

SEISMISCHE FRAGILITÄT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN IN WIENER GRÜNDERZEITHÄUSERN

*Seismic Fragility of Nonstructural Components
in Historical Unreinforced Masonry Buildings*

Nora Sadlik & Lukas Moschen

18. November 2021, 2. EESD Symposium

ÜBERBLICK

- Erdbebennachweise bei Gründerzeithäusern
- Erdbebenantwort von Sekundärstrukturen
- Seismisches Verhalten von beschleunigungs-sensitiven Sekundärstrukturen



ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN



PRIMÄRSTRUKTUR



Quelle:
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/images/geophysik/nachrichten/universitaet-wien-1>

Hauptuni Wien,
Seebenstein 1972

SEKUNDÄRSTRUKTUR

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

DECKENSYSTEME:

DüEG: Ziegelgewölbe

DüOG1: Doppelbaumdecke

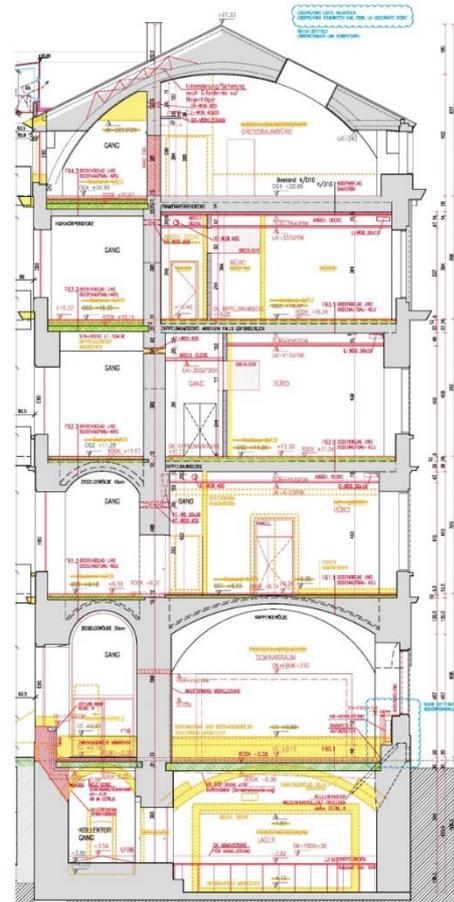
DüOG2: Doppelbaumdecke

DüOG3: Stahltraversendecke

Keine schubsteifen
Deckensysteme
vorhanden



Maßnahmen zur Weiterleitung der
horizontalen Erdbebeneinsatzlasten
erforderlich



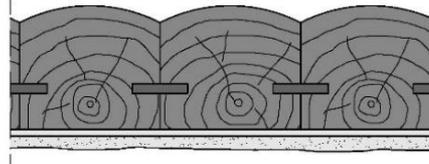
ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

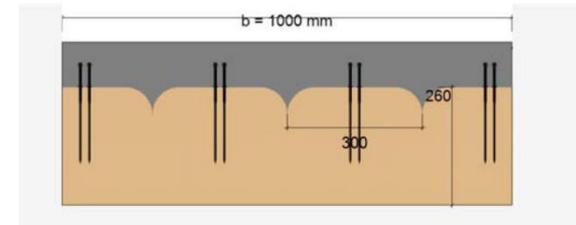


- › höhere Tragfähigkeit
- › gute Schallschutzeigenschaften
- › gute Brandschutzeigenschaften
- › niedrige Schwingungsanfälligkeit

Skizze:



Dippelbaum Bestand



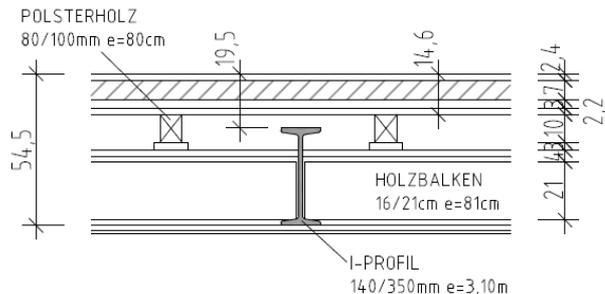
Holz-Beton Verbunddecke

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

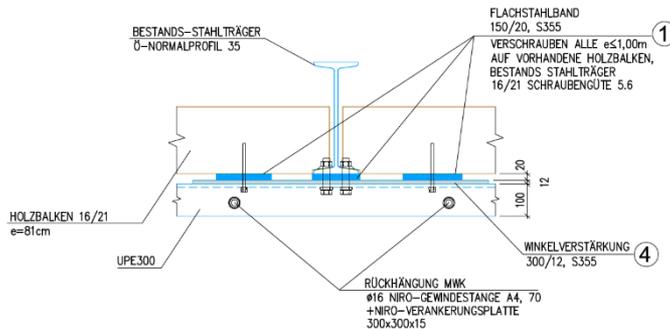
GENERALSANIERUNG TU WIEN

DÜOG3 STAHLTRAVERSESENDECKE

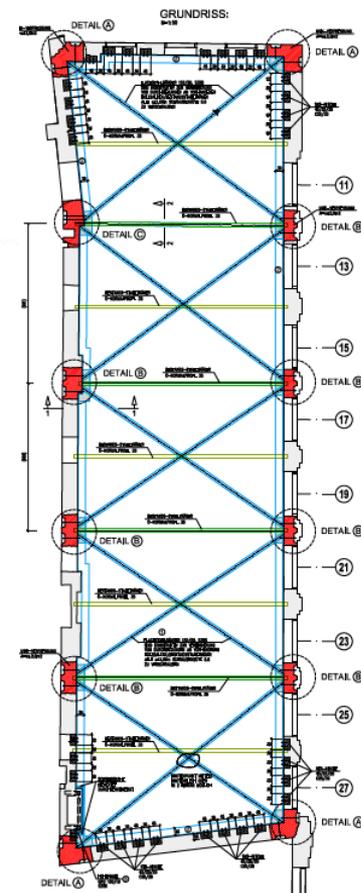
Herstellung einer Auskreuzung



Bestandsdecke



Deckenerüchtigung mittels Auskreuzung



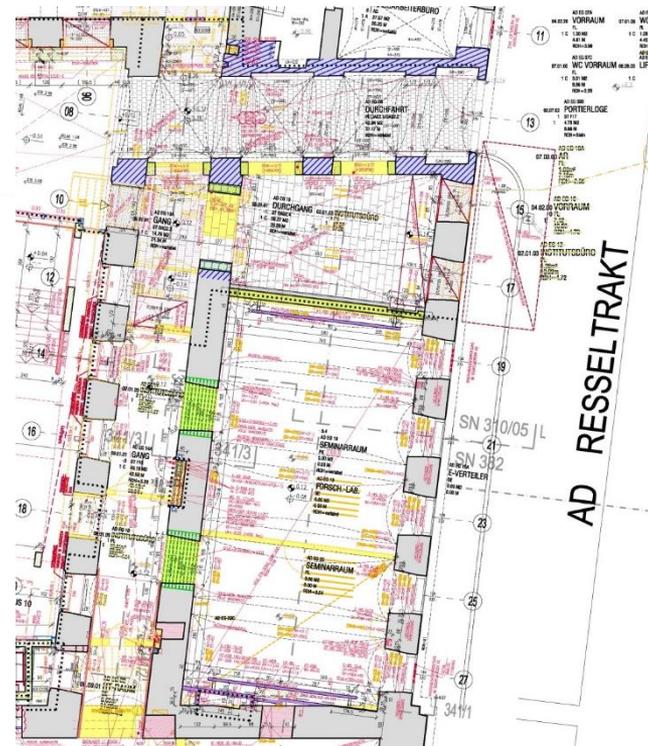
ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

Wand- u. Deckendurchbrüche in allen Geschossen
Nutzungsänderungen
Neue STB-Deckenfelder

Personenzahlerhöhung mit Zeitfaktor von +27%
Bauliche Eingriffe am statischen Gesamtsystem
 $\alpha_{ist} = 0,3$ (eigenes RFEM Modell)

→ Erdbebenbemessung erforderlich



Baumaßnahmen im EG des AD-Trakts

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

MODELLIERUNG DER GESCHOßE EG-OG3 IM
STATIKPROGRAMM RFEM

DECKENMODELLIERUNG

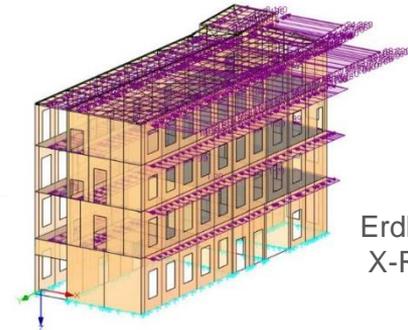
Weiterleitung horizontaler Lasten
10-12cm Stahlbetondecke der Verbunddecken
Oberste Decke – Auskreuzung

LAGERUNG

Zugausfall

E-MODUL

= $300 \cdot F_K$ (NACH GUTACHTEN)
= $150 \cdot F_K$ (GERISSENES MWK)



