

Erdbebensicherung von Bauwerken II – HS09

A. Erdbebenversuch einer Stahlbetonstütze auf dem ETH-Rütteltisch

Montag, 30. November 2009

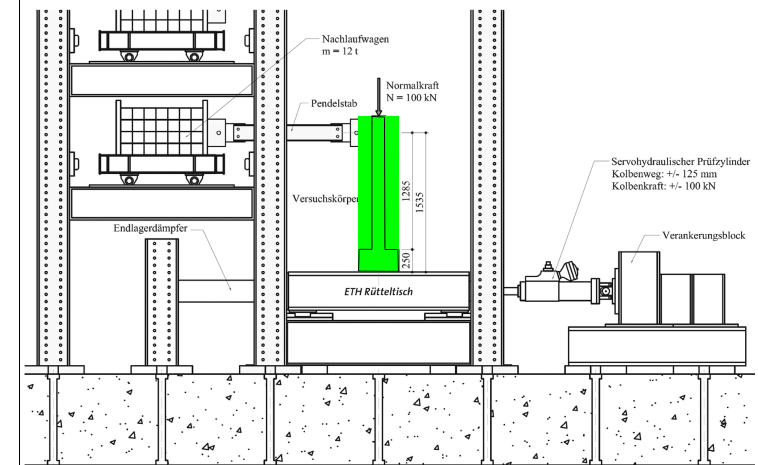
ibk Erdbebeningenieurwesen
und Baudynamik

ETH

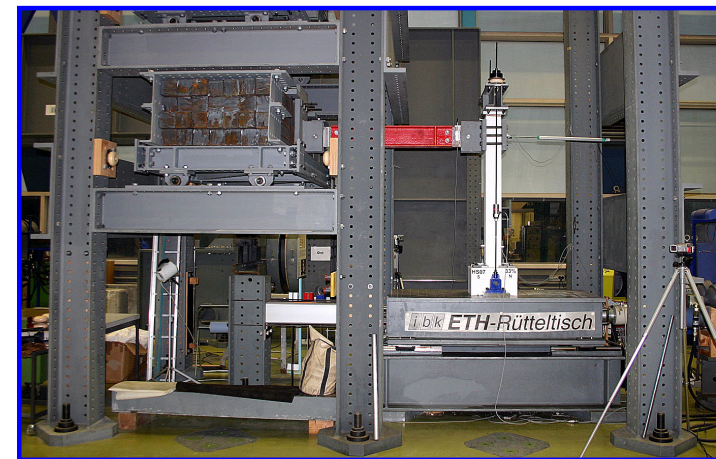
Programm

- **A1: Versuchseinrichtung**
- **A2: Versuchskörper**
 - Eigenschaften
 - Herstellung (Fotos aus der Vorlesung im HS07)
- **A3: Belastung**
 - Normalkraft
 - Erdbeben
- **A4: Instrumentierung**
- **A5: Modellierung mit „Seismostruct“ ([Sei09])**
- **A6: Vorbeschädigung**
- **A7: Vorhersagen und Versuchsergebnisse**
- **A8: Versuchsergebnisse**

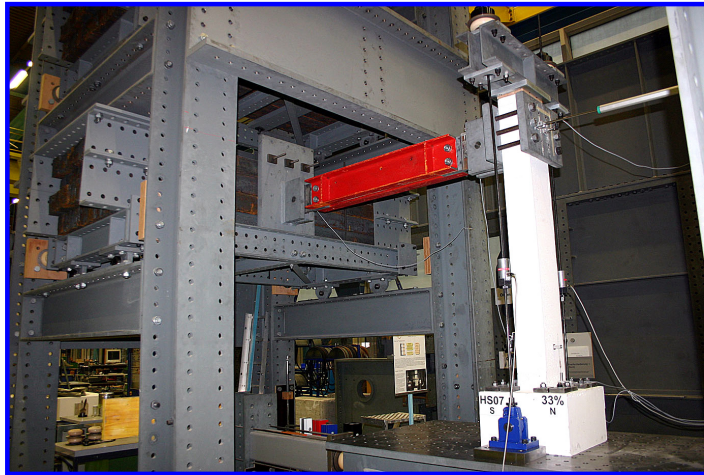
A1. Versuchseinrichtung (schematisch)



A1. Versuchseinrichtung (Bild 1)

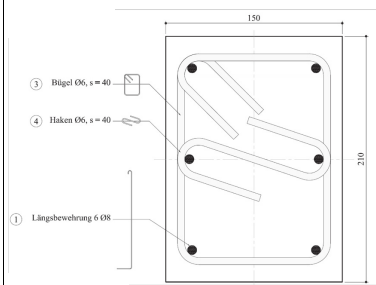


A1. Versuchseinrichtung (Bild 2)

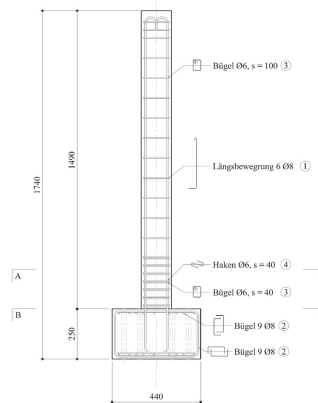


A2. Versuchskörper: Eigenschaften

Schnitt A-A

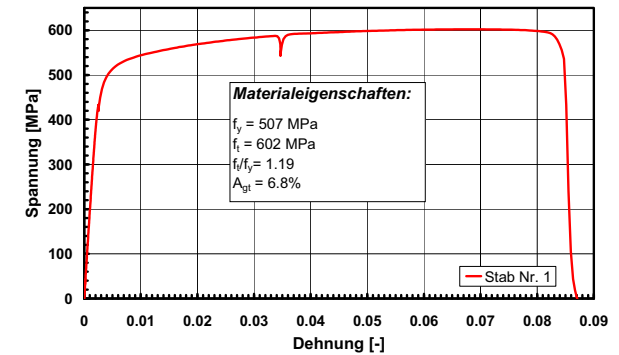


Ansicht



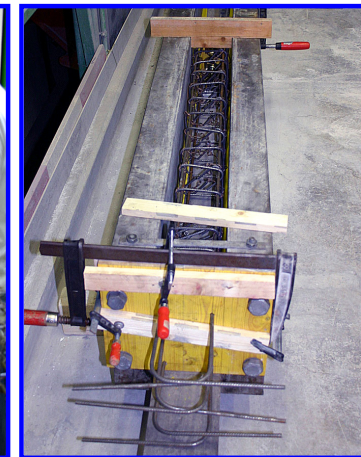
A2. Versuchskörper: Eigenschaften

Eigenschaften der Längsbewehrung

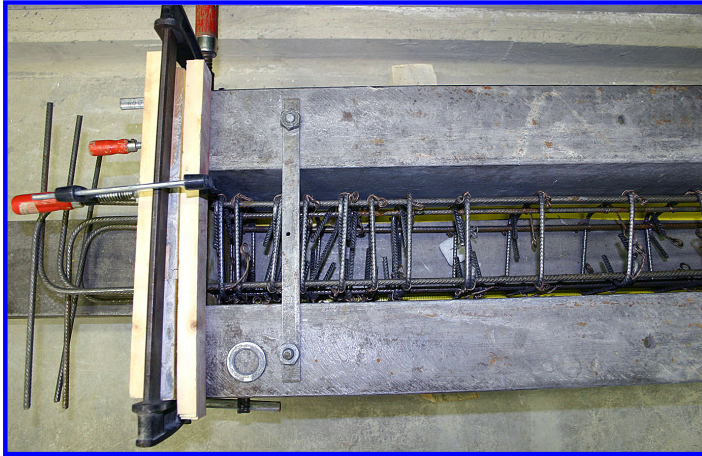


Eigenschaften des Betons: $f_c' = 40 \text{ MPa}$ (Schätzung)

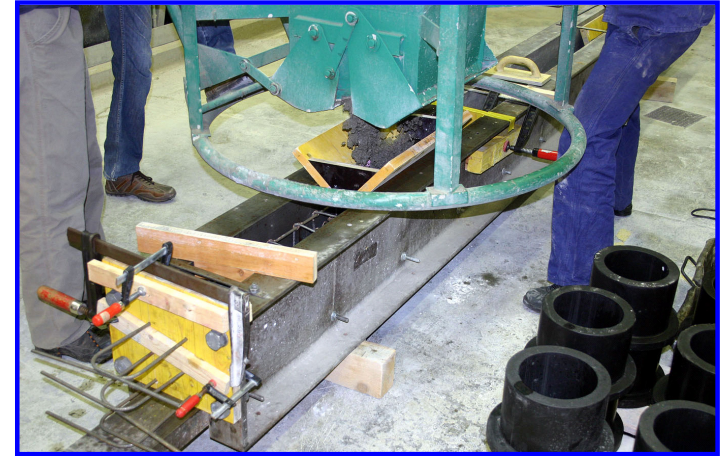
A2. Versuchskörper: Herstellung (i)



A2. Versuchskörper: Herstellung (ii)



A2. Versuchskörper: Herstellung (iv)



A2. Versuchskörper: Herstellung (iii)



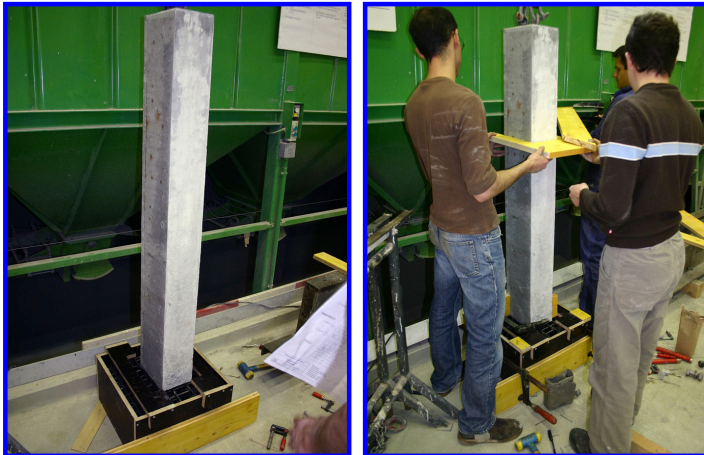
A2. Versuchskörper: Herstellung (v)



A2. Versuchskörper: Herstellung (vi)



A2. Versuchskörper: Herstellung (vii)



A2. Versuchskörper: Herstellung (viii)

