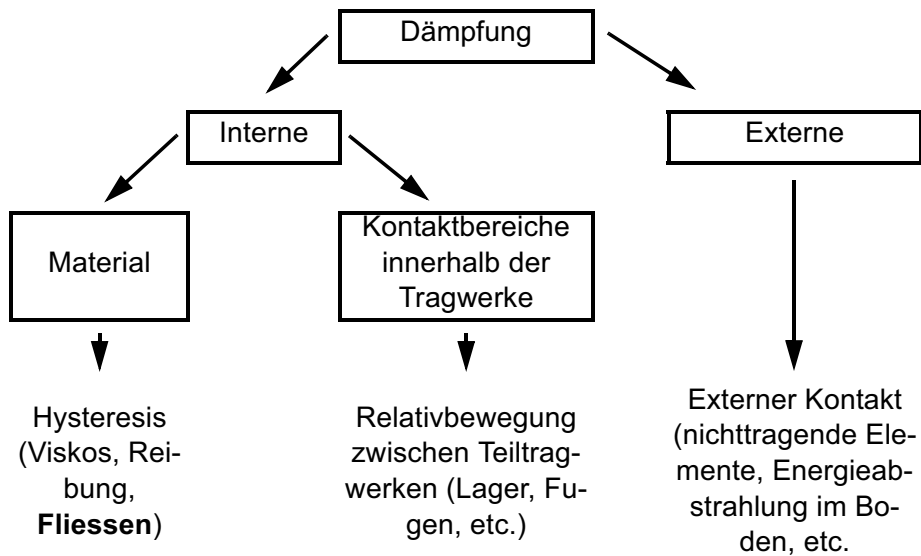


3.2.6 Dämpfung

• Dämpfungsarten



[Bac02] Bild 5.6

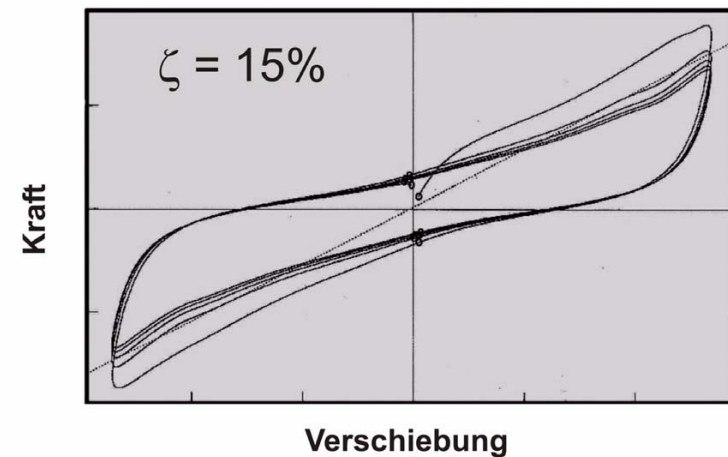
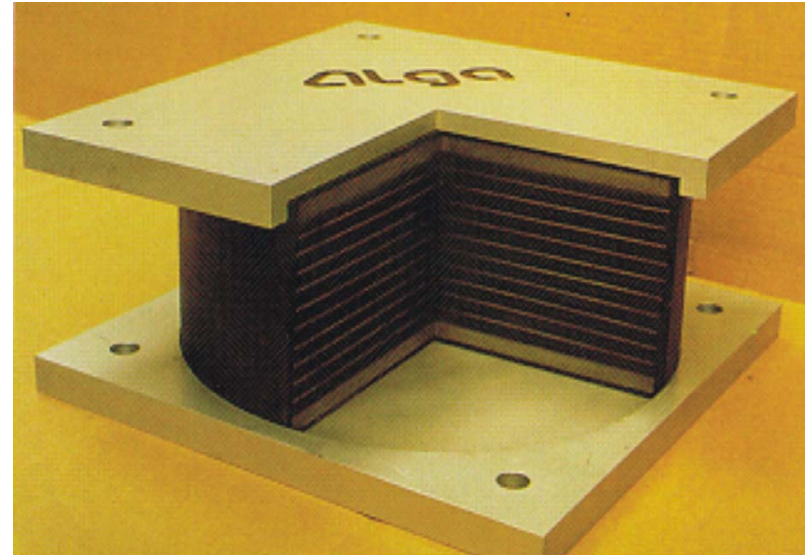
• Werten

- Hochbauten unter Wind: $\zeta = 1 \dots 2\%$
- Hochbauten unter Erdbeben: $\zeta = 3 \dots 7\%$
- Brücken unter Erdbeben: $\zeta = 1 \dots 5\%$
- Spezielle Anlagen: von Fall zu Fall unterschiedlich
- Weitere Angaben in [Bac+97]

• Massnahmen zu Erhöhung der Dämpfung

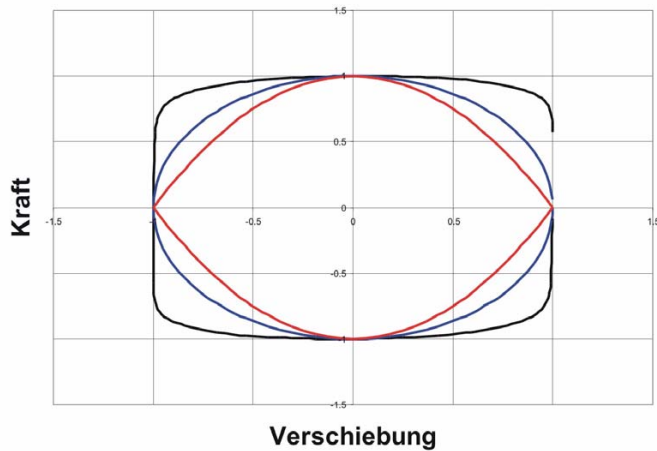
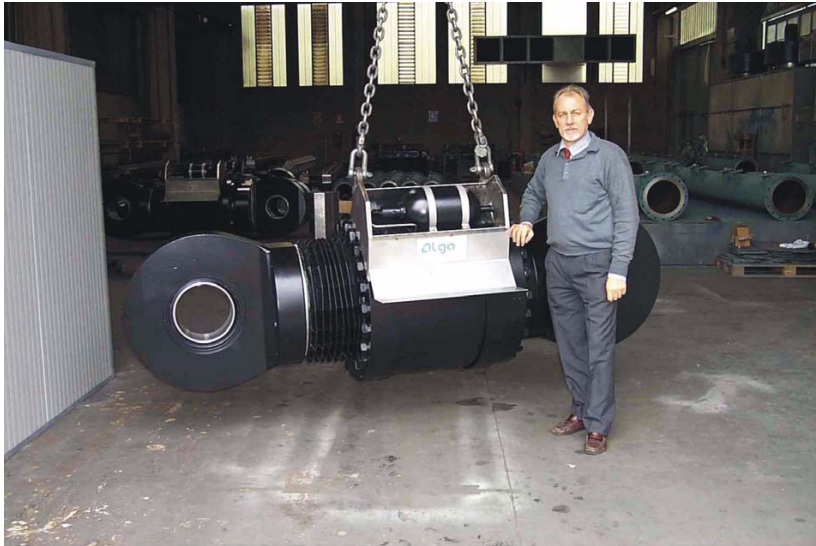
- Dissipatoren erhöhen die Dämpfung und die Periode. Das führt zu kleineren Kräften und grösseren Verformungen der Struktur.