Erdbeben in
X-Richtung

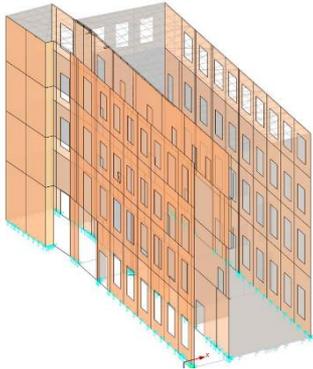


Erdbeben in
Y-Richtung

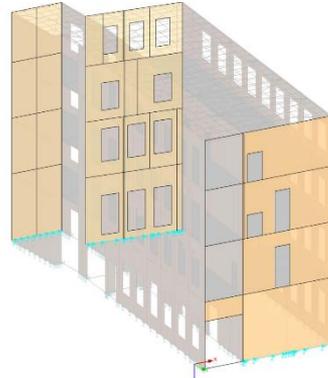
Erdbebenersatzlasten

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

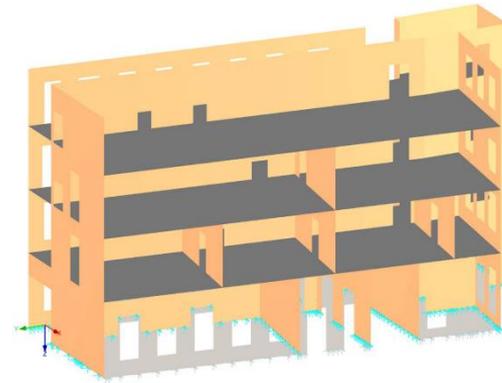
GENERALSANIERUNG TU WIEN



Erdbeben +Y / -Y
Längswandscheiben



Erdbeben +X/-X
Stirnwände



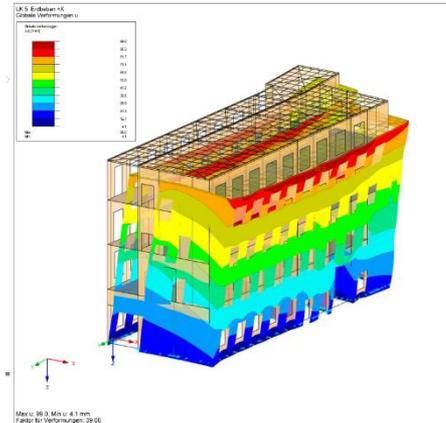
Zwischenwandscheiben

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

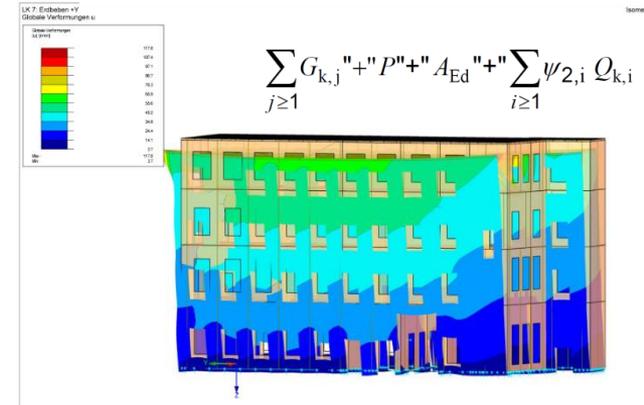
GENERALSANIERUNG TU WIEN

Kriterien zur Anwendung des vereinfachten AWS:

- ▶ Konstruktive Regelmäßigkeit im Aufriss
- ▶ Eigenschwingdauer T1



Verformungen Erdbeben +X



Verformungen Erdbeben +Y

Lastberechnung für das vereinfachte Antwortspektrumverfahren

Ermittlung von $S_d(T_1)$ gem. ÖN EN 1998-1, 3.2.2.5 (4)

Ermittlung der Eigenschwingungsdauer T_1 des Bauwerks in der betrachteten Richtung

$$T_1 = 1,190 \text{ s} \text{ aus RF-Dynam}$$

$$0 \leq T \leq T_B: \text{ nicht erfüllt } S_d(T) =$$

$$T_B \leq T \leq T_C: \text{ nicht erfüllt } S_d(T) =$$

maßgeb. Formel $T_C \leq T \leq T_D: \text{ erfüllt } S_d(T) = 0,928$

$$T_D \leq T: \text{ nicht erfüllt } S_d(T) =$$

$$0 \leq T \leq T_B: S_d(T) = a_g \cdot S \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right]$$

$$T_B \leq T \leq T_C: S_d(T) = a_g \cdot S \frac{2,5}{q}$$

$$T_C \leq T \leq T_D: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C}{T} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$T_D \leq T: S_d(T) = \begin{cases} a_g \cdot S \frac{2,5}{q} \left[\frac{T_C T_D}{T^2} \right] \\ \geq \beta \cdot a_g \end{cases}$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} " + " P " + " A_{Ed} " + " \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

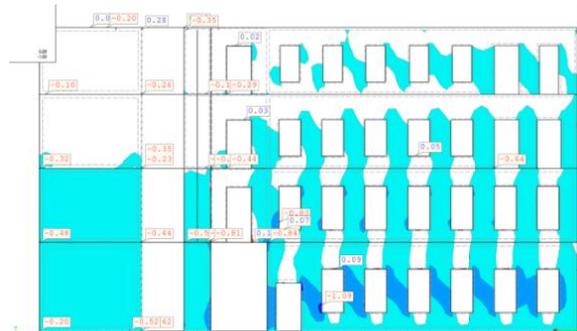
GENERALSANIERUNG TU WIEN

Nachweis Mauerwerk unter
Vertikalbelastung nach ÖN EN 1996-1: $N_{Rd} = \Phi t f_d$

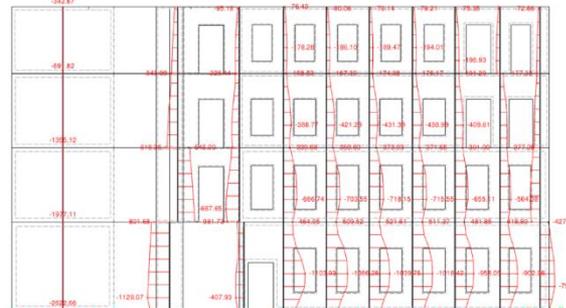
Typisches Versagensbild
eines MWK-Pfeilers:



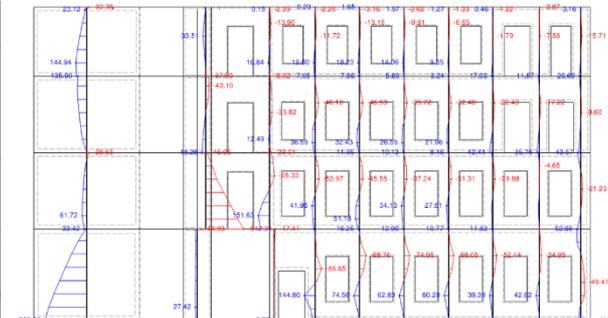
Quelle:
<https://www.masivbau.uni-hannover.de/143.html>



Druckspannungen



Normalkraftverlauf



Momentenverlauf

ERDBEBENNACHWEIS BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

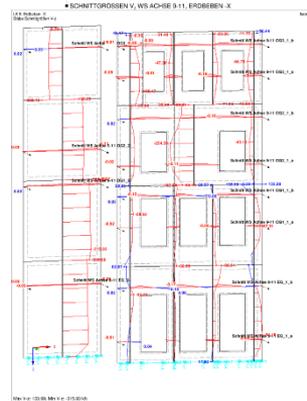
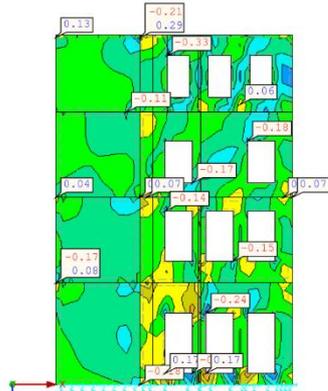
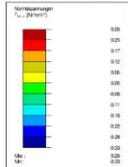
Nachweis Mauerwerk unter Schubbelastung nach ÖN EN 1996-1:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

$$V_{Rd} = f_{vd} t l_c$$

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4 \sigma_d$$

LK 6: Erdbeben - X
Flächen Spannungen Tau-xy,+
Werte: Tau-xy,+ [N/mm²]



MAUERWERK SCHUBNACHWEIS

AD-RESELTRAKT
Begleitmaßnahme 5.3

Annahme:
Überdeckter QS - l_{eff} , l_{eff}

(siehe Annotierte Spannungsbilder xy)
 f_{vd} 0,1 N/mm² (aus Mauerwerktafelrechner)
 V_{Ed} 1,67 -

ERDBEBEN in +X-RICHTUNG:

