

Vorschlag für einen plastischen Hysteresedämpfer für Aussteifungsverbände aus Stahlrundrohren

Alois Neulichedl

Ingenieurbüro Neulichedl & Partner, Schafferstrasse 37, I-39012 Meran

ZUSAMMENFASSUNG: Aussteifungsverbände in Stahl mit zentrischen Anschlüssen stellen unter statischen Lasten ein sehr effizientes Aussteifungssystem dar und werden deshalb auch sehr häufig eingesetzt. Für zyklische Beanspruchungen, wie Erdbebeneinwirkungen, sind solche Verbände in der üblichen Ausführung nicht so effizient wie z.B. Aussteifungsverbände mit exzentrischen Anschlüssen oder Aussteifungen mit Rahmentragwerken. In der vorliegenden Arbeit wird über die Entwicklung berichtet, wie bei Aussteifungsverbänden aus Stahlrundrohren mit zentrischen Anschlüssen durch den Einbau je eines plastischen Hysteresedämpfers an den Enden der Verbandsdiagonale ein Aussteifungsverband erhalten wird, welcher sehr gute Verhaltenseigenschaften unter Erdbebeneinwirkungen aufweist und mit Aussteifungsverbänden mit exzentrischen Anschlüssen vergleichbar ist.

1. EINLEITUNG

Stahl ist an und für sich ein sehr duktiler Material und somit grundsätzlich sehr geeignet für Tragwerke unter Erdbebeneinwirkungen. Für die Aussteifung gegen Horizontalbeanspruchungen werden im Stahlbau hauptsächlich die vier folgenden Systemtypen bzw. Kombinationen daraus verwendet:

- a. Rahmenstrukturen
- b. Fachwerkverbände mit zentrischen Anschlüssen
- c. Fachwerkverbände mit exzentrischen Anschlüssen
- d. Einfache Kragstrukturen

Die Fachwerkverbände mit zentrischen Anschlüssen stellen unter nicht zyklischen Beanspruchungen eine sehr einfache, effiziente und damit sehr häufig eingesetzte Aussteifungsart dar. Unter zyklischen Beanspruchungen, wie der Erdbebenbeanspruchung, sind allgemein die Aussteifungsverbände mit zentrischen Anschlüssen nicht so effizient. Während die Zugdiagonalen die dissipativen Zonen darstellen, fallen die Druckdiagonalen meist vorzeitig aus (Knickversagen) und es verbleibt nur mehr eine Resttragfähigkeit, somit ist die Duktilität geringer als z.B. bei den Systemtypen a) und c).

In diesem Beitrag wird über die Entwicklung eines plastischen Hysteresedämpfers für Aussteifungsverbände aus Stahlrundrohren mit zentrischen Anschlüssen berichtet. Der Hysteresedämpfer übernimmt in einem solchen Verband die Funktion der

dissipativen Zone und es wird ein ähnlich günstiges Systemverhalten erreicht, wie bei Fachwerkverbänden mit exzentrischen Anschlüssen.

Für Aussteifungsverbände in Stahl mit sich kreuzenden, schlanken Diagonalen (Neulichedl, 2006) und für Aussteifungsverbände mit offenen Stahlprofilen (Vayas und Thanopoulos, 2006) wurden im Prinzip ähnliche Systeme bereits vorgestellt.

2. BESCHREIBUNG DES PLASTISCHEN HYSTERESEDÄMPFERS

Bei Stahlstrukturen bietet sich an, zur Energiedissipation die plastischen Hystereseigenschaften des Stahls zu nutzen. Bei schlanken Bauteilen mit wechselnder, axialer Zug/Druck-Beanspruchung ist ein Problem, dass bei Zugbeanspruchung die plastischen Eigenschaften des Stahls voll genutzt werden können, bei Druckbeanspruchung hingegen ein vorzeitiges Stabilitätsversagen eintritt. Bei wechselnder Momentenbeanspruchung (M^+/M^-) hingegen, weisen Bauteile mit symmetrischen, duktilen Querschnitten gleiches Verhalten in beiden Beanspruchungsrichtungen auf und die plastischen Eigenschaften des Stahls können stets voll genutzt werden. Dieser Sachverhalt legt nahe, die plastischen Hystereseigenschaften des Stahls in einem biegebeanspruchten Bauteil zu nutzen. Nachteil der bis in die plastischen Bereiche genutzten biegebeanspruchten Bauteile ist, dass sie relativ weich sind. Im vorliegenden Fall wurde deshalb versucht ein System zu wählen, welches in der Anfangsphase (unter Gebrauchslasten) relativ steif ist und erst bei außergewöhnlichen Beanspruchungen (z.B. Erdbeben) ein weiches Verhalten mit großem plastischem Verformungsvermögen aufweist. Dieses Verhalten wurde, inspiriert vom System der Tellerfeder, bei dem in Abbildung 1b dargestellten Systems gefunden.

