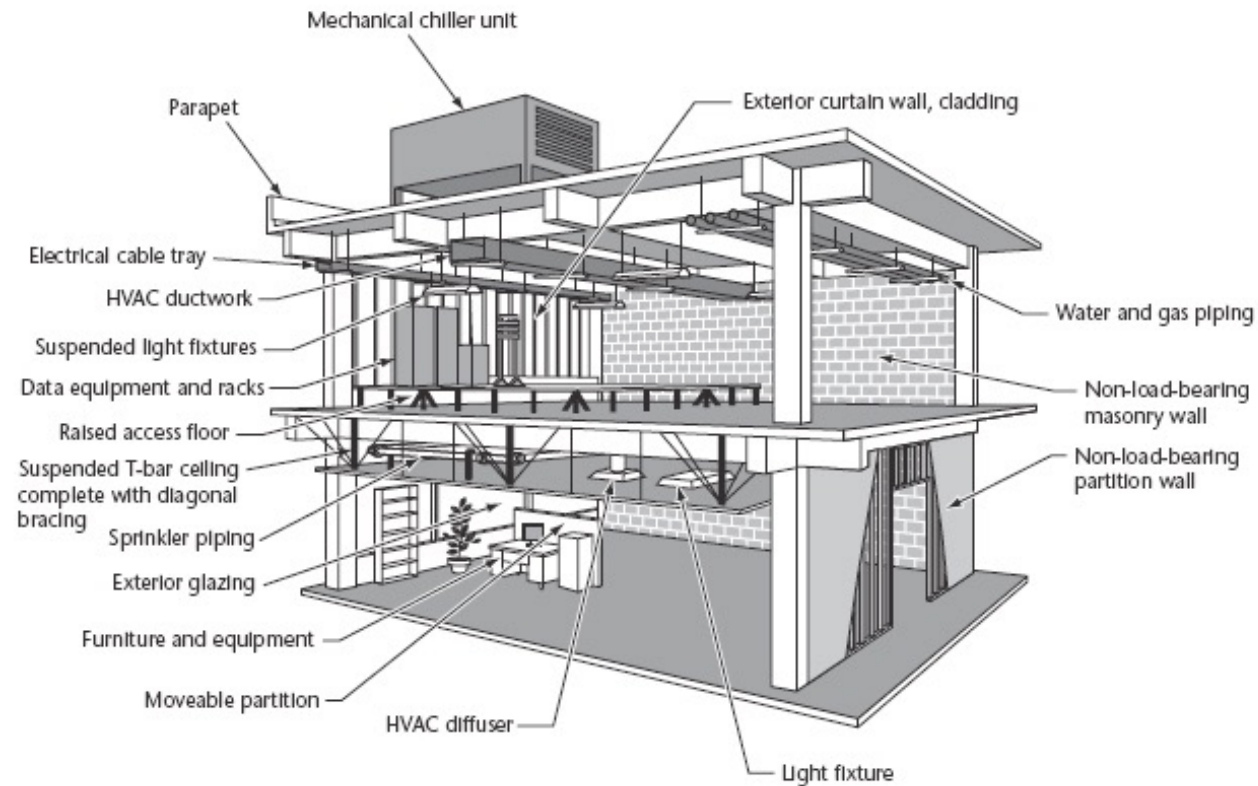


## Vertikale Erdbebenantwort regelmäßiger Tragwerke

### Assessment of Vertical Seismic Demands in Regular Buildings

- Maximale Beschleunigungsantwort
  - ▶ korrespondiert zu maximaler Beanspruchung
  - sehr steifer nichttragender Bauteile



Quelle: <http://www.paradigmengineering.ca/images/ofc.jpg>

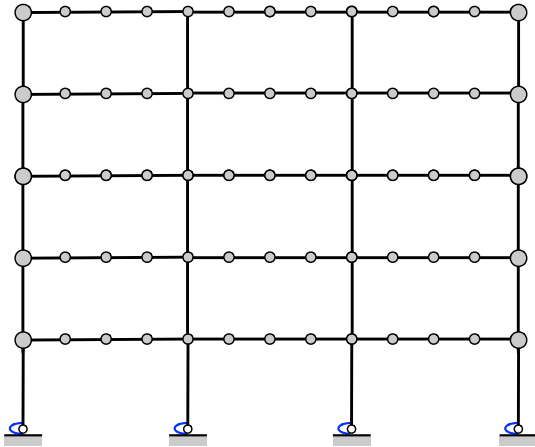
- Maximale Beschleunigungsantwort
  - ▶ korrespondiert zu maximaler Beanspruchung sehr steifer nichttragender Bauteile
  - Nichttragende Bauteile sind wichtiger Teil des Erdbebenrisikos
- Vertikale Erdbebenantwort
  - ▶ wird meist vernachlässigt
  - Annahme: konstant über Höhe regelmäßiger Tragwerke



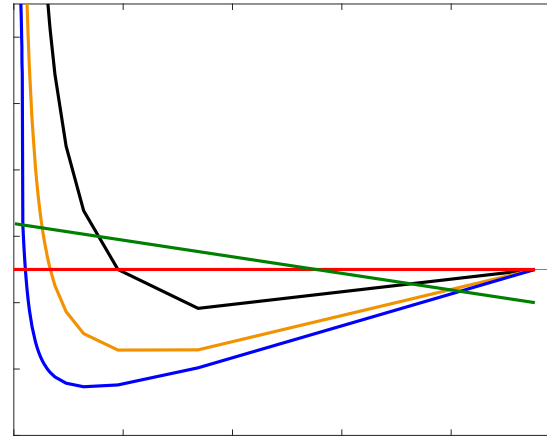
Quelle: <http://online.tarleton.edu/ACEF/EarthquakePreparednessforEducationalFacilities/>