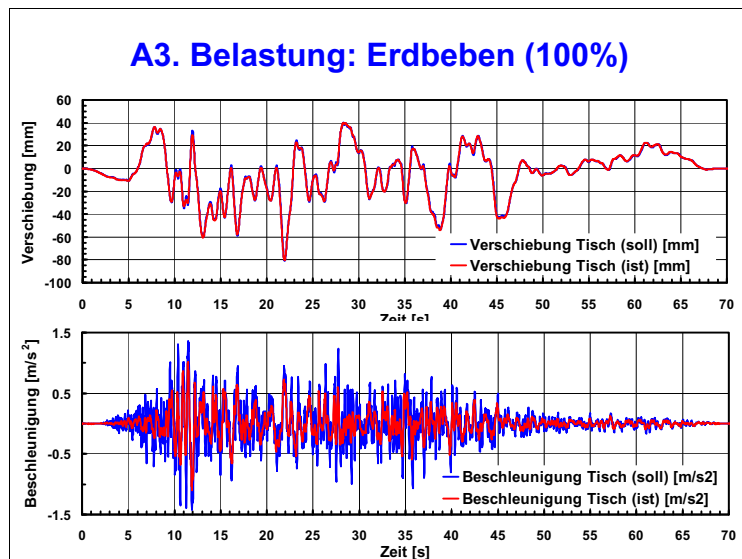
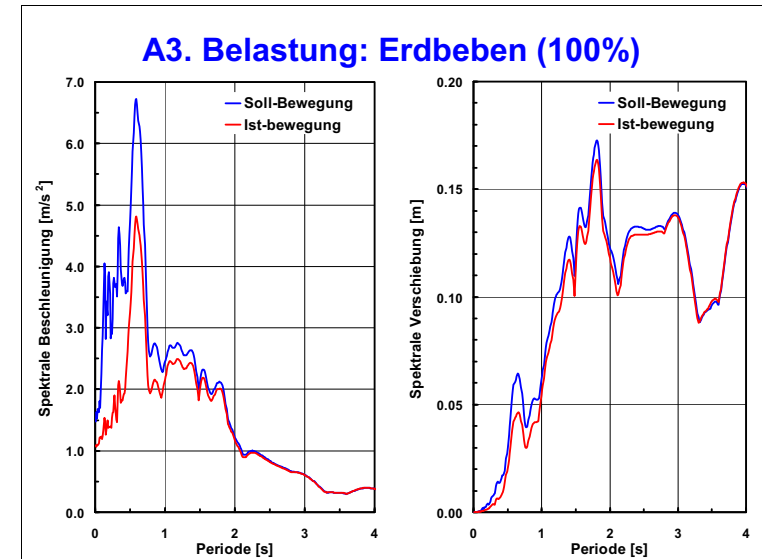
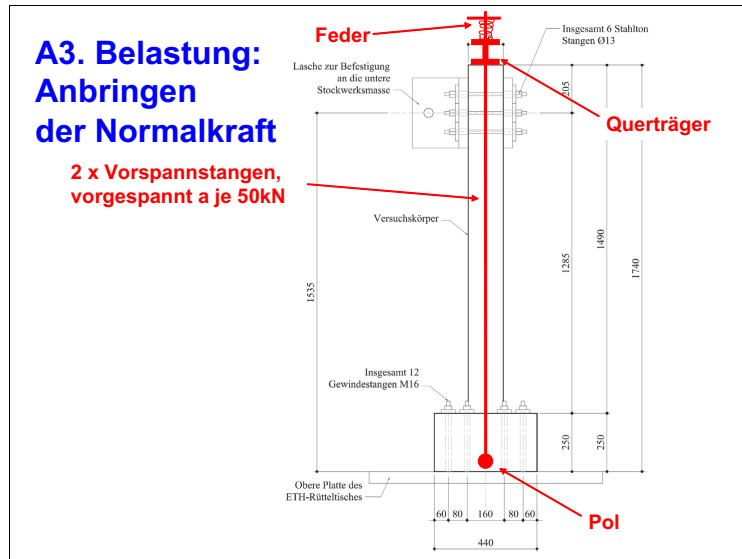


A2. Besten Dank!

- Katrin Beyer
- Christoph Gisler
- Tommi Jaggi
- Nikos Lavdas
- Juan Olavarria
- Wessam Rinawi
- Sandra Vecchi
- Loretta von der Tann
- Dominik Werne
- Ufuk Yazgan

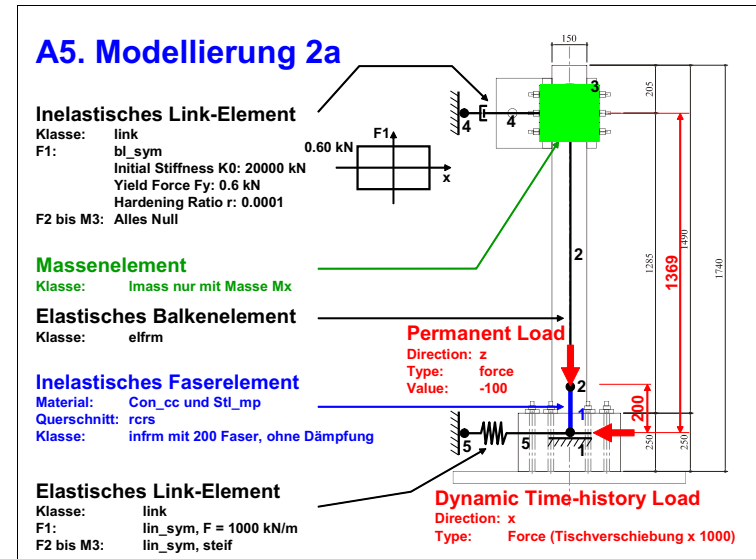
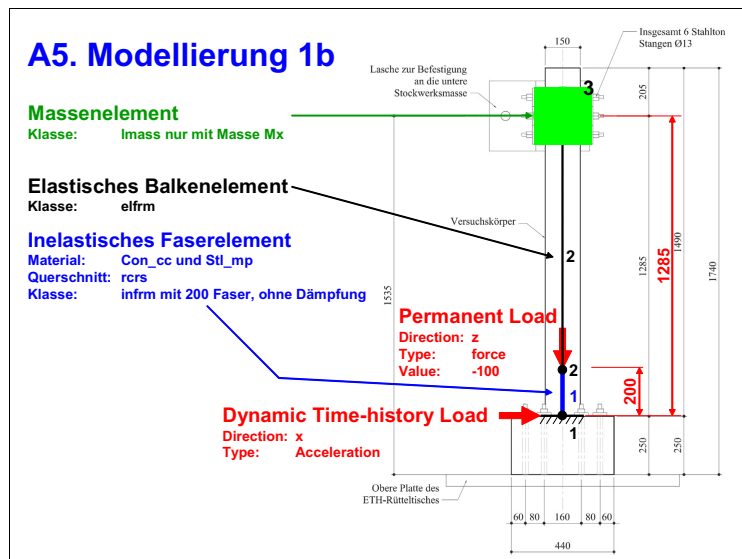
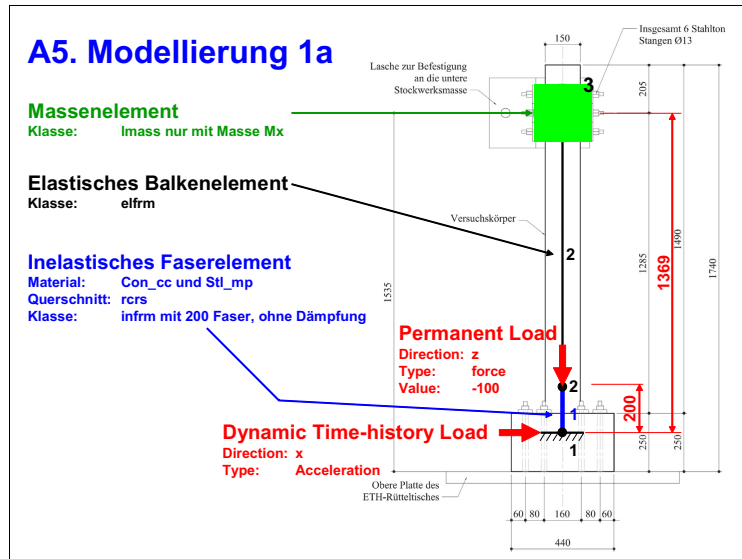
Rot: Studierenden, die den Versuchskörper im HS08 gebaut haben. Der gleiche Körper wird Heute nochmals getestet.





A4. Instrumentierung

- Relative Verschiebung:
 - $D_r = CH06 - CH03$
- Absolute Beschleunigung:
 - $A_{abs} = CH06$
 - $A_{abs} \sim CH12$
- Querkraft am Fuss
 - $V = CH09$
 - $V \sim CH12 * 12 \text{ Tonnen}$
- Moment am Fuss
 - $M = V * 1.285 \text{ m}$
- Verdrehung im PG
 - $V = (CH11 - CH10) / 0.2 \text{ m}$

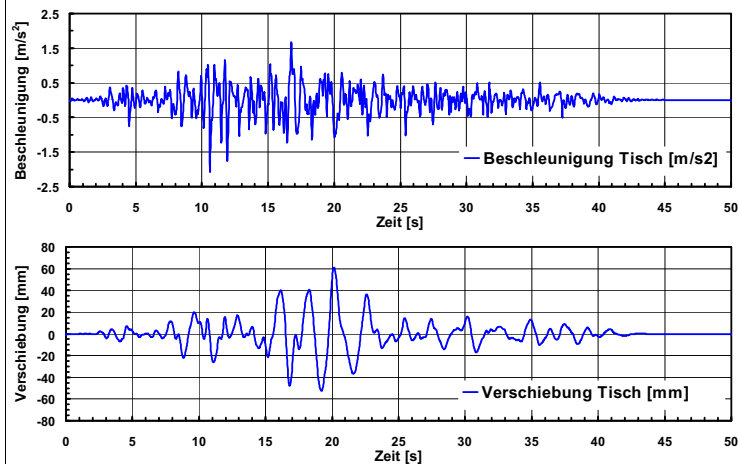


- ### A5. Weitere Modellierungen
- **Modellierung 2b**
 - Wie Modellierung 2a aber mit kürzeren Stabelementen (Analog wie 1b)
 - **Modellierung 3**
 - Modellierung des plastischen Gelenks der Stütze anhand von einem Link-Element
 - Ähnlich wie Frage 9, Übung 2 (siehe Datei "Rahmen_KP.spf")
 - Bemerkungen:
 - Die Problematik der Normalkraft entfällt, da bei den Link-Elementen das Axiale- und das Biege-Verhalten entkoppelt sind (Die Zeitverlaufsrechnung kann auch ohne Normalkraft durchgeführt werden).
 - Die Problematik der Länge der Stabelemente entfällt, da die „Strain-penetration“ bei den Link-Elementen pauschal berücksichtigt wird.

