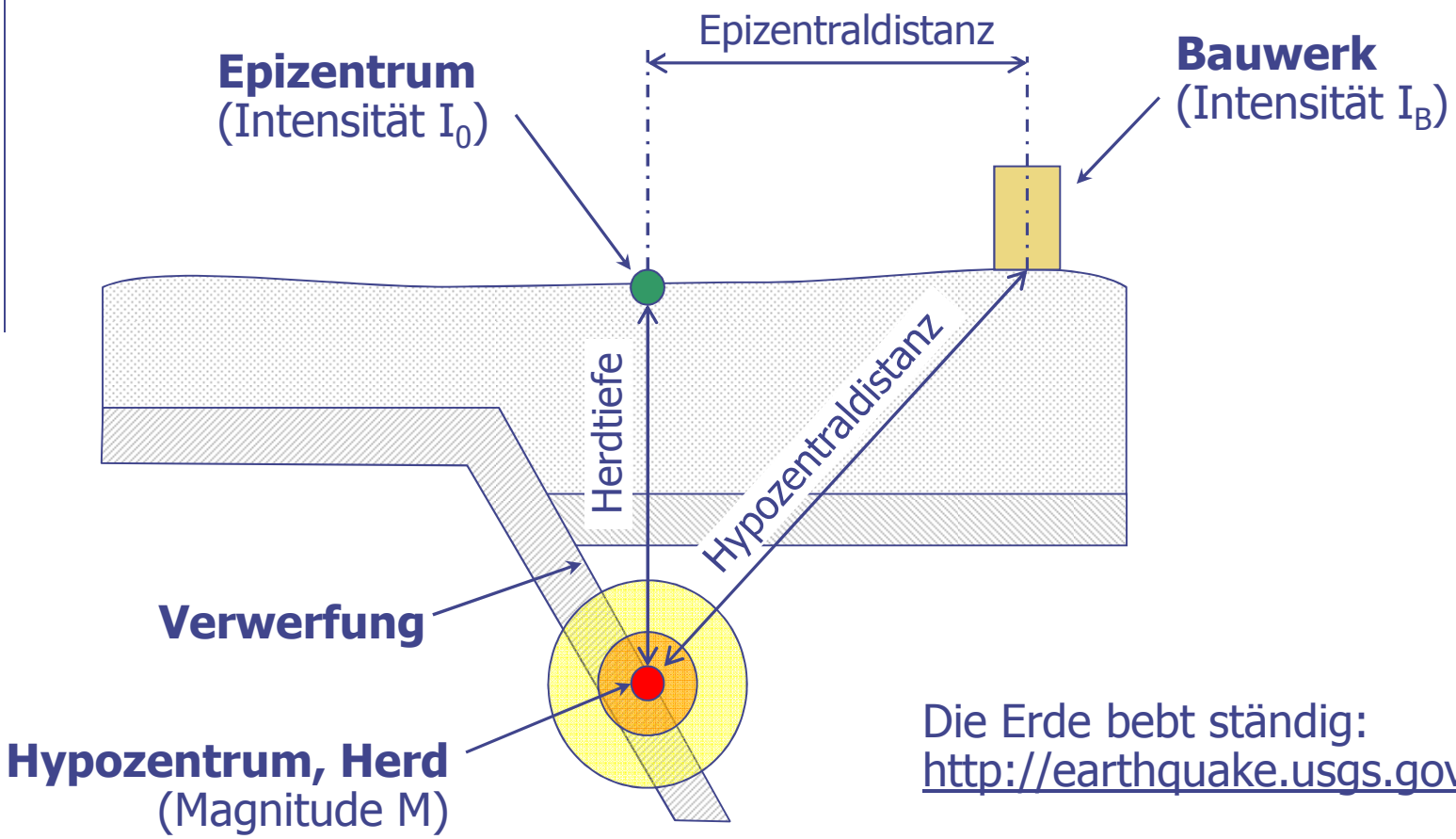
Sebastian Kurmann und Beat Schmied
Schmied Engineering GmbH, CH-4563 Gerlafingen
www.schmied-engineering.ch

Inhaltsverzeichnis

- Einleitung
- Nachweismethoden nach IEEE
- Nachweis mit Spektrumsanalyse und Workbench
- Verschiedenes

Einleitung

Definitionen



Die Erde bebt ständig:
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes

Klassierung

Mercalli-Stufe	Richter-Skala	Beschreibung der Erdbebenfolgen	Beschleunigung [g]
IV	ca. 3.7	Von den meisten Menschen im Umkreis von 30 km bemerkt; spürbar in Häusern; kleine Schäden möglich	0.005-0.01
V	ca. 4.3	Menschen werden im Schlaf aufgeweckt; Bäume und Masten beginnen zu schwanken	0.01-0.02
VI	ca. 5	Möbel können sich verschieben; leichte Schäden	0.02-0.05
VII	ca. 5.7	Leicht gebaute Häuser u. U. schwer beschädigt; leichte Schäden an massiven Bauwerken; Menschen geraten in Panik; Todesopfer in dicht besiedelten Regionen wahrscheinlich	0.05-0.1
VIII	ca. 6.3	Verbreitete Zerstörung von Gebäuden; leichte Schäden auch an "erdbebensicheren Anlagen; Felsstürze; Erdrutsche	0.1-0.2
IX	ca. 7	Allgemeine Gebäudezerstörungen; Fundamente verschieben sich; im Erdboden erscheinen erkennbare Risse	0.2-0.5
X	ca. 7.7	Verwüstungen; katastrophenartige Zerstörungen; breite Risse im Erdboden; die meisten Gebäude zerstört	0.5-1
XI	ca. 8.3	Alle Gebäude zerstört; landschaftsverändernde Zerstörungen; breite Spalten im Erdboden und in Straßen	>1
XII	ca. 9	großflächige verheerende Katastrophe	> 1.5

Risikopotential in der Schweiz

[BWG1]

Mässige bis mittlere Gefahr

Die Gefahr von Erdbeben in der Schweiz gilt im weltweiten Vergleich als mässig bis mittel. Erhöht ist sie im Wallis, in der Region Basel, in der Zentralschweiz, im Engadin und im St. Galler Rheintal. Beben der Stärke 5 auf der Richterskala sind in der Schweiz einmal innerhalb von 10 Jahren, solche der Stärke 6 einmal innerhalb von 100 Jahren wahrscheinlich. Beim schweren Beben von 1356 in Basel wird eine Magnitude von 6.5 angenommen.