WANDSCHERE ZT Begleitmaßnahme 5.3	Schnitt-Name	f_{vk} (N/mm ²) (aus RFEM Schnitt)	T_{max} (N/mm ²) (aus RFEM Schnitt)	T_{Ed} (N/mm ²)	Ergebnis	Ausnutzungsgrad	α
EG	Schnitt WS Achse 27_EC_A	0,33	0,06	0,1392	Nachweis erfüllt	43,11 %	> 0,60
	Schnitt WS Achse 27_EC_B	0,26	0,06	0,1224	Nachweis erfüllt	49,03 %	> 0,50
OG1	Schnitt WS Achse 27_OG1_A	0,33	0,1	0,1392	Nachweis erfüllt	71,85 %	> 0,60
	Schnitt WS Achse 27_OG1_B	0,15	0,07	0,0960	Nachweis erfüllt	72,93 %	> 0,50
	Schnitt WS Achse 27_OG1_C	0,24	0,09	0,1176	Nachweis erfüllt	76,55 %	> 0,50
OG2	Schnitt WS Achse 27_OG2_A	0,16	0,05	0,0684	Nachweis erfüllt	50,82 %	> 0,50
	Schnitt WS Achse 27_OG2_B	0,16	0,1	0,0864	Nachweis nicht erfüllt	101,85 %	< 0,40
	Schnitt WS Achse 27_OG2_C	0,08	0,11	0,0792	Nachweis nicht erfüllt	138,92 %	< 0,30

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN

Maßnahmen zur Ertüchtigung:

- Schubsteife Deckensysteme
- Mauerwerksverpressung
- Durchbrüche – Einbau Stahlrahmen
- Einbau STB-Wandscheiben zur Aussteifung
- Einbau durchgehende Wandscheiben



Verpressung Wandscheibe
im EG des AD-Trakts



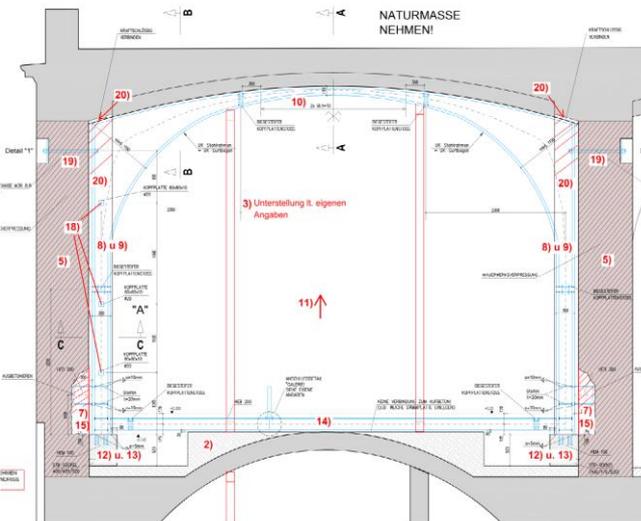
Einbau STB-Wandscheibe

ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

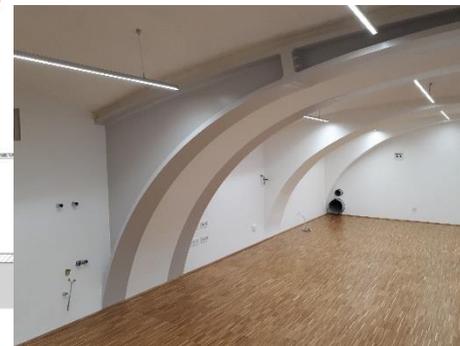
GENERALSANIERUNG TU WIEN



Einbau Stahlbetonrahmen

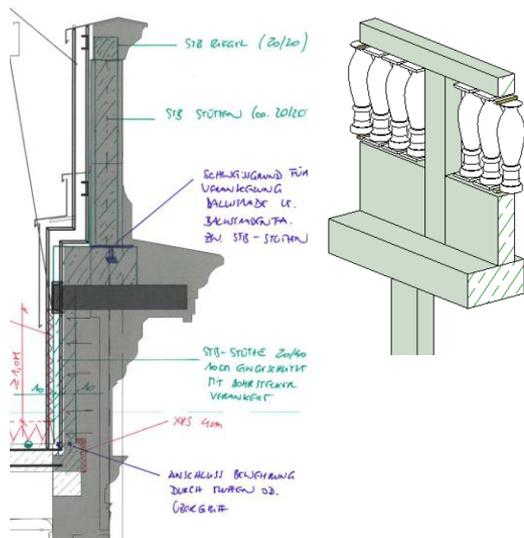


Einbau Stahlrahmen



ERDBEBENNACHWEISE BEI GRÜNDERZEITHÄUSERN

GENERALSANIERUNG TU WIEN



Erdbebennachweis
Gesimse und Balustrade

Nachweis für nichttragende
Bauteile gem. ÖNORM
1998-1 Punkt 4.3.5

$$F_a = (S_a \cdot W_a \cdot \gamma_a) / q_a$$

W_a als Gewicht des Bauteils;

S_a als der Erdbebenbeiwert

γ_a als Bedeutungsbeiwert

q_a als Verhaltensbeiwert

Ermittlung der äquivalenten statischen Erstlast beschleunigungs-sensitiver Sekundärstrukturen

Seismische Einwirkung

a_g	0,80 m/s ²
S	1,15 -

Referenzbodenbeschleunigung
Bodenparameter

Lastabtragende Struktur

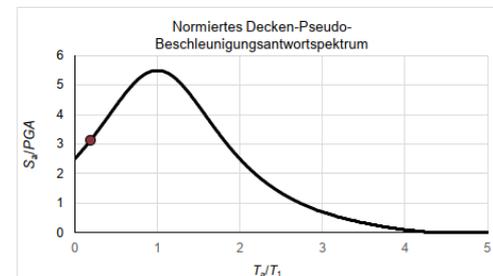
T_1	1,19 s
H	24,00 m

Grundswingungsdauer
Gesamthöhe des Gebäudes (ohne Penthouse)

Equipment (Sekundärstruktur)

T_a	0,23 s
z	24,00 m
q_a	2,00 -
m_a	11500,00 kg
γ_a	1,00 -

Schwingungsdauer
Höhe Anschluss Equipment an lastabtragende Struktur
Equipment Verhaltensbeiwert
Equipment Masse
Equipment Bedeutungsbeiwert



S_d/PGA

PGA

F_a

3,13 -
0,92 m/s²
16582 N

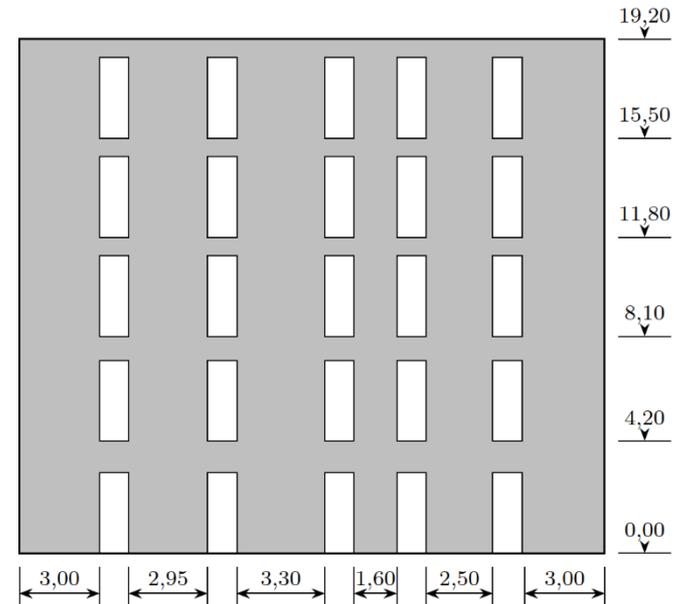
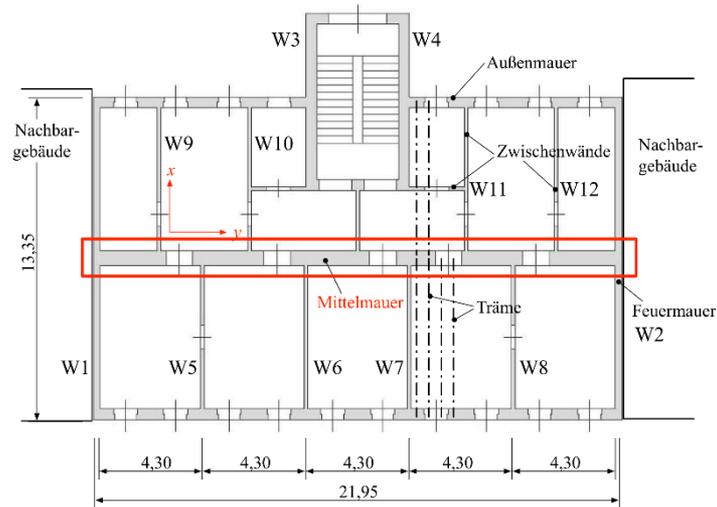
Vergrößerung bezüglich Spitzen-Bodenbeschleunigung
Standortspezifische Spitzen-Bodenbeschleunigung
Horizontale Ersatzlast am Equipment-Schwerpunkt



ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

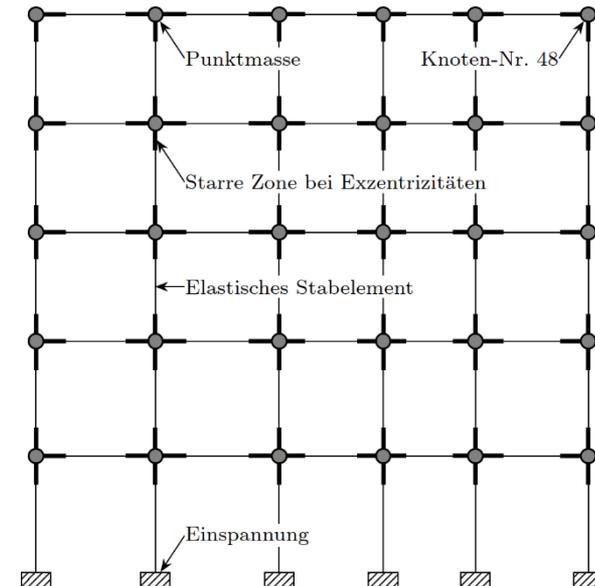
ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

