



SAKYAMUNI PAGODA in China / Quelle: Panoramio

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Martin Geiser

Inhalt

1. Einleitung

- ▶ BFH in Biel, Bildungsangebot, WB und F+E für die Holzwirtschaft
- ▶ Erdbebengefährdung und Erdbebenrisiko
- ▶ Grundbegriffe
- ▶ Verbreitete Vorurteile im Bezug auf die Erdbebensicherheit

2. Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

- ▶ Erdbebengerechter Entwurf
- ▶ Einwirkungen und Antwortspektrum
- ▶ Tragwerksanalyse
- ▶ Erdbebenbemessung

3. Schlussfolgerungen

Berner Fachhochschule BFH

Bachelor of Science in Holztechnik

Vertiefungen:

- Timber Structures and Technology
- Product and Process Management

Master of Science in Wood Technology

Internationales Masterstudium in Zusammenarbeit mit der Hochschule Rosenheim (DE)

Master of Science in Engineering

Kooperation der Fachhochschulen Schweiz

Höhere Fachschule Holz Biel

Dipl. Techniker/-in HF Holztechnik

Vertiefungen:

- Holzbau
- Schreinerei/Innenausbau
- Holzindustrie/Handel

Weitere Abschlüsse

- Holzbau-Vorarbeiter/-in mit Diplom
- Holzbau-Polier/-in mit eidg. Fachausweis
- Holzbau-Meister/-in mit eidg. Diplom
- Holzfachleute mit eidg. Fachausweis

MAS Holzbau, CAS Bauen mit Holz, CAS Bauphysik im Holzbau, CAS Brandschutz im Holzbau, CAS Brandschutz Architektur, CAS Digitale Vernetzung im Holzbau, CAS Holz-Tragwerke

Nachdiplomstudium HF Unternehmensführung

Kurse, Tagungen, Workshops, Seminare

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Weiterbildungskurs

Erdbebengerechte Holzbauten für Holz- und Bauingenieure

- ▶ 1. Durchführung 2015 (18 TN)
- ▶ 2. Durchführung 2016 (15 TN)
- ▶ Nächste Durchführung 2018
- ▶ Teilnehmerzahl begrenzt
- ▶ 8 Kurstage
- ▶ 6 ECTS




Erdbebengerechte Holzbauten

Vertiefte Weiterbildung für Holz- und Bauingenieure
August 2015 – Januar 2017, Biel

Partner:

Hauptsponsor:

GVB
Wir verbinden Sie mit uns

Co-Sponsor:

rothoblaas

Weiterbildung

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences



Berner Fachhochschule in Biel, F+E

Drei Institute

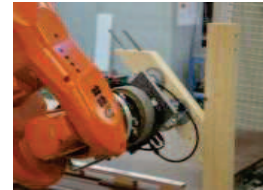
- Institut für Werkstoffe und Holztechnologie
- Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur
- Institut für Siedlungsentwicklung und Infrastruktur

Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur - Kompetenzbereiche

- ▶ Tragstrukturen
- ▶ Bauen im Bestand und Denkmalpflege
- ▶ Bauphysik und Energie
- ▶ Fenster, Türen und Fassadentechnik
- ▶ Integrierte Planung und Produktion
- ▶ Marktforschung und Management
- ▶ Holzbau

Personal insgesamt

- ▶ 27 Dozierende
- ▶ 70 Wiss. MA / Assistierende
- ▶ Total ca. 100 Mitarbeitende

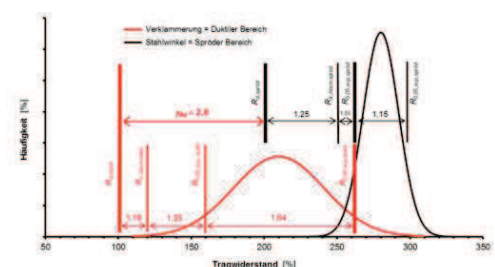
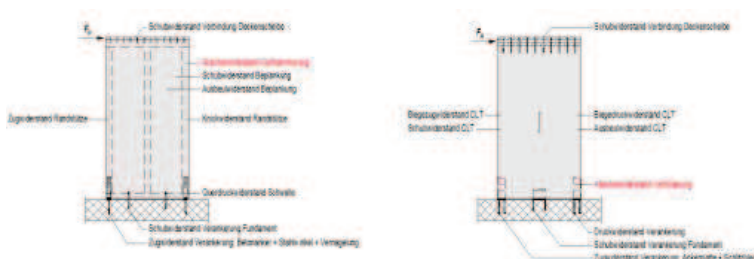


Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences



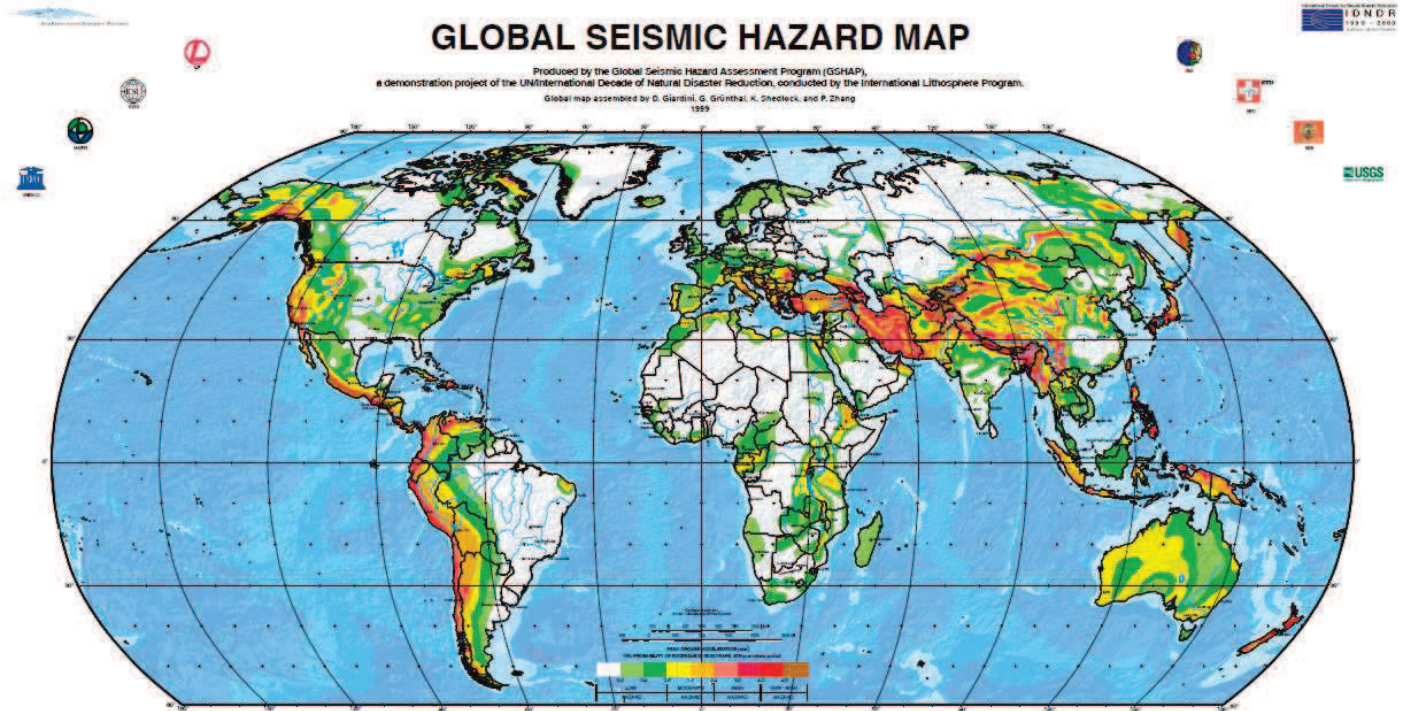
Institut für Holzbau, Tragwerke und Architektur

- ▶ Forschungsprojekt zum Thema Erdbeben im Holzbau:
Erdbebenbemessung von Holzbauwerken nach dem Konzept des duktilen Tragwerksverhalten, 2015 – 2017
- ▶ Partner aus Forschung: EMPA, ETHL, EiVD
- ▶ Partner aus Wirtschaft: 6 Holzbaufirmen + Rothoblaas
- ▶ Ziel: Abklärungen zur praktischen Umsetzung der Kapazitätsbemessung im Holzbau unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit und Bestimmung des Handlungsbedarfs
- ▶ Themen: Duktiles Verhalten, Hierarchie der Tragwiderstände, Wirtschaftlichkeit

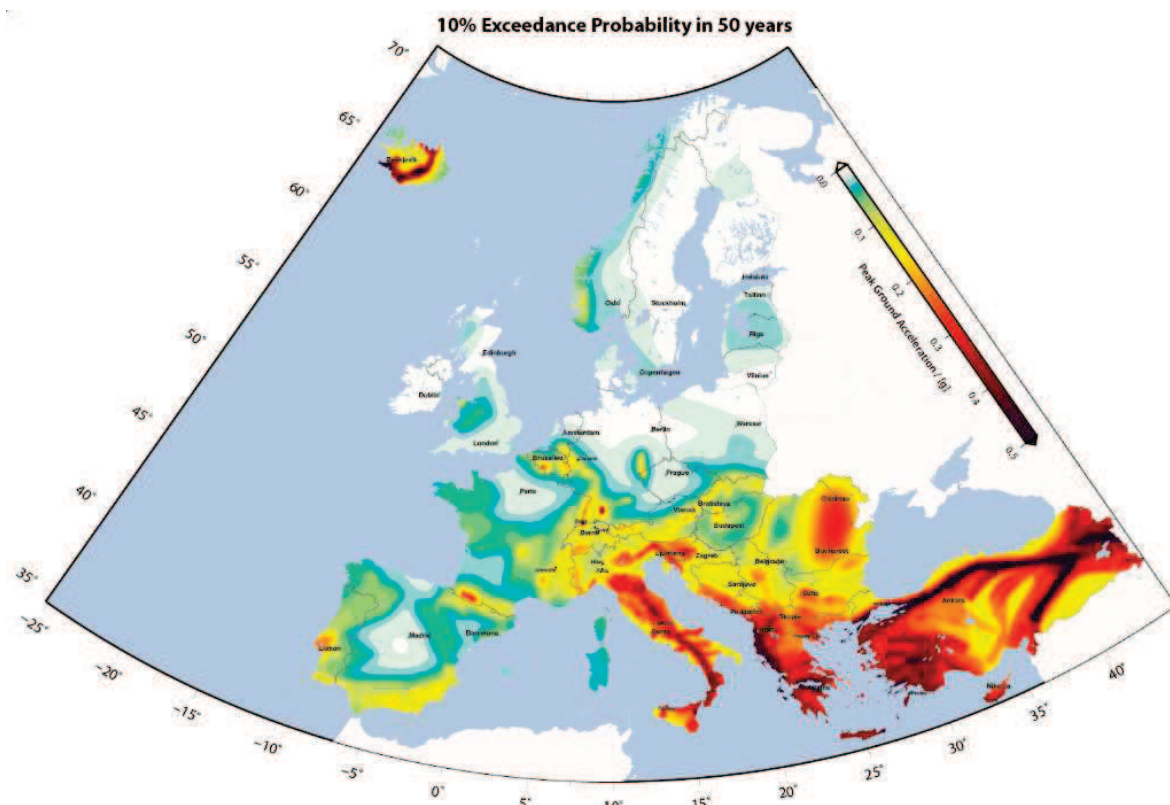


Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences





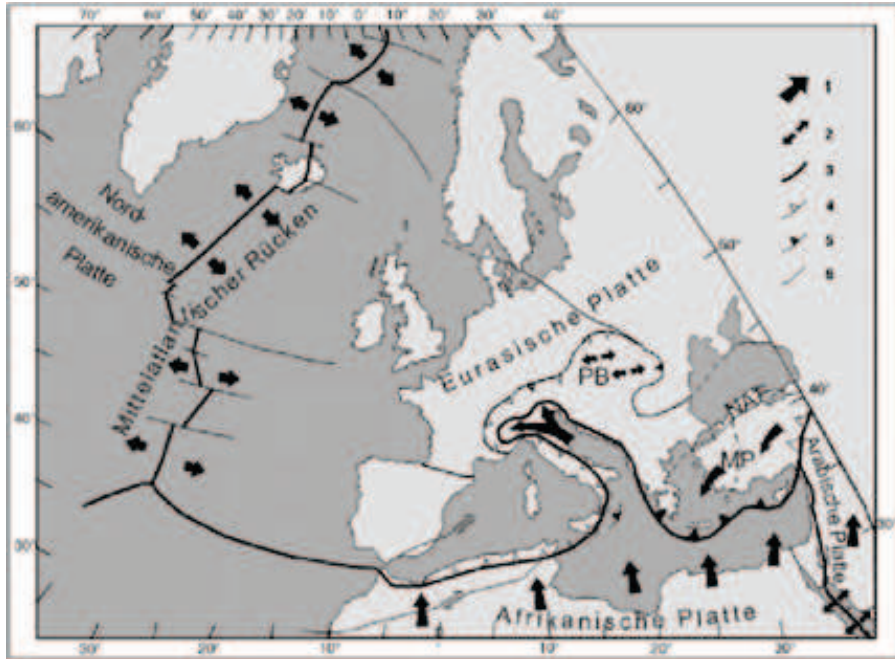
(Quelle: Giardini D. et al.. (1999), GSHM)



(Quelle: www.efehr.org)

Erdbebengefährdung in Europa

- ▶ Plattengrenze zwischen afrikanischer und eurasischer Platte
- ▶ Der apulische Sporn verschiebt sich innerhalb eines Jahres um ca. 4 bis 8 mm in Richtung eurasischer Platte

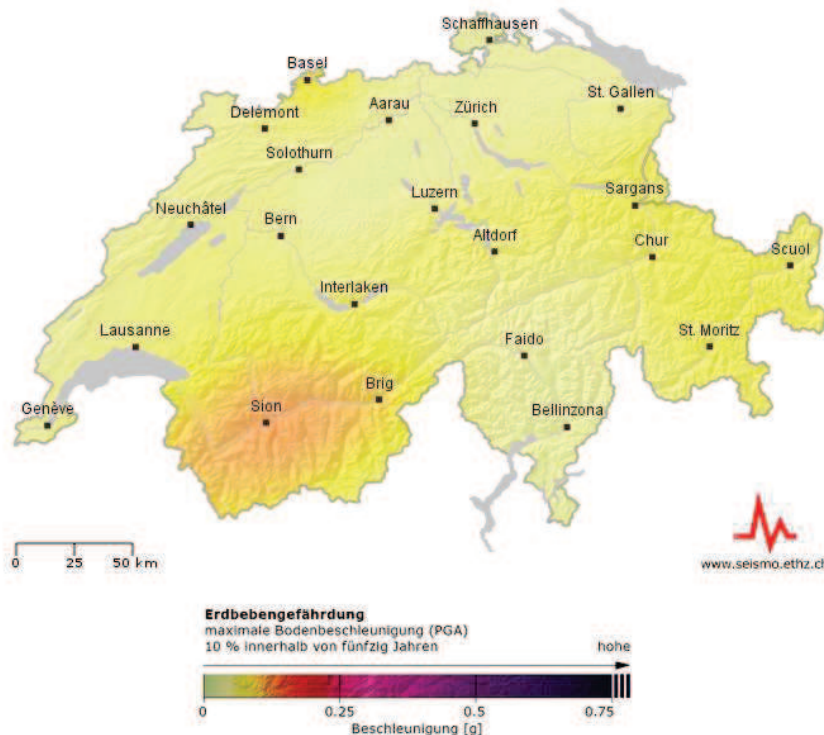


(Quelle: Schweizerischer Erdbeendienst SED)

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebengefährdung in der Schweiz

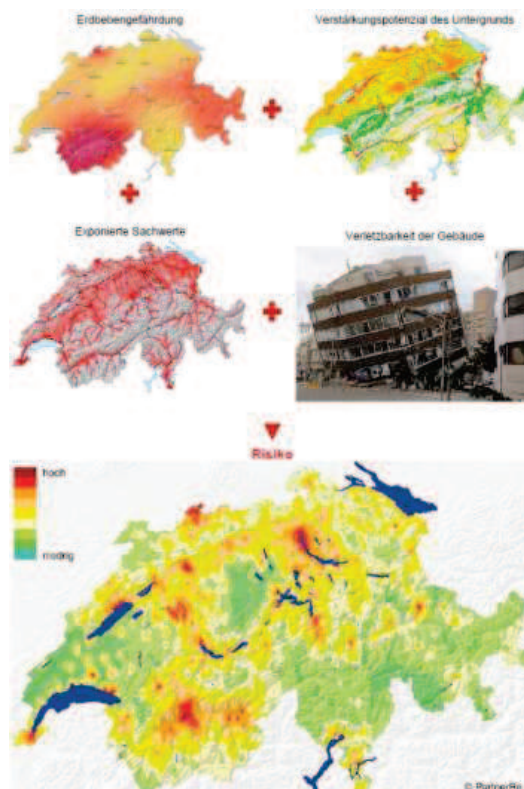
- ▶ Maximale Bodenbeschleunigung (PGA), 10% innerhalb von fünfzig Jahren



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Definition des Risikos

- Das Risiko ist die Summe der erwarteten Schäden in einem Zeitraum von zum Beispiel 100 Jahren:
- RISIKO = Erdbebengefährdung x Bodenbeschaffenheit x Exponierte Sachwerte x Verletzbarkeit**
- Die Verletzbarkeit der Bauwerke ist abhängig von der Bauweise und den für die Erdbebensicherung getroffenen baulichen Massnahmen



(Quelle: Karten der Baugrunderklassen, BAFU 2015)

- Historische Erdbeben in der Schweiz

Ort	Magnitude	Intensität	Datum	Lat. Nord	Long. West
Basel (BS) mit starkem Nachbeben	6.6	IX	18.10.1356	47.47	7.6
Churwalden (GR)	6.2	VIII	03.09.1295	46.78	9.54
Stalden-Visp (VS) mit starkem Nachbeben	6.2	VIII	25.07.1855	46.23	7.85
Aigle (VD) mit starkem Nachbeben	5.9	VIII	11.03.1584	46.33	6.97
Unterwalden (NW)	5.9	VIII	18.09.1601	46.92	8.36
Ardon (VS)	5.8	VII	04.1524	46.27	7.27
Sierre (VS) mit starkem Nachbeben	5.8	VIII	25.01.1946	46.35	7.4
Brig-Naters (VS)	5.7	VIII	09.12.1755	46.32	7.98
Altdorf (UR)	5.7	VII	10.09.1774	46.85	8.67
Ftan (GR)	5.4	VII	03.08.1622	46.82	10.23

(Quelle: Schweizerischer Erdbebedienst SED)



Auch in der Schweiz sind grosse Erdbebenkatastrophen möglich!

- ▶ Starke Erdbeben wie in Japan, in der Türkei oder in Italien sind möglich, sie sind aber seltener
- ▶ Über 90% der Bauwerke in der Schweiz weisen eine unbekannte und oft ungenügende Erdbebensicherheit auf
- ▶ Moderne Erdbeben-Baunormen sind relativ jung und werden z.T. ignoriert oder nicht vollumfänglich eingehalten
- ▶ Das Erdbebenrisiko in der Schweiz wird daher jeden Tag grösser

Sion/Champsec, 1930



(Quelle: BAFU, Sven Heunert)

Sion/Champsec, 2005



Auch die Schweiz ist gefährdet – Vorbereitung im Kanton Wallis

- ▶ Starkes Erdbeben alle 80...100 Jahre, das letzte in 1946
- ▶ Gemäss Schätzungen werden ca. 30'000 Gebäude beschädigt (Aquila 2009: 70'000 Gebäude wurden auf Bewohnbarkeit beurteilt)
- ▶ ... ca. 100'000 « Obdachlose »
- ▶ Ausbildung von Ingenieuren zur Gebäudebeurteilung nach einem Erdbeben (Ziel: 150 ausgebildete Fachleute)





Magnitude M

Die Magnitude M ist ein Mass für die Herdenergie, die in Form von Wellen abgestrahlt wird. Die Werte werden mit arabischen Ziffern auf der Richter-Skala ausgedrückt (+1 = 30x mehr Energie / 10x mehr Bodenbewegung)

Intensität I

Die Intensität I ist ein Mass für die lokale Wahrnehmbarkeit und Zerstörungskraft. In Europa wird die Intensität anhand der EMS-98 erfasst. Diese wird in römischen Ziffern von I bis XII angegeben.

EMS 98

Die Europäische Makroseismische Skala dient zur Einschätzung der Intensität von Erdbeben. Sie berücksichtigt systematisch die Auswirkungen auf Bauwerke mit verschiedenen Bautypen.

(Quelle: Schweizerischer Erdbebendienst SED)



- Magnitude, Epizentraldistanz, Bodenbeschleunigung und -verschiebung – Richtwerte für die Schweiz

Erdbebenzone	Beschleunigung $a_{gd} S$ [m/s ²]	Verschiebung U_{gd} [mm]	Magnitude	Epizentraldistanz
Z1	0,6 - 0,8	24 - 65	4 - 5	5 - 20 km
Z2	1,0 - 1,4	40 - 110	4,5 - 5,5	10 - 25 km
Z3a	1,3 - 1,8	52 - 140	5 - 6	10 - 25 km
Z3b	1,6 - 2,2	64 - 170	5 - 6	5 - 20 km

(Quelle: Thomas Wenk, Erdbeben – auch eine Gefahr in der Schweiz, Holzbautag Biel 2013)

Erfahrung...



≠



≠



(Quellen : Heidenhaus 1424 in Mühlebach / Haus in Les Bois (J. Bélat) / Grand Chalet 1756 in Rossinière (Wikipedia) / Haus in Steinhausen (Lignum))

rothoschool

Relevanz von einigen Vorteilen des Holzes...

Holz ist ein leichter Baustoff

- ▶ Ja, aber zur Verbesserung der Schalldämmung und der thermischen Behaglichkeit wird Masse hinzugefügt. Ein moderner Geschossdeckenaufbau ist 2 bis 5x schwerer als eine einfache Balkenlage.
- ▶ Gleiches gilt für Flachdächer (Kies, Begrünung)
- ▶ Nutz- und Schneelasten sind für alle Bauarten gleich

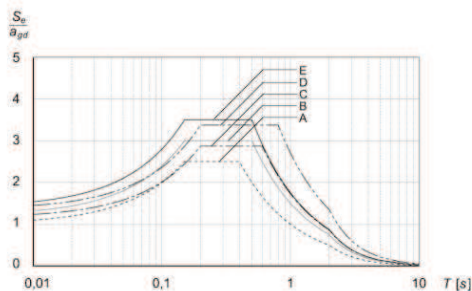
Holz hat eine niedrige Steifigkeit

- ▶ Ja, dies führt aber zu längeren Grundswingzeiten. Aus diesem Grund weisen kleine Holzgebäude oft eine ungünstige Grundswingzeit (T_1 «auf dem Plateau»)
- ▶ **Argumente aus der Tradition werden auf moderne Bauweisen übertragen, ohne den veränderten Kontext zu berücksichtigen**

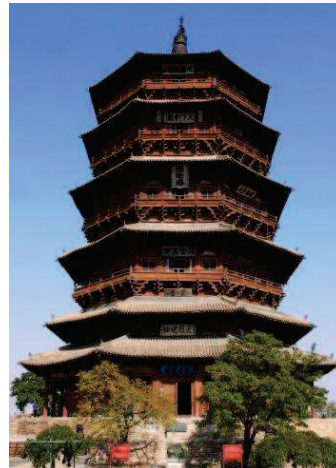
Nur hohe Gebäude sind betroffen...



Chalet in Stalden, VS



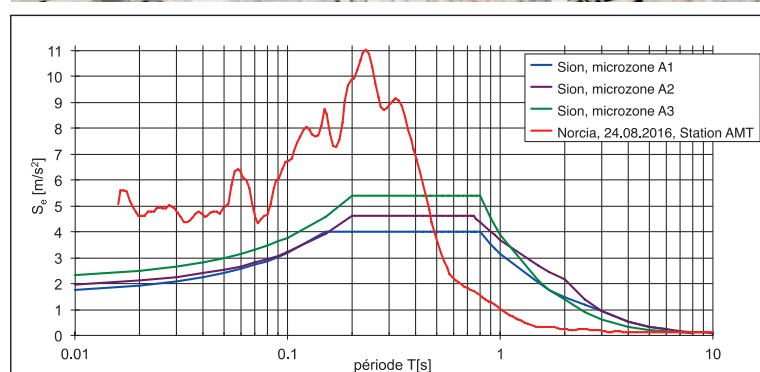
(Quellen: Schweizerischer Erdbebendienst SED, Norm SIA 265, Wikipedia)



Sakyamuni Pagoda, Japan
Gesamthöhe 67,31 m
Entspricht 20 Stockwerken
Gebaut in 1056
Hat mehreren starke Erdbeben überlebt

Nur hohe Gebäude sind betroffen...