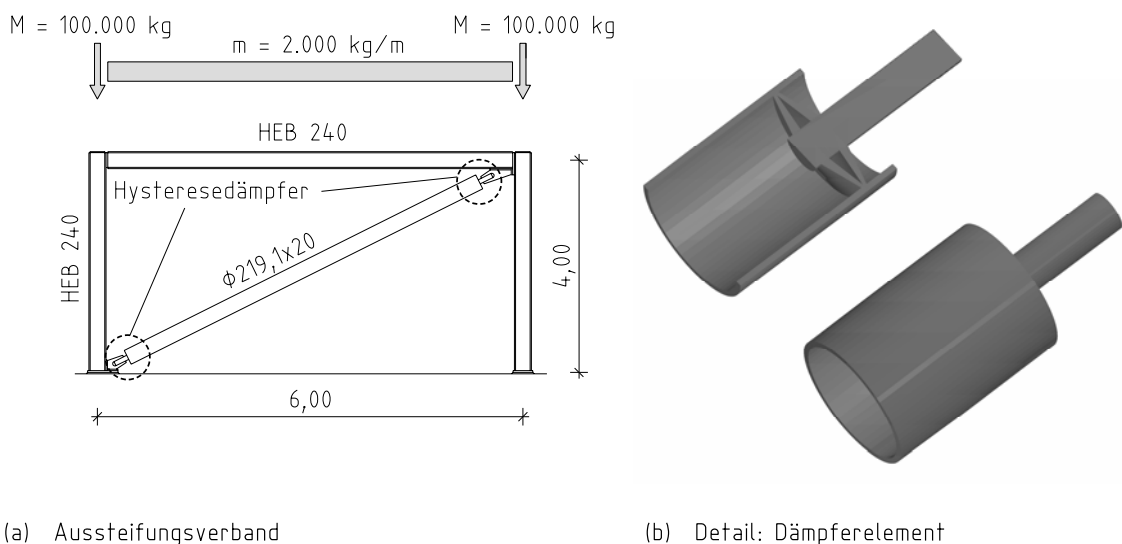


Abbildung 1: Vorgeschlagener Hysteresedämpfer

Es handelt sich hierbei um zwei kegelförmige Ringschalen mit sich nach außen verjüngender Schalenstärke und biegesteifem Anschluss sowohl am zentralen Rundstab, wie auch am außen liegenden Rohrquerschnitt. Durch die Kegelschalenform trägt das System zunächst einen hohen Anteil der Kräfte über die relativ steife Membranwirkung ab. Erst in einer zweiten Phase kommt die Biegewirkung mehr zum Tragen und das

System geht im Extremfall in die ebene Kreisringplatte über. Die sich verjüngende Schalenstärke wurde gewählt, um möglichst ein gleichzeitiges Plastizieren an beiden Einspannstellen zu erreichen.

Der hier vorgestellte Dämpfer ist also ein mechanischer Dämpfer, er gehört zur Gruppe der plastischen Hysteresedämpfer und funktioniert ohne Energiezufuhr (passive Tragwerkskontrolle). Es handelt sich also um ein weitgehend wartungsfreies Bauteil. Infolge der hohen Qualitätsansprüche an die Schweißverbindungen der beiden Ringschalen an den Rohrquerschnitt der Diagonale, bzw. den zentralen Rundstab, sollte dieses Bauteil von einem spezialisierten Betrieb mit entsprechenden Qualitätskontrollen zur Gütesicherung gefertigt werden.

Exemplarisch wird im vorliegenden Beitrag das Systemverhalten eines Dämpfers mit den Abmessungen aus Abbildung 2, eingebaut in einem Aussteifungsverband nach Abbildung 1a. untersucht.

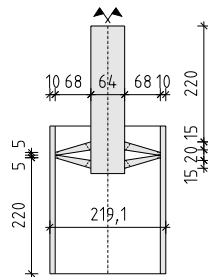
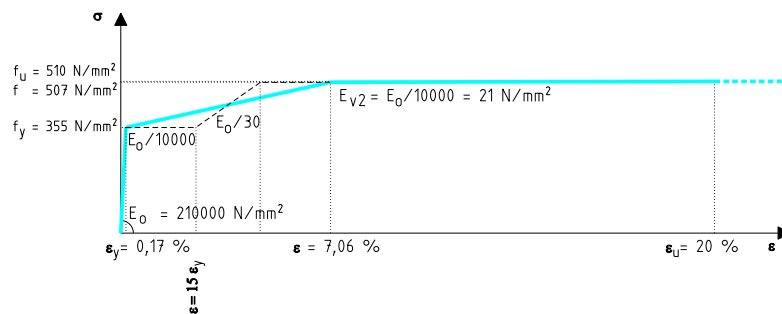


Abbildung 2: Abmessungen des Dämpferelements

Für alle Systemkomponenten von Dämpfer und Verband wurde das Material S355 J2G3 nach EN 10025 angenommen. Für die Berechnung wurden die folgenden Materialcharakteristiken nach Abbildung 3 angesetzt.

