


Grundlagen der Projektierung von Bauwerken bezüglich Erdbeben

Erdbebenrisiko im integralen Naturgefahrenmanagement Frühjahrskurs 2021: Modulgruppe Geo-Risiken

Educational Material

Author(s):

Wenk, Thomas 

Publication date:

2021-02-09

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000469000>

Rights / license:

In Copyright - Non-Commercial Use Permitted



Erdbebenrisiko im integralen Naturgefahrenmanagement
Frühjahrskurs 2021: Modulgruppe Geo-Risiken

Grundlagen der Projektierung von Bauwerken bezüglich Erdbeben

Dr. Thomas Wenk

Zürich, 9. Februar 2021

Projektierung

- Die „Projektierung“ im Sinne der Grundlagennorm SIA 260:2013 umfasst folgende Schritte der Bauingenieurtätigkeit bei Neubauten:
 - Entwurf
 - Einwirkung
 - Tragwerksanalyse
 - Bemessung
 - Konstruktive Gestaltung

- Bei bestehenden Bauten heisst der entsprechende Fachbegriff „Erhaltung“ gemäss SIA 269 und SIA 269/1 bis SIA 269/8.

s i a

SIA 260:2013 Bauwesen

Schweizer Norm
Norme suisse
Norma svizzera **SN**
505 260

Ersetzt Norm SIA 260, Ausgabe 2003

Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses
Basi per la progettazione di strutture portanti
Basis of structural designGrundlagen der Projektierung von
Tragwerken260
© SIA Norme, Erdbebenrisikomanagement, Bauwesen, Dr. Thomas Wenk, 02.09.2016

Erdbebenbestimmungen in den SIA-Tragwerksnormen

SIA-Nr.	Titel	Themen	Anzahl Seiten
SIA 260	Grundlagen der Projektierung von Tragwerken	Grundlagen, Bemessungsgleichungen	0,5
SIA 261	Einwirkungen auf Tragwerke	Erdbebenzonenkarte, Bauwerksklassen, Baugrundklassen, Antwortspektren, Bemessungsbeben, Berechnungsverfahren, konzeptionelle Massnahmen	11
SIA 262	Betonbau	Verhaltensbeiwerte, konstruktive Regeln	4
SIA 263	Stahlbau	Verhaltensbeiwerte, konstruktive Regeln	2
SIA 264	Stahl-Beton-Verbundbau	Verhaltensbeiwerte, konstruktive Regeln	1
SIA 265	Holzbau	Verhaltensbeiwerte, konstruktive Regeln	2
SIA 266	Mauerwerk	Verhaltensbeiwerte, konstruktive Regeln	1
SIA 267	Geotechnik	Foundationen, Stützbauwerke	4
SIA 269/8	Erhaltung von Tragwerken – Erdbeben	Einwirkung für bestehende Tragwerke, verformungsbasierte Tragwerksanalyse, Beurteilung der Verhältnismässigkeit von Erdbebensicherheitsmassnahmen, Massnahmenempfehlung	52