• Dissipatoren



Bilder aus [Mar03]

- Dissipatoren

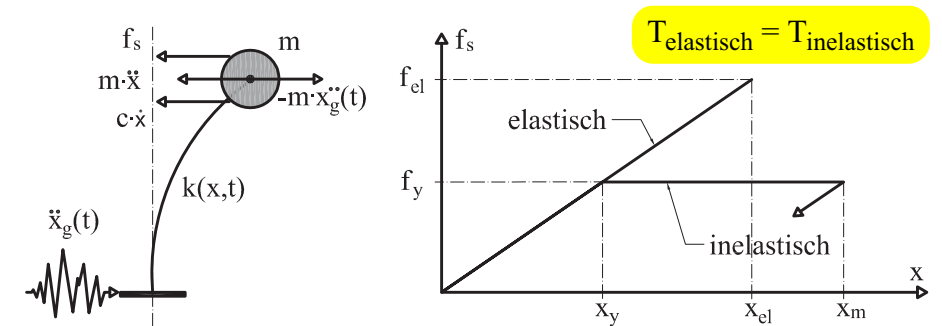


Bilder aus [Mar03]

3.3 Tragwiderstand und Duktilität

3.3.1 Anschauliches Beispiel

Gegenüberstellung der Zeitverlaufsberechnung eines elastischen und eines inelastischen Einmassenschwingers (EMS):



Wobei:

$$R_y = \frac{f_{el}}{f_y} : \text{Reduktionsfaktor} \quad (3.27)$$

$$f_{el} : \text{Maximale Rückstellkraft, die der elastische EMS während des Erdbebens } \ddot{x}_g(t) \text{ erreicht} \quad (3.28)$$

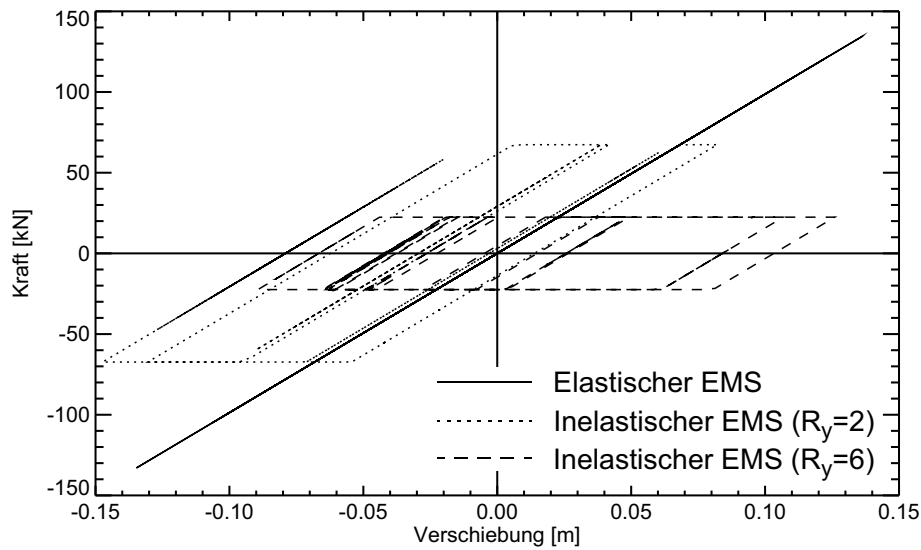
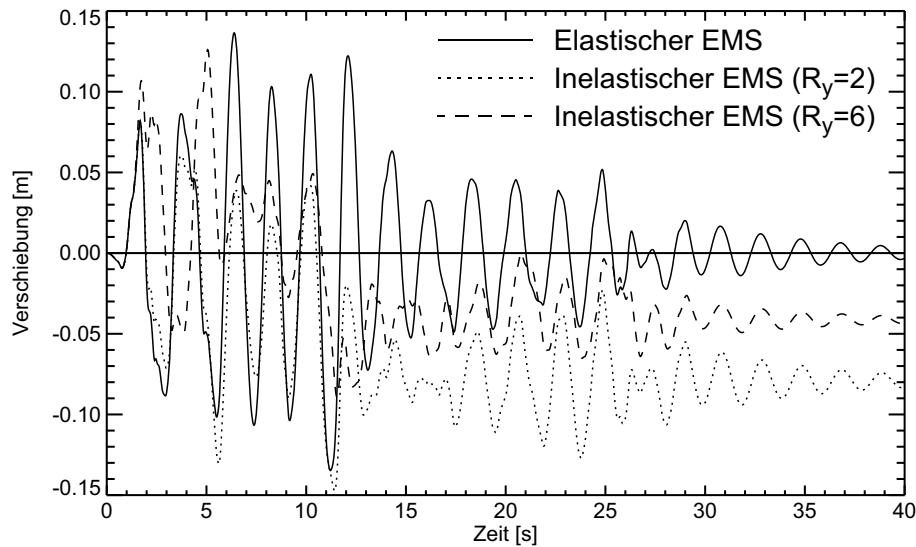
$$f_y : \text{Fließkraft des inelastischen EMS} \quad (3.29)$$

$$\mu_{\Delta} = \frac{x_m}{x_y} : \text{Verschiebeduktilität} \quad (3.30)$$

$$x_m : \text{Maximale Verschiebung, die der inelastische EMS während des Erdbebens } \ddot{x}_g(t) \text{ erreicht} \quad (3.31)$$

$$x_y : \text{Fließverschiebung des inelastischen EMS} \quad (3.32)$$

• Resultate



Grösse	Elastischer EMS	Inela. EMS $R_y=2$	Inela. EMS $R_y=6$
T [s]	2.0	2.0	2.0
F_{max} [kN]	134.70	67.35	22.45
R_y [-]	—	2.0	6.0
x_y [m]	—	0.068	0.023
x_m [m]	0.136	0.147	0.126
μ_Δ [-]	—	2.16	5.54

• Bemerkungen

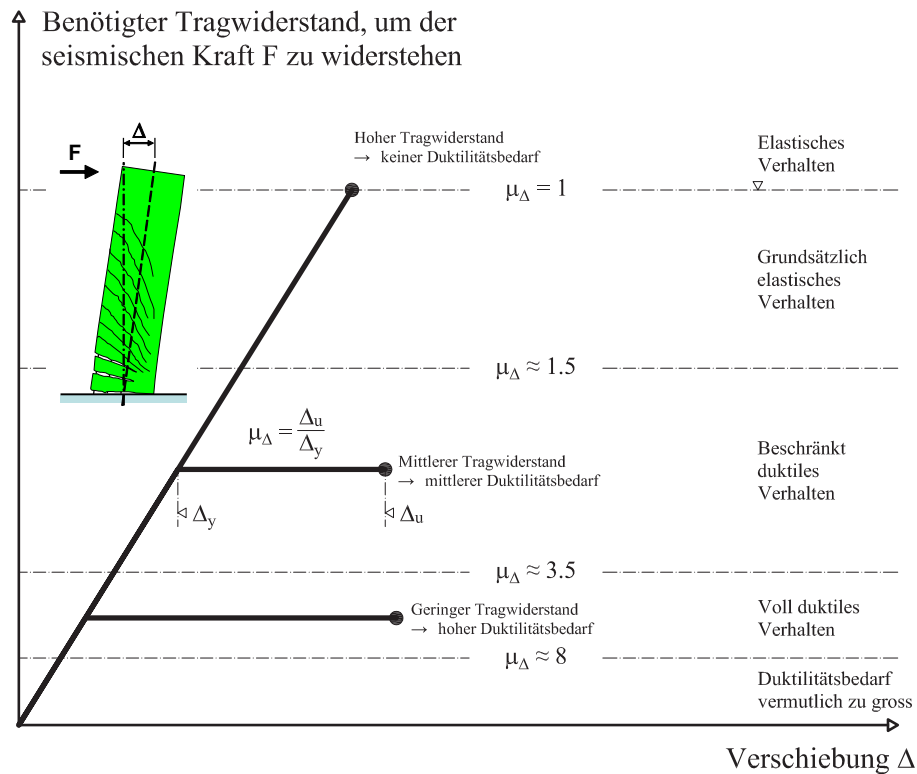
Beide inelastische EMS zeigen während des Erdbebens ein stabiles Verhalten.

