

1. Performance-Based Earthquake Engineering (PBEE, Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen, VE)

Inhalt

- 1) Das Erdbebenrisiko
- 2) Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen: Die Idee
- 3) Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen anhand von Verhaltenszuständen
- 4) Die Verletzbarkeitskurven
- 5) Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen anhand von Entscheidungsvariablen

Weiterführende Literatur zum Thema verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen

Bücher

- [BB04] Bozorgnia Y., Bertero V.: "Earthquake Engineering – From Engineering Seismology to Performance Based Engineering". CRC Press, Boca Raton, Fl., 2004.
- [FEM00] Federal Emergency Management Agency: "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". FEMA 356, November 2000.
- [FIB03] FIB: "Displacement-based seismic design of reinforced concrete buildings". State-of-the-art report. Fib Bulletin 25. 2003.

- [PGF04] Pinto P.E. , Giannini R. , Franchin P. : "Seismic Reliability Analysis of Structures". ISBN 88-7358-017-3. IUSS Press, 2004.
- [SEA95] SEAOC: "Vision 2000 – Performance Based Seismic Engineering of Buildings". Structural Engineers Association of California, April 3, 1995.

Zeitschriftenbeiträge

- [AM05] Aslani H., Miranda E.: "Fragility assessment of slab-column connections in existing non-ductile reinforced concrete buildings". Journal of Earthquake Engineering. Vol. 9, no. 6, pp. 777-804. Nov. 2005.
- [BA04] Bommer J. J., Acevedo A. B.: "The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis". Journal of Earthquake Engineering, Vol. 8, Special Issue 1, 2004.
- [Bac04] Bachmann H.: "Neue Tendenzen im Erdbebeningenieurwesen". Beton und Stahlbetonbau, Vol. 99, No.5, 2004.
- [Cor+00] Cornell C.A., Jalayer F., Hamburger R.O., Foutch D.A.: "The probabilistic basis for the 2000 SAC/FEMA steel moment frame guidelines". ASCE Journal of Engineering Mechanics 128(4): 526-533, 2002.
- [EE06] Erberik M.A., Elnashai A.S.: "Loss estimation analysis of flat-slab structures". Natural Hazard Review. Vol. 7. no. 1, pp. 26-37. January 2006.
- [EE04] Erberik M.A., Elnashai A.S.: "Fragility analysis of flat-slab structures". Engineering Structures. Vol. 26, pp. 937-948. 2004.

1.1 Das Erdbebenrisiko

Risiko = Gefährdung	x	Wert	x	Verletzbarkeit
----------------------------	----------	-------------	----------	-----------------------

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Gegeben von der Natur • Kann nicht reduziert werden • Kann aber untersucht werden | <ul style="list-style-type: none"> • Tragwerk • Nichttragende Bauteile • Einrichtungen • Wirtschaftliche und soziale Aspekte • Menschenleben • Gegeben von der Gesellschaft | <ul style="list-style-type: none"> • Direkte Konsequenzen <ul style="list-style-type: none"> - Schäden an tragenden und nicht-tragenden Bauteilen - Tote und Verletzte • Indirekte Konsequenzen <ul style="list-style-type: none"> - Folgeschäden an Umwelt und Gesellschaft (Explosionen, Brände, Vergiftungen, ...) - Wirtschaftliche und soziale Aspekte |
|---|---|---|

Das Erdbebenrisiko wird vom Verhalten der Bauwerken massgeblich beeinflusst. Durch geeignete konstruktive Massnahmen kann das Erdbebenrisiko effektiv reduziert werden.

1.2 Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen: Die Idee

Ausgangslage

- Bis vor kurzem war das klare Hauptziel einer Erdbebenbemessung, den Einsturz des Tragwerks zu vermeiden, d.h. Menschenleben zu retten.
- In letzter Zeit haben Erdbeben gezeigt (Northridge 94, Kobe 95, Seattle 02, ...), dass finanzielle Schäden viel grösser sein können als gedacht.
- Das Erdbebeningenieurwesen hat grosse Fortschritte gemacht und heutzutage sind leistungsfähige Verfahren vorhanden, um vernünftige Bodenbewegungen anzunehmen und das resultierende Bauwerkverhalten zu schätzen.
- Heutige Normbemessungsverfahren sind aber zu undurchsichtig:
 - Ingenieure und Ingenieurinnen verstehen nicht was wirklich dahinter steckt.
 - Bauherrschaften können keine Nutzen-Kosten Analyse des erdbebensicheren Bauens durchführen
 - Die Gesellschaft kann keine sachkundigen Entscheidungen bezüglich Strategien zu ihrem Erdbebenschutz treffen.

Zielsetzung

- "Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen bedeutet Bemessung, Bau, Überwachung und Unterhalt des Bauwerk, sodass sein Verhalten unter gewöhnlichen und aussergewöhnlichen Einwirkungen die Bedürfnisse der Benützer, der Bauherrschaft und der Gesellschaft erfüllt. Es setzt voraus, dass das Verhalten mit einer quantitativ bestimmbar Genauigkeit vorhergesagt werden kann. Dies erlaubt dann zusammen mit dem Auftraggeber zweckmässige und sachkundige Entscheidungen über Zielkonflikte zu treffen, die den ganzen Lebenszyklus des Bauwerks berücksichtigen und nicht lediglich seine Baukosten" (Nach Krawinkler).