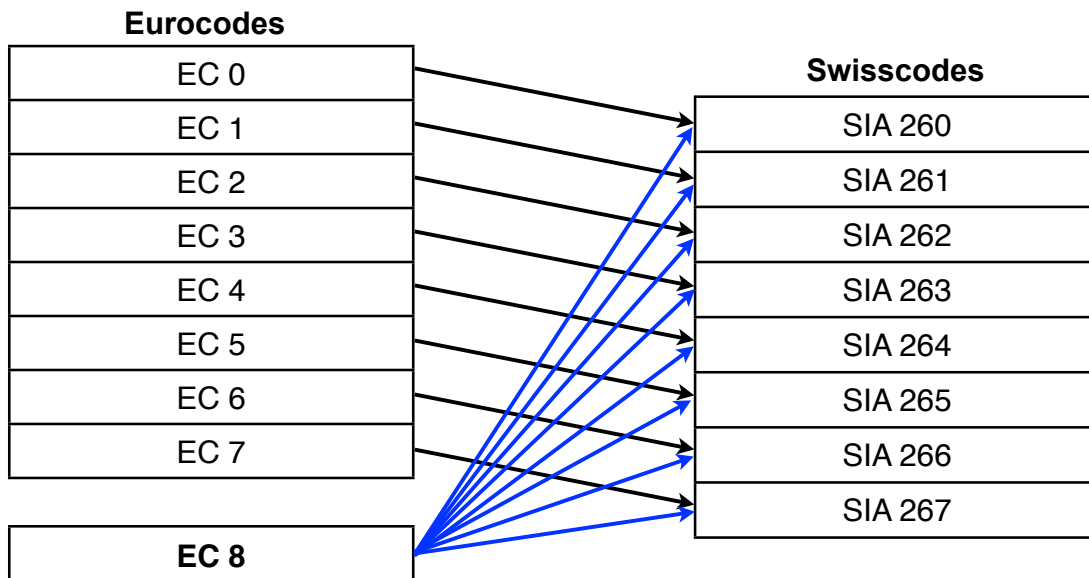
Erdbebenbestimmungen im Eurocode 8

- **Der Eurocode 8 „Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben“ gliedert sich in sechs Normen EN 1998-1 bis EN 1998-6.**
- **Die Teile 1 und 2 des Eurocode 8 dürfen als Alternative zu den SIA-Tragwerksnormen zusammen mit dem Nationaler Anhang NA zu SN EN 1998-1 bzw. NA zu SN EN 1998-2 angewandt werden**
- **Für die Teile 3 bis 6 fehlen Nationale Anhänge. Diese Teile sollen zusammen mit den SIA-Tragwerksnormen angewandt werden.**

EC8-Teil	EN-Nr.	SIA-Nr.	Titel	Anzahl Seiten
1	EN 1998-1	SIA 260.801	Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten	229
2	EN 1998-2	SIA 260.802	Brücken	146
3	EN 1998-3	SIA 260.803	Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden	90
4	EN 1998-4	SIA 260.804	Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen	83
5	EN 1998-5	SIA 260.805	Gründungen, Stützbauwerke und geotechnische Aspekte	44
6	EN 1998-6	SIA 260.806	Türme, Maste und Schornsteine	46

Integration des Eurocodes 8 in die SIA-Tragwerksnormen

- Um die Praxistauglichkeit entsprechend der SIA-Normentradition sicherzustellen, wurden im 2003 die umfangreichen Erdbebenbestimmungen im Eurocode 8 für die in der Schweiz vorherrschenden niedrigen bis mittleren Seismizität vereinfacht und in SIA 260 bis SIA 267 integriert.
- Die 548 Seiten für Neubauten wurden auf 26 Seiten verdichtet, fokussiert auf Gebäude und Brücken.

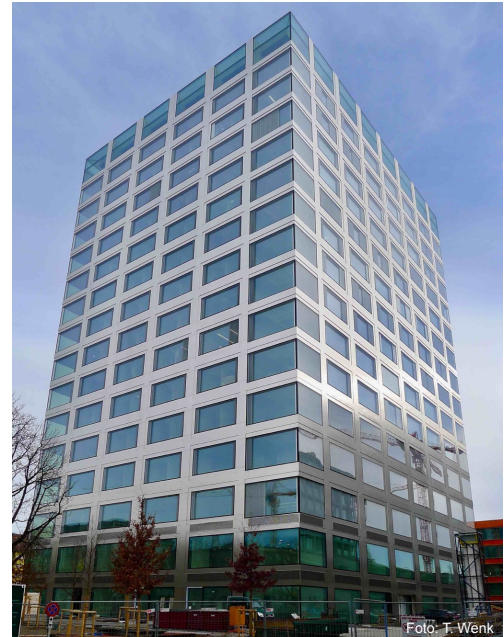


Erdbebengerechter Entwurf

- Einfache Regeln für die Entwurfsphasen abgeleitet aus typischen Schadenbildern bei starken Erdbeben.
- Nicht-rechnerische Ergänzungen zu den rechnerischen Nachweisen gemäss Tragwerksnormen unter Berücksichtigung der Unschärfen in den Festlegungen der Erdbebeneinwirkung.
- Garantiert ein robustes Tragwerk, so dass auch bei Erdbeben, die stärker als das Bemessungsbeben sind, die Schäden in einem vertretbaren Verhältnis zur Grösse der Überschreitung des Bemessungsbebens bleiben.

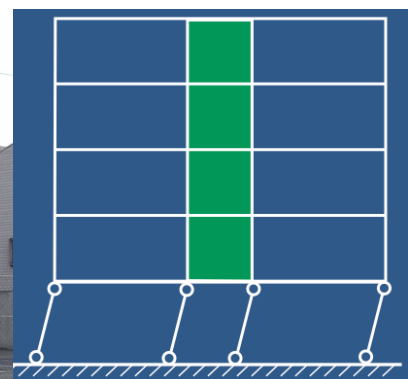
Erdbebengerechter Entwurf: Grundsätze

- Grundsätze des erdbebengerechten Entwurfs für die Auslegung des Tragwerks:
 - Einfachheit
 - Regelmässigkeit
 - Redundanz
- Erfordert enge Zusammenarbeit zwischen Architekt und Bauingenieur von der frühen Entwurfsphase an: **“Miteinander-Entwurf”**.