3.3.2 "Verhaltensgleichung"

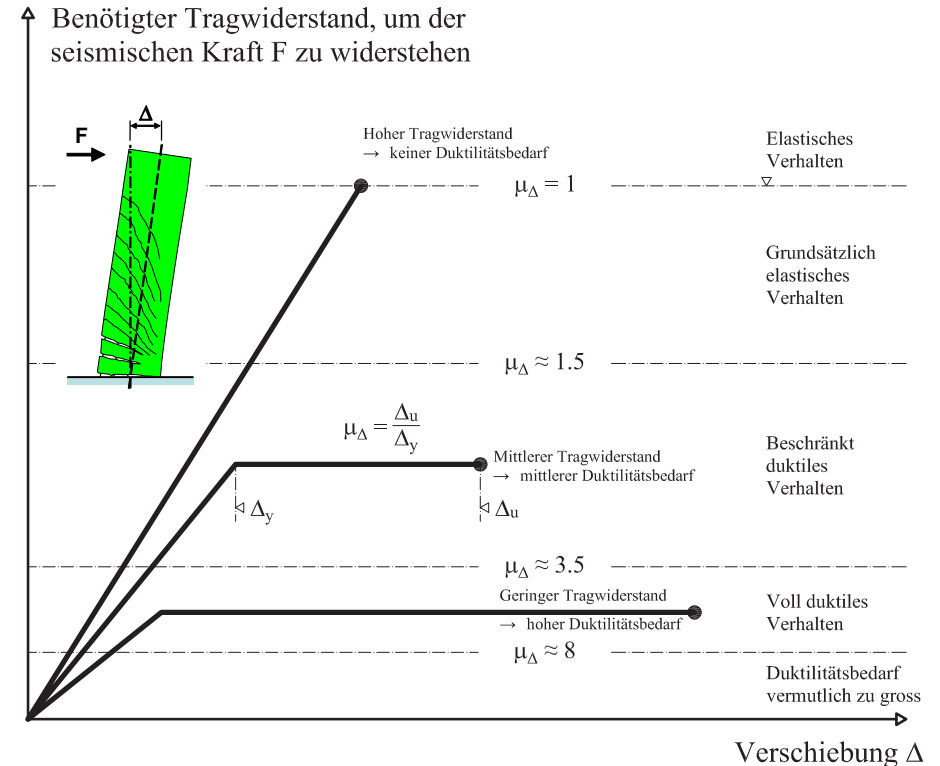
Bezüglich Einsturzgefahr gilt die folgende approximative Beziehung:

$$\text{"Güte" des Erdbebenverhaltens} \approx \text{Tragwiderstand} \times \text{Duktilität} \quad (3.33)$$

und um ein Erdbeben zu überstehen sind unterschiedliche Kombinationen von Tragwiderstand und Duktilität möglich:

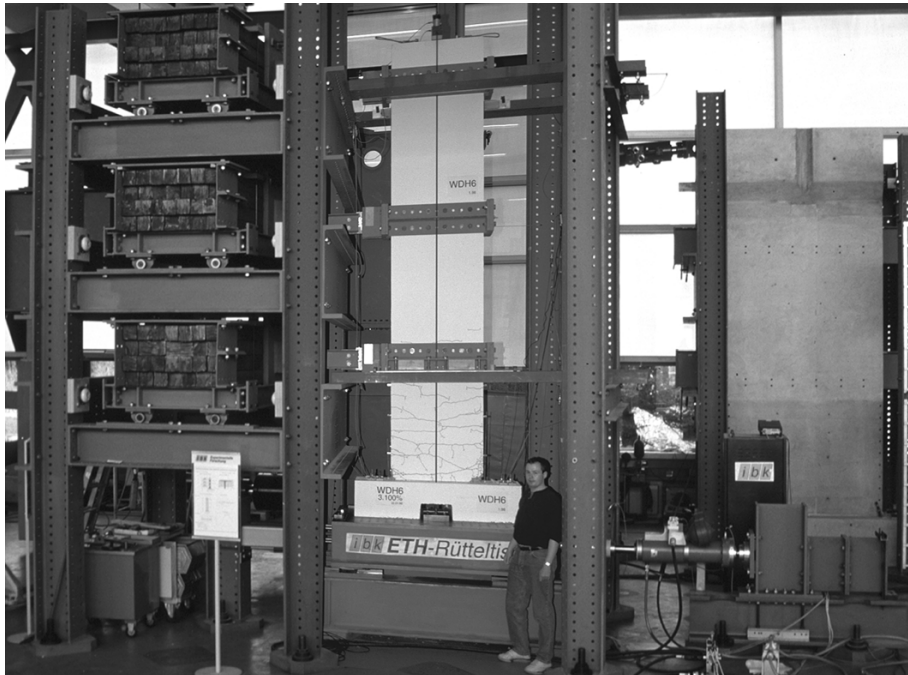


• Realistischere Darstellung der Entscheidungsvarianten

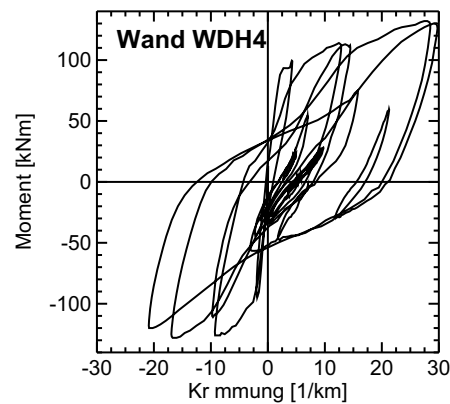


- Ein geringerer Widerstand des Tragwerks ist typischerweise durch eine geringere Steifigkeit begleitet.
- Falls die Massen bei den verschiedenen Tragwerken mehr oder weniger gleich sind (was normalerweise der Fall ist), dann besitzt das weichere Tragwerk eine längere Grundschwingzeit T.
- Tragwerke mit einer längeren Grundschwingzeit T erreichen während eines Erdbebens typischerweise grössere Verformungen, d.h. der Verformungsbedarf ist grösser.

3.3.3 Dynamisches Verhalten von Stahlbetonwänden [LWB99]



- Das linke Bild zeigt die Momenten-Krümmungs-Beziehung im plastischen Bereich der Wand.
- Trotz Überschreitung der elastischen Grenze, hat die Wand nicht versagt.
- Das plastische Verformungsvermögen von Tragwerken kann bei der seismischen Bemessung bewusst berücksichtigt werden.