A6. Vorbeschädigung

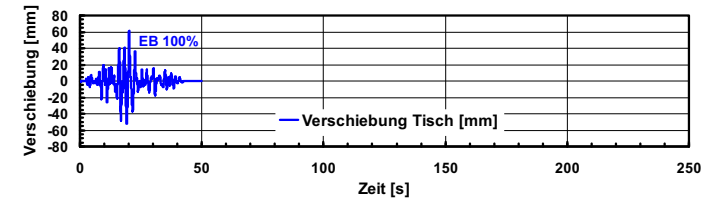
- **Geschichte**
 - Es wird der Versuchskörper vom HS08 weiter getestet
 - Er wurde bereits 4 Erdbeben unterworfen: 1x33%, 1x66%, 2x100%
- **Erdbeben HS08**
 - Die Bodenbewegung im HS09 und im HS08 ist unterschiedlich
- **Berücksichtigung und Einfluss der Vorbeschädigung**
 - Wie kann eine Vorbeschädigung bei numerischen Simulationen berücksichtigt werden und welche Konsequenzen auf das Kraft-Verformungs-Verhalten des Versuchskörpers hat sie?
- **Versuchsergebnisse HS08**
 - Der Versuchskörper hat beim 100% Erdbeben in 2008 eine Verschiebeduktilität von etwa 5 erreicht
- **Zustand des Versuchskörpers vor dem Versuch**
 - Abplatzungen der Betonüberdeckung im plastischen Gelenk

A6. Vorbeschädigung: Erdbeben HS08 (100%)

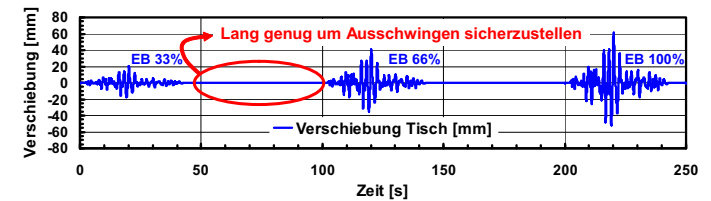


A6. Einfluss der Vorbeschädigung

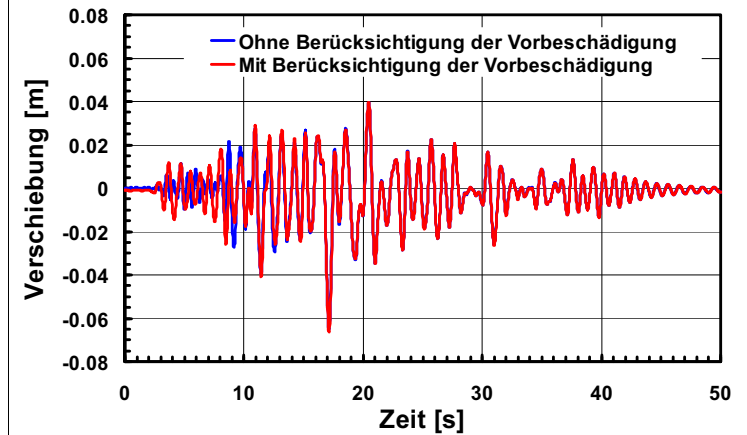
1) Variante a: Ohne Berücksichtigung der Vorbeschädigung



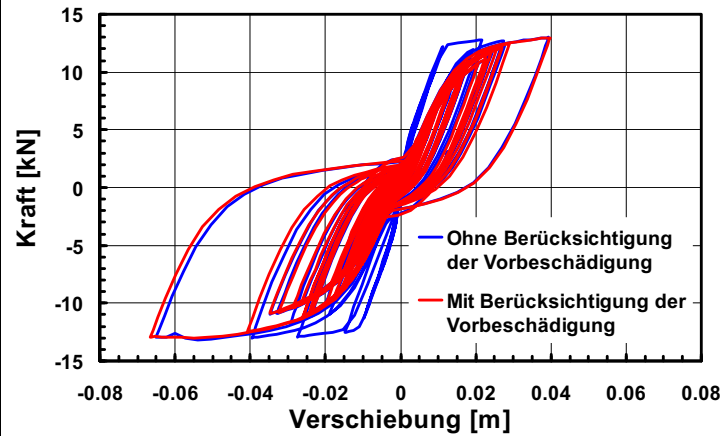
2) Variante b: Mit Berücksichtigung der Vorbeschädigung