[Bachmann H. 2002: Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten - Grundsätze für Ingenieure, Architekten, Bauherren und Behörden, Richtlinie des BWG, Bern.]

Erdbebengerechter Entwurf: Beispiel „Soft-Storey“



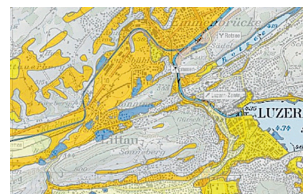
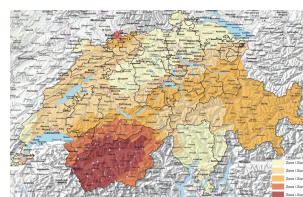
- Der Grundsatz „Regelmässigkeit“ des erdbebengerechten Entwurfs ist bezüglich des Verlaufs des horizontalen Aussteifungssystems im Erdgeschoss verletzt.
- Der horizontale Verschiebungsbedarf unter Erdbebeneinwirkung konzentriert sich auf das weiche Erdgeschoss („Soft-Storey“) anstelle einer gleichmässigen Verteilung über die Höhe.

Erdbebengerechter Entwurf in den SIA-Tragwerksnormen

- **Konzeptionelle und konstruktive Massnahmen bezüglich Einfachheit, Regelmässigkeit und Redundanz bei Gebäuden (SIA 261, Tabelle 27):**
 - Verbindlichkeit abhängig von Bauwerksklasse und Erdbebenzone
 - Abweichungen erlaubt, falls durch rechnerische Untersuchungen begründet.
- **Tragwerksanalyse**
 - Kriterien der Regelmässigkeit erfüllt:
Das einfache Berechnungsverfahren (Ersatzkraftverfahren) darf angewandt werden.
 - Kriterien der Regelmässigkeit nicht erfüllt:
Das aufwendigere Berechnungsverfahren (Antwortspektrumverfahren) muss angewandt werden.
- **Bemessungsmethode**
 - nicht erdbebengerecht:
nicht duktiles Tragwerksverhalten analog zur Bemessung bezüglich Nicht-Erdbebeneinwirkungen
 - erdbebengerecht:
duktiler Tragwerksverhalten

Erdbebeneinwirkung

- Die Erdbebeneinwirkung des Bemessungsbebens gemäss SIA 261 ist abhängig von:
 - Bauwerksklasse (BWK I, II, III)
 - Erdbebenzone (Z1a, Z1b, Z2, Z3a, Zb)
 - Baugrundklasse (A, B, C, D, E, F)
 - Tragwerkeigenschaften (Schwingzeiten, Verhaltensbeiwert)
- Die Erdbebeneinwirkung ist als sogenannte „aussergewöhnliche“ Einwirkung gemäss SIA 260 zu betrachten, d.h. die Kombination mit veränderlichen (Wind, Schnee, Nutzlasten, Ausnahme: Temperatur) oder aussergewöhnlichen Einwirkungen (Brand, Explosion, Anprall) entfällt.



Bauwerksklassen

- Abstufung der Erdbebeneinwirkung nach der Bedeutung bzw. den Folgen eines Versagens des Bauwerks.
- Beispiel für die höchste Bauwerksklasse III: Ambulanzgaragen
- Fotos zeigen das Olive View Hospital, Los Angeles, nach dem Erdbeben von San Fernando in Kalifornien 1971.



Fotos: EERI, Oakland, Kalifornien



Bauwerksklassen: Einteilung

- Gemäss SIA 261 werden die Bauwerke in drei Bauwerksklassen (BWK) mit zugehörigem Bedeutungsbeiwert γ_f eingeteilt.
- Kriterien für die Einteilung in BWK:
 - Bedeutung für die Katastrophenbewältigung
 - Personenbelegung
 - Schadenpotential
 - Umweltgefährdung