(a) Spannungs-Dehnungs-Linie für Stahl S 355 (mit Materialverfestigung)



(b) Spannungs-Dehnungs-Linie für Stahl S 355 (ohne Materialverfestigung)

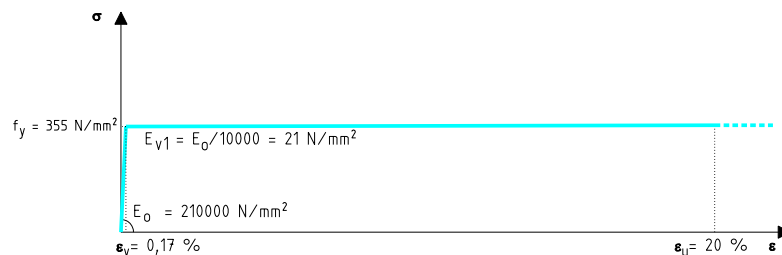


Abbildung 3: Materialcharakteristiken

3. TRAGVERHALTEN DES DÄMPFERS UNTER MONOTONER UND ZYKLISCHER LAST

3.1. RECHENMODELL

Die rechnerischen Untersuchungen wurden mit einem Rechenmodell nach der FE-Methode geführt. Verwendet wurde dafür das Programmsystem ANSYS ® - Version 8.1.

Das Dämpferelement wurde durch ein 2-dimensionales rotationssymmetrisches Modell abgebildet (Abbildung 4). Dazu wurde der Elementtyp PLANE 42 verwendet.

Sämtliche Berechnungen wurden unter Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearitäten aus „großen Verformungen“ und der Materialnichtlinearitäten durchgeführt.

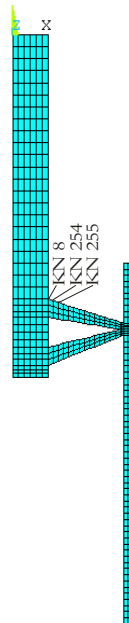


Abbildung 4: Verwendetes Rechenmodell

3.2. UNTERSUCHTE BEANSPRUCHUNGEN AM DÄMPFERELEMENT

Untersucht werden sollte das Systemverhalten hauptsächlich im nichtlinearen, plastischen Bereich und dabei nicht nur für eine monoton anwachsende, einseitige Beanspruchung, sondern auch für eine zyklische Wechselbeanspruchung. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wurde aber außer Acht gelassen.

Das Rohr wurde unten gehalten und die Last wurde am oberen Rundstabende verformungsgesteuert aufgebracht.

Zunächst wurde das Modell unter monotoner Laststeigerung ohne Berücksichtigung der Materialverfestigung (Materialcharakteristiken nach Abbildung 3b) untersucht. Daraus wurde die fiktive elastische Systemverformung δ_y und die Fließlast F_y ermittelt.

Dann wurde das Modell unter monotoner Laststeigerung mit Berücksichtigung der Materialverfestigung (Materialcharakteristiken nach Abbildung 3a) untersucht. Daraus erhält man die Kapazitätskurve des einzelnen Dämpferelements.

Schließlich wurde das Modell mit Berücksichtigung der Materialverfestigung noch unter zyklischen Wechselbeanspruchungen untersucht. Dabei wurden einmal steigende Verformungszyklen aufgebracht (± 5 mm; ± 10 mm; ± 15 mm; ± 20 mm) und in einer zweiten Berechnung 5 konstante Verformungszyklen mit ± 15 mm untersucht.

3.3. ERGEBNISSE DER RECHNERISCHEN UNTERSUCHUNGEN AM DÄMPFERELEMENT

Abbildung 5 zeigt die Last-Verformungskurve unter monoton ansteigender Last am Modell ohne Berücksichtigung der Materialverfestigung. Klar zu erkennen ist daraus auch der geometrisch nichtlineare Effekt des Systems (Durchschlagen der Tellerfeder).