Grösstes Risiko: Milliardenschäden drohen

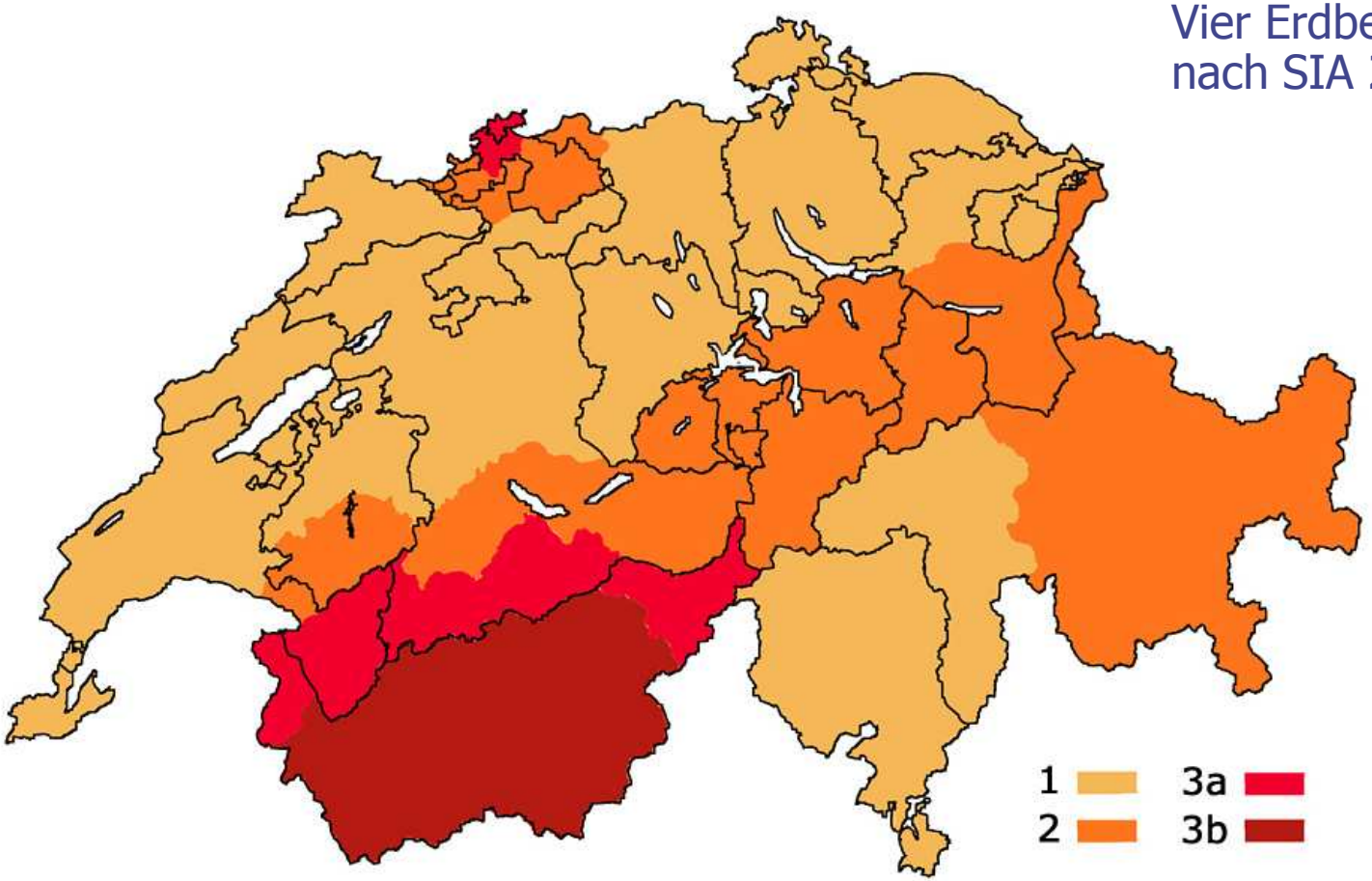
Das hohe Schadenpotenzial macht Erdbeben in der Schweiz zum grössten Risiko unter den Naturgefahren. Rund 90 Prozent der bestehenden Gebäude in der Schweiz wurden nicht oder nach veralteten Massstäben für Erdbeben bemessen. Sie könnten also ungenügend gesichert sein.

Die Rückversicherer in der Schweiz rechnen bei einem Ereignis der Stärke 5.5 bis 6 mit Schäden von rund 7 Milliarden und bei einem der Stärke 6 bis 6.5 mit solchen von rund 40 Milliarden Franken.

Erdbebenkarte der Schweiz

[BAFU1]

Vier Erdbebenzonen
nach SIA 261 (2003)



Einfluss des Untergrunds

[BAFU1]

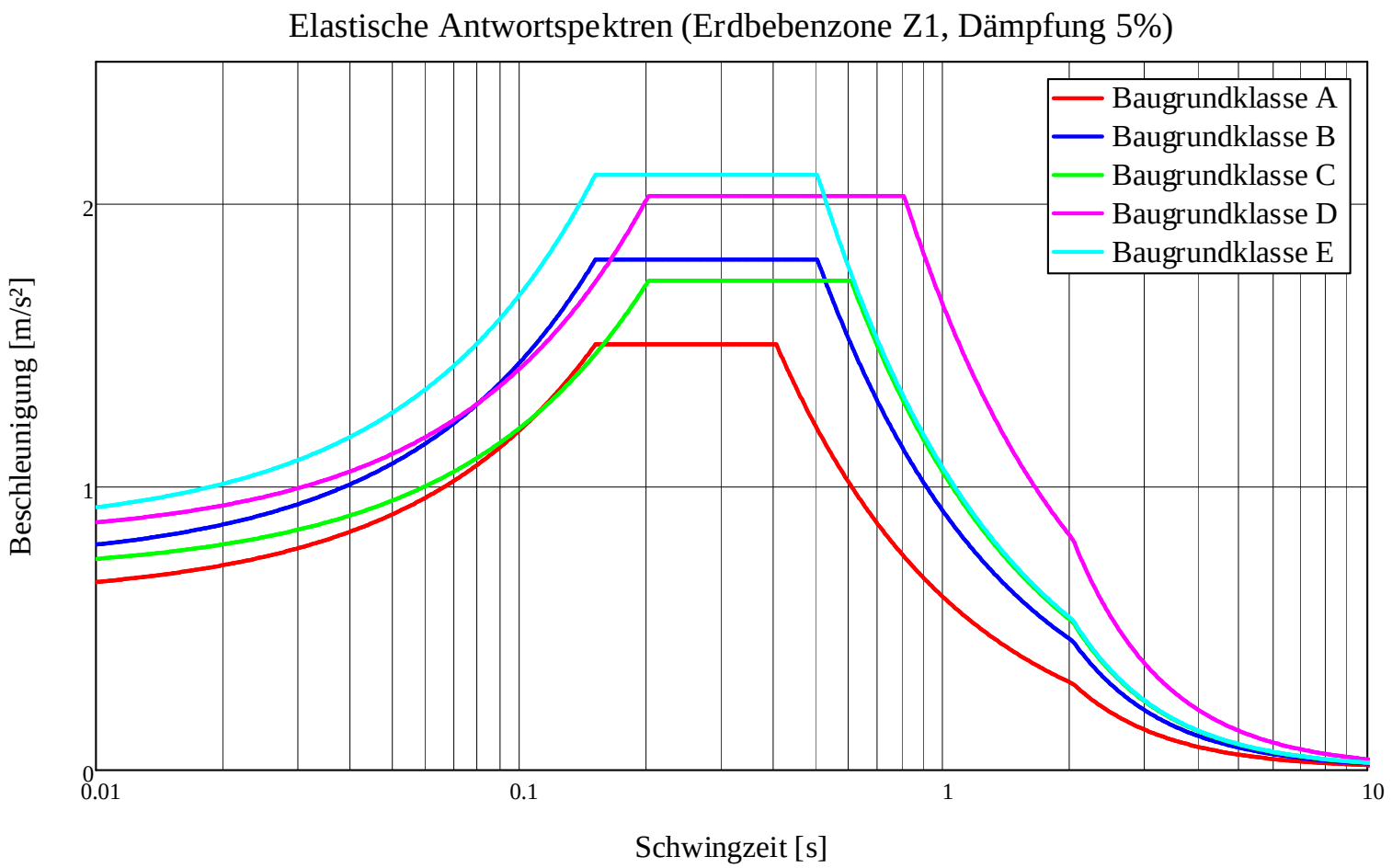
Innerhalb der Erdbebenzonen variiert die Erdbebenanregung abhängig von den lokalen Baugrundverhältnissen.

Grundsätzlich gilt:
je weicher der Baugrund, desto stärker und tieffrequenter die Erdbebenanregung.

