

## ERDBEBENINGENIEURWESEN UND BAUDYNAMIK

Eine gemeinsame Publikation von

**D G E B**

Deutsche Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
[www.dgeb.org](http://www.dgeb.org)

**O G E**

Österreichische Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
[www.oge.or.at](http://www.oge.or.at)

**S G E B**

Schweizer Gesellschaft für  
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik  
[www.sgeb.ch](http://www.sgeb.ch)

**Inhalt**

- S 2 **Alessandro Dazio erhält**  
Best Teaching Award der ETH Zürich
- S 2 **12. D-A-CH-Tagung 2011**  
am 15./16. September 2011 in Hannover

**Aufsatz**

- S 3 **Grundlagen der seismischen Auslegung**  
von Kernkraftwerken und Einfluss der  
Boden-Bauwerk Wechselwirkung  
*H. Sadegh-Azar, H.-G. Hartmann*
- S 11 **Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten**  
*Thomas Wenk*

**EDITORIAL**

Die Umsetzung der europäischen Norm Eurocode 8 zur Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben ist in Deutschland, Österreich und der Schweiz inzwischen fast vollständig abgeschlossen. Während die Normengrundlagen damit für alle europäischen Länder einheitlich sind, können nationale Besonderheiten, wie regionale Einteilungen der Erdbebengebiete und bestimmte Parameter zur Klassifizierung der Erdbebenstärken, über die nationalen Anhänge geregelt werden.

In Deutschland ist der EC 8 in der DIN EN 1998 in den Teilen 1 bis 6 umgesetzt und veröffentlicht. Zusätzlich wurden in den letzten Monaten die nationalen Anhänge der DIN EN 1998, Teile 1 (Grundlagen), 2 (Brücken) und 5 (Gründungen) veröffentlicht. In der Schweiz wurden bereits im Jahre 2003 die Erdbebenbestimmungen des Eurocodes 8 in die Tragwerksnormen SIA 260 ff. abgestimmt auf niedrige bis mittlere Seismizität integriert. Der SIA bereitet zurzeit ein Projekt zur Erarbeitung nationaler Anhänge zu den Eurocodes vor.

Mitte 2009 wurden die Eurocodes in Österreich verbindlich eingeführt und die Vorgängernormen zurückgezogen. Es gibt nationale Anwendungsdokumente zu allen 6 Teilen des EC 8, wobei aber nur im Dokument zu Teil 1 wesentliche Informationen enthalten sind. Dieser Teil wurde vor wenigen Wochen bereits zu ersten Mal überarbeitet und zum Gründruck aufgelegt.

Am 15. und 16. September 2011 wird die 12. DACH Tagung der Deutschen (DGEB), der Österreichischen (OGE) und der Schweizer (SGEB) Gesellschaften für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik stattfinden, die Bauingenieuren und Seismologen ein gemeinsames Plenum zur Diskussion aktueller Entwicklungen in Forschung und Praxis in den Bereichen des Erdbebeningenieurwesens, der Baudynamik und der Seismologie bietet. Diesmal wird die Tagung bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover veranstaltet. Eine Tagungsankündigung mit einer Beschreibung des bisher geplanten Programms und Hinweisen zur Anmeldung ist auf den folgenden Seiten enthalten.

Wie immer am Ende des Editorials, möchten wir Sie auch diesmal auf die Internetseiten unserer Gesellschaften

<http://www.dgeb.org>

<http://www.oge.or.at>

<http://www.sgeb.ch>

aufmerksam machen und Sie dazu einladen, sich auf diesem Weg über die Arbeit der nationalen Gesellschaften zu informieren und eine Mitgliedschaft in Betracht zu ziehen.

Carsten Könke  
Rainer Flesch  
Thomas Wenk

S 1



Carsten Könke  
(Vorsitzender DGEB)



Rainer Flesch  
(Generalsekretär OGE)



Thomas Wenk  
(Vorsitzender SGEB)

## Alessandro Dazio erhält Best Teaching Award der ETH Zürich

Am ETH-Tag vom 20. November 2010 wurde Alessandro Dazio für seine hervorragenden Leistungen in der Lehre der ETH zweifach geehrt. Er erhielt die „Goldene Eule“ des Vereins der Studierenden an der ETH (VSETH) als bester Dozent des Departements Bau, Umwelt und Geomatik (D-BAUG) und zusätzlich den mit 10'000 Franken dotierten „Credit Suisse Award for Best Teaching“ als bester Dozent der ganzen ETH Zürich. Mit dem Award können die Schweizer Hochschulen alljährlich ihre besten Hochschullehrer auszeichnen, basierend auf einer kontinuierlichen Beurteilung durch die Studenten während 2 Jahren. Der Award soll helfen, die Qualität der Hochschullehre zu erhöhen und den Wissens- und Forschungsplatz Schweiz zu stärken. Analog zum Nobelpreis kann jemand den CS Award nur einmal im Leben gewinnen ([www.eule.ethz.ch/2010/index](http://www.eule.ethz.ch/2010/index)).