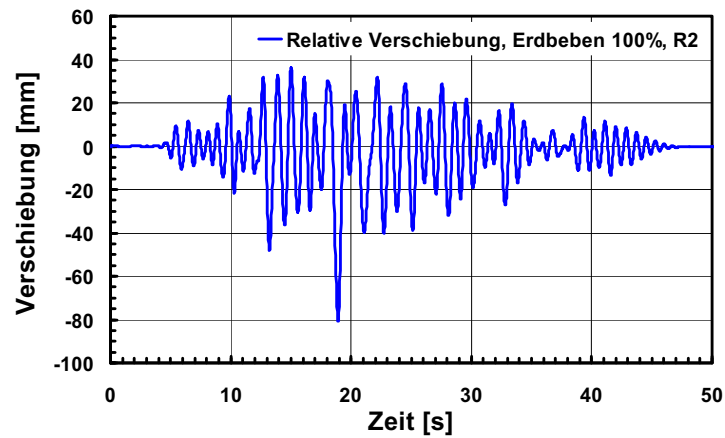
A6. Vergleich verschiedener Varianten



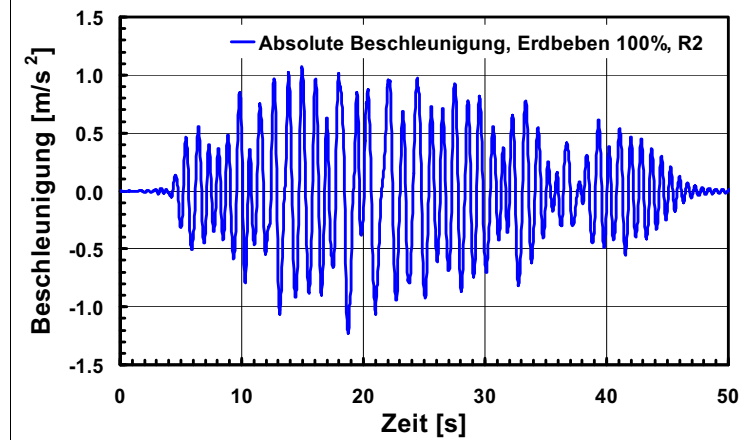
A6. Vergleich verschiedener Varianten



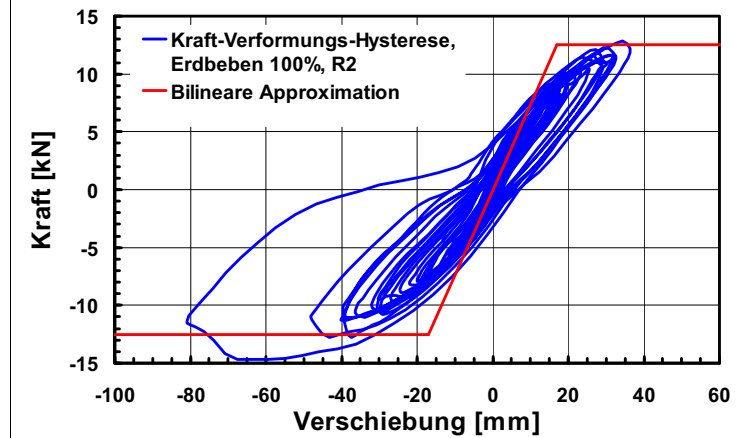
A6. Resultate HS08



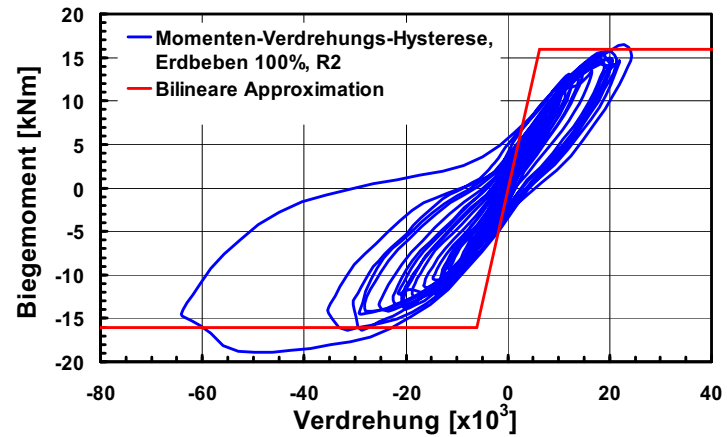
A6. Resultate HS08



A6. Resultate HS08



A6. Resultate HS08



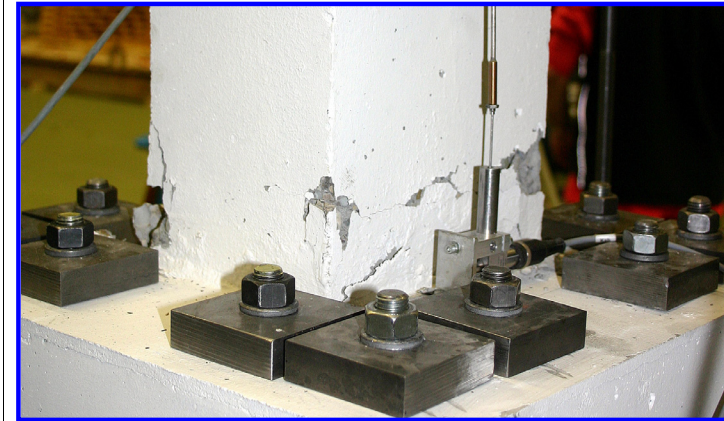
A6. Zustand des Versuchskörpers

Nordseite des plastischen Gelenks nach dem zweiten 100% Erdbeben im HS08



A6. Zustand des Versuchskörpers

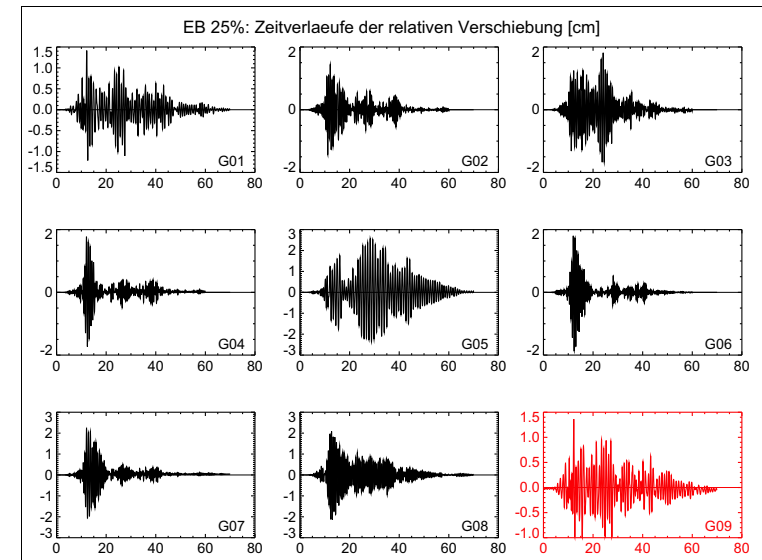
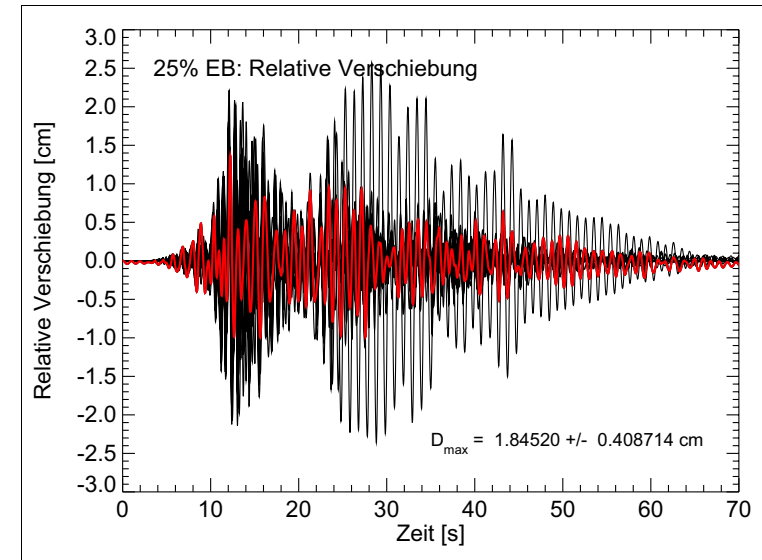
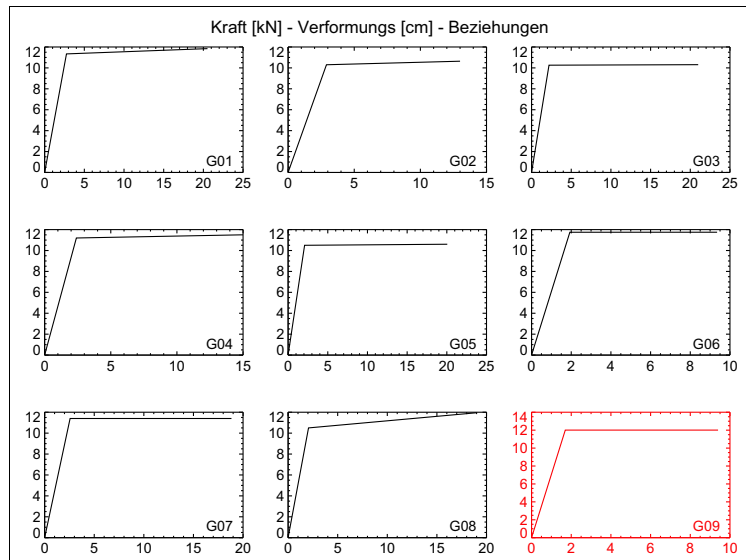
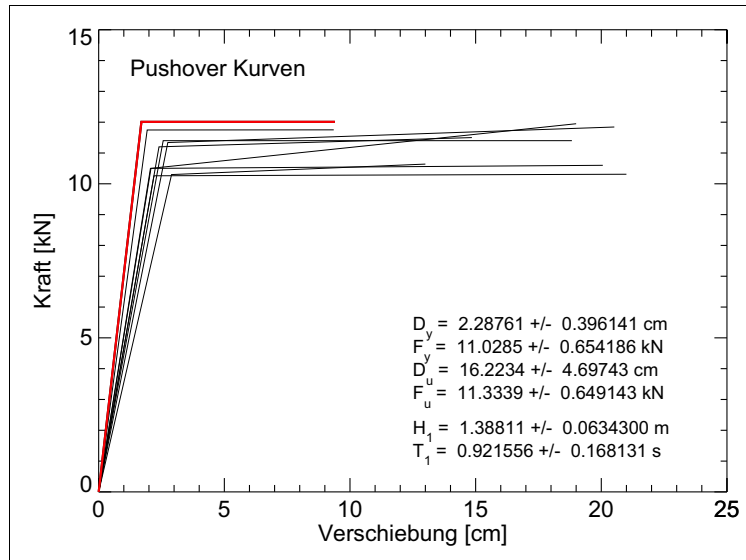
Südseite des plastischen Gelenks nach dem zweiten 100% Erdbeben im HS08

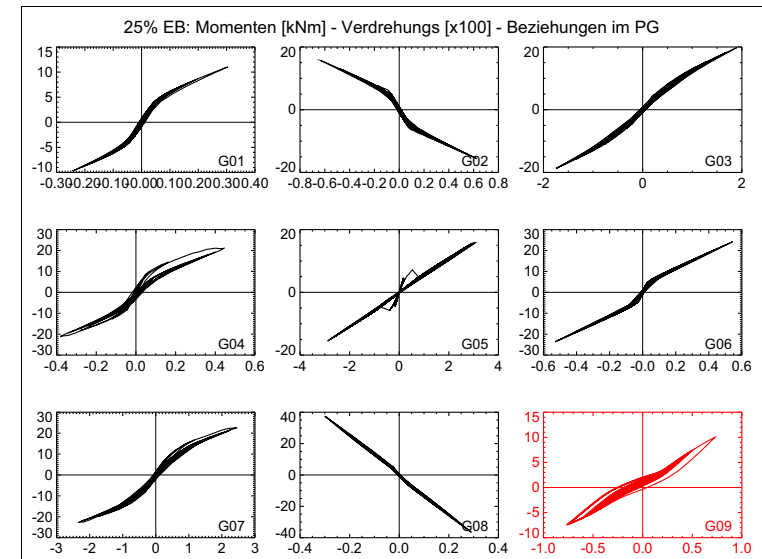
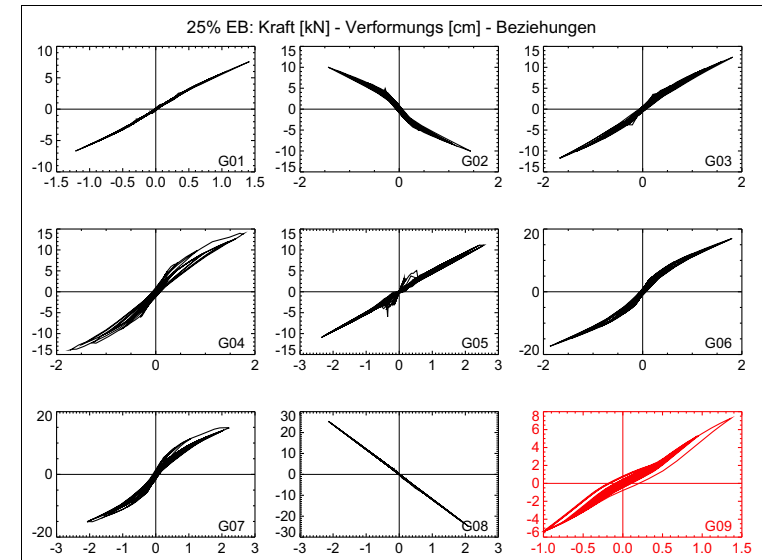
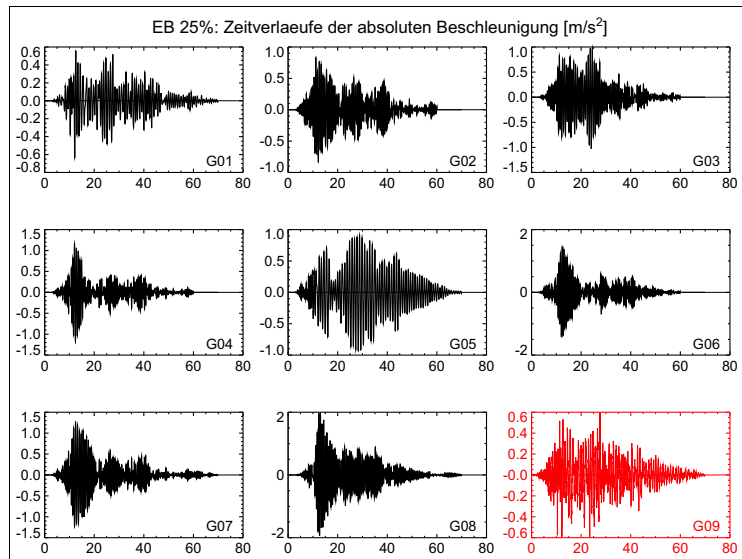
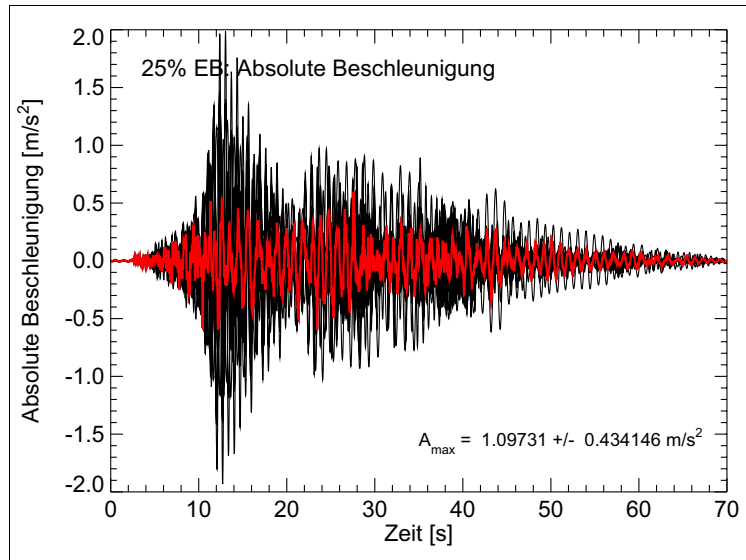