A	Harter Fels (z. B. Granit, Gneis, Quarzit, Kieselkalk, Kalk) oder weicher Fels (z. B. Sandstein, Nagelfluh, Juramergel, Opalinuston) unter max. 5 m Lockergesteinsabdeckung
B	Ablagerungen von grossräumig zementiertem Kies und Sand und/oder vorbelastete Lockergesteine mit einer Mächtigkeit über 30 m
C	Ablagerungen von normal konsolidiertem und unzementiertem Kies und Sand und/oder Moränenmaterial mit einer Mächtigkeit über 30 m
D	Ablagerungen von nicht konsolidiertem Feinsand, Silt und Ton mit einer Mächtigkeit über 30 m
E	Alluviale Oberflächenschicht der Baugrundklassen C oder D mit einer Mächtigkeit zwischen 5 und 30 m über einer steiferen Schicht der Baugrundklassen A oder B
F	Strukturempfindliche und organische Ablagerungen (z. B. Torf, Seekreide, Rutschmassen) mit einer Mächtigkeit über 10 m

Baugrundklassen nach SIA 261 (2003)

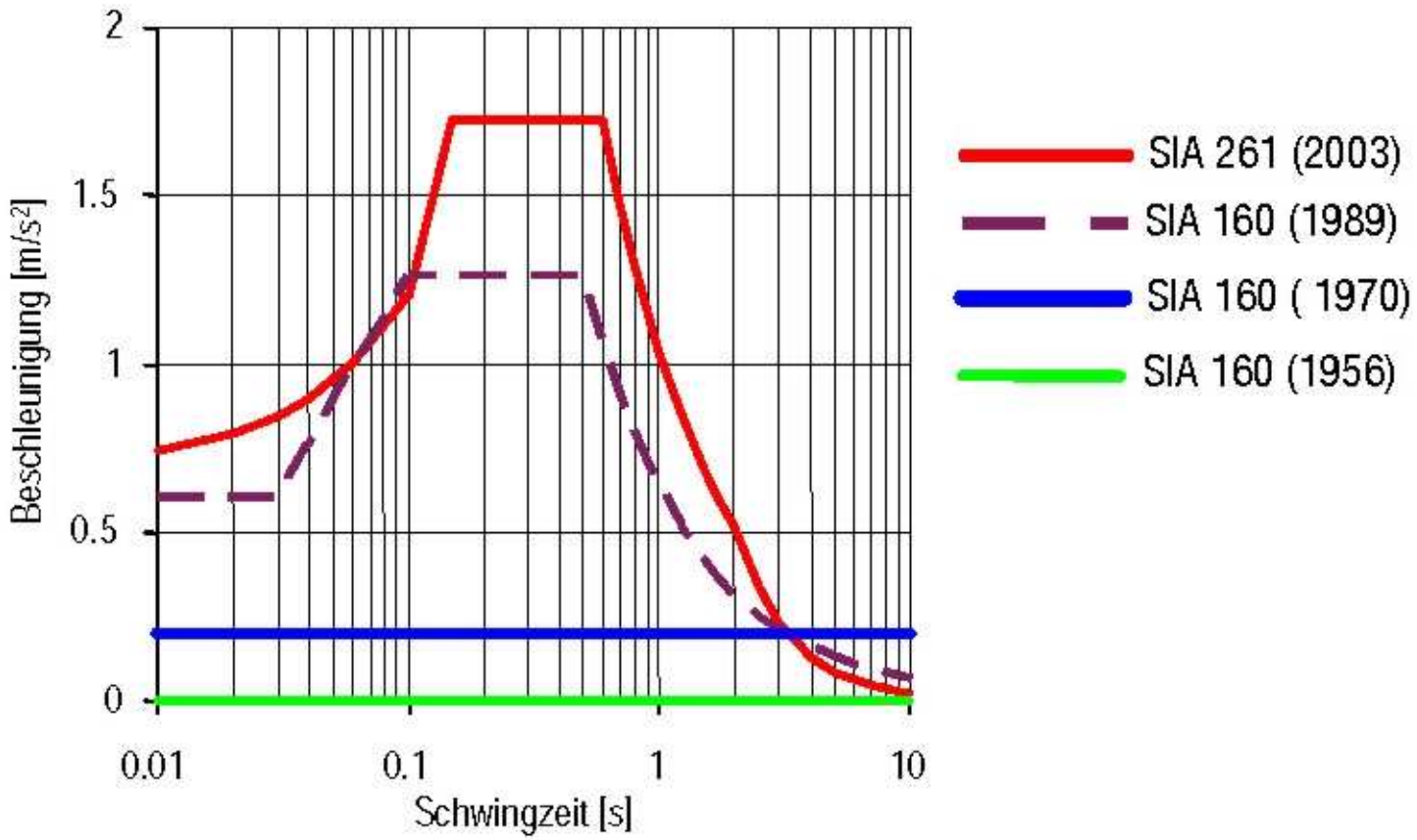
Einfluss des Untergrunds



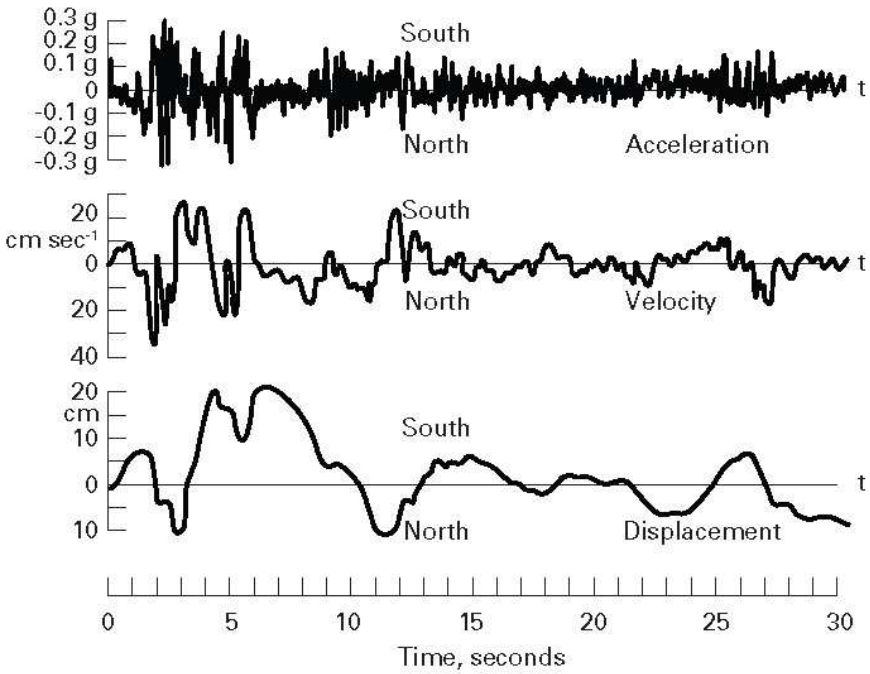
Normen-Entwicklung im Bauwesen

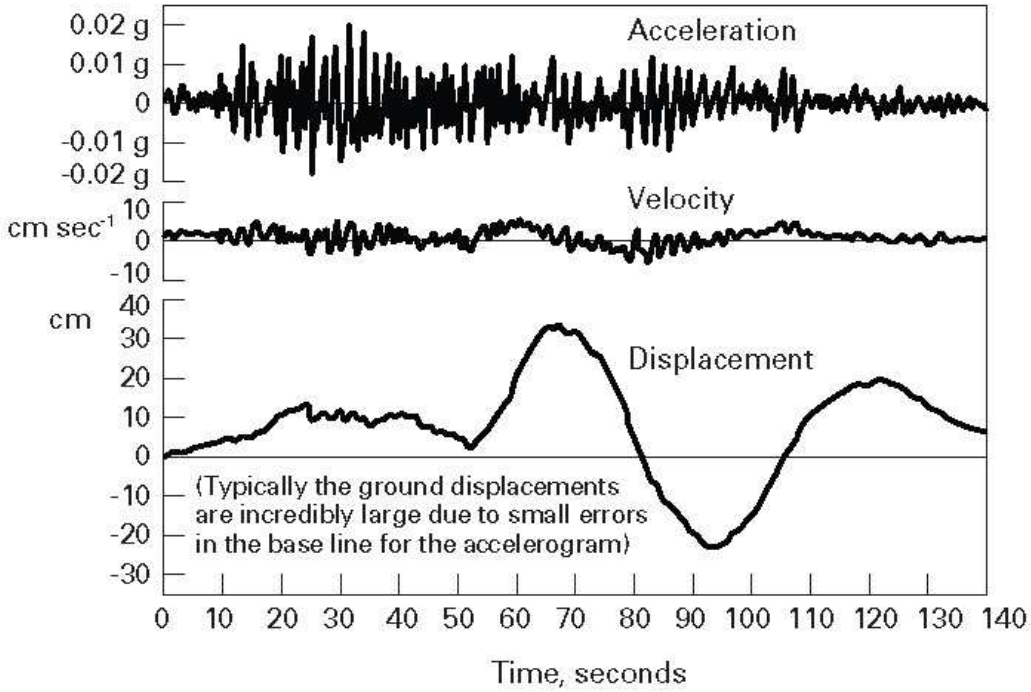
[BAFU1]