Alessandro Dazio war von 2003 bis Anfang 2010 Assistenzprofessor für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen am Institut für Baustatik und Konstruktion (IBK) der ETH Zürich. Seine Vorlesungen über neuartige, verformungsbasierte Entwurfs- und Berechnungsverfahren und seine innovativen Forschungsarbeiten mit statisch-zyklischen und dynamischen Einwirkungen auf großmaßstäbliche Versuchskörper aus Stahlbeton und Mauerwerk haben weltweit Beachtung gefunden. Im März 2009 lehnten die Professorinnen und Professoren des Departementes D-BAUG es mehrheitlich ab, das Tenure-Verfahren zur Beförderung von A. Dazio zum außerordentlichen Professor zu eröffnen. Seit Mai 2010 wirkt Alessandro Dazio als Co-Direktor der renommierten ROSE School (European School for Advanced Stu-



Die Rektorin überreicht Alessandro Dazio am ETH-Tag 2010 den „Credit Suisse Award for Best Teaching“ als besten Dozenten der ganzen ETH Zürich Bild: Oliver Bartenschlager

dies in Reduction of Seismic Risk) an der Universität Pavia (Italien). Seit 2004 ist er Vorstandsmitglied und Quästor der SGEB.

*Hugo Bachmann, Prof. em. ETH*

*Thomas Wenk, Dr., Präsident SGEB*

## 12. D-A-CH-Tagung 2011 am 15./16. September 2011 in Hannover Erdbeben und Baudynamik 2. Ankündigung

Die Deutsche (DGEB), die Österreichische (OGE) und die Schweizer (SGEB) Gesellschaften für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik führen seit 1989 im zweijährigen Turnus gemeinsame Tagungen durch. Die 12. D-A-CH-Tagung wird am 15./16. September 2011 an der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) in Hannover stattfinden und von der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB) organisiert. Die Tagung soll Bauingenieuren und Seismologen ein gemeinsames Plenum zur Diskussion aktueller Entwicklungen in Forschung und Praxis in den Bereichen des Erdbebeningenieurwesens, der Baudynamik und der Seismologie bieten.

Zu mehreren Schwerpunktthemen sind Vortragsanmeldungen eingegangen:

- 100 Jahre Albstadt-Erdbeben
- Performance based design
- Dynamische Messungen zur Systemidentifikation und zum Systemmonitoring
- Beurteilung und Ertüchtigung bestehender Bauten in Erdbebengebieten
- Induzierte Seismizität

Nähere Hinweise zum Tagungsprogramm, zur Anmeldung und zu Hotels in der Nähe des Veranstaltungsortes in Hannover sind auf der Internetseite der DGEB unter [www.dgeb.org](http://www.dgeb.org) zu finden. Mitglieder der DGEB sowie der Schwestergesellschaften aus Österreich und der Schweiz und Teilnehmer, die einen Vortrag halten, können sich zu einem ermäßigten Tagungsbeitrag anmelden.

Wissenschaftliche Mitarbeiter, die an ihrer Dissertation arbeiten, Mitglied der DGEB sind und auf der D-A-CH Tagung einen Vortrag halten, können einen formlosen Antrag auf Gewährung eines Zuschusses zu den Tagungskosten an den Vorstand der DGEB stellen.

### Organisationskomitee:

D. Kaiser, C. Könke, J. Schlittenhardt, Th. Spies

### Programmkomitee:

T. Bistry, C. Butenweg, R. Flesch, K.-G. Hinzen, D. Kaiser, C. Könke, H. Sadegh-Azar, J. Schwarz, L. Stempniewski, T. Wenk, V. Zabel

# Grundlagen der seismischen Auslegung von Kernkraftwerken und Einfluss der Boden-Bauwerk Wechselwirkung

H. Sadegh-Azar, H.-G. Hartmann

S 3

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden die Grundlagen für eine sichere Auslegung von Kernkraftwerken unter Erdbebeneinwirkungen zusammengestellt. Zu Anfang wird das zu Grunde liegende Sicherheitskonzept der seismischen Auslegung und die entsprechenden internationalen Sicherheitsanforderungen und Richtlinien vorgestellt. Nach einer kurzen Einführung in die seismologischen und bodendynamischen Grundlagen werden die verschiedenen Analyse- und Rechenmethoden vorgestellt und diskutiert. Die gesamte Berechnungskette vom Erdbebenherd über den Untergrund ins Bauwerk bis zur Anlagen-Komponente wird dabei in gestaffelte Berechnungsschritte eingeteilt. Es werden insbesondere die Einflüsse der Dekonvolution und der dynamischen Boden-Bauwerk-Wechselwirkung auf die bautechnische Auslegung und die Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren, Sekundärspektren) untersucht.

## 1 Einführung

Die Auslegung normaler Bauwerke in Deutschland infolge Erdbeben basiert auf der neuen DIN 4149 [1]. Die der DIN 4149 entsprechende Norm in Europa ist der Eurocode 8 [2]. Die beiden Normen unterscheiden sich nur unwesentlich und die Schutzziele beider Normen sind identisch. Ziel der Normen ist, im Falle eines Erdbebens menschliches Leben zu schützen, Schäden zu begrenzen und sicherzustellen, dass für die öffentliche Sicherheit und Infrastruktur wichtige bauliche Anlagen funktionstüchtig bleiben.