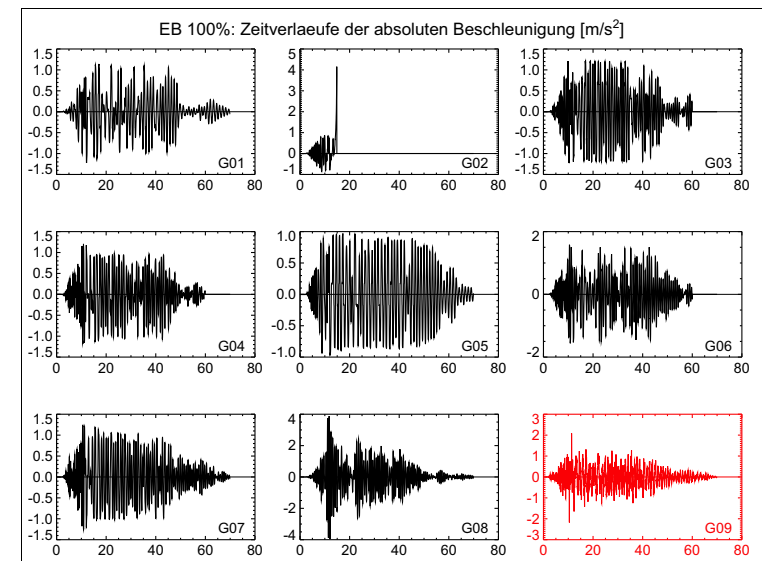
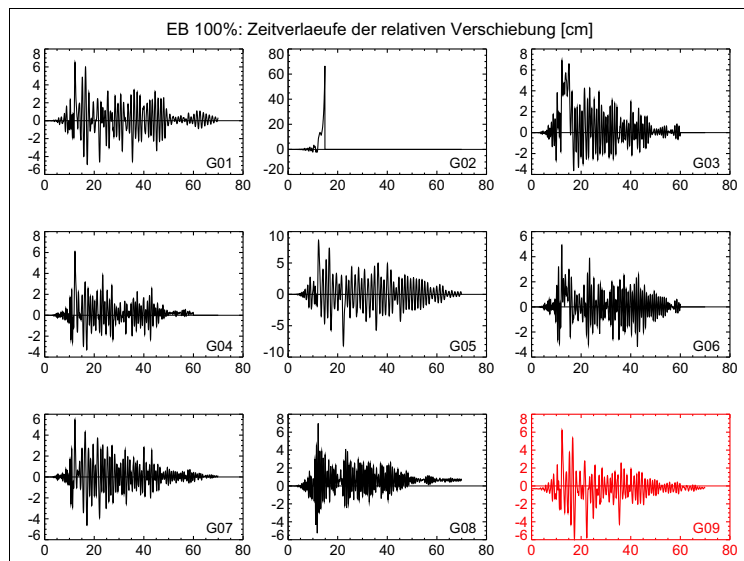
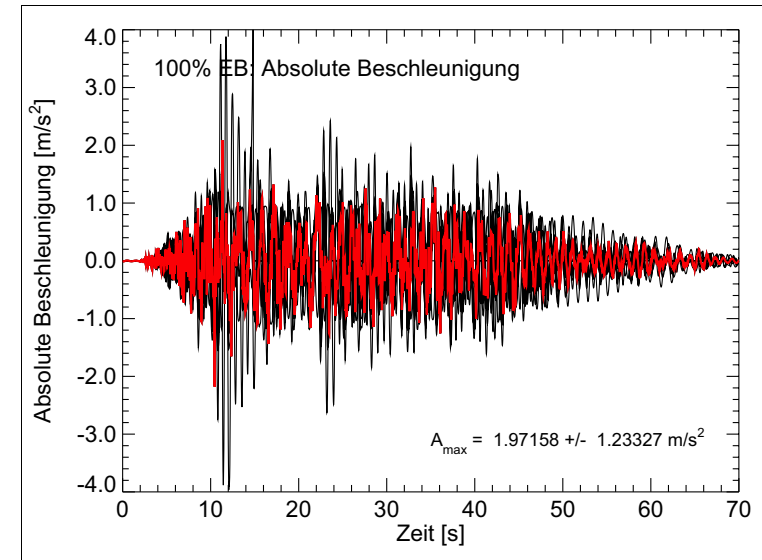
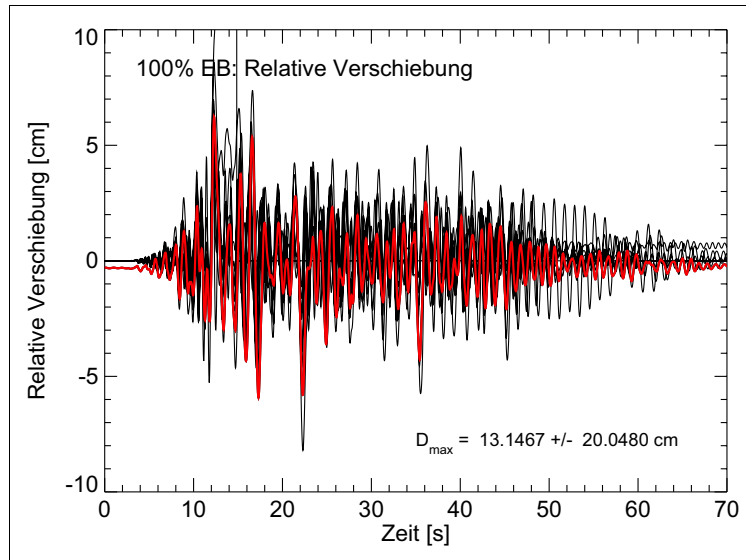
A7. Vorhersagen

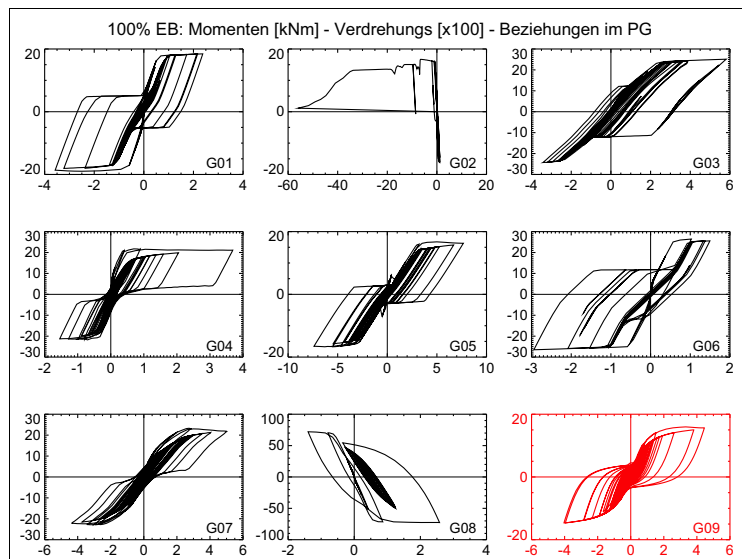
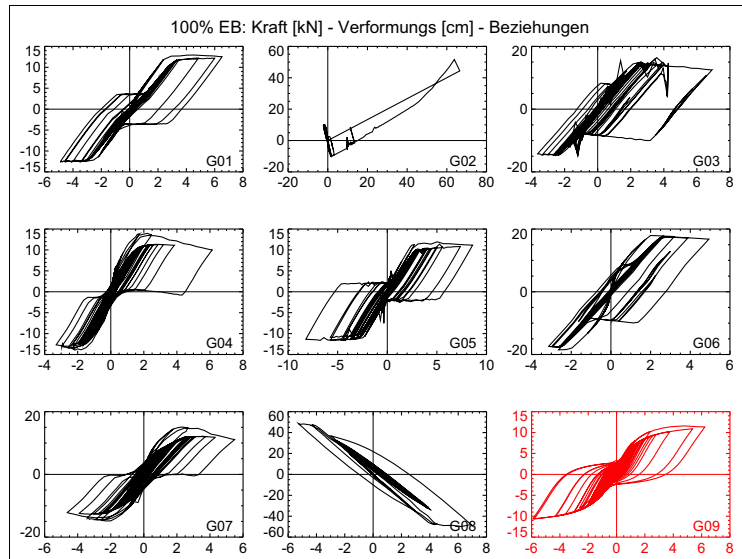
- 9 Dateien mit unterschiedlichen Resultaten wurden digital eingereicht.
- Die Gruppen mit unterschiedlichen Resultaten setzen sich aus folgenden Studierenden zusammen (letzte 3 Ziffern der Legi):

Gruppe	Studierende
G01	637
G02	713
G02	592
G03	552
G03	829
G04	224
G04	730
G05	323
G05	513
G06	018
G07	424
G08	049
G08	540
G09	007









A.8 Versuchsergebnisse

A.8.1 Allgemeine Bemerkungen

Im Rahmen des Demonstrationsversuchs wurde der Versuchskörper insgesamt 2 Zeitverläufen unterworfen. Die entsprechenden Resultate sind in den 2 Dateien

- EBII_Demonstrationsversuch_HS09_Resultate_25%.xls
- EBII_Demonstrationsversuch_HS09_Resultate_100%.xls

gespeichert. Die Dateien sind gleich aufgebaut und zwar wie folgt:

- Worksheet "Data_Gemessen": Enthält die gemessenen Daten ohne jegliche Modifizierung.
- Worksheet "Data_Berechnet": Enthält die Daten, die gemäss Abschnitt A.8.2 aus den gemessenen Daten bereinigt oder berechnet worden sind.
- Worksheets "KK" bis "BM": Enthalten Diagramme der gemessenen Daten. Es gibt ein Diagramm pro Messkanal.
- Worksheets "Diag_...": Enthalten Diagramme von ausgewählten bereinigten oder gemessenen Daten. Diese Diagramme können mit den numerischen Vorhersagen verglichen werden.

Die Prozedur zur Auswertung der Messdaten ist im nächsten Abschnitt kurz zusammengefasst. Die Messeinrichtung ist auf Seite A10 dargestellt.

A.8.2 Auswertung der Messdaten

Bevor mit der Auswertung der Messdaten angefangen werden kann, sollen folgenden Bemerkungen gemacht werden:

- Infolge von Problemen mit der Messeinrichtung sind die Messdaten vom Kanal CH01 "Kolbenkraft" sehr wahrscheinlich falsch und können bei der Auswertung nicht weiterverwendet werden.
- Die Kraftmessdose, die im Kanal CH09 "Kraft im Pendelstab" eingebaut ist, besitzt ein unterschiedliches Verhalten auf Zug und Druck. Die entsprechende Eichungskonstanten sind leider verloren gegangen und eine Neu-Kalibrierung der Kraftmessdose wäre sehr aufwändig. Aus diesem Grund können die Daten dieses Messkanals bei der Auswertung nur bedingt verwendet werden.