BWK	Merkmale	Beispiele für Gebäude
III	- Lebenswichtige Infrastrukturfunktion	Akutspitäler, Feuerwehrgebäude, Ambulanzgaragen
II	- Bedeutende Infrastrukturfunktion - Personenbelegung: $PB > 50$ oder $PB_{max} > 500$ Pers. - Schulen, Kindergärten, Gebäude der öffentlichen Verwaltung sofern $PB_{max} > 10$ Personen - Enthält besonders wertvolle Güter	Schulen, Theater, Einkaufszentren, öffentliche Verwaltung, Spitäler, grosse Wohn-, Büro- und Gewerbebauten
I	- alle übrigen Bauwerke, sofern keine Umweltschäden möglich sind	gewöhnliche Wohn-, Büro- und Gewerbebauten

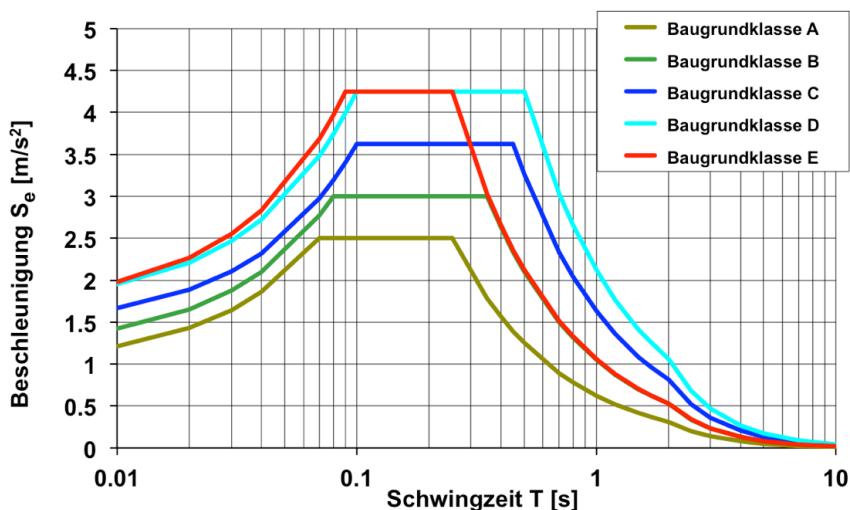
Bauwerksklassen: Bedeutungsfaktor

- Für den Nachweis der Tragsicherheit bei BWK I beträgt der Bedeutungsbeiwert $\gamma_f = 1,0$ entsprechend einer Wiederkehrperiode des Bemessungsbebens von 475 Jahren (Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% in 50 Jahren).
- Der Bedeutungsfaktor γ_f erscheint im Bemessungsspektrum als Multiplikator der Erdbebeneinwirkung.
- Für den Personenschutz (Tragsicherheit) gilt eine grössere Wiederkehrperiode im Vergleich zum Schutz von Sachwerten (Gebrauchstauglichkeit).

BWK	Bedeutungsbeiwert γ_f	
	Tragsicherheit	Gebrauchstauglichkeit
III	1,5	1,0
II	1,2	kein Nachweis erforderlich (Gebrauchstauglichkeit ist implizit durch den Nachweis der Tragsicherheit erfüllt.)
I	1,0	kein Nachweis erforderlich (Gebrauchstauglichkeit ist implizit durch den Nachweis der Tragsicherheit erfüllt.)