Für kerntechnische Anlagen liegen die Anforderungen an die Erdbebenauslegung wesentlich höher. Diese sind in den Sicherheitsrichtlinien der IAEA (International Atomic Energy Agency) sowie in den länderspezifischen Erdbebennormen festgelegt. Daneben sind in Europa auch ggf. die Vorgaben der EUR [8] zu berücksichtigen.

Basierend auf den in NS-R-1 [5] dargelegten Sicherheitsanforderungen an die Bemessung von Kernkraftwerken werden in den Sicherheitsrichtlinien NS-G-3.3 [6] und NS-G-1.6 [7] Empfehlungen zur Bestimmung der seismischen Einwirkungen und der entsprechenden Bemessung von Kernkraftwerken gegeben. Diese Dokumente bil-

den die Grundlage für die nationalen Normenwerke der IAEA-Mitgliedsstaaten bezüglich der Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen.

Die IAEA-Sicherheitsrichtlinie NS-G-1.6 [7] beschreibt das grundlegende Sicherheitskonzept zur Auslegung von Kernkraftwerken für seismische Einwirkungen. Im Rahmen dieses Sicherheitskonzepts wird zwischen einem Sicherheitserdbeben (safe shutdown earthquake) und einem Auslegungserdbeben (operation basis earthquake) unterschieden. Das Sicherheitserdbeben hat dabei ausschließlich sicherheitstechnischen Charakter, d.h. während und nach dem Eintreten eines solchen Erdbebens müssen alle Funktionen für das sichere Abfahren der Anlage und die Abfuhr der Nachzerfallswärme gewährleistet sowie der Einschluss der radioaktiven Spaltprodukte sichergestellt sein. Das Auslegungserdbeben hat indes einen operativen Fokus. Es soll sichergestellt werden, dass bei geringeren Erschütterungen die Anlage sicher weiter betrieben werden kann.

Die länderspezifische Erdbebennorm für Deutschland ist die KTA 2201 „Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen“ [3]. Ein neuer Regeländerungsentwurfsvorschlag dieser Norm befindet sich zurzeit in Bearbeitung.

Die gesamte Berechnungskette vom Erdbebenherd über den Untergrund ins Bauwerk bis zur anlagentechnischen Komponente (mechanische oder elektrotechnische Systeme) wird in gestaffelte Berechnungsschritte eingeteilt. Jeder Berechnungsschritt wird entkoppelt von den anderen durchgeführt. Eine ganzheitliche Betrachtung ist selbst mit den heutigen Rechnerkapazitäten kaum möglich und wäre auch nicht sinnvoll.

## 2 Seismologische und bodendynamische Grundlagen

Von der Entstehung eines Erdbebens bis zu seiner Wirkung auf Bauwerke laufen drei wesentliche Vorgänge ab (Bild 1):

- a) Entstehung seismischer Wellen im Erdbebenherd: In der Erdkruste oder in mehreren Kilometern Tiefe wird durch eine plötzliche Entspannung des Gesteins entlang einer Scherfuge die in diesem Bereich aufgestaute Deformationsenergie in Form von Erdbebenwellen abgestrahlt.
- b) Ausbreitung der seismischen Wellen in der Erdkruste, den geologischen Schichten und den oberflächennahen Bodenschichten: Die Abstrahlcharakteristik kann näherungsweise erfasst werden, indem man die seismischen Wellen zu Scher- und Kompressionswellen idealisiert, die sich in Erdmantel und Erdkruste kugelförmig ausbreiten. An Grenzen zwischen Bodenschichten verschiedener Steifigkeit werden die Wellen gebrochen, teilweise reflektiert und in andere Wellentypen umgeformt. Auf ihrem Ausbreitungsweg nehmen die Amplituden der Wellen ab. Dies geschieht zum einen durch Streuung und Absorption im

Dr.-Ing. H. Sadegh-Azar

HOCHTIEF Consult IKS Energy  
Lyoner Str. 25, 60528 Frankfurt

Dr.-Ing. H.-G. Hartmann

IBE  
Bockenheimer Landstr. 68, 60323 Frankfurt

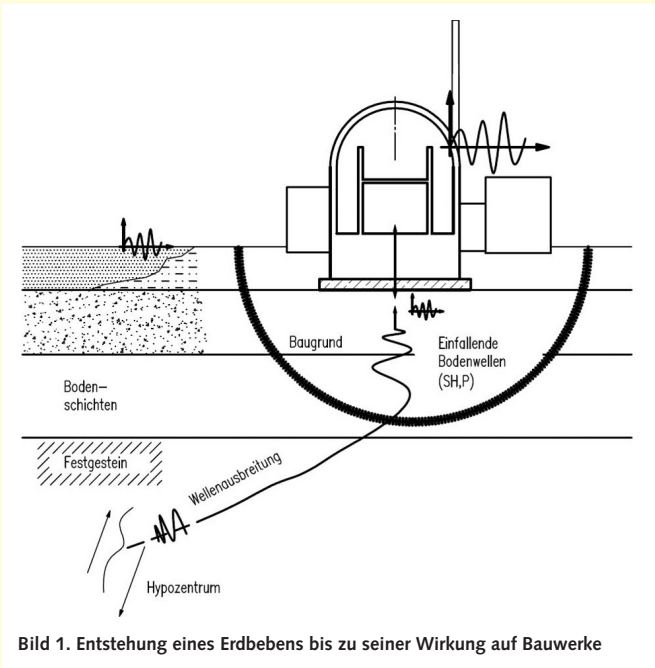


Bild 1. Entstehung eines Erdbebens bis zu seiner Wirkung auf Bauwerke

Bodenmaterial, zum anderen durch die räumliche Ausbreitung der mitgeführten Energie.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen ist von Steifigkeit und Masse des Bodenmaterials abhängig. Bodensteifigkeit und Geschwindigkeit nehmen ab, je mehr sich die Wellen der Erdoberfläche annähern. Abhängig von der relativen Lage des Standortes zum Bebenherd im Untergrund fallen die Erdbebenwellen im Allgemeinen schräg ein.