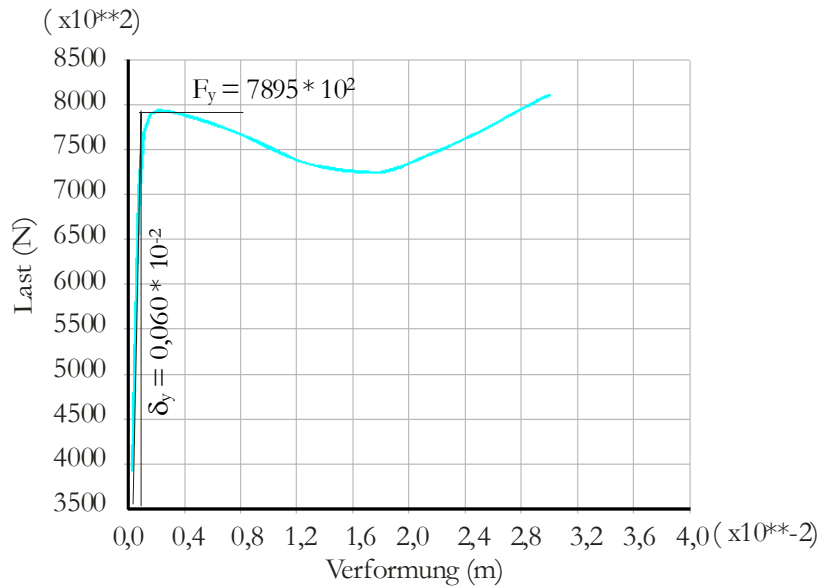


Abbildung 5: Last-Verformung bei ideal elastischem – ideal plastischem Material

Abbildung 6 zeigt die Last-Verformungskurve unter monoton ansteigender Last am Modell mit Berücksichtigung der Materialverfestigung. Die Entwicklung der Spannungen mit der klaren Ausbildung von plastischen Zonen ist in Abbildung 7 zu verfolgen.