GRÜNDERZEIT-MUSTERGEBÄUDE



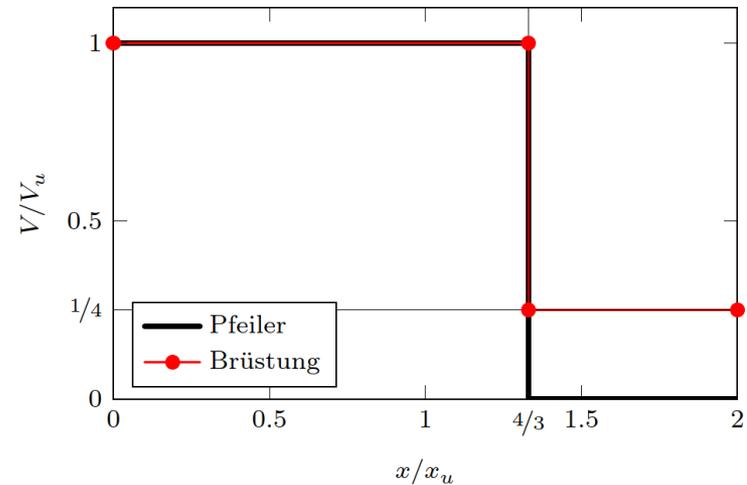
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente



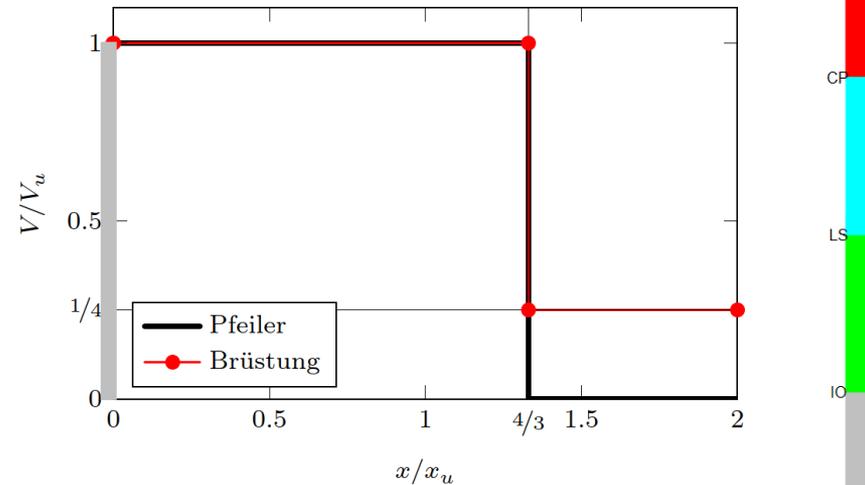
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- **Konzentriertes Plastizitätsmodell** in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler



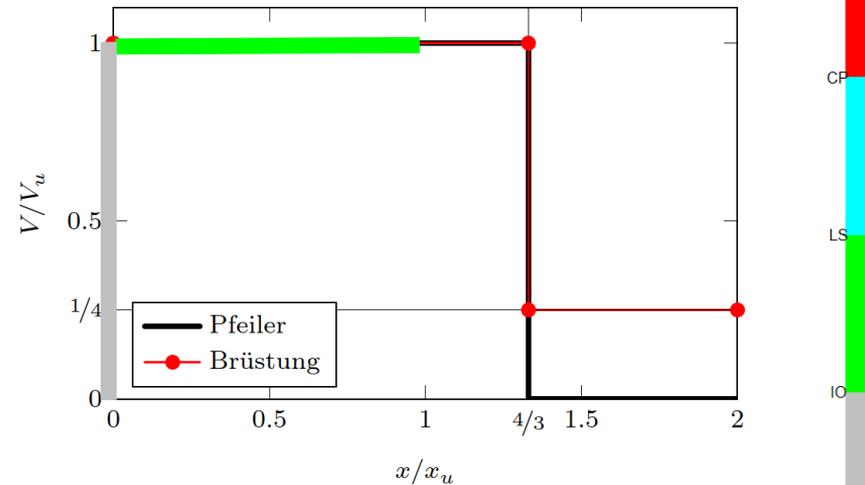
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- **Konzentriertes Plastizitätsmodell** in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler
- Grenzzustände:
DL erfüllt: ●



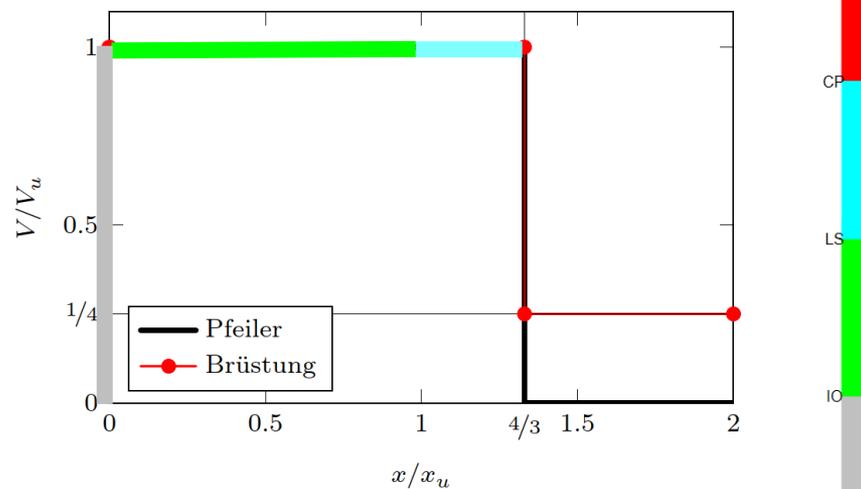
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- **Konzentriertes Plastizitätsmodell** in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler
- Grenzzustände:
DL erfüllt: ○
SD erfüllt: ●



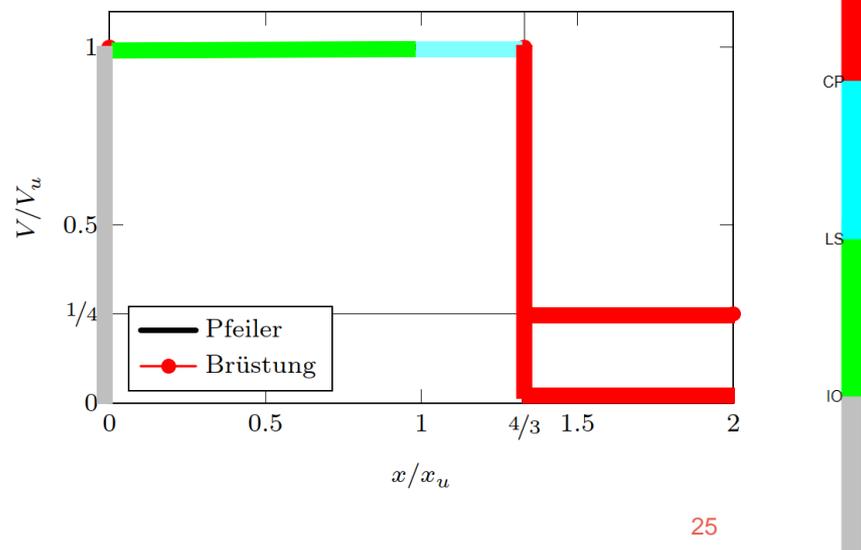
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- **Konzentriertes Plastizitätsmodell** in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler
- Grenzzustände:
 DL erfüllt: ○
 SD erfüllt: ●
 NC erfüllt: ●



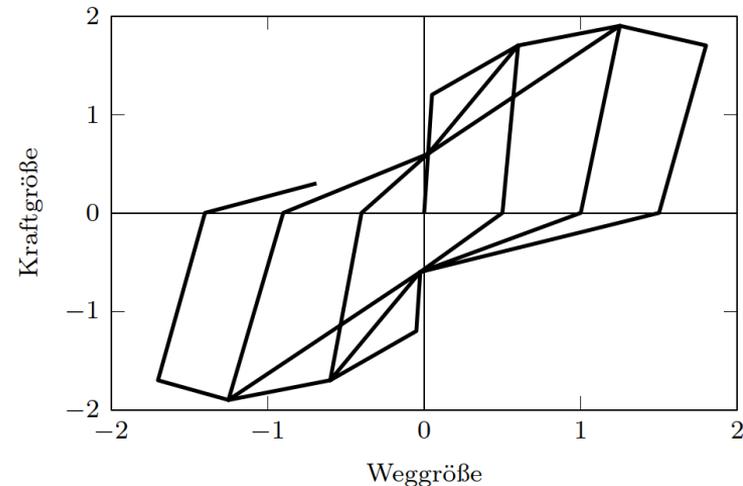
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- **Konzentriertes Plastizitätsmodell** in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler
- Grenzzustände:
 - DL erfüllt: ○
 - SD erfüllt: ●
 - NC erfüllt: ●
 - NC nicht erfüllt: ●



MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

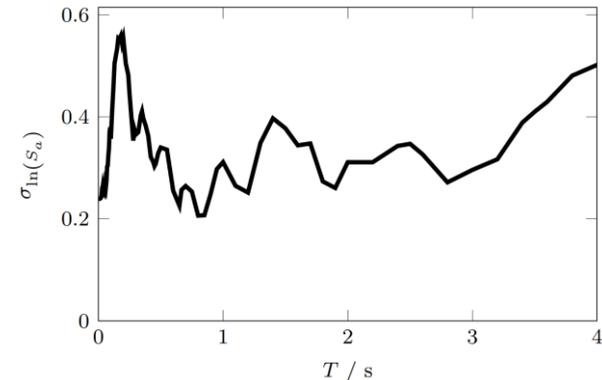
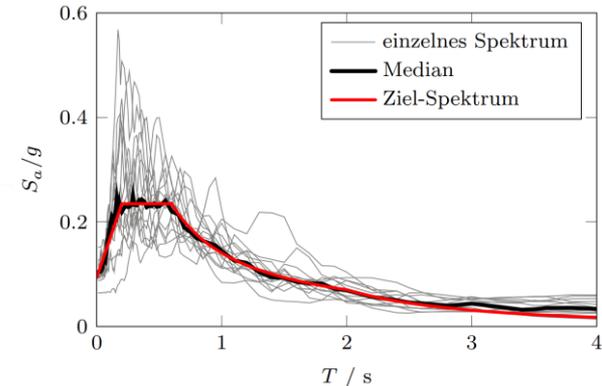
- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente
- Konzentriertes Plastizitätsmodell in Mitte Brüstung und unterster Pfeiler
- Zyklische Degradation (Steifigkeit und Festigkeit) mit **Pivot-Modell**
- Geometrische Nichtlinearität ($P\Delta$)
- Modale Dämpfung von 5%



ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

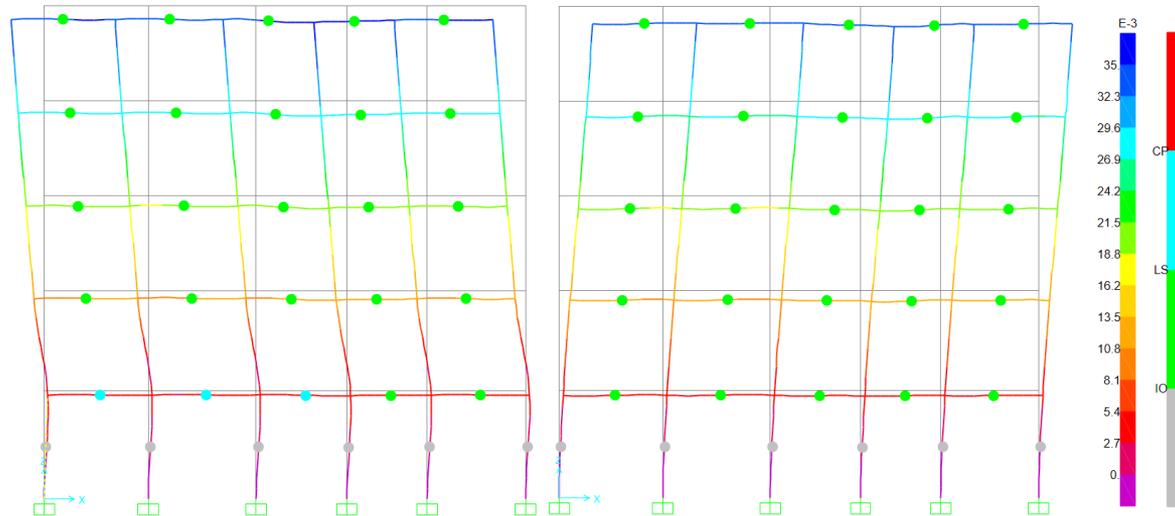
WIENER ERDBEBEBENSATZ

- Standort westlich der Donau
- Baugrundklasse C ($S = 1,15$)
- Bedeutungsbeiwert $\gamma = 1,00$
- „Nur“ 14 Erdbebenschriebe
- Für breite Klasse von Gebäuden anwendbar (bis $T_1 = 1.5$ s)
- Anforderung EN 1998-1 eingehalten



ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

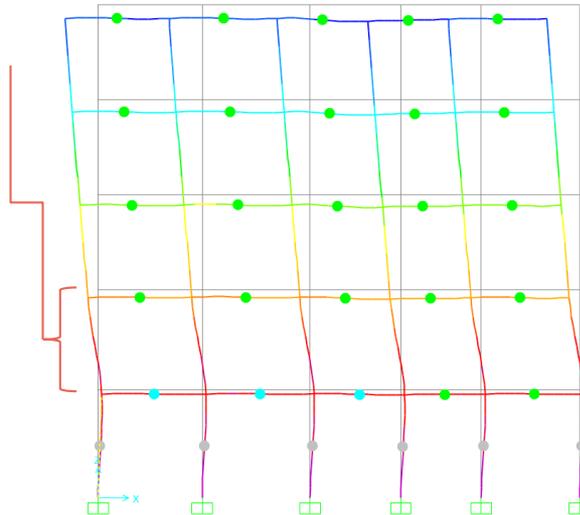
DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT



ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

SEKUNDÄRSTRUKTUREN

- **Relativ-Verschiebung** zwischen Stockwerks-Decken
- Schaden an Zwischenwänden, Steigleitungen, Fassade etc. möglich
- **Verschiebungssensitive Elemente**



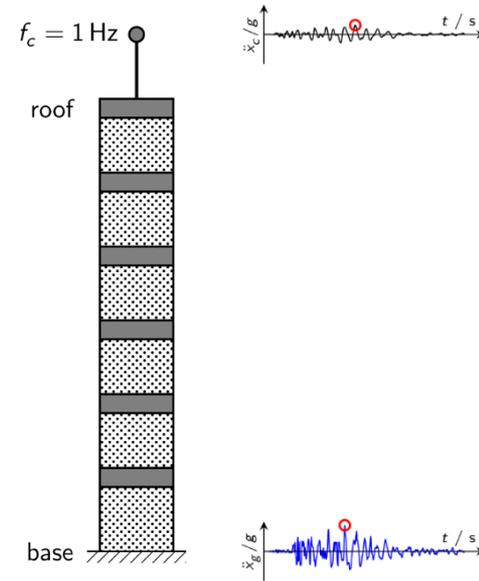
ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

SEKUNDÄRSTRUKTUREN

- **Beschleunigungs-sensitive Elemente**
- Schaden an Tanks, HVAC System, etc.
- **Totale Beschleunigung** einer Decke
- Idealisierung als **Einmasseschwinger**

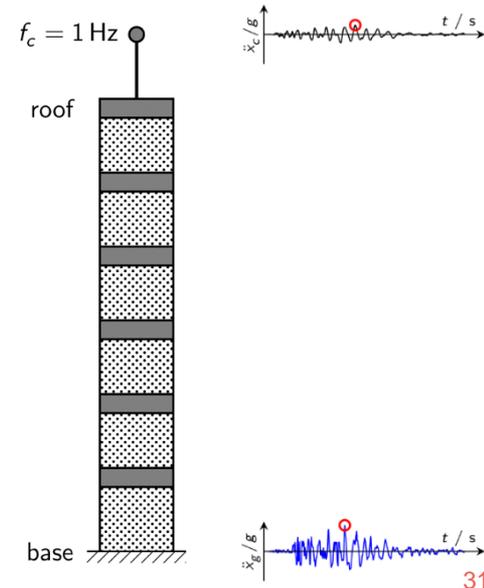
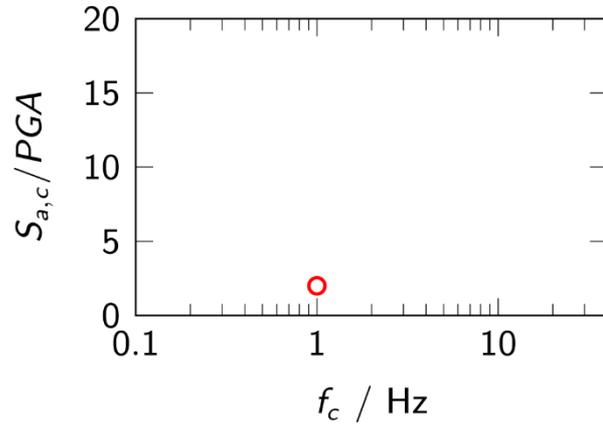