Ein bedeutsames Phänomen ist der Umstand, dass in Oberflächennähe mit der abnehmenden Wellengeschwindigkeit die Ausbreitungsrichtung immer mehr zur Vertikalen hin gebrochen wird (Snell'sches Brechungsgesetz). Dies bedeutet, dass man bei hinreichend großem Abstand des Standortes zum Erdbebenherd vertikal propagierende Wellen annehmen darf.

Wenn gleichzeitig ein horizontaler Verlauf der Bodenschichten angenommen werden kann, können die Bodenbewegungen mit Hilfe der Theorie der eindimensionalen Wellenausbreitung ermittelt werden. Während in größerer Bodentiefe wegen der höheren Steifigkeiten nur geringe Materialdehnungen auftreten, nehmen sie mit abnehmendem Abstand zur Oberfläche zu. Insbesondere bei starken Erdbeben in geringer Entfernung ist dann die Berücksichtigung der nichtlinearen Materialeigenschaften des Bodens unerlässlich, da die Bodensteifigkeiten und Materialdämpfungen ab einer gewissen Dehnung zunehmend von deren Amplitude abhängen. Das nichtlineare Materialverhalten kann näherungsweise berücksichtigt werden, indem in einer iterativen linearen

ren Berechnung die Materialkennwerte den auftretenden Dehnungen schrittweise angepasst werden.

An der Erdoberfläche gemessene Beschleunigungszeitverläufe sind die Basis für definierte Bodenantwortspektren, die für die Auslegung von Bauwerken heranzuziehen sind. Die in Datenbanken vorliegenden Zeitverläufe gelten für Messorte auf Fels oder auf mehr oder weniger steifen alluvialen Böden. Die daraus abgeleiteten Bodenantwortspektren beziehen sich somit auf Standorte mit Böden, die in etwa denen an den Messstellen entsprechen. Lokale Gegebenheiten und deren Auswirkungen auf die seismischen Bewegungen sind speziell zu berücksichtigen.

c) Einflüsse auf die seismischen Bewegungen des Baugrundes am Standort durch lokale Bodeneigenschaften und durch die Fundamente der Bauwerke (insbesondere Pfahlgründungen): Die seismischen Wellen werden beim Durchgang der lokalen Bodenschichtung im Bereich des Baugrundes am Standort hinsichtlich des Frequenzverhaltens und der Amplituden verändert. Das Übertragungsverhalten des Bodens ist abhängig von der Geometrie des Bodenprofils, von den Materialeigenschaften der einzelnen Bodenschichten und von der Art der seismischen Erregung.

Zusätzlich zu den seismologischen Daten für einen Standort sind daher für die Erdbebenauslegung auch die bodendynamischen Kennwerte des Baugrundes erforderlich. Diese sind in der Regel Teil des Bodengutachtens am Standort.

### 3 Beschreibung und Quantifizierung der Einwirkung infolge Erdbeben

Bauwerke, deren Unversehrtheit während und nach einem Erdbeben von höchster Wichtigkeit für den Schutz der Bevölkerung ist, z. B. Krankenhäuser, Feuerwachen, fossile Kraftwerke, LNG-Tanks, chemische Großanlagen werden für extrem starke und seltene Erdbeben ausgelegt. Kernkraftwerke hingegen werden für noch stärkere und unwahrscheinlichere Erdbeben (die sogenannten Sicherheitserdbeben) ausgelegt. Die Wiederkehrperiode für das Sicherheitserdbeben liegt international zwischen 10000 bis 100000 Jah-