# Überblick

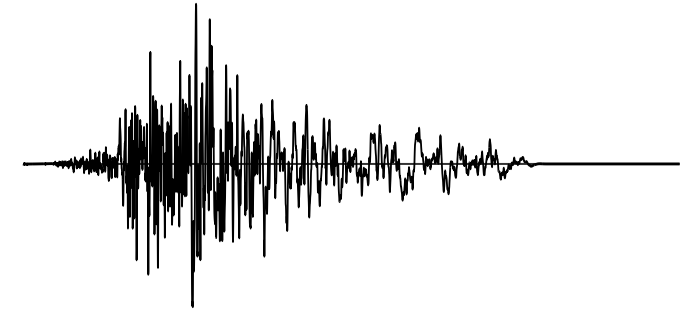
Stahlrahmen



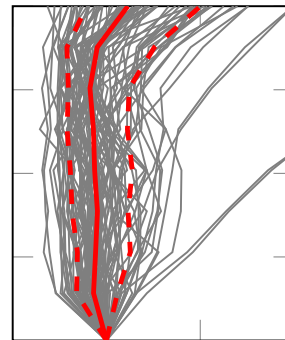
Dämpfungsmodellierung



Erdbebenanregung

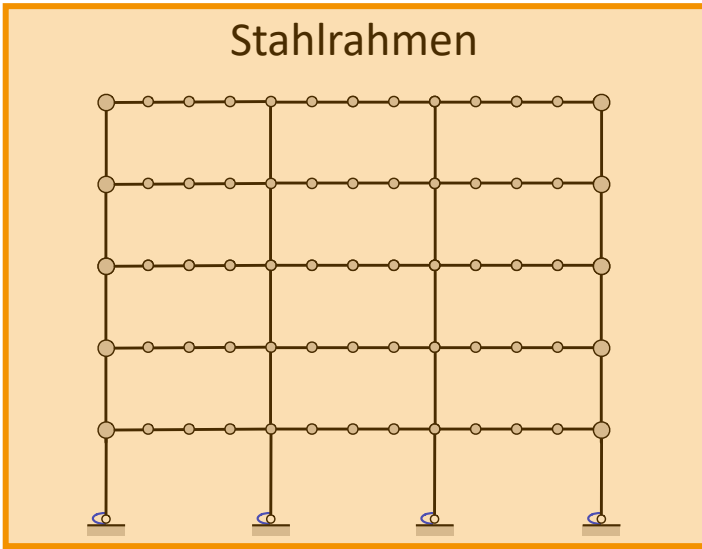


Erdbebenantwort

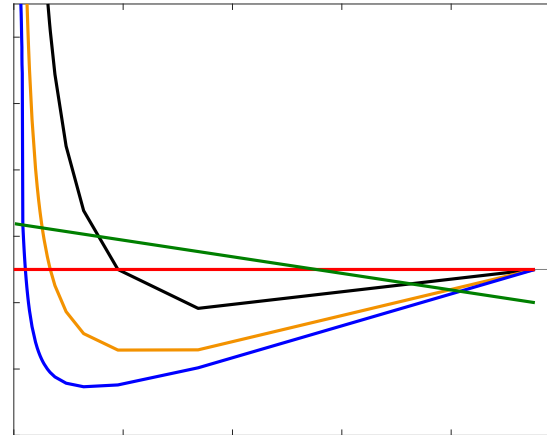


# Überblick

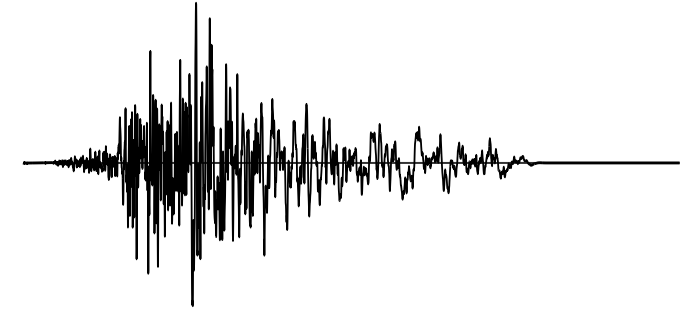
## Stahlrahmen



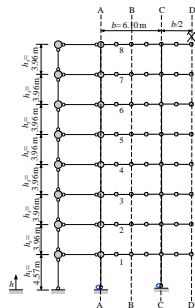
## Dämpfungsmodellierung



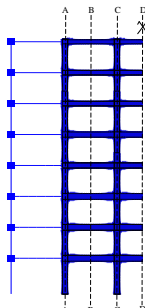
## Erdbebenanregung



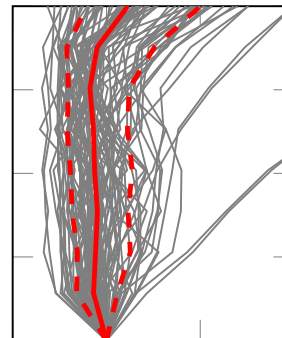
## Balkenmodell



## Schalenmodell

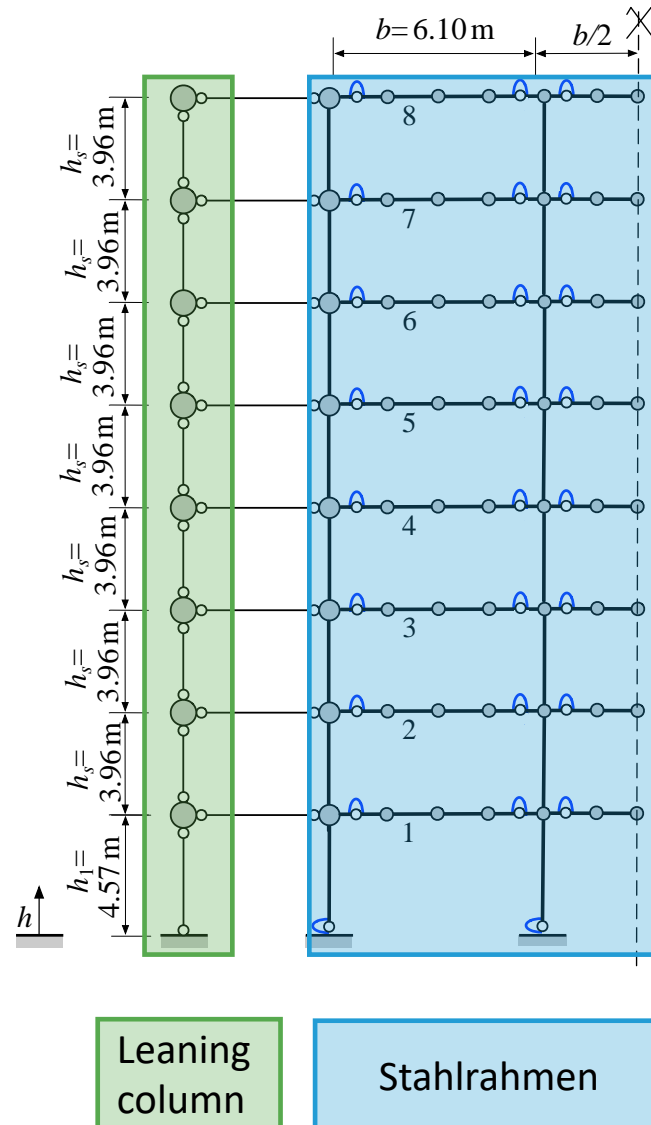


## Erdbebenantwort



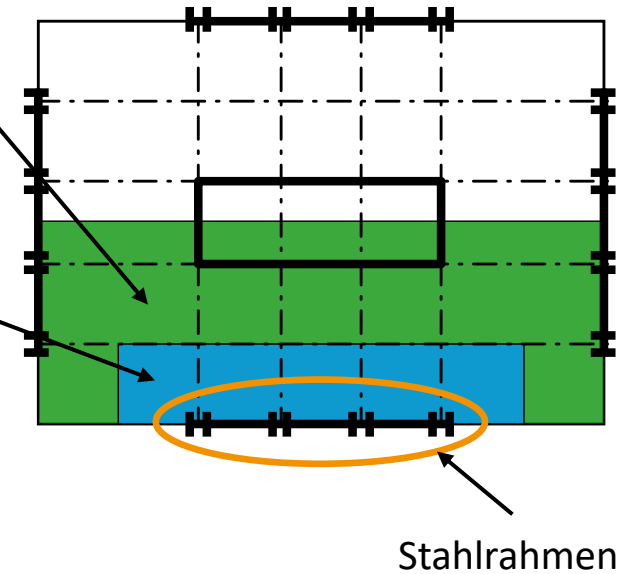


### 8-stöckiger FEMA P-695 Stahlrahmen



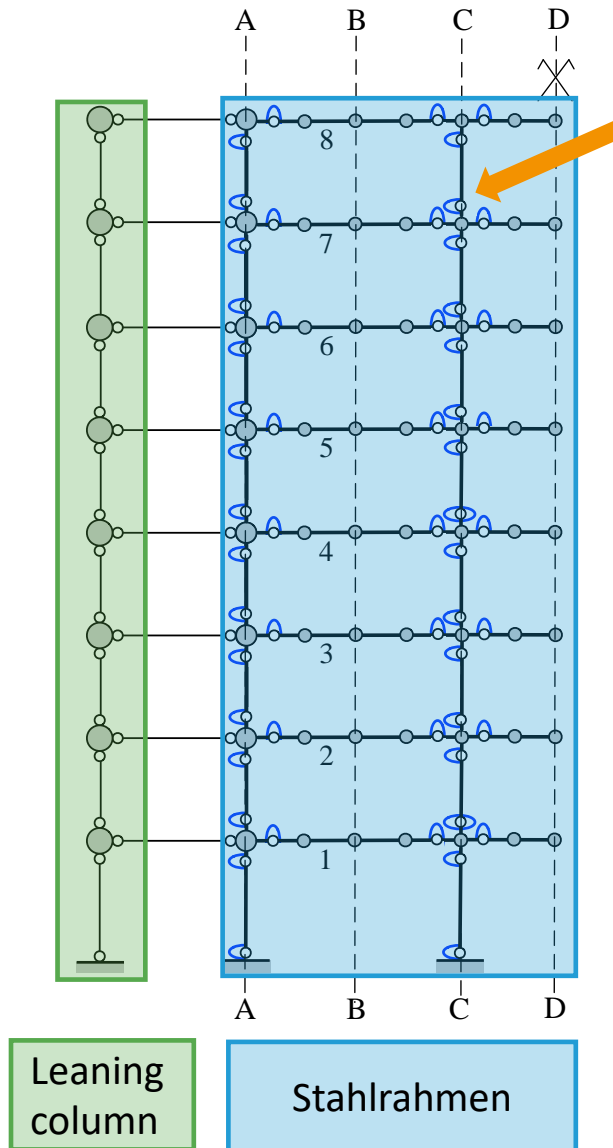
Einflussfläche der Lasten  
des *Leaning column*

Einflussfläche der Lasten  
des Stahlrahmens



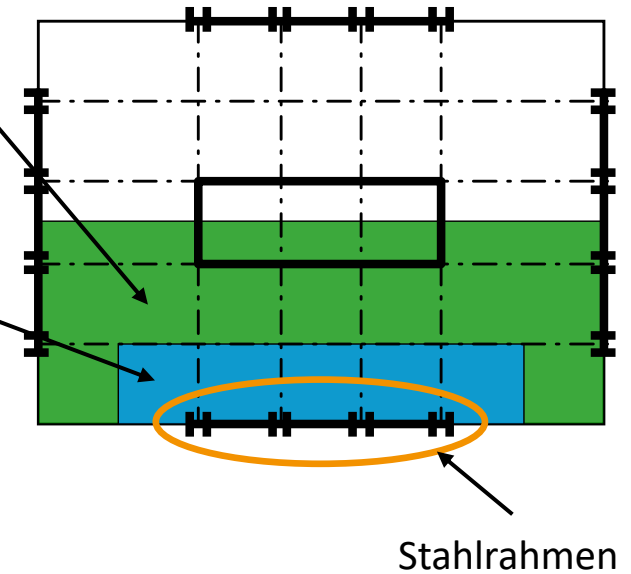
- ★ Elastizitätsmodul von Stahl
- ★ elastisches Materialverhalten
- ★ reduzierte Riegelabschnitte
- ★ Bernoulli-Euler Balken
- ★ Punktmassen

### 8-stöckiger FEMA P-695 Stahlrahmen



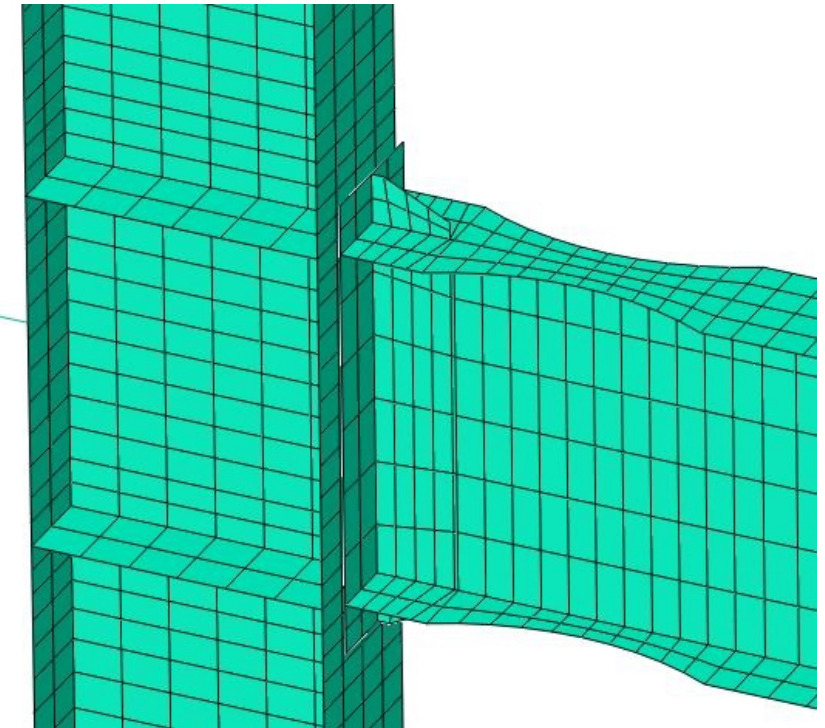
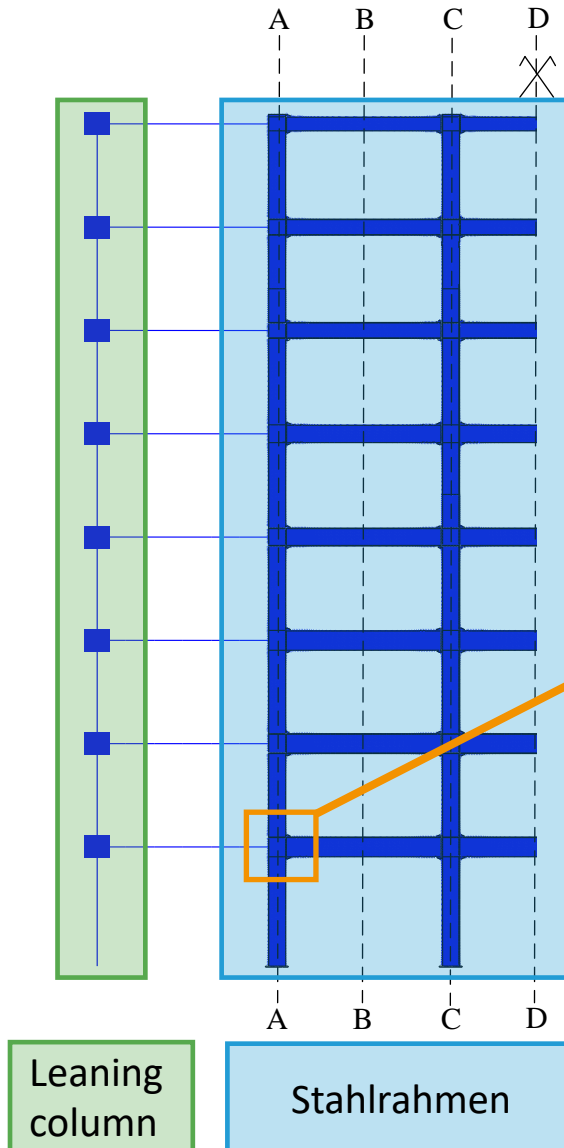
Einflussfläche der Lasten  
des *Leaning column*

Einflussfläche der Lasten  
des Stahlrahmens



- ★ Elastizitätsmodul von Stahl
- ★ inelastisches Materialverhalten
- ★ reduzierte Riegelabschnitte
- ★ Bernoulli-Euler Balken
- ★ Punktmassen

8-stöckiger  
FEMA P-695  
Stahlrahmen

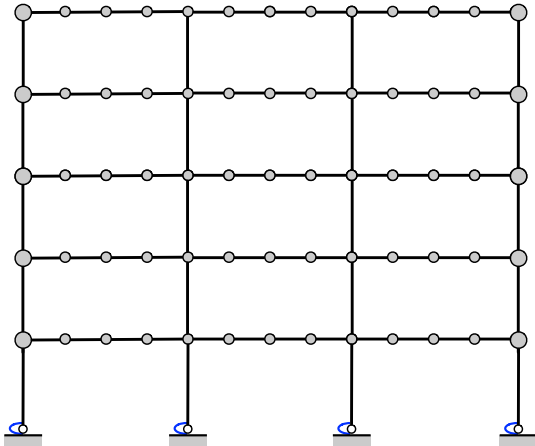


- ★ Elastizitätsmodul von Stahl
- ★ (in)elastisches Materialverhalten
- ★ reduzierte Riegelabschnitte
- ★ Bernoulli-Euler Balken
- ★ kontinuierliche Massenverteilung