18.11.2021



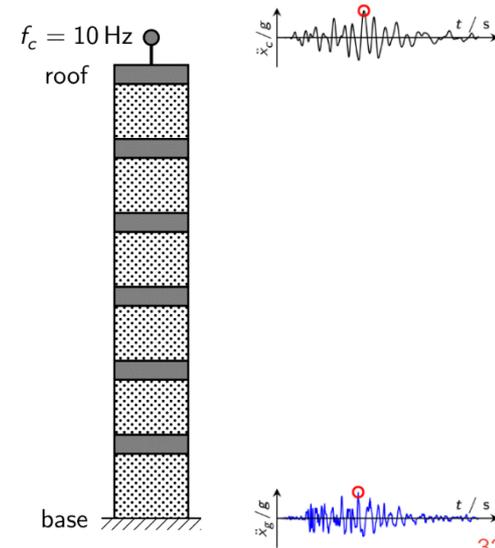
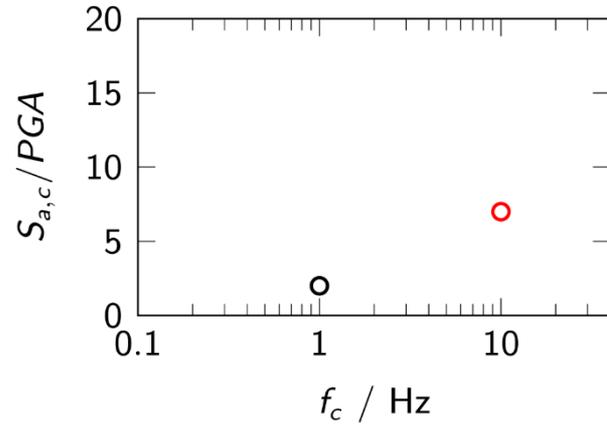
ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

DECKEN-ANTWORTSPEKTRUM



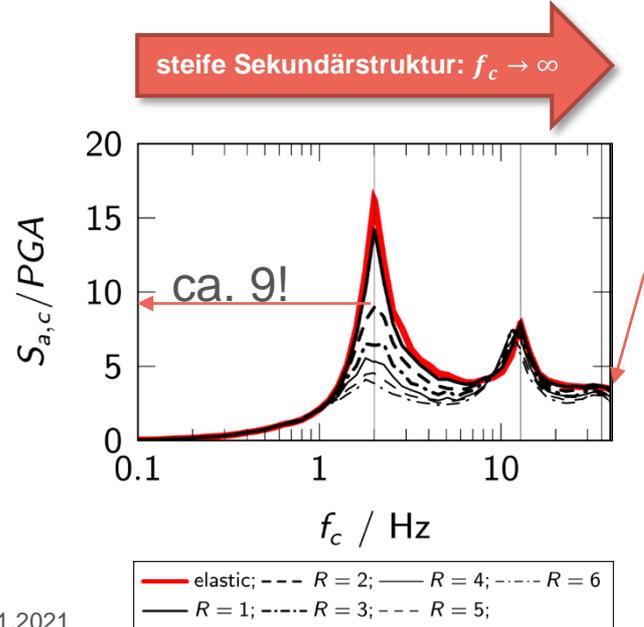
ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

DECKEN-ANTWORTSPEKTRUM

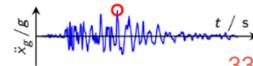
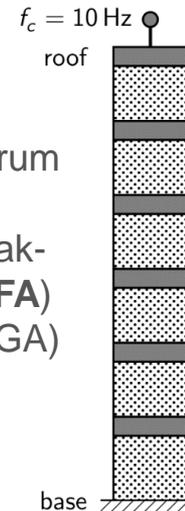


ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

DECKEN-ANTWORTSPEKTRUM

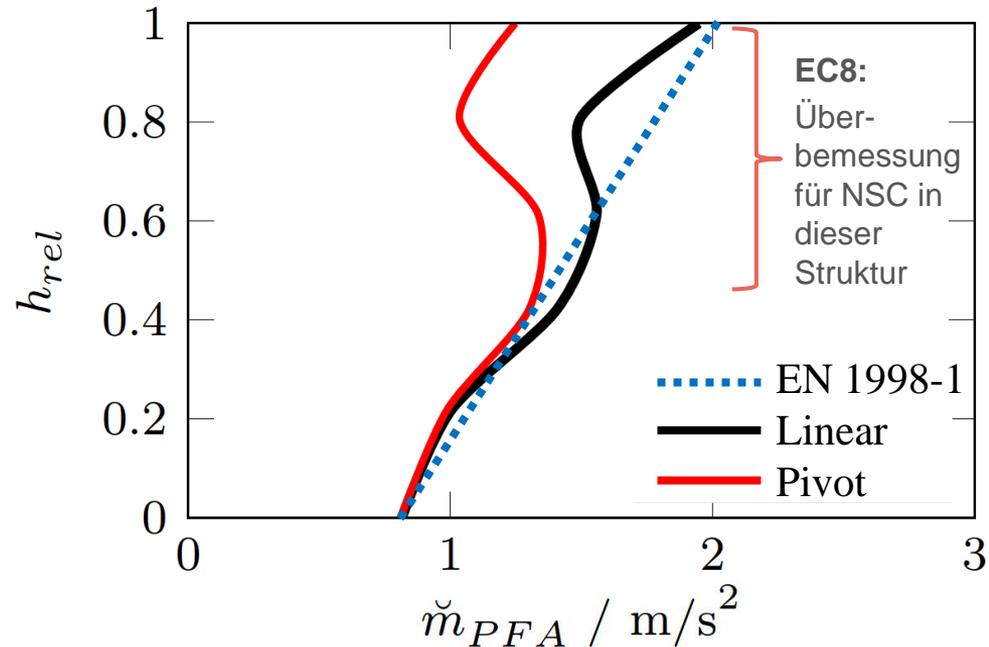
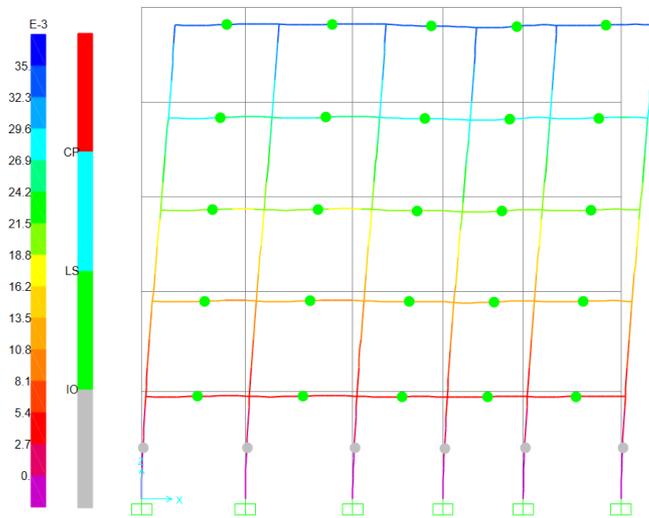


Bei $f_c \rightarrow \infty$:
 Decken-Antwortspektrum
 = Spitzen-Decken-
 Beschleunigung = **Peak-
 Floor-Acceleration (PFA)**
 (hier: PFA = ca. 3.5 PGA)



ERDBEBENANTWORT VON SEKUNDÄRSTRUKTUREN

FOKUS: PEAK-FLOOR-ACCELERATION

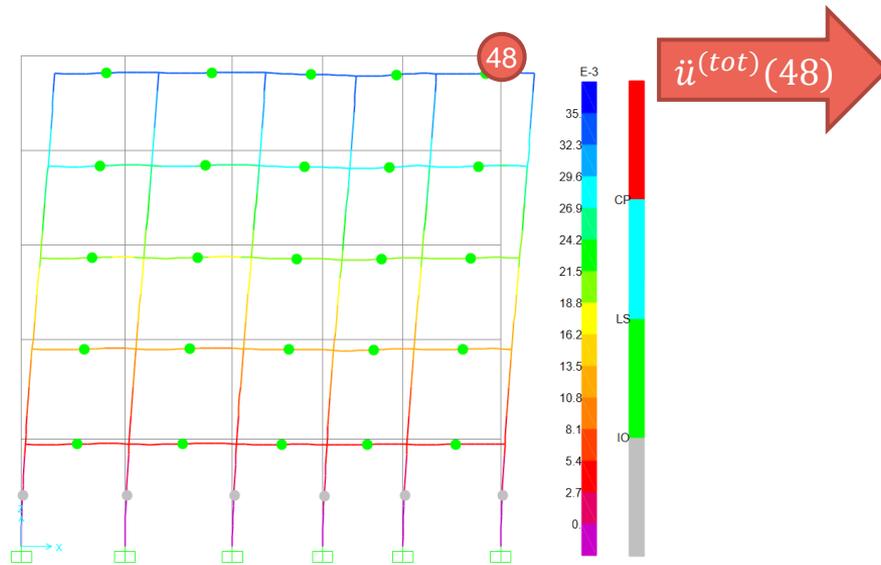




**SEISMISCHES VERHALTEN VON
BESCHLEUNIGUNGS-SENSITIVEN
SEKUNDÄRSTRUKTUREN**

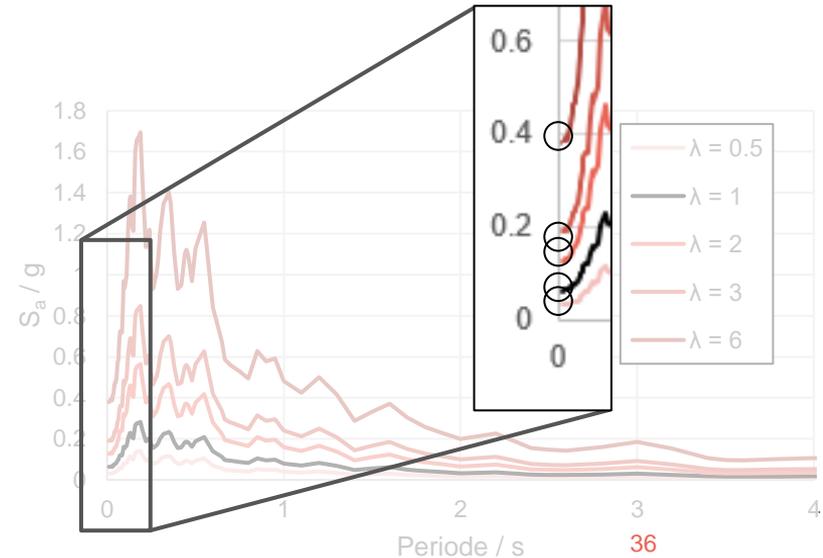
INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA BEISPIEL MIT NGA SEQUENZ 1776