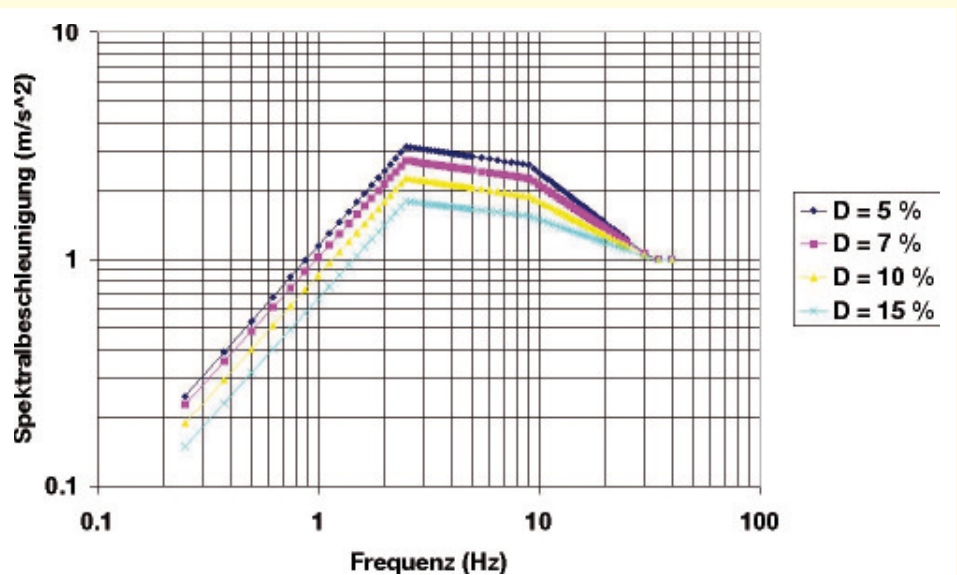


Bild 2. Breitbandiges Bodenantwortspektrum für die Auslegung (hier mod. USAEC-Spektrum, D ist die Dämpfung)

ren. Der neue Regeländerungsentwurfsvorschlag der KTA 2201.1 sieht eine Wiederkehrperiode von 100000 Jahren vor (für die 50%-Fraktile). Zum Vergleich beträgt die anzusetzende Wiederkehrperiode bei normalen Industrieanlagen oder Bauwerken 475 Jahre. Die Einwirkungen infolge Erdbeben in jeder Richtung werden in der Regel durch ein Bodenantwortspektrum für einen bestimmten Horizont (z.B. Geländeoberfläche) gegeben. In **Bild 2** ist ein typisches breitbandiges Bodenantwortspektrum dargestellt. Dieses Spektrum enthält und repräsentiert alle für die bauliche Auslegung erforderlichen Eingangsgrößen.

Vereinfacht ausgedrückt ist ein Bodenantwortspektrum die graphische Darstellung der Maximalantworten von Bauwerken auf dem Baugrund/Boden eines Standorts. Wie man aus **Bild 2** erkennen kann, variiert die Maximalantwort mit der Schwingfrequenz und Dämpfung des Bauwerks.

Die Vorgabe eines Bodenantwortspektrums für einen bestimmten Standort erfolgt basierend auf umfangreichen Untersuchungen und Auswertungen durch Seismologen. Alternativ können auch eine Anzahl von Erdbeben-Beschleunigungszeitverläufen vorgegeben oder künstlich aus dem Spektrum generiert werden. **Bild 3** zeigt einen typischen Erdbebenzeitverlauf. Für die Generierung künstlicher spektrumkompatibler Zeitverläufe gibt es eine Reihe von Verfahren, die hierfür angewendet werden können.

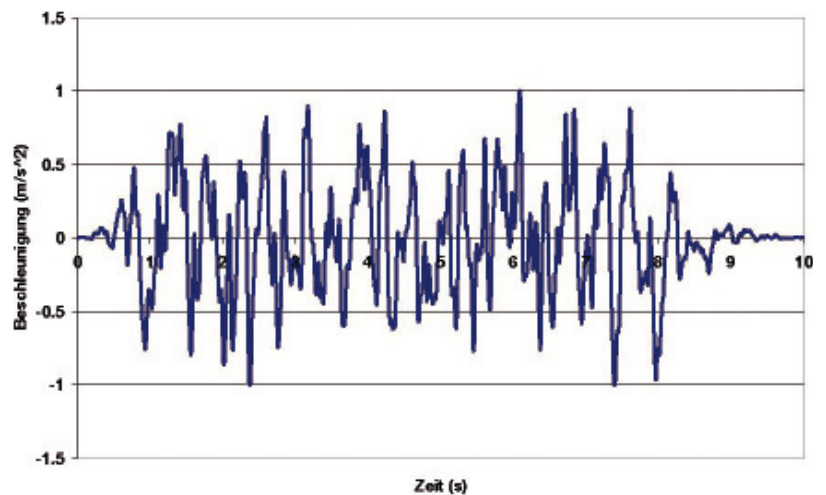


Bild 3. Typischer künstlicher Erdbebenzeitverlauf für die Auslegung

#### 4 Dekonvolution

In der Regel liegt die seismische Lastbeschreibung in der Form eines Bodenantwortspektrums im Freifeld vor, das heißt an der Oberfläche des tragfähigen Baugrundes. Um die Anregung auf einen anderen Horizont (z.B. Fundamentunterkante) umzurechnen wird eine Dekonvolution durchgeführt. Die Berechnung erfolgt in der Regel an einem eindimensionalen Bodenmodell unter Berücksichtigung des nichtlinearen Bodenverhaltens (**Bild 4**). Bei der Dekonvolutionsberechnung werden mögliche Streuungen der Boden-

