



DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT BASIEREND AUF DEM WIENER ERDBEBENSATZ

Lukas Moschen, 19. November 2020

FCP.VCE.ÖIAV - Symposium Erdbebeningenieurwesen

DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT BASIEREND AUF DEM WIENER ERDBEBENSATZ

INHALTSVERZEICHNIS

- Der Wiener Erdbebensatz
- Dynamische Tragwerksantwort
- Inkrementelle Dynamische Analyse
(Dynamische Traglastberechnung)

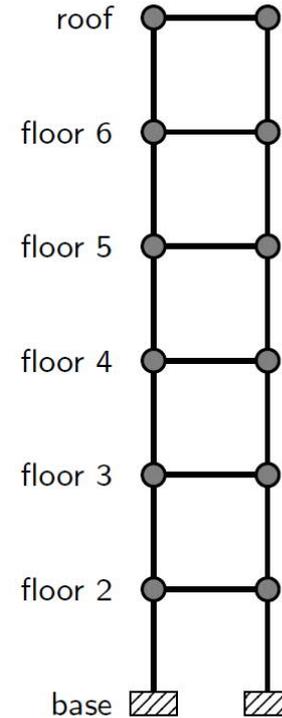


DER WIENER ERDBEBENSATZ

DER WIENER ERDBEBENSATZ

MOTIVATION

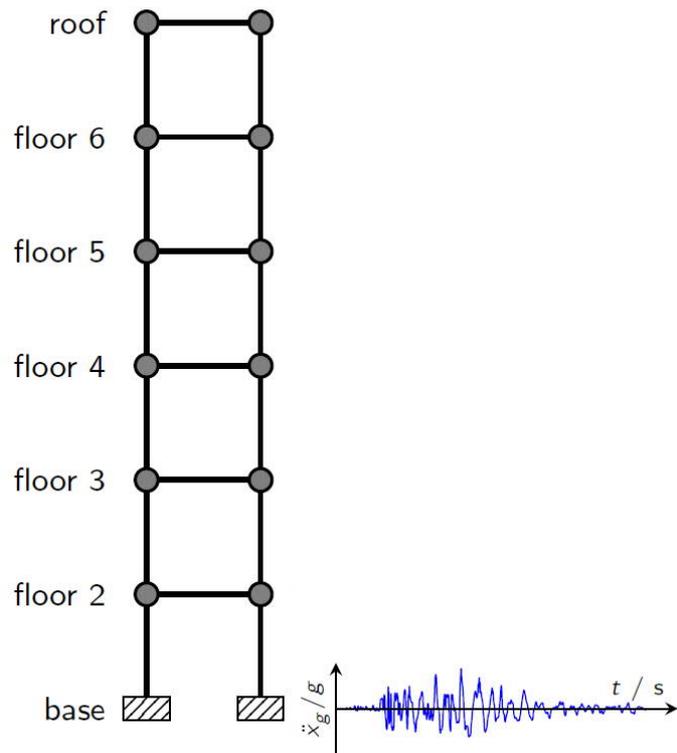
- Modellierung der Struktur



DER WIENER ERDBEBENSATZ

MOTIVATION

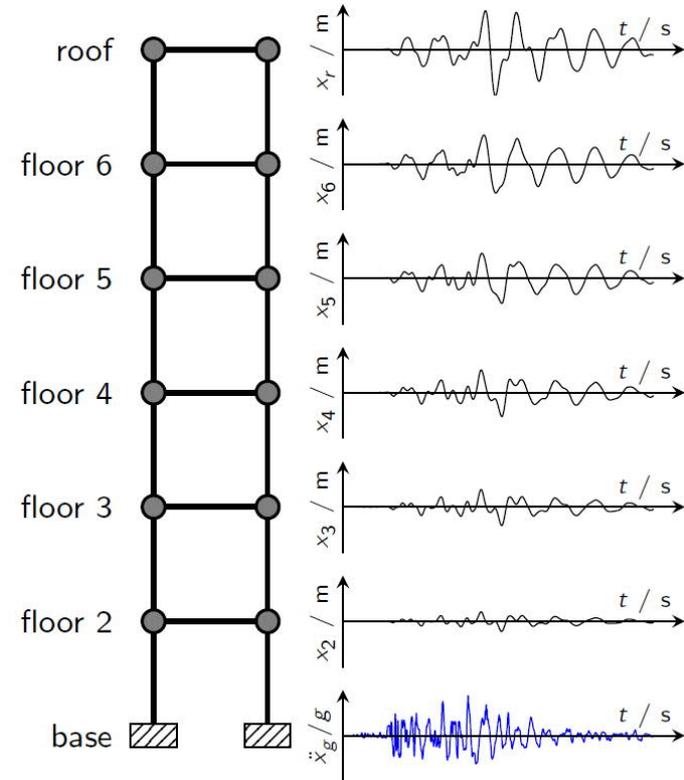
- Modellierung der Struktur
- Anregung mit standort-spezifischen Erdbebenschrieben



DER WIENER ERDBEBENSATZ

MOTIVATION

- Modellierung der Struktur
- Anregung mit standort-spezifischen Erdbebenschrieben
- Berechnung dynamische Strukturantwort
- Welche Erdbebenschriebe verwenden Sie im Wiener Becken?

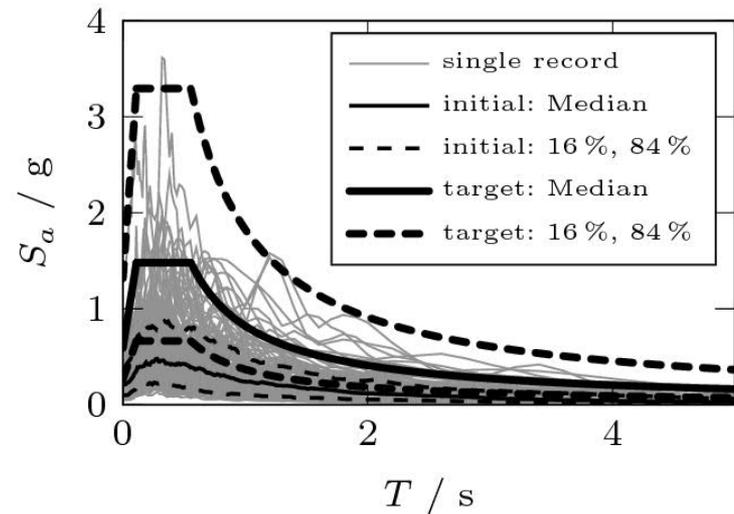


DER WIENER ERDBEBENSATZ

ERDBEBEN-SELEKTION

Anforderung an Algorithmus

- Effiziente Selektion
- Median → **Antwortspektrum**
- Standardabweichung → **Minimum**
- Spektralbereich → für **große Klasse von Gebäuden** verwendbar



DER WIENER ERDBEBENSATZ

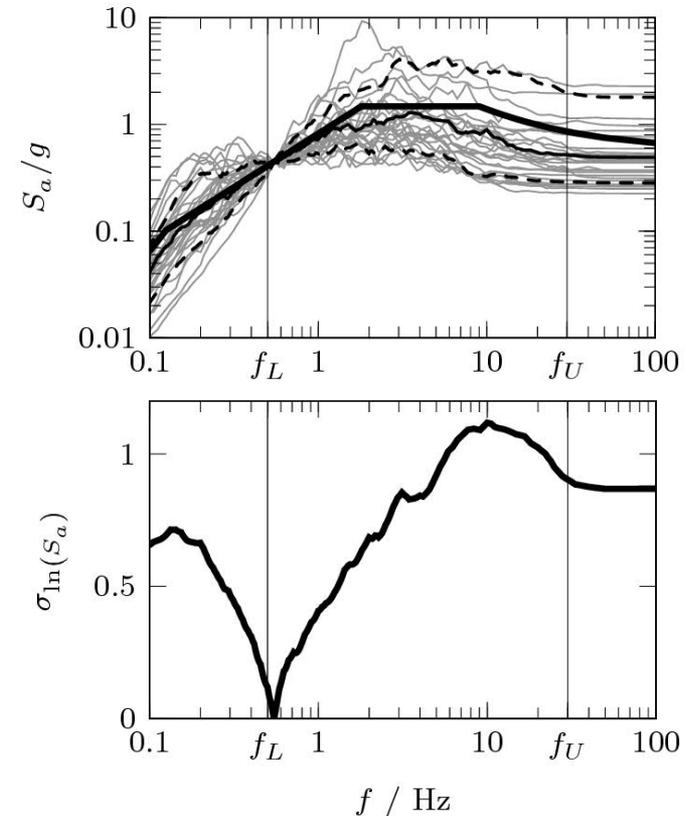
ERDBEBEN-SELEKTION

Beispiel Selektion an nur einer
Periode/Frequenz

- Median \triangleq Antwortspektrum
- Standardabweichung = 0

Optimierungsaufgabe:

„Finde optimalen Erdbebensatz
zwischen f_L und f_U “



DER WIENER ERDBEBENSATZ

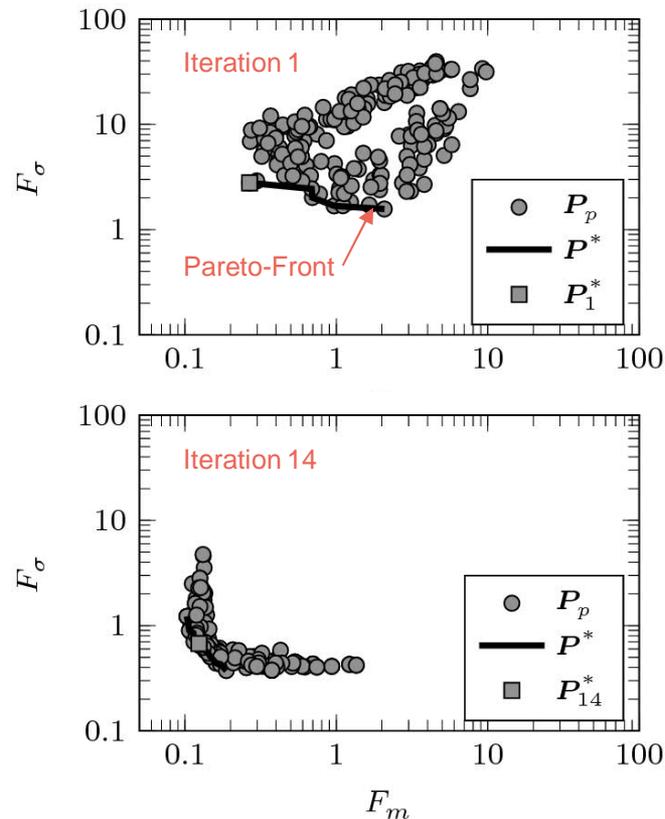
ERDBEBEN-SELEKTION

Optimierung:

1. Median \rightarrow Antwortspektrum
2. Standardabweichung \rightarrow Minimum

Zwei Fitness-Funktionen erforderlich:

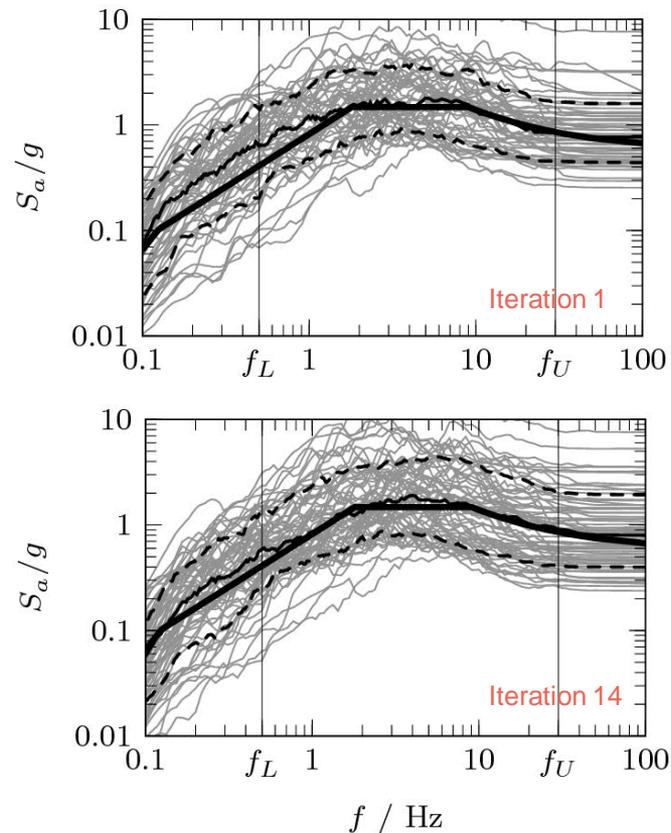
$$\left. \begin{aligned}
 F_{m,k} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (S_{ad,j} - \check{m}_{j,k})^2} \\
 F_{\sigma,k} &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\sigma_t - \sigma_{j,k})^2}
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \min$$



DER WIENER ERDBEBENSATZ

ERDBEBEN-SELEKTION

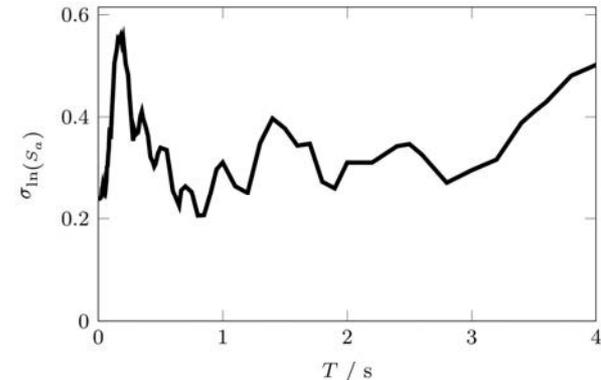
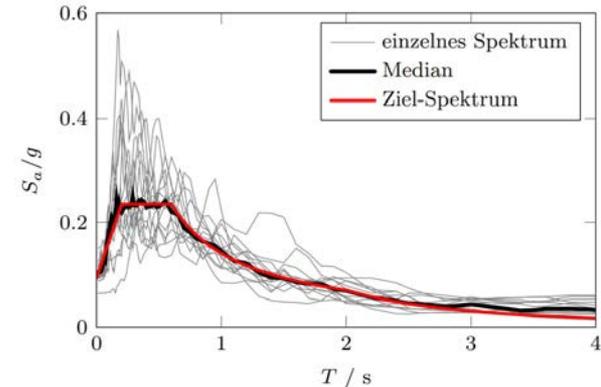
- Alle Pareto-optimalen Lösung sind von selber Qualität
- Konvergenz nach 14 Iterationen
- Berechnungsdauer ca. 20 s (Laptop) zur Lösungsfindung von 2^{21540} Kombinationen
- Konstanter Skalierungsfaktor \rightarrow Relative Intensität zwischen Erdbeben bleibt erhalten



DER WIENER ERDBEBENSATZ

WIENER ERDBEBENSATZ

- 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**

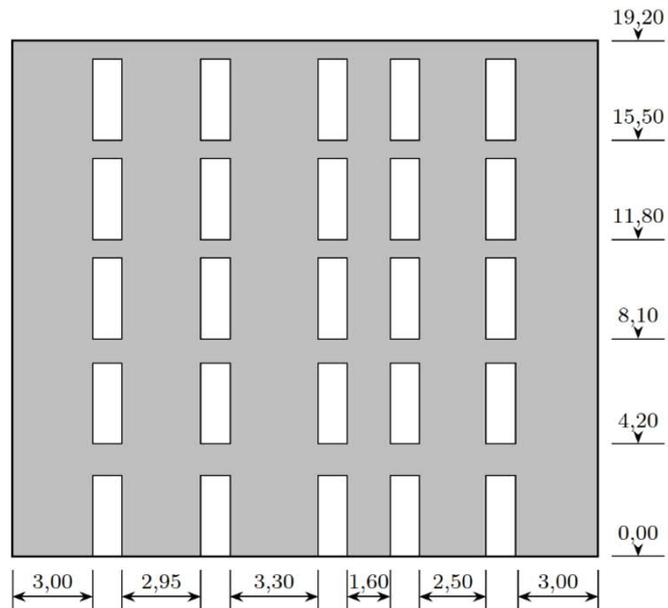
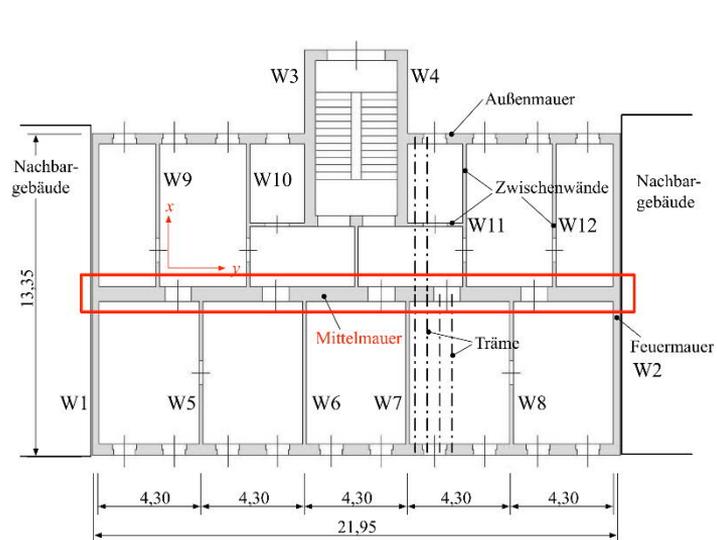