In Bezug auf die Auswertung der Messdaten, die im Worksheet "Data_Berechnet" der jeweiligen Resultatsdateien angegeben sind, ist folgendes zu bemerken:

- 1) Die "**Tischverschiebung**" entspricht Kanal CH03 und wurde bereinigt, indem die Anfangsverschiebung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.
- 2) Die "**Tischbeschleunigung**" entspricht Kanal CH04 und wurde bereinigt, indem die Anfangsbeschleunigung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.
- 3) Die "**Absolute Kopfverschiebung**" entspricht Kanal CH05 und wurde bereinigt, indem die Anfangsverschiebung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.
 - Diese Bereinigung ist eigentlich nicht ganz gerechtfertigt, da bereits vor dem Versuch "25% Erdbeben" der Versuchskörper durch die Ver-

suche im Herbstsemester 2008 vorbeschädigt war. Am Ende des letzten Versuches im HS08 war aber die bleibende relative Kopfverschiebung des Versuchskörper lediglich etwa 0.7 mm, was diese Näherung gerechtfertigen mag.

- 4) Die "**Relative Kopfverschiebung**" wird anhand von Gl. (A.1) bestimmt. Die "**Tischverschiebung**" und die "**Absolute Kopfverschiebung**" gehen aus den Punkten 1) und 3) hervor.

$$\text{Rel. Kopfverschiebung} = \text{Abs. Kopfverschiebung} - \text{Tischverschiebung} \quad (\text{A.1})$$

- 5) Die "**Absolute Kopfbeschleunigung**" wird gleich Kanal CH12 angenommen und wurde bereinigt, indem die Anfangsbeschleunigung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.

- Die so bestimmte "**Absolute Kopfbeschleunigung**" ist wegen der Verformungen im Pendelstab und seinen Verbindungen zu Masse und Stütze erst eine Näherung der tatsächlich vorhandenen absoluten Kopfbeschleunigung.
- Die "**Absolute Kopfbeschleunigung**" könnte auch anhand von Kanal CH06 bestimmt werden. Diesbezüglich ist es aber wichtig zu merken, dass die Beschleunigungsgeber, die zur Messung von Beschleunigungen zum Einsatz kamen, Beschleunigungen entlang ihren Längsachsen messen. Bei Kanal CH06 war der Beschleunigungsgeber so montiert, dass beim Versuchsbeginn seine Längsachse horizontal lag. Infolge relativer Auslenkung des Versuchskörpers während des Versuchs, ist der Stützenkopf einer Rotation unterworfen. Infolge dieser Rotation entsteht ein Winkel zwischen der Längsachse des Gebers und der Horizontalen. Sobald die Längsachse des Gebers nicht mehr horizontal ist, um die horizontale Beschleunigung

des Stützenkopfs zu bekommen, muss diese Rotation kompensiert werden. Die Rotation des Stützenkopfs wurde nicht direkt gemessen und könnte aus der Rotation im plastischen Gelenk sowie aus der relativen Auslenkung des Stützenkopfs relativ genau geschätzt werden.

- 6) Die **“Querkraft am Fuss”** wird anhand von Gl. (A.2) bestimmt. Die **“Absolute Kopfbeschleunigung”** geht aus Punkt 5) hervor.

$$\text{Querkraft am Fuss} = \text{Absolute Kopfbeschleunigung} \cdot 12t \quad (\text{A.2})$$

- Die so bestimmte **“Querkraft am Fuss”** berücksichtigt nicht die Dämpfungskräfte (Siehe Gl. (A.3) und (A.4)) und ist deshalb erst eine Näherung der tatsächlich vorhandenen Querkraft am Fuss des Versuchskörpers. Eine bessere Schätzung der Querkraft am Fuss des Versuchskörpers hätte anhand von Kanal CH09 vorgenommen werden können (siehe Seite A27).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (\text{A.3})$$

$$\begin{aligned} \text{Querkraft am Fuss} &= kx = m(\ddot{x} - \ddot{x}_g) - c\dot{x} \\ &= (\text{Absolute Kopfbeschleunigung} \cdot 12t) - c\dot{x} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

- 7) Die **“Verdrehung im PG”** wird anhand von Gl. (A.5) bestimmt.

$$\text{Verdrehung im PG} = \frac{(\text{Vertikal_Weg_Sued} - \text{Vertikal_Weg_Nord})}{200 \text{ mm}} \quad (\text{A.5})$$

- **“Vertikal_Weg_Sued”** entspricht Kanal CH10 und wurde bereinigt, indem die Anfangsverschiebung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.

- **“Vertikal_Weg_Nord”** entspricht Kanal CH11 und wurde bereinigt, indem die Anfangsverschiebung zur Zeit $t = 0$ von allen gemessenen Daten abgezogen wurde.
- Diese Bereinigung der vertikalen Weggeber ist eigentlich nicht ganz gerechtfertigt, da bereits vor dem Versuch “25% Erdbeben” war der Versuchskörper durch die Versuche im Herbstsemester 2008 vorbeschädigt. Die bleibenden Verformungen im plastischen Gelenk am Ende des letzten Versuchs im HS08 waren aber klein und diese Näherung scheint deshalb gerechtfertigt.
- Die 200mm entsprechen dem horizontalen Abstand der zwei Weggeber.

- 8) Der **“Moment am Fuss”** wird anhand von Gl. (A.6) bestimmt. Die **“Querkraft am Fuss”** geht aus Punkt 6) hervor.

$$\text{Moment am Fuss} = \text{Querkraft am Fuss} \cdot 1.285\text{m} \quad (\text{A.6})$$

- 9) Die **“Ist-Normalkraft”** wird anhand von Gl. (A.7) bestimmt.

$$\text{Ist-Normalkraft} = \text{Normalkraft_OST} + \text{Normalkraft_WEST} \quad (\text{A.7})$$

- **“Normalkraft_OST”** entspricht Kanal CH07.
- **“Normalkraft_WEST”** entspricht Kanal CH08.

- 10) Die **“Soll-Normalkraft”** ist konstant und beträgt 100 kN.

A.8.3 Kurze Bemerkungen zu den Versuchsergebnissen

Die Resultate des Demonstrationsversuchs werden in der Folge kurz kommentiert und zum Teil mit Handberechnungen verglichen.

Handberechnung Demonstrationsversuch (Final)

1) Dynamische Eigenschaften des unbeschädigten Versuchskörpers

b = 210 mm	fc' = 40 MPa
l = 150 mm	E = 36342 MPa
h = 1285 mm	
Ig = 5.91E+07 mm ⁴	α = 0.24
EI _g = 2.15E+12 Nmm ²	EI = 5.15E+11 Nmm ²
k = 728 kN/m	
m = 12 t	
f = 1.24 Hz	T = 0.81 s
	Te = 0.40 s

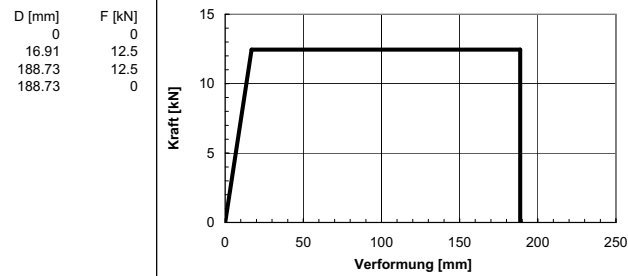
2) Seismischer Bedarf des unbeschädigten Versuchskörpers (100% der Tischbewegung)

Sa = 3.31 m/s ²	Viskose Dämpfung = 0.025
Sd = 54.53 mm	
Vel = 39.70 kN	
Mel = 51.01 kNm	