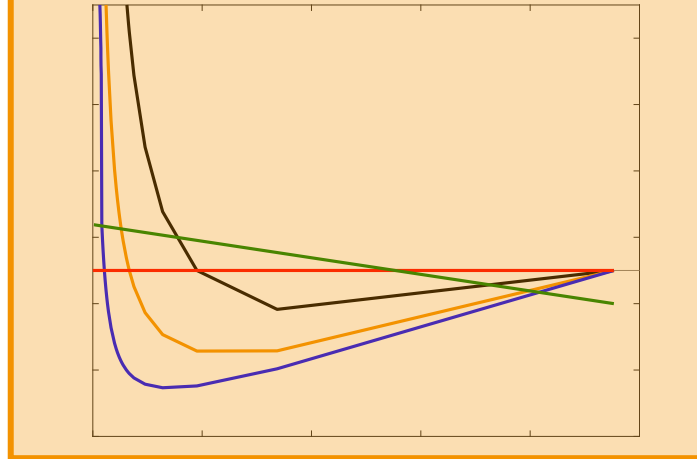


# Überblick

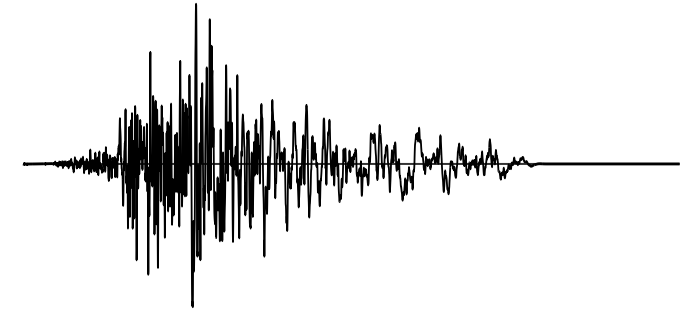
Stahlrahmen



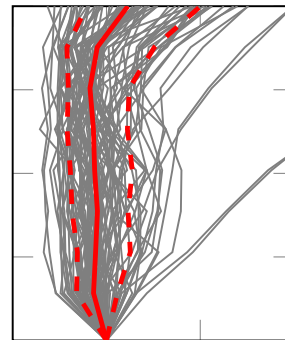
Dämpfungsmodellierung



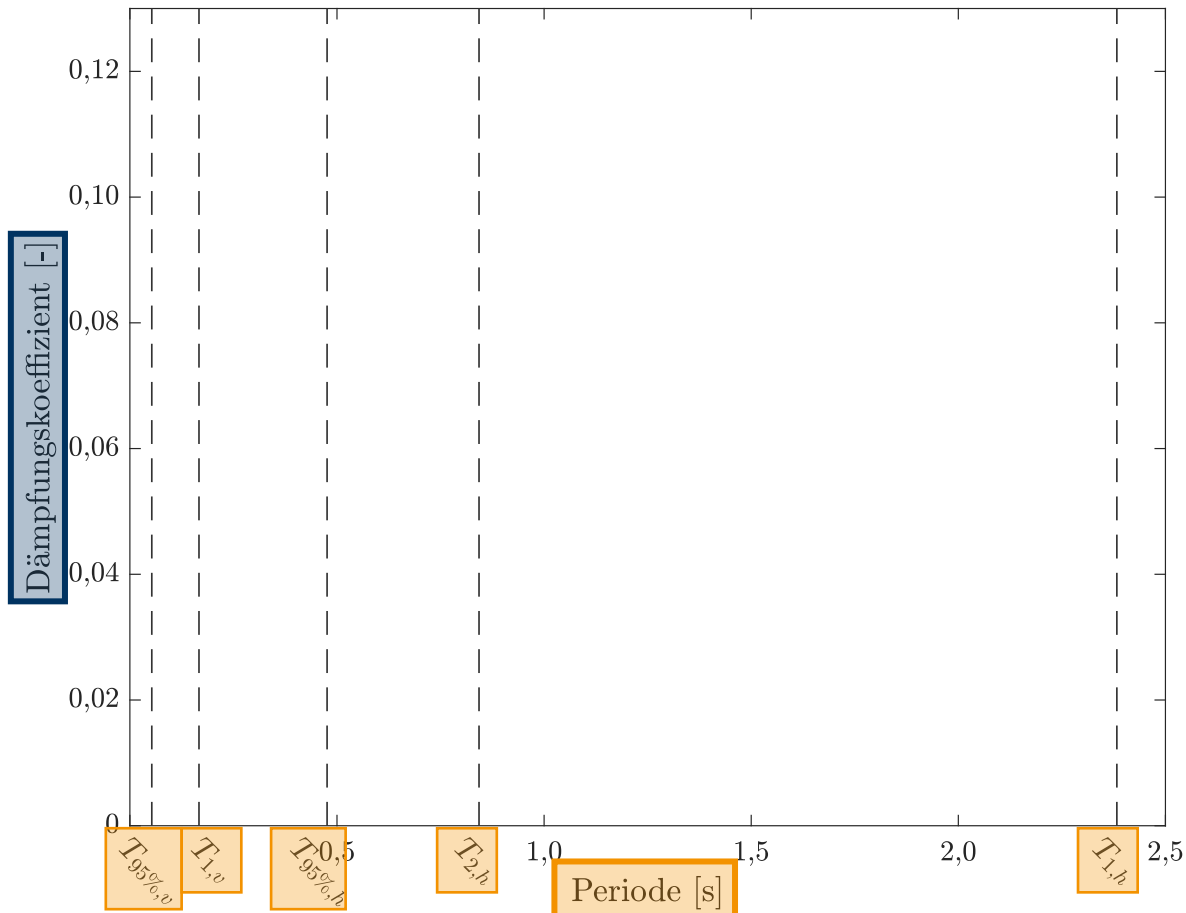
Erdbebenanregung



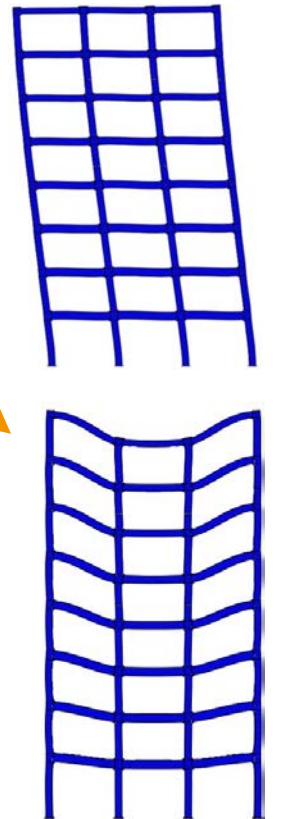
Erdbebenantwort



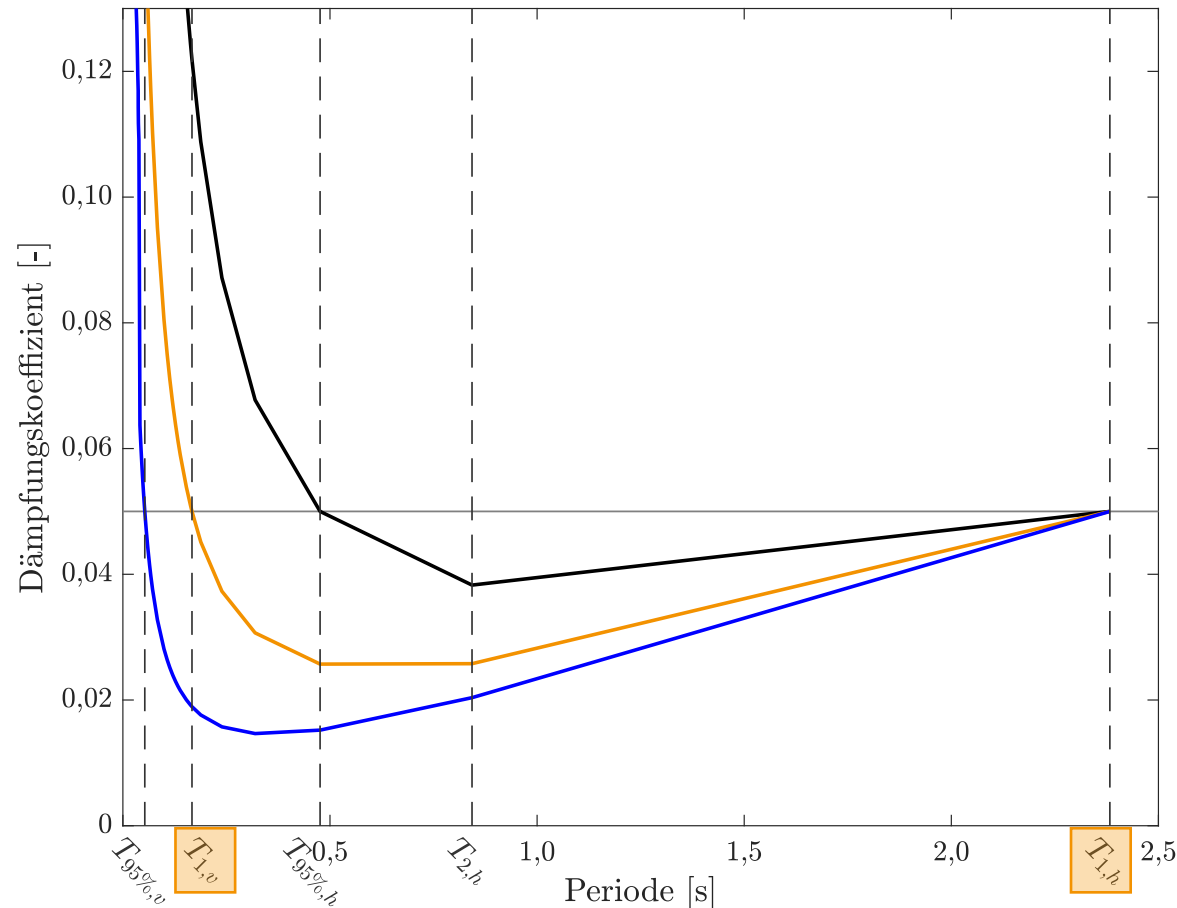
## Dämpfungsvarianten am Beispiel des 8-stöckigen Rahmens



- ★  $T_{1,h} = 2,38 \text{ s}$
- ★  $T_{95\%,h} = 0,47 \text{ s}$
- ★  $T_{1,v} = 0,17 \text{ s}$
- ★  $T_{95\%,v} = 0,06 \text{ s}$



## Dämpfungsvarianten am Beispiel des 8-stöckigen Rahmens



— Rayleigh Dämpfung  $R_{95\%,h}$   
— Rayleigh Dämpfung  $R_{1,v}$   
— Rayleigh Dämpfung  $R_{95\%,v}$

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K}$$

$\mathbf{C}$  ... Dämpfungsmatrix

$\mathbf{M}$  ... Massenmatrix

$\mathbf{K}$  ... Steifigkeitsmatrix

$\alpha, \beta$  ... Proportionalitätsfaktoren

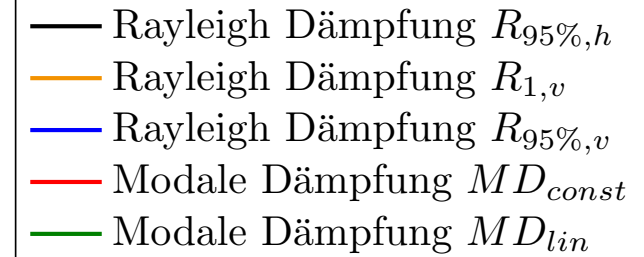
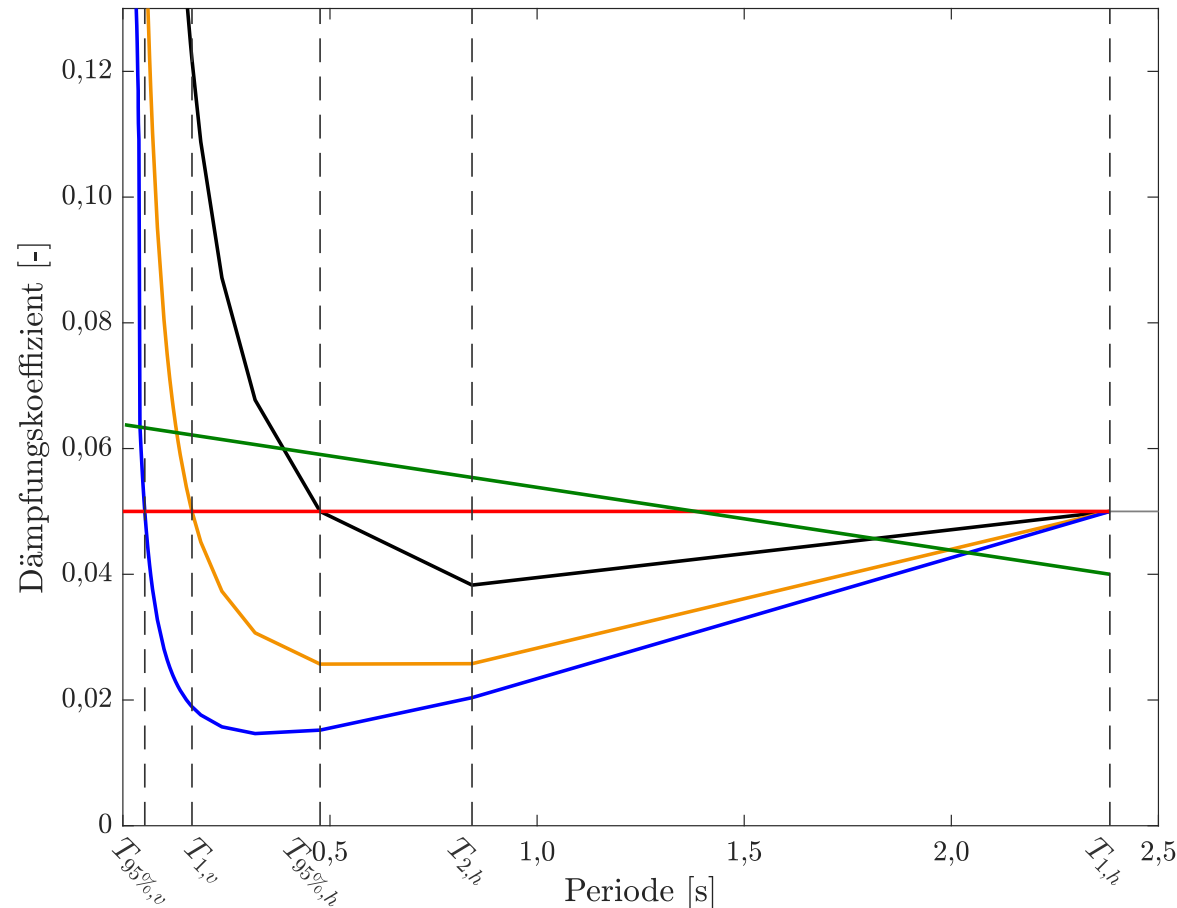
★  $R_{95\%,h}$ : hohe Dämpfung vertikaler Modes