- ▶ Campanile von Amatrice nach dem Erdbeben vom 24.08.2016, M 6,2
- ▶ Elastisches Antwortspektrum der betroffene Zone
- ▶ Vergleich mit Schweizer Spektren für die Stadt Sion

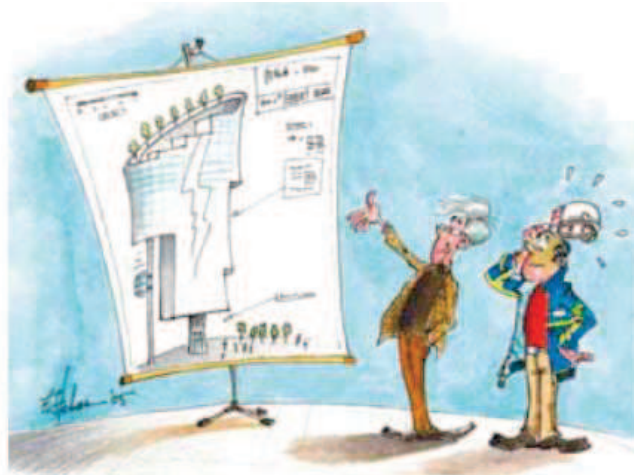


(Quellen: Accélérogramme SED ; Spectre Pierino Lestuzzi ; Amatrice Spiegel.de)



Erdbebengerechter Entwurf

- „Erdbebenmässige“ Fehler und Mängel beim konzeptionellen Entwurf des Tragwerks können durch eine auch noch so ausgeklügelte Berechnung und Bemessung nicht kompensiert werden! (Zitat Prof. Bachmann)



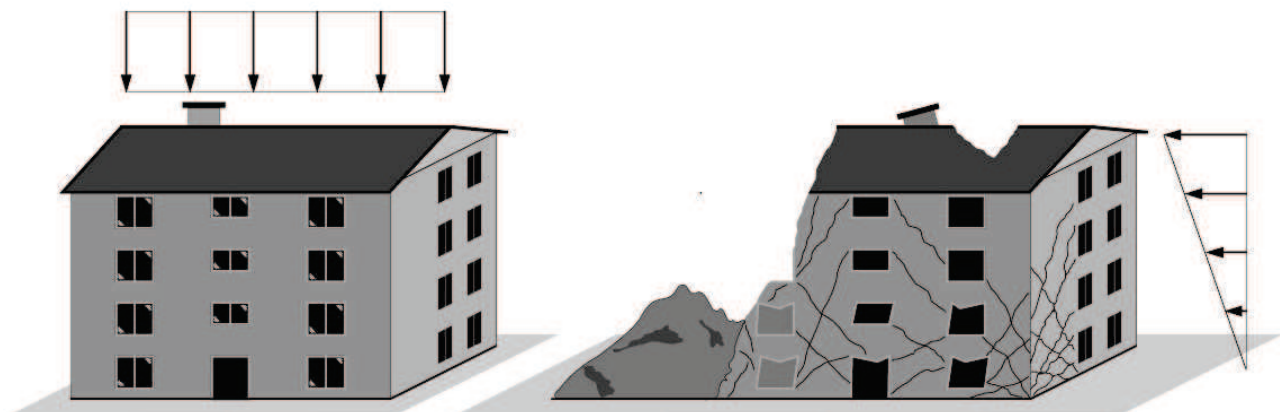
- **Enge Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur bereits im frühesten Entwurfsstadium**

(Quelle: Hugo Bachmann, Erdbebengerechter Entwurf von Hochbauten, BWG, 2002 / «Erdbebensicheres Bauen in der Schweiz» BAFU 2006)



Erdbebengerechter Entwurf

- **Horizontal denken und nicht nur vertikal, bereits in den ersten Entwurfsphasen**
- So können unnötige Mehrkosten vermieden werden



(Quelle: seismoatschool.ethz.ch)

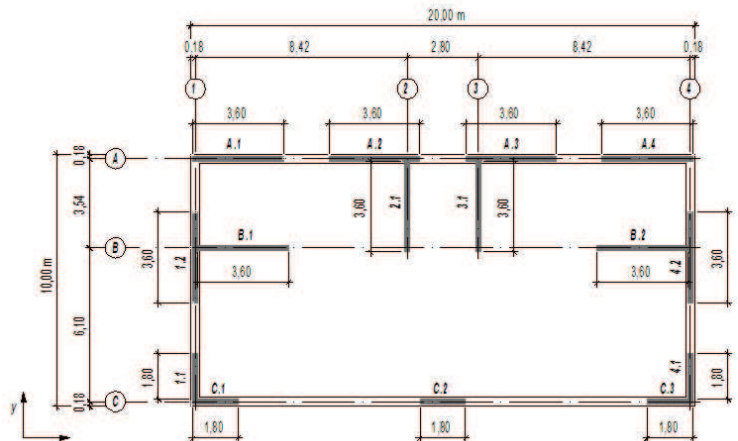
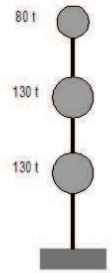
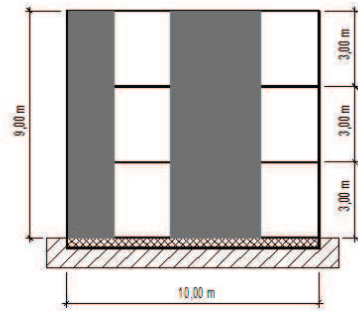
Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebengerechter Tragwerksentwurf

- Ausreichend viele und gut verteilte Aussteifungselemente vorsehen
- Regelmässiges Tragwerk entwerfen
- **Vorsicht mit dem « soft-storey »**



(Quelle: Hugo Bachmann, Conception parasismique des bâtiments, OFEG, 2002)

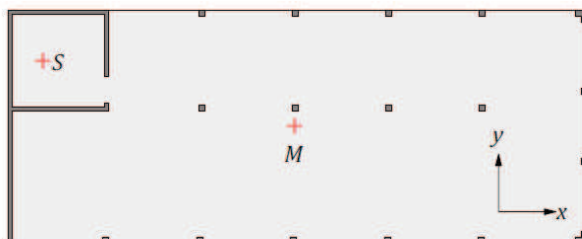


rothoschool

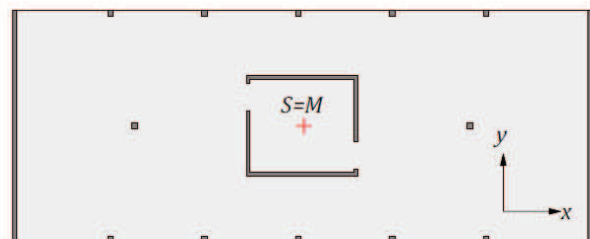
Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebengerechter Tragwerksentwurf

- Massenzentrum **M** und Steifigkeitszentrum **S** sollen möglichst deckungsgleich sein



Figur 36:
Massen- und Steifigkeitszentrum nicht deckungsgleich:
Es resultieren starke Torsionskräfte.



Figur 37:
Massen- und Steifigkeitszentrum deckungsgleich:
Es entsteht kaum Torsion aus Erdbeben.

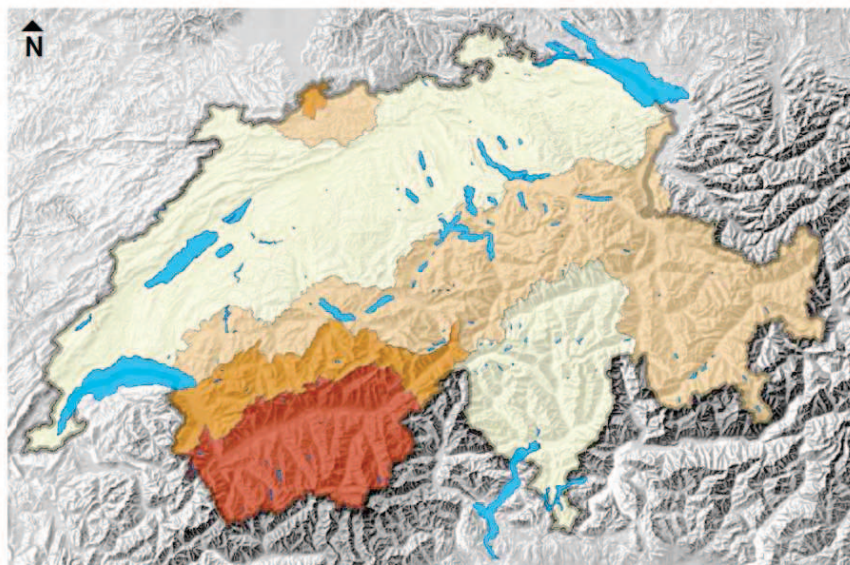
(Quelle: Lignum-Dokumentation, Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten)

- Im Holzbau ist es z.T. möglich, durch unterschiedliche Ausführungen der Wände, die Position des Steifigkeitszentrums **S** zu steuern

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebeneinwirkungen

- Erdbebenzonen und entsprechende Bemessungswerte der horizontalen Bodenbeschleunigung a_{gd}



Erdbebenzone nach SIA 261 (2014)

Zone 1 Zone 2 Zone 3a Zone 3b

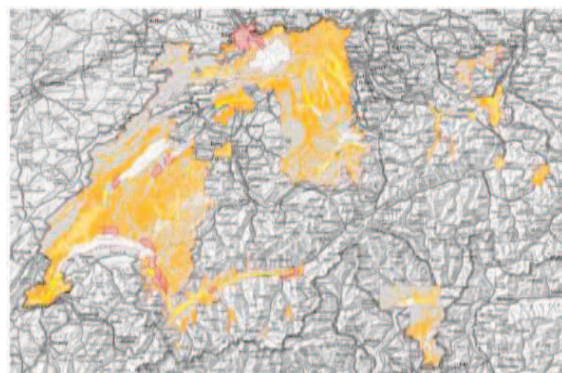
Z1	$a_{gd} = 0,6 \text{ m/s}^2$
Z2	$a_{gd} = 1,0 \text{ m/s}^2$
Z3a	$a_{gd} = 1,3 \text{ m/s}^2$
Z3b	$a_{gd} = 1,6 \text{ m/s}^2$

(Quellen: Norm SIA 261 / Karten der Baugrundklassen, BAFU 2015)

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebeneinwirkungen

- Baugrundklassen und entsprechende Bodenparameter S



Baugrundklasse	$v_{s,30}$ [m/s]	N_{60}	S_u [kPa]	Beschreibung
A	> 800	—	—	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation mit höchstens 5 m Lockergestein an der Oberfläche
B	500...800	> 50	> 250	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steilem Ton mit einer Mächtigkeit von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe
C	300...500	15...50	70...250	Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steilem Ton mit einer Mächtigkeit von einigen zehn bis mehreren hundert Metern
D	< 300	< 15	< 70	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Lockergestein (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichen bis steilem kohäsivem Lockergestein
E	—	—	—	Oberflächliche Schicht von Lockergestein mit v_s -Werten nach C oder D und veränderlicher Dicke zwischen 5 m und 20 m über einem Bodenmaterial mit $v_s > 800$ m/s
F	—	—	—	Strukturempfindliche, organische oder sehr weiche Ablagerungen (z.B. Torf, Seekreide, weicher Lehm) mit einer Mächtigkeit über 10 m

Baugrundklasse	Beschreibung des stratigraphischen Profils	$v_{s,30}$ [m/s]	N_{60} [Schlagzahl/0,3m]	c_u [kN/m²]	S	T_R [s]	T_C [s]	T_D [s]	I_p [m]
A	Fels oder andere felsähnliche geologische Formation mit höchstens 5 m Lockergestein an der Oberfläche	> 800	—	—	1,00	0,15	0,4	2,0	600
B	Ablagerungen von sehr dichtem Sand, Kies oder sehr steilem Ton mit einer Mächtigkeit von mindestens einigen zehn Metern, gekennzeichnet durch einen allmählichen Anstieg der mechanischen Eigenschaften mit der Tiefe	500...800	> 50	> 250	1,20	0,15	0,5	2,0	500
C	Ablagerungen von dichtem oder mitteldichtem Sand, Kies oder steilem Ton mit einer Mächtigkeit von einigen zehn bis mehreren hundert Metern	300...500	15...50	70...250	1,15	0,20	0,6	2,0	400
D	Ablagerungen von lockerem bis mitteldichtem kohäsionslosem Lockergestein (mit oder ohne einige weiche kohäsive Schichten), oder von vorwiegend weichen bis steilem kohäsivem Lockergestein	< 300	< 15	< 70	1,35	0,20	0,8	2,0	300
E	Oberflächliche Schicht von Lockergestein mit v_s -Werten nach C oder D und veränderlicher Dicke zwischen 5 m und 20 m über steilem Bodenmaterial mit $v_s > 800$ m/s	—	—	—	1,40	0,15	0,5	2,0	500
F	Strukturempfindliche, organische oder sehr weiche Ablagerungen (z.B. Torf, Seekreide, weicher Lehm) mit einer Mächtigkeit über 10 m	—	—	—	—	—	—	—	—

(Quellen: Norm SIA 261 / Karten der Baugrundklassen, BAFU 2015)

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebeneinwirkungen

- Bauwerksklassen (BWK) nach SIA 261 und EC 8 – Bedeutungsbeiwerte γ_f

Tabelle 25. Bauwerksklassen und Bedeutungsbeiwerte

BWK	Merkmale	Beispiele	γ_f
I	- Personenbelegung $P_B \leq 50$ Personen - Keine grösseren Menschenansammlungen - Keine besonders wertvollen Güter und Einrichtungen - Schädigung der Bevölkerung oder der Umwelt ausgeschlossen	- Wohn-, Büro- und Gewerbegebäude - Industrie- und Lagergebäude - Parkgaragen - Brücken von untergeordneter Bedeutung nach einem Erdbeben (z.B. Fusswegbrücken und land- und forstwirtschaftlich genutzte Brücken, sofern sie nicht über Verkehrswege von erheblicher Bedeutung führen)	1,0
II	- Personenbelegung $P_B > 50$ Personen - Grössere Menschenansammlungen wahrscheinlich - Besonders wertvolle Güter und Einrichtungen - Bedeutende Infrastrukturfunktion	- Spitäler samt Anlagen und Einrichtungen, sofern sie nicht der Bauwerksklasse III zuzuordnen sind - Einkaufszentren, Sportstadien, Kinos, Theater, Schulen und Kirchen - Gebäude der öffentlichen Verwaltung - Brücken von erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben, sowie Brücken, die über Verkehrswege mit erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben führen - Stützmauern und Böschungen im Bereich von Verkehrswegen mit erheblicher Bedeutung nach einem Erdbeben - Bauwerke sowie Anlagen und Einrichtungen für Versorgung, Entsorgung und Telekommunikation, sofern sie nicht der Bauwerksklasse III zuzuordnen sind - Hochkamine	1,2
III	Lebenswichtige Infrastrukturfunktion	- Ataktpfänger samt Anlagen und Einrichtungen - Bauwerke sowie Anlagen und Einrichtungen für den Katastrophenschutz (z.B. Feuerwehrgelände oder Ambulanzgaragen) - Brücken von grosser Bedeutung für die Zugänglichkeit eines Gebiets nach einem Erdbeben - Stützmauern und Böschungen im Bereich von Verkehrswegen mit grosser Bedeutung für die Zugänglichkeit ausgewählter Bauwerke oder eines Gebiets nach einem Erdbeben - Lebenswichtige Bauwerke für Versorgung, Entsorgung, Telekommunikation	1,4

Tabelle 4.3: Bedeutungskategorien für Hochbauten

Bedeutungskategorie	Bauwerke
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z. B. landwirtschaftliche Bauten usw.
II	Gewöhnliche Bauwerke, die nicht unter die anderen Kategorien fallen
III	Bauwerke, deren Widerstand gegen Erdbeben wichtig ist im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen, z. B. Schulen, Versammlungsräume, kulturelle Einrichtungen usw.
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit während Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung ist, z. B. Krankenhäuser, Feuerwachen, Kraftwerke usw.

ANMERKUNG: Die Bedeutungskategorien I, II und III oder IV entsprechen jeweils grob den Auswirkungskategorien CC1, CC2 und CC3, definiert in EN 1990-2002, Anhang B.

(5)P Der Wert von γ_f für die Bedeutungskategorie II muss definitionsgemäss gleich 1,0 sein.

ANMERKUNG: Die γ_f zugewiesenen Werte zur Verwendung in einem Land können in seinem nationalen Anhang festgelegt sein. Die Werte von γ_f dürfen für die verschiedenen Erdbebenzonen des Landes unterschiedlich sein, in Abhängigkeit von der Erdbebengefährdung und von Überlegungen hinsichtlich der öffentlichen Sicherheit (siehe Anmerkung zu 2.1(4)). Die empfohlenen Werte für γ_f für die Bedeutungskategorien I, III und IV sind gleich 0,8; 1,2 und 1,4.

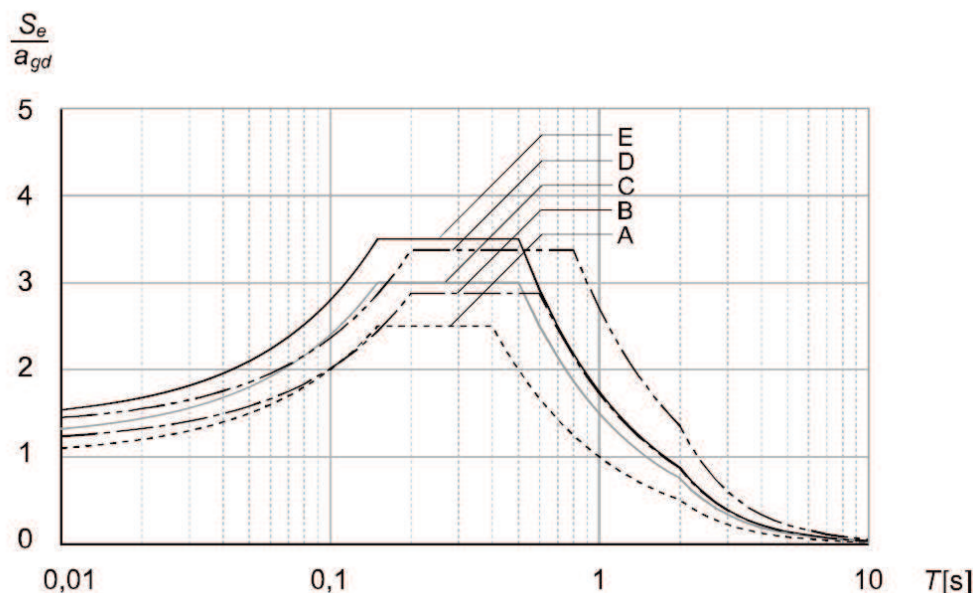
(Quellen: Norm SIA 261:2014 / EN 1998-1:2004)

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Antwortspektrum

- Angabe der horizontalen Beschleunigung S_e in Abhängigkeit der Grundschiebungzeit T_1 bzw. Schwingzeit T

Figur 18: Elastische Antwortspektren für $\xi = 0,05$

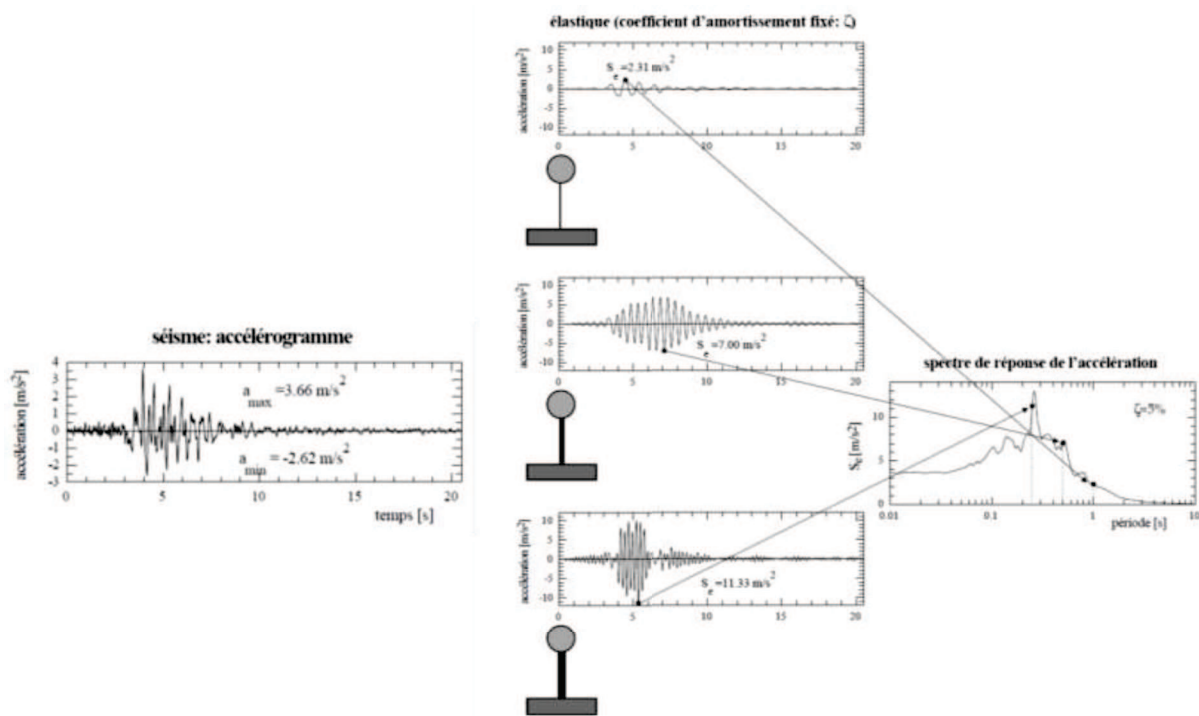


(Quelle: Norm SIA 261:2014)

Erdbaugerechtes Bauen mit Holz

Entstehung des elastischen Antwortspektrums

- Akzelerogramm und Antwortspektrum der Beschleunigung

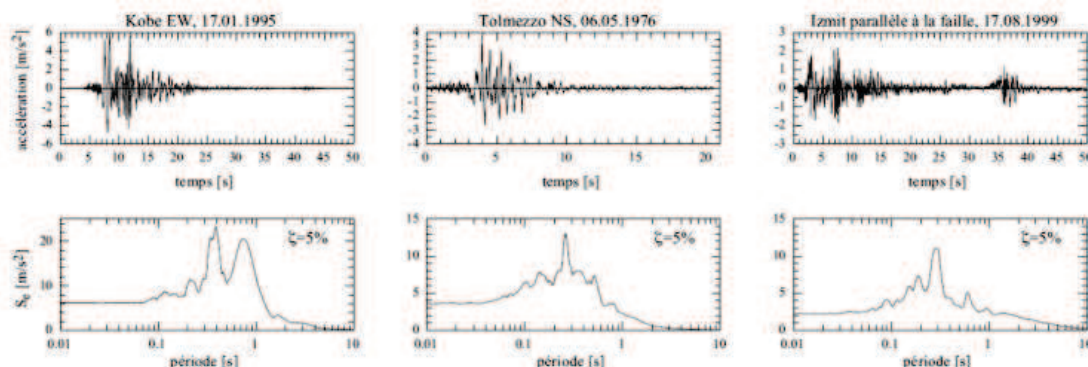


(Quelle: Lestuzzi, P. (2012), ETH Lausanne)

Erdbebugerehtes Bauen mit Holz

Entstehung des elastischen Antwortspektrums

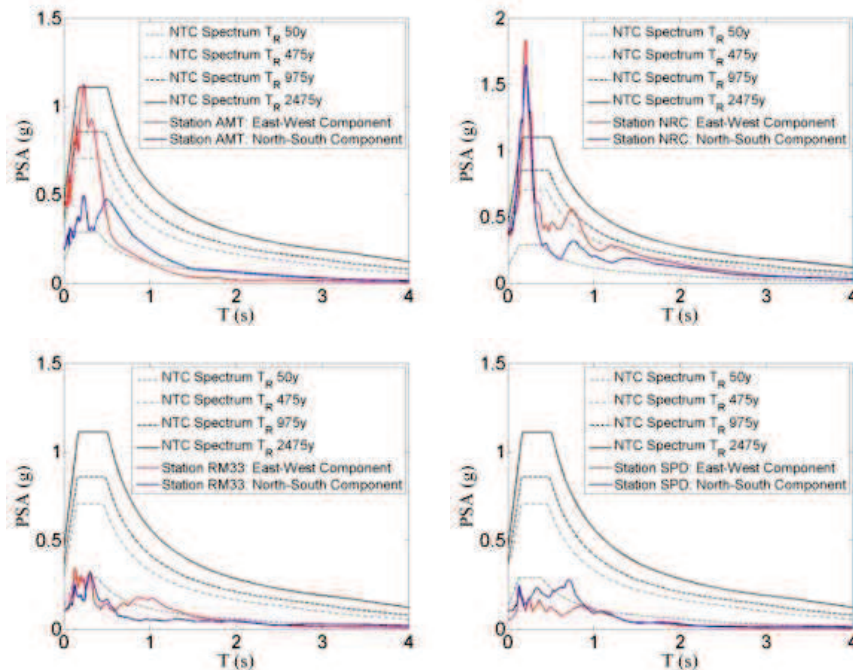
- Akzelerogramme und Antwortspektrum der Beschleunigung



- ▶ Man unterscheidet deutlich unterschiedliche Regionen:
- Für sehr kurze Perioden ist die spektrale Beschleunigung gleich der maximalen Bodenbeschleunigung.
- Für sehr lange Perioden wird die spektrale Beschleunigung sehr klein.
- Zwischen zwei Extremen erscheint eine Spanne von Perioden (grob zwischen 0,2 und 0,8 Sekunden) für welche die spektrale Beschleunigung höher ist als die des Bodens.