Antwortspektrum elastisches Tragverhalten (Erbebenzone 1, Baugrundklasse C, 5% Dämpfung)



Erdbeben ≠ Erdbeben

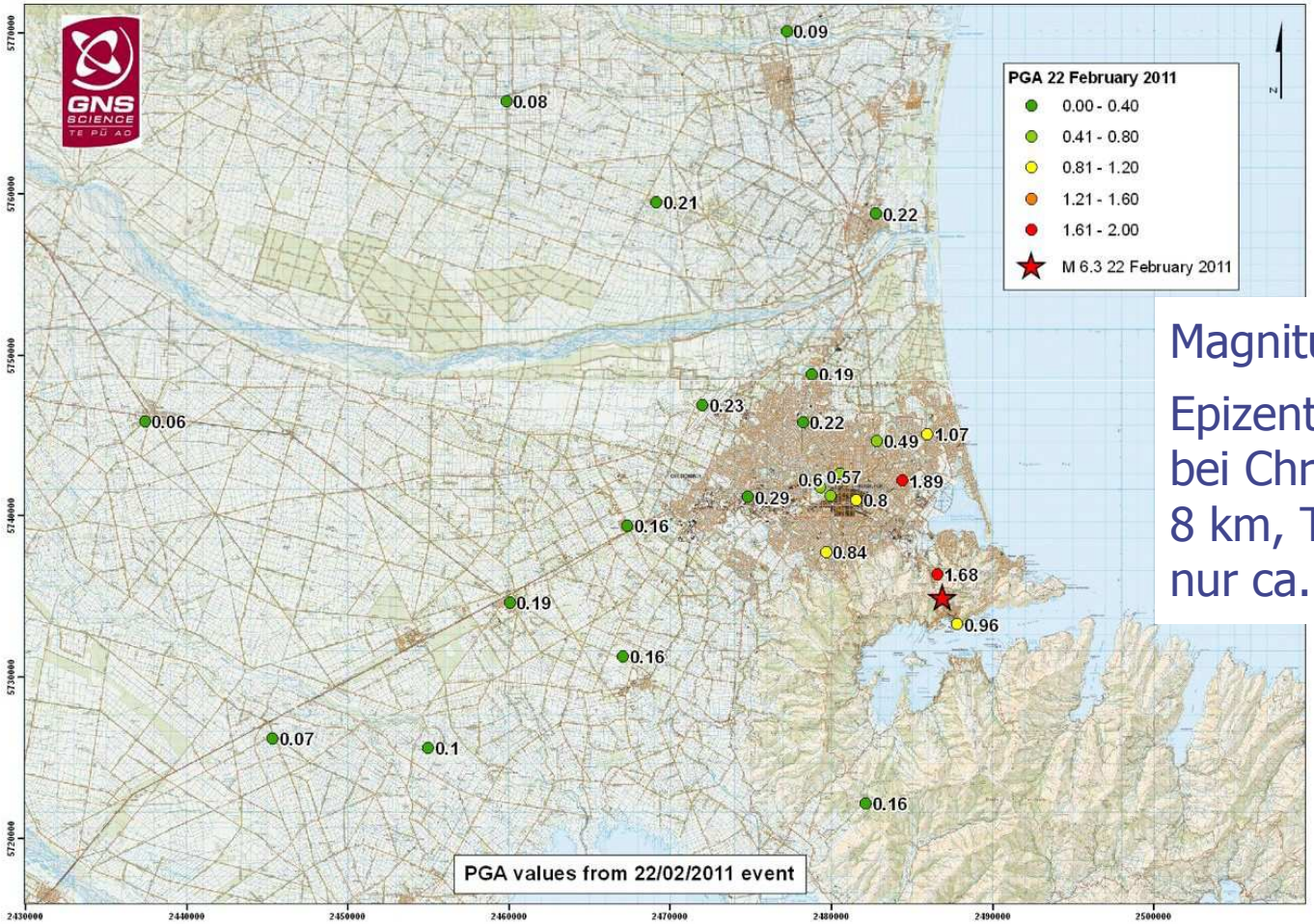




El Centro, Kalifornien, 18. Mai 1940
Magnitude 7.1

Mexico City, 19. Sept. 1985
Magnitude 8.1

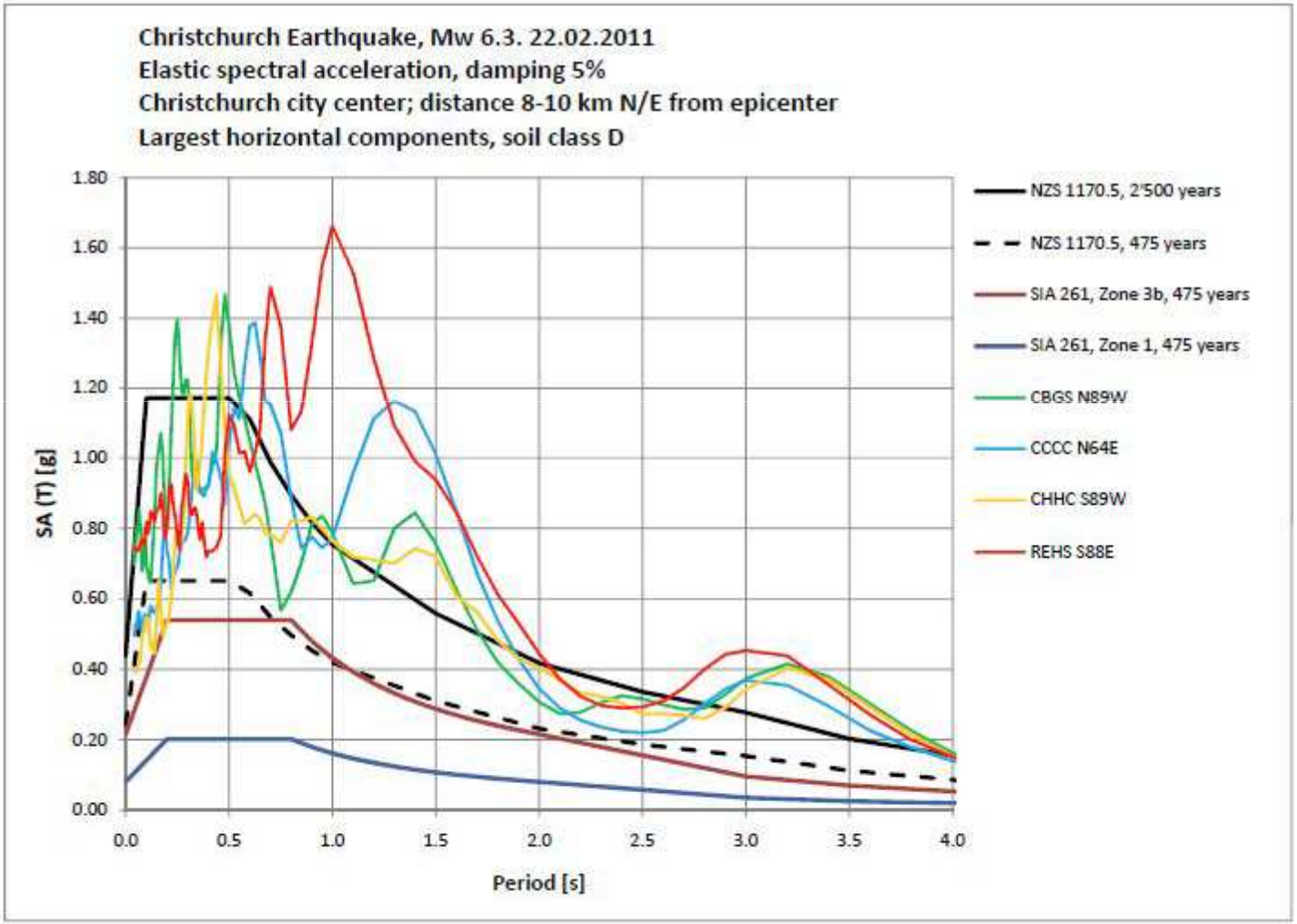
Christchurch 22. Februar 2011



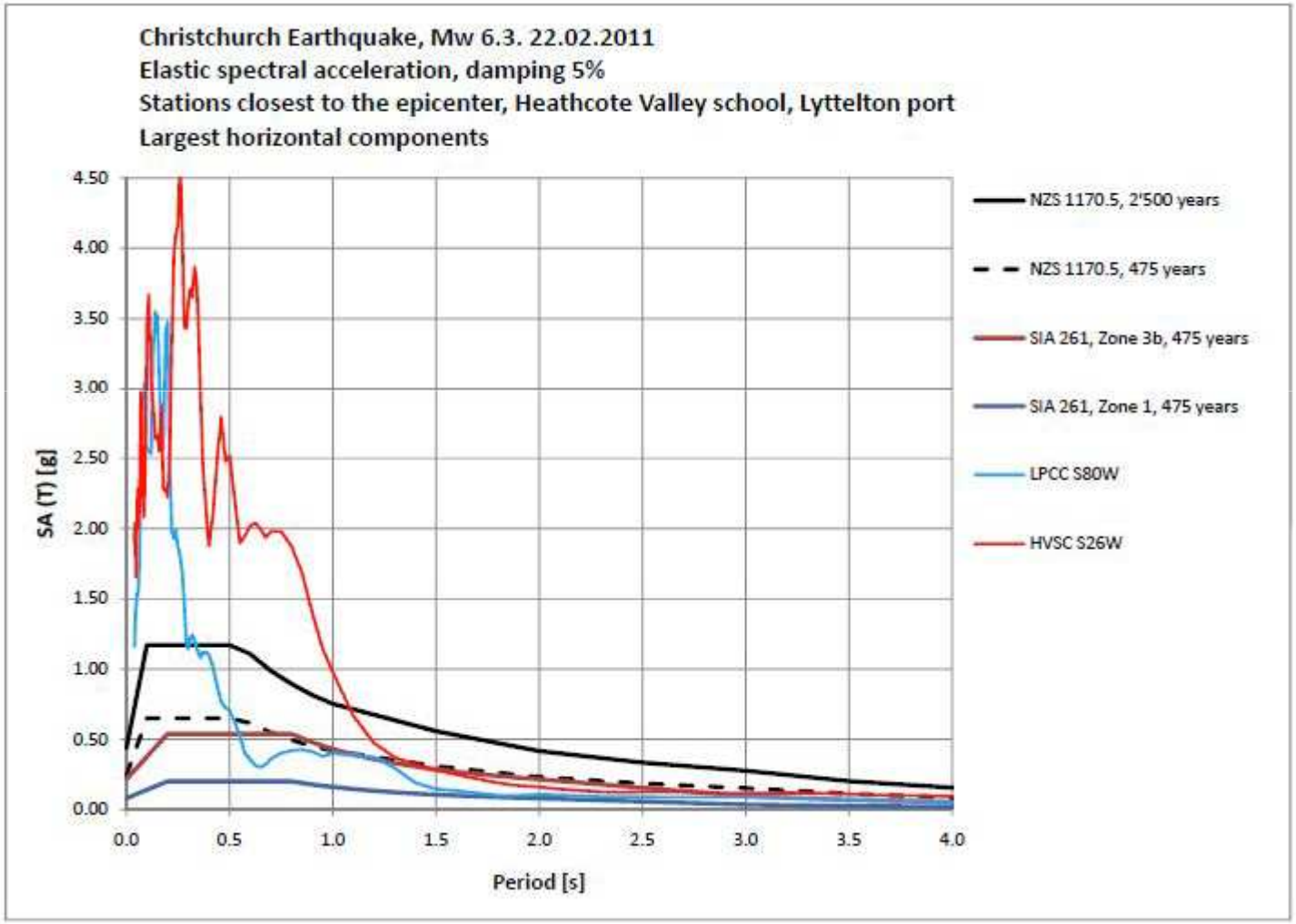
Magnitude 6.3