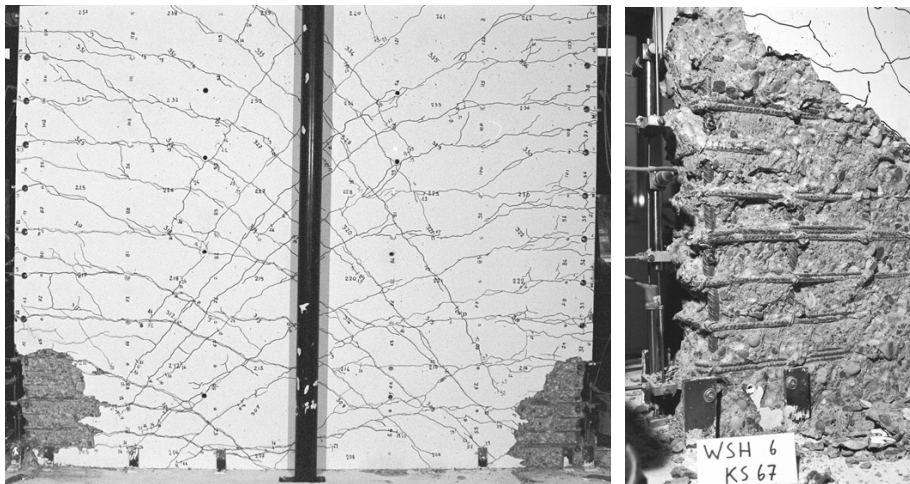
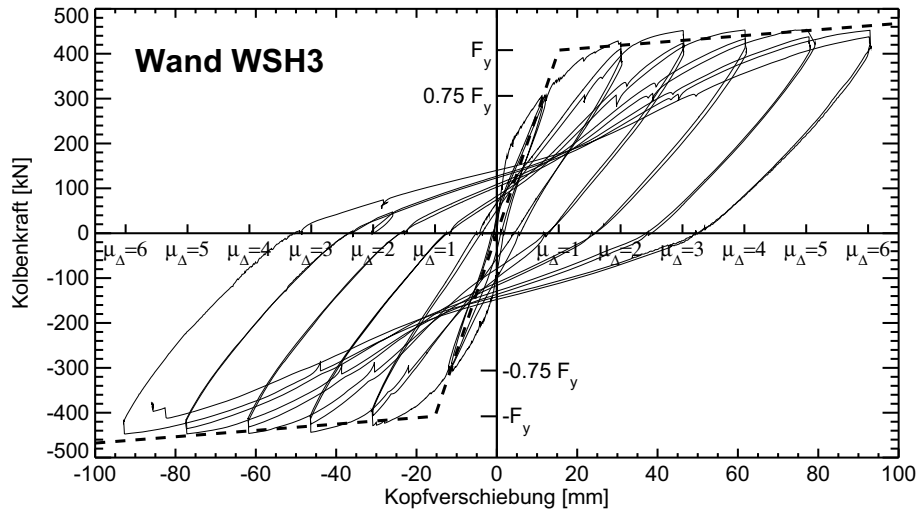


3.3.4 Statisch-zyklisches Verhalten von Stahlbetonwänden



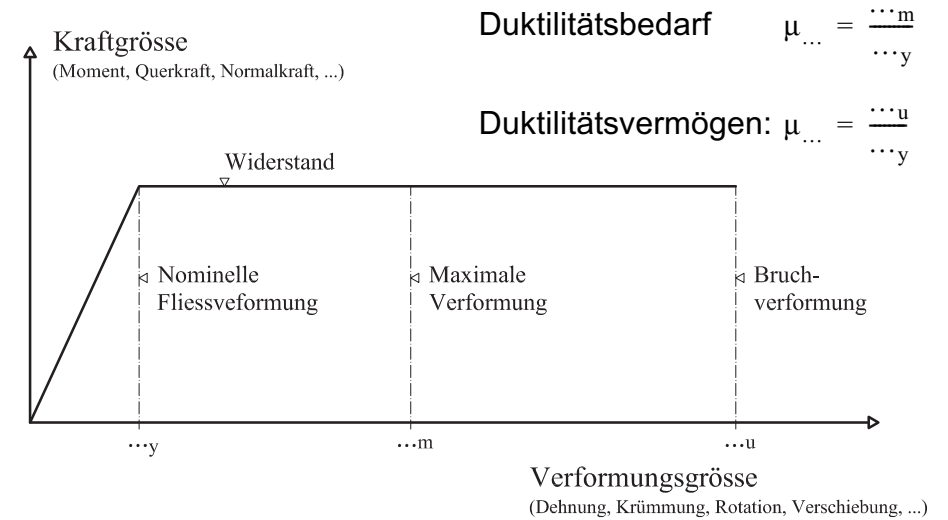
Wand WSH6 aus [DWB99]

• [DWB99]: Hysteretisches Verhalten einer Stahlbetonwand



Plastischer Bereich der Wand WSH6 (links) und Vergrößerung des linken Endbereichs (rechts). Beide Aufnahmen wurden bei Duktilität 6 aufgenommen

3.3.5 Allgemeine Definition von Duktilität



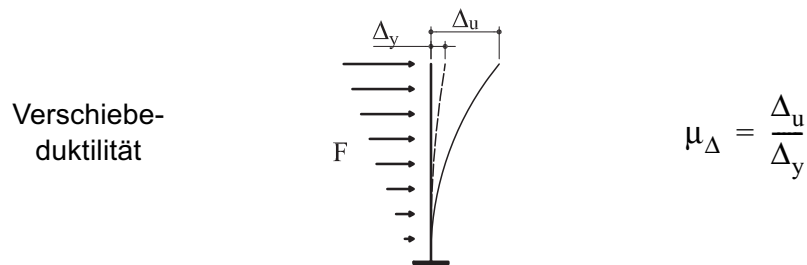
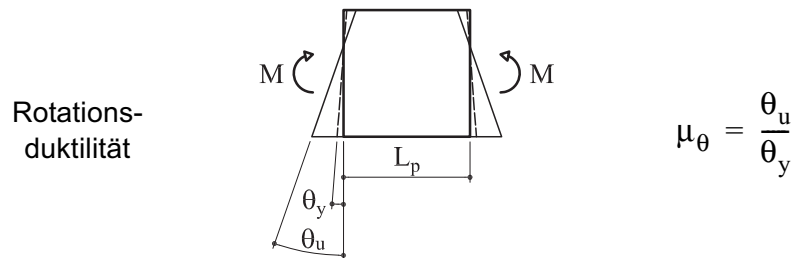
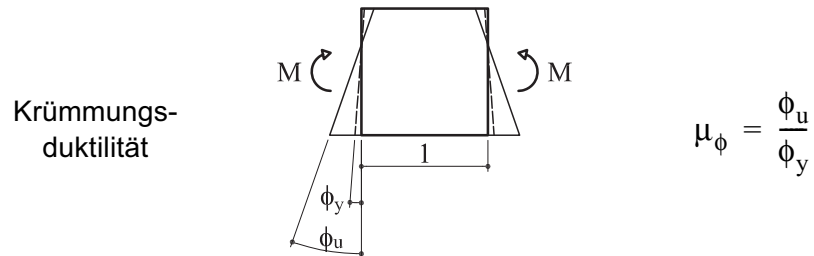
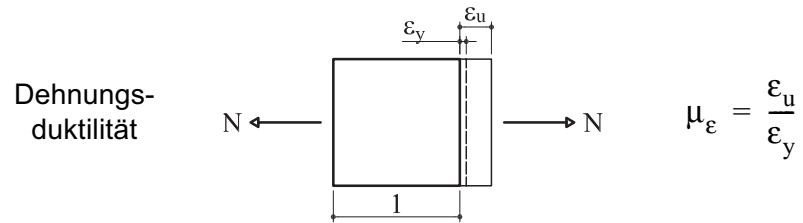
• Bemerkungen