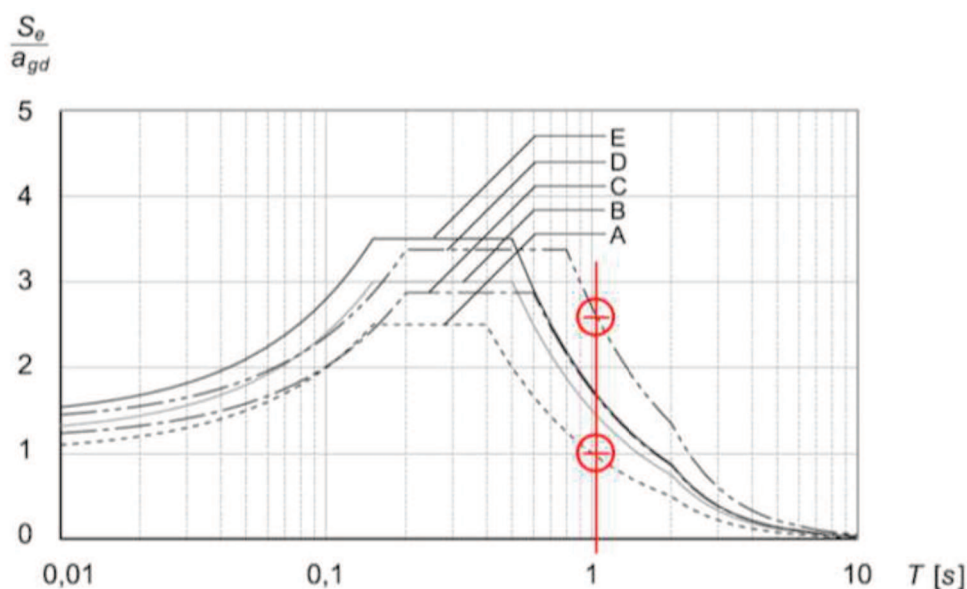
(Quelle: Lestuzzi, P. (2012), ETH Lausanne)

- Die Ordinatenwerte S_e sind Mittelwerte!
- «Echte Erdbeben haben die Normen nicht gelesen»



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

- Beträchtliche Bedeutung der Baugrundklasse, Beispiel bei $T_1 = 1$ s



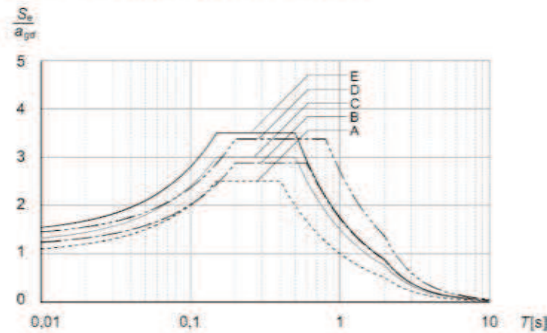
Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Antwortspektrum

- Der «aufsteigende Ast» wird in der Regel nicht verwendet
- Mögliche Ausnahme: Höhere Schwingungsformen im ASV

Figur 18: Elastische Antwortspektren für $\xi = 0,05$



(Quelle: Norm SIA 26:2014)

16.2.3.1 Die in Figur 18 dargestellten Antwortspektren der horizontalen Bodenbeschleunigung werden wie folgt bestimmt:

$$S_e = a_{gd} S \left[1 + \frac{(2,5 \eta - 1) T}{T_B} \right] \quad (0 \leq T \leq T_B) \quad (26)$$

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \eta \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (27)$$

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \eta \frac{T_C}{T} \quad (T_C \leq T \leq T_D) \quad (28)$$

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \eta \frac{T_C T_D}{T^2} \quad (T_D \leq T) \quad (29) \quad \text{rothoschool}$$

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Vom elastischen Antwortspektrum S_e zum Bemessungsspektrum S_d

- S_e Ordinatenwert des elastischen Antwortspektrums, Antwortspektren der horizontalen Bodenbeschleunigung [m/s²]
Im Plateaubereich beträgt S_e :

$$S_e = 2,5 a_{gd} S \eta \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (27)$$

- S_d Ordinatenwert des Bemessungsspektrums, Bemessungsspektrum der horizontalen Bodenbeschleunigung [-]
Wird aus S_e für 5% viskose Dämpfung unter Berücksichtigung des Verhaltensbeiwerts q und des Bedeutungsbeiwerts γ_f bestimmt. Im Plateaubereich beträgt S_d :

$$S_d = 2,5 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} \frac{S}{q} \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (32)$$

S_d gibt an, wieviel von den ständigen und quasi-ständigen Lasten horizontal anzusetzen sind:

16.5.2.4 Die horizontale Ersatzkraft infolge Erdbebeneinwirkung ist für jede Hauptrichtung wie folgt zu bestimmen:

$$F_d = S_d(T_1) \sum_j (G_k + \sum \eta_{2k} Q_k) \quad (41)$$

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse - Ermittlung der Grundschiwingzeit T_1

Unterschiedliche Möglichkeiten:

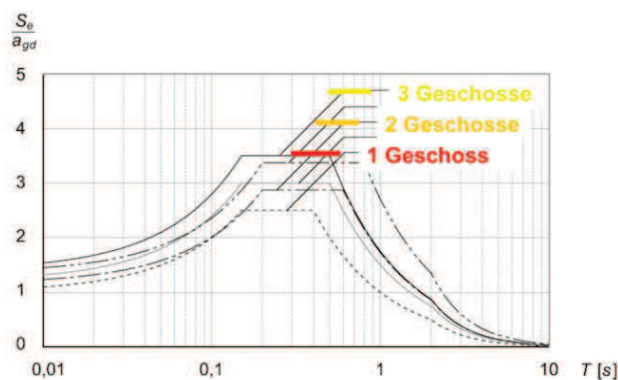
- ▶ Plateauwert
- ▶ Schätzformel (Gleichung SIA 261.39)
- ▶ Grundgleichung
- ▶ Vereinfachte Rayleigh-Methode (Gleichung SIA 261.40)
- ▶ Rayleigh-Methode
- ▶ Dynamische Analyse
- ▶ Immer abhängig von der Steifigkeit k und der Masse m

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse - Ermittlung der Grundschiwingzeit T_1

Plateauwert

- ▶ Empfehlung aus dem Forschungsprojekt WHFF 2012.04
- ▶ T_1 von 1- bis 3-geschossigen Holzrahmenbauten aufgrund von Berechnungen und mit Hilfe von Annahmen



- ▶ Auch höhere CLT-Gebäude mit T_1 auf dem Plateau
- ▶ Als Vergleich: Mauerwerksgebäude zwischen ca. 3 und 7 Geschossen mit T_1 auf dem Plateau

► Gleichung 261.39

16.5.2.3 Die Grundschiwingzeit T_1 (in s) von Gebäuden kann in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe h (in m) und der Art des Tragsystems abgeschätzt werden:

$$T_1 = C_t h^{0,75} \quad (39)$$

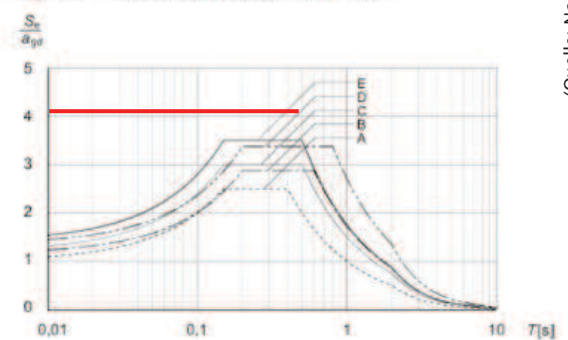
Für den Beiwert C_t gilt:

– biegebeanspruchte räumliche Stahlrahmen	0,085
– biegebeanspruchte räumliche Stahlbetonrahmen	0,075
– alle anderen Tragwerke	0,050.

- Ergibt sehr kurze Grundschiwingzeiten die mit den aufwendigen Berechnungen nicht gut übereinstimmen, mit Versuchsergebnissen jedoch schon (vgl. WHFF 2012.04)!

- Da der aufsteigende Ast nicht verwendet wird, führt Gleichung 261.39 in der Regel zum Plateauwert

Figur 18: Elastische Antwortspektren für $\xi = 0,05$



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

$$T = 2 \pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

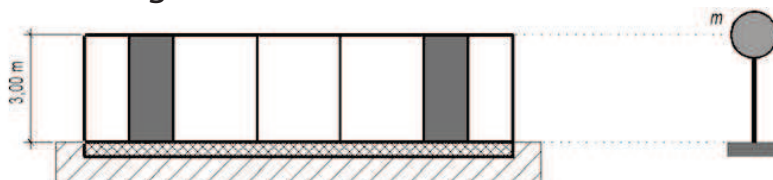
Mit:

T Schwingzeit [s]

m Masse [kg]

k Steifigkeit [N/m]

- Ideal bei 1-geschossigen Gebäuden (Einmassenschwinger, EMS) wie z.B. eingeschossige Hallen



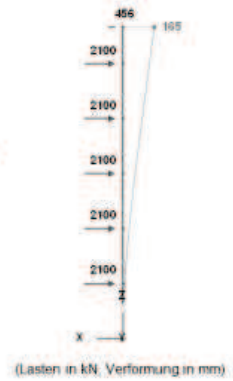
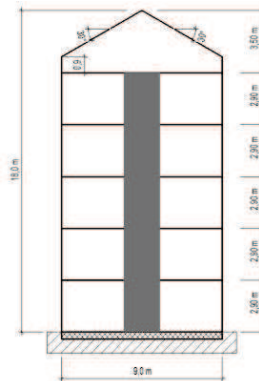
► Gleichung 261.40

Alternativ kann die Grundschiwingzeit T_1 (in s) für jede Hauptrichtung folgendermassen berechnet werden:

$$T_1 = 2\sqrt{u} \quad (40)$$

Dabei bezeichnet u (in m) die fiktive horizontale Auslenkung der Gebäudeoberkante unter den in horizontaler Richtung angesetzten ständigen und quasi-ständigen Lasten G_k bzw. $\psi/2 Q_k$.

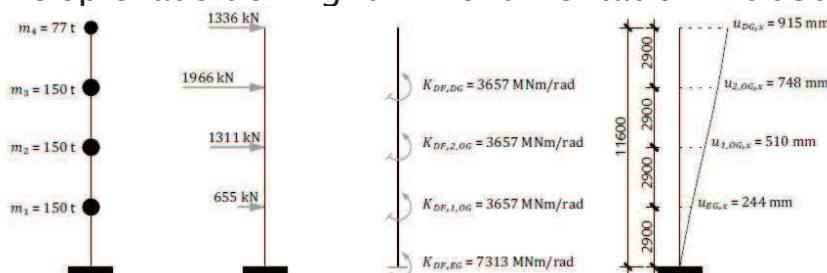
- Wurde aus der Grundgleichung abgeleitet
- Eignet sich gut für Abschätzungen und Kontrollen
- Beispiel mehrgeschossiger Massivbau mit Dachgeschoss in Holz



$$T_1 = 2\sqrt{u} = 2\sqrt{0.165} = 0.81 \text{ s}$$

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot u_i^2}{\sum_{i=1}^n F_{d,i} \cdot u_i}}$$

- Liefert zuverlässige Ergebnisse sofern die Grundannahmen stimmen
- Beispiel aus der Lignum Dokumentation Erdbebensichere Holzbauten



$$T_{1,x} = 2 \cdot \pi \cdot$$

$$\sqrt{\frac{150000 \text{ kg} \cdot ((0.244 \text{ m})^2 + (0.510 \text{ m})^2 + (0.748 \text{ m})^2) + 77000 \text{ kg} \cdot (0.915 \text{ m})^2}{655 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 0.244 \text{ m} + 1311 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 0.510 \text{ m} + 1966 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 0.748 \text{ m} + 1336 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 0.915 \text{ m}}}$$

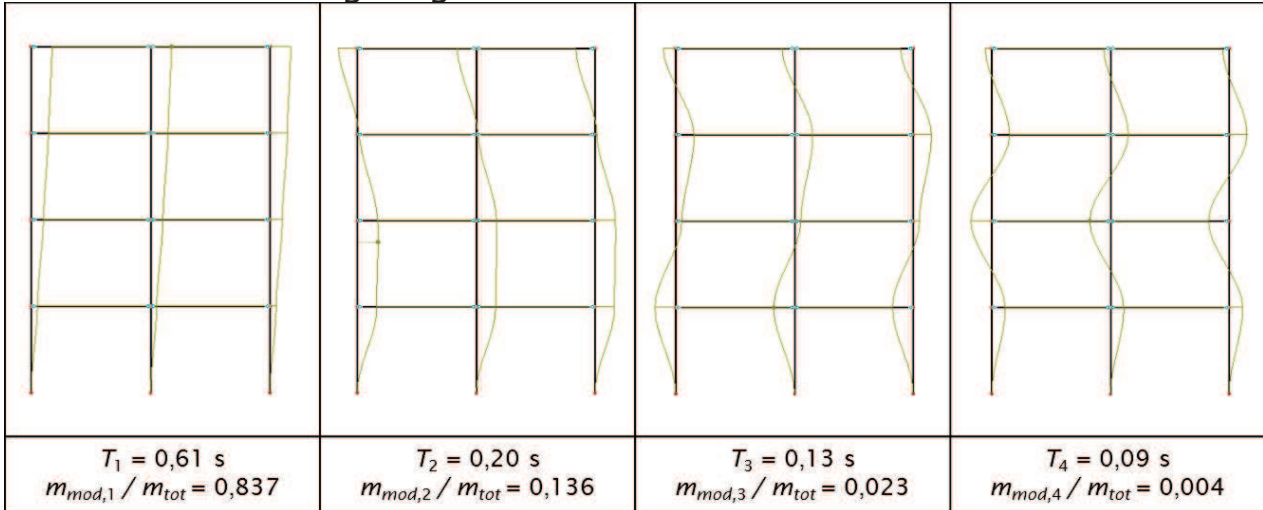
$$T_{1,x} = 1.48 \text{ s}$$

Erdbebensicheres Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse - Ermittlung der Grundschwingzeit T_1

Dynamische Analyse

- ▶ Mit Matrizenrechnung (in der Regel nur bei 2D-Modellen)
- ▶ Mit Hilfe einer Dynamik-Software (hier Dlubal RSTAB – DynamPRO, 2D)
- ▶ Liefert zuverlässige Ergebnisse sofern die Grundannahmen stimmen

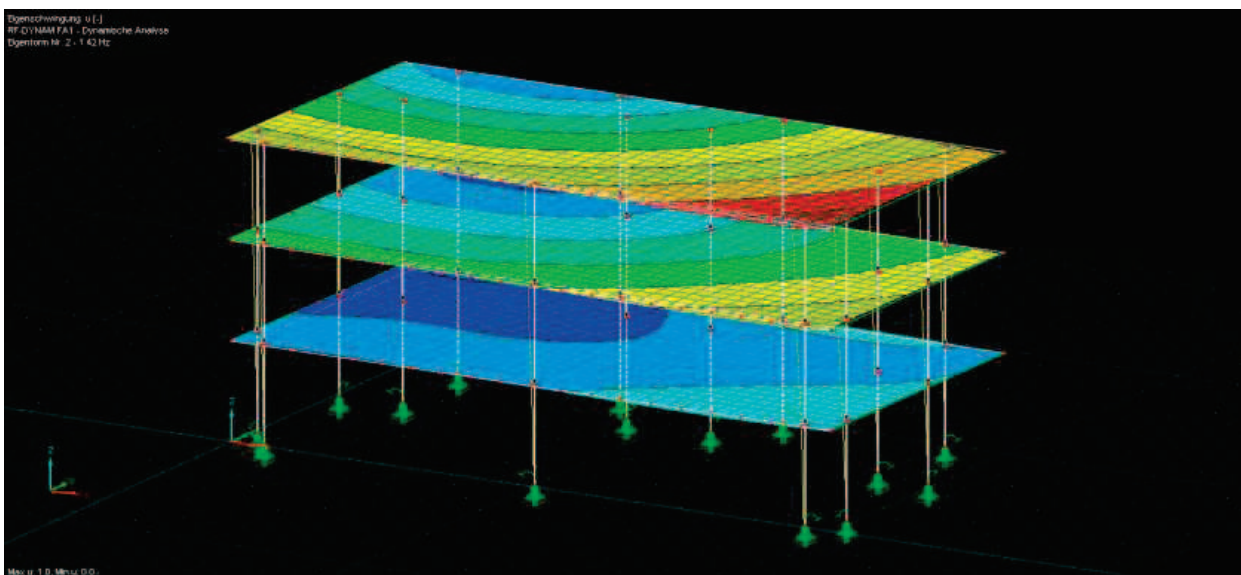


Erdbebensicheres Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse - Ermittlung der Grundschwingzeit T_1

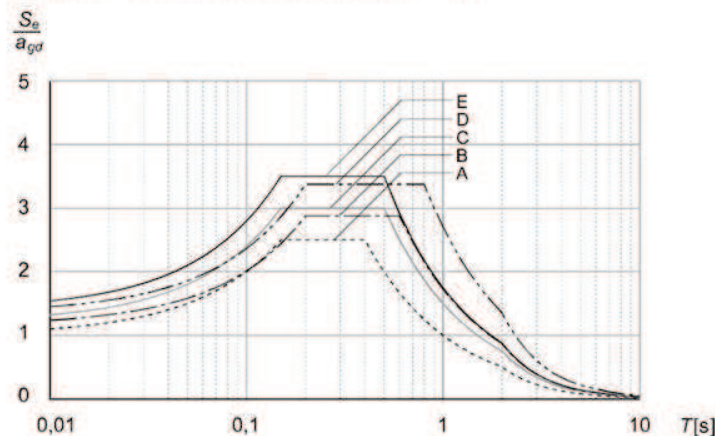
Dynamische Analyse

- ▶ Mit Hilfe einer Dynamik-Software (z.B. Dlubal RFEM – Dynam, 3D)



- ▶ T_1 **bestimmt das Gebäude**, nicht unsere Berechnungen, selbst wenn sie raffiniert sind!
- ▶ Eine **Unterschätzung** der Steifigkeiten führt zu Schnittkräften **auf der unsicheren Seite!**

Figur 18: Elastische Antwortspektren für $\xi = 0,05$

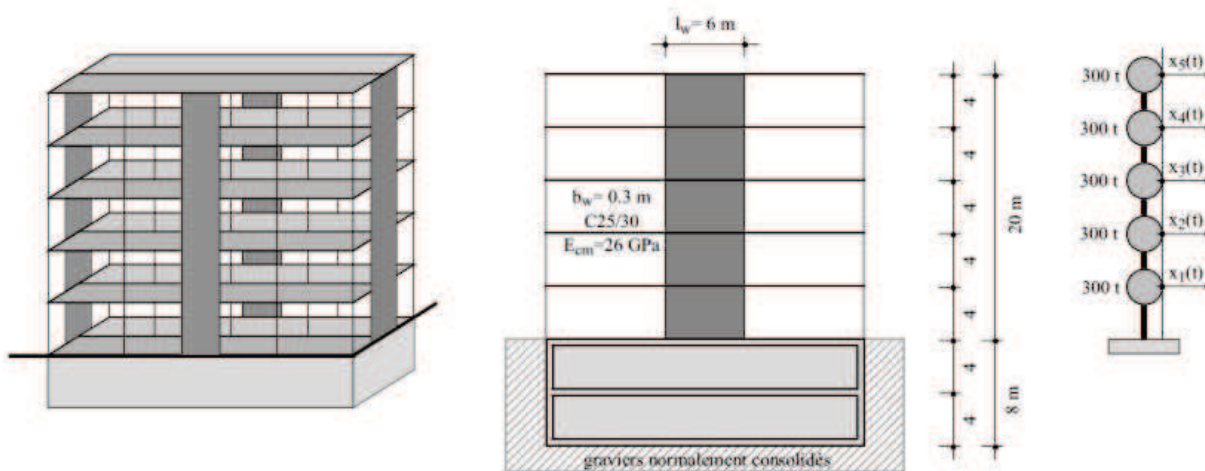


- ▶ **SIA 261: Ersatzkraftverfahren (EKV)**
- ▶ **EC8: Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren**
- ▶ Für Tragsysteme, die sich durch zwei ebene Tragwerksmodelle darstellen lassen und deren Verhalten durch Beiträge höherer Schwingungsformen nicht wesentlich beeinflusst werden.
- ▶ Nur bei regelmässigen Bauwerken mit $T_1 \leq 2$ s anwendbar
- ▶ **SIA 261: Antwortspektrenverfahren (ASV)**
- ▶ **EC8: Multimodales Antwortspektrumverfahren**
- ▶ Für alle Bauwerke anwendbar
- ▶ Bei Bauwerken, die die Kriterien zur Anwendung des EKV nicht erfüllen, **muss** das ASV angewendet werden
- ▶ Die Regelmässigkeitskriterien sind in den Normen beschrieben

Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Antwortspektrenverfahren (SIA 261)

- ▶ Multimodales Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Vorgehen an einem 5-geschossigen Bauwerk



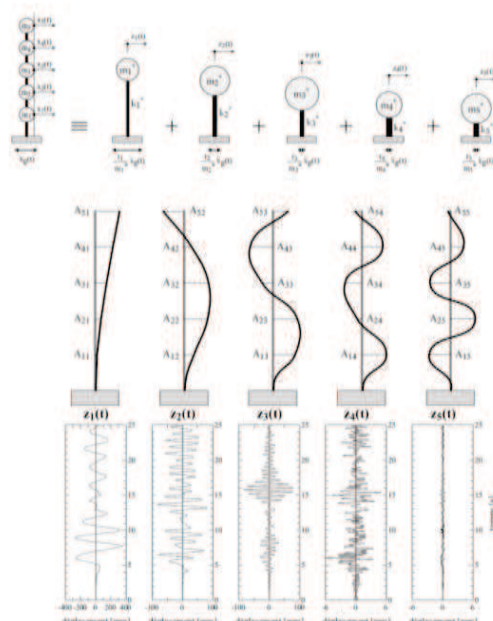
Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Antwortspektrenverfahren (SIA 261)

- ▶ Multimodales Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Vorgehen an einem 5-geschossigen Bauwerk

Modale Analyse

- ▶ Der Mehrmassenschwinger wird in eine Summe von einzelnen, unabhängigen Einmassenschwingern zerlegt = Modaler Zerlegungsprozess
- ▶ Die Maximalwerte von jedem Schwingungsmodus stimmen meistens in der Zeit nicht überein. Aus diesem Grund wird nicht summiert sondern gemäss der SRSS-Regel superponiert

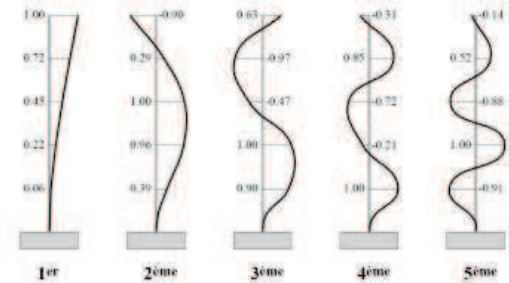
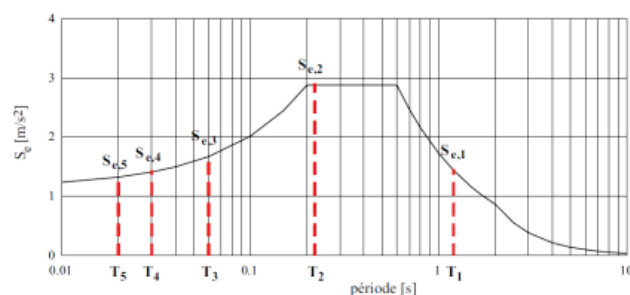


Tragwerksanalyse – Antwortspektrenverfahren (SIA 261)

- ▶ Multimodales Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Vorgehen an einem 5-geschossigen Bauwerk

Schwingungsformen zu berücksichtigen

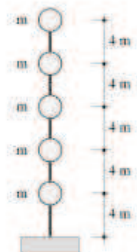
- ▶ Gemäss SIA u. EC: Die Summe der effektiven modalen Massen der berücksichtigten Schwingungsformen soll in der Regel mindestens **90%** der Gesamtmasse des Tragwerks erreichen



m = 300 t, classe de sols C
EI = 30% EI₀

	1	2	3	4	5
f [Hz]	0.87	5.57	15.8	30.5	45.5
m* [kNs ² /m]	531	891	1011	714	868
L = r m* [-]	1.38	0.59	0.32	0.26	0.14
M _{mod} [kNs ² /m]	1018	310	105	49	18
S _g [m/s ²]	2.41	4.32	2.71	2.29	2.14

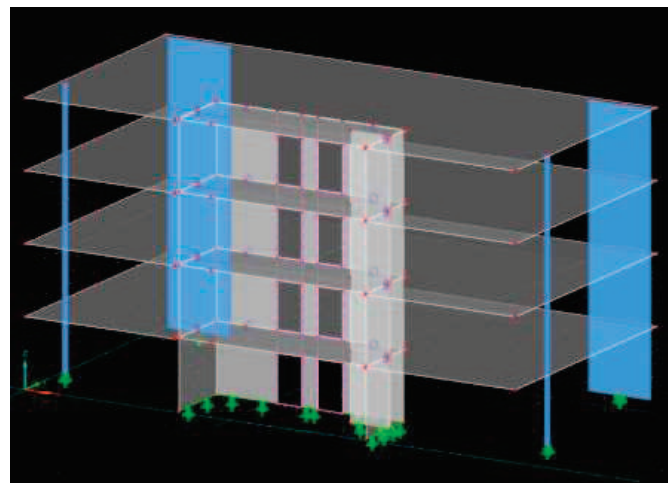
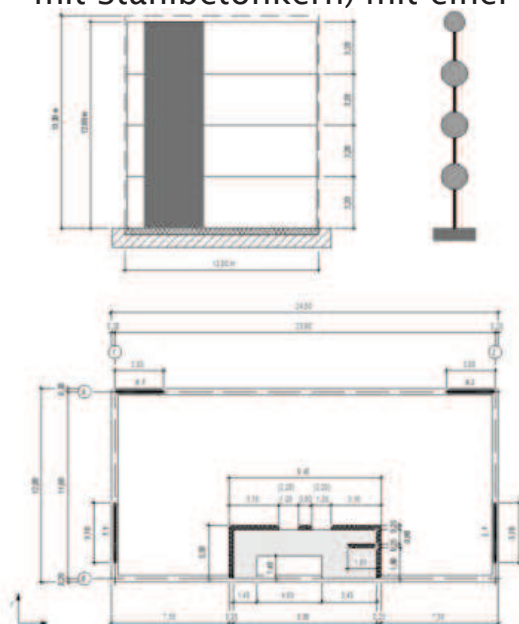
m* : masse généralisée
r : facteur de participation
M_{mod} : masse modale



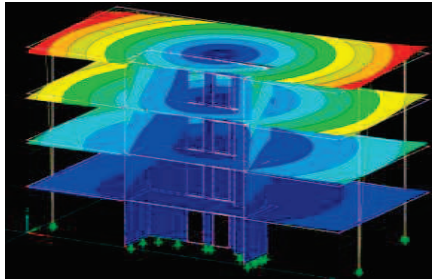
(Quelle: Lestuzzi, P. (2012), ETH Lausanne)

Tragwerksanalyse – Modale Analyse

- ▶ Beispiel der modalen Analyse eines 5-geschossigen Mischbaus (Holzbau mit Stahlbetonkern) mit einer Dynamik-Software (RFEM-Dynam)

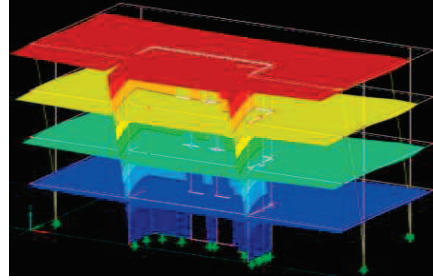


- ▶ Beispiel der modalen Analyse eines 5-geschossigen Mischbaus (Holzbau mit Stahlbetonkern) mit einer Dynamik-Software (RFEM-Dynam)



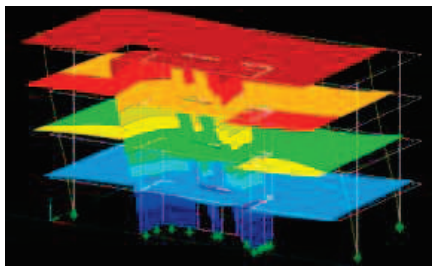
$$T_1 = 0,78 \text{ s}$$

$$m_{mod,1} / m_{tot} = 0,003$$



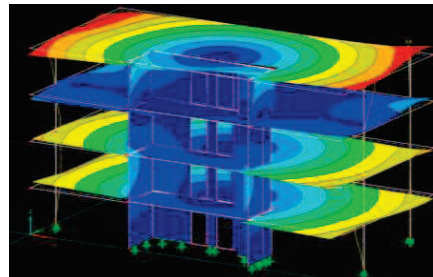
$$T_2 = 0,60 \text{ s}$$

$$m_{mod,2} / m_{tot} = 0,735$$



$$T_3 = 0,33 \text{ s}$$

$$m_{mod,3} / m_{tot} = 0,816$$



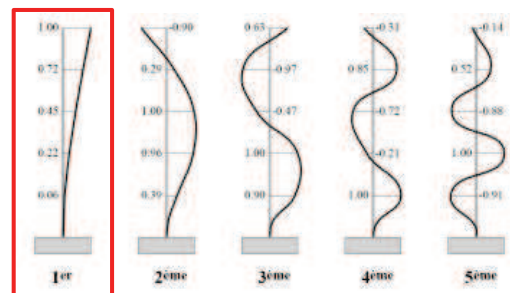
$$T_4 = 0,23 \text{ s}$$

$$m_{mod,4} / m_{tot} = 0,001$$

- ▶ Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Nur für regelmässige Bauwerke anwendbar