**DYNAMISCHE
TRAGWERKSANTWORT**

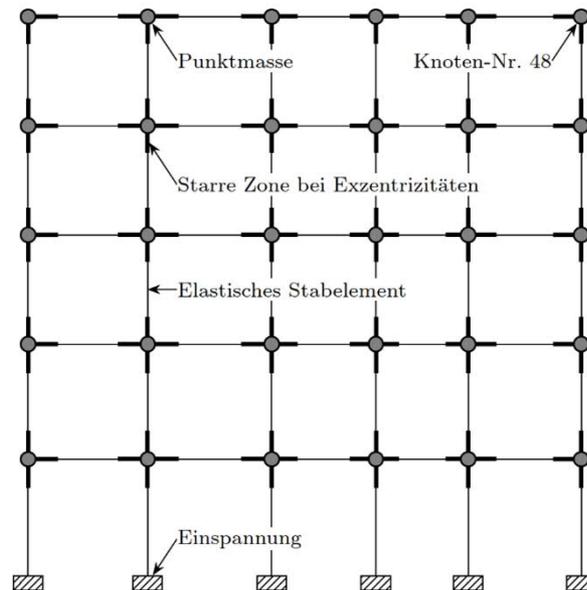
DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

GRÜNDERZEIT-MUSTERGEBÄUDE



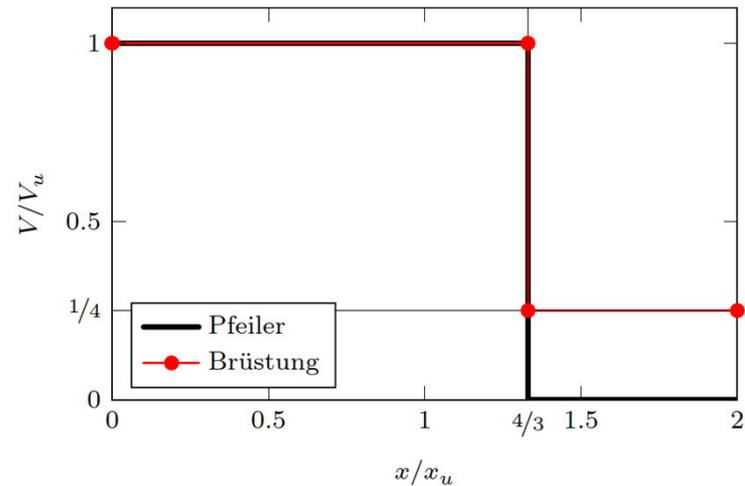
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- Punktmassen über Pfeiler
- Elastische Stabelemente



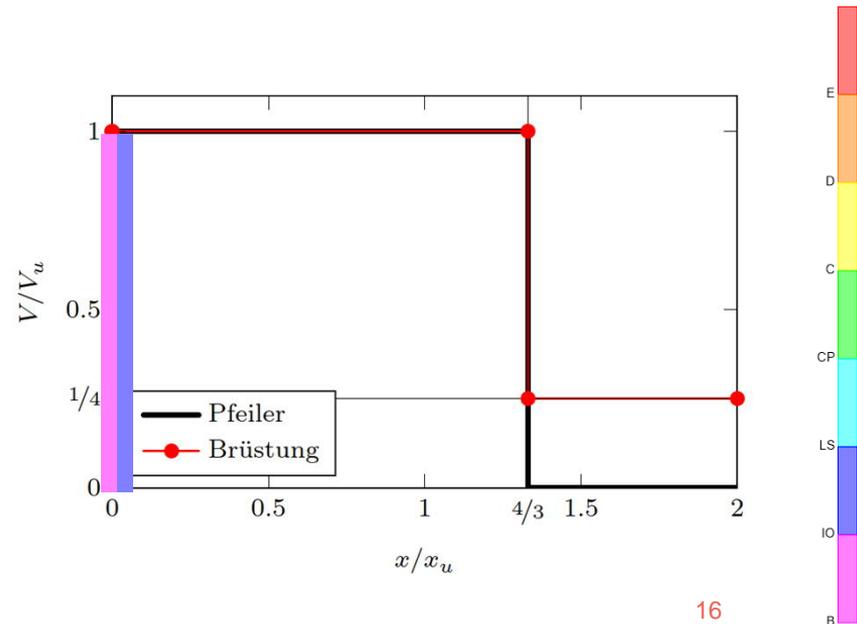
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

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



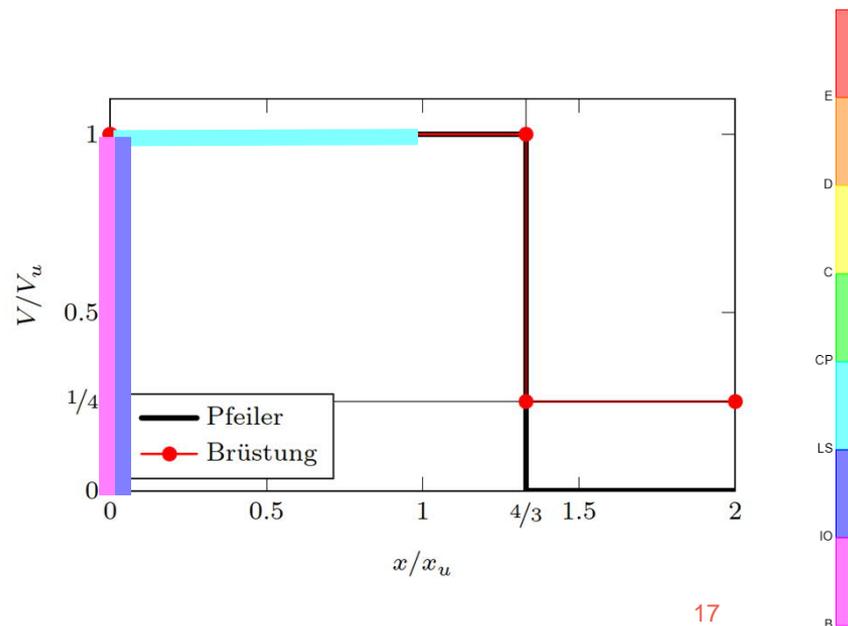
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

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



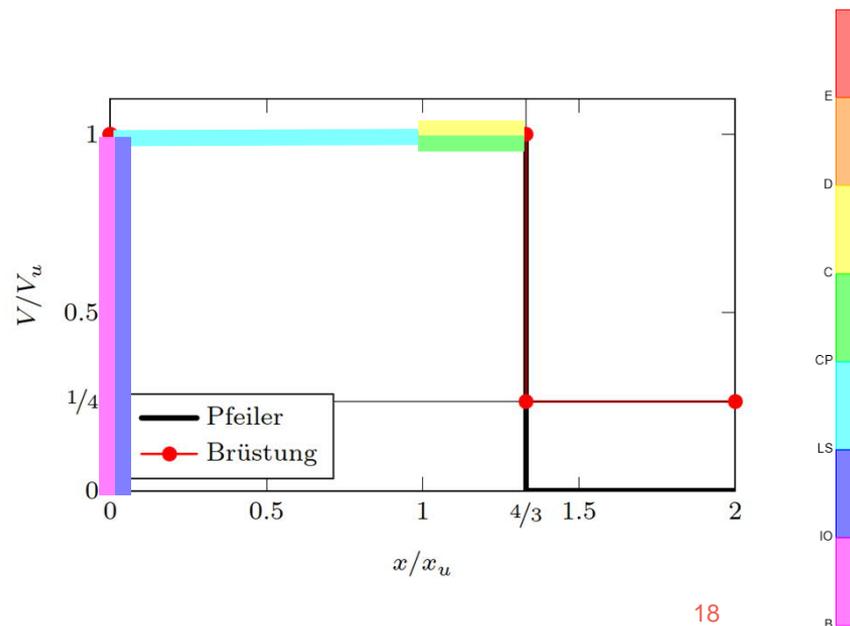
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

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



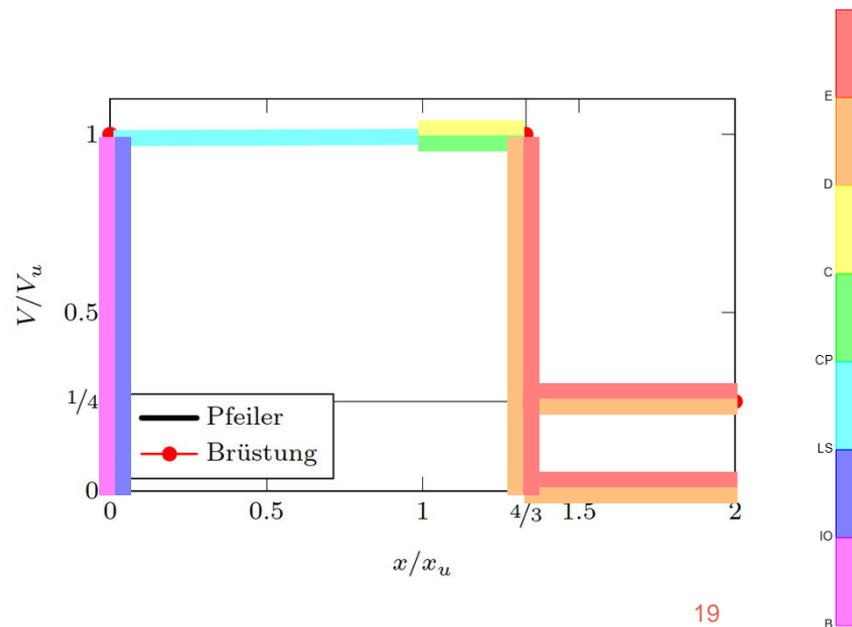
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