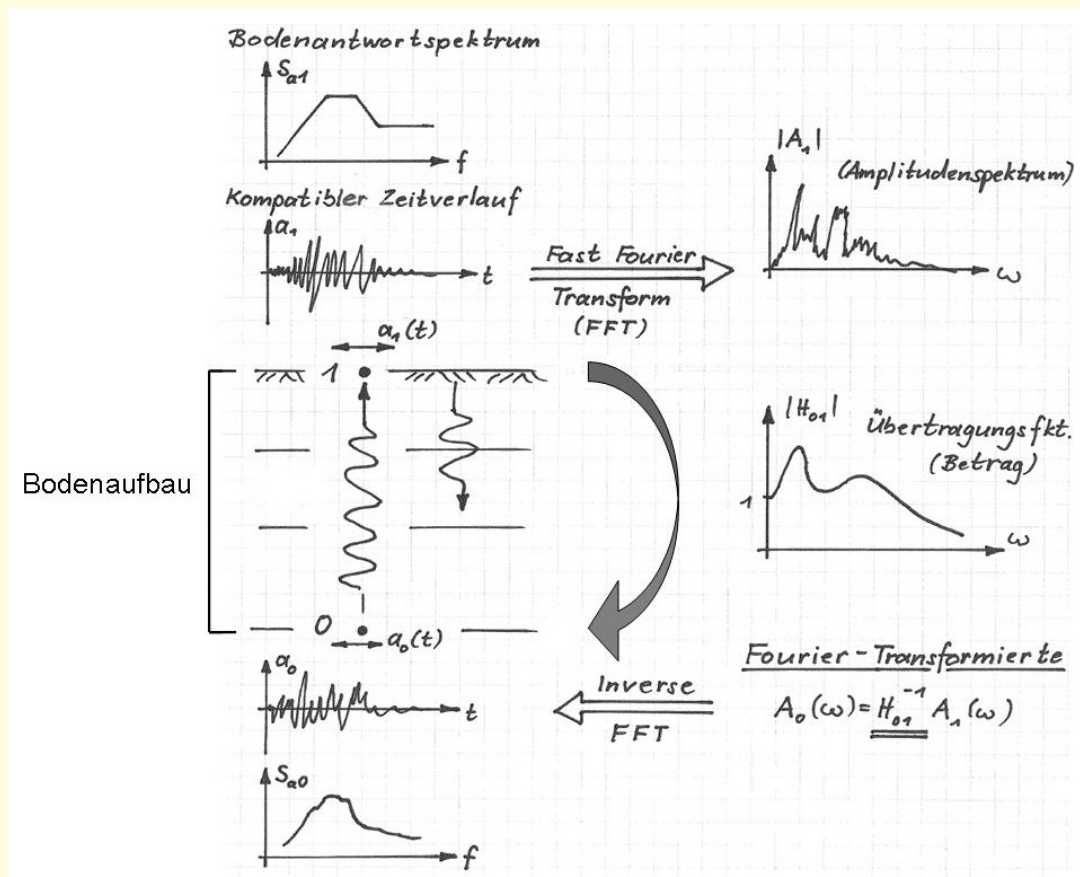


Bild 4. Dekonvolution zur Umrechnung der Anregung auf einen anderen Horizont (hier von Punkt 1 auf der Geländeoberfläche zu Punkt 0 unter dem Fundament)

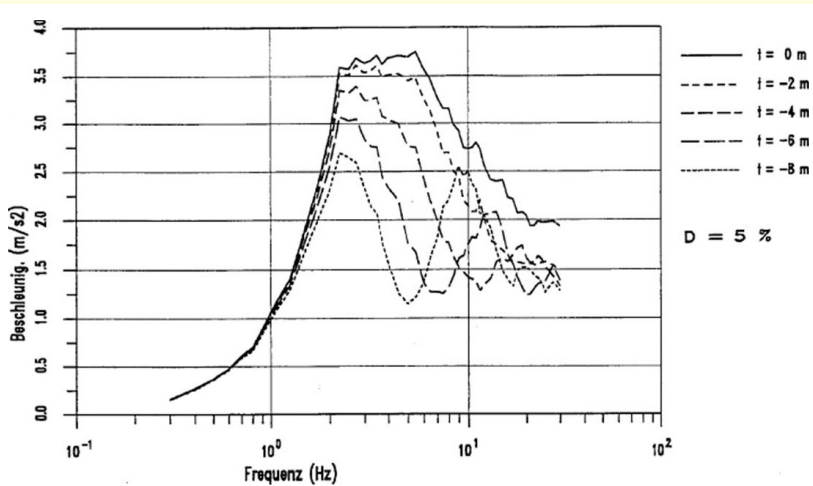


Bild 5. Ergebnisse einer Dekonvolutionsberechnung (Bodenantwortspektrern in Abhängigkeit der Tiefe t unter Geländeoberfläche)

eigenschaften berücksichtigt. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ eingehüllt. Die Ergebnisse einer Dekonvolutionsberechnung für verschiedene Tiefen unter der Geländeoberfläche sind in Bild 5 dargestellt.

### 5 Boden-Bauwerk-Wechselwirkung

Bei Erdbeben bewegt sich der Boden in einem hinreichenden Abstand vom Bauwerk unbeeinflusst von diesem, siehe Bild 6, als sogenannte Freifeldbewegung. Nähern wir uns dem Bauwerk bis zum Fundament, beobachten wir zunehmend Unterschiede in der Bodenbewegung. Diese Unterschiede werden im Wesentlichen durch die Steifigkeit der Gründung (z. B. steife Tiefgeschosse oder Pfahlgründung) und durch die träge Bauwerksmasse verursacht.

Bei einer leichten Baustruktur auf einem sehr steifen Felsuntergrund kann vereinfachend angenommen werden, dass die anregende Bewegung am Fundament die gleiche ist wie die Bewegung des Bodens im Freifeld. Diese Annahme ist sicher gültig für Bauwerke wie Stahlmaste oder auch Stahlbetontürme, sie ist auch gerechtfertigt für eine Vielzahl von Bauwerken des üblichen Hochbaus.