Vereinfachungen

- ▶ Analyse auf die erste Schwingungsform beschränkt
- ▶ Berücksichtigt die Gesamtmasse anstelle der modalen Masse der ersten Eigenform
- ▶ Nach EC 8 kann ab 3 Geschosse die Gesamtmasse mit dem Beiwert λ reduziert werden.
- ▶ Bei Gebäuden bis zu zwei Geschossen ist $\lambda = 1,0$, ab 3 Geschossen: $\lambda = 0,85$



$m = 300 \text{ t}$, classe de sols C
 $EI = 30\% EI_0$

	1	2	3	4	5
$f \text{ [Hz]}$	0.87	5.57	15.8	30.5	45.5
$m^* \text{ [kNs}^2\text{m]}$	531	891	1011	714	868
$L = r/m^* \text{ [-]}$	1.38	0.59	0.52	0.26	0.14
$M_{mod} \text{ [kNs}^2\text{m]}$	1018	310	105	49	18
$S_0 \text{ [m/s}^2\text{]}$	2.41	4.32	2.71	2.29	2.14

m^* : masse généralisée
 r : facteur de participation
 M_{mod} : masse modale



Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Ersatzkraftverfahren (SIA 261)

- ▶ Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Nur für regelmässige Bauwerke anwendbar

Vorgehen

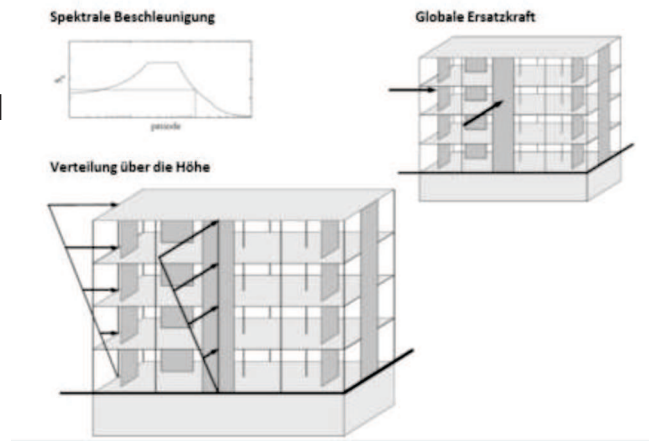
- ▶ Grundswingzeit T_1 bestimmen
- ▶ Horizontale Ersatzkraft (F_d) aufgrund der Grundswingzeit (T_1) bestimmen

$$F_d = S_e \cdot M_{Tot} = S_e(T_1) \cdot \sum_j m_j$$

- ▶ Horizontale Ersatzkraft über die Gebäudehöhe linear verteilen:

$$F_{di} = \frac{z_i \cdot m_i}{\sum_j (z_j \cdot m_j)} \cdot F_d$$

- ▶ Einfach und praktisch, keine dynamische Analyse (ausser T_1)

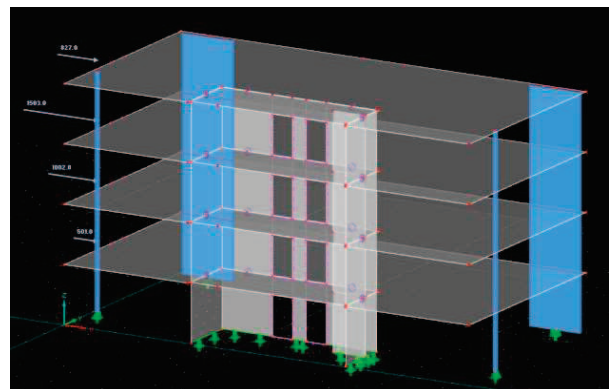
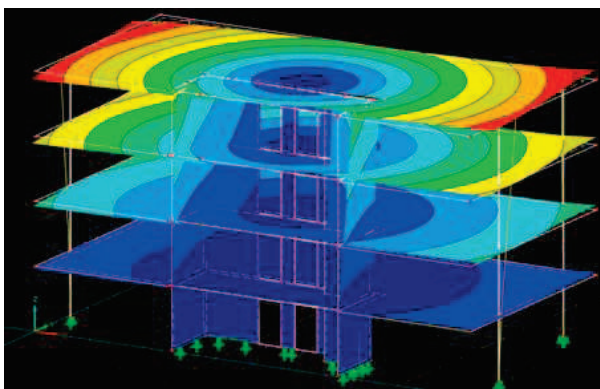


(Quelle: Lestuzzi, P. (2012), ETH Lausanne)

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Ersatzkraftverfahren (SIA 261)

- ▶ Vereinfachtes Antwortspektrumverfahren (EC 8)
- ▶ Nur für regelmässige Bauwerke anwendbar
- ▶ Sehr nützlich **zur Überprüfung** von Berechnungen nach dem multimodalen Antwortspektrumverfahren



Erdbebensicheres Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Exzentrizität und Torsion

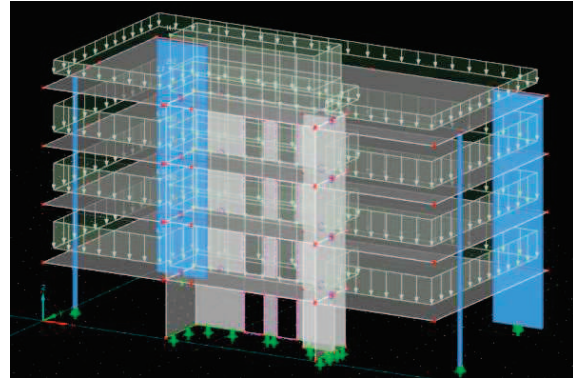
Im Antwortspektrenverfahren (od. multimodales Antwortspektrumverfahren)

- ▶ ASV für unregelmässige Bauwerke
- ▶ Normalerweise an einem räumlichen Tragwerksmodell
- ▶ Genauere Steifigkeitsermittlung
- ▶ Die Bauwerksmasse ist mit definierten Exzentrizitäten zu berücksichtigen

Exzentrizität der Massenschwerpunkte

- ▶ $e_{d,sup} = e + 0,05 b$
- ▶ $e_{d,inf} = e - 0,05 b$

(Gleichungen 261.45 u. 261.46)

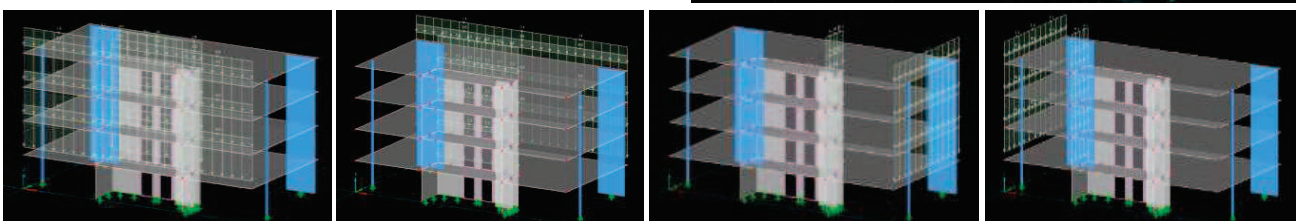
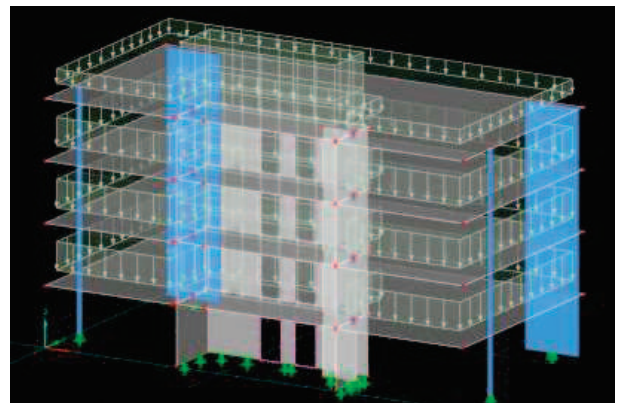


Erdbebensicheres Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Exzentrizität und Torsion

Im Antwortspektrenverfahren (od. multimodales Antwortspektrumverfahren)

- ▶ **Vorsicht:** Diese Massenexzentrizitäten werden von der Software nicht immer korrekt erfasst und müssen deshalb z.T. «manuell» eingegeben werden
- ▶ Über Trapezmassen (funktioniert nicht bei allen Programmen)
- ▶ Über eine Kombination von Flächen- und Linienmassen (Beispiel)





Tragwerksanalyse – Unregelmässige Bauwerke im Aufriss

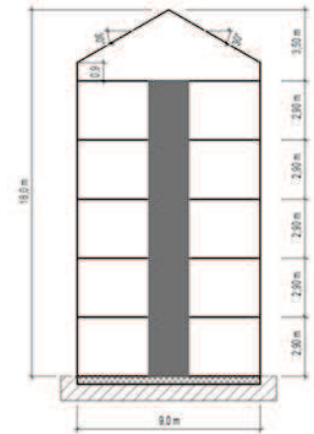
Abschätzung der Erdbebenkräfte bei Dachgeschossen und Aufstockungen

- Gleichung für sekundäre Bauteile (SIA 261, Gl. 49 bzw. EC 8, Gl. 4.25):

$$F_a = \frac{\gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot G_a}{g \cdot q_a} \cdot \left[\frac{3 \cdot \left(1 + \frac{z_a}{h}\right)}{1 + \left(1 - \frac{T_a}{T_1}\right)^2} - 0,5 \right] \geq \frac{\gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot G_a}{g \cdot q_a}$$

Mit $z_a = h$ und $T_a = T_1$ kann die Formel wie folgt vereinfacht werden:

$$F_a = \frac{\gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot G_a}{g \cdot q_a} \cdot 5,5 \geq \frac{\gamma_f \cdot a_{gd} \cdot S \cdot G_a}{g \cdot q_a}$$



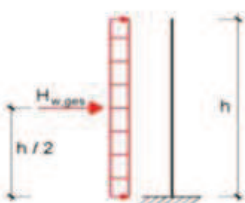
- **Faktor 5,5** setzt sich zusammen aus **2,5** (Plateauhöhe), **1,5** (modaler Beteiligungsfaktor I') und ca. **1,5** (Beiwert zur Erfassung des Resonanzeffekts infolge höherer Schwingungsformen)



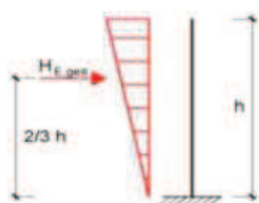
Tragwerksanalyse – Dachgeschosse und Aufstockungen

- Unterschied Wind – Erdbeben
- Die Windkraft ist **konstant** über die Gebäudehöhe verteilt
- Die Erdbebenersatzkraft ist **linear** verteilt (oder wird als linear verteilt angenommen)

Wind



Erdbeben

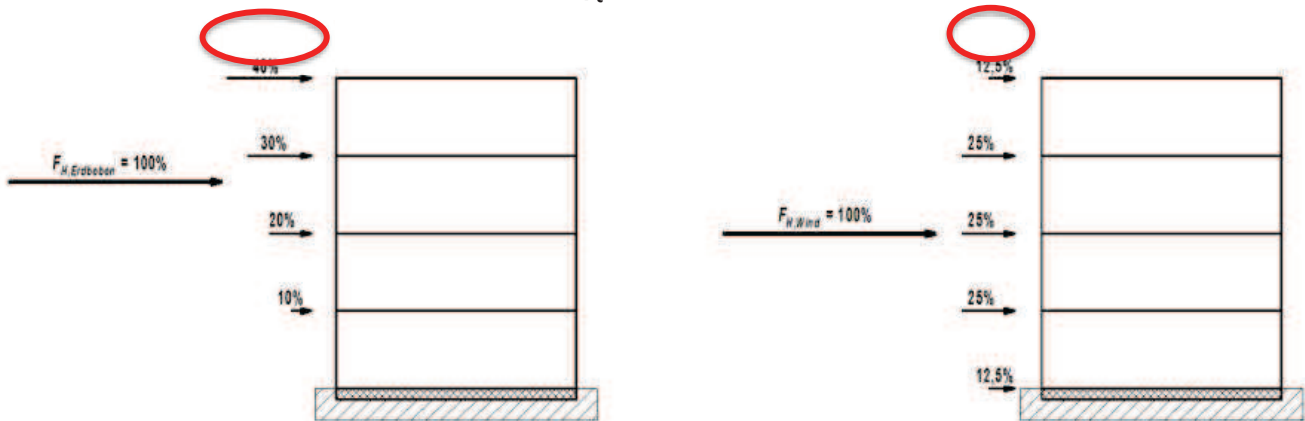


(Quelle: seismoatschool.ethz.ch)



Tragwerksanalyse – Dachgeschosse und Aufstockungen

- ▶ Unterschied Wind – Erdbeben
- ▶ Bei gleich grosser globalen Horizontalkraft, ist die am obersten Geschoss wirkende Kraft beim Erdbeben **3,2 Mal** grösser als beim Wind
- ▶ Unter Berücksichtigung von η_t beträgt die Differenz **Faktor 2,3**



- ▶ **Erdbebenkräfte in der Regel massgebend**



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte auf die vertikalen Aussteifungselemente

Verteilung abhängig von der Scheibenwirkung der Dach- und Geschossdecken

- Weiche Horizontalscheiben in Vergleich zu den vertikalen Aussteifungselemente
 - ▶ **Keine Scheibenwirkung → Verteilung nach der Einzugsfläche**
- Steife Horizontalscheiben im Vergleich zu den vertikalen Aussteifungselemente
 - ▶ **Scheibenwirkung → Verteilung nach der Steifigkeit**

Scheibenwirkung von den Steifigkeitsverhältnissen abhängig

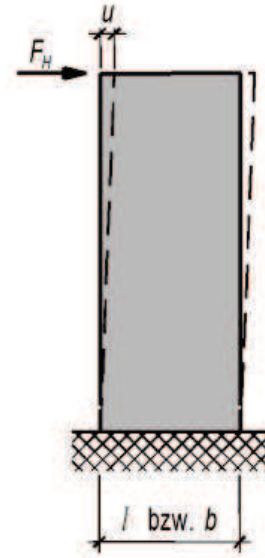
Beispiel Balkenlage mit HWS-Platte beplankt

- ▶ Im Holzrahmenbau → Starke Scheibenwirkung
- ▶ In massiven Bauwerken → Schwache Scheibenwirkung



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Fall Scheibenwirkung Verteilung nach der Steifigkeit

- ▶ Bei Gebäuden mit Tragwänden aus **Stahlbeton** werden die Horizontalkräfte anteilmässig zur Trägheit der einzelnen Wände verteilt: $k \sim I^3$
- ▶ **Mauerwerk** oft wie Stahlbeton, entspricht jedoch nicht der Realität
- ▶ **Brettsperrholz** (CLT) abhängig von der Fügetechnik. Bei Zugankern und Schubwinkeln $k \sim I^{1,5}$, bei kontinuierlich verbundenen Fugen bis zu $k \sim I^2$ [1]
- ▶ Im **Holzrahmenbau** wird in der Regel $k \sim b$ angesetzt [2]



$$k = \frac{F_H}{U}$$



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte

- ▶ Im **Holzrahmenbau** wird in der Regel $k \sim b$ angesetzt. Gemäss IP-Holz Holzrahmenbau [2] ist Σb für die Steifigkeit massgebend, die Unterteilung soll dabei eine unwesentliche Rolle spielen



Darstellung der Auslenkung gemäss [2]

Tragwerksanalyse – Unterschiedliche Verteilungen der Kräfte

Grund

Unterschiedliche Verformungsanteile

(Tabelle aus [3])

- ▶ Holzrahmenbau:

$$u_V \gg u_M$$

- ▶ Brettsper Holz:

$$u_V \approx u_M$$

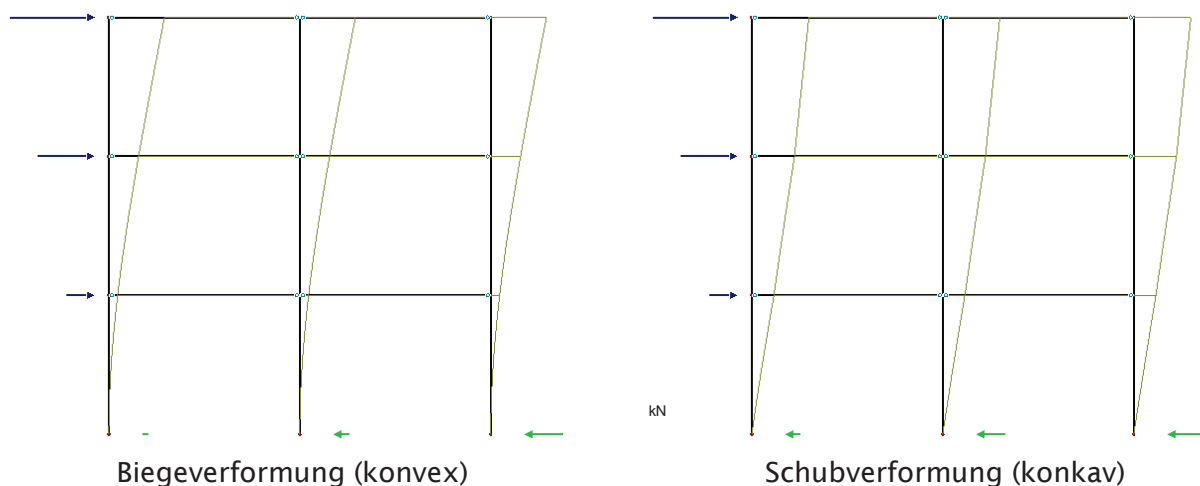
- ▶ Stahlbeton:

$$u_V \ll u_M$$

System	Rahmenbauwand Beplankung einreihig verklammert	Rahmenbauwand Beplankung dreireihig verklammert	Rahmenbauwand Beplankung aufgeklett	Mehrlagige Massivholzplatte	Stahlbetonwand (Beton gerissen)
Wandaufbau	Ständerwerk: Kopfholz 60/140 mm Schwelle 60/140 mm Ständer 60/140 mm Randholz 60/140 mm	Ständerwerk: Kopfholz 100/140 mm Schwelle 100/140 mm Ständer 100/140 mm Randholz 100/140 mm	Ständerwerk: Kopfholz 100/140 mm Schwelle 100/140 mm Ständer 100/140 mm Randholz 100/140 mm	Konstruktion: mehrlagige Massivholzplatte $t = 140$ mm Lagen 30/25/30/25/30 E-Modul 7000 N/mm ² G-Modul 500 N/mm ²	Konstruktion: Stahlbetonwand $t = 200$ mm E-Modul 15000 N/mm ² G-Modul 7250 N/mm ² (E- und G-Modul aufgrund der Risikobildung um 90% reduziert)
Beplankung	OSB3 $t = 15$ mm Klammern 1,53 x 50 mm, $a_s = 50$ mm einreihig	OSB3 $t = 15$ mm Klammern 1,53 x 50 mm, $a_s = 23$ mm dreireihig	Beplankung: Dreischichtplatte $t = 27$ mm, aufgeklett Lagen 9/9/9		
Verankerung	Verankerung: eingeschlitzte Stahl- bleche $t = 8$ mm Stabdübel 8 mm, 1 Reihe à 2 Stück	Verankerung: zwei eingeschlitzte Stahl- bleche $t = 8$ mm Stabdübel 8 mm, 2 Reihen à 4 Stück	Verankerung: zwei eingeschlitzte Stahl- bleche $t = 8$ mm Stabdübel 8 mm, 2 Reihen à 8 Stück	Verankerung: zwei eingeschlitzte Stahl- bleche $t = 8$ mm Stabdübel 8 mm, 4 Reihen à 10 Stück	
Steifigkeit	0,7 kN/mm	2,7 kN/mm	4,0 kN/mm	14,3 kN/mm	82,0 kN/mm
Verformungs- anteile	Verankerung 18% Beplankung 10% Normalkraft Ständer 6% Verbindungsmittel 66%	Verankerung 9% Beplankung 39% Normalkraft Ständer 11% Verbindungsmittel 39%	Verankerung 11% Beplankung 20% Normalkraft Ständer 19%	Verankerung 6% Schub 46% Biegung 48%	Verankerung 0% Schub 13% Biegung 87%

Tragwerksanalyse – Unterschiedliche Verteilungen der Kräfte

- ▶ Grundsätzlich gilt: $k \sim l^x$
- ▶ Grenzwerte: $1 \leq x \leq 3$
- ▶ Bei 100% Biegeverformungsanteil gilt: $x = 3$
- ▶ Bei 100% Schubverformungsanteil gilt: $x = 1$



(Darstellung der Biege- bzw. Schubverformungen mit Hilfe von Dlubal RSTAB 8)



Tragwerksanalyse – Unterschiedliche Verteilungen der Kräfte

Problematik

- ▶ Bauteile mit 100% Schub- oder 100% Biegeverformungsanteil gibt es in der Wirklichkeit nicht!
- ▶ $k \sim I^3$ im Stahlbeton, $k \sim I^{1,5}$ bis $k \sim I^2$ bei CLT oder $k \sim b$ im Holzrahmenbau sind **Vereinfachungen**
- ▶ Wie sieht die effektive Kraftverteilung aus?

Lösungsansatz

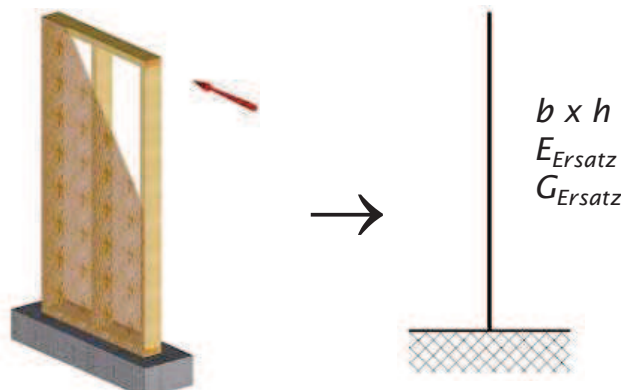
- ▶ Modellierung unter Berücksichtigung des «effektiven» Verformungsverhaltens der Bauteile insbesondere der Schub- und Biegeverformungen
- ▶ Im Holzrahmenbau: **Ersatzstabverfahren** nach der Lignum Dokumentation Erdbebengerechte Mehrgeschossige Holzbauten [3]



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte

Beispiel Holzrahmenbau

- ▶ Ersatzstabverfahren nach der Lignum Dokumentation Erdbebengerechte Mehrgeschossige Holzbauten [3]
- ▶ Bestimmung eines äquivalenten Stabes «Ersatzstab» mit E_{Ersatz} und G_{Ersatz} aufgrund der verschiedenen Verformungsanteile einer Holzrahmenwand



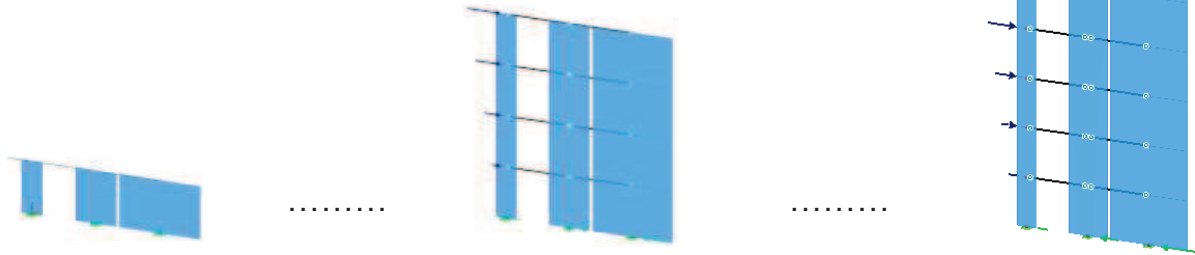
Figur aus [3]

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte

Inwiefern ist die Annahme von $k \sim b$ im Holzrahmenbau anwendbar?