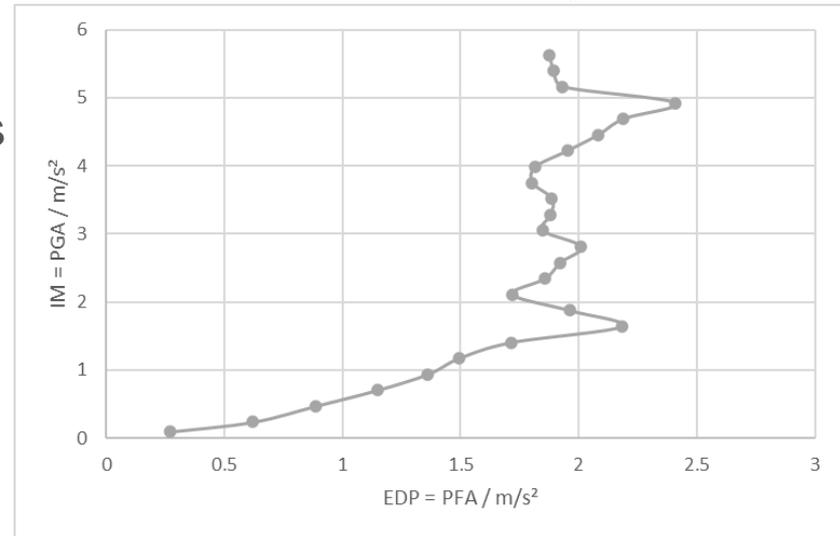
18.11.2021

DETAIL PGA



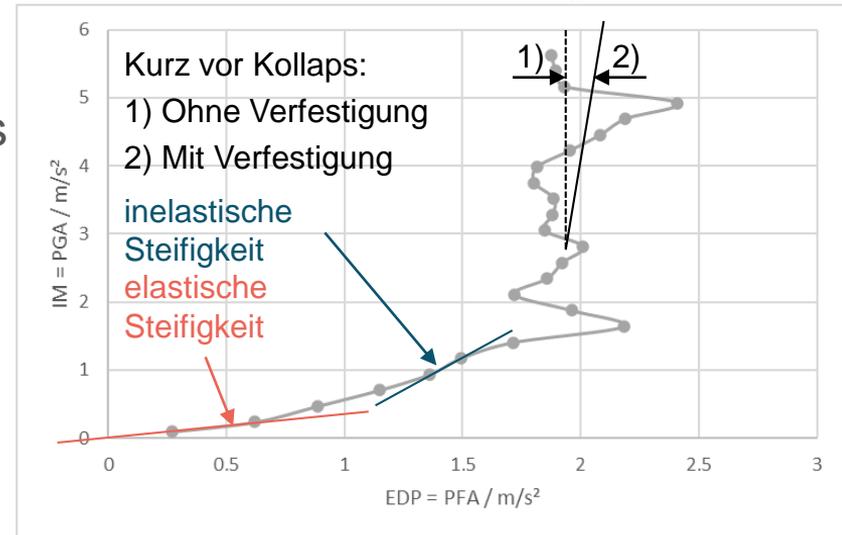
IDA BEISPIEL MIT NGA SEQUENZ 1776

- Intensitätsmaß $IM = PGA$
- Amplitudenmodulation des Erdbebens durch inkrementelle Laststeigerung
- Maximalwert der absoluten dynamischen Strukturantwort (Engineering Demand Parameter)
 $EDP = PFA = \max(|\ddot{u}^{(tot)}(48)|)$



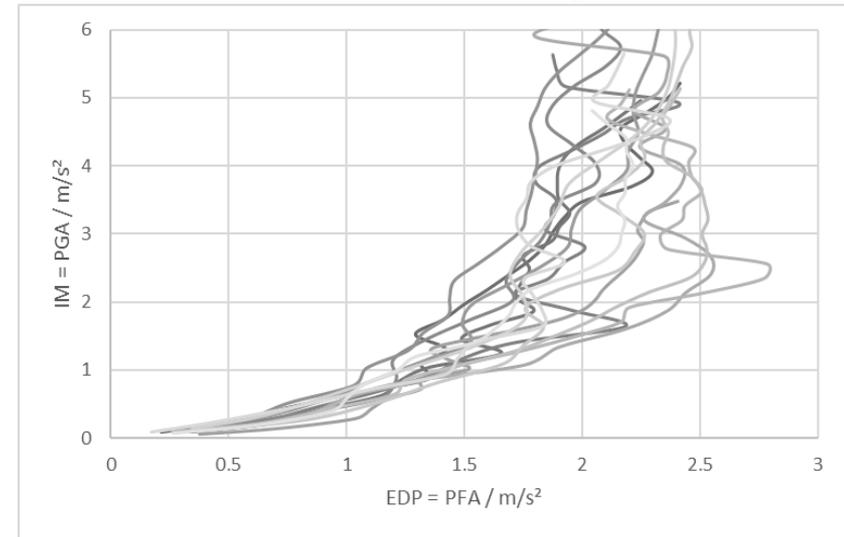
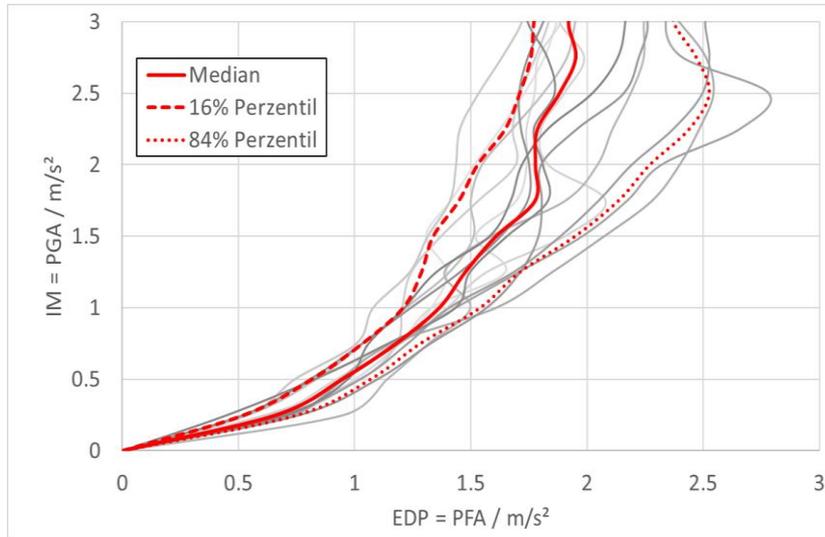
IDA BEISPIEL MIT NGA SEQUENZ 1776

- Intensitätsmaß $IM = PGA$
- Amplitudenmodulation des Erdbebens durch inkrementelle Laststeigerung
- Maximalwert der absoluten dynamischen Strukturantwort (Engineering Demand Parameter)
 $EDP = PFA = \max(|\ddot{u}^{(tot)}(48)|)$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA WIENER ERDBEBENSATZ

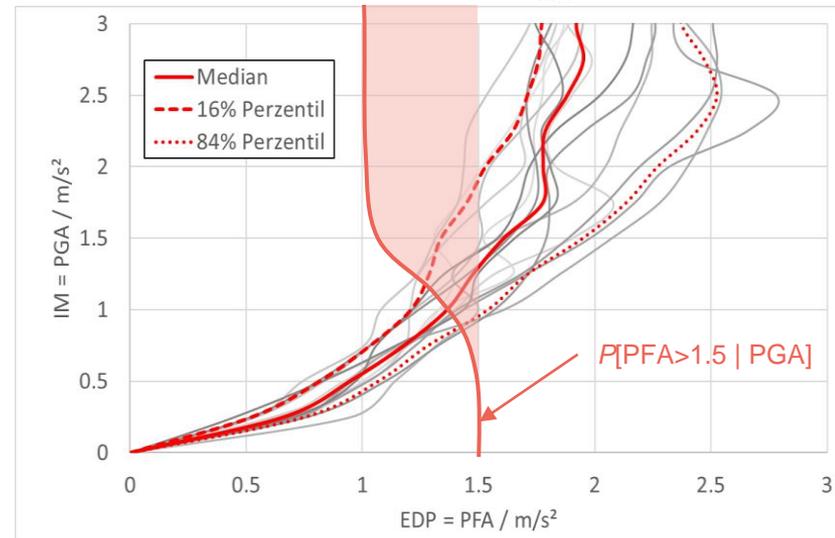


PFA - FRAGILITÄTSKURVEN

- **Allgemein:**
Fragilität = Wahrscheinlichkeit von Anforderung (EDP) > Kapazität (CAP) bei gegebener Intensität (IM = PGA):

$$P[EDP > CAP \mid PGA]$$
- **Speziell für PFA in Abbildung:**

$$P[PFA > 1.5 \mid PGA]$$



TOTALE WAHRSCHEINLICHKEIT

Allgemein:

Wahrscheinlichkeit von Anforderung (EDP) > Kapazität (CAP)

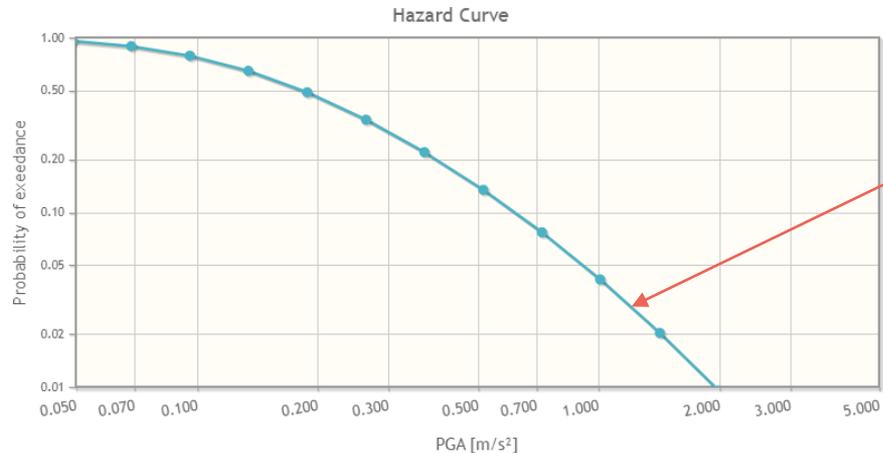
$$P[\text{PFA} > 1.5] = \int_0^{\infty} \underbrace{P[\text{PFA} > 1.5 | \text{PGA}]}_{\text{Fragilitätskurve}} | \underbrace{dP[\text{PGA}]}_{\text{Inkrementeller Zuwachs der seismischen Gefährdungskurve}}$$

Inkrementeller Zuwachs der
seismischen Gefährdungskurve

FRAGILITÄTSKURVEN & TOTALE WAHRSCHEINLICHKEIT

TOTALE WAHRSCHEINLICHKEIT

Seismische Gefährdungskurven in Österreich von ZAMG:

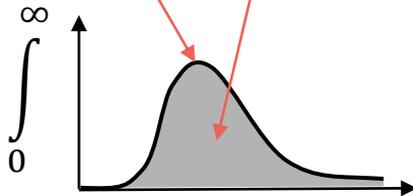


Tangente an seismische
Gefährdungskurve negativ,
daher Betrag der
Ableitung erforderlich!

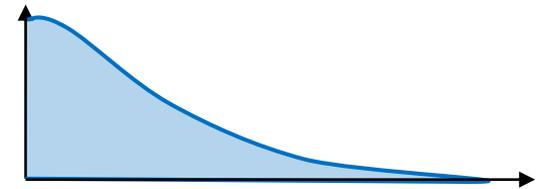
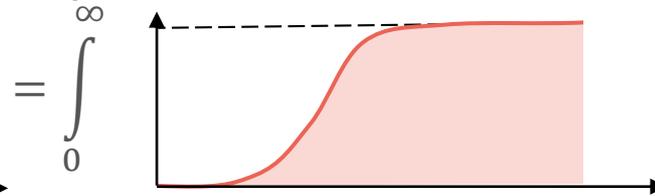
TOTALE WAHRSCHEINLICHKEIT

$$P[\text{PFA} > 1.5] = \int_0^{\infty} P[\text{PFA} > 1.5 | \text{PGA}] |dP[\text{PGA}]|$$

Größte
Überschreitungs-
wahrscheinlichkeit bei
moderater Intensität



$$= \int_0^{\infty} P[\text{PFA} > 1.5 | \text{PGA}] \left| \frac{d}{d[\text{PGA}]} (P[\text{PGA}]) \right| d[\text{PGA}]$$



ZUSAMMENFASSUNG

RESÜMEE

- Überschreitungswahrscheinlichkeit der Strukturantwort bei moderater Intensitäten viel höher als bei Intensitäten von Starkbeben!
- Seismische Gefährdungskurven von ZAMG oder näherungsweise aus EC8
- Gegenüberstellung der Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Grenzzustandes mit „normativen“ Überschreitungswahrscheinlichkeiten
- **Es gibt besser IM als PGA. PGA hier nur zu Demonstrationszwecken!**
- Log-Normalverteilte Fragilitätskurven für Gründerzeithäuser werden bald veröffentlicht. **WARUM?**

ZUSAMMENFASSUNG

AUSBLICK NEUE EN 1998-1-1 / ANHANG E

- Vereinfachtes Nachweisformat
- Z.B. Ziel-Wahrscheinlichkeit für CC2 Gebäude für Grenzzustand NC: $P_{t,NC,CC2} = 2 \cdot 10^{-4}$
- Fragilitätskurven angenähert mit Lognormalverteilung
- Gefährdungskurve von EN 1998-1-1 oder ZAMG

E.2 Reliability-based verification

(3) The performance of a structure for a given consequence class (CC) and for a limit state of interest LS may be considered as acceptable if the inequality given by Formula (E.1) is satisfied.

$$P_{LS} \leq P_{t,LS,CC} \quad (E.1)$$

where:

P_{LS} is the annual probability of exceedance of a designated limit state, which may be calculated according to this Annex;

$P_{t,LS,CC}$ is the target annual probability of exceedance of a designated limit state for a given consequence class.

NOTE The basis for calculation of the target probability of exceedance of LS for a given consequence class of a structure, $P_{t,LS,CC}$, can be the target probability of exceedance of the SBC limit state. For structures of consequence class CC2, this target probability is $P_{t,NC,CC2} = 2 \times 10^{-4}$, unless the relevant Authority or the National Annex gives a different value.

(4) The annual probability of exceedance of a designated limit-state may be calculated using Formula (E.2).

$$P_{LS} = \int_0^{\infty} P(L|S_e) \left| \frac{dH(S_e)}{dS_e} \right| dS_e \quad (E.2)$$

where:

S_e is the intensity measure of the ground motion in the form of a spectral acceleration (e.g. the PGA or the spectral acceleration at the fundamental period of the structure);

$P(L|S_e)$ is the probability that the ground motion with intensity equal to S_e will cause exceedance of limit state LS;

$H(S_e)$ is the seismic hazard function, i.e. the median of annual frequency of exceedance of S_e ;

NOTE In this Annex, the annual frequency of exceedance and the annual probability of exceedance are deemed to be small enough to be regarded as equal.

(5) $P(L|S_e)$ may be assumed to be log-normally distributed, as given by Formula (E.3).

LITERATUR

1. Bradley, Brendon A. (2010): A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 58 (5).
2. Baker, J. W. (2011): Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. In *J. Struct. Eng.* 137 (3), pp. 322–331.
3. Moschen, L.; Medina, R. A.; Adam, C. (2019): A ground motion record selection approach based on multiobjective optimization. In *Journal of Earthquake Engineering* 23 (4), pp. 669–687.
4. Moschen, L.; Tsalouchidis, K. T.; Adam, C. (2019): Tragwerksantwort Wiener Gründerzeithäuser unter Erdbebenanregung auf Grundlage des Wiener Erdbebensatzes. In *Bauingenieur* 94 (12), pp. 461–471.
5. Krakora, A.; Bauer, P. (2014): Berechnungsbeispiele anhand des Wiener Gründerzeit-Mustergebäudes. Kammer der Architekten und Ingenieurkonsulenten für Wien, Niederösterreich und Burgenland.
6. Vamvatsikos, D.; Cornell, C. A. (2002): Incremental Dynamic Analysis. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 31 (3), pp. 491–514.
7. Ibarra, L. F.; Medina, R. A.; Krawinkler, H. (2005): Hysteretic Models that Incorporate Strength and Stiffness Deterioration. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 34 (12), pp. 1489–1511.
8. Elnashai, A. S.; Di Sarno, L. (2015): Fundamentals of earthquake engineering. From source to fragility. With assistance of Oh-Sung Kwon. Second edition. Chichester, West Sussex: Wiley.
9. Weginger, S., Jia, Y., Lenhardt, W., Papi-Isaba, M. & Hausmann, H. (2019), Entwicklung einer regionalen Erdbebengefährdungskarte für Österreich, Tagungsband der 16. D-A-CH Tagung, Innsbruck, 26.-27. September 2019, 27–34.
10. Eads, L.; Miranda, E.; Krawinkler, H.; Lignos, D. G. (2013): An efficient method for estimating the collapse risk of structures in seismic regions. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 42 (1), pp. 25–41.