Epizentrum sehr nahe bei Christchurch Distanz 8 km, Tiefe 5 km, Dauer nur ca. 10 Sekunden

Christchurch 22. Februar 2011



Christchurch 22. Februar 2011



Erdbeben & Tsunami - kein neues Phänomen

[Wikipedia]

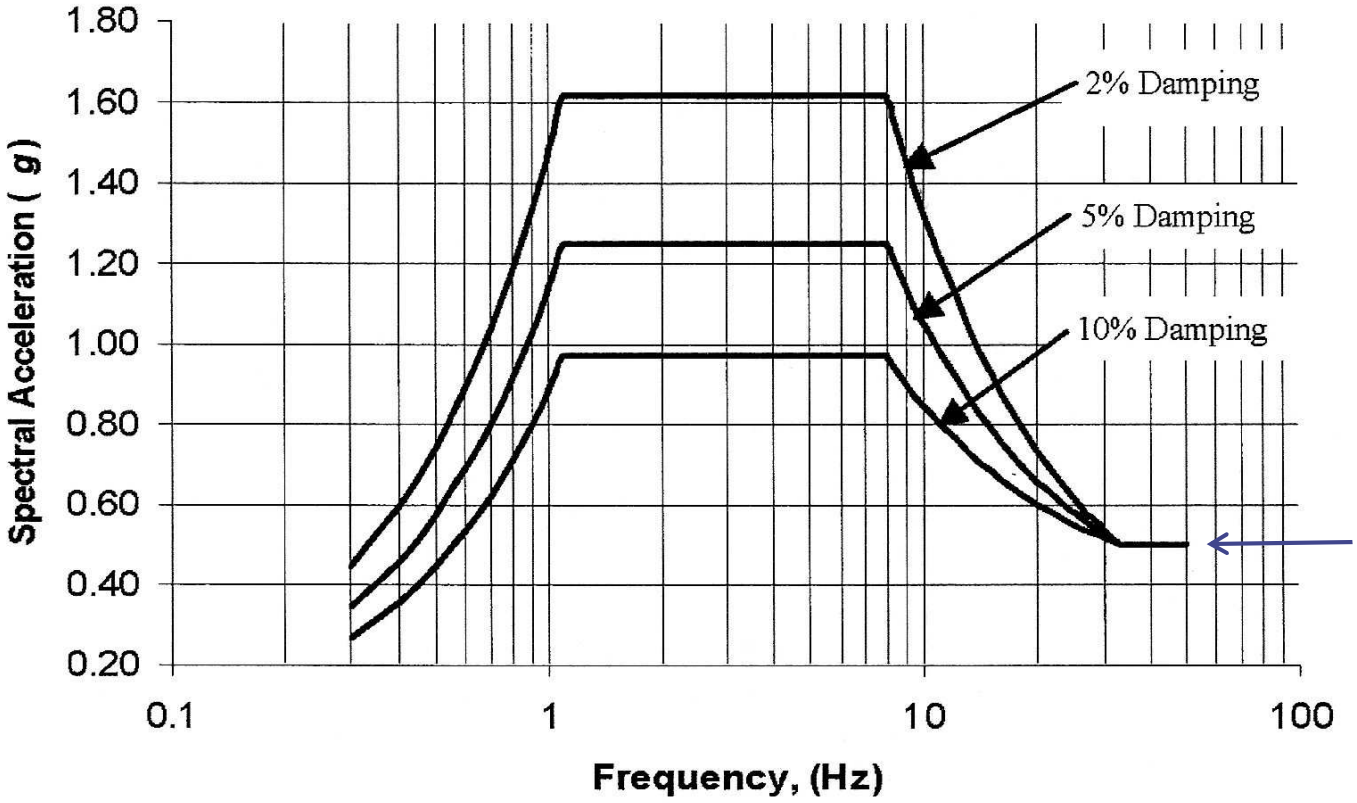
Jahr	Ort	Magnitude	Tsunami
1896	Meiji Sanriku, Japan	8.2-8.5	38 m
1908	Messina, Italien	7.2	12 m
1933	Showa Sanriku	8.4	28 m
2011	Tohoku, Japan	9.0	38 m