- ▶ Gebäudeachse mit unterschiedlich breiten Wänden
($b = 1,25 \text{ m}$, $2,50 \text{ m}$, $5,00 \text{ m}$)
- ▶ Anzahlgeschosse von 1 bis 8
- ▶ Kraftverteilung nach $k \sim b$ bzw. **Ersatzstabverfahren**



- ▶ Vertikale Kraftverteilung linear (EKV) oder nach den Eigenformen (dynamische Analyse, ASV)
- ▶ Verwendung des Softwarepakets Dlubal RSTAB inkl. DynamPRO
- ▶ Verbindungsstab unendlich steif (Starrstab)
- ▶ Horizontalkraft bzw. Querkraft konstant mit $F_H = V = 200 \text{ kN}$

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

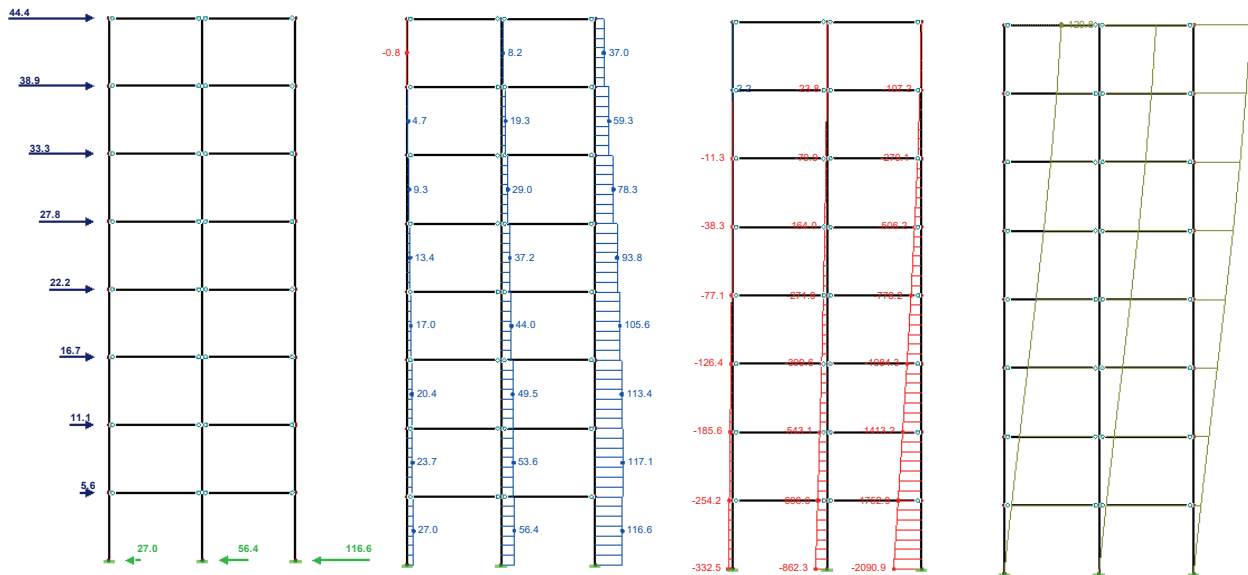
- ▶ Vereinfachte Ermittlung der Schnittkräfte nach $k \sim b$

Anzahl Geschosse mit $h = 2,90 \text{ m}$	Hebelarmfaktor (EKV, lineare Verteilung) x Stockwerkshöhe	Wandbreite					
		$b = 1,25 \text{ m}$		$b = 2,50 \text{ m}$		$b = 5,00 \text{ m}$	
		V	M	V	M	V	M
		[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]
1	1.00	29	83	57	166	114	331
2	1.67	29	138	57	277	114	554
3	2.33	29	193	57	386	114	772
4	3.00	29	249	57	497	114	994
5	3.67	29	304	57	608	114	1'216
6	4.33	29	359	57	718	114	1'435
7	5.00	29	414	57	829	114	1'657
8	5.67	29	470	57	940	114	1'879



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

- Ermittlung der Schnittkräfte mit Hilfe des **Ersatzstabverfahrens**
- Vertikale Kraftverteilung linear (gemäss EKV)



Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

rothoschool



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

- Vergleich der Schnittkräfte nach **Ersatzstabverfahren** oder $k \sim b$

Anzahl Geschosse mit $h = 2,90 \text{ m}$	Abweichungen: Ersatzstabverfahren EKV inkl. K_{DF} / vereinfacht					
	Wandbreite					
	$b = 1,25 \text{ m}$		$b = 2,50 \text{ m}$		$b = 5,00 \text{ m}$	
	ΔV	ΔM	ΔV	ΔM	ΔV	ΔM
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	0.82	0.82	0.97	0.97	1.06	1.06
2	0.84	0.74	0.97	0.94	1.06	1.09
3	0.85	0.70	0.97	0.92	1.05	1.12
4	0.87	0.66	0.97	0.90	1.05	1.13
5	0.88	0.64	0.97	0.88	1.05	1.15
6	0.88	0.62	0.97	0.87	1.04	1.16
7	0.89	0.60	0.97	0.86	1.04	1.17
8	0.89	0.59	0.97	0.85	1.04	1.17

- Relativ gute Übereinstimmung bei der Querkraft
- **Grössere Differenzen beim Biegemoment**

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

rothoschool

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

- Grösseren Abweichungen bei zunehmender Geschosszahl

Anzahl Geschosse mit $h = 2,90$ m	Wandbreite $b = 5,00$ m				Verformungsanteile		
	exkl. K_{DF}		inkl. K_{DF}				
	ΔV	ΔM	ΔV	ΔM	u_V	u_M	$u_{K,DF}$
	[-]	[-]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]
1	1.02	1.02	1.06	1.06	86%	4%	11%
2	1.02	1.04	1.06	1.09	77%	7%	16%
3	1.02	1.06	1.05	1.12	70%	10%	20%
4	1.02	1.07	1.05	1.13	64%	13%	23%
5	1.02	1.09	1.05	1.15	59%	15%	26%
6	1.02	1.10	1.04	1.16	55%	16%	29%
7	1.02	1.11	1.04	1.17	51%	18%	31%
8	1.02	1.11	1.04	1.17	48%	19%	33%

- Bei zunehmender Geschosszahl nehmen die Verformungsanteile aus Biegung und Drehfedersteifigkeiten zu

- Die breitere Wand zieht mehr Kräfte an und entlastet die schmalere

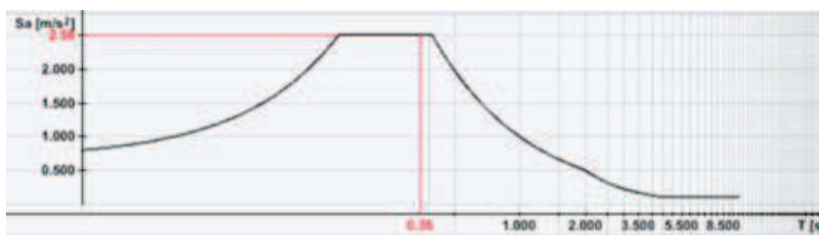
Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

Ermittlung der Schnittkräfte mit Hilfe des (multimodalen) ASV

- Die Summe der Stockwerksmassen ist konstant mit $m_{tot} = 80$ t
- Der Ordinatenwert des Antwortspektrums beträgt $S_e = 2,5$ m/s²
- (entspricht z.B. Plateauwert in der Z2 mit der Baugrundklasse A)
- Somit ergibt sich eine Horizontalkraft von $F_H = m \cdot S_e$
- $F_H = m \cdot S_e = 80$ t $\cdot$ 2,5 m/s² = 200 kN
- Die Steifigkeit der Holzwände wurde mit dem Beiwert κ_k modifiziert, damit die Grundswingzeit auf dem Plateau bleibt. So sind die Ergebnisse untereinander vergleichbar (Bild aus DynamPRO)



- Sämtliche Eigenformen wurden berücksichtigt, somit beträgt die Summe der effektiven modalen Massen 100% der totalen Masse

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

- Schnittkräfte mit Hilfe des (multimodalen) Antwortspektrumverfahrens

Anzahl Geschosse mit $h = 2,90$ m	Dynamische Eigenschaften				Wandbreite					
					$b = 1,25$ m		$b = 2,50$ m		$b = 5,00$ m	
	T_1	κ_k	$T_{1,angepasst}$	$m_{mod,1}/m_{tot}$	V	M	V	M	V	M
	[s]	[-]	[s]	[-]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kNm]
1	0.53	2.0	0.37	1.00	25	72	56	162	119	346
2	0.63	3.0	0.36	0.92	24	103	52	242	109	534
3	0.74	4.0	0.37	0.87	23	131	49	318	103	719
4	0.85	6.0	0.34	0.84	22	158	48	392	99	902
5	0.96	8.0	0.34	0.81	22	184	46	463	96	1'087
6	1.07	9.0	0.35	0.79	21	208	45	532	94	1'273
7	1.18	11.0	0.35	0.78	21	231	45	600	92	1'458
8	1.28	13.0	0.35	0.77	21	254	44	667	91	1'643

- Hinweis: Gebäude in Holzrahmenbauweise mit wenig Stockwerken weisen in der Regel eine Grundschwingzeit auf dem Plateau auf

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences



Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

Diskussion der Ergebnisse

Anzahl Geschosse mit $h = 2,90$ m	Schub- verformungsteil	EKV / Vereinfacht		$m_{mod,1} / m_{tot}$	ASV / Vereinfacht	
		$b = 5,00$ m			$b = 5,00$ m	
	u_v	ΔV	ΔM		ΔV	ΔM
	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	86%	1.06	1.06	1.00	1.04	1.04
2	77%	1.06	1.09	0.92	0.96	0.96
3	70%	1.05	1.12	0.87	0.90	0.93
4	64%	1.05	1.13	0.84	0.87	0.91
5	59%	1.05	1.15	0.81	0.84	0.89
6	55%	1.04	1.16	0.79	0.82	0.89
7	51%	1.04	1.17	0.78	0.81	0.88
8	48%	1.04	1.17	0.77	0.80	0.87

- Im EKV wird als Vereinfachung die Gesamtmasse der ersten Eigenform zugewiesen. Vorsicht, nach EC 8 kann die Masse mit λ reduziert werden
- Das Verhältnis $m_{mod,1}/m_{tot}$ (über)kompensiert die zunehmenden Biegemomente bei steigender Geschosshöhe

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebensgerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte im Holzrahmenbau

Diskussion der Ergebnisse

- ▶ Je höher das Gebäude, desto grösser die Abweichungen
- ▶ Da beim Ersatzkraftverfahren die totale Masse anstelle von $m_{mod,1}$ angesetzt wird, werden die Abweichungen die durch die «klassische», vereinfachte Kraftverteilung nach $k \sim b$ verursacht werden, kompensiert, Vorsicht jedoch falls λ nach EC8 angesetzt wird
- ▶ Beim Ersatzkraftverfahren wird gemäss die planmässige Exzentrizität e mit den Faktoren 0,5 bzw. 1,5 multipliziert. Dies berücksichtigt eine etwas ungenaue Erfassung der Steifigkeiten
- ▶ Eine Kraftverteilung nach $k \sim b$ ist für die Erdbebenbemessung von regelmässigen Gebäuden anwendbar

Vorsicht mit der Windeinwirkung bei höheren Gebäuden

- ▶ Im Gegensatz zum Erdbeben ist die Windeinwirkung nicht von der Gebäudeantwort abhängig (im Normalfall), es entsteht somit keine Kompensation durch die EKV-Vereinfachung m_{tot} anstelle von $m_{mod,1}$

Erdbebensgerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte in der Brettsperrholzbauweise

- ▶ Gemäss [1] ist die Verteilung der Kräfte in der Brettsperrholzbauweise von der Fügechnik abhängig. Bei Zugankern und Schubwinkeln $k \sim l^{1,5}$, bei kontinuierlich verbundenen Fugen bis zu $k \sim l^2$ [1]
- ▶ Aufgrund der Veränderung der Schub- und Biegeverformungsanteile bei zunehmender Geschosszahl wird sich die Kraftverteilung auch verändern
- ▶ Grundsätzlich wäre es möglich Richtwerte zu ermitteln in Abhängigkeit der Fügechnik und der Geschossanzahl
- ▶ Solche Richtwerte wären hilfreich für Handrechnungen und für Plausibilitätskontrollen von Berechnungen an räumlichen Tragwerksmodellen. Leider fehlen zur Zeit noch solche Richtwerte
- ▶ Ein räumliches Tragwerksmodell, das die Schub- und Biegeverformungen sowie der Steifigkeit der Anschlüsse berücksichtigt, ist unumgänglich

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

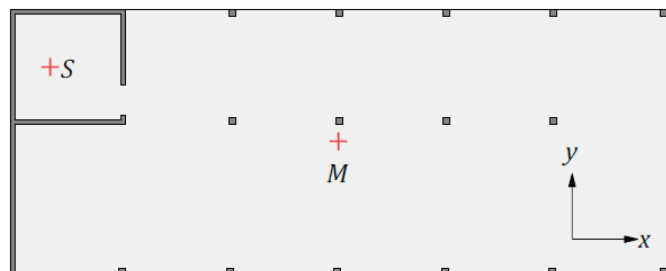
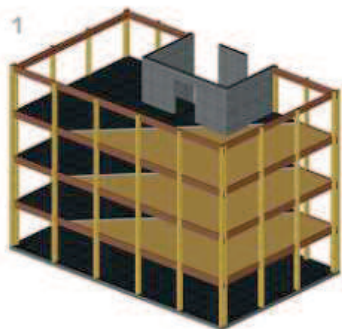
Tragwerksanalyse – Mischbauweise, Hybridbauten

Mischbauten werden aus verschiedenen Gründen erstellt

- Schallschutz, Brandschutz, sommerlicher Wärmeschutz, Kosten, etc.,

Problematik falls Stahlbetonkern nicht zentrisch

- **Unregelmässige Aussteifung, starke Torsion**
- **Konzeptionelle Massnahmen gemäss Norm SIA 261 nicht erfüllt**



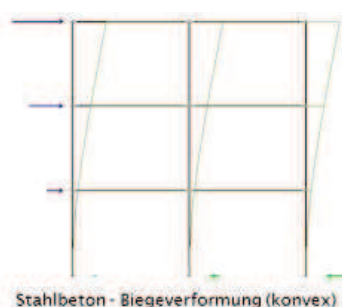
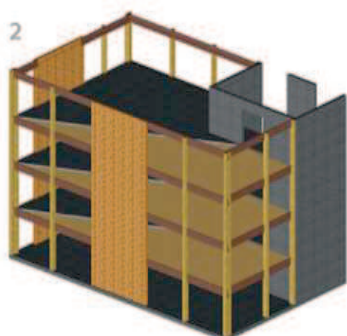
Figuren aus [3]

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

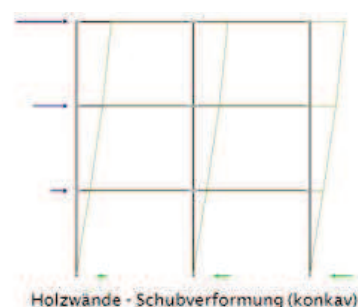
Tragwerksanalyse - Mischbauweise, Hybridbauten

Problematik

- Tragsystem im Grundriss unregelmässig
- **Unterschiedliche Verformungseigenschaften** der Tragelemente zur Abtragung der horizontalen Kräfte
- **Tragwerksanalyse nach dem (multimodalen) Antwortspektrenverfahren erforderlich**



Stahlbeton - Biegeverformung (konvex)



Holzwände - Schubverformung (konkav)

Figur links aus [3]

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte in der Mischbauweise

Beispiel Stahlbeton – Holzrahmenbau – Modell

- ▶ 5-Geschosse, $h_{tot} = 15,0 \text{ m}$
- ▶ Verbindungsstab unendlich steif
- ▶ Stockwerksmassen $5 \cdot 100 \text{ t}$ (in der Mitte des Verbindungsstabes)

Stahlbetontragwand

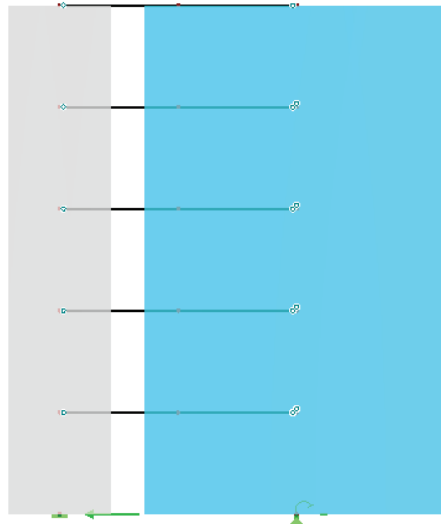
C25/30

$b = 200 \text{ mm}$

$l = 3'000 \text{ mm}$

$E_{cm} = 26'000 \text{ N/mm}^2$

$G = 11'125 \text{ N/mm}^2$



Holzrahmenwand

Ersatzstab mit:

$b_{Ersatz} = 100 \text{ mm}$

$l = 9'000 \text{ mm}$

$E_{Ersatz} = 7'277 \text{ N/mm}^2$

$G_{Ersatz} = 92 \text{ N/mm}^2$

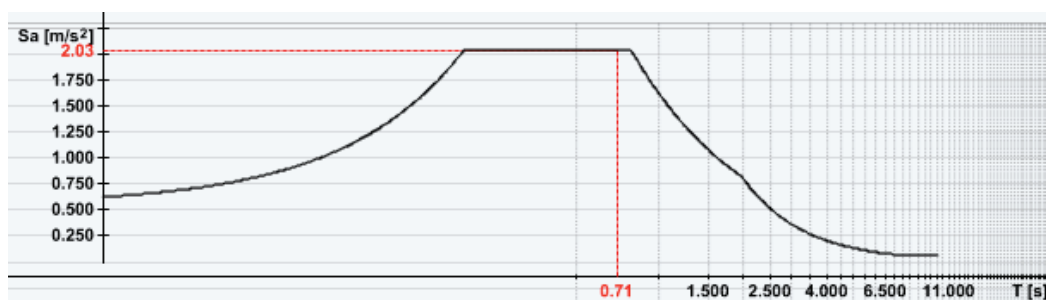
$K_{DF,EG} = 16'053 \text{ MNm/rad}$

$K_{DF,OG} = 8'026 \text{ MNm/rad}$

Tragwerksanalyse – Verteilung der Kräfte in der Mischbauweise

Beispiel Stahlbeton – Holzrahmenbau – Dynamische Analyse

- ▶ Verbindungsstab unendlich steif
- ▶ Stockwerksmassen $5 \cdot 100 \text{ t}$
- ▶ Grundschiebungzeit $T_1 = 0,71 \text{ s}$ (Dynamische Analyse mittels DynamPro)
- ▶ Erdbebenzone Z1, Baugrundklasse D



- ▶ Ordinatenwert des elastischen Antwortspektrums $S_e = 2,025 \text{ m/s}^2$
- ▶ Erdbebenersatzkraft:
 - ▶ $F = m \cdot S_e = 500 \text{ t} \cdot 2,025 \text{ m/s}^2 = 1'012 \text{ kN}$

Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse - Verteilung der Kräfte in der Mischbauweise

Beispiel Stahlbeton - Holzrahmenbau - Steifigkeiten

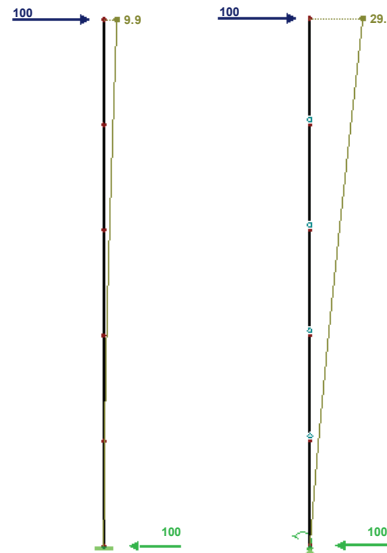
- Annahme: Starke Scheibenwirkung
- Verteilung der Kräfte proportional zur Steifigkeit der Tragwände

Stahlbetontragwand

$$k = F_H/u = 10,1 \text{ kN/mm}$$

Kraftverteilung
proportional zur
Steifigkeit:

75% der Kräfte



Holzrahmenwand

$$k = F_H/u = 3,4 \text{ kN/mm}$$

Kraftverteilung
proportional zur
Steifigkeit:

25% der Kräfte

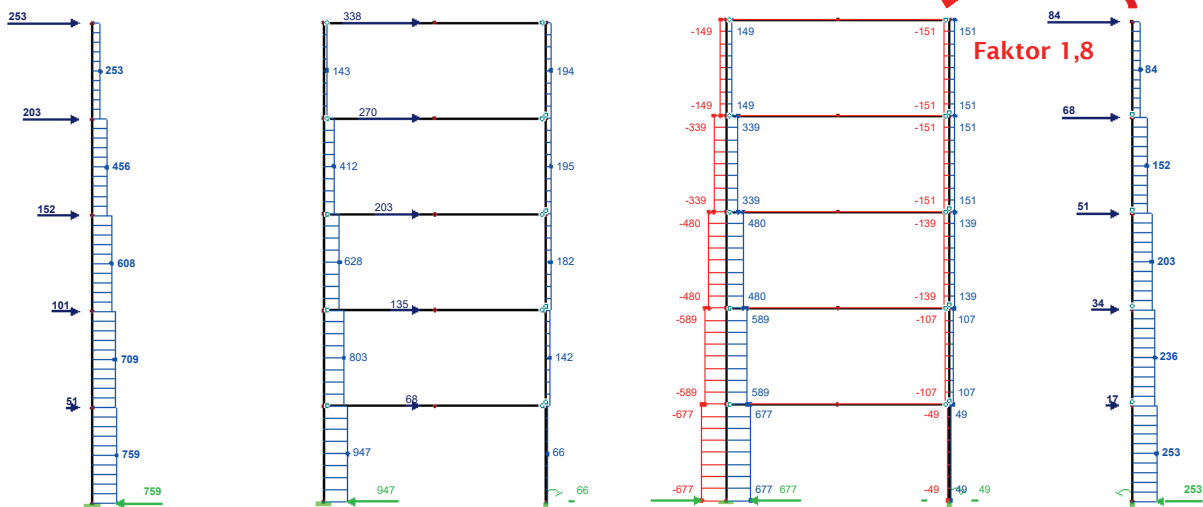
rothoblaas Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz



Tragwerksanalyse - Verteilung der Kräfte in der Mischbauweise

Beispiel Stahlbeton - Holzrahmenbau

- Querkräfte [kN]** bei einer Erdbebenersatzkraft $F = 1'012 \text{ kN}$
- Tragwände separat betrachtet mit 75% / 25% - Gesamttragwerk - ASV



Stahlbetontragwand

75% der Kräfte

Tragwerk - EKV

100% der Kräfte

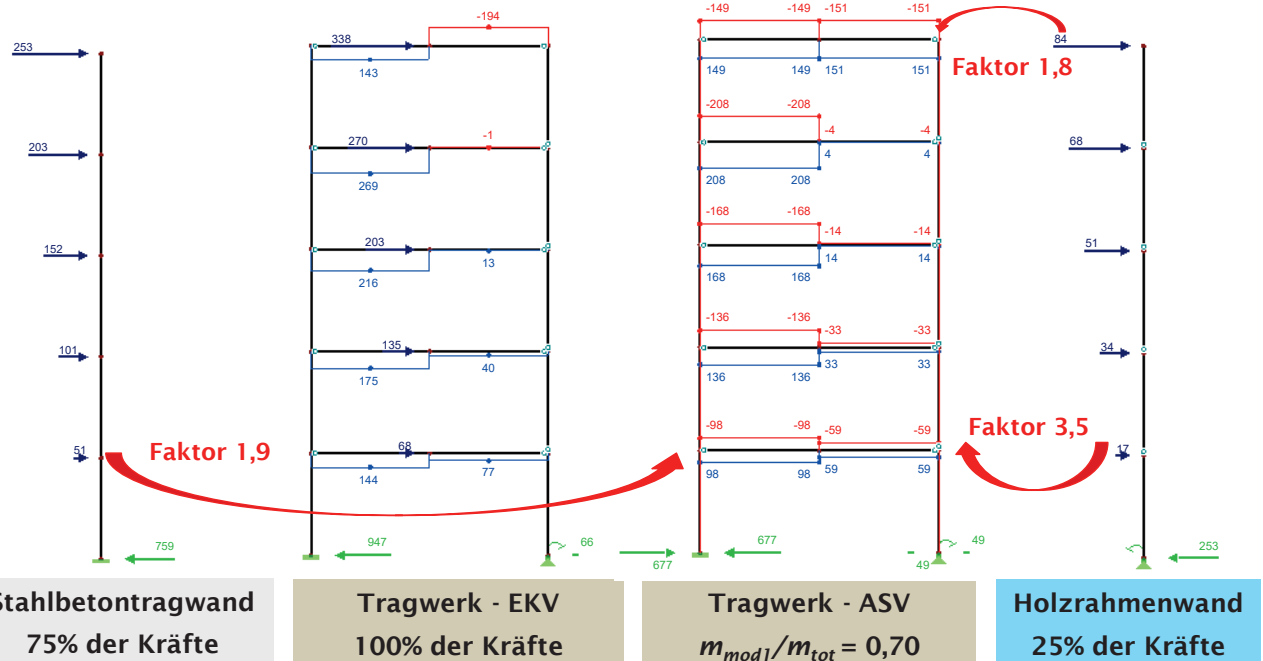
Tragwerk - ASV

$$m_{mod1}/m_{tot} = 0,70$$

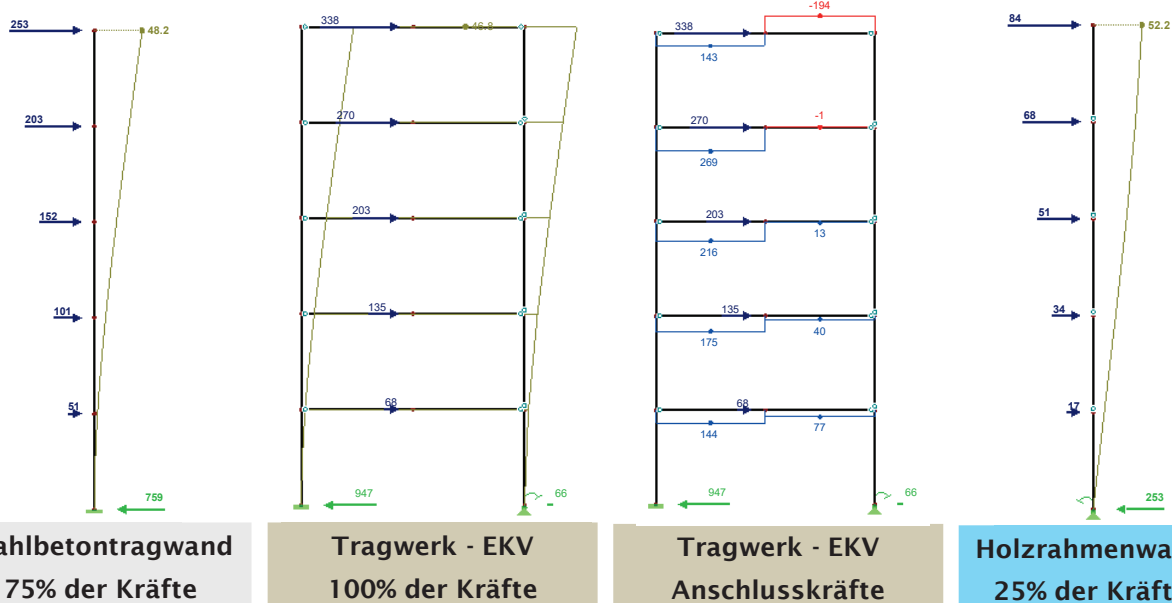
Holzrahmenwand

25% der Kräfte

- **Anschlusskräfte [kN]** bei einer Erdbebensersatzkraft $F = 1'012 \text{ kN}$
- Tragwände separat betrachtet mit 75% / 25% - Gesamttragwerk - ASV



- Stahlbetonscheiben und Holzrahmenwände verformen sich nicht ähnlich
- Die Holzrahmenwand entlastet die Stahlbetonscheiben im oberen Bereich
- Die Stahlbetonscheiben entlastet die Holzrahmenwand im unteren Bereich

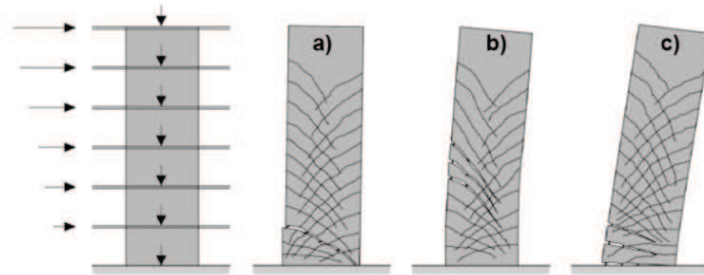
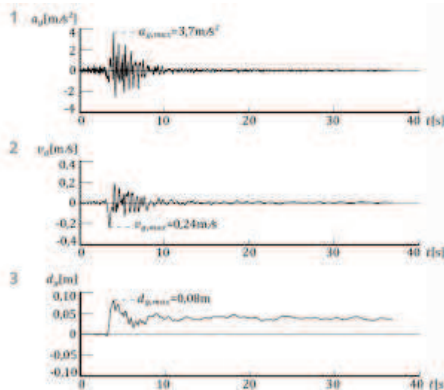


Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Besonderheiten bei Mischbauten

Betonsteifigkeit

- Rissbildung im Verlauf des Erdbebens
- **Steifigkeitsreduktion** infolge der Rissbildung



- a) Schubversagen → nicht duktil (vgl. Durchstanzen)
- b) Plastisches Gelenk ausserhalb des Wandfusses
- c) Plastisches Gelenk am Wandfuss → gewünschtes Verhalten

Figuren aus [3] und SCEB

Erdbebenberechtigtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Besonderheiten bei Mischbauten

Betonsteifigkeit

- Steifigkeit im gerissenen Zustand:

Balken	
Rechteckiger QS	$0.40I_g$
T- oder L-QS	$0.35I_g$

Stützen	
$N/(f_c A_g) > 0.5$	$0.80I_g$
$N/(f_c A_g) = 0.2$	$0.60I_g$
$N/(f_c A_g) = -0.05$	$0.40I_g$

Wände	
$N/(f_c A_g) = 0.2$	$0.45I_g$
$N/(f_c A_g) = 0.0$	$0.25I_g$
$N/(f_c A_g) = -0.1$	$0.15I_g$

Tabelle G.3: Empfehlungen für die Querschnittswerte von Stahlbetontragelementen im Rissezustand (aus [NZS 3101])

- Schwankungen des E-Moduls nach Norm SIA 263:

$$E_{cm} = k_E \sqrt[3]{f_{cm}}$$

f_{cm} : Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit

Gesteinskörnung	k_E
Alluvialkies	10'000-12'000
Gebrochener Kalk	8'000-10'000
Glimmerhaltiges Gestein	6'000-8'000

- **Starke Variationen möglich – Bei Mischbauten zu berücksichtigen**

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Besonderheiten bei Mischbauten

Aufgrund der unterschiedlichen Verformungseigenschaften sind Mischbauten **sorgfältig zu analysieren**. Folgendes soll berücksichtigt werden:

- ▶ Beton kann grosse Steifigkeitsschwankungen aufweisen (Variationen beim E-Modul + Rissbildung),
- ▶ Je nach System können Holzwände markant steifer sein als rechnerisch ermittelt,
- ▶ Die Steifigkeit der Dach- und Deckenscheiben ist ebenfalls zu untersuchen,
- ▶ Die maximal möglichen Beanspruchungen sollen aufgrund einer **Sensitivitätsanalyse** ermittelt werden.