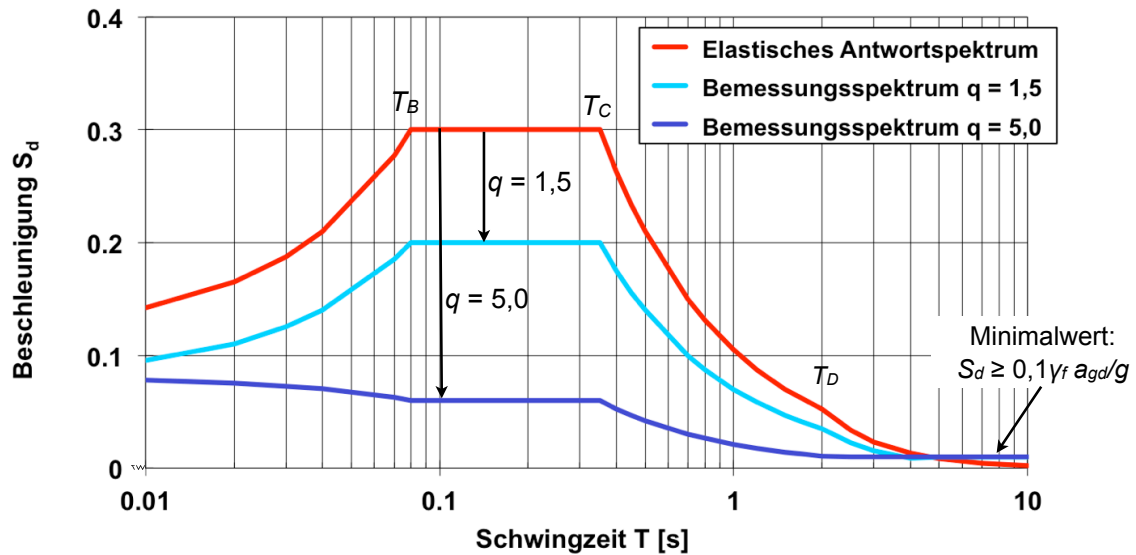
Elastisches Antwortspektrum

- In der Norm SIA 261 werden fünf elastische Antwortspektren für Baugrundklasse A bis E vorgegeben.
- Je weicher der Baugrund (BGK A > D), desto höher und langperiodischer das Antwortspektrum.
- Dargestellt für Z2 mit $a_{gd} = 1,0 \text{ m/s}^2$ und Dämpfung $\zeta = 5\%$



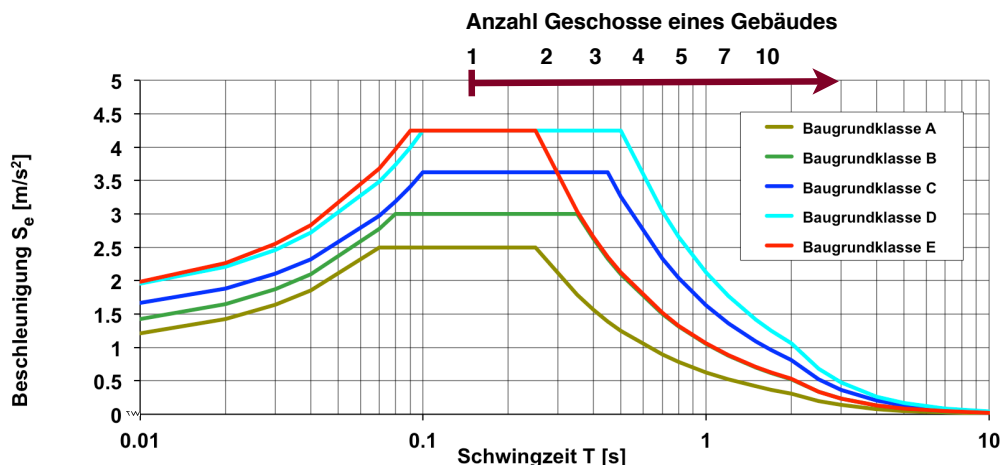
Bemessungsspektrum

- Das Bemessungsspektrum wird aus dem elastischen Antwortspektrum für Dämpfung $\zeta = 5\%$ bestimmt unter Berücksichtigung des Bedeutungsbeiwerts γ_f und des Verhaltensbeiwerts q .
- Das Bemessungsspektrum ist dimensionslos, d.h. normiert auf g .
- Dargestellt für Z2 ($a_{gd} = 1 \text{ m/s}^2$), Baugrundklasse B ($S = 1,2$) und BWK I ($\gamma_f = 1,0$).