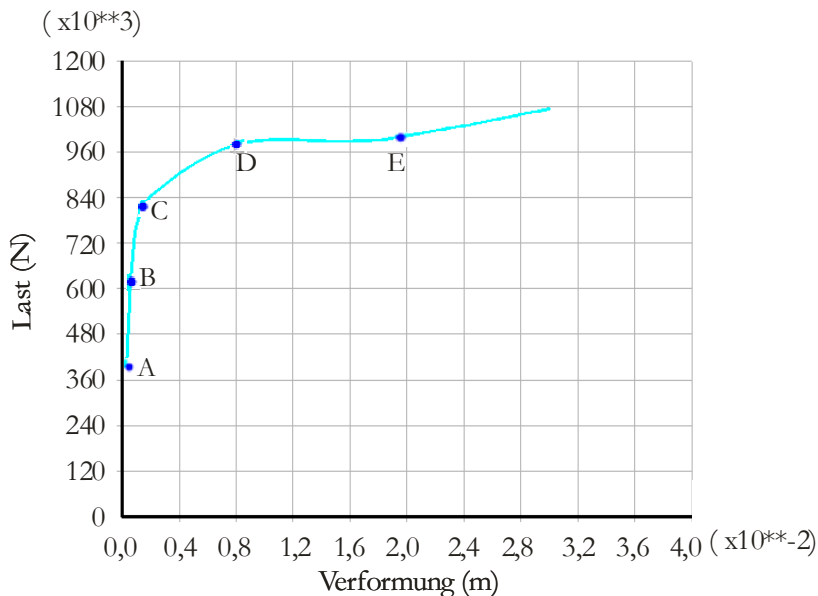


Abbildung 6: Last-Verformung mit Berücksichtigung der Materialverfestigung

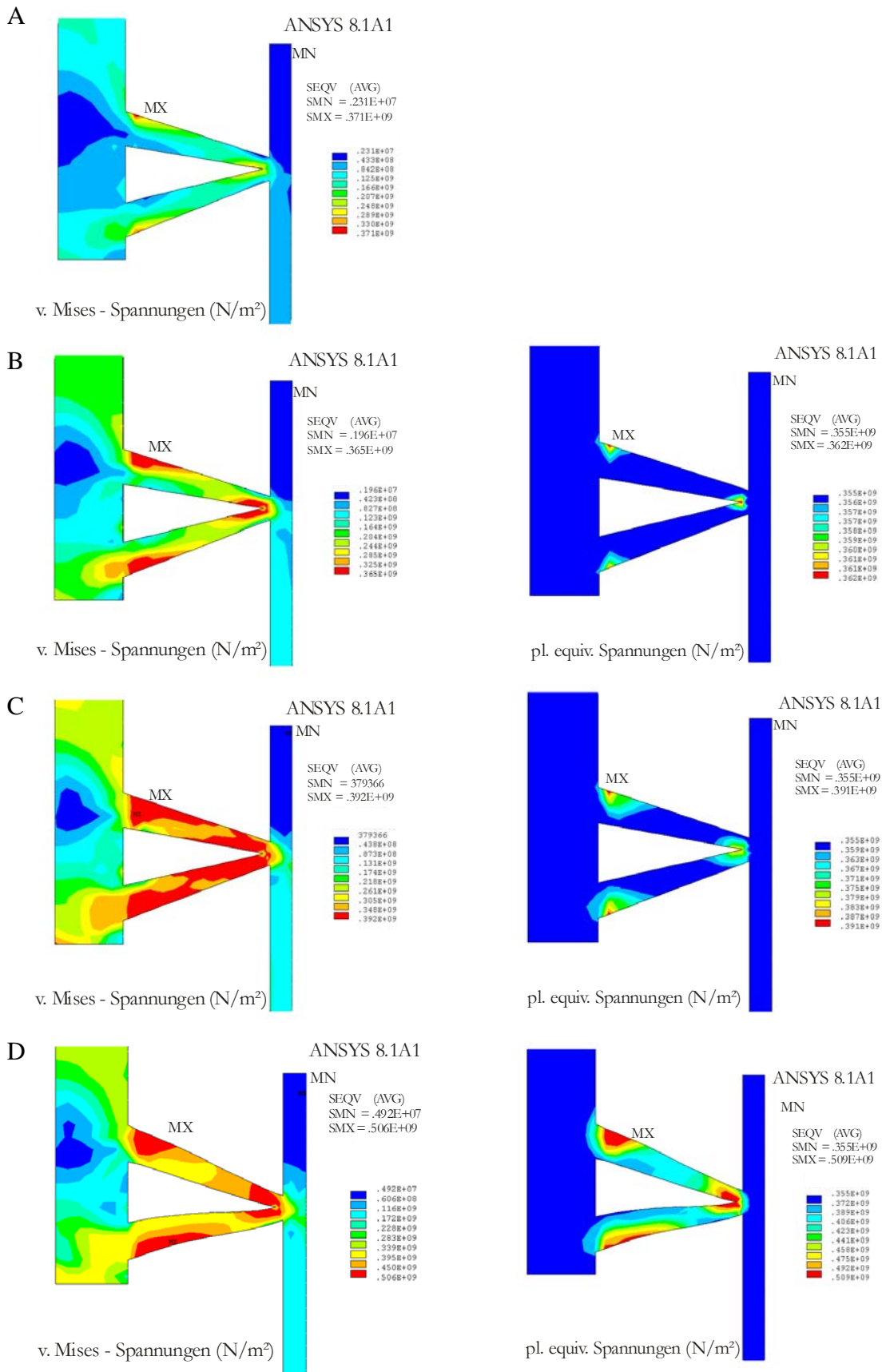
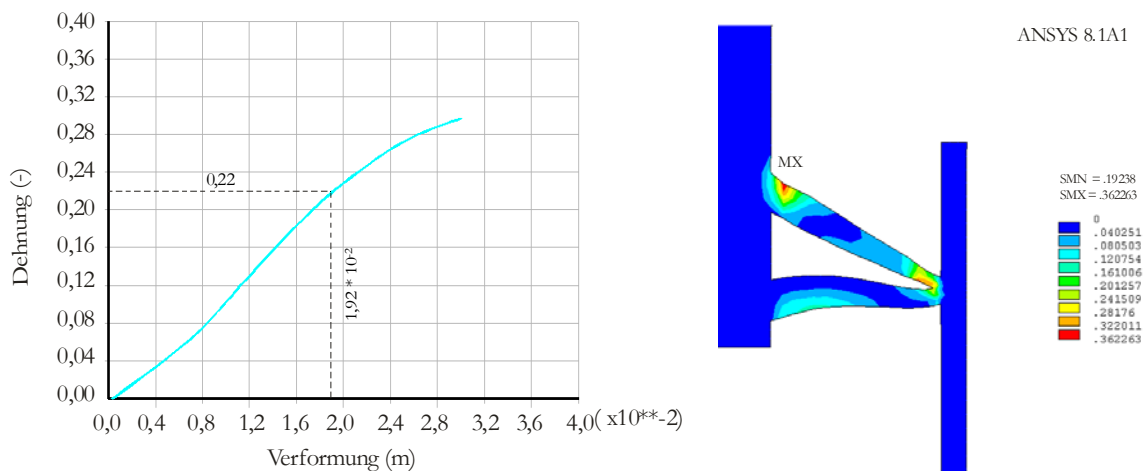


Abbildung 7: Spannungsentwicklung (N/m²)