Haben wir jedoch massive oder schwere Baustrukturen auf relativ weichem Baugrund vor uns, kann die Bewegung am Fundament deutlich von der Bewegung im Freifeld abweichen. Dies gilt z.B. für typische Strukturen aus der Kerntechnik wie z.B. Reaktorgebäude oder Standortzwischenlager,

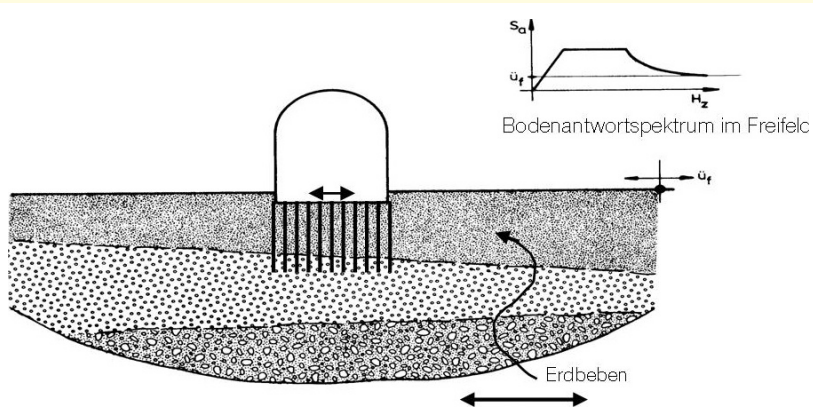


Bild 6. Freifeldbewegung und Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bei Erdbeben

oder auch für Dämme oder Schwergewichtstaumauern.

Ein anderer Fall von Boden-Bauwerk-Wechselwirkung liegt vor, wenn der Baugrund durch die Gründung im Vergleich zum Freifeld wesentlich ausgesteift wird, z.B. durch steife Tiefgeschosse oder Tiefgründungen (s. Bild 9a-b). Dies ist erkennbar an einer im Vergleich zu einer Flachgründung deutlich höheren Horizontal- oder Kippsteifigkeit. Ein typisches Beispiel sind Pfahlgründungen unter horizontaler Erdbebenanregung. Da Pfähle meist bei weichen Böden zum Einsatz kommen, können sie die Schubsteifigkeit des Baugrundes erheblich vergrößern, wenn die Pfahlanzahl nur groß genug ist. Auf der anderen Seite entstehen durch die Bodenbewegungen in den Pfählen Biege- und Schubbeanspruchungen, die in der Bemessung zu berücksichtigen sind. Dies gilt prinzipiell