- Das **Duktilitätsvermögen** ist eine Eigenschaft des Bauteils.
- Der **Duktilitätsbedarf** ist eine Auswirkung der seismischen Anregung und er ergibt sich aus dem dynamischen Verhalten des Tragwerks.
- Ein Bauteil übersteht ein Erdbeben wenn folgende Bedingung erfüllt ist:

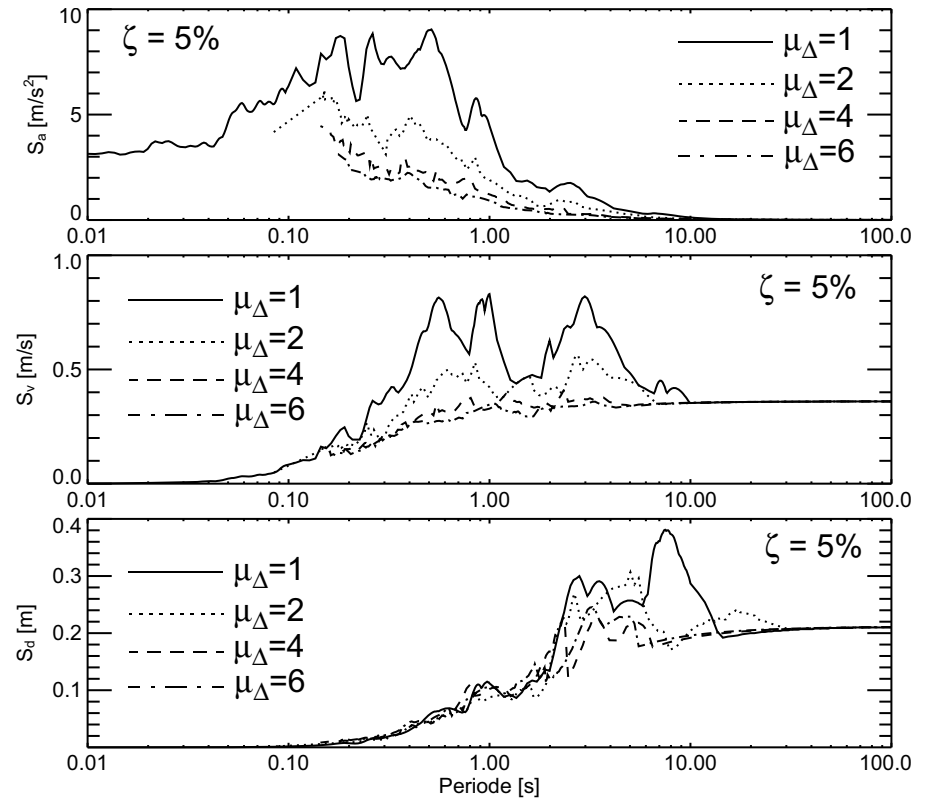
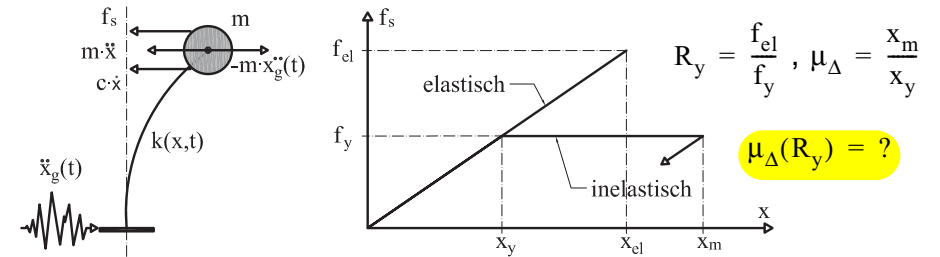
$$\text{Duktilitätsvermögen} \geq \text{Duktilitätsbedarf} \quad (3.34)$$

- Die Bruchverformung eines Bauteils wird erreicht wenn lokal das Verformungsvermögen der Baustoffe (Bruchdehnung) erreicht ist. Das Duktilitätsvermögen ist dann somit ausgeschöpft.

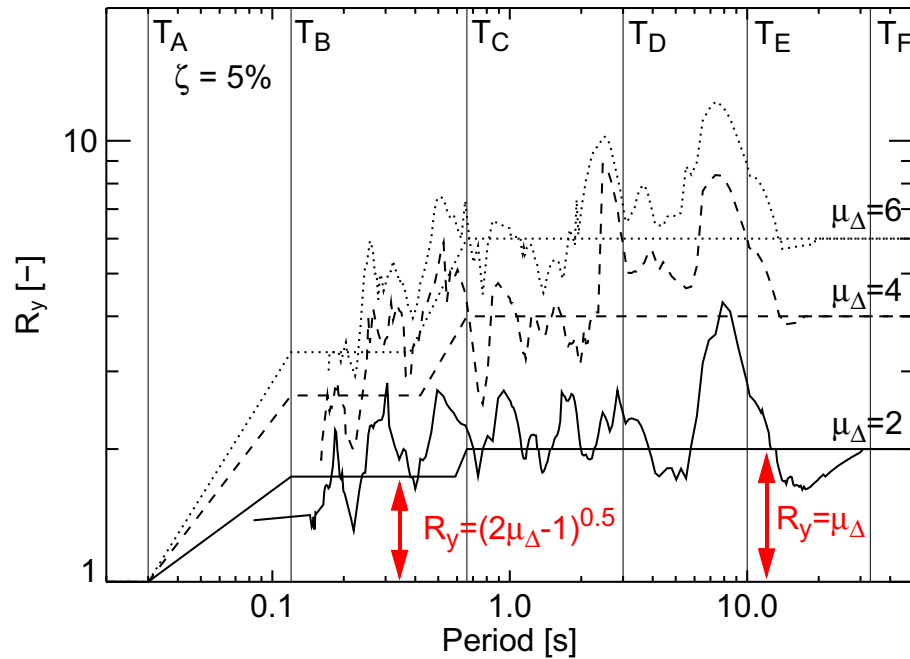
3.3.6 Definition und Arten der Duktilität