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Tragwerksanalyse – Besonderheiten bei Mischbauten

Fazit - Empfehlung

- ▶ **Das Gebäude ganz in Holz realisieren!**
- ▶ Oder **Brettsperrholz vorziehen** (bessere Verträglichkeit weil deutlich steifer als Holzrahmenbau und weniger von Schubverformungen dominiert)

Im Bezug auf die Zusammenarbeit Holzingenieur - Bauingenieur

- ▶ Aufgrund der Tragwerkskomplexität ist das klassische, verbreitete Zusammenarbeitsmodell zwischen Holz- und Bauingenieuren in Frage zu stellen
- ▶ Die kommentarlose Zustellung eines Lastplans vom Holzingenieur an den Bauingenieur ist unzureichend
- ▶ Eine **enge Zusammenarbeit** zwischen Holz- und Bauingenieuren ist bei Hybridbauten erforderlich (fördert auch das «Vier-Augen-Prinzip»)



Erdbebenbemessung

Zwei unterschiedliche Bemessungskonzepte

- A. SIA 261: Bemessung nach dem **nicht-duktilen Tragwerksverhalten**
 - ▶ Eurocode 8: **nichtdissipatives Tragwerksverhalten**
 - ▶ Verhaltensbeiwert von **$q = 1,5$**
- B. SIA 261: Bemessung nach dem **duktilen Tragwerksverhalten**
 - ▶ Eurocode 8: dissipatives Tragwerksverhalten
 - ▶ Überbegriff: **Kapazitätsbemessung**
 - ▶ Verhaltensbeiwerte **$q > 1,5$ (SIA bis $q = 3$; EC Kap. 8 bis $q = 5$)**

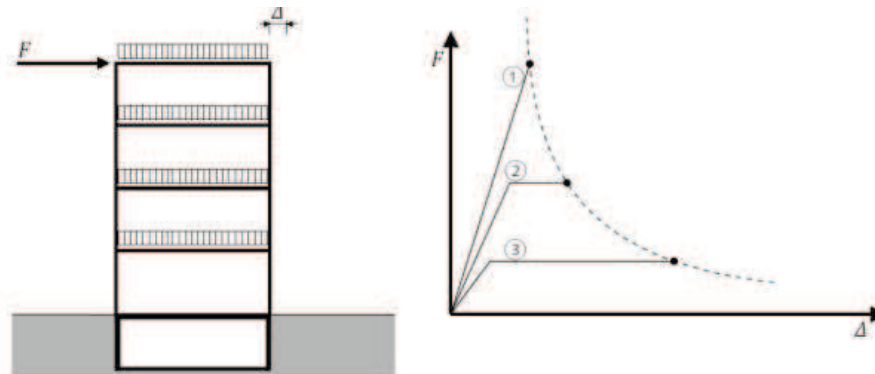


Erdbebenbemessung

Zwei unterschiedliche Bemessungskonzepte [3]

- ▶ Güte des Erdbebenverhaltens $\approx$ **Tragwiderstand · Duktilität**

Figur 20:
Horizontale Beanspruchung in Funktion der horizontalen Verschiebung für unterschiedliche Tragwerksausbildungen bei gleichem Bemessungsbeben entlang der Bedarfslinie aus dem Bemessungsspektrum [nach 12].



- ① «Elastischer», sehr hoher Tragwiderstand: Bemessungsbeben erfordert keine plastische Verformungen.
- ② Mittlerer Tragwiderstand: Bemessungsbeben erfordert mässige plastische Verformungen.
- ③ Tiefer Tragwiderstand: Bemessungsbeben erfordert grosse plastische Verformungen.
- F horizontale Beanspruchung
- Δ globale horizontale Verschiebung

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung

Zwei unterschiedliche Bemessungskonzepte

► Nicht-duktilen (nicht-dissipativen) Tragwerksverhalten

- Konventionelle Bemessung wie für Wind, Schnee, Nutzlast, etc.
- Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ berücksichtigt im wesentlichen nur die Überfestigkeit

► Duktilen (dissipativen) Tragwerksverhalten

- Besonderer Bemessungsansatz, berücksichtigt, dass die Güte des Erdbebenverhaltens $\approx$ **Tragwiderstand** · **Duktilität**
- Verhaltensbeiwerte $q > 1,5$ berücksichtigen die Überfestigkeit und die Duktilität

$$S_d = 2,5 \gamma_f \frac{a_{gd}}{g} \frac{S}{q} \quad (T_B \leq T \leq T_C) \quad (32)$$

16.5.2.4 Die horizontale Ersatzkraft infolge Erdbebeneinwirkung ist für jede Hauptrichtung wie folgt zu bestimmen:

$$F_d = S_d(T_1) \sum_j (G_k + \sum \psi_{2j} Q_k) \quad (41)$$

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten

- Konventionelle Bemessung wie für Wind, Schnee, Nutzlast etc.
- Keine besondere Bemessungsregeln ausser den konzeptionellen und konstruktiven Massnahmen gemäss Norm SIA 261:2014, Tabelle 26
- Sprödes Versagen nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze
- Berücksichtigt im wesentlichen nur die Überfestigkeit
- Wenig Tragreserve wenn das Erdbeben das Bemessungsbeben überschreitet (Epizentrum)

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung nach dem **nicht-duktilen Tragwerksverhalten**

- ▶ Geringer Sanierungsaufwand nach dem (Bemessungs-) Erdbeben weil das Tragwerk im elastischen Bereich bleibt
- ▶ Für Bauwerke die nach dem Erdbeben funktionstüchtig sein müssen z.T. mit $q = 1,0$
- ▶ Dabei ist zu beachten:
 - ▶ Tatsächliche Erdbeben haben die Normen nicht gelesen
 - ▶ Bei den Bemessungsbeben handelt es sich um Mittelwerte (vgl. SIA 261:2014, Ziffer 16.2.3.1)
- ▶ Geeignet für Regionen mit schwacher bis mittlerer Seismizität

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung nach **dem duktilen Tragwerksverhalten**

- ▶ Basiert auf die Methode der Kapazitätsbemessung
- ▶ Kapazitätsbemessung bedeutet, dass die nicht-duktilen Bereiche aufgrund der Kapazität (Tragfähigkeit) der duktilen Bereiche bemessen werden und nicht aufgrund der Schnittgrössen aus der Tragwerksanalyse
- ▶ Man «sagt» dem Tragwerk genau, wo es plastifizieren darf und soll und muss, und wo nicht. Damit wird ein günstiger plastischer Mechanismus bewirkt [3]
- ▶ Wahl eines geeigneten plastischen Mechanismus und Aufteilung des Tragwerks in elastisch bleibende und in plastifizierende Bereiche [3]
- ▶ Basiert auf die Regel der gleichwertigen Verschiebungen (RGV) sinngemäss



Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

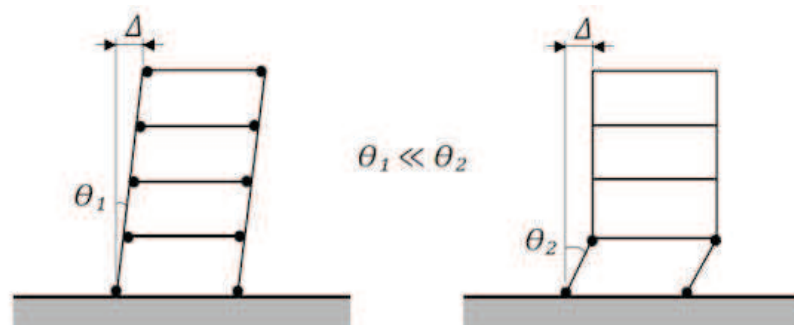
- ▶ Berücksichtigt, dass:
 - ▶ Güte des Erdbebenverhaltens $\approx$ Tragwiderstand $\cdot$ Duktilität
- ▶ Tragreserven falls das Bemessungsbeben überschritten wird
- ▶ Vorteilhaft im Bezug auf die Robustheit
- ▶ Hoher Sanierungsaufwand nach dem (Bemessungs-) Erdbeben weil das Tragwerk im plastischen Bereich beansprucht wird
- ▶ Für Bauwerke die nach dem Erdbeben funktionstüchtig sein müssen ungeeignet
- ▶ Sinnvoll für Regionen mit mittlerer bis starker Seismizität
- ▶ Projektierung und Qualitätssicherung aufwendig
- ▶ Tragwerksanalyse tendenziell nach dem Ersatzkraftverfahren (Schwerpunkt aufs Tragwerksverhalten und weniger auf die «genaue» Ermittlung der Schnittkräfte). Anwendung ASV auch möglich



Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

- ▶ Wahl eines geeigneten plastischen Mechanismus [3]

Figur 23:
Plastische Mechanismen eines Rahmens bei Erdbebeneinwirkung: ungeeigneter Stützenmechanismus (rechts) und besser geeigneter Riegelmechanismus (links) [nach 12].



Figur aus [3]

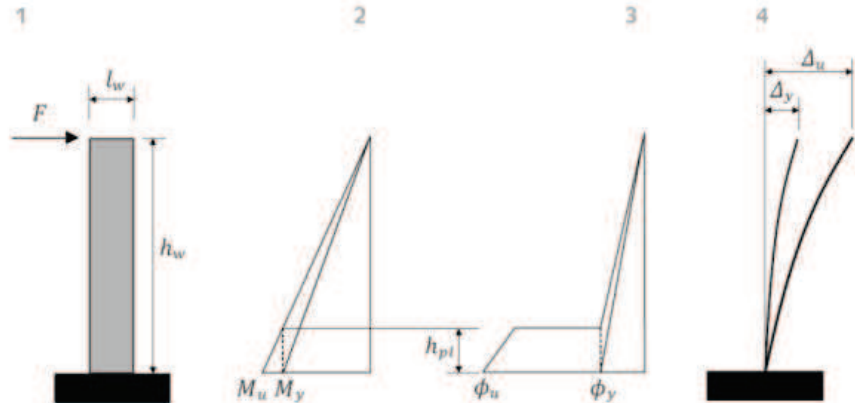
- ▶ Wichtig ist das Verhältnis lokale Duktilität / globale Duktilität

- Wahl eines geeigneten plastischen Mechanismus [3]

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} > \mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (20)$$

Figur 22:
Beziehung zwischen
globaler (μ_{Δ}) und lokaler
(μ_{ϕ}) Duktilität am Beispiel
eines Kragarms [nach 12].

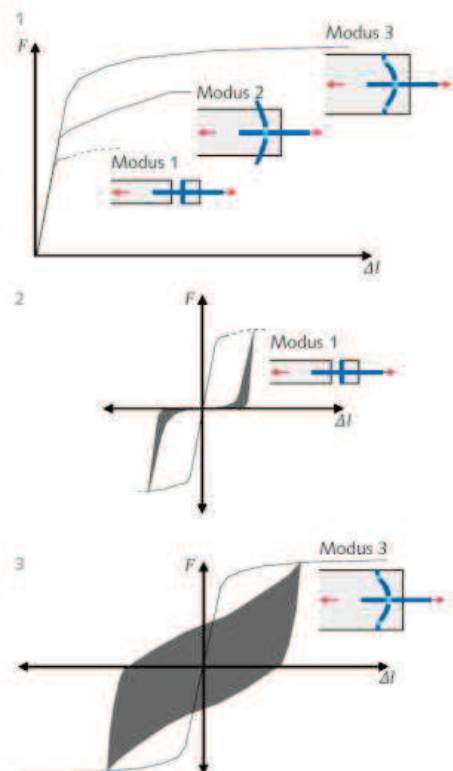
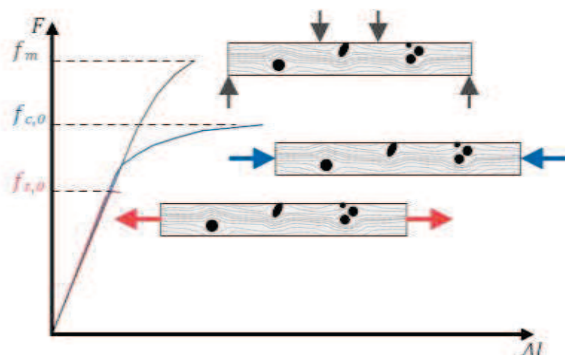
- 1 Kragarm
- 2 Biegemomente
- 3 Querschnitts-
verformungen
- 4 Verformung des ganzen
Tragwerks



Figur aus [3]

- Die globale Duktilität ist immer geringer als die lokale Duktilität

- Holz auf Zug und Schub **sehr spröde**, auf Druck und v.a. Querdruck ist eine gewisse Plastizität jedoch nicht zu verwerten weil nicht zyklisch
- Zyklische Duktilität nur über mechanische Verbindungsmittel möglich**



Figuren aus [3]

Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

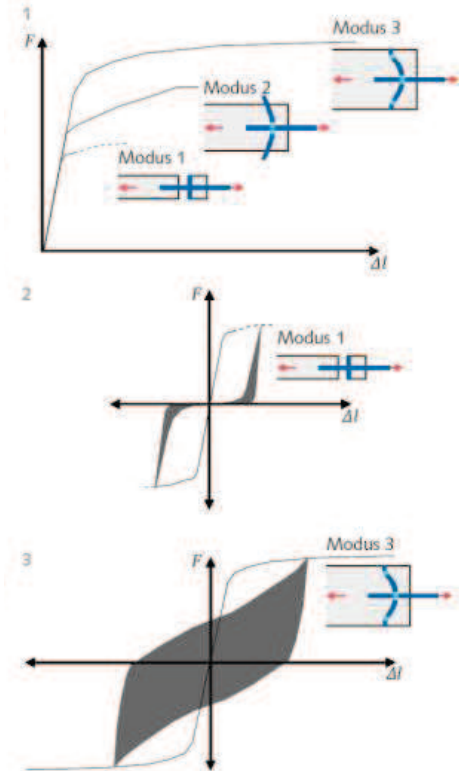
- ▶ Um Energie zu dissipieren muss eine zyklische Plastifizierung sichergestellt werden
- ▶ Beispiel einer Stabdübelverbindung

Modus 1 - Lochleibungsversagen

- Ausbildung eines «Verbindungsspieles»
- Sehr geringe Energievernichtung

Modus 3 – Stahlversagen

- Günstigeres zyklisches Tragverhalten
- Energievernichtung möglich
- (Energie E , Arbeit W [J], [Ws], [Nm])

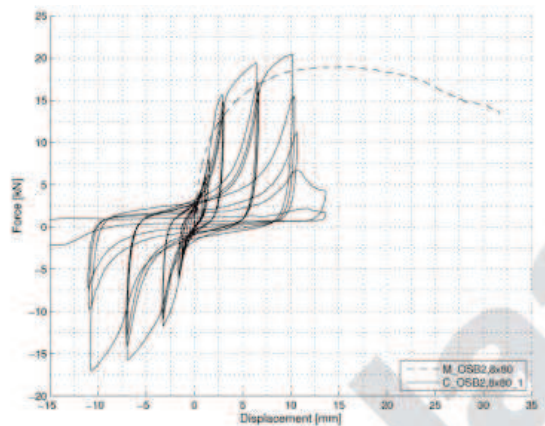
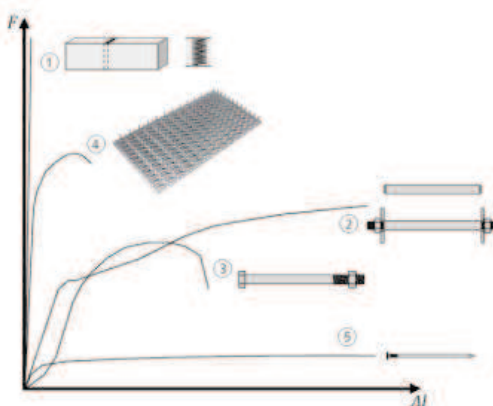


Figuren aus [3]

Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

- ▶ Im Erdbebeningenieurwesen ist es wichtig, dass die Duktilität zyklisch ermittelt wird und nicht monoton
- ▶ Grosse Unterschiede zwischen einer monoton ermittelten Duktilität [3] und einer zyklisch ermittelten Duktilität [5]

Figur 41:
Tragverhalten von verschiedenen Holzverbindungen [31]:
① Verklebung
② Stabdübel (Passbolzen)
 $d = 14 \text{ mm}$
③ Bolzen (Bauschraube)
 $d = 14 \text{ mm}$
④ Nagelblech 10000 mm^2
⑤ Nagel $d = 4,4 \text{ mm}$



Nagel monoton: $\mu \approx 10 \dots 30$

Nagel zyklisch: $\mu \approx 3 \dots > 6$



Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

Duktile Verbindungen mit Holz - Anforderungen gemäss Eurocode 8

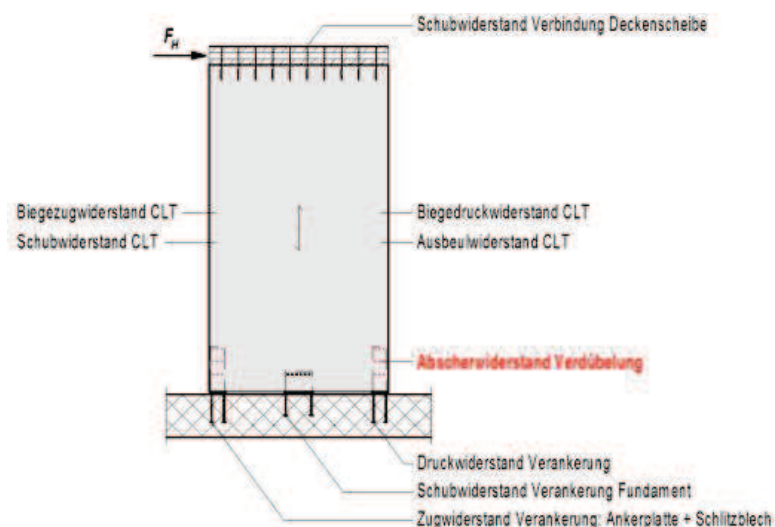
- ▶ Für eine mittlere Duktilität (DCM, $q = 2 \dots 2,5$):
minimales Duktilitätsmass von 4
- ▶ Für eine hohe Duktilität (DCH, $q = 3 \dots 5$):
minimales Duktilitätsmass von 6
- ▶ Verbindungen müssen mindestens 3 vollständigen Zyklen standhalten bei einer maximalen Reduktion des Widerstandes von 20%



Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

Verhältnis lokale Duktilität / globale Duktilität μ_ϕ / μ_Δ

- ▶ Beispiel 1
Brettsperrholz
- ▶ Duktilität der Zugverankerung von $D_s = \mu_\phi = 4$ (mit Ankernägeln oder kleinen Stabdübeln möglich)
- ▶ Anzahl Stockwerke
1, 2, 4, 6, 8



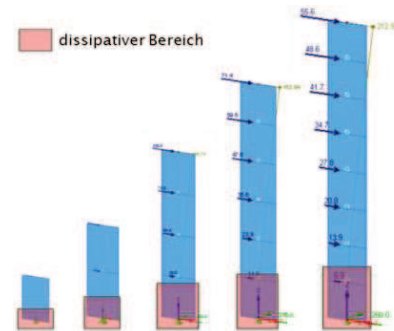
Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

Verhältnis lokale Duktilität / globale Duktilität μ_ϕ / μ_Δ

- ▶ Beispiel 1 Brettsperrholz mit $D_s = \mu_\phi = 4$
- ▶ Verformungsanteile und globale Duktilität μ_Δ

Anzahl Geschosse mit $h = 3,0$ m	Duktilität			
	μ_ϕ, D_s	Δ_y	Δ_u	μ_Δ
	[-]	[mm]	[mm]	[-]
1	4	13.25	19.25	1.45
2	4	29.82	40.69	1.36
4	4	75.83	94.28	1.24
6	4	124.84	179.62	1.44
8	4	169.66	238.54	1.41



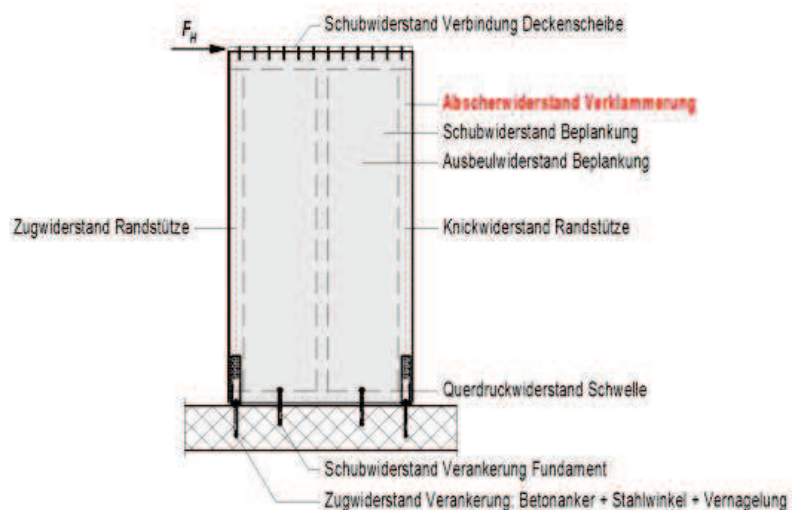
$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y} > \mu_\Delta = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

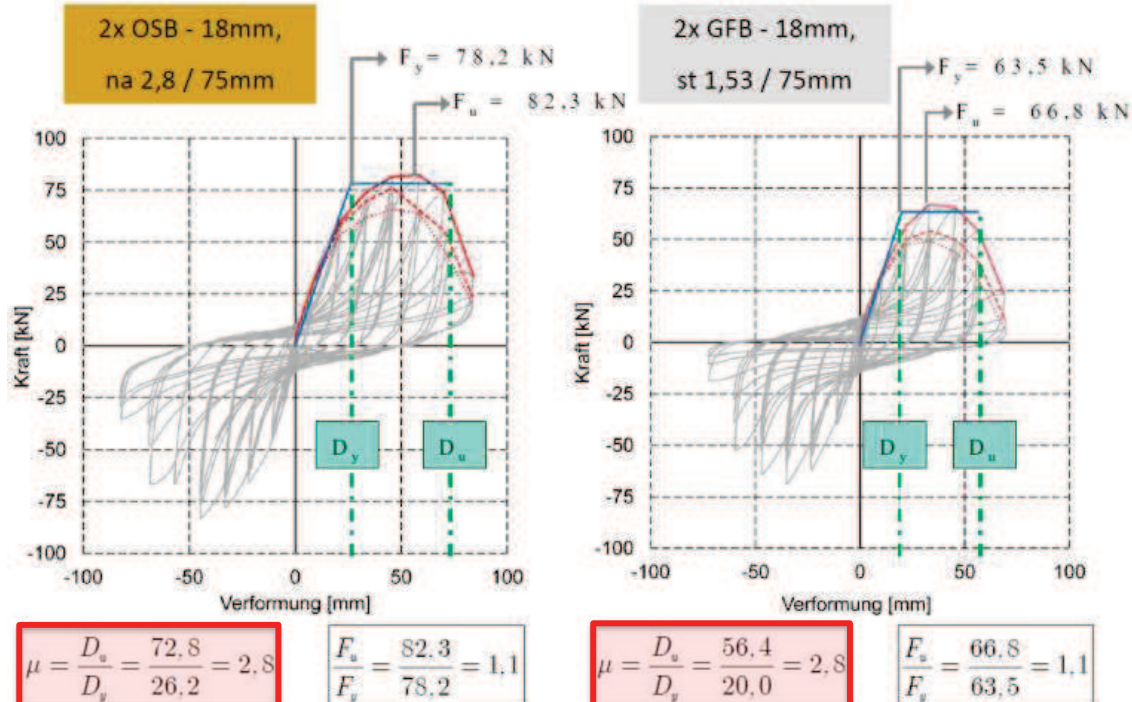
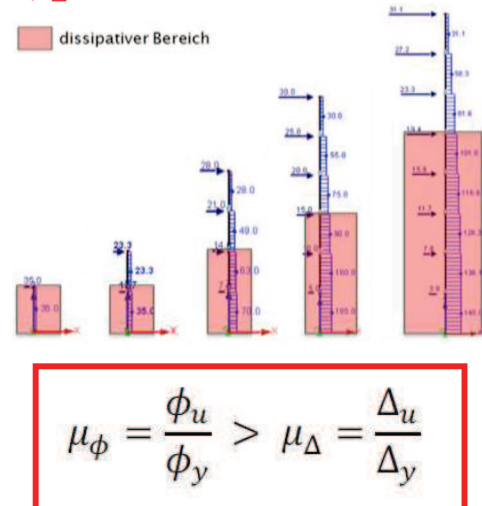
Verhältnis lokale Duktilität / globale Duktilität μ_ϕ / μ_Δ