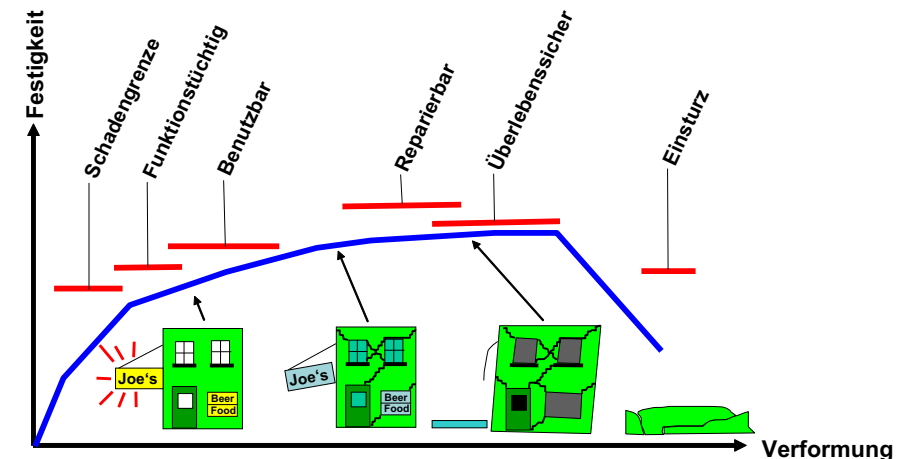
- Oder, anders gesagt:
“Der Auftraggeber und der Bauingenieur bzw. die Bauingenieurin legen zusammen fest welcher Verhaltenszustand das Bauwerk unter einer Erdbebeneinwirkung gegebener Auftretenswahrscheinlichkeit ausweisen soll.”
(Nach Bachmann)

Bemerkungen

- Das verhaltensbasierte Erdbebeningenieurwesen bezieht sich sowohl auf **bestehende Bauwerke** als auch auf **Neubauten**.
- Bei **bestehenden Bauwerken** wird dabei der für die untersuchte Gefährdung zu erwartende Verhaltenszustand gesucht (**Überprüfung**).
- Bei **Neubauten** wird dabei der für die untersuchte Gefährdung vereinbarte Verhaltenszustand sichergestellt (**Bemessung**).
- Für eine ausführliche Diskussion der Konzepte bezüglich des verhaltensbasierten Erdbebeningenieurwesens wird auf Kapitel 9 von [BB04] verwiesen.

1.3 Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen anhand von Verhaltenszuständen

Mögliche Verhaltenszustände



Aus [FIB03] nach R. Hamburger

- Die Verhaltenszustände berücksichtigen Schäden am Tragwerk, an den nichttragenden Bauteilen und am Inhalt.
- Schäden korrelieren meistens ziemlich gut mit den inelastischen Verformungen des Tragwerks.
- Die Begriffe zur Bezeichnung der Verhaltenszustände sind so gewählt, dass sie auch für Am-Bau-Beteiligte ohne Ingenieurausbildung (Architekt, Bauherr, Behörden, ...) verständlich sind. Deshalb sind sie eher unbestimmt.
- Um die Verhaltenszustände tatsächlich verwenden zu können, müssen sie mit Indikatoren versehen werden, die sich an ingenieurmässigen Grenzzustände verbunden sind. Diese sind zum Beispiel: *Rissebildung, Fließbeginn, Abplatzen, Knicken/Reissen der Bewehrung*.

... rung, Verankerungsbruch, Verlust an vertikalem Tragwiderstand, Schiefstellung, bleibende Schiefstellung, Reduktion der Festigkeit, Gesamtversagen, usw.

- Trotz dieser ingenieurmässigen Grenzzustände, ist es oft schwierig zwischen den Verhaltenszuständen genau zu unterscheiden (v.a. zwischen "Funktionstüchtig", "Benutzbar" und "Reparierbar").

Mögliche Verhaltenszustände und mögliche Indikatoren

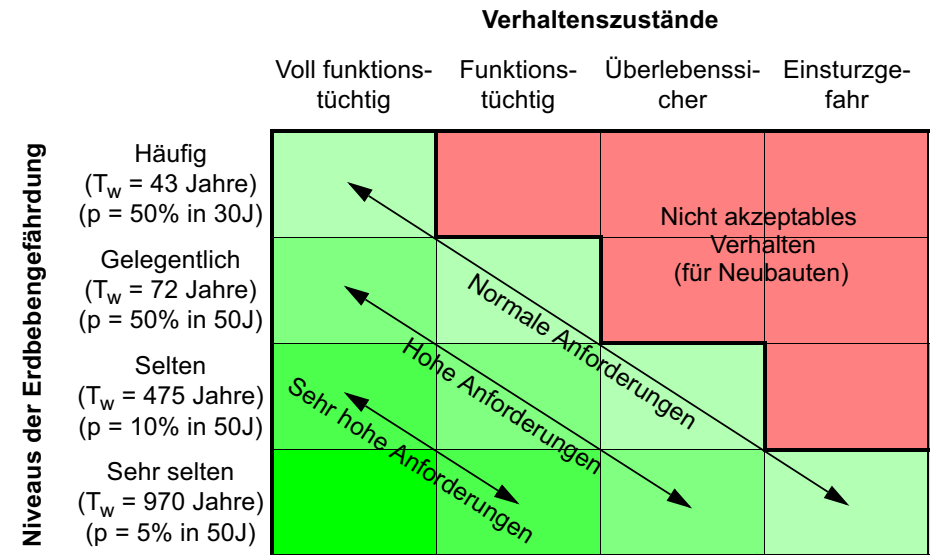
Systembeschreibung	Verhaltenszustände			
	Voll funktions-tüchtig	Funktionstüchtig	Überlebenssi-cher	Einsturz-gefahr
Schiefstellung	< 0.2%	< 0.5%	< 1.5%	< 2.5%
Permanente Schiefstellung	~ 0	~ 0	< 0.5%	< 2.5%
...
Nichtduktile Stahlbeton-Rahmen	-	Risse < 0.5 mm Begrenzte Flies-sen Keine Abplatzun-gen	Begrenzte Ab-platzungen, Risse < 3 mm in Knoten	Versagen einzel-ner Stösse, grosse Schäden an kurzen Stüt-zen, Risse > 3 mm in Knoten
...
Lifte	Alle funktionsfähig	Generell funktionsfähig	Einige nicht funktionsfähig	Viele nicht funktionsfähig
...