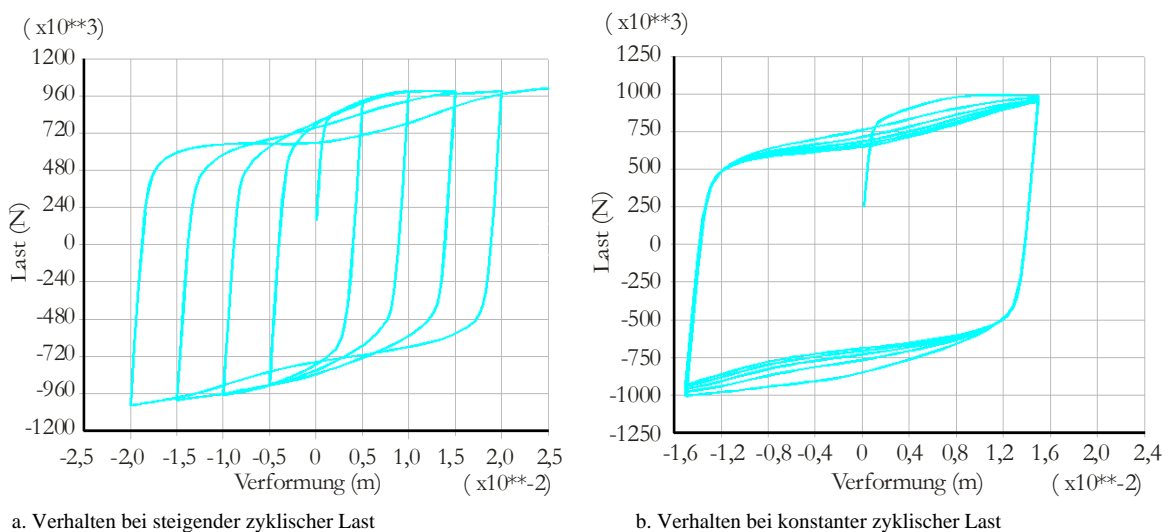
Rein rechnerisch nicht eindeutig festgelegt werden kann, wann das Bauteil versagt, also seine Verformungskapazität erreicht hat. Da momentan noch keine Bauteilversuche für eine Kalibrierung des Rechenmodells vorliegen, wird nach Meinung des Verfassers auf der sicheren Seite liegend, folgendes Versagenskriterium angenommen: bei Erreichen einer Dehnung von 22 % als Mittelwert von drei benachbarten Knotenpunkten, d.h. im vorliegenden Fall als Mittelwert auf einer Länge von rund 14 mm. Wie Abbildung 8 zeigt, konzentriert sich im Rechenmodell die maximale Dehnung in einem Knotenpunkt und klingt dann rasch ab. Der Mittelpunkt wird über die Knoten 8, 254 und 255 gebildet und erreicht bei einer Bauteil-Verformung von 19,2 mm den kritischen Wert von 22 % Dehnung.

Das günstige Systemverhalten unter zyklischer Belastung zeigt Abbildung 9. Daraus ist das sehr gute dissipative Verhalten des vorgeschlagenen Dämpfers mit einer fülligen Hysteresekurve zu erkennen.



a. Entwicklung der Dehnungen (Mittelwert aus Knoten 8, 254, 255) b. Dehnungsverteilung bei einer Verformung von 19,2 mm

Abbildung 8: Dehnungsentwicklung



a. Verhalten bei steigender zyklischer Last

b. Verhalten bei konstanter zyklischer Last

Abbildung 9: Last-Verformungs-Verhalten unter zyklischen Lasten

4. TRAGVERHALTEN DES DÄMPFERS IM AUSSTEIFUNGSVERBAND

4.1. UNTERSUCHTES BEISPIEL

Als Beispiel wurde der in Abbildung 1a dargestellte Aussteifungsverband untersucht. Die Riegel-Stützen-Verbindungen wurden gelenkig angenommen. Die Hauptteile der Verformungen ergeben sich dabei aus den Verformungen in der Diagonale. Das System Dämpfer - Rohr 219,1 x 20 mm - Dämpfer kann als drei in Serie geschaltete Federn betrachtet und durch eine wirkungs-äquivalente Diagonale ersetzt werden.

4.2. ERGEBNISSE DER RECHNERISCHEN UNTERSUCHUNGEN

Aus der Modalanalyse ergibt sich die dominante Grundfrequenz von $f = 11,20$ Hz, bzw. die Schwingperiode von $T = 0,089$ s für die Horizontalschwingung. Nach elastischer Berechnung wird die idealisierte Fließlast von $F_y = 789,5$ kN in der Diagonale von einer äußeren Horizontallast von $F'_y = 656,9$ kN am Verband geweckt, wobei sich eine Horizontalverformung von $\delta'_y = 0,0037$ m einstellt. Beim Erreichen der kritischen Verformung von 19,2 mm im Dämpferelement ergibt sich eine Horizontalverformung am Verband von $\delta'_u = 0,049$ m mit einer zugehörigen Horizontallast von $F'_u = 829,8$ kN, wie aus der Kapazitätskurve in Abbildung 10 ersichtlich.