3) Inelastische Stützenkapazität

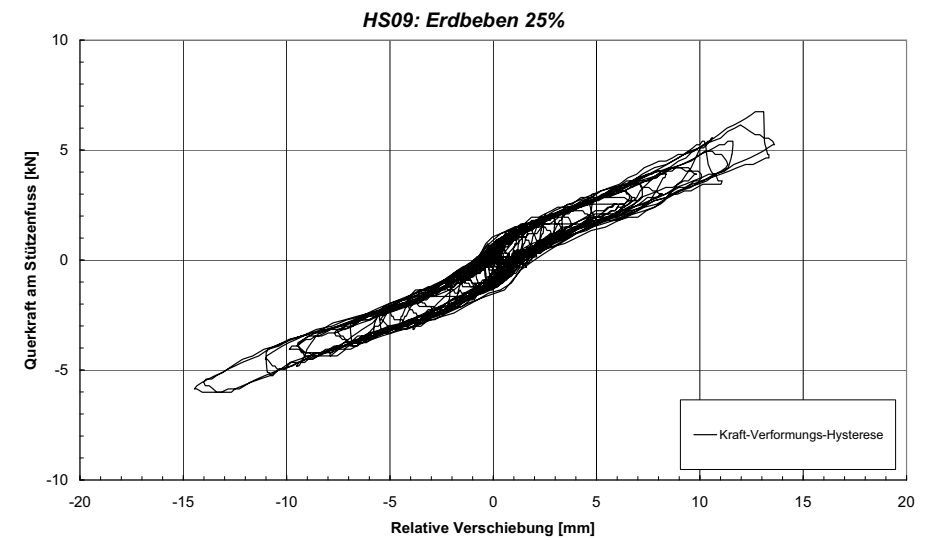
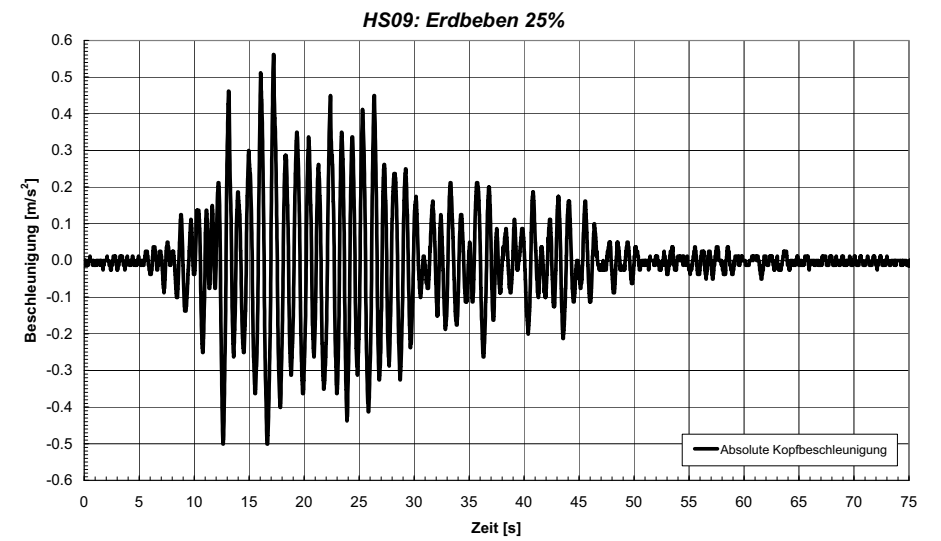
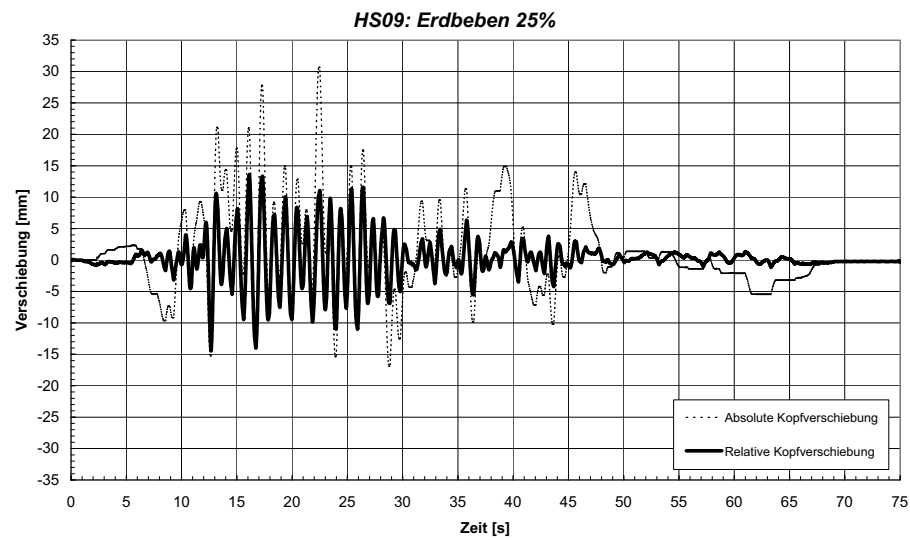
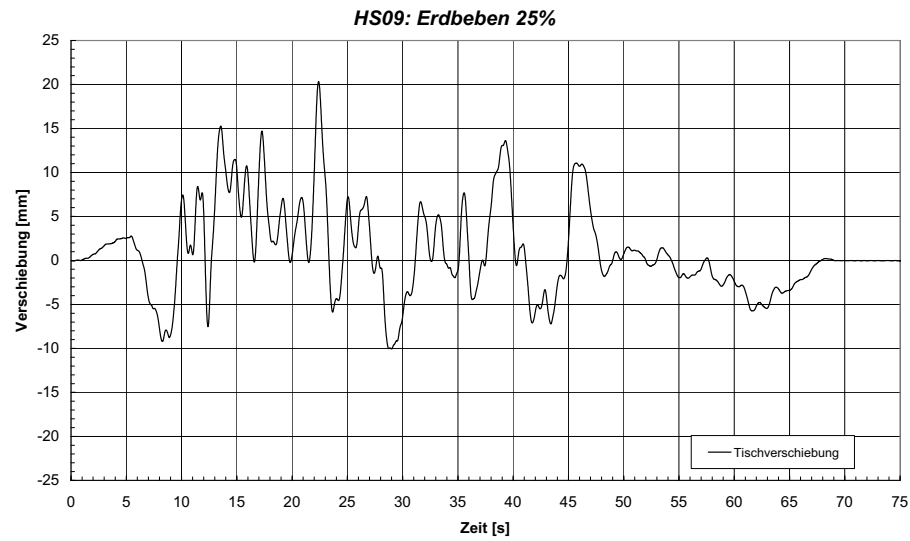
φy' = 27.85 km ⁻¹	φy = 30.73 km ⁻¹	Eleff = 521 kNm ²
My' = 14.5 kNm		EI _g = 2146 kNm ²
Mn = 16 kNm	Lpl = 192.208 mm	α = 0.24
φu = 782.6 km ⁻¹	Δy = 16.91 mm	Fy = 12.5 kN
Mu = 16 kNm	Δu = 188.73 mm	Fu = 12.5 kN
	μΔ (cap) = 11.16	
fy = 508 MPa	μΔ (dem) = 3.22	q = 3.19
di = 8 mm		
N = 100 kN	n = 0.08	

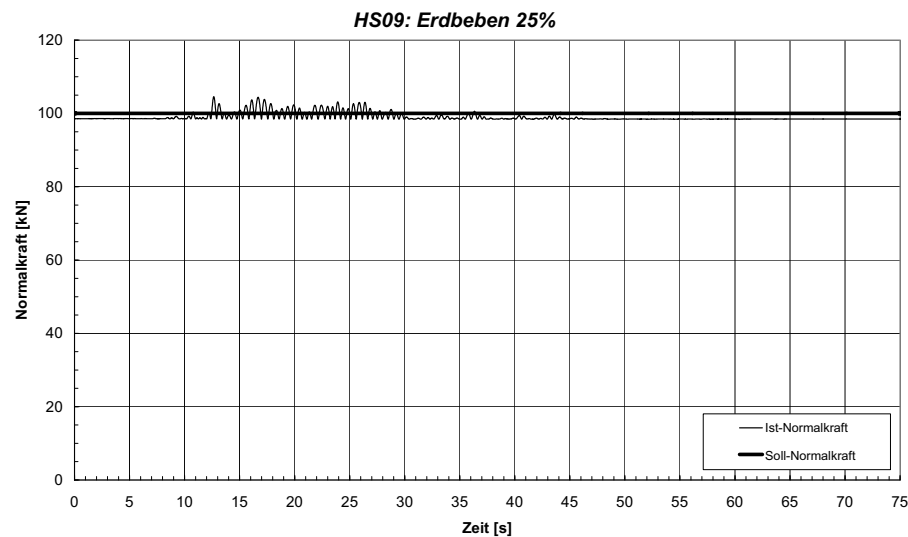
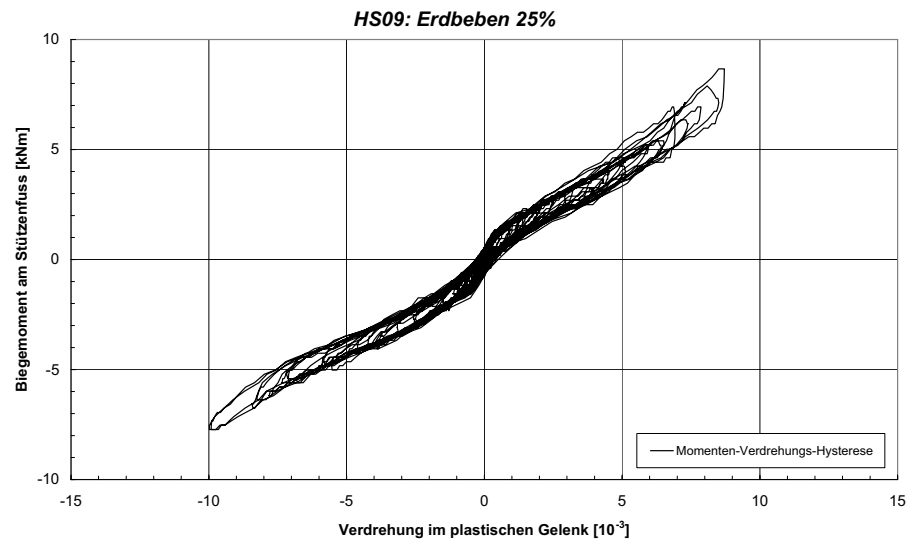
4) Bilineare approximation der Pushover Kurve