→ geringe PFA-Vergrößerung

★  $R_{95\%,v}$ : geringe Dämpfung niedriger Modes

→ zu starke PFA-Vergrößerung

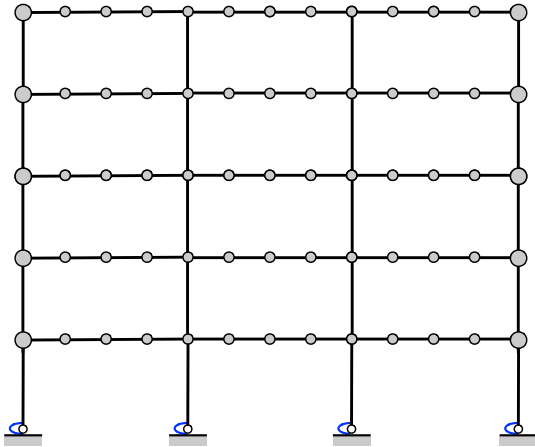
## Dämpfungsvarianten am Beispiel des 8-stöckigen Rahmens



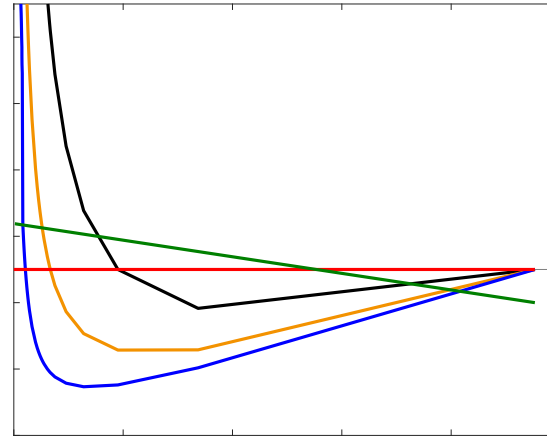
- ★  $R_{95\%,h}$ : hohe Dämpfung vertikaler Modes  
→ geringe PFA-Vergrößerung
- ★  $R_{95\%,v}$ : geringe Dämpfung niedriger Modes  
→ zu starke PFA-Vergrößerung
- ★ modale Dämpfung  
→ zwischen Rayleigh-Varianten

# Überblick

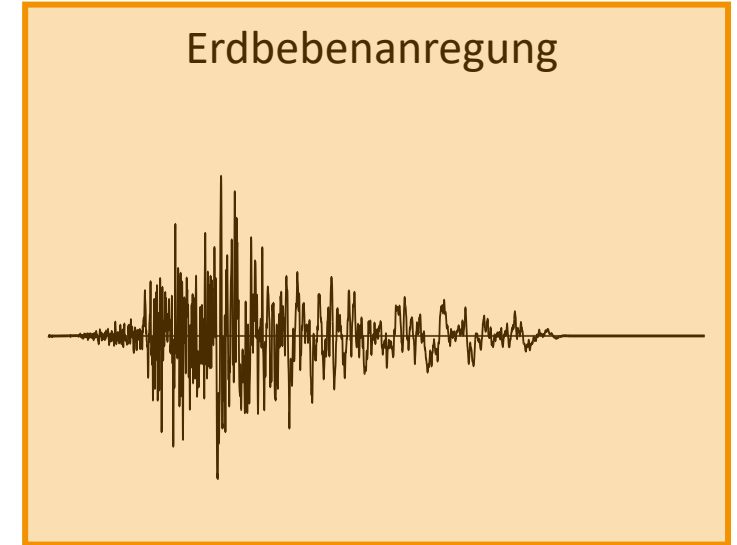
Stahlrahmen



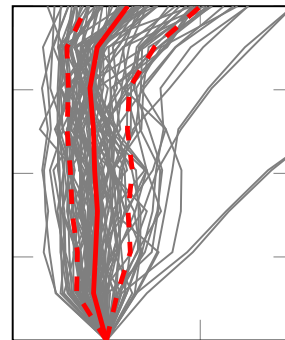
Dämpfungsmodellierung



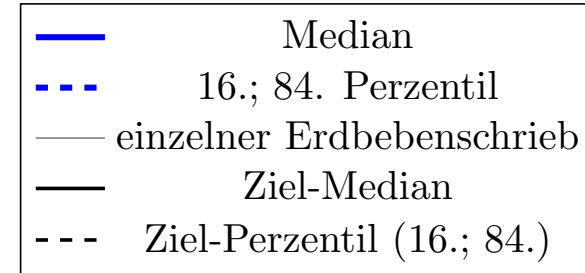
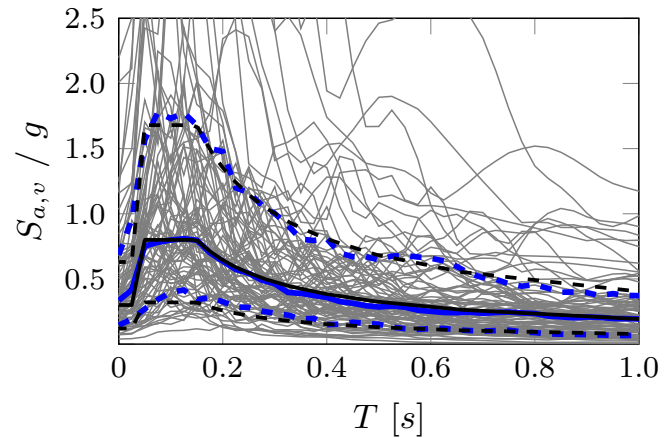
Erdbebenanregung



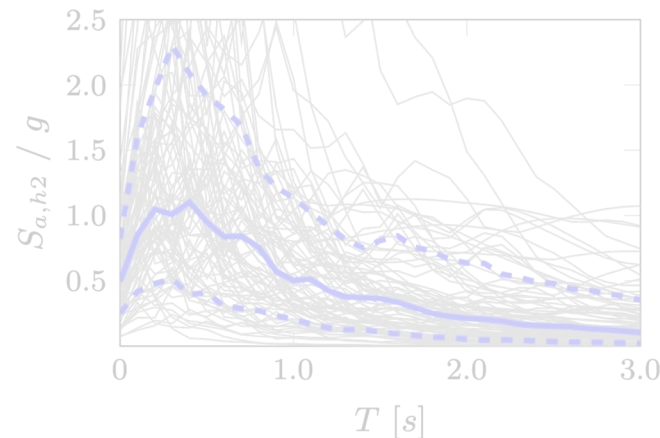
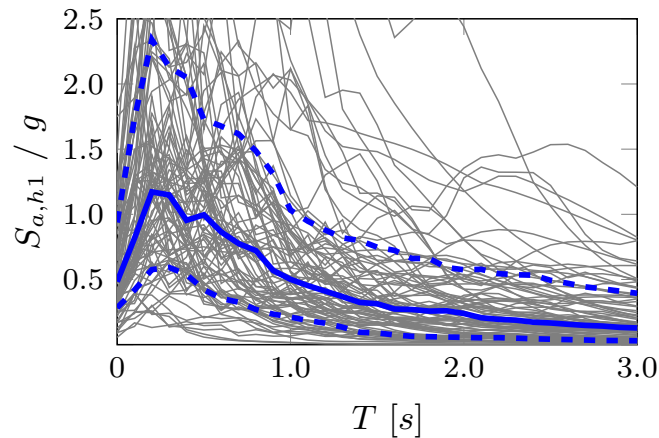
Erdbebenantwort



### Vertikale Komponente



### Horizontale Komponente

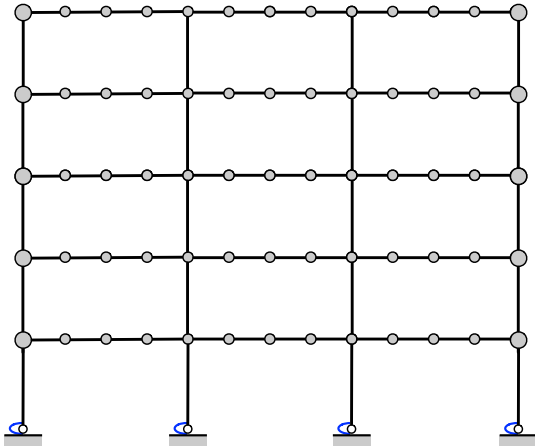


- ★ 90 Erdbebenschriebe
- ★ Ziel-Median: vertikales NEHRP-Spektrum
- ★ konstanter Skalier-Faktor: 2,10
- ★ min. Magnitude  $M_W^{min} = 5,5$