Nach [SEA95]

- Beispiel nach SEAOC, Vision 2000 [SEA95]. Die Indikatoren sind hier sehr generisch (z.B. Einsturzgefahr bei einer Schiefstellung < 2.5% unabhängig vom Bauwerkstyp). Bei anderen Quellen (z.B FEMA 356, [FEM00]) werden präzisere Angaben gemacht.
- Die Indikatoren sollen am Besten messbare ingenieurmässige Grenzzustände darstellen.

Verhaltenszustände in Funktion der Überschreitungswahrscheinlichkeit der Erdbebenanregung

- Vorschlag nach SEAOC Vision 2000 [SEA95]



Nach [SEA95]

- Eine übliche Bezugsgrösse zur Charakterisierung der Erdbeben-gefährdung ist 50 Jahre. Diese Zeit ist etwa repräsentativ für die Grössenordnung der Lebensdauer eines Gebäudes und der Lebenszeit eines Erwachsenen bzw. Investors, uns sie hat somit ein realistischen Bezug zu Lebens- und Eigentumsrisiken.
- Die Verknüpfung der Erdbebengefährdung mit den Verhaltenszu-ständen erlaubt eine Schätzung des Erdbebenrisikos.
- Das verhaltensbasierte Erdbebeningenieurwesen anhand von Verhaltenszuständen ist nicht eine absolute Neuheit. Ähnliche Strategien sind bereits seit einer Weile vorhanden.

- Vorschlag nach SIA 260 und 261

		Verhaltenszustände	
		Funktionstüchtig	Überlebenssicher
Niveaus der Erdbebengefährdung	Gelegentlich (200 Jahre) (p = 22% in 50J)	Sehr hohe Anforderungen (BWK III)	Nicht akzeptabel
	Selten (475 Jahre) (p = 10% in 50J)		Normale Anforderungen (BWK I)
	Sehr Selten (800 Jahre) (p = 6% in 50J)		Hohe Anforderungen (BWK II)
	Extrem selten (1200 Jahre) (p = 4% in 50J)		Sehr hohe Anforderungen (BWK III)

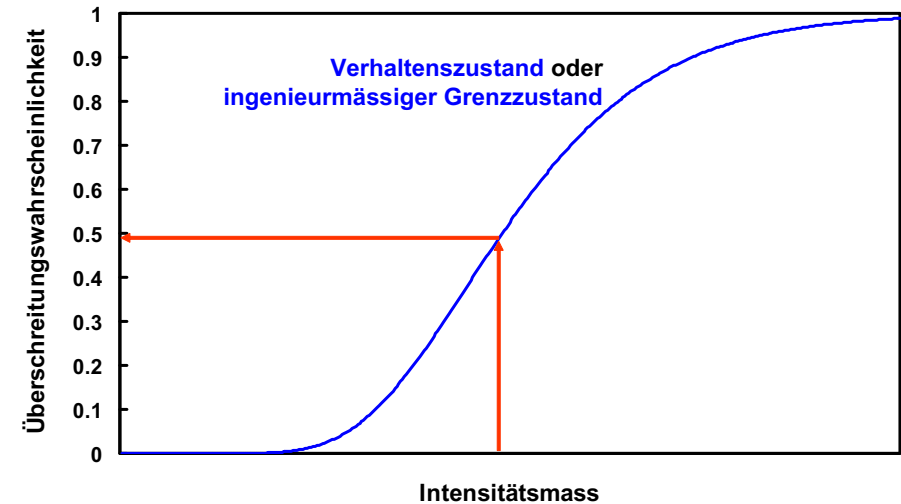
Ein ähnliches Konzept, das auf "Norm-schadenbilder" beruhte, war bereits in der Norm SIA 160/1989 enthalten.

	Norm-Schadenbild I	Norm-Schadenbild II	Norm-Schadenbild III
Tragwerk	Grosse Schäden, jedoch ohne offensichtliche Einsturzgefahr (übersteht Nachbeben ähnlicher Stärke)	Mittlere Schäden (bleibende Verformungen an zahlreichen Stellen)	Geringfügige Schäden (nur geringe bleibende Verformungen an vereinzelt Stellen)
Zwischenwände (nichttragend)	Stark beschädigt (breite Risse, häufig herausgebrochen)	Ziemlich beschädigt (stark zerrissen, vereinzelt herausgebrochen)	Unwesentlich beschädigt (dünne Risse)
Fassaden, Fenster, betriebliche Einrichtungen	Sehr grosse Schäden	Wesentliche Schäden	Unbedeutende Schäden (dürfen Funktionstüchtigkeit nicht beeinträchtigen)
Funktionstüchtigkeit	Keine, aber noch evakuierbar	Stark beeinträchtigt	Unbeeinträchtigt
Reparatur	Mit sehr grossem Aufwand eventuell möglich	Mit grossem Aufwand möglich (Risse injizieren, in Gebäuden Zwischenwände und Fenster, usw. ersetzen, bei Brücken Lager ersetzen, etc.)	Mit kleinem Aufwand möglich (Risse sanieren, neu verputzen, etc.)