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



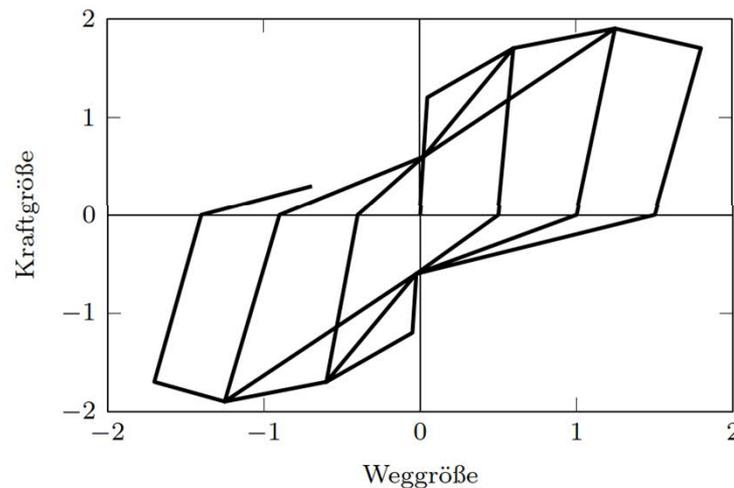
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

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



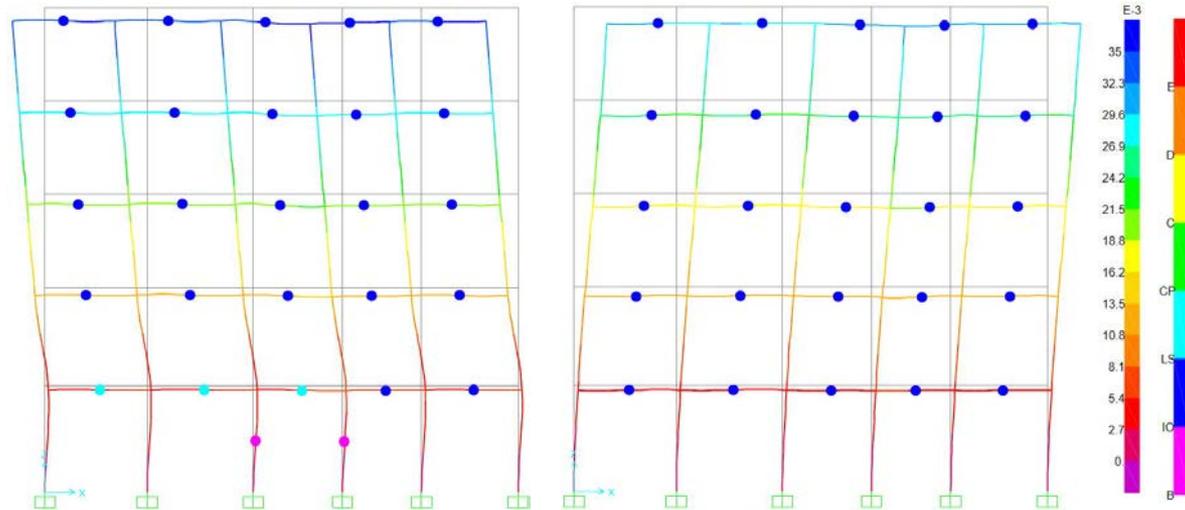
MECHANISCHES MODELL MITTELMAUER

- 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%



DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

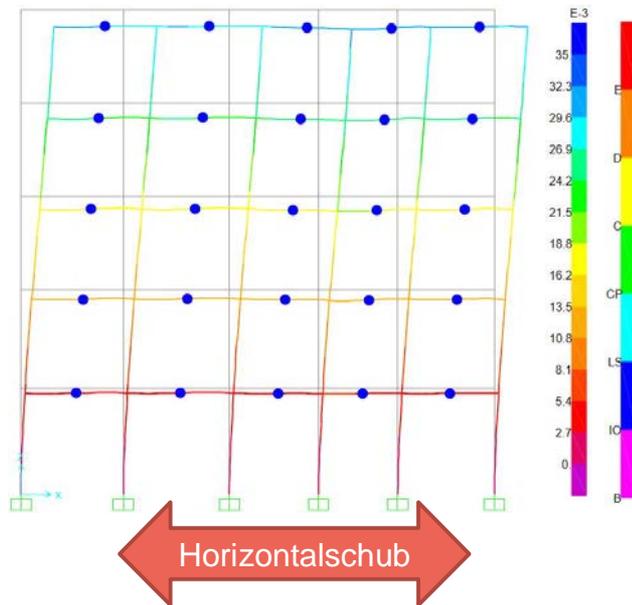
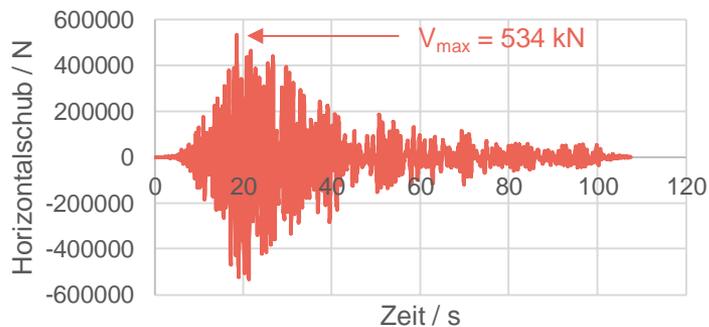
DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT



DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

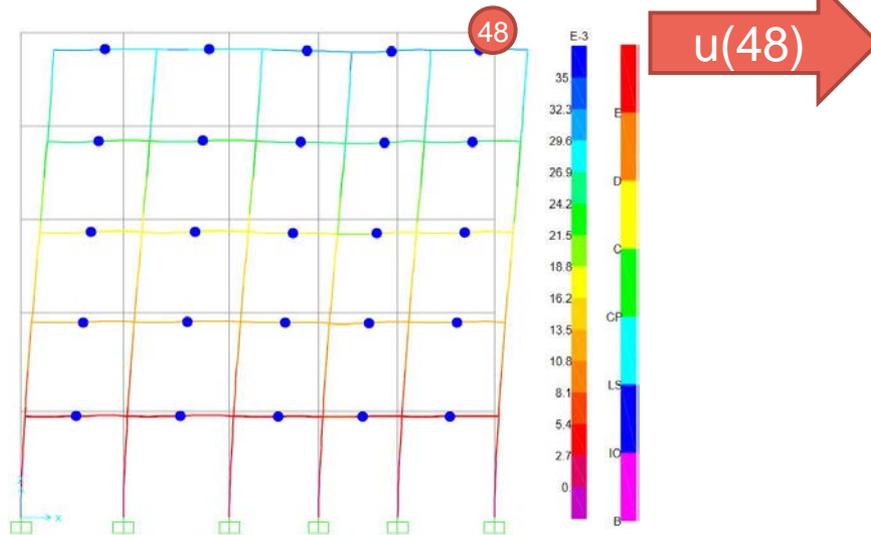
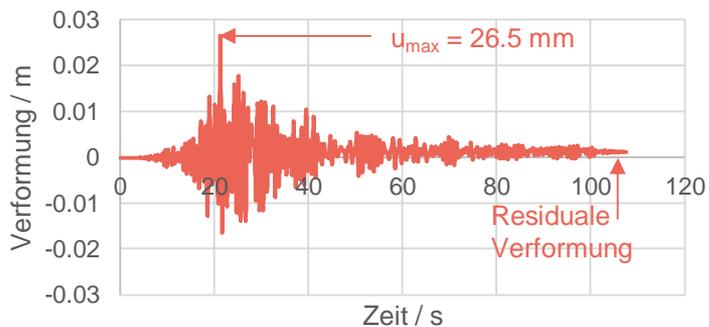
Beispiel: Horizontalschub mit
NGA Sequenz 1776



DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

Beispiel: Verformung Knoten 48 mit NGA Sequenz 1776



DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

Gesamter Wiener Erdbebensatz

- Horizontalschub

$$V_{\text{Median}} | \text{ Bemessungserdbeben} = 604 \text{ kN}$$

→ **Nachweis Tragfähigkeit** (analog für Schnittgrößen)

- Verformung

$$u(48)_{\text{Median}} = 26.5 \text{ mm}$$

→ **Nachweis laterale Verschiebung** (analog für Stockwerks-Drift)

DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

DYNAMISCHE TRAGWERKSANTWORT

Wie berechnet man die dynamische Traglast?