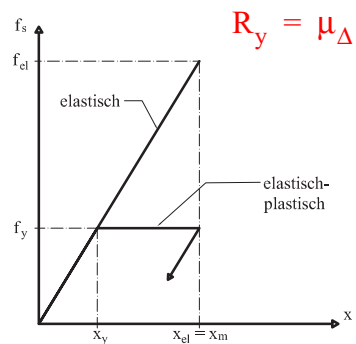
3.4 Inelastische Antwortspektren



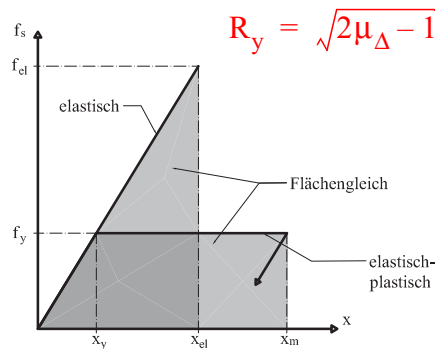
Reduktionsfaktor R_y



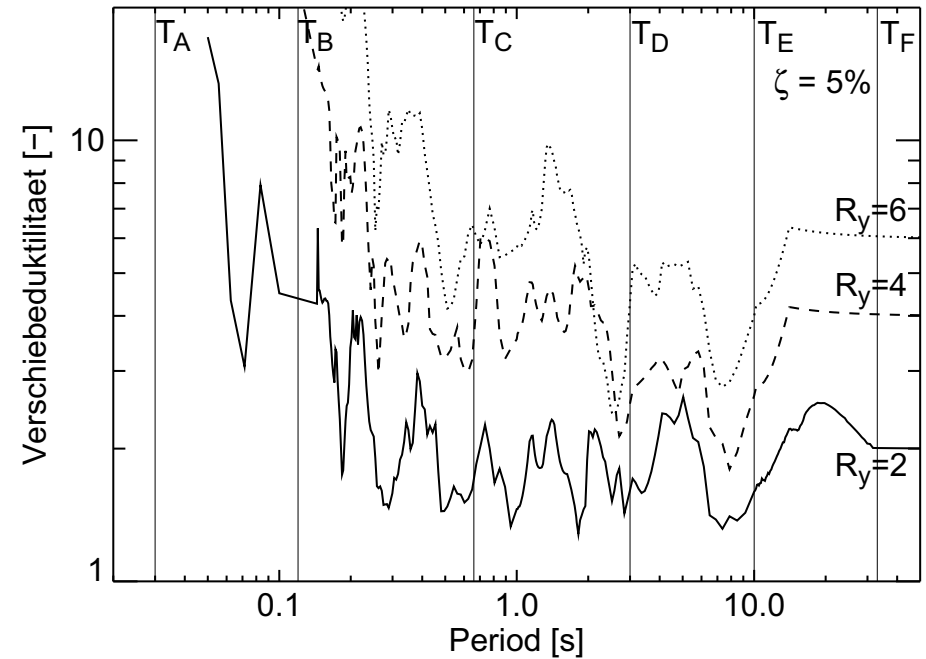
Prinzip der gleichen Verschiebungen



Prinzip der gleichen Formänderungsarbeit



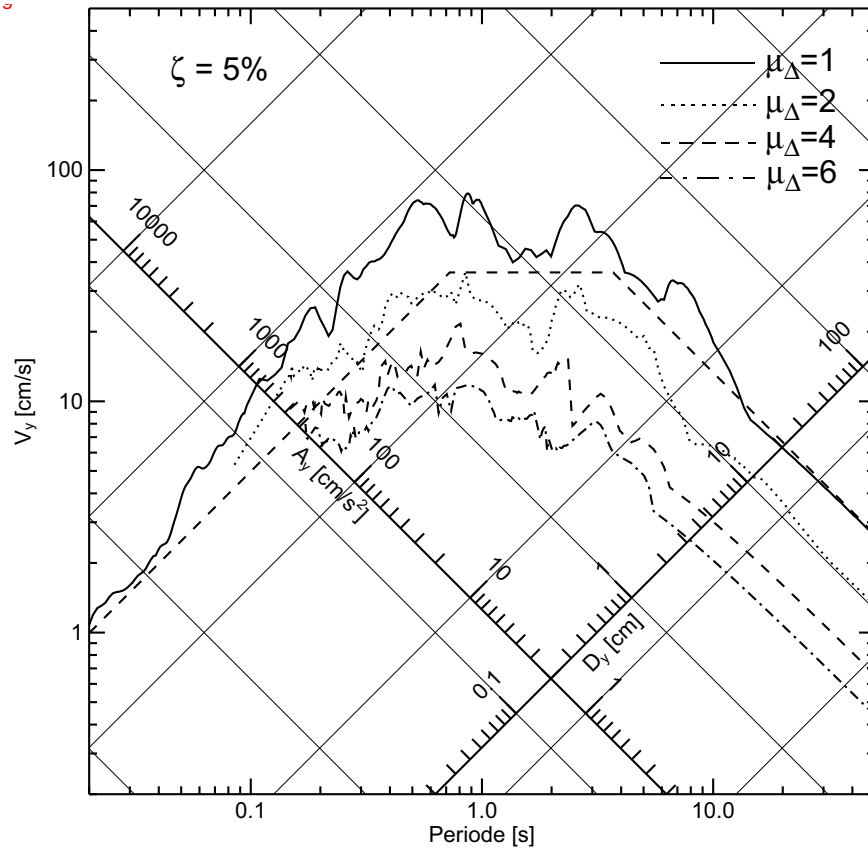
Verschiebeduktilitaet μ_Δ



- Bei kleinen Perioden, kann schon eine kleine Reduktion des elastischen Widerstands eines EMS zu einem riesigen Duktilitätsbedarf führen.
- Die Problematik des grossen Duktilitätsbedarfs werden im Kapitel 7 verdeutlicht.
- Auch im Periodenbereich, wo das "Prinzip der gleichen Verschiebungen" vorausgesetzt wird, kann sich ein wesentlich grösserer Duktilitätsbedarf ergeben.

3.4.1 Inelastische Bemessungsspektren

- Doppelt-log. Darstellung von inelastischen Antwortspektren

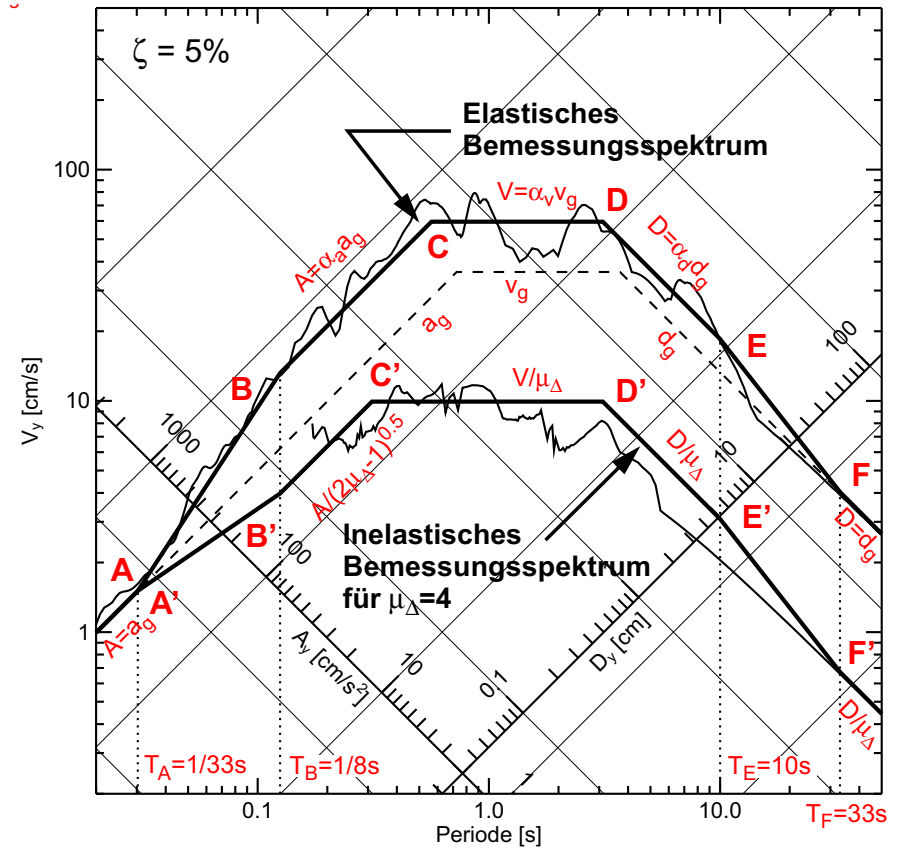


Neue Achsen:

$$D_y = x_y, V_y = \omega_n x_y, A_y = \omega_n^2 x_y \quad (3.35)$$

wobei: x_y = Fließverschiebung

- Inelastische Bemessungsspektren nach Newmark [NH82]