Tabelle 2 aus SIA Dokumentation D044: "Die Erdbebenbestimmungen der Norm 160", 1989.

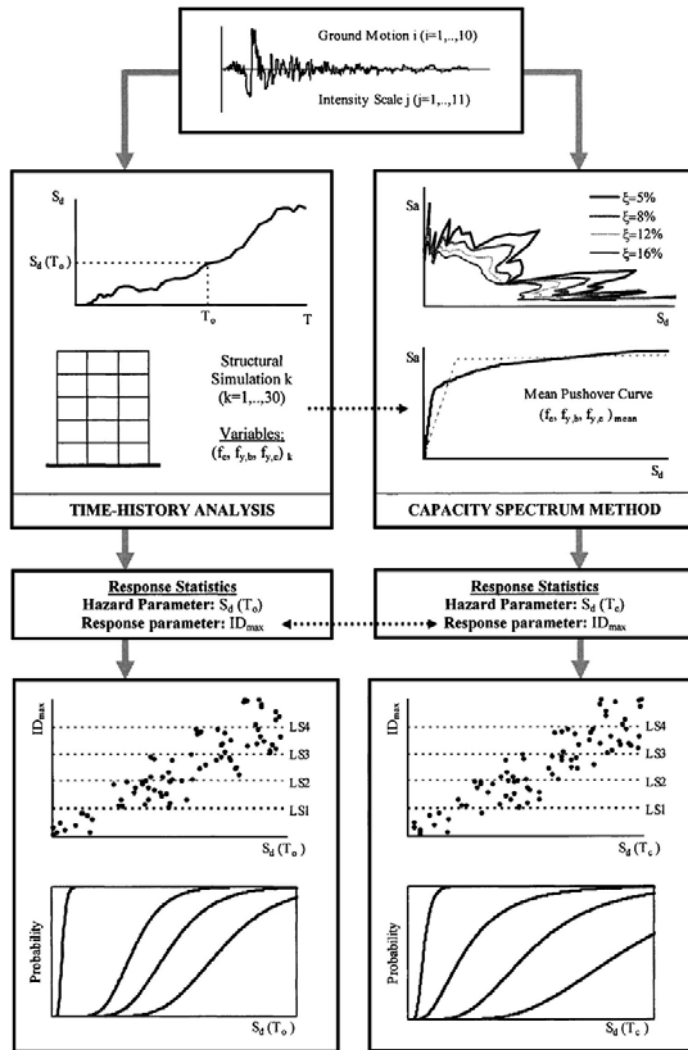
1.4 Die Verletzbarkeitskurven

Definition und Ziel



- Die Verletzbarkeitskurve ist eine Verteilungsfunktion, die die Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Verhaltenszustandes oder eines ingenieurmässigen Grenzzustandes in Funktion eines gegebenen Intensitätsmasses darstellt.
- Typische Intensitätsmassen sind:
 - Maximale Bodenbewegungsgrösse (z.B.: a_{gd} , ...)
 - Spektrale Ordinate (z.B.: $S_a(T_1)$, $S_d(T_1)$, ...)
 - Schiefstellungen und Stockwerksschiefstellungen
 - Verdrehungen von Gelenken, ...
- Verletzbarkeitskurven erlauben die Veranschaulichung und die Betrachtung von Unsicherheiten im Rahmen des verhaltensbasierten Erdbebeningenieurwesens.

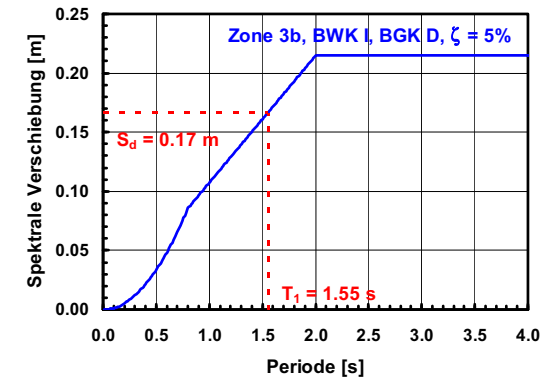
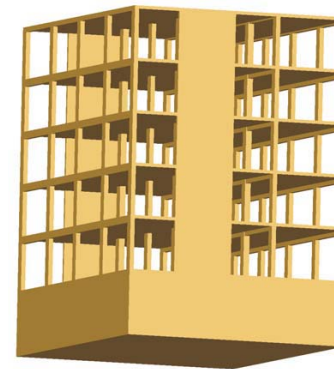
Berechnung von Verletzbarkeitskurven (mögliches Vorgehen)



Aus [EE06]

Berechnung von Verletzbarkeitskurven zur Überprüfung von bestehenden Bauwerken: Ein Beispiel