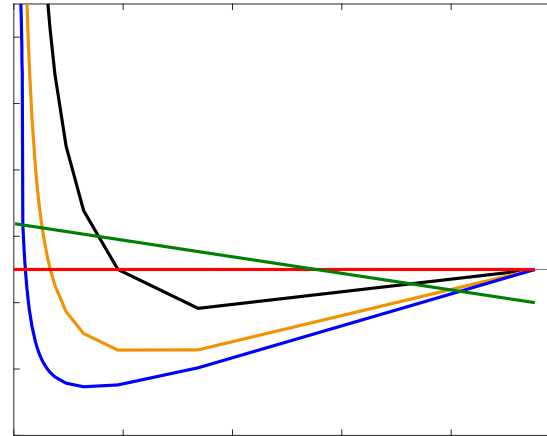


# Überblick

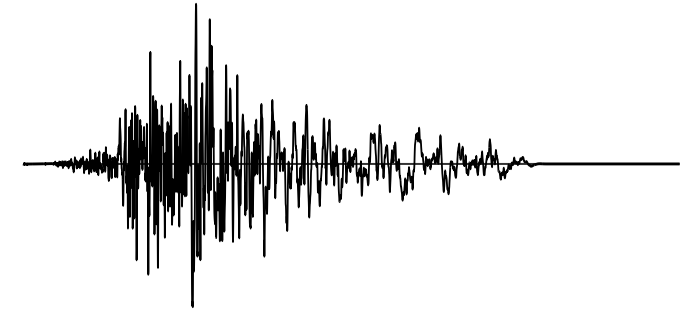
Stahlrahmen



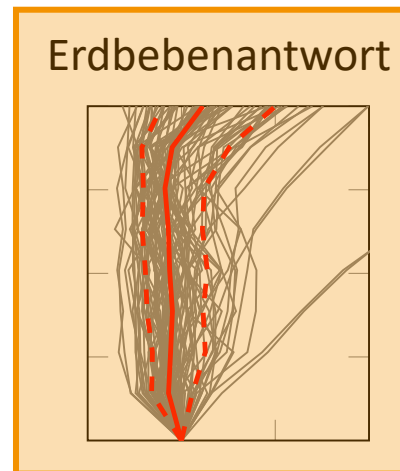
Dämpfungsmodellierung



Erdbebenanregung



Erdbebenantwort



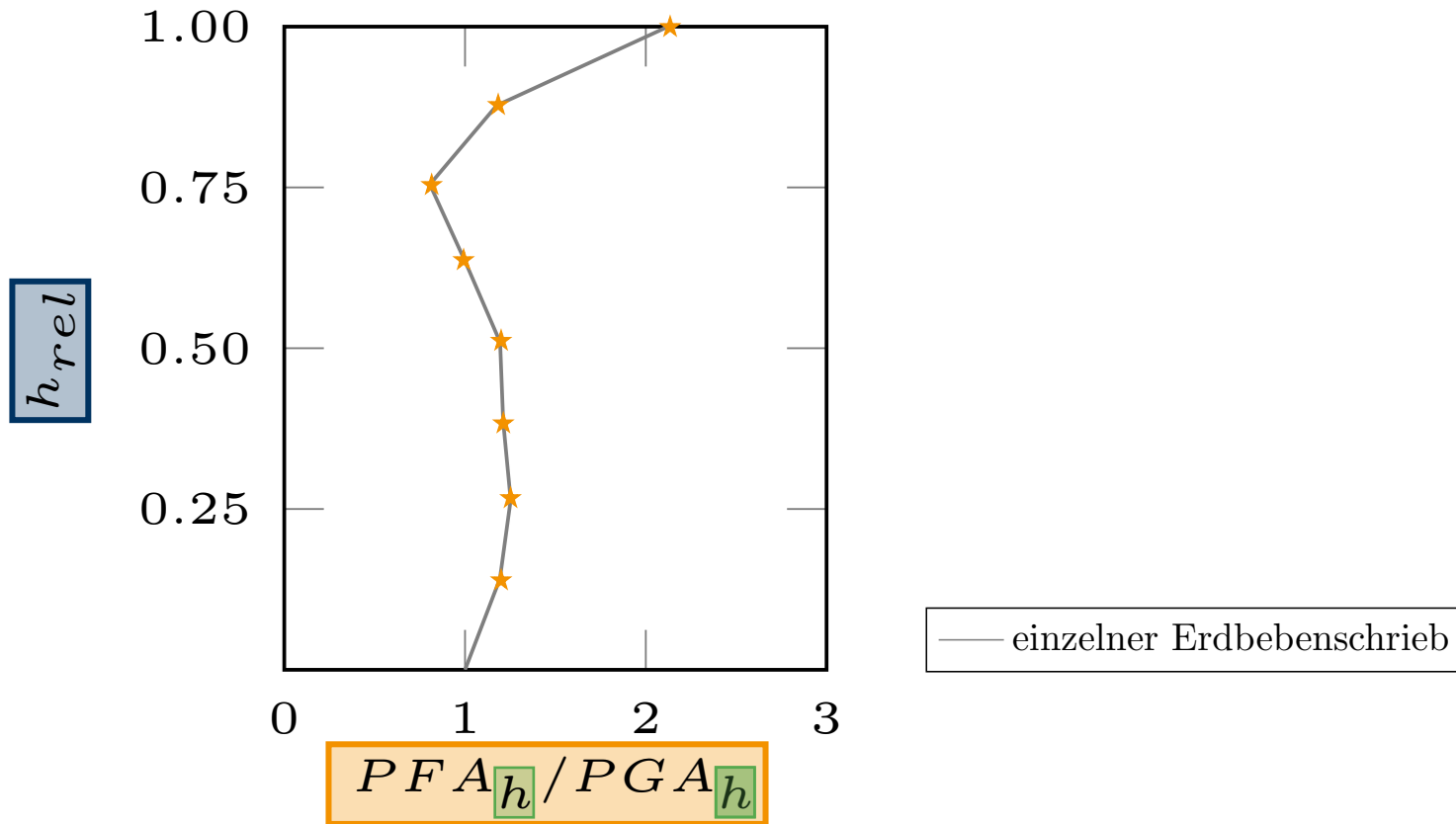
Elastische Antwort

Dämpfungsvarianten

Inelastische Antwort



### Diagramm dynamischer Vergrößerung



Relative Höhe

$$h_{rel} = \frac{h}{H} = \frac{\text{aktuelle Höhe}}{\text{Gesamthöhe}}$$

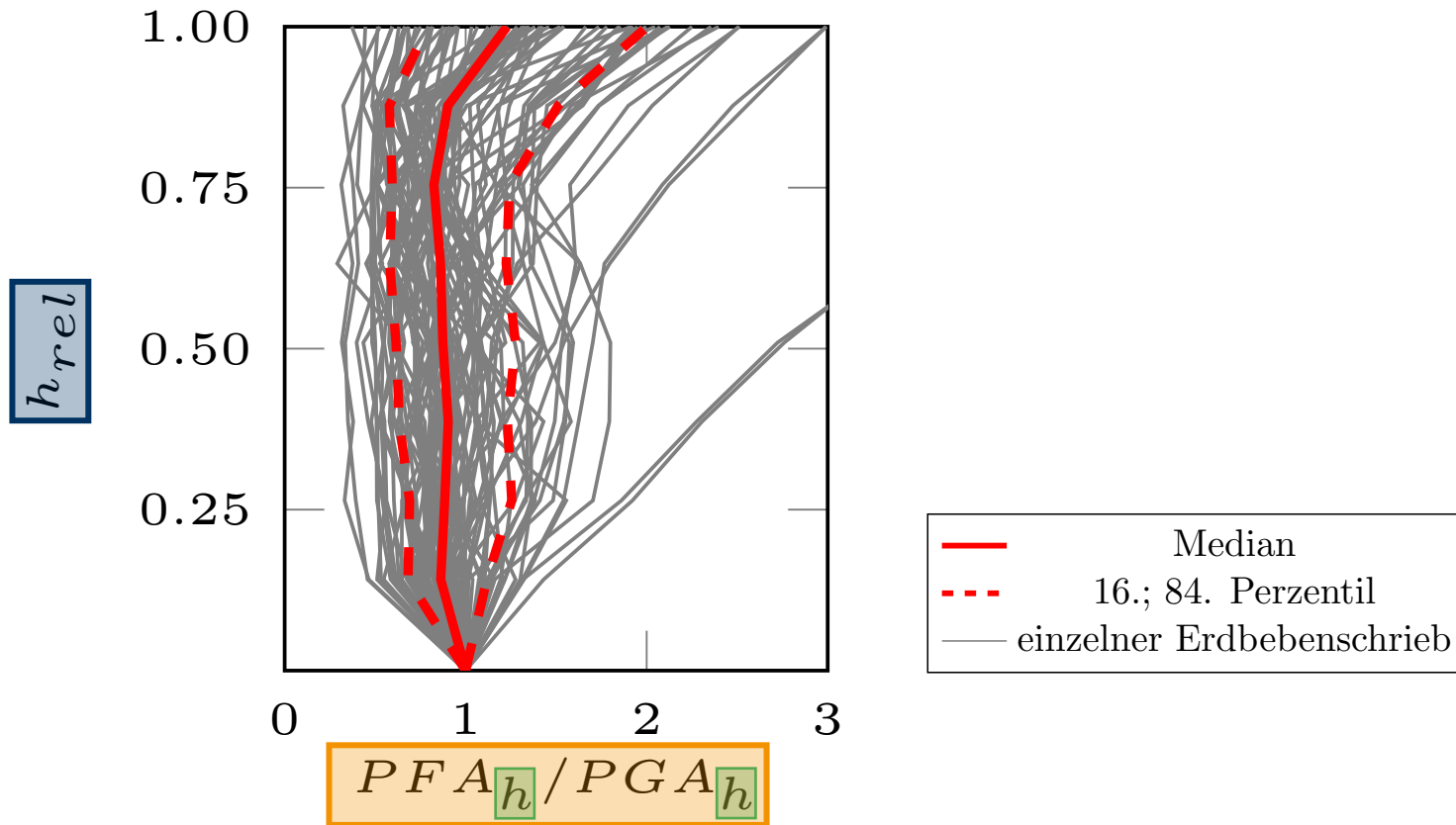
Dynamische Vergrößerung

- ★ *PFA* ... Peak Floor Acceleration
- ★ *PGA* ... Peak Ground Acceleration

Index

- ★ *h* ... horizontale Komponente
- ★ *v* ... vertikale Komponente

### Diagramm dynamischer Vergrößerung



Relative Höhe

$$h_{rel} = \frac{h}{H} = \frac{\text{aktuelle Höhe}}{\text{Gesamthöhe}}$$

Dynamische Vergrößerung

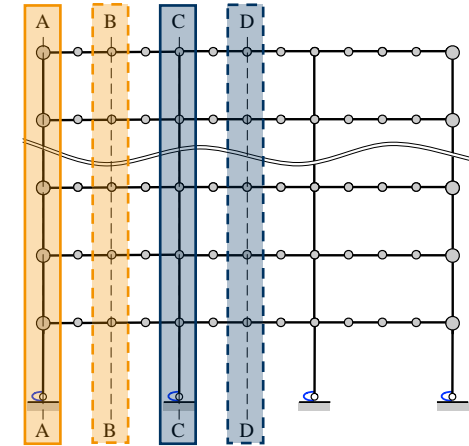
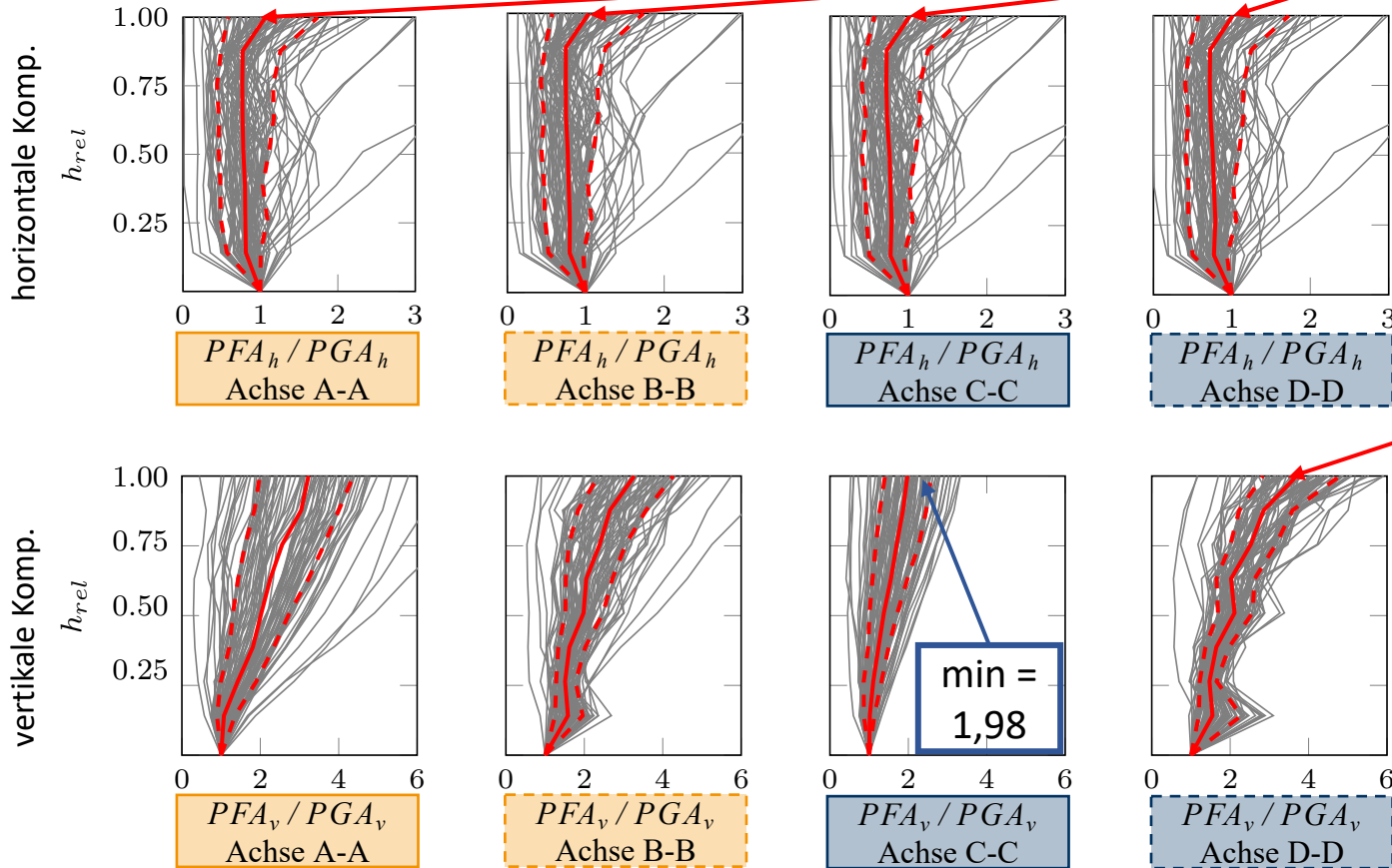
- ★ *PFA* ... Peak Floor Acceleration
- ★ *PGA* ... Peak Ground Acceleration