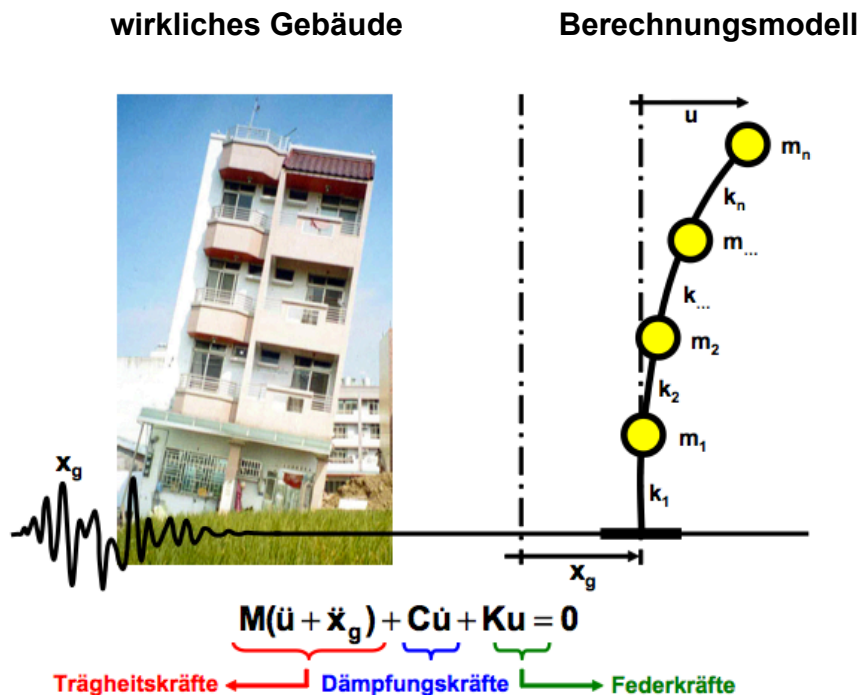


Resonanz zwischen Baugrund und Bauwerk

- Der Bereich der maximalen horizontalen Beschleunigung der Antwortspektren fällt in den Resonanzbereich von relativ niedrigen Gebäuden.
- Die horizontale Grundschwingzeit von Gebäuden nimmt mit der Anzahl Geschosse zu.
- Bei Hochhäuser ab etwa 10 Geschossen ist in niedriger Seismizität in der Regel der Wind die massgebende Einwirkung in horizontaler Richtung.



Tragwerksanalyse



[Dazio A. 2008: Erdbebengefährdung und erdbebengerechter Entwurf von Neubauten, in: Erdbebensicherheit von Gebäuden – Rechts- und Haftungsfragen, Dokumentation SIA D 0227, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich.]

Tragwerksanalyse

- In der SIA 261 befinden sich detaillierte Festlegungen zum Ersatzkraftverfahren und zum Antwortspektrumverfahren.
- Bei Gebäuden darf das einfachere Ersatzkraftverfahren angewandt werden, falls die Kriterien der Regelmässigkeit erfüllt. Andernfalls muss das aufwendigere Antwortspektrumverfahren angewandt werden.
- Bei Brücken darf das Ersatzkraftverfahren nur für einfeldrige Balken- oder Rahmenbrücken angewandt werden. Für alle übrigen Brückenarten muss das Antwortspektrumverfahren angewandt werden.
- Das Berechnungsmodell ist linear elastisch für beide Verfahren mit Annahme mittlerer Steifigkeiten bis Fließbeginn der einzelnen Tragwerksteile.
- Die Erdbebenanregung erfolgt durch das Bemessungsspektrum für alle (relevanten) Schwingformen des Tragwerksmodells.

Tragwerksanalyse: Vergleich der Berechnungsverfahren I

	Ersatzkraftverfahren	Antwortspektrumverfahren	Nicht-lineare statische Berechnung	Nicht-lineare dynamische Berechnung
Dynamisches Modell	linearer EMS	linearer MMS	nicht-linearer EMS	nicht-linearer MMS
Geometrisches Modell	2D	2D oder 3D	2D	2D oder 3D
Materialmodell	linear-elastisch	linear-elastisch	nicht-linear	nicht-linear
Dämpfungsmodell	viskos	viskos	viskos	viskos, hysteretisch oder Reibung
Berücksichtigte Eigenformen	Grundform	alle	Grundform	nicht relevant
Berücksichtigung der Torsion	Amplifikationsfaktor	linear	linear oder Amplifikationsfak.	nicht-linear
Berücksichtigung von Material-nichtlinearitäten	Verhaltensbeiwert q	Verhaltensbeiwert q	nicht lineares Materialmodell	nicht lineares Materialmodell

[Wenk T. (2011): Erdbebensicherung von Bauwerken I, Folienkopien FS 2011, E-Collection, ETH Zürich: www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/152828/eth-3020-01.pdf]

Tragwerksanalyse: Vergleich der Berechnungsverfahren II

	Ersatzkraftverfahren	Antwortspektrumverfahren	Nicht-lineare statische Berechnung	Nicht-lineare dynamische Berechnung
Erdbebenanregung	Bemessungsspektrum	Bemessungsspektrum	Bemessungsspektrum	Zeitverlauf
Resultatgrößen	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte, lokale und globale Verformungen	Schnittkräfte, lokale und globale Verformungen
Einsatzbereich	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke
Typische Anwendung	Bemessung, Plausibilitätskontrolle	Bemessung von Neubauten	Überprüfung bestehender Bauten	Spezialbauwerke, Forschung
Aufwand	niedrig	mittel	hoch	sehr hoch
SIA-Norm	SIA 261	SIA 261	SIA 269/8	nur Grundsätze in SIA 261

[Wenk T. (2011): Erdbebensicherung von Bauwerken I, Folienkopien FS 2011, E-Collection, ETH Zürich: www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/152828/eth-3020-01.pdf]