Nachweismethoden nach IEEE Std 693-2005

Antwortspektren - Design Level

[IEEE 693]

High required response spectrum - 0.5g



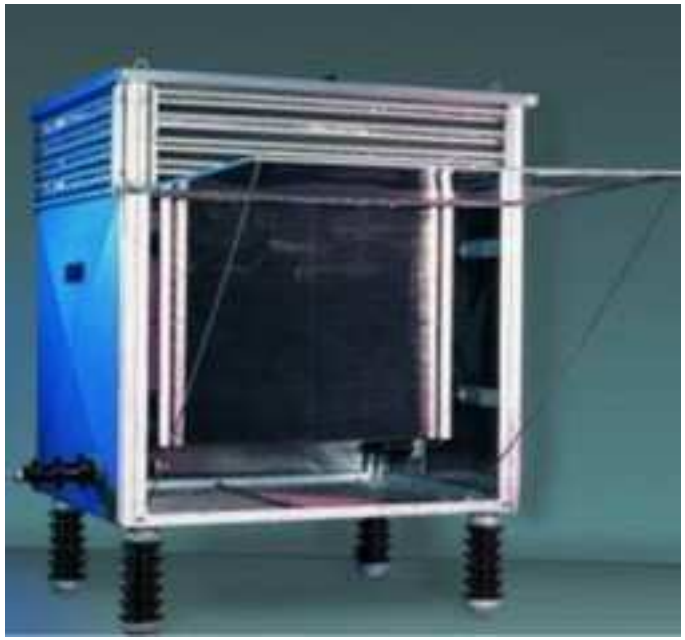
ZPA = 0.5g
zero period
acceleration

Methoden-Übersicht

- Statische Analyse
  → keine Eigenfrequenzen unter 33 Hz
  → Nachweis mit ZPA-Wert (0.5g)
  → meist rein analytischer Nachweis
- Statische Koeffizienten-Analyse
  → nur wenige Eigenfrequenzen unter 33 Hz
  → Nachweis mit max. Spektrumsbeschleunigung + Multimode-Faktor
  → rein analytischer Nachweis möglich
- Antwortspektrum-Analyse
  universell anwendbar, solange Realität genügend gut mit einem linearen Modell abgebildet werden kann
- Time-History-Analyse
- Rütteltischtests

Statische Koeffizienten-Methode

- meist relativ einfache Strukturen
- wenige heikle, nachzuweisende Details z.B. Fussisolatoren, Bodenverankerung



Bilder: Filterwiderstände der Firma Schniewindt

Spektrumsanalyse

- Lineare FE-Simulationen mit Workbench
- Balken-, Schalen- oder Volumenmodelle

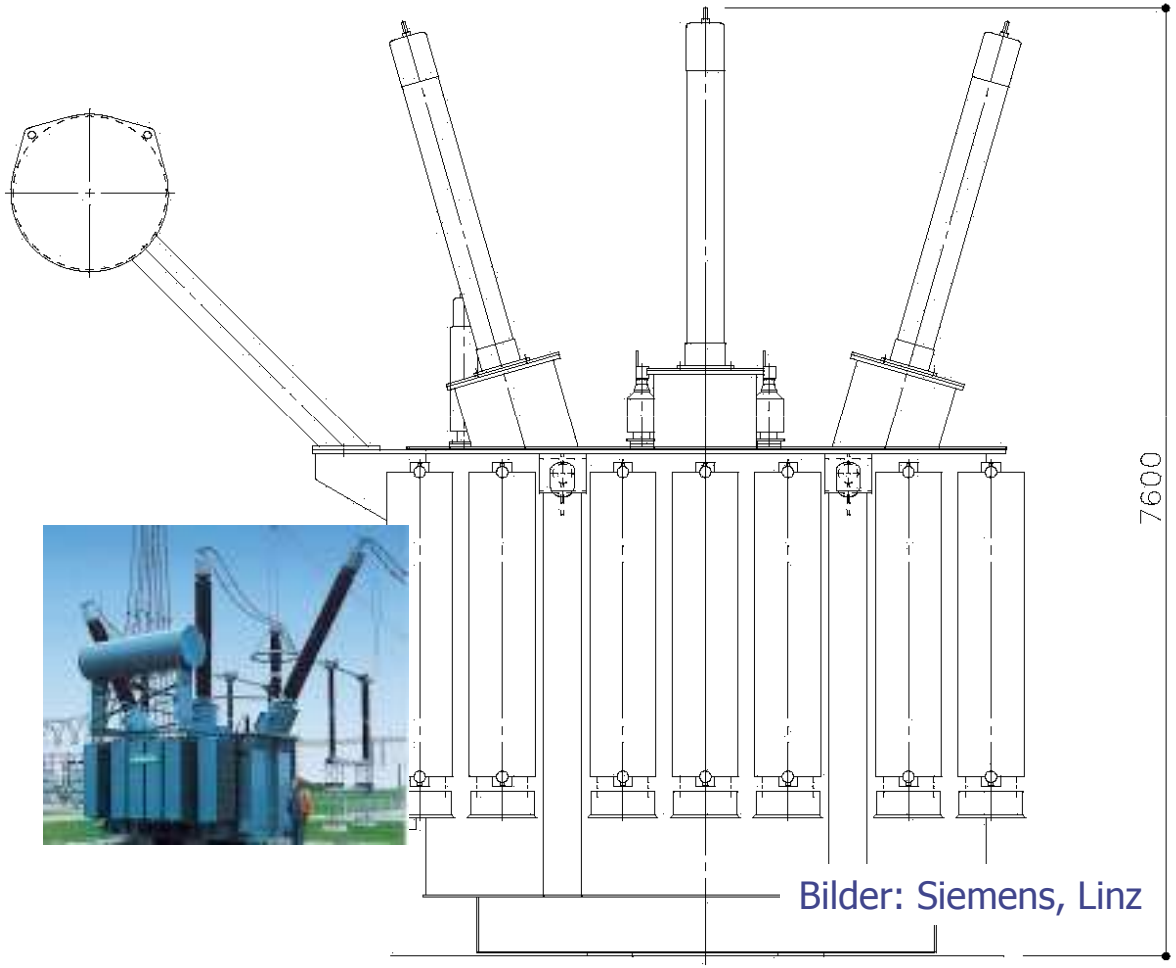
Stromwandler
Trench France

Spannungsteiler
Maxwell, Rossens

Spektrumsanalyse + Rütteltest

Ist die Komponente für einen Rütteltest zu gross, werden nur heikle Einzelteile getestet. Der Rest muss mittels Simulation nachgewiesen werden.