Index

- ★ *h* ... horizontale Komponente
- ★ *v* ... vertikale Komponente

### Dynamische Vergrößerung des 8-stöckigen Rahmens

Konstante modale Dämpfung

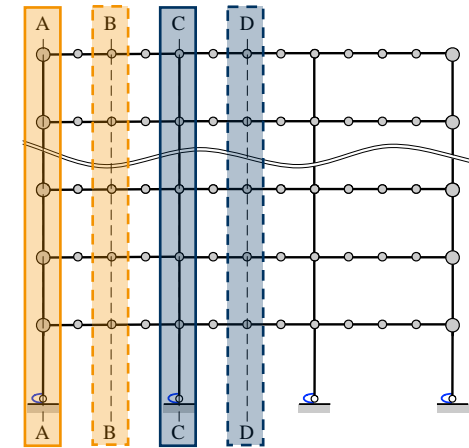
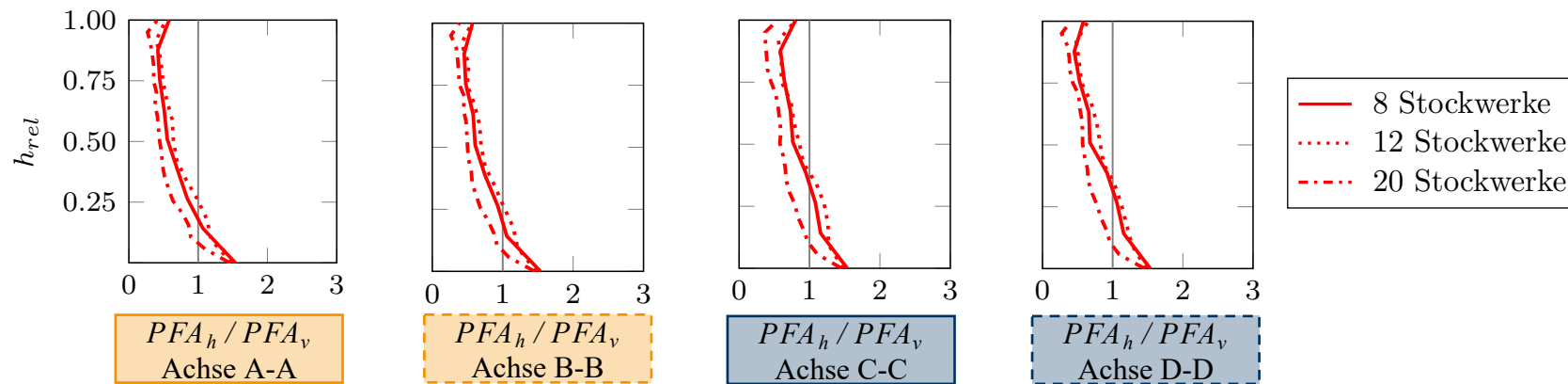
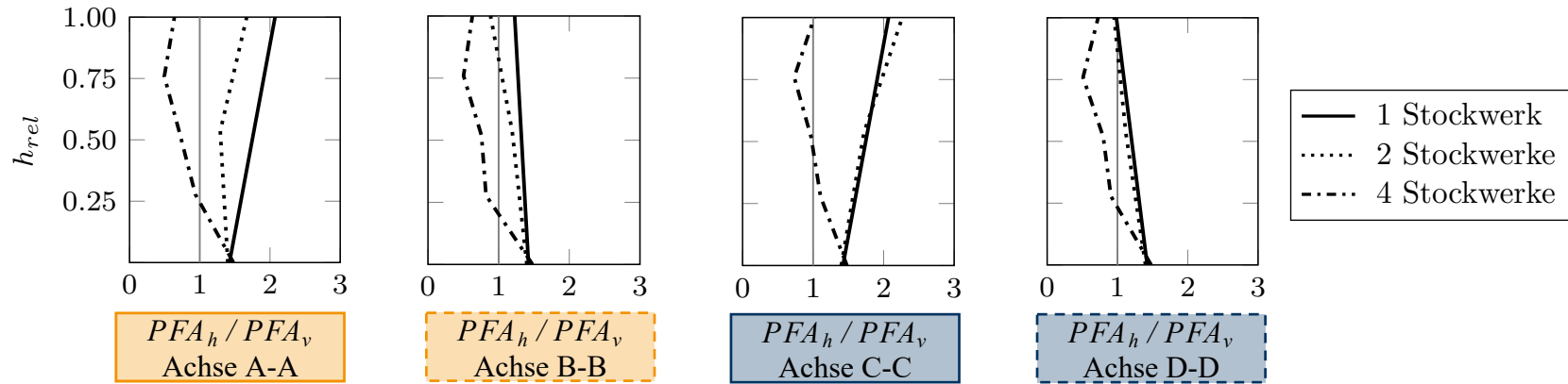


- ★  $PFA_h$  je Stockwerk konstant
- ★  $PFA_v$  variiert mit Lage
- ★ max. horizontale Vergrößerung: 1,10
- ★ max. vertikale Vergrößerung: 3,69
- 8. Stockwerk; Achse D-D

— Median - - - 16.; 84. Perzentil — einzelner Erdbebenschrieb

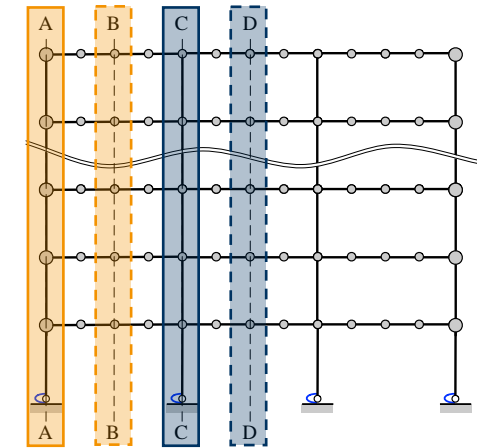
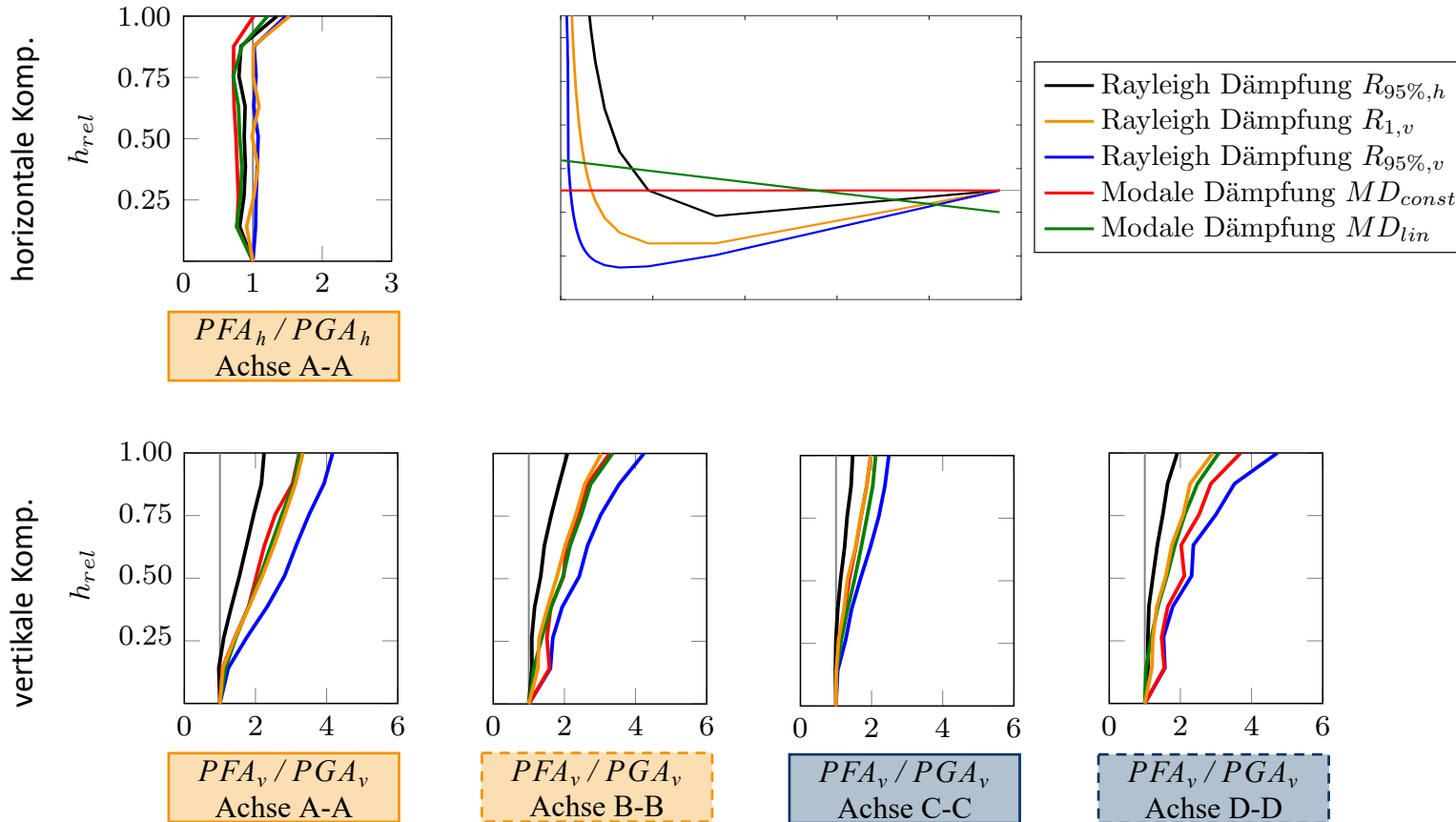
### Verhältnis horizontaler zu vertikaler Beschleunigungsantwort