• Das Beispielgebäude

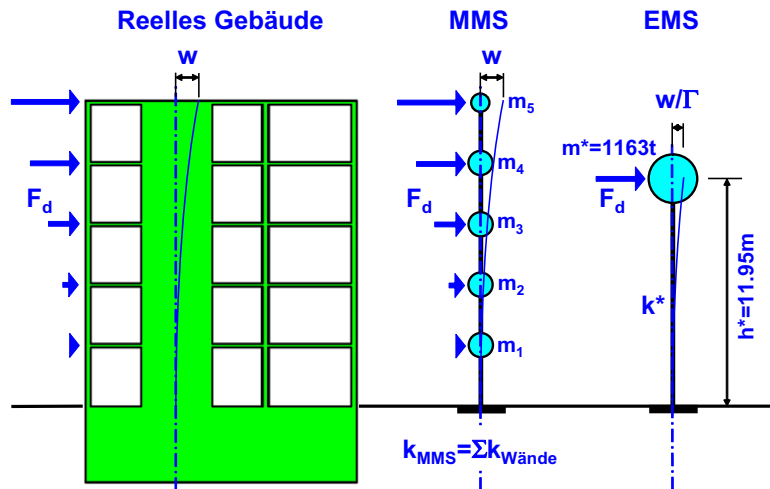


- Das Gebäude ist 5-stöckig und wurde Ende der sechziger Jahre gebaut. In Querrichtung ist das Gebäude durch zwei gleiche Tragwände ausgesteift. In Längsrichtung erfolgt die Aussteifung hingegen durch drei Stahlbetonrahmen.
- Das Verhalten des Gebäudes in Wandrichtung soll für eine Seismizität gemäss Zone 3b, BGK D, BWK I aus der Norm SIA 261 beurteilt werden.
- Die Grundschwingzeiten betragen:
 - a) Wandrichtung: $T_1 = 1.55 \text{ s}$
 - b) Rahmenrichtung: $T_1 = 1.52 \text{ s}$
- Beispielgebäude aus der SIA Dokumentation D0211

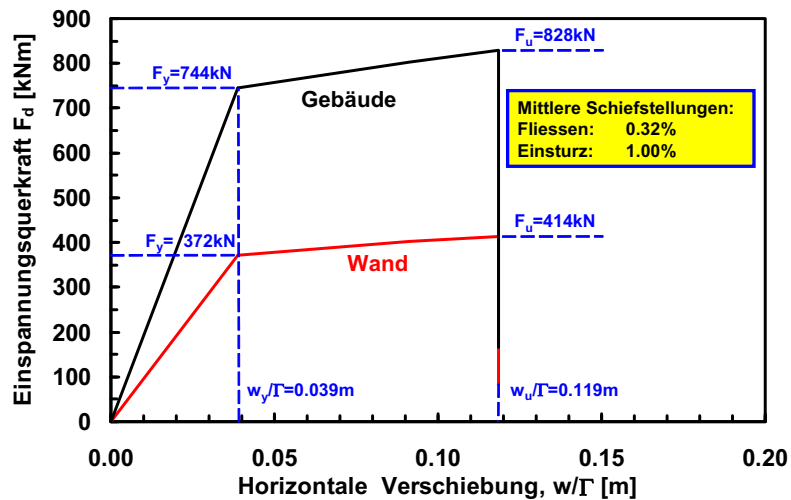
• Aufgabe

Berechnung der Verletzbarkeitskurve, die die Verhaltenszustände gemäss SEAOC Vision 2000 in Funktion der spektralen Verschiebung bei der Grundschwingzeit des Gebäudes darstellt.

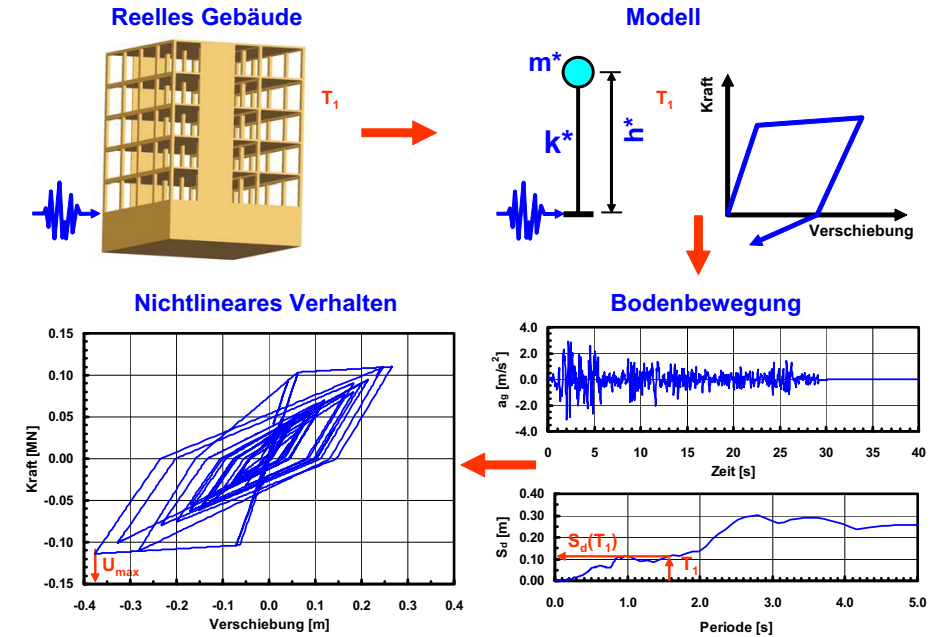
- Modellierung des Gebäudes als Einmassenschwinger