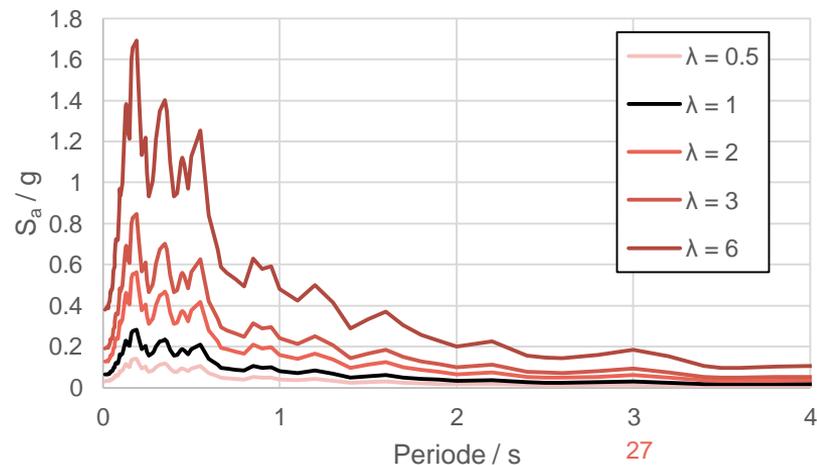
**INKREMENTELLE DYNAMISCHE
ANALYSE (DYNAMISCHE
TRAGLASTBERECHNUNG)**

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

- Intensitätsmaß $IM = S_a(T_1)$

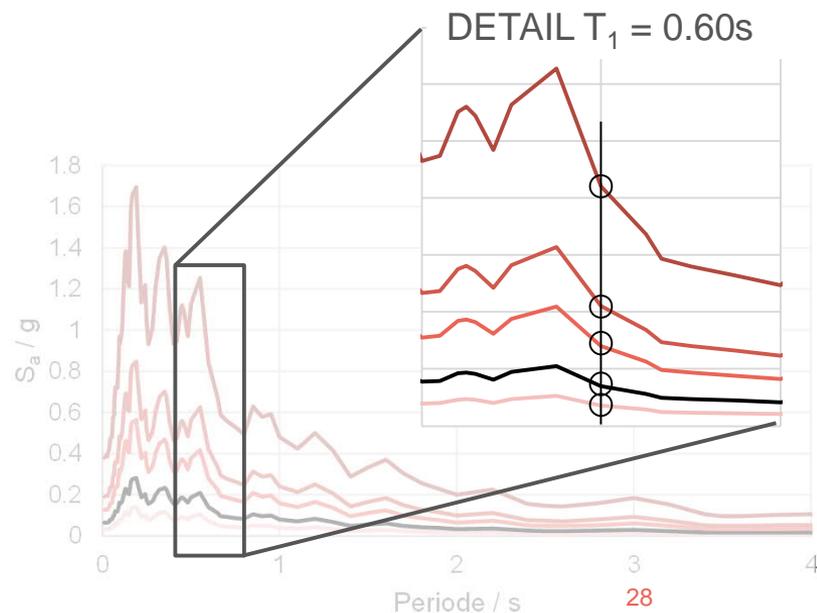


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

- Intensitätsmaß $IM = S_a(T_1)$
- Amplitudenmodulation des Erdbebens durch inkrementelle Laststeigerung

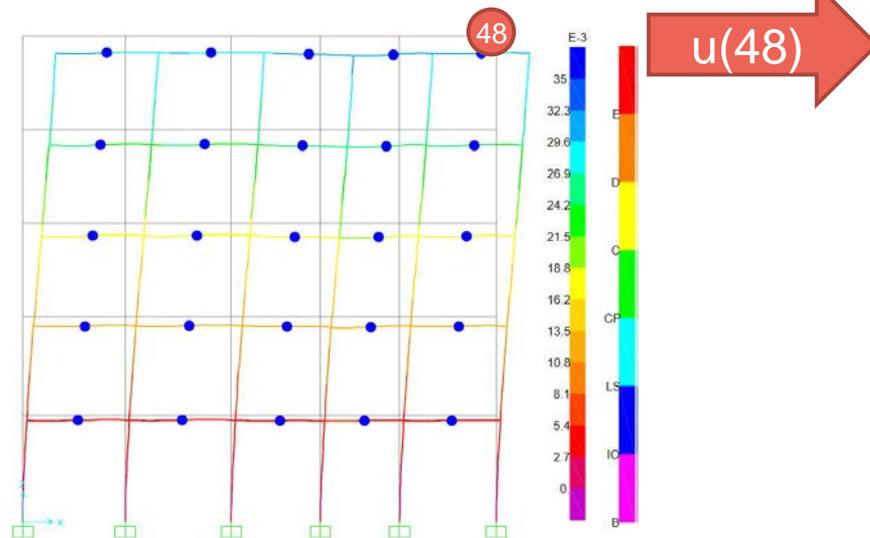


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

- Intensitätsmaß $IM = S_a(T_1)$
- Amplitudenmodulation des Erdbebens durch inkrementelle Laststeigerung
- Maximalwert der absoluten dynamischen Strukturantwort (Engineering Demand Parameter)
 $EDP = u(48)$

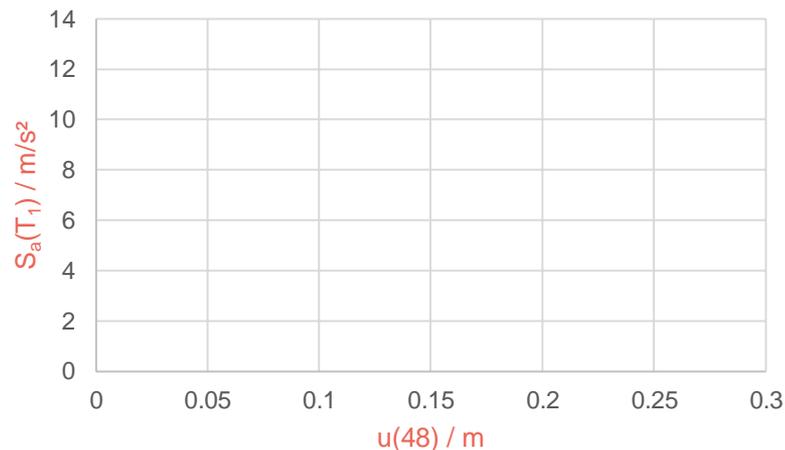


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

- Intensitätsmaß $IM = S_a(T_1)$
- Amplitudenmodulation des Erdbebens durch inkrementelle Laststeigerung
- Maximalwert der absoluten dynamischen Strukturantwort (Engineering Demand Parameter)
 $EDP = u(48)$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

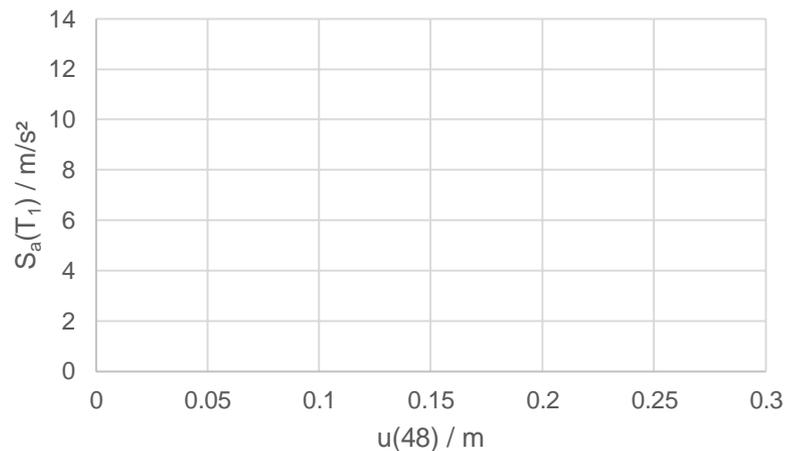
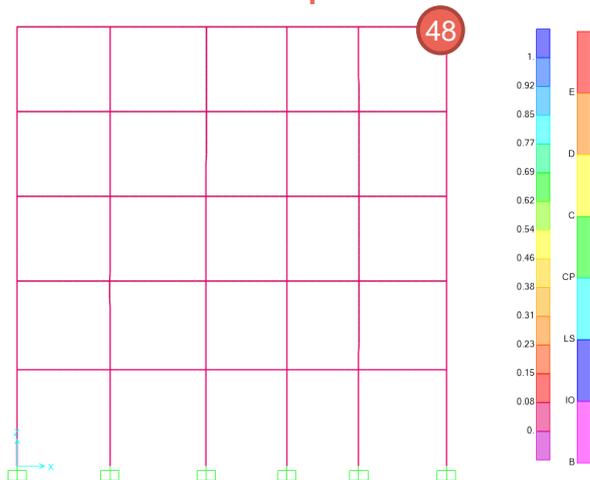
$\lambda = 0.1:$

IM:

$S_a(T_1) = 0.18 \text{ m/s}^2$

EDP:

$u(48) = 0.003 \text{ m}$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

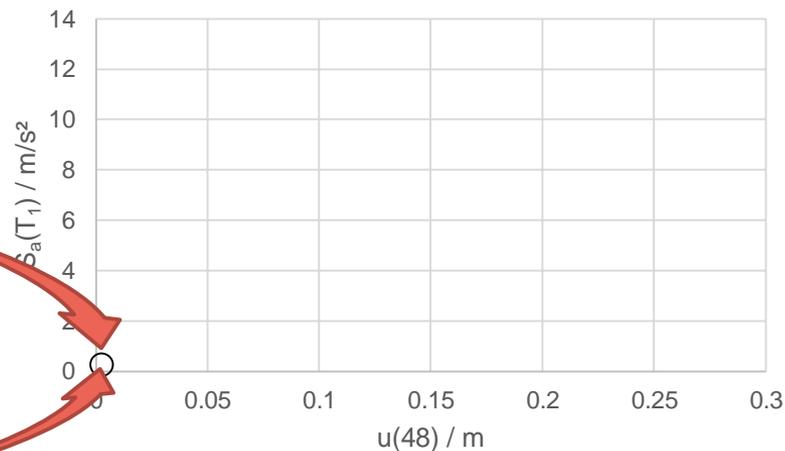
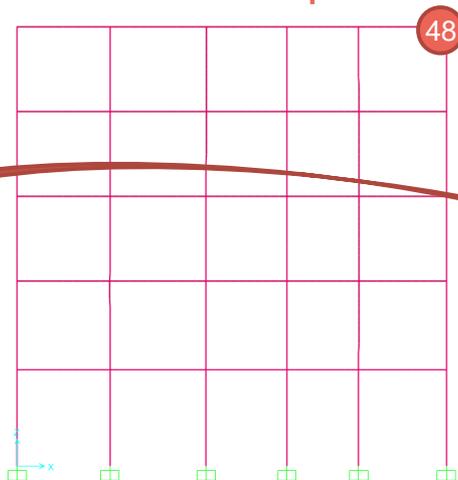
INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

$\lambda = 0.1:$

IM:
 $S_a(T_1) = 0.18 \text{ m/s}^2$

EDP:
 $u(48) = 0.003 \text{ m}$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

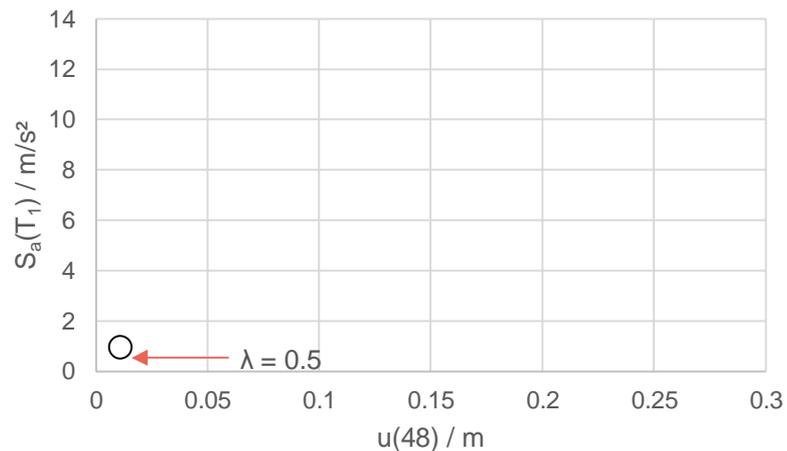
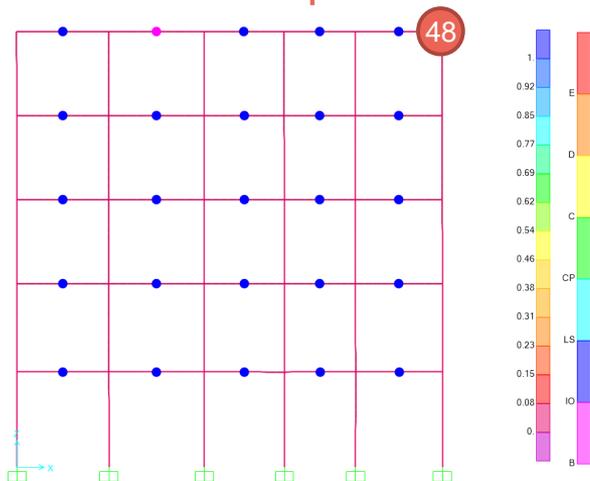
$\lambda = 0.5:$

IM:

$S_a(T_1) = 0.91 \text{ m/s}^2$

EDP:

$u(48) = 0.01 \text{ m}$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

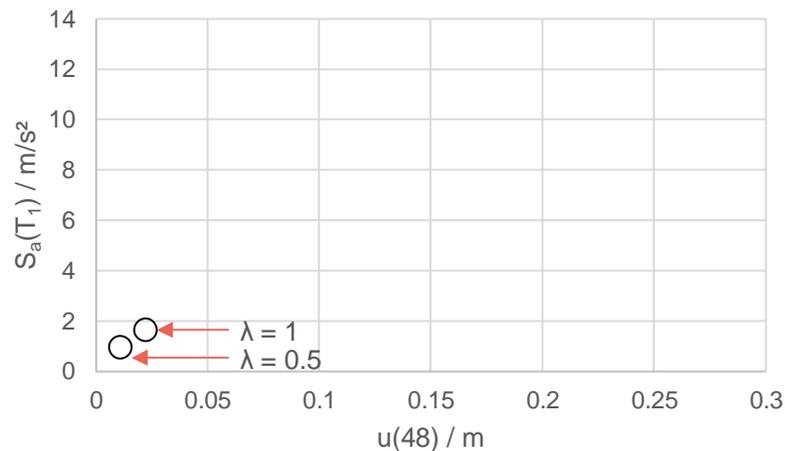
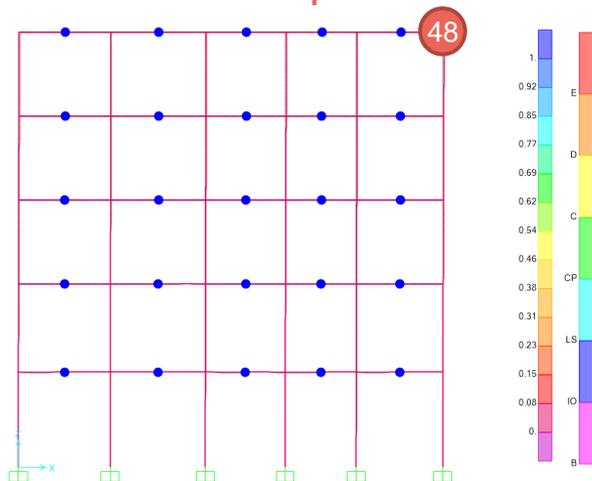
$\lambda = 1$:

IM:

$$S_a(T_1) = 1.83 \text{ m/s}^2$$

EDP:

$$u(48) = 0.03 \text{ m}$$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

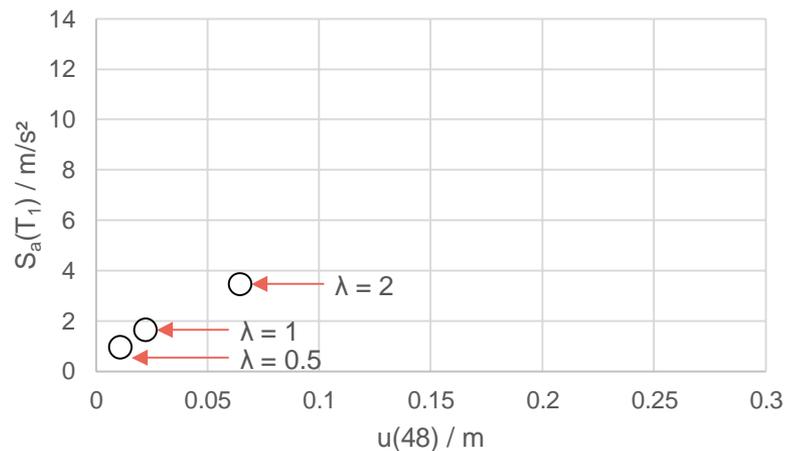
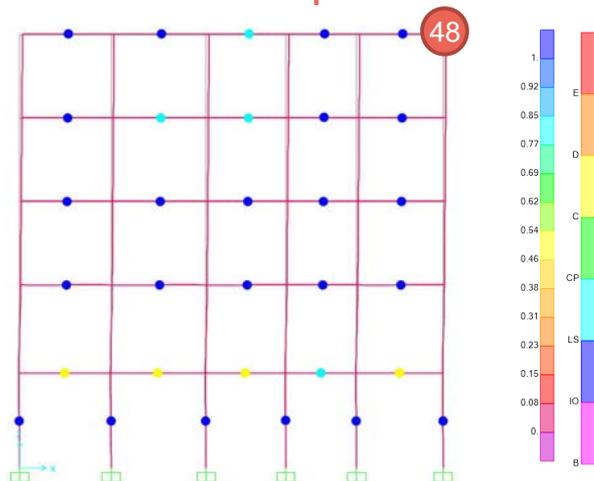
$\lambda = 2$:

IM:

$$S_a(T_1) = 3.66 \text{ m/s}^2$$

EDP:

$$u(48) = 0.06 \text{ m}$$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

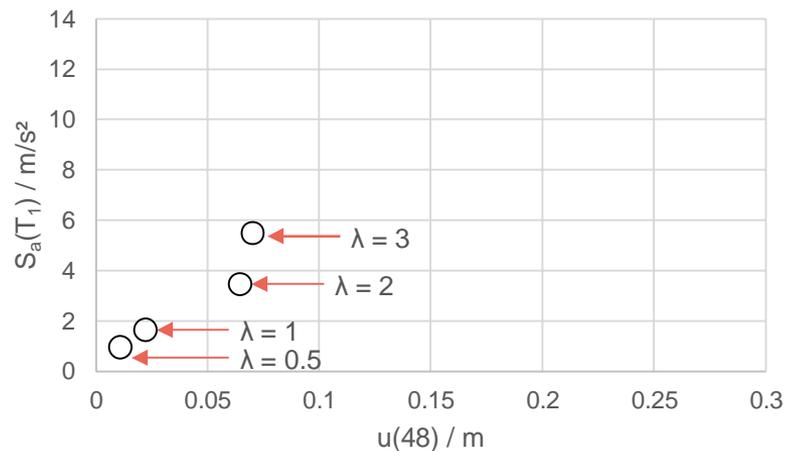
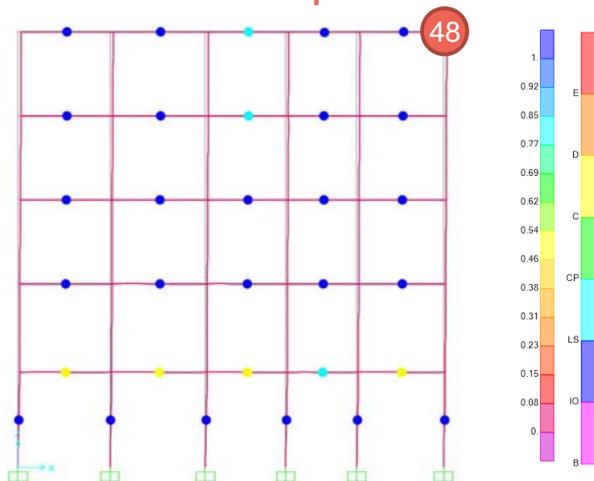
$\lambda = 3$:

IM:

$$S_a(T_1) = 5.49 \text{ m/s}^2$$

EDP:

$$u(48) = 0.07 \text{ m}$$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

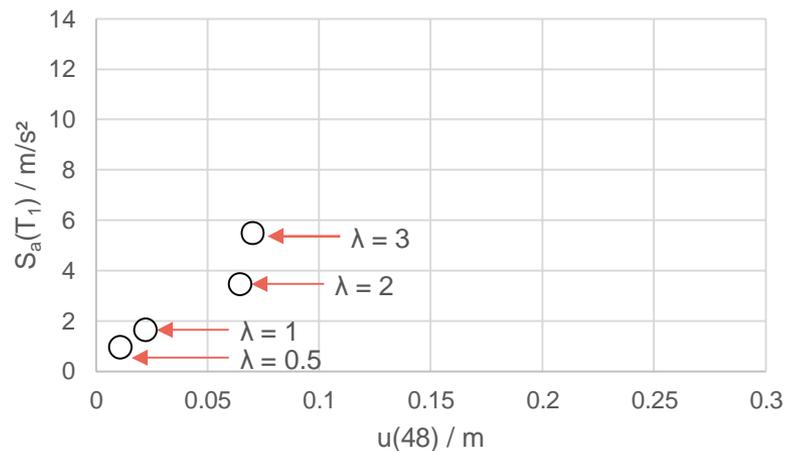
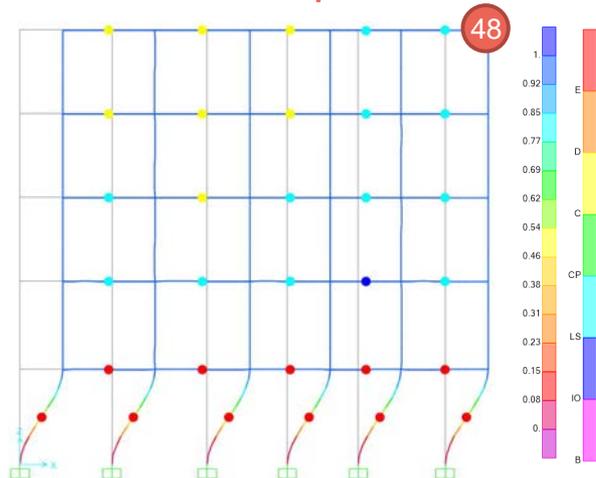
$\lambda = 6$:

IM:

$$S_a(T_1) = 10.98 \text{ m/s}^2$$

EDP:

$$u(48) = 0.95 \text{ m}$$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

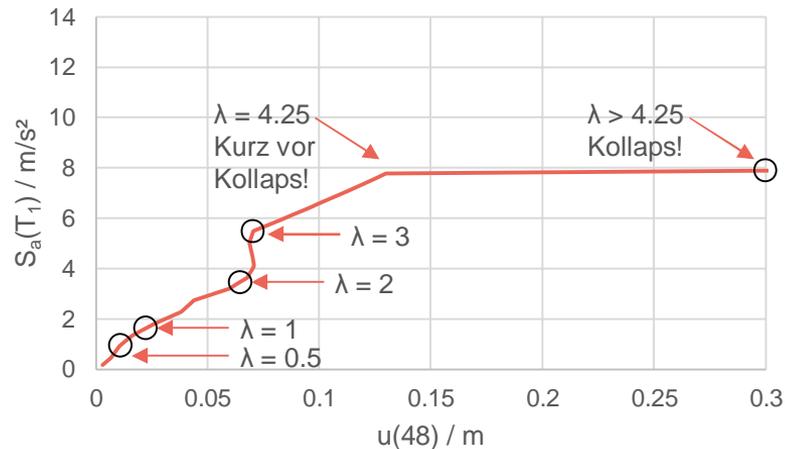
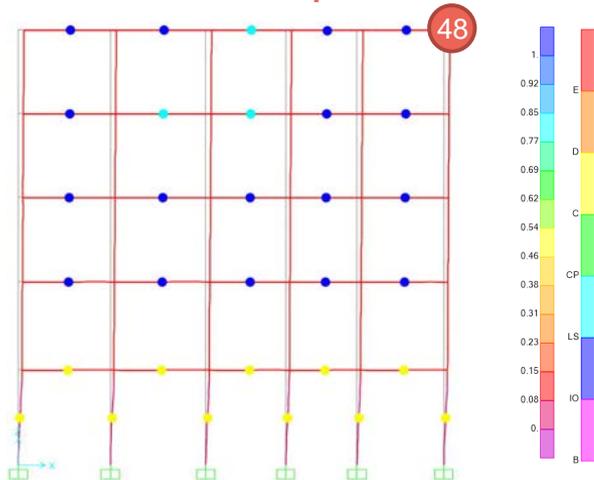
INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Beispiel mit NGA Sequenz 1776

$\lambda = 4.25$:

IM:
 $S_a(T_1) = 7.778 \text{ m/s}^2$

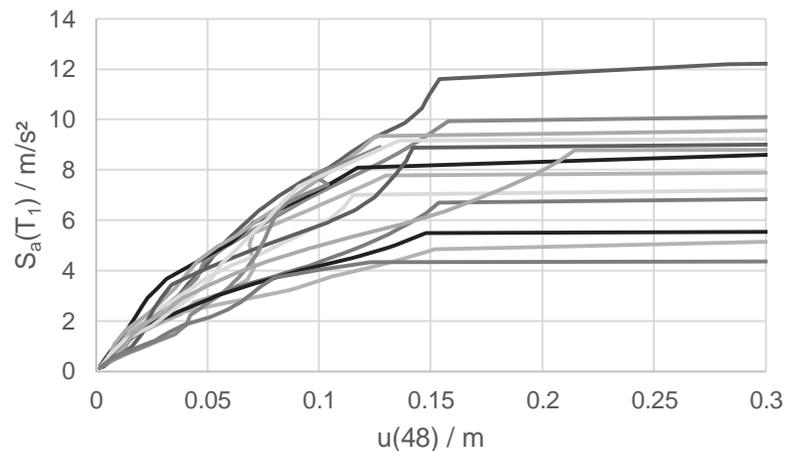
EDP:
 $u(48) = 0.13 \text{ m}$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