Beispiel:
Transformatoren und deren Durchführungen



Bilder: Siemens, Linz

Time History + Rütteltest

Leistungsschalter mit Reibdämpfer
Abgleich mit Rütteltest für Nachweis von Varianten

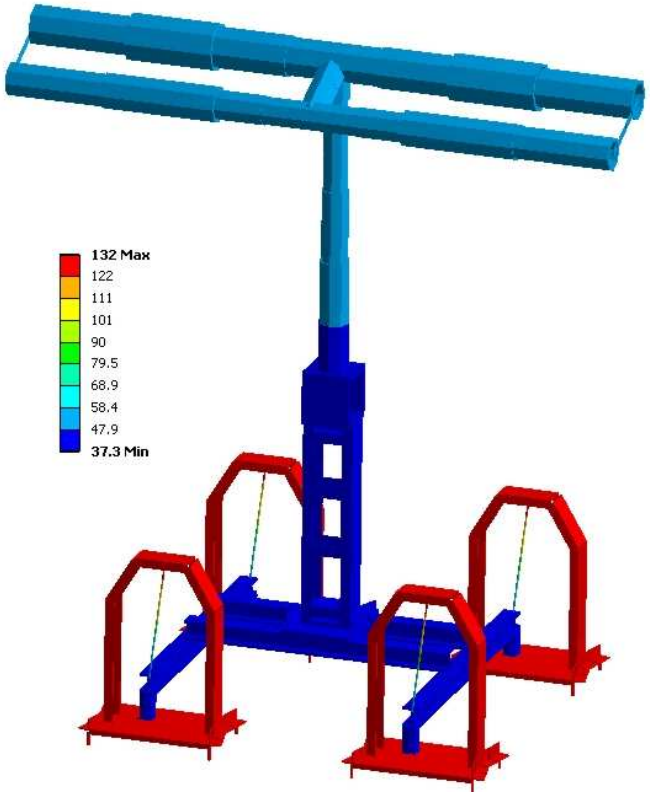


Bild: Siemens, Berlin

Nachweis nach IEEE mit Spektrumsanalyse in Workbench

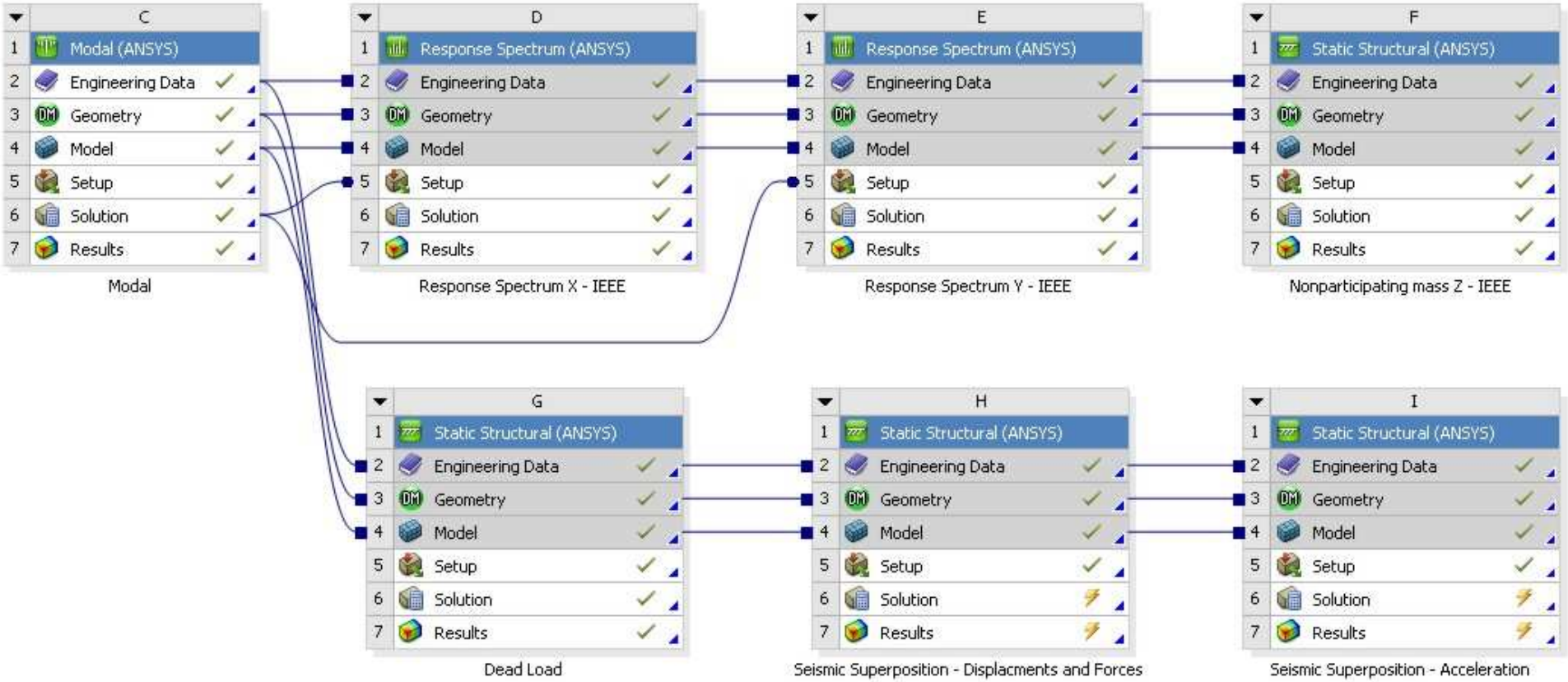
Vorgehen

1. Modalanalyse
2. Spektrumsanalysen in allen drei Achsrichtungen
3. Überlagerung der drei Achsrichtungen nach der SRSS-Methode (Square Root Sum of the Squares)
4. Statische Analysen Eigengewicht und Normallasten (Wind, Öldruck etc.)
5. Lastkombination
6. Auswertung und Nachweise

Das Vorgehen wird im Folgenden am Beispiel eines Stromwandlers gezeigt, der auf einem Stahlunterbau steht.

Nachweis mit Spektrumsanalyse

WB-Projekt



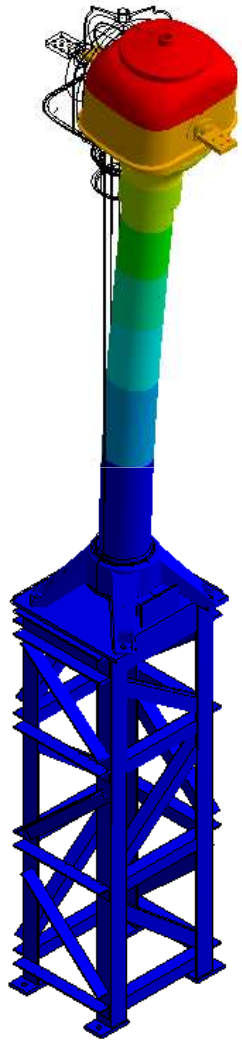
Modalanalyse

- Frequenzsuche im Bereich 0 – 33 Hz
- Massenbeteiligung muss mindestens 90% betragen
  → statische Analyse für unbeteiligte Masse mit Beschleunigungs-anteil des ZPA-Werts (seit WB12 kann fehlende Masse direkt in der Spektrumsanalyse berücksichtigt werden)