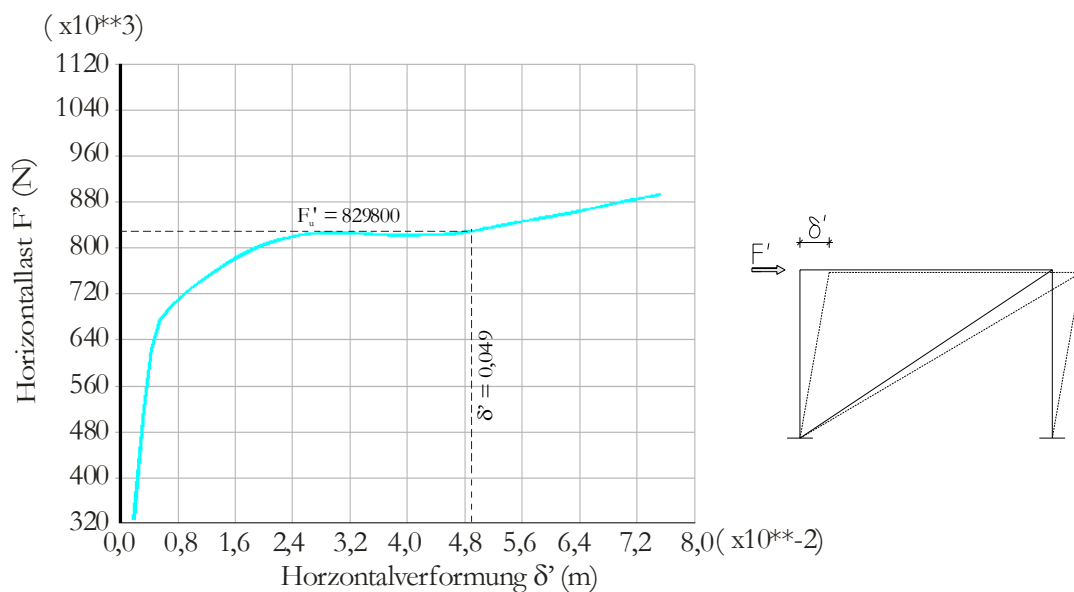


Abbildung 10: Kapazitätskurve Verband

Damit errechnet sich eine Verschiebungsduktilität von $\mu_\delta = \delta'_u / \delta'_y = 13,24$. Nach Bachmann (2002) kann der Verhaltensbeiwert $q = F_{el} / F_y$ bei Systemen mit Frequenzen von $2 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ mit guter Näherung mit dem „Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit“ ermittelt werden. Damit ergibt sich

$$q = \sqrt{2 \mu_\delta - 1} \quad (1)$$

und im hier behandelten Beispiel erhält man damit $q = 5,0$.

Der Verhaltensbeiwert kann auch, wie von Mistler (2005) beschrieben, über die Kapazitätsspektrumsmethode ermittelt werden. Im vorliegenden Beispiel wurde das Antwortspektrum für die Bodenklasse A aus der derzeit gültigen italienischen Erdbebennorm (O.P.C.M. 20.03.2003, n. 3274) der Berechnung zu Grunde gelegt. Der Einfluss der Energiedissipation im nichtlinearen Bereich der Last-Verformungskurve infolge hysteretischen Verhaltens findet durch die Ermittlung einer äquivalenten elastischen Dämpfung und einer entsprechenden Abminderung des elastischen Antwortspektrums Berücksichtigung.

$$\xi_{\text{eff}} = \xi_0 + \xi_{\text{eq}} = \xi_0 + 1 / (4 \pi) * E_D / E_{S_0} \quad (2)$$

- ξ_0 viskose Bauwerksdämpfung
- ξ_{eq} äquivalente viskose Dämpfung infolge hysteretischen Verhaltens
- E_D Hystereseenergie
- E_{S_0} maximale Dehnungsenergie

Die viskose Bauwerksdämpfung ξ_0 wurde auf Grund der Anhaltswerte in der Literatur (Petersen, 1996) mit 1 % angenommen. Die Hystereseenergie E_D und die maximale Dehnungsenergie E_{S_0} wurden direkt aus den errechneten Hysteresekurven bestimmt. Damit lässt sich das abgeminderte Antwortspektrum $S_{e(T)}$ zur Charakterisierung der seismischen Beanspruchung ermitteln. Über einen interaktiven Prozess, wo die Bodenbeschleunigung a_g so lange gesteigert wird, bis sich das abgeminderte Antwortspektrum und das Kapazitätsspektrum gerade noch schneiden, wird der maximale Grundwert der Bodenbeschleunigung $a_{g,\text{max}}$ ermittelt (Abbildung 11). Im vorliegenden Beispiel ergibt sich ein $a_{g,\text{max}} = 6,1 \text{ m/s}^2$ und die dazugehörige Horizontalkraft am Verband von $F_u' = 829,8 \text{ kN}$.