Bemessung

- Die materialspezifischen Tragwerksnormen SIA 262 bis SIA 266 unterscheiden zwei Erdbebenbemessungsmethoden:
- Nicht-duktiler Tragwerksverhalten
 - Konventionelles Bemessungskonzept, keine besonderen konstruktiven Regeln zu beachten.
 - Geringfügiges plastisches Verformungsvermögen, sprödes Versagen möglich
 - Verhaltensbeiwert in der Regel nur $q = 1,5$
- Duktiler Tragwerksverhalten
 - Erdbebenberechtigtes Bemessungskonzept (Kapazitätsbemessung)
 - Besondere konzeptionelle und konstruktive Regeln sind einzuhalten.
 - Grosses plastisches Verformungsvermögen, sprödes Versagen ausgeschlossen
 - Grösserer Verhaltensbeiwert q von 2,0 bis 5,0
 - (Mit Duktilität wird das gesamte Verformungsvermögen bezogen auf das elastische Verformungsvermögen bezeichnet.)

Bemessungsbeispiel für duktiler und nicht-duktiler Tragwerksverhalten

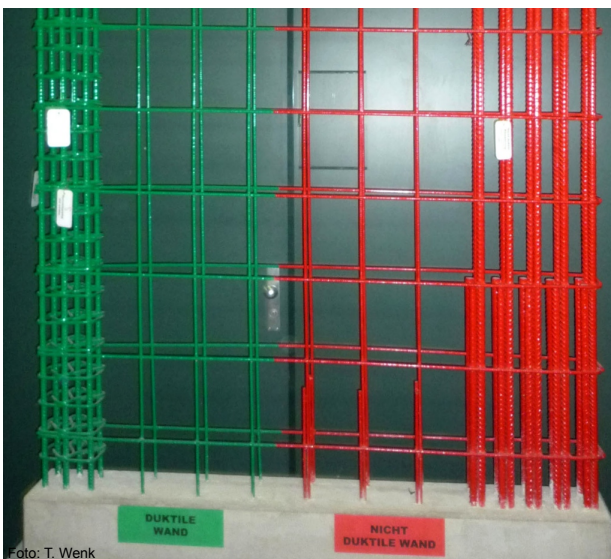


Foto: T. Wenk

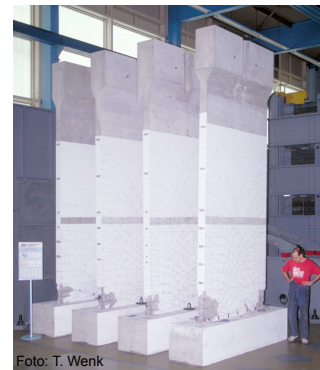
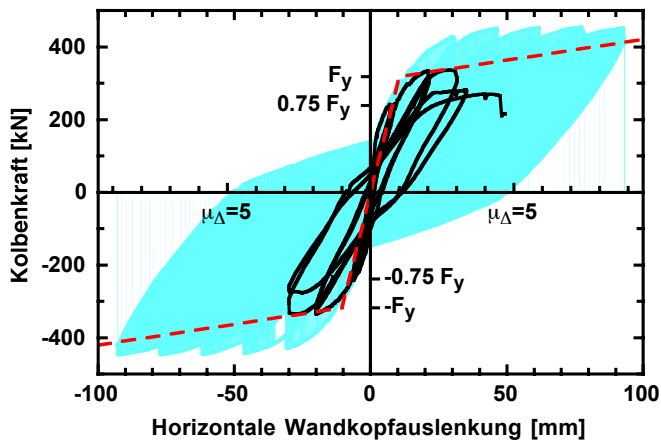
duktiler
Tragwerksverhalten

nicht-duktiler
Tragwerksverhalten

- Bewehrung des Wandfusses einer Stahlbetontragwand für die gleiche Erdbebeneinwirkung:
- Links duktiler Tragwerksverhalten:
 - Kapazitätsbemessung
 - Verhaltensbeiwert $q = 4$
 - hochduktiler Betonstahl C
 - enge Umschnürungsbewehrung im Randelement
 - Kein Stoss der Vertikalbewehrung im plastischen Bereich
- Rechts nicht-duktiler Tragwerksverhalten:
 - konventionelle Bemessung
 - Verhaltensbeiwert $q = 2$
 - normaler Betonstahl B
- Im Ergebnis kann dank Kapazitätsbemessung Bewehrung eingespart werden.