- ▶ Beispiel 2
Holzrahmenbau
- ▶ Duktilität der
Zugverankerung
von $D_s = \mu_\phi = 6$ (mit
Klammern möglich)
- ▶ Anzahl Stockwerke
1, 2, 4, 6, 8



- ▶ Beispiel 2 Holzrahmenbau mit $D_s = \mu_\phi = 6$
- ▶ Verformungsanteile und globale Duktilität μ_Δ

Anzahl Geschosse mit $h = 3,0 \text{ m}$	Duktilität			
	μ_ϕ, D_s	Δ_y	Δ_u	μ_Δ
	[-]	[mm]	[mm]	[-]
1	6	18.53	65.52	3.54
2	6	42.72	89.71	2.10
4	6	75.40	164.67	2.18
6	6	108.48	240.38	2.22
8	6	141.54	350.19	2.47



Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung – Verhaltensbeiwerte q

- ▶ SIA 261: Bemessung nach dem **nicht-duktilen Tragwerksverhalten**
 - ▶ Eurocode 8: **nicht-dissipatives Tragwerksverhalten**
 - ▶ Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ (in Spezialfällen sogar $q = 1,0$)
 - ▶ Sämtliche Tragwerke können nicht-dissipativ bemessen werden
 - ▶ EC 8, 8.1.3(6) hat z.T. zu Missverständnissen geführt
 - ▶ Tragwerke die zu den **Klassen DCM und DCH** zugeordnet werden, können **sowohl dissipativ als auch nicht-dissipativ** entworfen und berechnet werden
 - ▶ Nur Tragwerke die sich nicht den Klassen DCM und DCH zuordnen lassen, können nur nicht-dissipativ entworfen und berechnet werden

Erdbebengerechtes Bauen mit Holz

Erdbebenbemessung – Verhaltensbeiwerte q

- ▶ Verhaltensbeiwerte q gemäss SIA 265

Tragwerkstyp	Duktilität	Verhaltensbeiwert q	Zuordnung in Funktion von Wirksamkeit, Anzahl und Verteilung der duktilen Verbindungsbereiche	Beispiele der Zuordnung ¹⁾
A	klein	1,5	Alle Tragwerke, die sich nicht den Typen B, C oder D zuordnen lassen	– Bogentragwerke – Rahmentragwerke mit geklebten Rahmenecken – Tragwerke mit steifen Stützeinspannungen in den Fundamenten – Tragwerke mit Wandscheiben zur Abtragung von Horizontalkräften ohne mechanische Verbindungen
B	gering	2,0	Tragwerke mit vereinzelt duktilen Verbindungsbereichen	– Tragwerke mit wenigen, aber wirksamen duktilen Bereichen – Einschossige Tragwerke mit Stützen mit halbsteifen Anschlüssen am Fundament
C	mittel	2,5	Tragwerke mit verschiedenen, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	– Rahmen- oder Stütze-Riegel-Tragwerke mit halbsteifen Verbindungen (Anschlüsse am Fundament können halbsteif oder gelenkig sein) – Rahmen- und Fachwerktragwerke mit mechanischen Verbindungsmitteln in den Rahmenknoten bzw. in den Verbindungen der Fachwerkbauweise – Tragwerke mit Wandscheibenelementen mit aufgeklebter Beplankung, sofern sie untereinander mechanisch verbunden sind – Mischbauweise, bestehend aus skelettartigen, tragenden Holzrahmen mit nichttragender Ausfachung
D	hoch	3,0	Tragwerke mit vielen, gleichmässig verteilten, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	– Tragwerke mit Wandscheiben: – Beplankung mit Rahmen mechanisch verbunden – Scheibenelemente untereinander mechanisch verbunden – mechanische Verbindungen mit Duktilitätsklasse $D_k > 3$ gemäss Ziffer 6.1.2

¹⁾ Entscheidend für die Zuordnung ist das Verhalten bezüglich vertikaler Abtragung von Horizontalkräften. Die Ausbildung der horizontalen Scheiben bleibt dabei unberücksichtigt.

Bemessung nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten

Bemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten

Hinweis:
globale Duktilität
≠ lokale Duktilität

Verhaltensbeiwerte nach SIA 265 - Zuordnung

Tragwerks- typ	Duktilität	Verhaltens- beiwert q	Zuordnung in Funktion von Wirksamkeit, Anzahl und Verteilung der duktilen Verbindungsbereiche	Beispiele der Zuordnung ¹⁾
A	klein	1,5	Alle Tragwerke, die sich nicht den Typen B, C oder D zuordnen lassen	- Bogen- und Stütz-Regel Tragwerke - Rahmen- und Stütz-Regel Tragwerke mit geklebten Rahmenecken - Tragwerke mit steilen Stützeinsparungen in den Fundamenten - Tragwerke mit Wandscheiben zur Abtragung von Horizontalkräften ohne mechanische Verbindungen
B	gering	2,0	Tragwerke mit vereinzelten, duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit wenigen, aber wirksamen duktilen Bereichen - Eingeschossige Tragwerke mit Stützen mit halbstreifen Anschlüssen am Fundament
C	mittel	2,5	Tragwerke mit verschiedenen, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Rahmen- oder Stütz-Regel Tragwerke mit halbstreifen Verbindungen (Anschlüsse am Fundament können halbstreif oder gelenkig sein) - Rahmen- und Fachwerktragwerke mit mechanischen Verbindungsmitteln in den Rahmenknoten bzw. in den Verbindungen der Fachwerkbauweise - Tragwerke mit Wandscheibenelementen mit aufgeklebter Bewehrung, sofern sie untereinander mechanisch verbunden sind - Mischbauweise, bestehend aus skelettartigen, tragenden Holzrahmen mit nicht-tragender Ausfachung
D	hoch	3,0	Tragwerke mit vielen, gleichmässig verteilten, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit Wandscheiben: - Bewehrung mit Rahmen mechanisch verbunden - Scheibenelemente untereinander mechanisch verbunden - mechanische Verbindungen mit Duktilitätsmass $D_v > 3$ gemäss Ziffer 6.1.2

¹⁾ Entscheidend für die Zuordnung ist das Verhalten bezüglich vertikaler Abtragung von Horizontalkräften. Die Ausbildung der horizontalen Scheiben bleibt dabei unberücksichtigt.



Bilder: Séquences Bois / Häring

Verhaltensbeiwerte nach SIA 265 - **Potentielle** Zuordnung

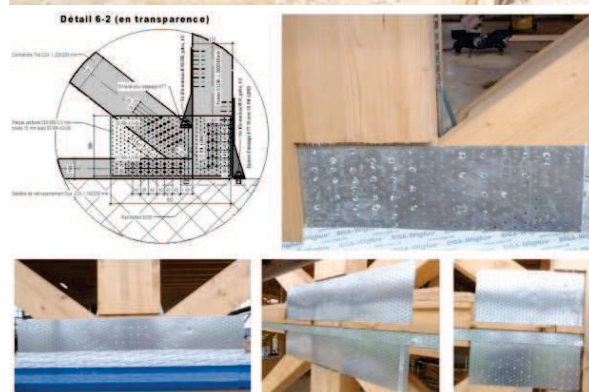
Tragwerks- typ	Duktilität	Verhaltens- beiwert q	Zuordnung in Funktion von Wirksamkeit, Anzahl und Verteilung der duktilen Verbindungsbereiche	Beispiele der Zuordnung ¹⁾
A	klein	1,5	Alle Tragwerke, die sich nicht den Typen B, C oder D zuordnen lassen	- Bogen- und Stütz-Regel Tragwerke - Rahmen- und Stütz-Regel Tragwerke mit geklebten Rahmenecken - Tragwerke mit steilen Stützeinsparungen in den Fundamenten - Tragwerke mit Wandscheiben zur Abtragung von Horizontalkräften ohne mechanische Verbindungen
B	gering	2,0	Tragwerke mit vereinzelten, duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit wenigen, aber wirksamen duktilen Bereichen - Eingeschossige Tragwerke mit Stützen mit halbstreifen Anschlüssen am Fundament
C	mittel	2,5	Tragwerke mit verschiedenen, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Rahmen- oder Stütz-Regel Tragwerke mit halbstreifen Verbindungen (Anschlüsse am Fundament können halbstreif oder gelenkig sein) - Rahmen- und Fachwerktragwerke mit mechanischen Verbindungsmitteln in den Rahmenknoten bzw. in den Verbindungen der Fachwerkbauweise - Tragwerke mit Wandscheibenelementen mit aufgeklebter Bewehrung, sofern sie untereinander mechanisch verbunden sind - Mischbauweise, bestehend aus skelettartigen, tragenden Holzrahmen mit nicht-tragender Ausfachung
D	hoch	3,0	Tragwerke mit vielen, gleichmässig verteilten, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit Wandscheiben: - Bewehrung mit Rahmen mechanisch verbunden - Scheibenelemente untereinander mechanisch verbunden - mechanische Verbindungen mit Duktilitätsmass $D_v > 3$ gemäss Ziffer 6.1.2

¹⁾ Entscheidend für die Zuordnung ist das Verhalten bezüglich vertikaler Abtragung von Horizontalkräften. Die Ausbildung der horizontalen Scheiben bleibt dabei unberücksichtigt.



Tragwerks- typ	Duktilität	Verhaltens- beiwert q	Zuordnung in Funktion von Wirksamkeit, Anzahl und Verteilung der duktilen Verbindungsbereiche	Beispiele der Zuordnung ¹⁾
A	klein	1.5	Alle Tragwerke, die sich nicht den Typen B, C oder D zuordnen lassen	- Bogentragwerke - Rahmentragwerke mit geklebten Rahmenecken - Tragwerke mit steilen Stützeinspan- nungen in den Fundamenten - Tragwerke mit Wandscheiben zur Abtragung von Horizontalkräften ohne mechanische Verbindungen
B	gering	2.0	Tragwerke mit vereinzelt, duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit wenigen, aber wirksamen duktilen Bereichen - Eingeschossige Tragwerke mit Stützen mit halbstreifen Anschlüssen am Fundament
C	mittel	2.5	Tragwerke mit verschiedenen, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Rahmen- oder Stütze-Regel Tragwerke mit halbstreifen Verbindungen (An- schlüsse am Fundament können halb- steif oder gelenkig sein) - Rahmen- und Fachwerktragwerke mit mechanischen Verbindungsmitteln in den Rahmenseiten bzw. in den Verbindungen der Fachwerkbauweise - Tragwerke mit Wandscheibenelementen mit aufgeklebter Beplankung, sofern sie untereinander mechanisch verbunden sind - Mischbauweise, bestehend aus skelett- artigen, tragenden Holzrahmen mit nicht- tragender Ausfachung
D	hoch	3.0	Tragwerke mit vielen, gleichmässig verteilten, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit Wandscheiben: - Beplankung mit Rahmen mecha- nisch verbunden - Scheibenelemente untereinander mechanisch verbunden - mechanische Verbindungen mit Duktilitätsmass $D_s > 3$ gemäss Ziffer 6.1.2

¹⁾ Entscheidend für die Zuordnung ist das Verhalten bezüglich vertikaler Abtragung von Horizontalkräften. Die Ausbildung der horizontalen Scheiben bleibt dabei unberücksichtigt.



Tragwerks- typ	Duktilität	Verhaltens- beiwert q	Zuordnung in Funktion von Wirksamkeit, Anzahl und Verteilung der duktilen Verbindungsbereiche	Beispiele der Zuordnung ¹⁾
A	klein	1.5	Alle Tragwerke, die sich nicht den Typen B, C oder D zuordnen lassen	- Bogentragwerke - Rahmentragwerke mit geklebten Rahmenecken - Tragwerke mit steilen Stützeinspan- nungen in den Fundamenten - Tragwerke mit Wandscheiben zur Abtragung von Horizontalkräften ohne mechanische Verbindungen
B	gering	2.0	Tragwerke mit vereinzelt, duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit wenigen, aber wirksamen duktilen Bereichen - Eingeschossige Tragwerke mit Stützen mit halbstreifen Anschlüssen am Fundament
C	mittel	2.5	Tragwerke mit verschiedenen, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Rahmen- oder Stütze-Regel Tragwerke mit halbstreifen Verbindungen (An- schlüsse am Fundament können halb- steif oder gelenkig sein) - Rahmen- und Fachwerktragwerke mit mechanischen Verbindungsmitteln in den Rahmenseiten bzw. in den Verbindungen der Fachwerkbauweise - Tragwerke mit Wandscheibenelementen mit aufgeklebter Beplankung, sofern sie untereinander mechanisch verbunden sind - Mischbauweise, bestehend aus skelett- artigen, tragenden Holzrahmen mit nicht- tragender Ausfachung
D	hoch	3.0	Tragwerke mit vielen, gleichmässig verteilten, hoch wirksamen duktilen Verbindungsbereichen	- Tragwerke mit Wandscheiben: - Beplankung mit Rahmen mecha- nisch verbunden - Scheibenelemente untereinander mechanisch verbunden - mechanische Verbindungen mit Duktilitätsmass $D_s > 3$ gemäss Ziffer 6.1.2

¹⁾ Entscheidend für die Zuordnung ist das Verhalten bezüglich vertikaler Abtragung von Horizontalkräften. Die Ausbildung der horizontalen Scheiben bleibt dabei unberücksichtigt.



Verhaltensbeiwerte nach EC 8 - **Potentielle** Zuordnung

- Wird $q > 1,5$ angesetzt, sind besondere Anforderungen zu erfüllen
- CLT-Bauwerke** können nicht-dissipativ mit $q = 1,5$ bemessen werden
- Keine Verhaltensbeiwerte für die dissipative Bemessung von CLT-Bauwerken
- Gewisse hohe Verhaltensbeiwerte werden in Frage gestellt

Tabelle 8.1: Auslegungskonzepte, Tragwerkstypen und Höchstbeträge der Verhaltensbeiwerte für die drei Duktilitätsklassen

Auslegungskonzept und Duktilitätsklasse	q	Beispiele für Tragwerke
niedriges Energiedissipationsvermögen - DCL	1,5	Kragarm-Tragwerke; Träger; Zwei- oder Dreigelenkbögen; Fachwerke mit Dübelverbindungen
mittleres Energiedissipationsvermögen - DCM	2	Verleimte Wandscheiben mit verleimten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen; Fachwerke mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen; Tragwerke in Mischbauweise, bestehend aus Holzrahmen (zur Aufnahme der Horizontallasten) und einer nichttragenden Ausfachung
	2,5	Statisch überbestimmte Rahmen mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen (siehe 8.1.3(3)P)
hohes Energiedissipationsvermögen - DCH	3	Genagelte Wandscheiben mit verleimten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen; Fachwerke mit Nagelverbindungen;
	4	Statisch überbestimmte Rahmen mit stiftförmigen oder Bolzenverbindungen (siehe 8.1.3(3)P).
	5	Genagelte Wandscheiben mit genagelten Schubfeldern mit Nagel- oder Schraubenverbindungen

(Quelle: EN 1998-1:2004)

Verhaltensbeiwerte aus neuesten Forschungsergebnissen

- Vorschlag zur Überarbeitung von EC 8 gemäss [7]
- $q = 4,0$ anstelle von $q = 5,0$ für Holzrahmenbau
- $q = 2,0 \dots 3,0$ für Brettsperrholz-Bauwerke

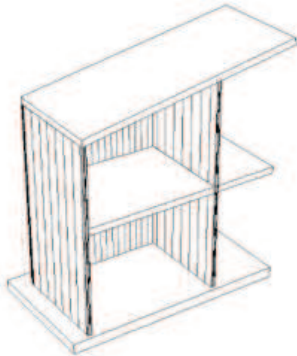
Table 2. Structural types and upper limit values of the behaviour factors for buildings regular in elevation

Structural type	DCM	DCH
X-Lam buildings	2,0	3,0
Light-Frame buildings	2,5	4,0
Log House buildings	2,0	-
Moment resisting frames	2,5	4,0
Post and beam timber buildings	2,0	-
Mixed structures made of timber framing and masonry infill resisting to the horizontal forces.	2,0	-
Large span arches with two or three hinged joints	-	-
Large span trusses with nailed, screwed, doweled and bolted joints	-	-
Vertical cantilever systems made with glulam or CLT wall elements	2,0	-

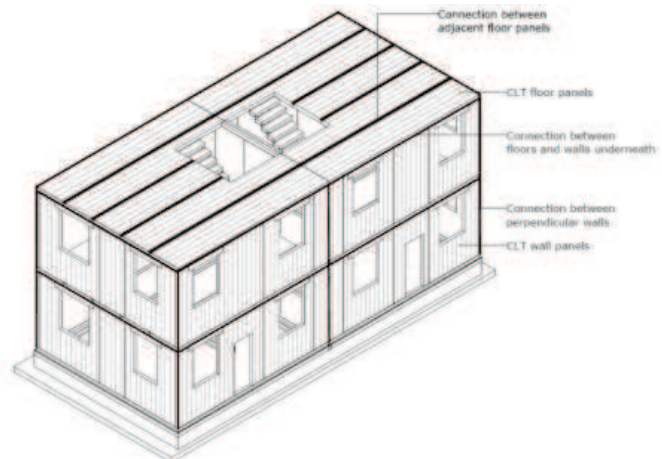


Verhaltensbeiwerte für die Brettsperrholzbauweise

- ▶ Für die nicht-dissipative Bemessung gilt **$q = 1,5$**
- ▶ Für **vertikale Kragarmsysteme** wird **$q = 2,0$** vorgeschlagen [7]
- ▶ Wird das CLT-Bauwerk **als steifer Kasten** entworfen, berechnet und bemessen, wird **$q = 2,0$** (DCM) bis **$q = 3,0$** (DCH) vorgeschlagen [7]



CLT als vertikaler Kragarm [7]



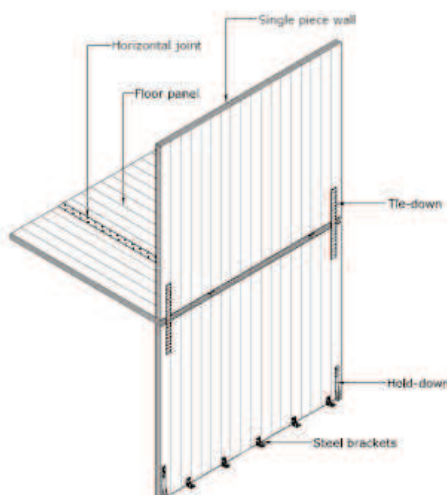
CLT-Bauwerke als steifer Kasten [7]



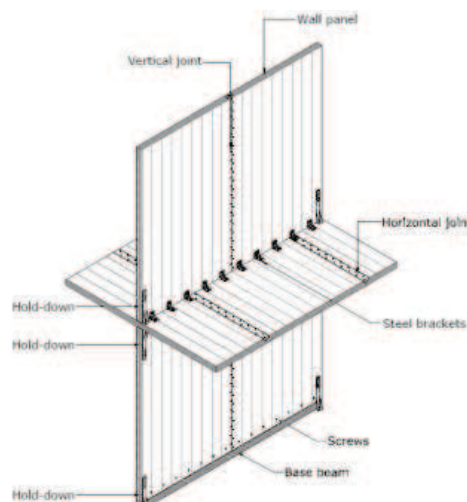
Verhaltensbeiwerte für die Brettsperrholzbauweise (als steifer Kasten)

Vorschläge im Bezug auf die dissipative Bemessung gemäss [7]

- ▶ Für DCM mit **$q = 2,0$** können die Wände monolithisch sein
- ▶ Für DCH mit **$q = 3,0$** sind die Wände nach bestimmten Regeln zu unterteilen



Monolithische CLT-Wand [7]



Unterteilte CLT-Wand [7]

- **Potentielle** Zuordnung weil diese Zuordnung nur möglich ist wenn zusätzliche und z.T. anspruchsvolle Anforderungen erfüllt sind
- Gemäss SIA 265 sind Ziffer 4.6.2 und 4.6.3 einzuhalten
- **Vergrösserte Abstände** um spröde Versagensarten zu vermeiden

Tabelle 11: Anforderungen an stiftförmige Verbindungen mit duktilem Verhalten (Nadelholz)

Tragwerkstyp	Anforderungen bezüglich Holzdicke, Einschlag- und Einschraubtiefen	Anforderungen bezüglich der minimalen Abstände der Verbindungsmittel parallel zur Faserrichtung
B	gemäss Tabelle 16 für das Duktilitätsmass $D_s > 3$ ¹⁾	minimale Abstände der Verbindungsmittel parallel zur Faserrichtung gemäss den Tabellen 20 (Stabdübel und Bolzen), 24 bzw. 29 (Nägeln), 29 (Schrauben gemäss Ziffer 6.5.1.2), 34 bzw. 35 (Schrauben gemäss Ziffer 6.5.1.3), 265/1-33 (Klammern)
C und D	gemäss Tabelle 16 für das Duktilitätsmass $D_s > 3$ ¹⁾	1,5-fache minimale Abstände der Verbindungsmittel parallel zur Faserrichtung gemäss den Tabellen 20 (Stabdübel und Bolzen), 24 bzw. 29 (Nägeln), 29 (Schrauben gemäss Ziffer 6.5.1.2), 34 bzw. 35 (Schrauben gemäss Ziffer 6.5.1.3), 265/1-33 (Klammern)

¹⁾ Bei Verbindungen mit Holzwerkstoffen ist die Norm SIA 265/1 (Ziffer 8.3) mitgeltend. Die Holzwerkstoffdicken sind so zu wählen, dass Gleichung 265/1-(20) massgebend ist.

- **Überbemessung der nicht-duktilen Bereiche**

Duktilität im Falle von $q > 1,5$

Vorsicht: Modus 3 bedeutet nicht automatisch duktile Verbindungen!

- Modus 3 ist eine Voraussetzung jedoch alleine nicht ausreichend

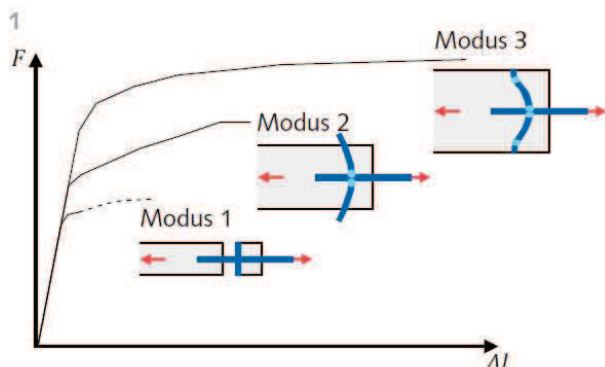


Tabelle 19: Erforderliche Holzdicke und Holzweite b_y (nach SIA 265/1)

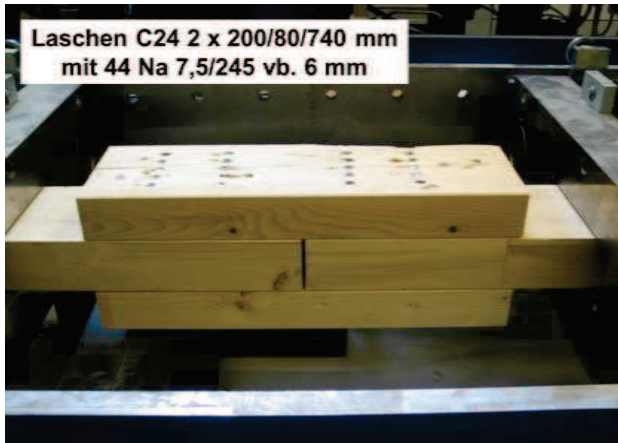
Ausstellungsform		erforderliche Holzdicke	k_p ¹⁾	
Holz – Holz, HWS – Holz zweischneitig		$t_{1,erf} = 1,26 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{1 + \beta_y}} + 1 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$ $t_{2,erf} = 2,52 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_y}} \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, \frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \frac{4 \beta_y}{1 + \beta_y}$	(88)
	Für $\beta_y = 1$	$t_{1,erf} = 2,15 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$ $t_{2,erf} = 1,76 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, \frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(89)
Holz – Holz, HWS – Holz einschneitig		$t_{1,erf} = 1,26 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{1 + \beta_y}} + 1 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$ $t_{2,erf} = 1,26 \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_y}} + 1 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, \frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \frac{4 \beta_y}{1 + \beta_y}$	(90)
	Für $\beta_y = 1$	$t_{1,erf} = 2,15 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$ $t_{2,erf} = 2,15 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, \frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(91)
Stahl – Holz zweischneitig		$t_{2,erf} = 1,76 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(92)
		$t_{1,erf} = 2,52 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$	$k_p = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(93)
Stahl – Holz mehrschneitig		Scherfuge A wenn $t_2 \geq 2t_1$, gilt: $t_{1,erf} = 2,52 \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,1,1}}} d^{0,8}$	$k_{p,1} = \min \left[\frac{t_1}{t_{1,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(94)
		Scherfuge B wenn $t_1 \geq 0,35t_2$, gilt: $t_{2,erf} = \alpha \sqrt{\frac{f_{t,1}}{f_{t,2,1}}} d^{0,8}$	$k_{p,2} = \min \left[\frac{t_2}{t_{2,erf}}, 1,0 \right] \sqrt{2}$	(95)

¹⁾ Hinweis: Sind die vorhandenen Holzdicke kleiner als die erforderlichen Holzdicke, wird mit den Gleichungen (88) bis (95) k_p linear interpoliert.