Konstante modale Dämpfung



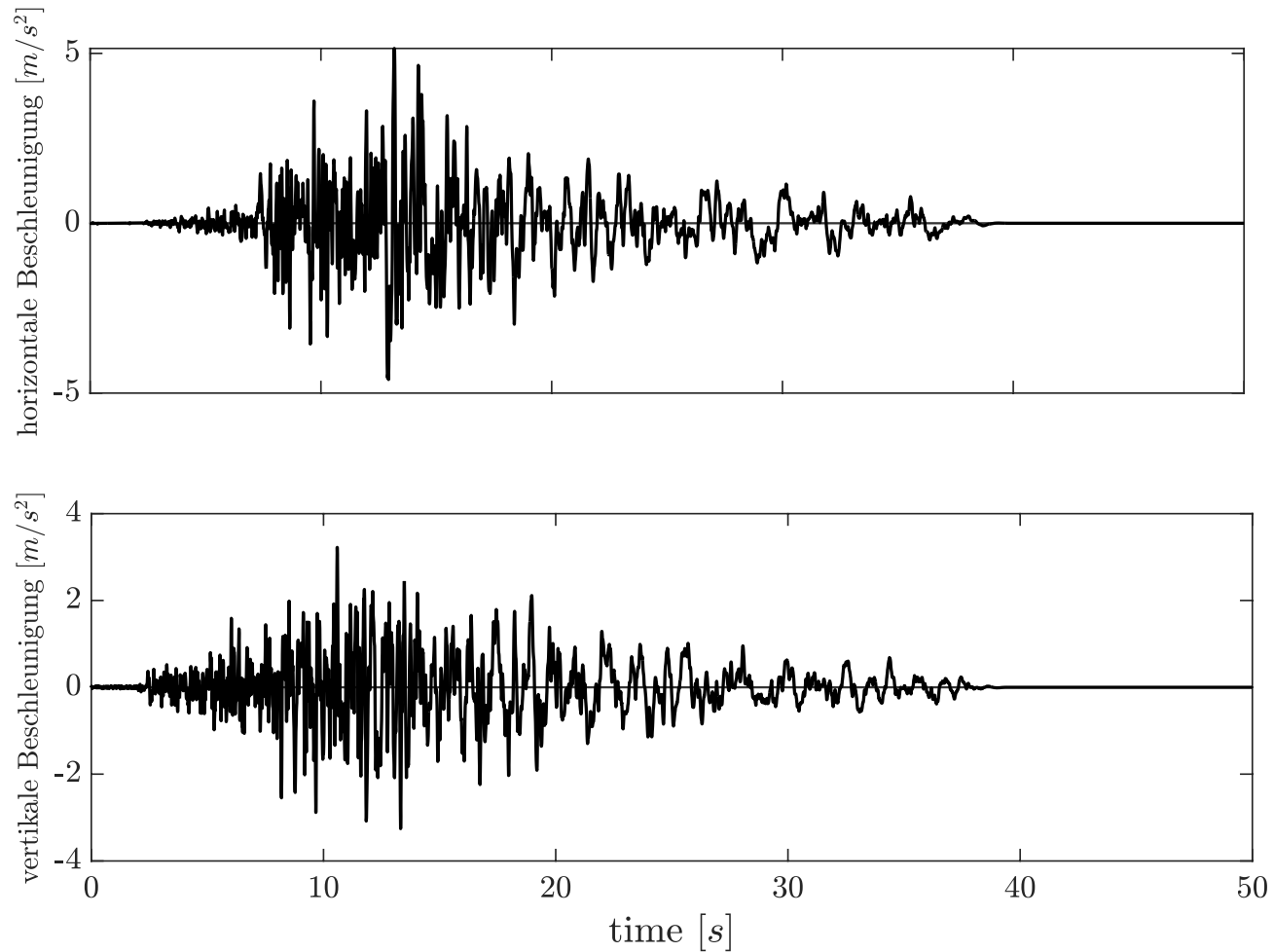


### Dynamische Vergrößerung des 8-stöckigen Rahmens 5 Dämpfungsvarianten

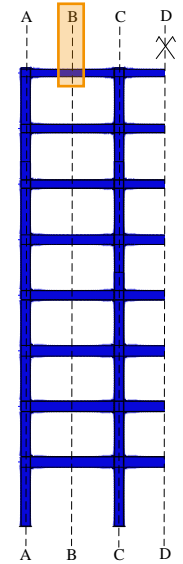
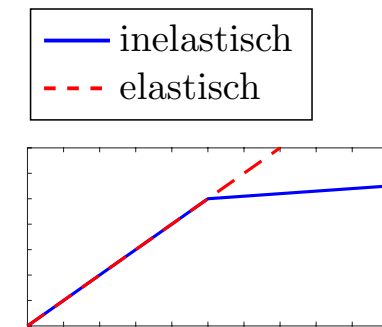
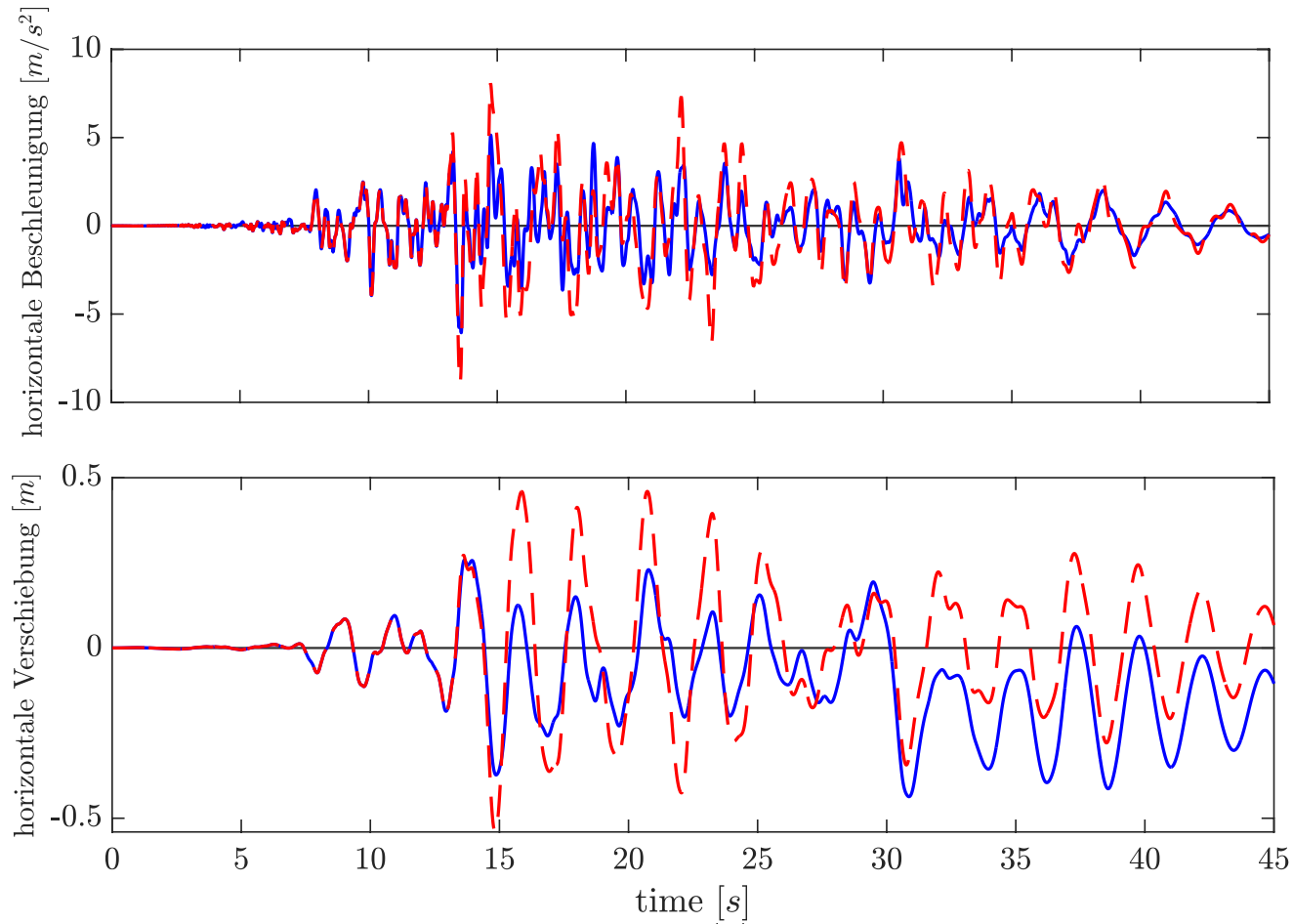


- ★  $R_{95\%,h}$  : hohe Dämpfung vertikaler Modes  
→ geringe PFA-Vergrößerung
- ★  $R_{95\%,v}$  geringe Dämpfung niedriger Modes  
→ zu starke PFA-Vergrößerung
- ★ modale Dämpfung  
→ zwischen Rayleigh-Varianten

### Bodenbeschleunigung „RSN 1000“ (Northridge-Erdbeben)

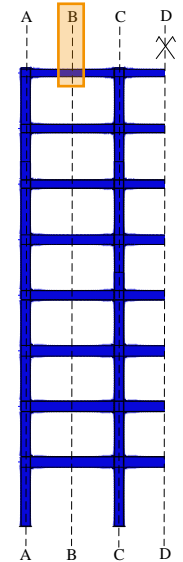
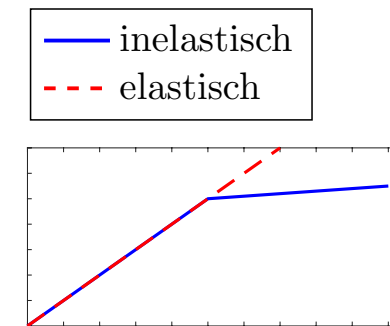
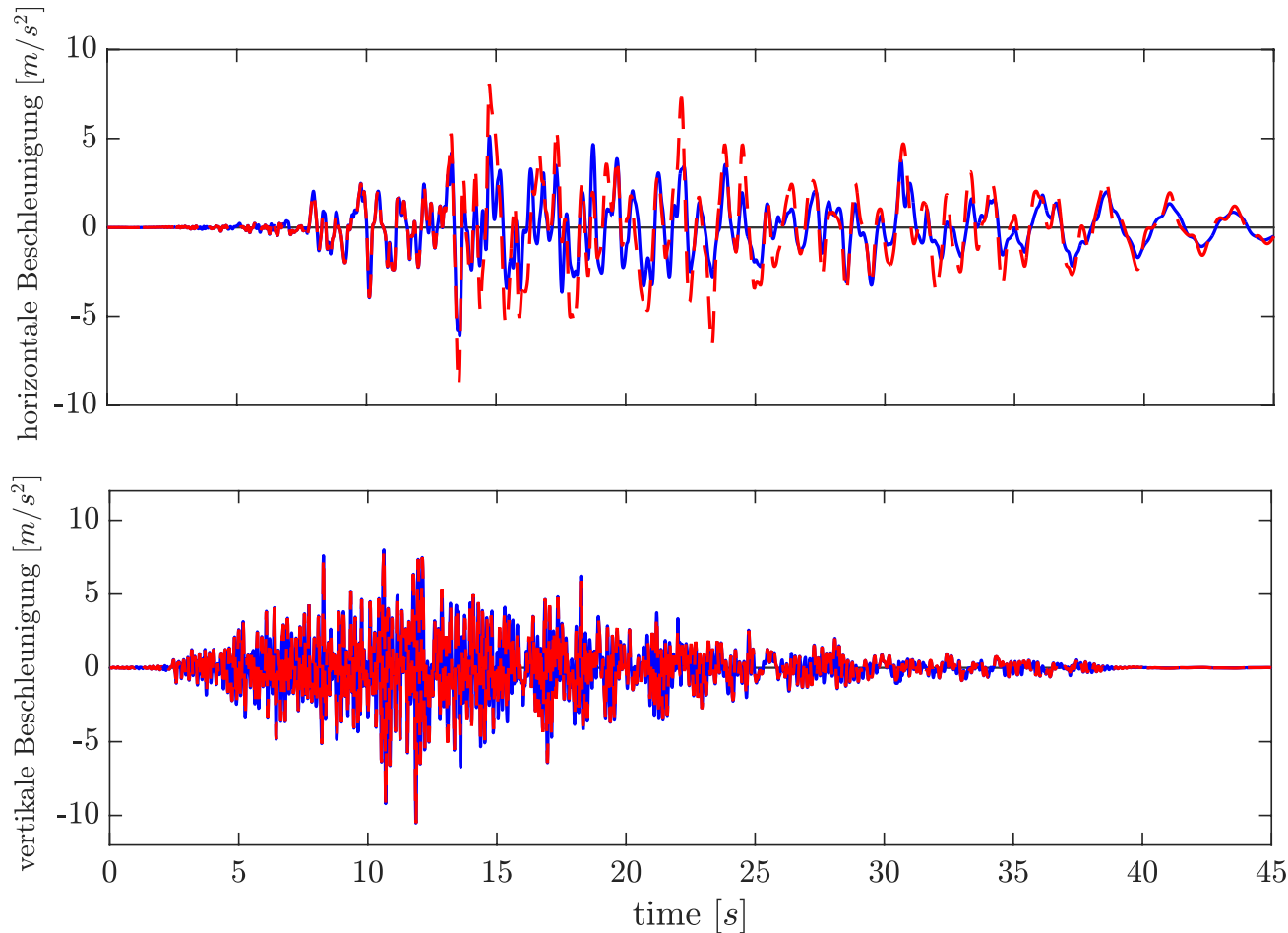


### Beschleunigungsantwort des 8-stöckigen Schalenmodells Vergleich elastisches und inelastisches Materialverhalten



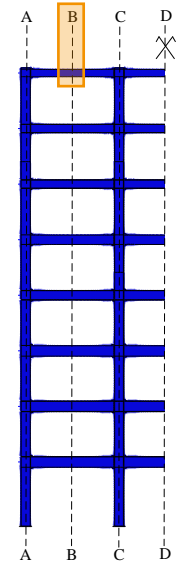
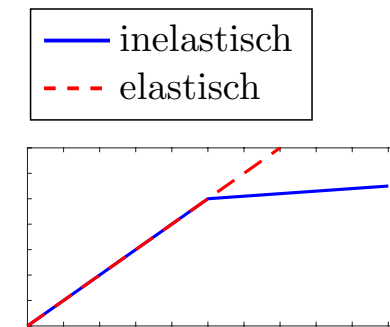
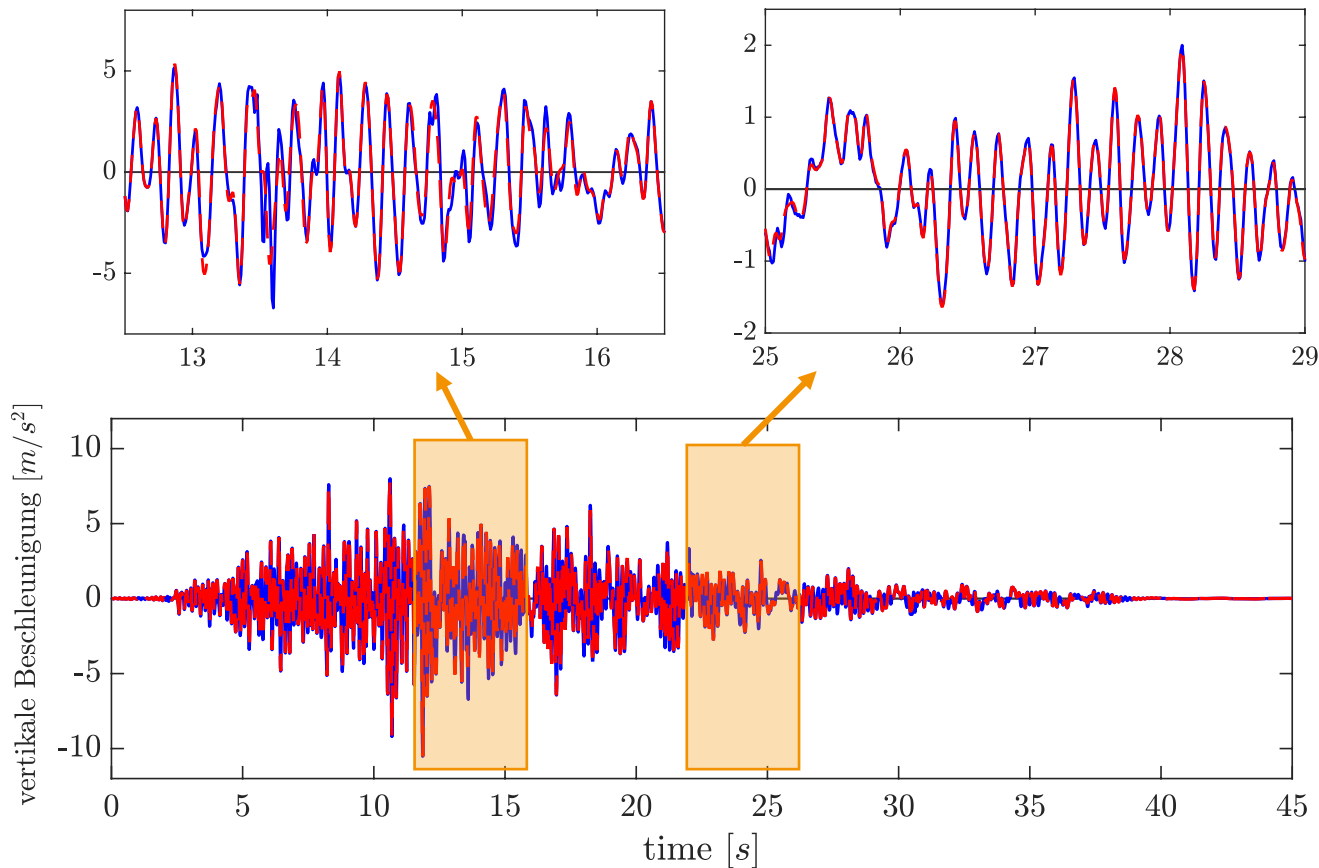
★ horizontale Antwort  
→ inelastische Beschleunigung kleiner