- Nichtlineare Kraft-Verformungs-Beziehung des Gebäudes

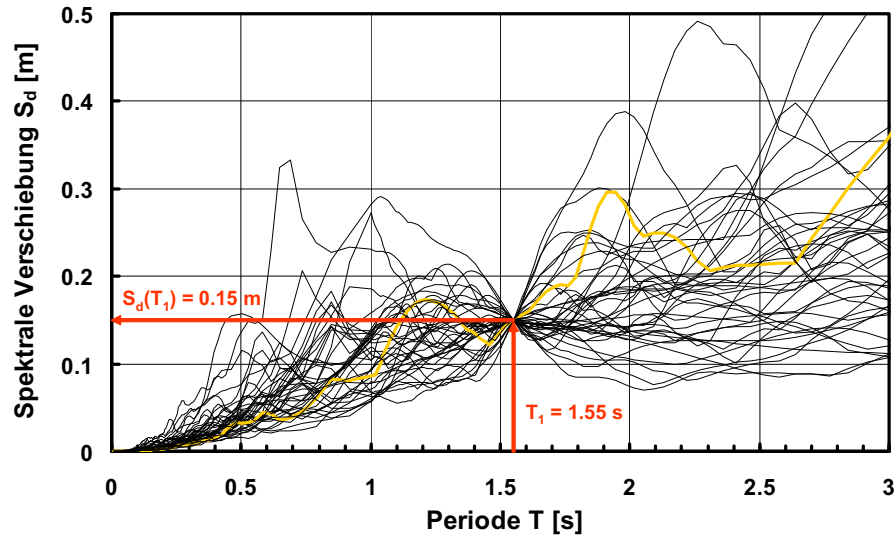


- Nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen



- Modellierung des Tragwerks in Wandrichtung als äquivalenter Einmassenschwinger mit nichtlinearen Eigenschaften (Siehe V2)
 - Modale Masse: $m^* = 1163 \text{ t}$
 - Modale Steifigkeit: $k^* = 744 \text{ kN} / 0.039 \text{ m} = 19077 \text{ kN/m}$
 - Grundschwingzeit: $T_1 = 2\pi(m^*/k^*)^{1/2} = 1.55 \text{ s}$
- Wichtige Schiefstellungen betragen:
 - Fließbeginn: $\delta_y = 0.039 / 11.95 = 0.32\%$
 - Einsturz: $\delta_u = 0.119 / 11.95 = 1.00\%$
 - Bem: Die Einsturzschiefstellung ist viel kleiner als bei [SEA95]
- Die Eigenschaften des Tragwerks werden im Rahmen dieses Beispiels deterministisch festgelegt.

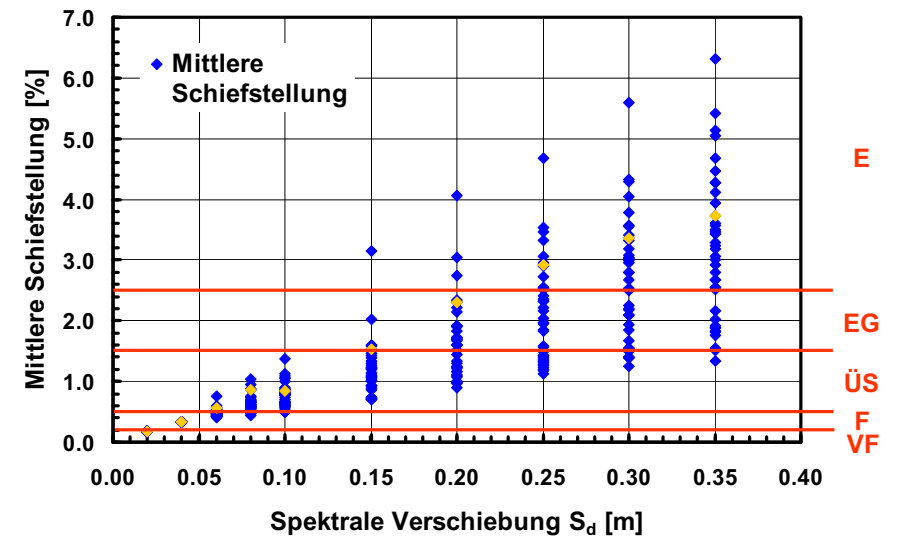
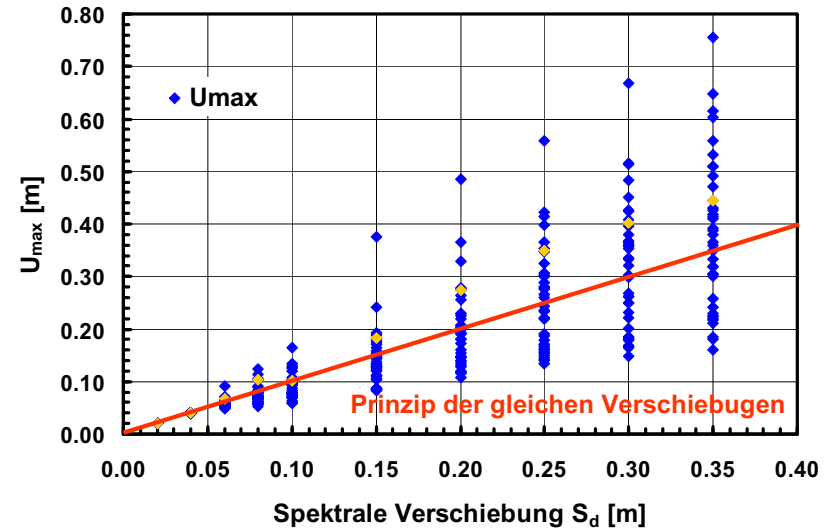
• Bodenbewegungen