Verhaltensbeiwerte

Duktilität im Falle von $q > 1,5$

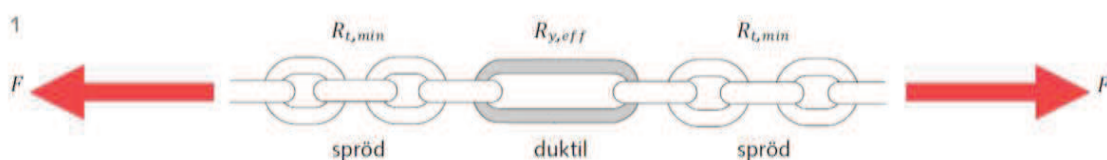
- ▶ Vorsicht: Modus 3 bedeutet nicht automatisch duktile Verbindung!
- ▶ Beispiel Zuganschluss mit $t_{vorh} = 80 \text{ mm} > t_{erf} = 67 \text{ mm}$ (Modus 3) jedoch **Spröbruch**



Verhaltensbeiwerte - Kapazitätsbemessung

Duktilität im Falle von $q > 1,5$

- ▶ **Vorsicht HBT1** mit den grau hinterlegten Feldern «Verbindungen mit sprödem Verhalten, diese sind wenn möglich zu vermeiden»
Nicht grau hinterlegte Felder $\neq$ automatisch duktile Verbindungen
- ▶ Prinzip der Kapazitätsbemessung: Man «sagt» dem Tragwerk genau, wo es plastifizieren darf und soll und muss, und wo nicht. Damit wird ein günstiger plastischer Mechanismus bewirkt [3]
- ▶ Wie sagt man das dem Tragwerk?
- ▶ Mit der **Hierarchie der Tragwiderstände!**
- ▶ Duktile Kette [3]:



Figur aus [3]



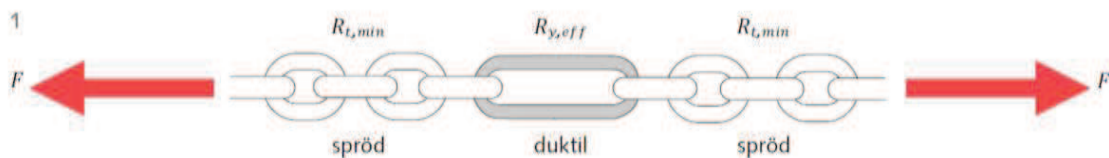
Erdbebenbemessung **nach dem duktilen Tragwerksverhalten**

Hierarchie der Tragwiderstände

- «Überbemessen» M_d^+ , V_d^+ , T_d^+ etc. bedeutet nicht Bemessung auf den x-fachen Bemessungswert der Auswirkung (Schnittkraft) M_d , V_d , T_d etc. (infolge Erdbeben oder Wind), sondern auf den x-fachen Wert des Tragwiderstandes der anschliessenden plastifizierenden Bereiche M_{Rd} , V_{Rd} , T_{Rd} etc. d.h. der duktilen Verbindungsbereiche:

$$M_d^+ = \gamma_{Rd} \cdot M_{Rd} \text{ bzw. } V_d^+ = \gamma_{Rd} \cdot V_{Rd} \text{ bzw. } T_d^+ = \gamma_{Rd} \cdot T_{Rd}$$

γ_{Rd} Überfestigkeitsfaktor



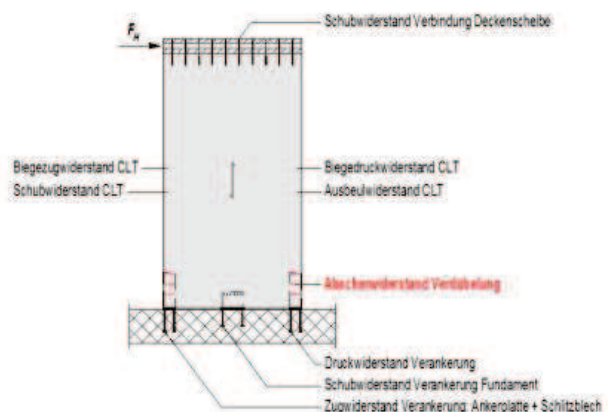
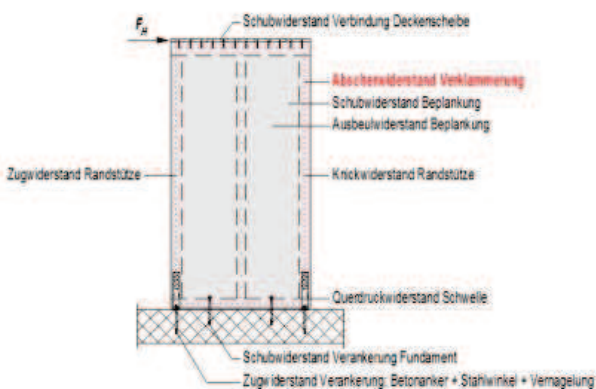
Figur aus [3]



Erdbebenbemessung **nach dem duktilen Tragwerksverhalten**

Hierarchie der Tragwiderstände

- Beispiele Holzrahmenbau und Brettsper Holzbauweise
- Sämtliche nicht-duktilen Bereiche sind zu überbemessen
- Betonanker mit seismischer Leistungskategorie C2

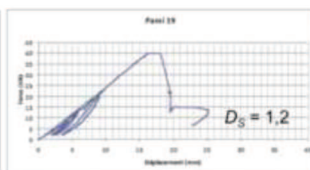


Erdbebenbemessung **nach dem duktilen Tragwerksverhalten**

Hierarchie der Tragwiderstände

- Wird $q > 1,5$ angesetzt, ist die Verklammerung als schwächstes Glied der Kette auszubilden

Randrippen 100/140 mm
Gipsfaserplatte 15 mm
Klammer 1,53/50 $e_B = 25$ mm
zweireihig ($e_{B, \text{result}} = 12$ mm)
Innenrippen 60/140 mm,
 $a_r = 278$ mm

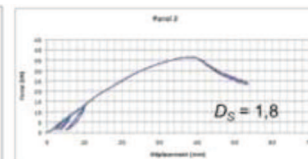


Fotografie

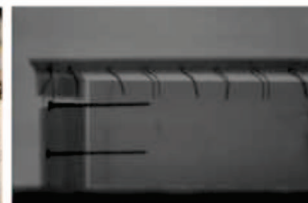


Röntgenbild

Holzrahmen 60/140 mm
Hartfaserplatte
HB.HLA2, 8 mm
Klammern 1,53/50
 $e_B = 50$ mm

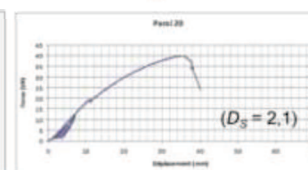


Fotografie

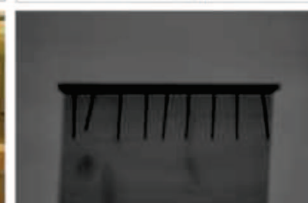


Röntgenbild

Holzrahmen 60/140 mm
Hartfaserplatte HB.HLA2, 8 mm
Nägel 2,8/70 $e_B = 30$ mm
Ohne Innenrippe



Fotografie



Röntgenbild

Berner Fachhochschule | Haute école spécialisée bernoise | Bern University of Applied Sciences

Erdbebenbemessung **nach dem duktilen Tragwerksverhalten**

Hierarchie der Tragwiderstände

- Grenzabstand der Verklammerung** in Abhängigkeit des Beplankungsmaterials und des Tragwerksverhaltens, aufgrund der Normen SIA 260 ff.

Platte			Maximale Plattenbeanspruchung ³		Grenzabstand e_R bzw. a_v	
Typ	Dicke	$f_{v,d}$	T_{Rd} bzw. $f_{v,0,d}$ mit $k_{v2} = 0.33$		für den Tragwerksverhalten	
	t	in der FK1	Schub	Ausbeulen	nicht-duktil	duktil
	(mm)	(N/mm ²)	(kN/m)	(kN/m)	(mm)	(mm)
Pavaplan (HB.HLA2) 8 mm	8	13.5	35.7	16.0	30	36
OSB/4 < 10 bis 18 mm	15	6.3	31.3	26.3	18	22
OSB/3 < 10 bis 18 mm	15	6.2	30.9	25.9	18	22
Spanplatte P5 < 13 bis 20 mm	16	5.5	29.0	26.0	18	22
Spanplatte P4 < 13 bis 20 mm	16	5.2	27.3	24.4	19	23
3SP SN EN 13353 12 bis 20 mm	19	3.5	21.8	23.1	22	26
DWD-Agepan 16 mm	16	3.1	16.5	14.8	32	39
Fermacell 15 mm ¹	15	2.0	10.1	8.4	56	68
THD-Statik-Agepan ² 40 bis 60 mm	60	0.5	10.1	33.8	47	57

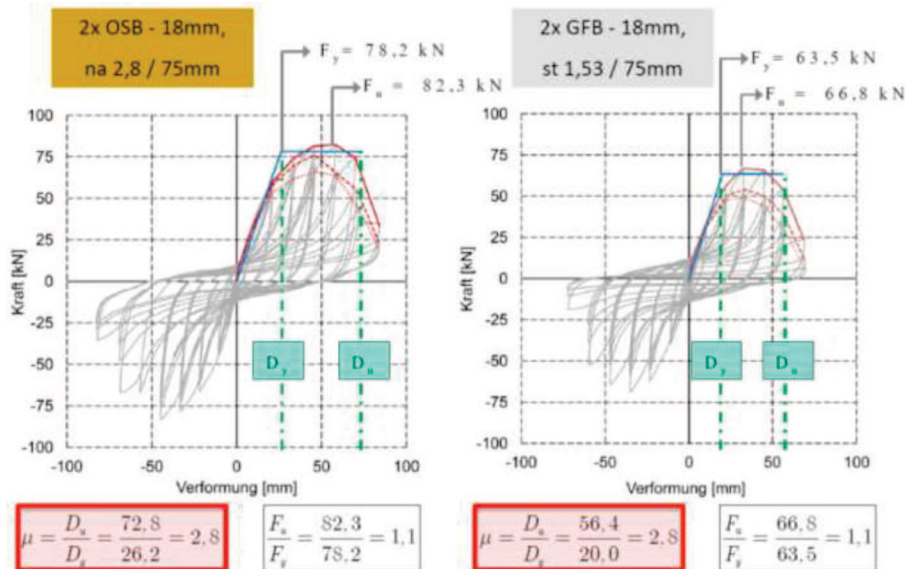
¹ Bei diesem Produkt wird empfohlen, den Zugwiderstand anstelle vom Schubwiderstand einzusetzen (2.4 MPa anstelle von 3.5 MPa)

² Bei diesem Produkt wurde der Modifikationsfaktor für KLED kurz verwendet

³ Für den Lastfall Erdbeben, Feuchteklasse 1, einseitige Beplankung, Rippenabstand $a_r = 625$ mm

⁴ Bemessungswert des Tragwiderstands einer Klammer K 1,53/50 gemäss SIA 265/1:2009 Ziffer 8.3.4.2 mit $\alpha > 30^\circ$ und $\eta_f = 1.4$: $R_d = 0.48$ kN

- Wird der Grenzabstand nicht unterschritten, ist das Verhalten weitgehend vom Beplankungsmaterial unabhängig, Beispiel aus [6]



Überfestigkeitsfaktor - Unterschiedliche Normen im Vergleich (Holzbau)

- Schweizer Norm SIA 265 **1,2**
- Italienische Norm NTC 2008 **1,1...1,3** (je nach Duktilitätsklasse)
- Eurocode 8 keine Zahlenangabe «ausreichende Überfestigkeit erforderlich»

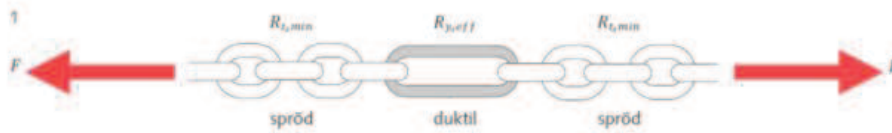
Andere Schweizer Tragwerksnormen

Schweizer Norm SIA 262 (Beton) $\varepsilon \cdot \kappa = 1,1...1,65$
(abhängig von der Geschossanzahl)

Schweizer Norm SIA 263 (Stahl) **1,2**

Überfestigkeitsfaktor - Angaben aufgrund neuester Forschungsergebnisse

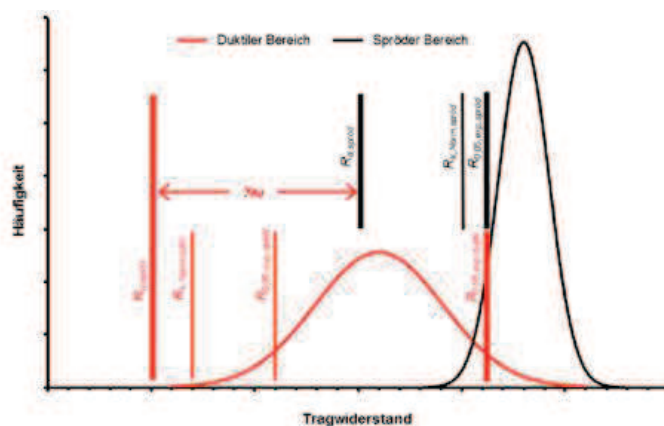
- ▶ Seim 2013 [6] 1,65...2,2
- ▶ Brühl 2013 [8] 1.33...2,0
- ▶ Jorissen, Fragiaco 2011 [9] 1,2...2,1 - Empfehlung 1,6



Figur aus [3]

- ▶ Definition des Überfestigkeitsfaktors γ_{Rd}

$$R_{0,05,exp,spröd} \geq R_{0,95,exp,duktil}$$



Bezeichnungen

γ_{Rd}	Überfestigkeitsfaktor, definiert als $R_{d,spröd} / R_{d,duktil}$
$R_{d,duktil}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des duktilen Bereichs gemäss Norm
$R_{k,Norm,duktil}$	Charakteristischer Wert des Tragwiderstands des duktilen Bereichs gemäss Norm
$R_{0,05,exp,duktil}$	5%-Fraktile des Tragwiderstands des duktilen Bereichs im Versuch
$R_{0,95,exp,duktil}$	95%-Fraktile des Tragwiderstands des duktilen Bereichs im Versuch
$R_{d,spröd}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des spröden Bereichs gemäss Norm
$R_{k,Norm,spröd}$	Charakteristischer Wert des Tragwiderstands des spröden Bereichs gemäss Norm
$R_{0,05,exp,spröd}$	5%-Fraktile des Tragwiderstands des spröden Bereichs im Versuch

- ▶ Die effektive Tragfähigkeit (Kapazität) des duktilen Bereichs spielt dabei eine entscheidende Rolle

- ▶ Beispiel Zuganker WHT (Rothoblaas-Produkt)
- ▶ Wichtig: Diese Frage der adäquaten Überfestigkeit betrifft die Erdbebenbemessung nach dem nicht-duktilen Tragwerksverhalten nicht



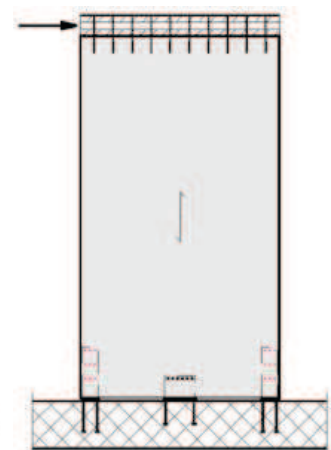
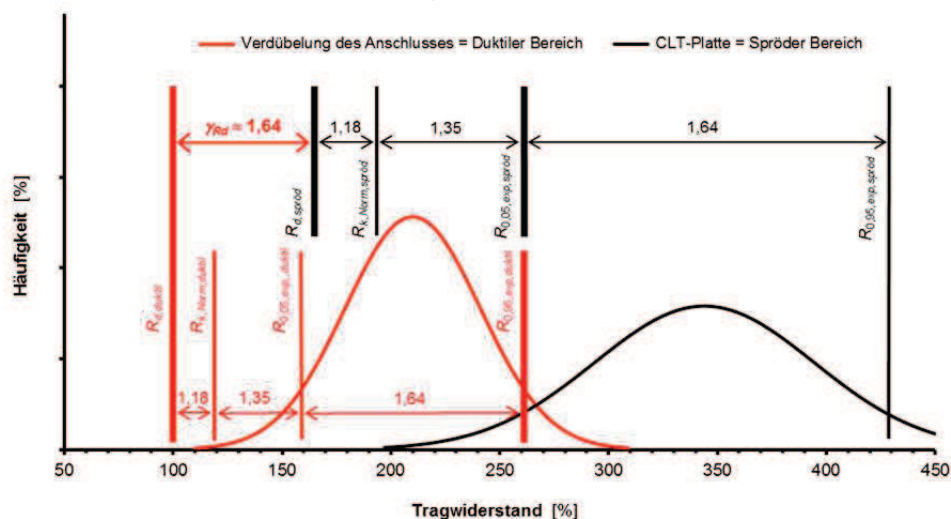
ANMERKUNGEN für die seismische Planung



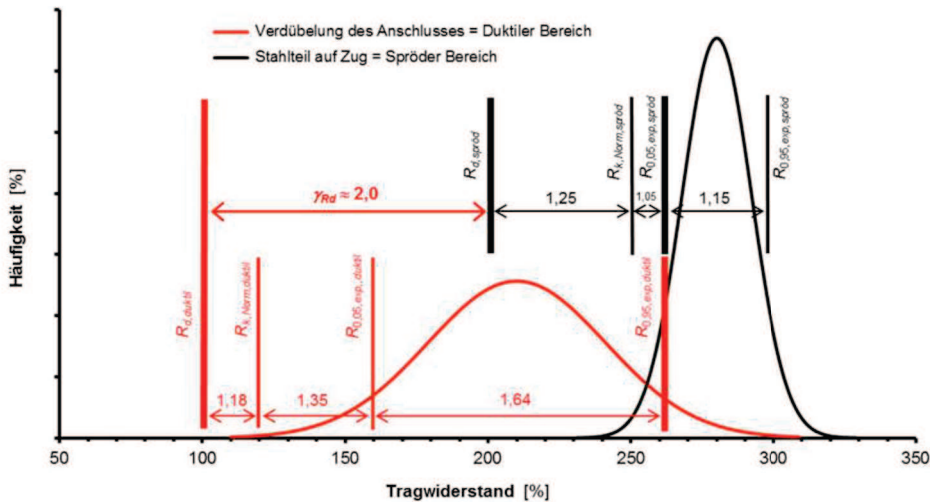
Es ist aufmerksam auf die effektive Hierarchie der Festigkeiten sowohl hinsichtlich des Gesamtgebäudes als auch innerhalb des WHT-Verbindungssystems zu achten. Erfahrungsmäßig ist die höchste Festigkeit des Ankernagels LBA (und der Lochblechschraube) wesentlich höher als die gemäß EN 1995 berechnete charakteristische Festigkeit.

Bsp.: Ankernagel LBA Ø4 x 60 mm: $R_{yk} = 1,93$ kN gemäß EN1995 / $R_{yk} = 2,8 - 3,6$ kN nach experimentellen Prüfungen (variiert je nach Holzart). Die experimentellen Daten basieren auf Prüfungen, die im Rahmen des X-Rev-Forschungsprojekts durchgeführt wurden und werden im wissenschaftlichen Bericht Verbindungssysteme für Holzgebäude: Experimentelle Untersuchung für die Abschätzung der Steifigkeit, Tragfähigkeit und Duktilität (DICAM - Institut für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften - UniTN) veröffentlicht.

- ▶ Beispiel CLT-Bauweise: **CLT-Platte** / **Verdübelung des Anschlusses**
- ▶ Grobe Abschätzung von γ_{Rd} aufgrund von Forschungsergebnissen [6] und Annahmen (dieser Schätzwert soll im Rahmen des Forschungsprojektes näher untersucht werden)



- ▶ Beispiel Holzrahmenbauweise: **Stahlteil auf Zug** / **Verklammerung**
- ▶ Grobe Abschätzung von γ_{Rd} aufgrund von Forschungsergebnissen [6] und Annahmen (dieser Schätzwert soll im Rahmen unseres Forschungsprojektes näher untersucht werden)



- ▶ Der adäquate Überfestigkeitsfaktor γ_{Rd} ist fallweise festzulegen, unter Berücksichtigung von γ_M und der Festigkeitsreduktion β_{sd} (vgl. z.B. [7]) infolge zyklischer Beanspruchung des plastischen Bereichs
- ▶ Dabei ist zu beachten, dass $R_{0,95,exp,duktil}$ eine wesentliche Rolle spielt (**Kapazität** des duktilen Bereichs)
- ▶ Im Bezug auf **Robustheit** und Standsicherheit im Falle einer Überschreitung des Bemessungsbebens ist die duktile Bemessung empfehlenswert
- ▶ Im Bezug auf die **Sanierung** nach einem Erdbeben ist die nicht-duktilen Bemessung vorteilhafter

Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten Bemerkungen...

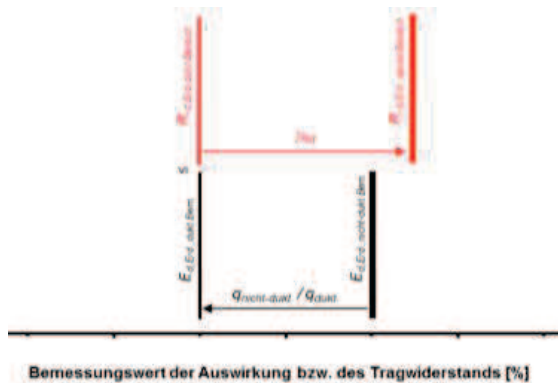
- Unterschiedliche Situationen aus wirtschaftlicher Sicht

$$q / (1,5 \cdot \gamma_{Rd}) < 1$$

→ nicht duktile Bereiche sind stärker zu bemessen als wenn sie nicht-duktil gerechnet werden

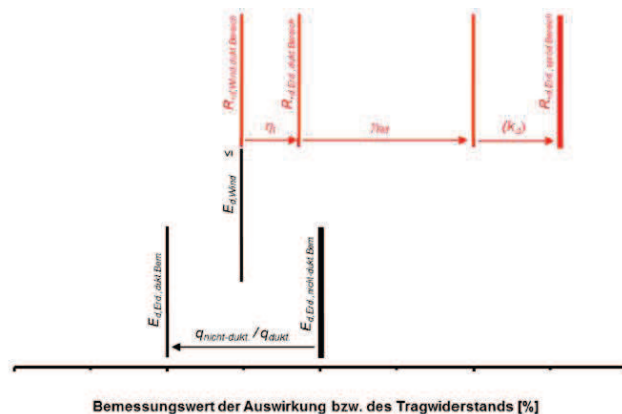
$$q / (1,5 \cdot \gamma_{Rd}) > 1$$

→ nicht duktile Bereiche können geringer bemessen werden als wenn sie nicht-duktil gerechnet werden



Erdbebenbemessung nach dem duktilen Tragwerksverhalten Bemerkungen...

- In gewissen Situationen, z.B. in Regionen mit schwacher bis mittlerer Seismizität, kann der Wind für die Bemessung des duktilen Bereichs massgebend sein
- In diesem Fall ist sowohl Wind als auch Erdbeben für die Bemessung massgebend
- Damit die duktile Erdbebenbemessung wirtschaftlich bleibt, soll die Windauswirkung ein gewisses Niveau nicht überschreiten



Bezeichnungen

$E_{d,End,dukt.Bem.}$	Bemessungswert der Erdbebenauswirkung im Falle einer duktilen Bemessung
$E_{d,End,nicht-duktil.Bem.}$	Bemessungswert der Erdbebenauswirkung im Falle einer nicht-duktilen Bemessung
$E_{d,Wind}$	Bemessungswert der Windauswirkung
$R_{d,Wind,dukt.Bereich}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des duktilen Bereichs infolge Windauswirkung
$R_{d,End,dukt.Bereich}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des duktilen Bereichs für die Erdbebenbemessung
η_1	Beiwert zur Erfassung der Lasteinwirkungsdauer gemäss Norm SIA 265 bzw. zur Erfassung der unterschiedlichen Werte für k_{mod} , γ_M und β_{Ed} nach EC8 und [7]
γ_{Rd}	Überfestigkeitsfaktor, definiert als $R_{d,spröde} / R_{d,dukt}$
k_s	Beiwert zur Erfassung der unterschiedlichen Verhältnisse zwischen M_2 / V_2 bei Wind und Erdbeben, massgebend für gewisse nicht-duktilen Bereiche
$R_{d,End,spröde.Bereich}$	Bemessungswert des Tragwiderstands des spröden Bereichs für die Erdbebenbemessung



Erdbebenbengerechtes Bauen mit Holz

Generelle Bemerkungen

- ▶ Stand der Normung entspricht nicht was heute gebaut wird
- ▶ Stand der Technik berücksichtigen

Einige Denkanstösse

- ▶ Tragwerksentwurf: Horizontal denken, nicht nur vertikal, von Anfang an; Robustheit beachten
- ▶ Tragwerksanalyse: Konservative Werte führen z.T. zu Ergebnissen die auf der unsicheren Seite liegen (z.B. T_1 im absteigenden Ast)
- ▶ Tragwerksbemessung: Hohe Kapazität der duktilen Bereiche führt dazu, dass die Kapazitätsbemessung im Holzbau, insbesondere bei der CLT-Bauweise, fallweise auf Wirtschaftlichkeit zu prüfen ist



- [1] Wallner-Novak, M. et al. (2013): *Brettspertholz Bemessung, Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode*, proHolz Austria, Wien
- [2] Bundesamt für Konjunkturfragen (1989), *Holzrahmenbau*, Impulsprogramm Holz (IP-Holz), Kapitel 3.2.2
- [3] Brunner, R. et al (2010): *Technische Dokumentation der Lignum, Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten*, Lignum, Zürich
- [4] Walter, B. (2015): *Beitrag zur Erdbebenbemessung im Holztafelbau, Ermittlung der Grundschiwingdauer unter Berücksichtigung von Biege- und Schubsteifigkeit* in Bautechnik 92 (2015), Heft 7, Ernst & Sohn, Berlin
- [5] Piazza, M. (201x): *Seismic REV, Experimental campaign on Rothoblaas products*, University of Trento
- [6] Seim, W. (2013): *Experimentelle und rechnerische Untersuchungen zur praxisgerechten Verankerung von Holzrahmenwänden*, Internationales Holzbauforum Garmisch
- [7] Follesa, M. et al. (2015): *A proposal for a new Background Document of Chapter 8 of Eurocode 8*, Inter / 48 – 102 – 1
- [8] Brühl, F. (2013): *Duktile Verbindungen im Holzbau*, Internationales Holzbauforum Garmisch- Partenkirchen
- [9] Jorissen, A., Fragiacomio, M., (2011): *General notes on ductility in timber structures*, Engineering Structures 33, 2987-2997