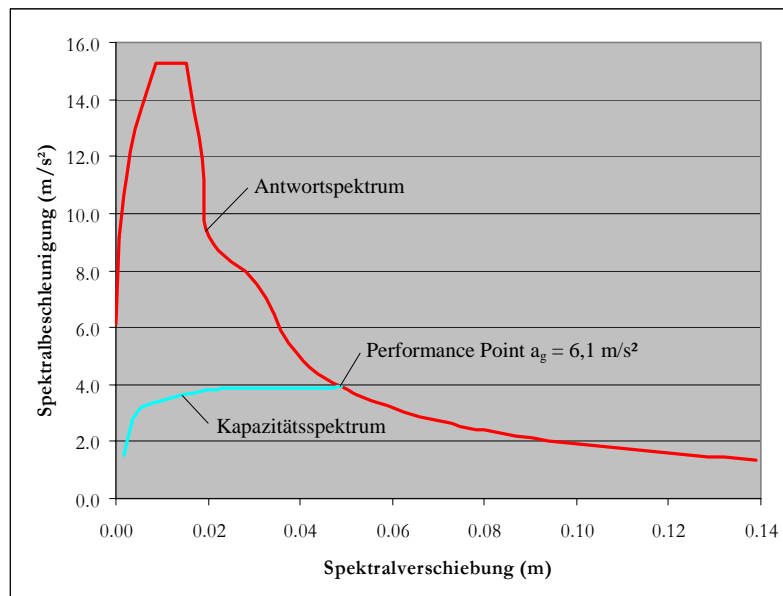


Abbildung 11: Bestimmung des Performance Point für das max. aufnehmbare Erdbeben

Der Verhaltensbeiwert ist mit $q = F_{\text{el}} / F_u$ definiert, wobei F_{el} die Erdbebenkraft bei linear-elastischem Strukturverhalten darstellt und F_u die seismische Kraft des realen

Bauwerks unter Berücksichtigung aller Nichtlinearitäten. Im vorliegenden Beispiel ergibt sich für $T = 0,089$ s über das elastische Antwortspektrum $F_{el}' = S_{e(T)} M_{Tot} = 2\,444,1$ kN und damit $q = 2,95$. Mit $T = 0,089$ s $< T_B = 0,15$ s befinden wir uns aber in einem Bereich des Antwortspektrums, wo für die Bestimmung des Bemessungswertes F_d nicht mehr die Definition $F_d = F_{el} / q$ verwendet wird, sondern

$$F_d = F_{el,(T=0)} + (F_{el,(T_B)} / q - F_{el,(T=0)}) * (T / T_B) \quad (3)$$

Mit $F_d = F_u'$ ergäbe sich aus (3) ein $q = 6,31$.

5. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die vorgestellten theoretischen Untersuchungen zeigen, dass es gelingt durch den Einbau eines sehr einfachen plastischen Dämpfers in einem Aussteifungsverband mit Diagonalen aus Stahlrundrohren mit zentrischen Anschlüssen das Systemverhalten so zu modifizieren, dass Verhaltensbeiwerte bei der Erdbebenbemessung angesetzt werden können, wie sie sonst nur mit Aussteifungsverbänden mit exzentrischen Anschlüssen erreicht werden.

Das vorgestellte Aussteifungssystem zeichnet sich durch seine Einfachheit und seine sehr guten Energiedissipationseigenschaften aus. Das System eignet sich für den Einsatz in Neubauten und auch für den nachträglichen Einbau in bestehende Strukturen und somit für die Anpassung von Bauwerken an die Anforderungen moderner Erdbebennormen.

Zur Bestätigung des in der vorgestellten theoretischen Untersuchung gefundenen, sehr guten Systemverhaltens (Duktilität) bei Erdbebenbeanspruchungen und für die Kalibrierung des Rechenmodells sind aber noch unbedingt Versuche erforderlich. Darauf aufbauend wären dann noch Modellrechnungen mit Systemen über das gesamte Frequenzspektrum interessant, um eine genauere Aussage über einen allgemein ansetzbaren Verhaltensbeiwert q treffen zu können.

SCHRIFTENVERZEICHNIS

- Neulichedl, A., 2006. Development of a simple plastic hysteretic damper. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. S. 232, Geneva, Switzerland, www.ecees.org
- Vayas, I., Thanopoulos, P., 2006. Dissipative (INERD) Verbindungen für Stahltragwerke im Erdbebengebiet. Stahlbau, Heft 12, S. 993-1003.
- Bachmann, H., 2002. Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser-Verlag: Basel 2002
- Mistler, M., 2005. Seismisches Verhalten von Mauerwerksbauten. DACH Tagung 2005 in Köln. In: DGEB-Publikation Nr. 13, S. 65-72, Aachen 2005.
- O.P.C.M. 20.03.2003, n. 3274. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Allegato 2. G.U. 08.05.2003 n. 105
- Petersen, C., 1996. Dynamik der Baukonstruktionen. Verlag: Vieweg & Sohn. Wiesbaden 1996