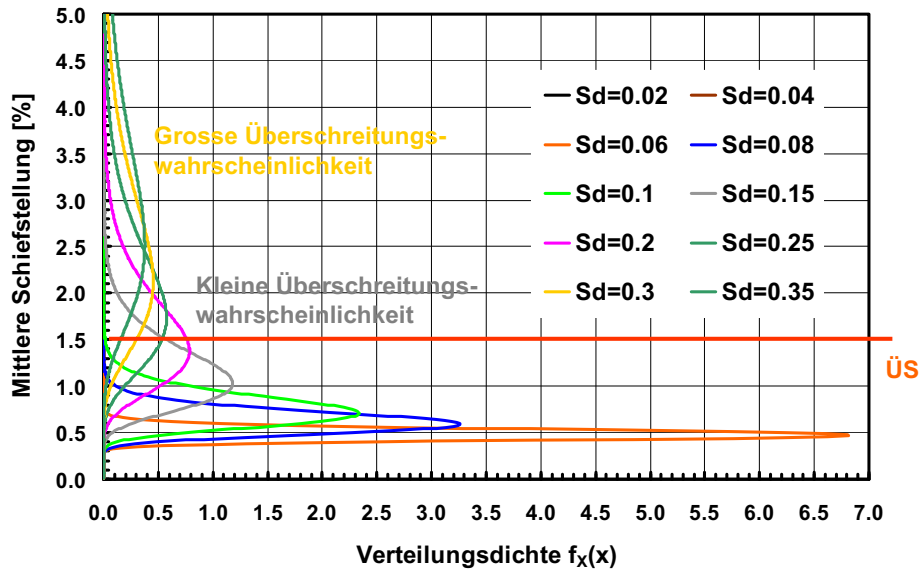
- 39 reelle Zeitverläufe werden verwendet
- Die Zeitverläufe werden zur gleichen spektralen Ordinate $S_d(T_1)$ skaliert.
- Es werden insgesamt 10 verschiedenen spektralen Ordinaten betrachtet: $S_d(T_1) = 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25, 30, 35$ cm.
- Zur Berechnung der Verletzbarkeitskurven werden insgesamt 390 nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt.
- Die Zeitverlaufsberechnungen liefern die maximale relative Verformung U_{max} des äquivalentes EMS. Die mittlere Schiefstellung ergibt sich aus:

$$\delta_m = \frac{U_{max}}{h^*}$$

• Resultate der Zeitverlaufsberechnungen

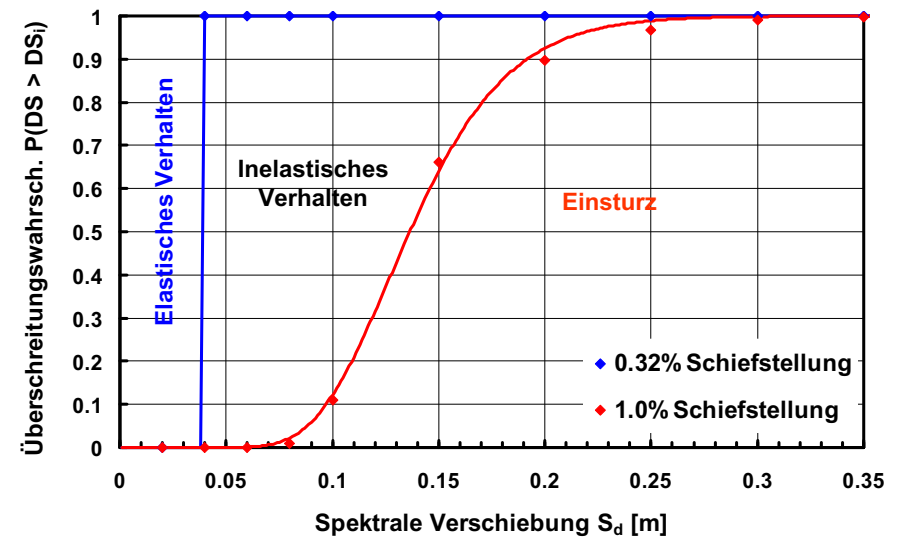
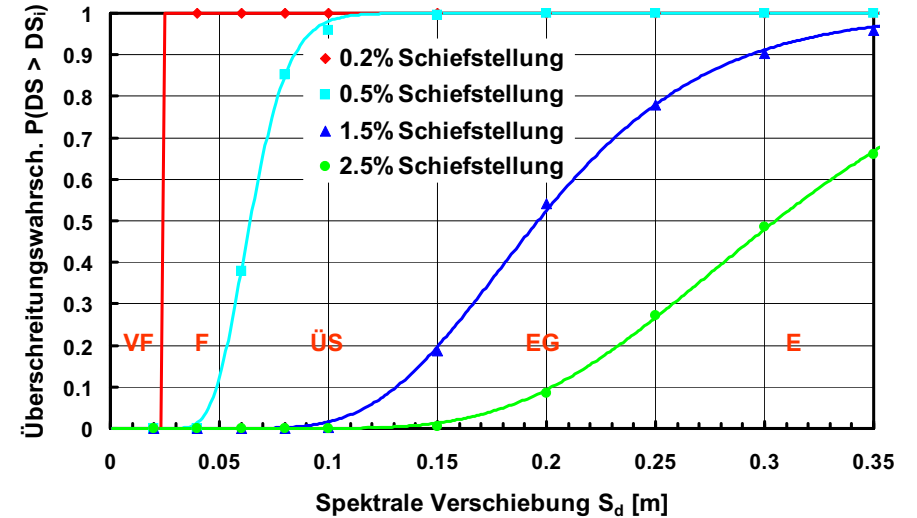


- Auswertung der Zeitverlaufberechnungen:
Lognormales Fitting der Schiefstellungen