Versuch mit 25% Erdbeben

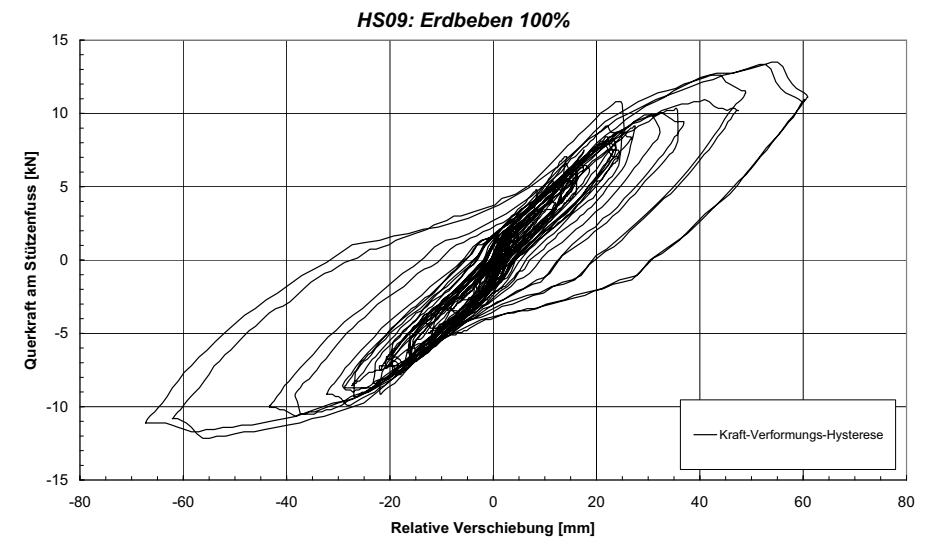
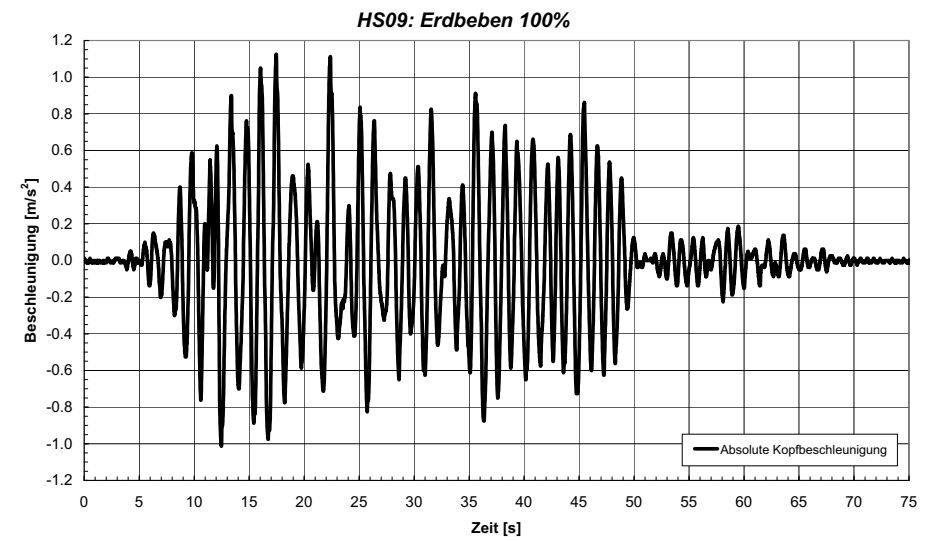
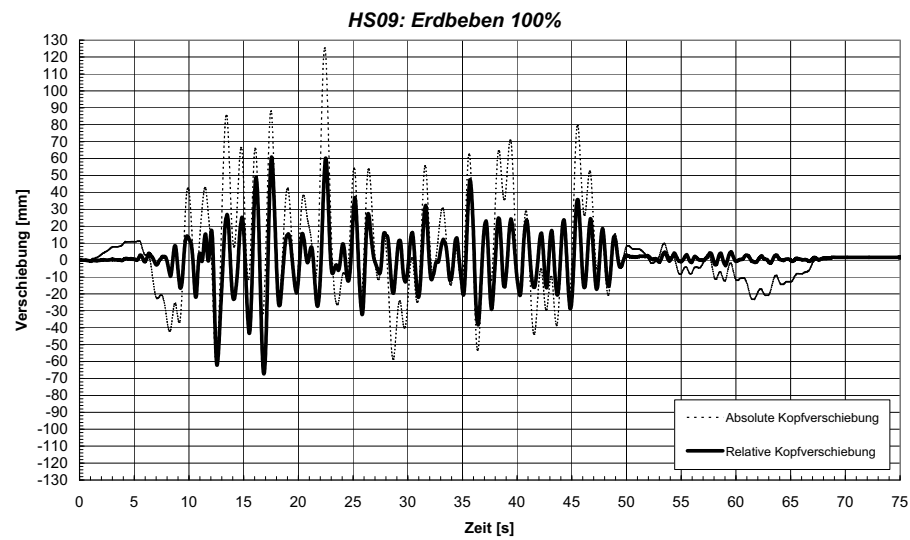
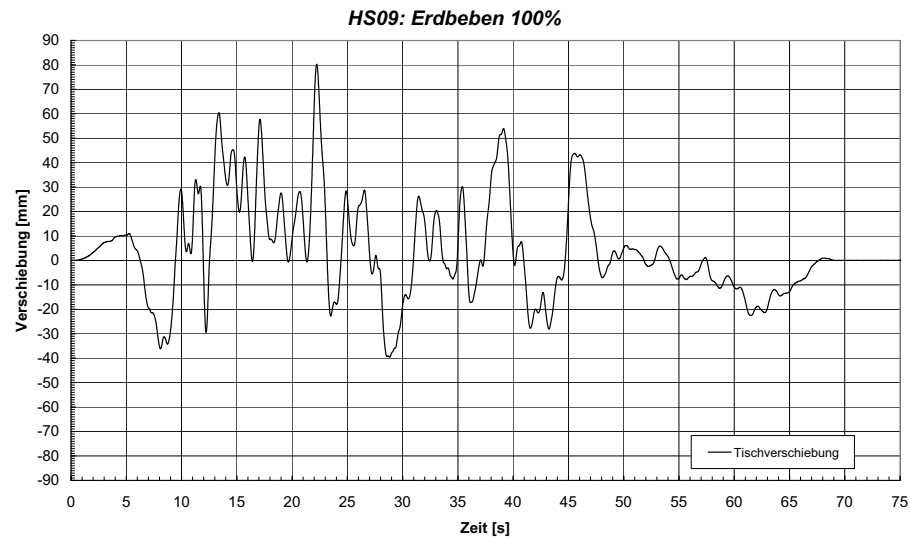
- Der Betrag der gemessenen maximalen relativen Verschiebung ist 14.5 mm. Dies entspricht einer Verschiebeduktilität μ_{Δ} von etwa 0.9. Der Versuchskörper hat somit einer relativer Verschiebung erreicht, die kleiner als die Fließverschiebung des unbeschädigten Versuchskörpers war. Aus diesem Grund ist es durch diesen Versuch zu keiner wesentlichen zusätzlichen Beschädigung des Versuchskörper gekommen.
- Diese erste Beobachtung wird durch die Hysterese der Querkraft am Stützenfuss zur relativen Verschiebung bestätigt.
 - Die Fläche der Hysteresekurve ist klein, was eine geringe Energie-dissipation, typisch für weitgehend elastische Systeme, andeutet.
 - Die Gerade $[(-\Delta_y, -F_y), (\Delta_y, F_y)]$ ist steiler als einer linearen Approximation der gemessenen Hysterese. In Anbetracht der Vorschädigung des Versuchskörper war ein solches Verhalten zu erwarten (Siehe Diagramm oben auf Seite A15).
 - Für kleine relative Verschiebungen ist das Verhalten des Versuchskörpers steifer. Dies weil die Normalkraft schafft, die vorhandenen Risse mindestens zum Teil wieder zu schliessen.
- Am Anfang und am Ende des Versuchs betrug die Normalkraft in etwa 98.5 kN, was kleiner war als die erwünschten 100 kN. Es ist aber zu bemerken, dass während des Versuchs die Normalkraft ein Maximum von 104.5 kN erreicht hat. Diese Erhöhung der Normalkraft ist auf die nicht zwangungsfreie Verlängerung des Versuchskörpers zurückzuführen.

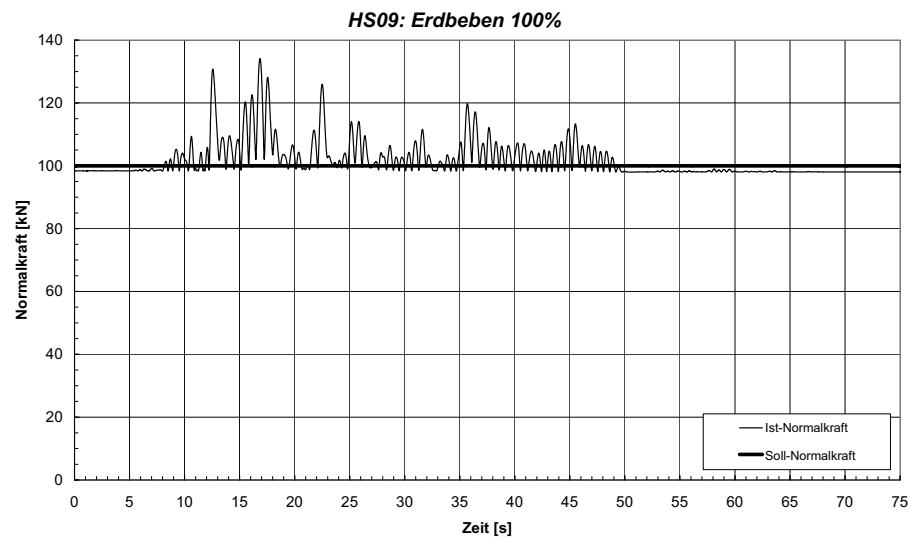
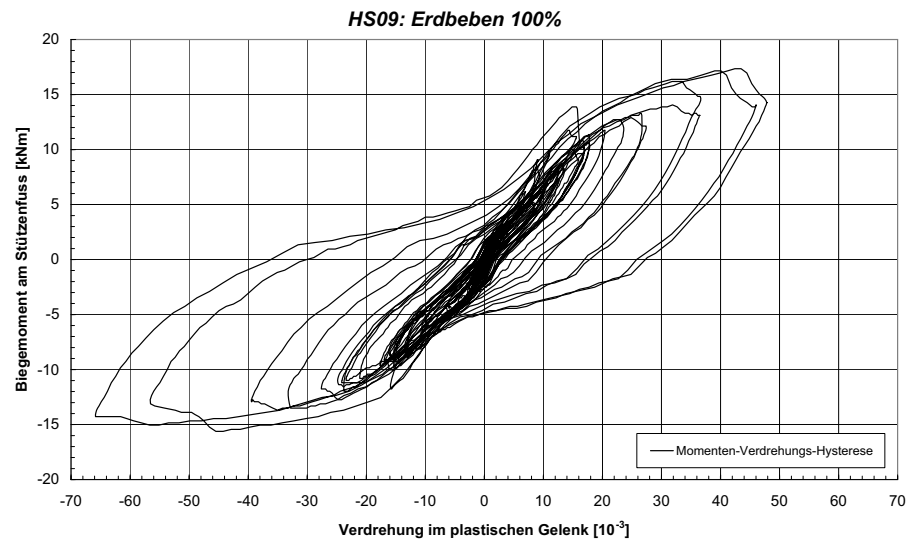




Versuch mit 100% Erdbeben

- Der Betrag der gemessenen maximalen relativen Verschiebung ist 67.3 mm. Dies entspricht einer Verschiebeduktilität μ_{Δ} von etwa 4.0. Eine solche Verschiebeduktilität ist bereits recht gross und ist durchhaus mit den beobachteten Zunahmen der Abplatzungen der Betonüberdeckung im plastischen Bereich kompatibel.
- Die maximal gemessene Normalkraft beträgt 134.1 kN (grössere axiale Verlängerung als beim Versuch "25% Erdbeben" infolge grösserer inelastischer Verschiebungsamplitude), was grösser ist, als der Sollwert von 100 kN. Diese Erhöhung der Normalkraft kann zum Teil erklären, warum das maximal "gemessene" Biegemoment (17.4 kNm) etwas grösser ist als der handberechnete Biege widerstand (16.0 kN, siehe Seite A31). Dies trotz der Tatsache, dass die maximale relative Verschiebung, die während dieses Versuches gemessen wurde (67.3 mm), kleiner als die maximale relative Verschiebung ist, die während der Versuche im HS08 gemessen wurde (89.0 mm). Andere Gründe, die diesen Unterschied erklären könnten, sind die höhere Dehngeschwindigkeit der Bewehrung während des Versuches und die Vernachlässigung der Dämpfungskräfte bei der Berechnung der Querkraft am Wandfuss.





Plastischer Gelenk nach dem 100% Erdbeben