Einfluss der Duktilität des Betonstahls

- Vergleich zweier Stahlbetonwände mit unterschiedlichem Betonstahl unter zyklisch-statischer Einwirkung
- Schwarze Linie: Horizontalkraft-Horizontalverschiebungs-Hysteresekurve für eine Stahlbetonwand mit sprödem Betonstahl A: Verschiebeduktilität $\mu_{\Delta} = 2,5$
- Hellblaue Fläche: Horizontalkraft-Horizontalverschiebungs-Hysteresekurven für eine Stahlbetonwand mit hoch duktilem Betonstahl C: Verschiebeduktilität $\mu_{\Delta} = 9,0$



[Dazio A., Wenk T., Bachmann H. 1999: Versuche an Stahlbetontragwänden unter zyklisch-statischer Einwirkung. IBK-Bericht Nr. 239, www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/144433/eth-23296-01.pdf

Bemessung: Übersicht über Verhaltensbeiwerte q

Nicht-duktiler Tragwerksverhalten		
Bauweise	Verhaltensbeiwert q	Kriterien für Festlegung von q
alle	1,5 als Regelfall	keine

Duktiler Tragwerksverhalten		
Bauweise	Verhaltensbeiwert q	Kriterien für Festlegung von q
Stahlbeton	3,0 bis 4,0	Duktilität der Bewehrung
Stahl	2,0 bis 5,0	Tragsystem und Querschnittsklasse
Verbund	2,0 bis 5,0	Tragsystem und Querschnittsklasse
Holz	2,0 bis 3,0	Duktilität der Verbindungen
Mauerwerk	2,0 bis 2,5	erhöhtes Verformungsvermögen

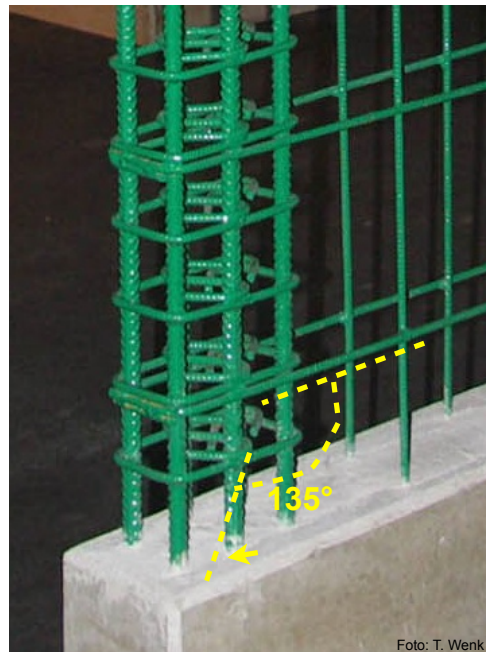
Konstruktive Gestaltung

- Die materialspezifischen Tragwerksnormen SIA 262 bis SIA 266 enthalten viele Regeln für die konstruktive Gestaltung bei duktilem Tragwerksverhalten.
- Das Ziel ist die Sicherstellung eines ausreichenden plastischen Verformungsvermögens der kritischen Bereiche im Tragwerk, d.h. dort wo sich unter Erdbebeneinwirkung grosse Verformungen ergeben werden.
- Als Beispiel werden die Regeln in SIA 262 Ziffer 5.7.1 für die konstruktive Gestaltung der Bügel, d.h. der horizontalen Umschnürungsbewehrung, im Randelement einer Stahlbetontragwand aufgezeigt:
 - Bügelabstand $s_h \leq \min(150 \text{ mm}, 6\varnothing_{sl})$: \varnothing_{sl} ist der Durchmesser der Vertikalstäbe
 - Bügeldurchmesser $\varnothing \geq 0,35 \varnothing_{sl,max}$
 - Endhaken der Bügel müssen eine 135°-Abbiegung aufweisen.
 - Vertikalstäbe im Abstand $\geq 200 \text{ mm}$ müssen durch eine Abbiegung der Bügel oder durch Querhaken gehalten werden.
 - Der erforderliche Bewehrungsgehalt der Bügel ist in Funktion der Normalkraft und der Beton- und Stahlfestigkeiten im Randelement zu bestimmen.

Konstruktive Gestaltung von Umschnürungsbügel



Druckversagen im Untergeschoss eines 24-stöckigen Hochhauses in Concepción, Chile im 2010:
Bügel mit 90°-Haken öffnen sich.



Demonstrationswand für duktilen Tragwerksverhalten gemäss SIA 262:
Bügel mit 135°-Haken öffnen sich nicht.