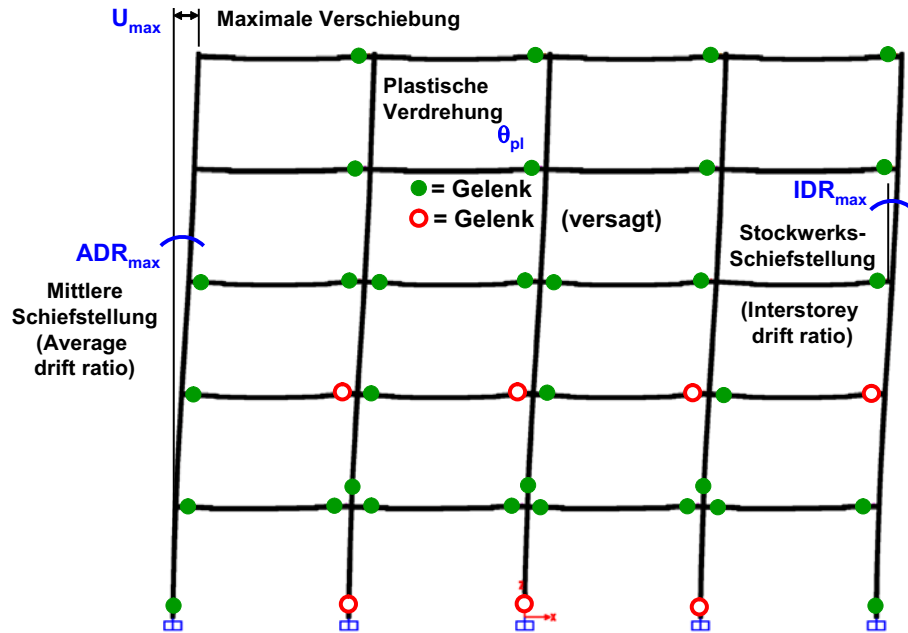


- Bei der spektralen Ordinate $S_d(T_1) = 0.02m$ und $0.04m$ bleibt der EMS elastisch.
- Die Standardabweichung (Streuung) der Resultate steigt mit steigender spektraler Ordinate, d.h. mit steigendem Verschiebeduktilitätsbedarf des EMS.
- Die "Steigung" der Verletzbarkeitskurve zeigt die Variabilität des Verhaltenszustands (oder des ingenieurmässigen Grenzzustands) bei einem gegebenen Intensitätsmass.

- Verletzbarkeitskurven



• Weitere Indikatoren

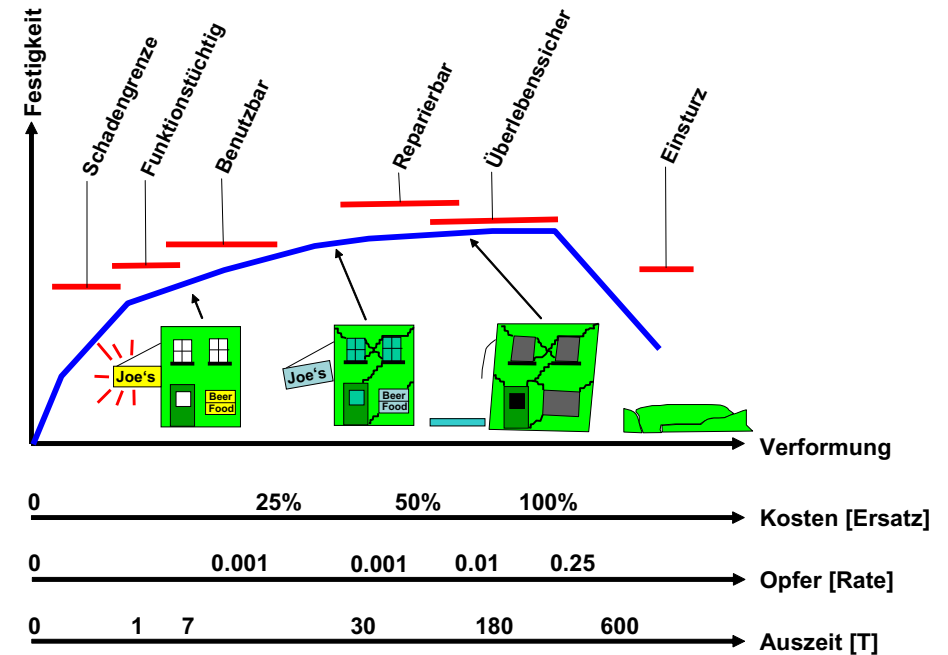


• Einige schwierige Aspekte

- Auslese der Zeitverläufe (siehe z.B. [BA04])
- Wahl der Indikatoren
- Quantifizierung der Indikatoren (Antwort des Bauwerks)
- Beziehung zwischen die Antwort des Bauwerks und den Schaden
- Monetärer Wert des Schadens
- ...

1.5 Verhaltensbasiertes Erdbebeningenieurwesen anhand von Entscheidungsvariablen

Entscheidungsvariablen



Aus [BB04]

- Kontinuierliche Variablen, die sich optimal in einen probabilistischen Ansatz einbetten lassen.
- Ziel ist z.B., die Berechnung des diskontierten jährlichen monetären Werts der Erdbebenschäden über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks. Ein solcher Wert kann direkt mit den Erträgen aus dem Bauwerk verglichen werden und eine solide Entscheidungsgrundlage bezüglich Auslegung des Bauwerks liefern.
- [BB04] diskutiert das VE anhand von Entscheidungsvariablen ausführlich.