- Maximale Verschiebung eines EMS:

$$x_m = \mu_{\Delta} \cdot D_y$$

- Fließkraft eines EMS:

$$f_y = m \cdot A_y$$

Inelastische Spektren anhand von $R_y-\mu_\Delta-T_n$ Beziehungen

Anhand der $R_y-\mu_\Delta-T_n$ Beziehungen werden die inelastischen Bemessungsspektren mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$A_y = S_{pa, inelastisch} = \frac{1}{R_y} \cdot S_{pa, elastisch} \quad (3.36)$$

$$D = S_{d, inelastisch} = \frac{\mu_\Delta}{R_y} \cdot S_{d, elastisch} \quad (3.37)$$

Es ist wichtig zu merken, dass:

$$S_{pa, inelastisch} \neq \omega^2 \cdot S_{d, inelastisch} \quad (3.38)$$

• $R_y-\mu_\Delta-T_n$ Beziehungen nach [NH82]

$$R_y = \begin{cases} 1 & T_n < T_a \\ (2\mu_\Delta - 1)^{\beta/2} & T_a < T_n < T_b \\ \sqrt{2\mu_\Delta - 1} & T_b < T_n < T_{c'} \\ \frac{T_n}{T_c} \mu_\Delta & T_{c'} < T_n < T_c \\ \mu_\Delta & T_n > T_c \end{cases} \quad \text{(Prinzip der GE)} \quad (3.39)$$

(Prinzip der GV)

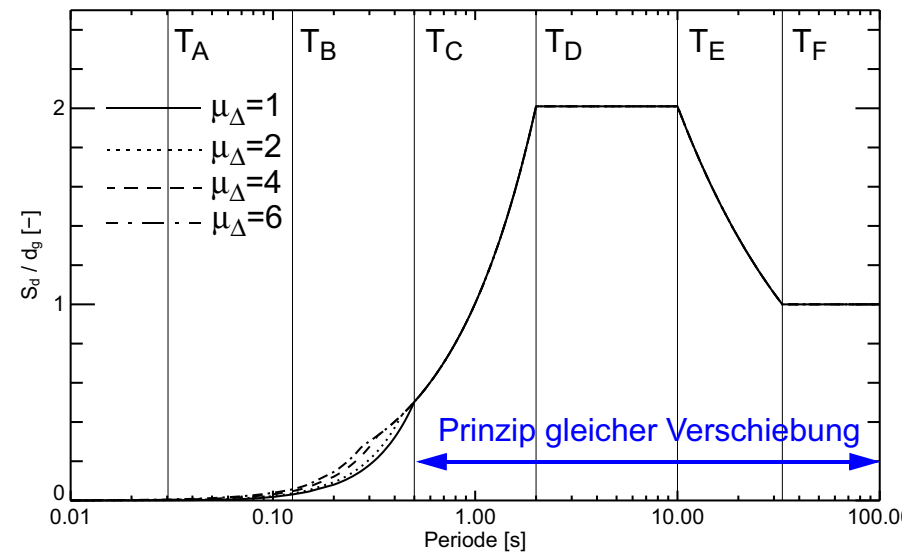
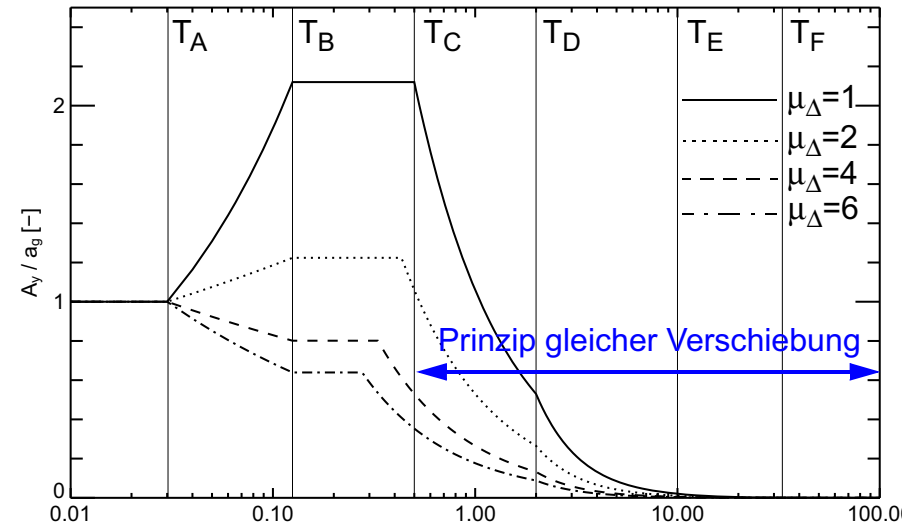
Wobei: $\beta = \log(T_n/T_a)/\log(T_b/T_a) \quad (3.40)$

$T_a = 1/33s, T_b = 1/8s \quad (3.41)$

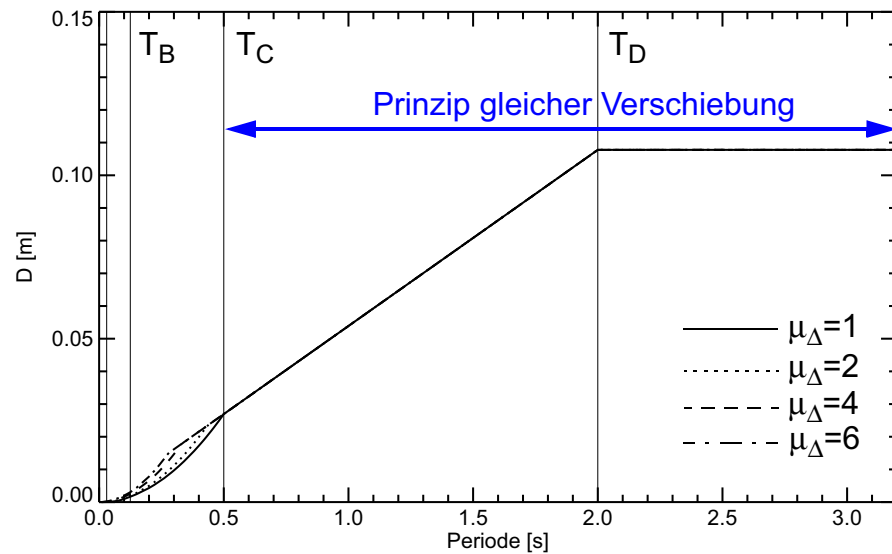
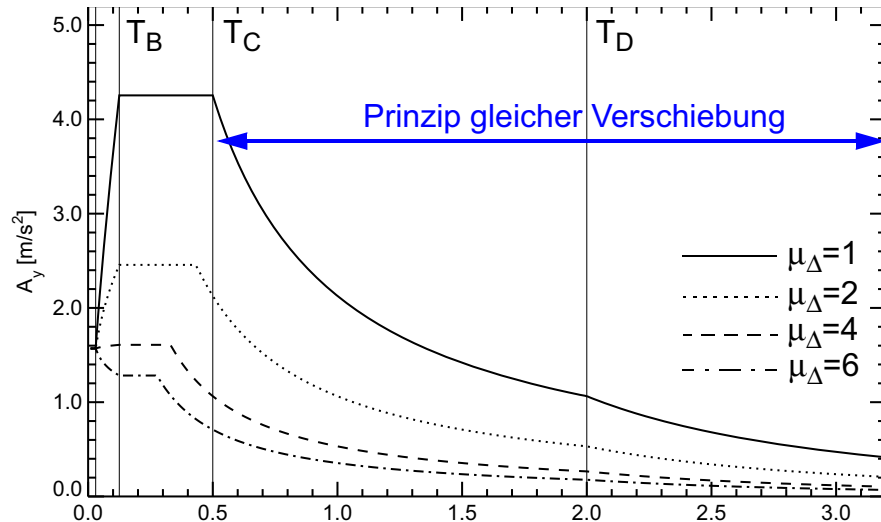
T_c = Eckperiode zwischen den Bereichen konstanter S_{pa} und konstanter S_{pv}