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	3.20410	0.31210	-0.14999E-01	0.020751	0.224973E-03	0.246003E-03	0.206783E-03
2	3.27207	0.30562	-0.72282	1.000000	0.522473	0.571558	0.480229
3	14.2421	0.70214E-01	-0.21562	0.298299	0.464908E-01	0.622395	0.427318E-01
4	14.9695	0.66803E-01	0.20474E-02	0.002833	0.419199E-05	0.622399	0.385305E-05
5	24.4777	0.40854E-01	0.20787E-01	0.028758	0.432094E-03	0.622872	0.397157E-03
6	24.8729	0.40204E-01	0.21955E-02	0.003037	0.482024E-05	0.622877	0.443050E-05
7	29.9602	0.33378E-01	-0.53063	0.734114	0.281573	0.930771	0.258806
8	34.1620	0.29272E-01	0.25162	0.348103	0.633112E-01	1.00000	0.581921E-01
sum					0.914514		0.840571

$\omega_i = f_i \cdot 2\pi$ γ_i



Spektrumsanalyse pro Richtung

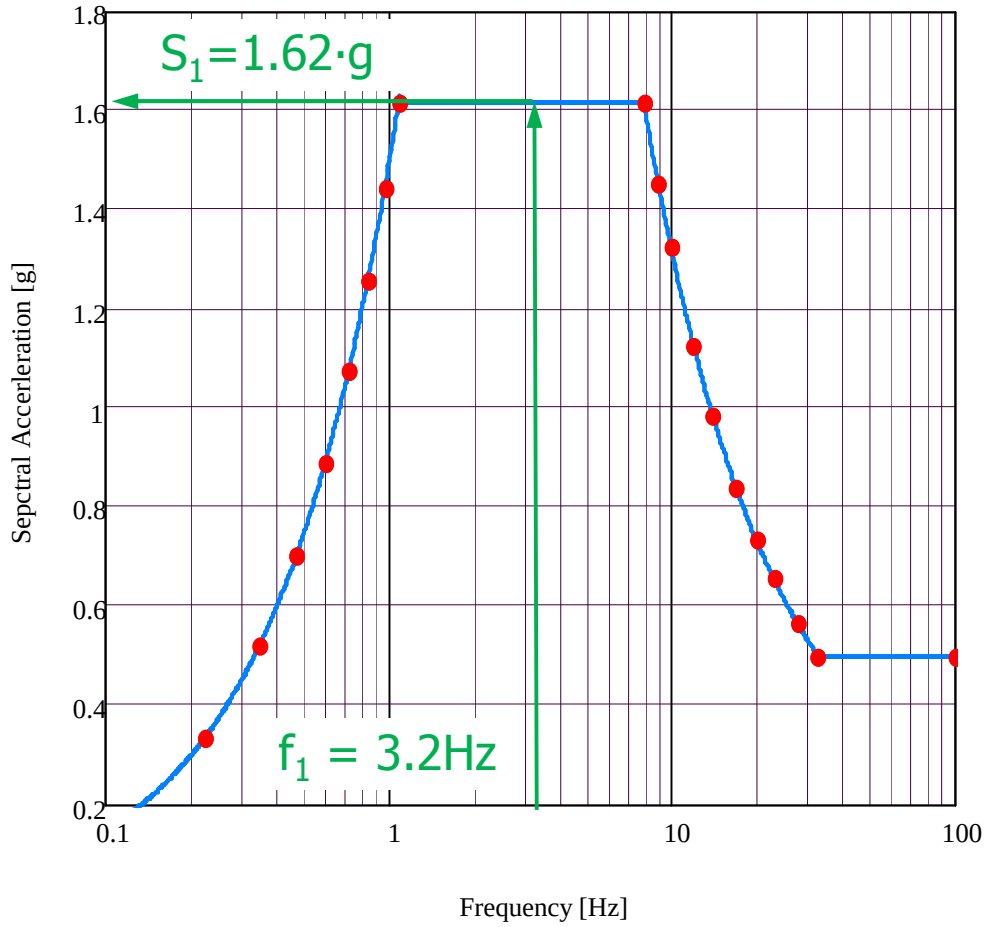
- Beschleunigungsspektrums nach IEEE mit 2% Dämpfung
- Berechnung der modalen Antworten (Bsp. für Verschiebungsantwort)

$$\{R\}_i = \frac{S_i \cdot \gamma_i}{\omega_i^2} \cdot \{\phi\}_i$$

$\{\phi\}_i$ Eigenvektoren

- Überlagerung der modalen Antworten zur Gesamtantwort mit der SRSS-Methode

$$\{R\} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \{R\}_i^2}$$



Überlagerung der 3 Richtungsspektren

Falls die Massenbeteiligung in vertikaler Richtung 0% aufweist, kann statt einer Spektrumsanalyse auch eine statische Analyse mit dem ZPA-Beschleunigungswert durchgeführt werden.

Überlagerung in Workbench über APDL-Befehle in einer statischen Analyse.

```
! SRSS Ueberlagerung
lcoper,zero
Lcoper,add,1,mult,1
Lcoper,add,2,mult,2
Lcoper,add,3,mult,3
Lcoper,sqrt
```

Statische Analysen und Lastkombination

Für das Eigengewicht und andere Betriebslasten wie Wind oder Innendruck sind statischen Analyse durchzuführen.

Das Eigengewicht, die Normallasten sowie die seismischen Lasten werden für den ASD-Nachweis (Allowable Strength Design) wie folgt überlagert:

$$ASD = 1.0 \cdot D + 1.0 \cdot OP + 1.0 \cdot E_{RRS}$$

D Eigengewicht
OP normale Betriebslasten
E_{RRS} seismische Last (3-axial)

Gestützt auf die amerikanischen Normen erlaubt IEEE auch den LRFD-Nachweis (Load Resistance Factor Design). Dieser lässt etwas höhere Auslastungsgrade zu. In vielen Fällen schreibt deshalb der Endkunde die ASD-Methode vor.

Auswertung und Nachweis

Ausgewertet werden die Verschiebungen, die Beschleunigungen sowie die Schnittlasten der mechanisch relevanten Bauteile (Isolatoren, Schraubenverbindungen, Stahlunterbau, Anker etc.).

Zum Auswerten der Schnittlasten werden Gelenke definiert. Über die Gelenk-Kennnummer (_jid) werden die Schnittlasten zur Weiterverwendung in eine externes Textfile geschrieben.

Die Nachweisführung erfolgt mit Nennspannungen anhand der geforderten Normen:

→ Verbundwerkstoffe und Porzellan für Isolatoren nach IEEE
→ Stahl nach AISC Manual of Steel Construction
→ Aluminium nach Aluminium Design Manual

Verschiedenes

Literatur

BWG1 Das Erdbebenrisiko in der Schweiz und die Massnahmen des Bundes, Bundesamt für Wasser und Geologie BWG

BAFU1 Erdbebenertüchtigung von Bauwerken, Bundesamt für Umwelt, 2008 (Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, www.planat.ch)

SAH1 Erdbeben, SAH-Kurs 2003, René Steiger, EMPA, Abteilung Holz, Dübendorf

ISMES ISMES Istituto Sperimentale Modelli e Strutture, Bergamo

EAT1 Earthquake requirements and seismic capabilites for Eaton‘s electrical distribution and control equipment, Eaton, August 2009, www.eaton.com

SED Die jüngsten Erdbebenkatastrophen von Neuseeland und Japan aus der Sicht der Seismologie, öffentlicher Vortrag des Schweizerischen Erdbebendienstes an der ETH Zürich vom Donnerstag 17. März 2011, www.seismo.ethz.ch

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers
Recommended Practice for Seismic Design of Substations
IEEE Std 693-2005

AISC Steel Construction Manual
American Institute of Steel Construction

Internet

U.S. Geological Survey
http://earthquake.usgs.gov/earthquakes

NASCC: The Steel Conference 2011
Free Webinair: New Zealand and Japan Earthquakes, report on structural issues
http://www.aisc.org/form.aspx?ekfrm=28352