### Beschleunigungsantwort des 8-stöckigen Schalenmodells Vergleich elastisches und inelastisches Materialverhalten



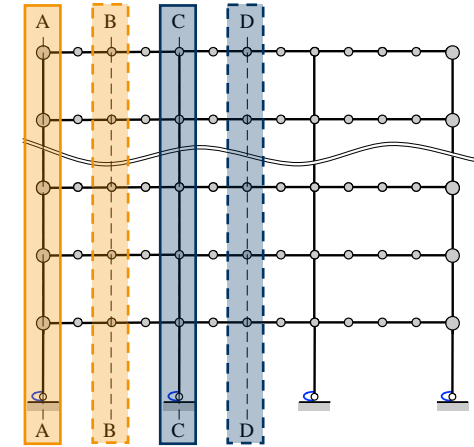
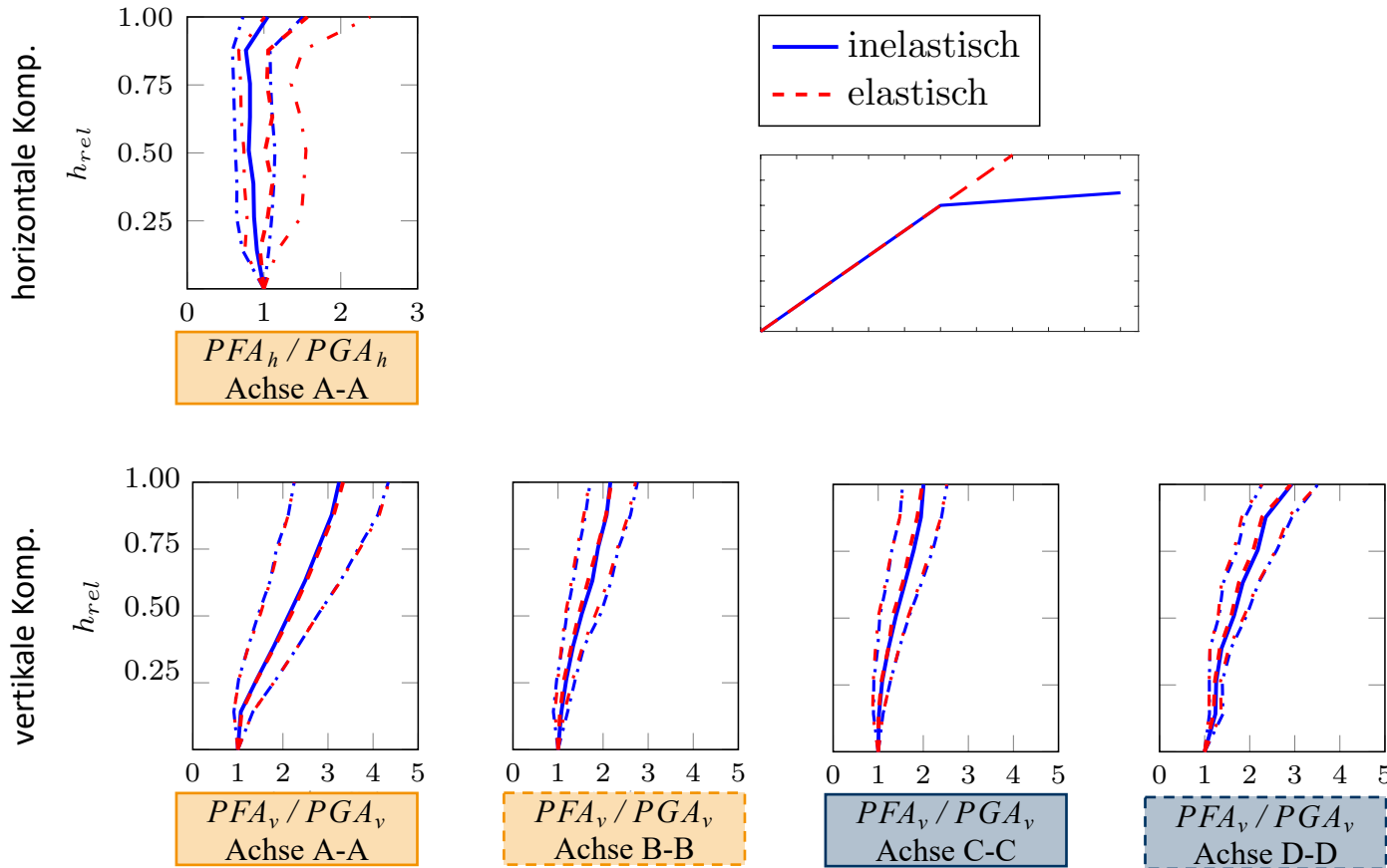
- ★ horizontale Antwort  
→ inelastische Beschleunigung kleiner
- ★ vertikale Antwort  
→ inelastische Beschleunigung gleich

### Beschleunigungsantwort des 8-stöckigen Schalenmodells Vergleich elastisches und inelastisches Materialverhalten



- ★ horizontale Antwort  
→ inelastische Beschleunigung kleiner
- ★ vertikale Antwort  
→ inelastische Beschleunigung gleich

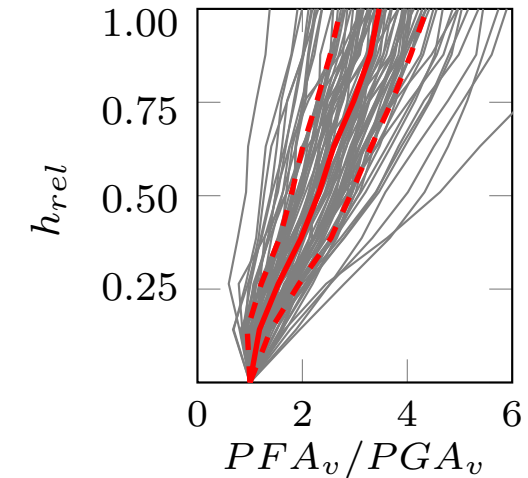
### Dynamische Vergrößerung des 8-stöckigen Balkenmodells Vergleich elastisches und inelastisches Materialverhalten



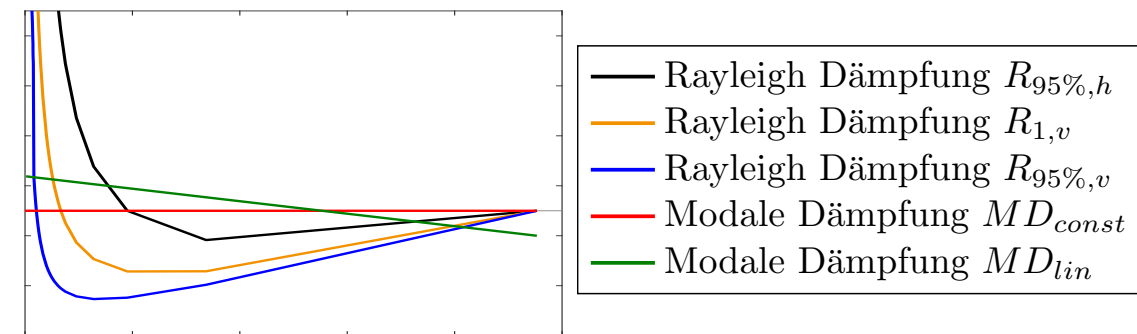
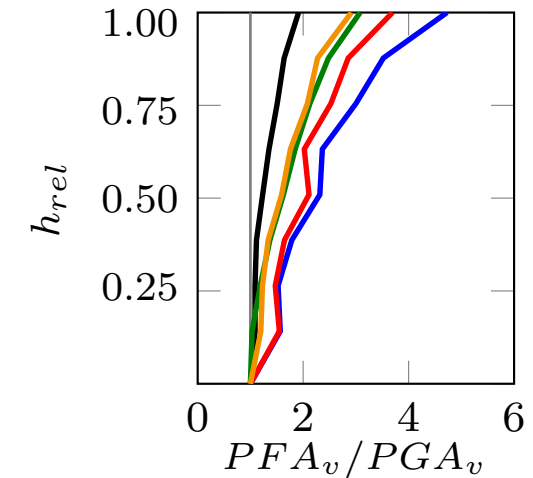
- ★ horizontale Beschleunigung  
→ inelastische Antwort kleiner
- ★ vertikale Beschleunigung  
→ inelastische Antwort gleich



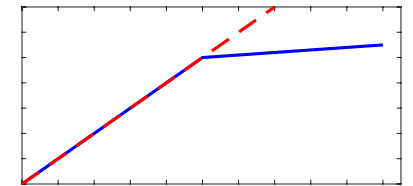
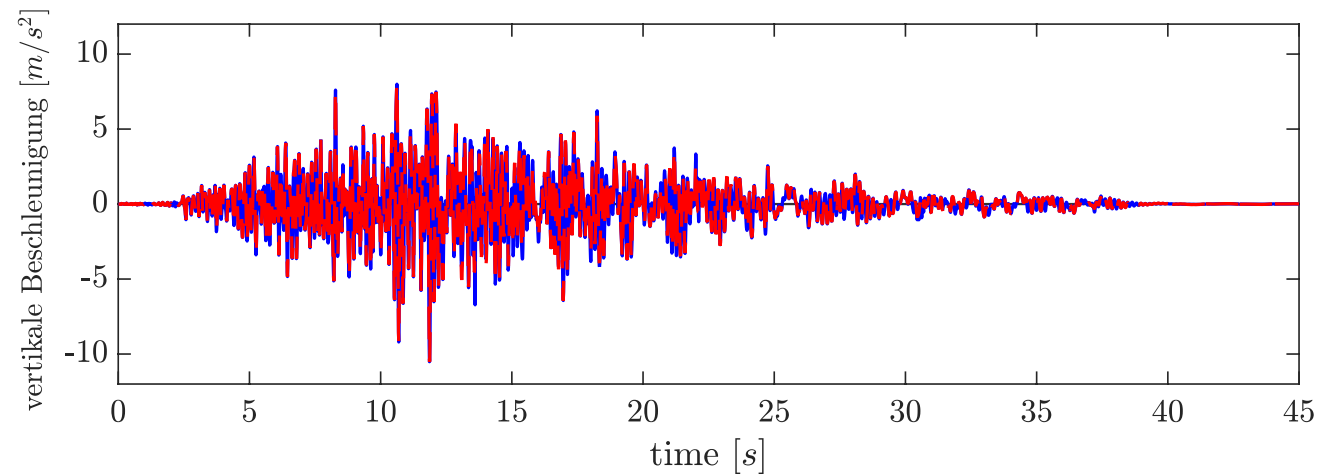
- Elastische vertikale Beschleunigungsantwort
  - ▶ nimmt mit Höhe regelmäßiger Stahlrahmen zu
  - ▶ variiert je nach Lage des betrachteten Knotens
- Dämpfungsmodellierung
- Inelastische vertikale Beschleunigungsantwort



- Elastische vertikale Beschleunigungsantwort
- Dämpfungsmodellierung
  - ▶ beeinflusst die vertikale Beschleunigungsantwort stark
    - übliche Rayleigh-Dämpfung ( $R_{95\%,h}$ )
      - zu hohe Dämpfung der vertikalen Moden
    - modifizierte Rayleigh-Dämpfung ( $R_{95\%,v}$ )
      - zu geringe Dämpfung niedriger Moden
    - modale Dämpfung ( $MD_{const}$  und  $MD_{lin}$ )
      - zwischen Rayleigh-Dämpfungs Varianten- Inelastische vertikale Beschleunigungsantwort



- Elastische vertikale Beschleunigungsantwort
- Dämpfungsmodellierung
- Inelastische vertikale Beschleunigungsantwort
  - ▶ entspricht der elastischen Beschleunigungsantwort
  - ▶ Übliche Rahmenmodellierung kann vertikale Beschleunigungsantwort ausreichend abschätzen



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit**

---

**Nadia Gremer**

nadia.gremer@uibk.ac.at