$T_{c'}$ = Eckperiode zwischen den Bereichen konstanter S_{pa} und konstanter S_{pv} im inelastischen Spektrum

• Inelastische Bemessungsspektren nach Newmark



- Inelastische Bemessungsspektren nach Newmark (linear)



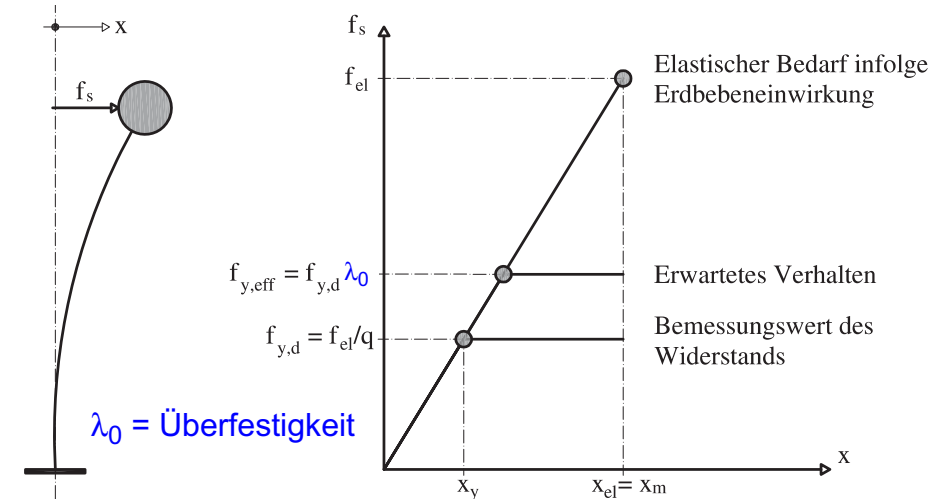
3.4.2 Verhaltensbeiwert q nach Norm SIA 261 [SIA03]

In den meisten Normen wird die Fähigkeit von Tragwerken mehr oder weniger grosse inelastische Verformungen zu ertragen indirekt anhand des sogenannten Verhaltensbeiwerts q charakterisiert.

Unter Annahme des "Prinzip der gleichen Verschiebungen" kann der Zusammenhang zwischen Verschiebeduktilität und Verhaltensbeiwert wie folgt veranschaulicht werden:

$$q = \mu_{\Delta} \cdot \lambda_0 \tag{3.42}$$

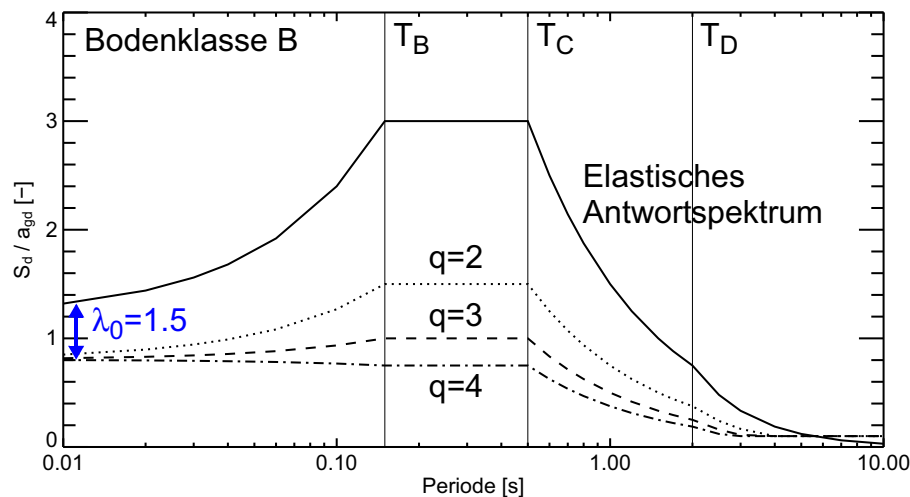
wobei λ_0 die inherente Überfestigkeit des Tragwerks darstellt.



• Bemerkungen

- Im Bemessungskonzept der Norm wird das duktile Verhalten von Tragwerken berücksichtigt indem der elastische Bedarf infolge Einwirkung anhand des Verhaltensbeiwerts q reduziert wird, um den Bemessungswert der Einwirkung zu bekommen.
- Infolge Anwendung von Sicherheitsfaktoren im Rahmen der Bemessung, besitzt das Tragwerk eine inherente Überfestigkeit und deshalb liegt das erwartete Verhalten des Tragwerks zwischen dem rein elastischen Verhalten und dem Verhalten, dass während der Bemessung angenommen wurde (siehe auch [Daz04b]).
- Die Überfestigkeit reduziert somit den Duktilitätsbedarf des Tragerwerks.
- In Bezug auf die maximalen Verformungen, die während eines Erdbebens auftreten, spielt typischerweise dieser Unterschied zwischen angenommenem und erwartetem Verhalten eine eher untergeordnete Rolle.

• Bemessungsspektren nach Norm SIA 261



3.4.3 Inelastische Bemessungsspektren: Zusammenfassung

Die Prinzipien der “Gleichen Verschiebungen” und der “Gleichen Verformungsarbeit” vereinfachen das wirkliche Verhalten stark.

- Bemessungsspektren sind sehr nützliche Werkzeuge, um Tragwerke auf die zu erwartende Erdbebeneinwirkung zu bemessen. Im Mittel können Bemessungsspektren die Auswirkung von Erdbeben gut abbilden.
- Wenn einzelne Erdbeben betrachtet werden, kann es hingegen oft vorkommen, dass die Spektren diese Auswirkung unterschätzen.
- Diese Eigenschaft der Spektren soll bei Bemessungsaufgaben berücksichtigt werden, indem möglichst robuste Tragwerke angestrebt werden sollen.