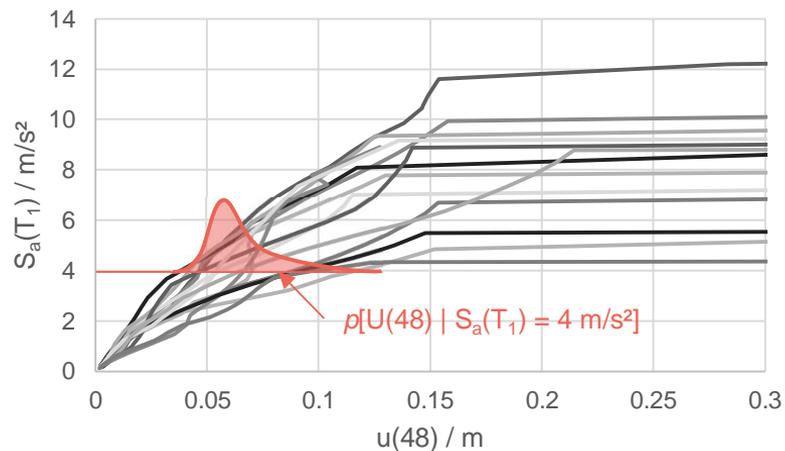


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte

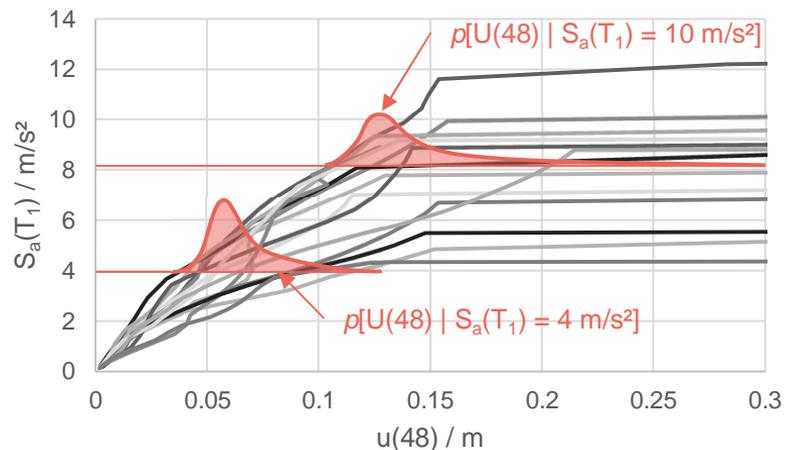


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte

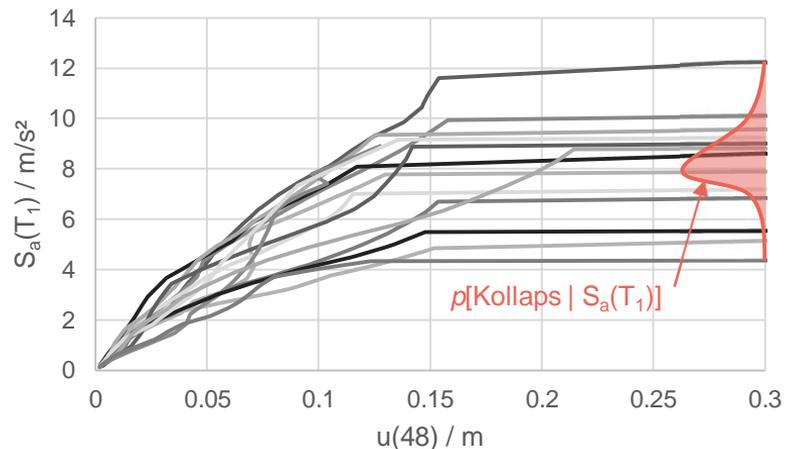


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte
- Kollaps-Fragilität (= Integral der bed. Kollaps-Wahrscheinlichkeitsdichte)

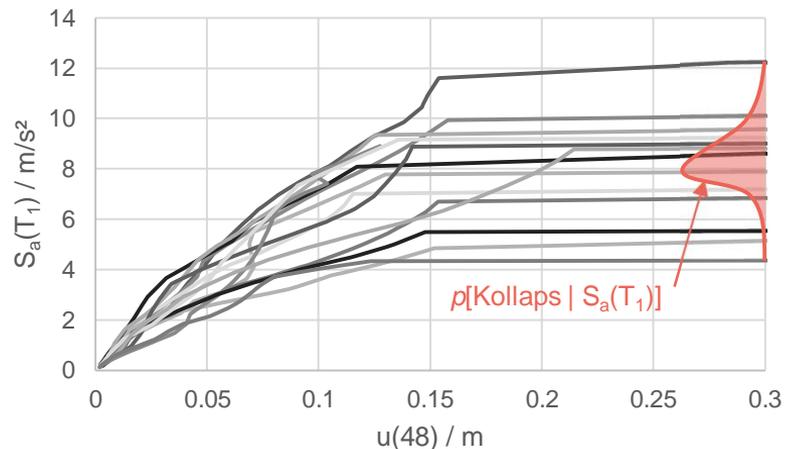


INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte
- Kollaps-Fragilität (= Integral der bed. Kollaps-Wahrscheinlichkeitsdichte)
- $P[S_a(T_1)] \triangleq$ Seismic Hazard Curve



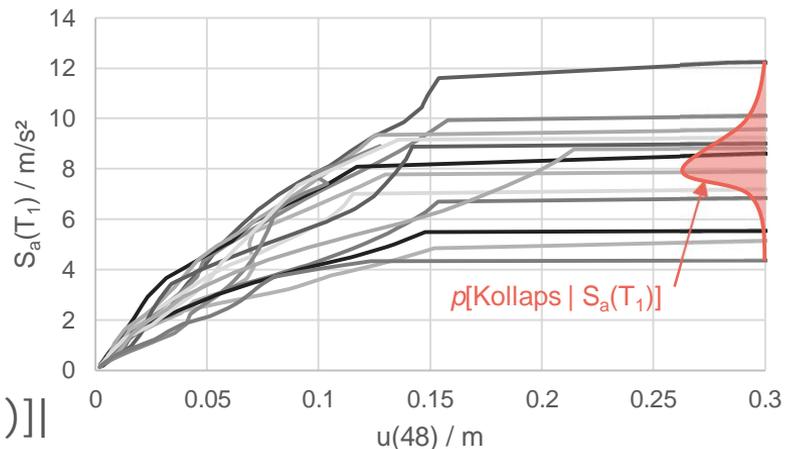
INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichte
- Kollaps-Fragilität (= Integral der bed. Kollaps-Wahrscheinlichkeitsdichte)
- $P[S_a(T_1)] \triangleq$ Seismic Hazard Curve
- Kollaps-Wahrscheinlichkeit

$$P[\text{Kollaps}] = \int_0^{\infty} P[\text{Kollaps} | S_a(T_1)] |dP[S_a(T_1)]|$$



INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE (DYNAMISCHE TRAGLASTBERECHNUNG)

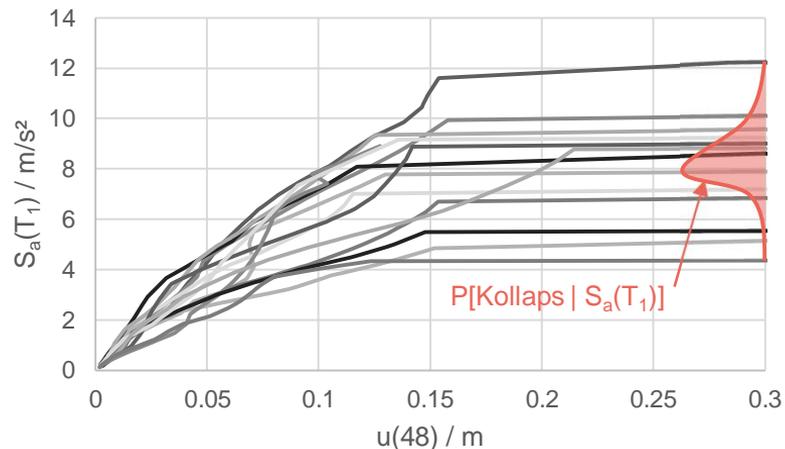
INKREMENTELLE DYNAMISCHE ANALYSE

IDA Wiener Erdbebensatz: 14 IDA-Kurven

- zugehöriger Horizontalschub
 $V_{IDA, \text{Median} | \text{Kollaps}} = 820 \text{ kN}$
- Vergleich mit Bemessungserdbeben

$$\frac{V_{IDA, \text{Median} | \text{Kollaps}}}{V_{\text{Median} | \text{Bemessungserdbeben}}} = \frac{820}{604} = \mathbf{1,36}$$

→ 36% „Traglast-Reserve“



ZUSAMMENFASSUNG

RESÜMEE / HINWEISE ZUR ANWENDUNG

- 14 Schriebe in Wiener Erdbebensatz
- Rasche nichtlineare Berechnung für „Bemessungserdbeben“
- Dynamische Strukturantwort (insbesondere **Beschleunigung & Geschwindigkeit**) mit nichtlinearer Zeitverlaufsberechnung aussagekräftig
- **Dynamische Traglastberechnung erhöht Ausnutzung um 36%**
- **Einfache Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit**
- Studieren Sie die lastabtragende Struktur → Vorschlag Berechnungsschritte:
 - Zuerst Antwortspektrum-Verfahren (= Referenzlösung & Design)
 - Danach Pushover Analyse (Assessment & Performance)
 - Falls erforderlich/gewünscht inkrementell dynamische Analyse (Assessment & Performance)

LITERATUR

1. Bradley, Brendon A. (2010): A generalized conditional intensity measure approach and holistic ground-motion selection. In *Earthquake Engng Struct. Dyn.* 58 (5), n/a-n/a. DOI: 10.1002/eqe.995.
2. Baker, J. W. (2011): Conditional Mean Spectrum: Tool for Ground-Motion Selection. In *J. Struct. Eng.* 137 (3), pp. 322–331. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000215.
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. DOI: 10.1080/13632469.2017.1342302.
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. DOI: 10.1002/eqe.141.
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. DOI: 10.1002/eqe.495.