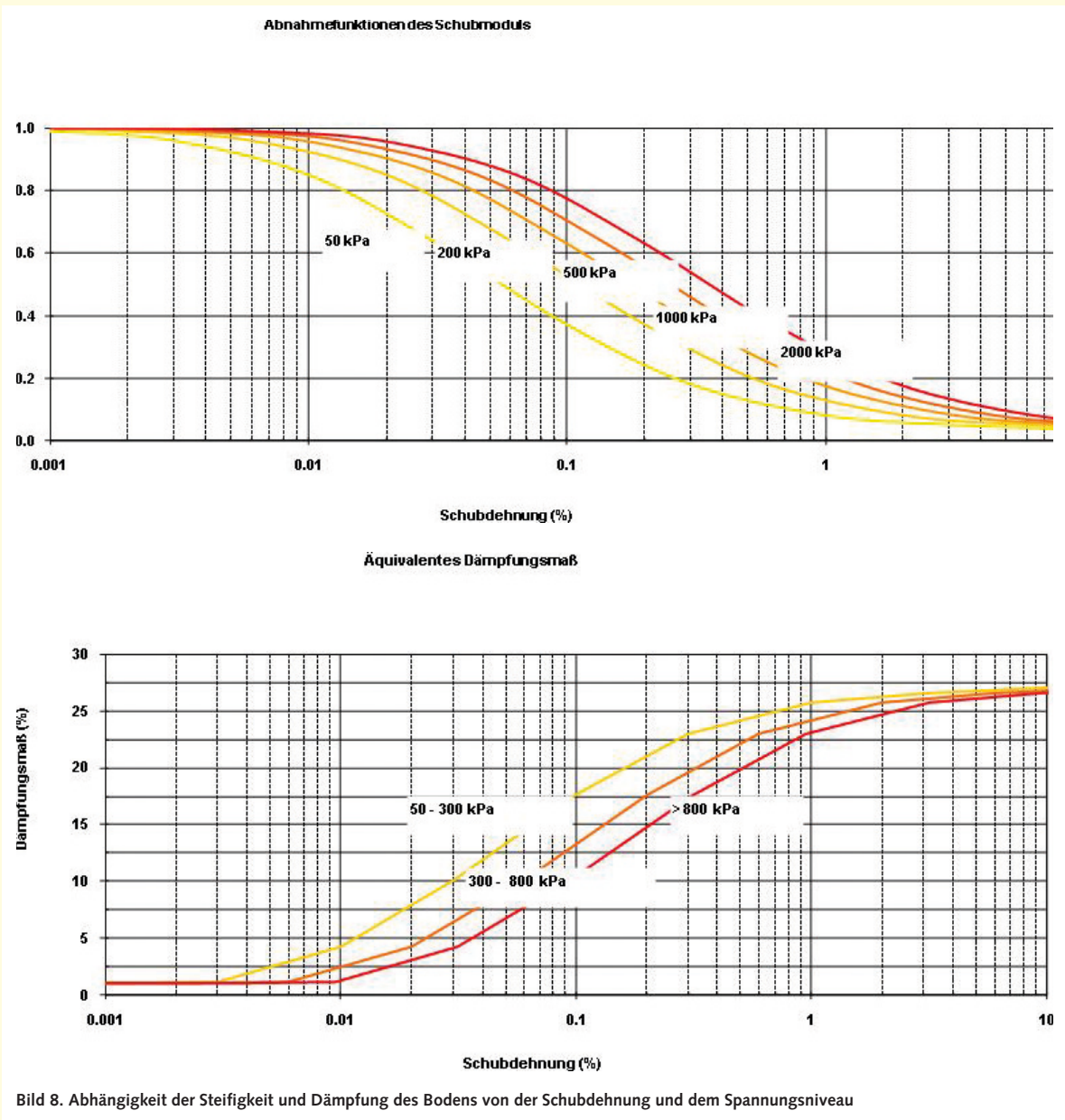
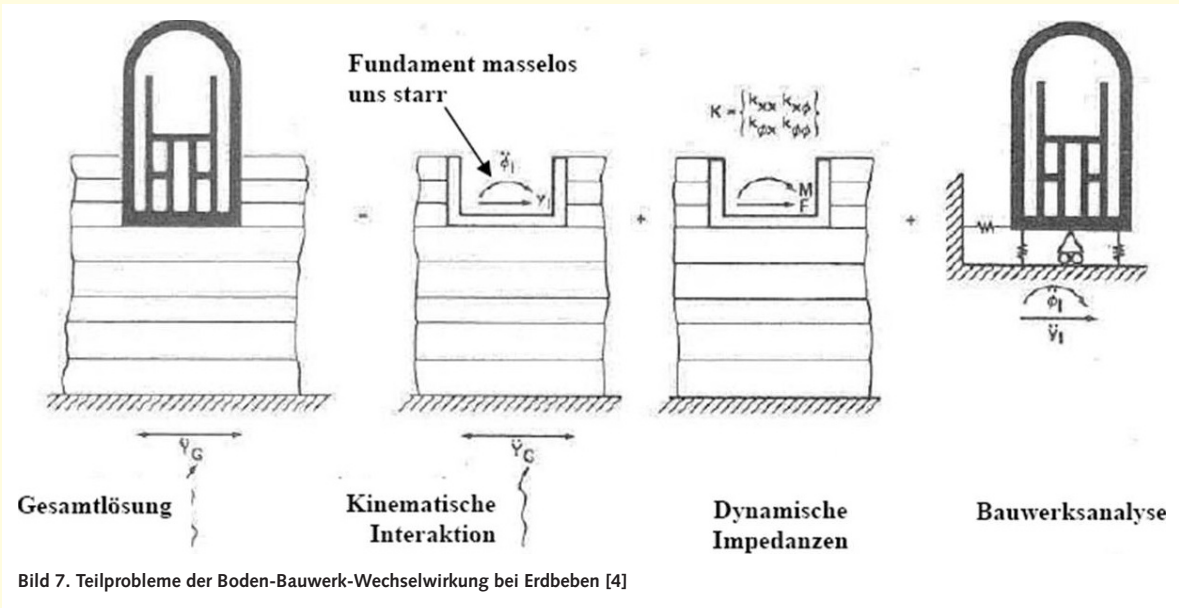
auch für einen Einzelpfahl.

Grundsätzlich lassen sich die beschriebenen Phänomene der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung bei Erdbebeneinwirkung in folgender Weise klassifizieren:

- a) Das aus dem Grundgebirge ankommende seismische Wellenfeld wird am Bauwerksstandort verändert. Dies geschieht zum Einen durch die oberflächennahen Bodenschichten und die Reflexion an der Geländeoberfläche. Wir bezeichnen dies als **Freifeld-Verschiebungsfeld**.
- b) Zum Anderen wird die Veränderung des Wellenfeldes durch die Geometrie und Steifigkeit der Bauwerksgründung bedingt. Es kommt zu Reflexionen, Streuungen und Beugungen. Dies bezeichnen wir als **kinematische Wechselwirkung**.
- c) Das Bauwerk auf der nachgiebigen Gründung wird zu Schwingungen angeregt. Dabei werden wiederum Wellen in den umgebenden Baugrund abgegeben, die das seismische Wellenfeld überlagern. Neben dem Energieeintrag durch die Anregung gibt es auch einen Energieverlust, der als Abstrahlungsdämpfung bezeichnet wird. Dieser Vorgang wird hier **träge Wechselwirkung** genannt.

Das Problem der Bauwerk-Boden-Wechselwirkung bei Erdbeben kann in einem 3-Schritt-Verfahren nach Bild 7 berechnet werden.

1. Teilproblem: Kinematische Wechselwirkung
  - Schritt 1: Ermittlung der Bewegung des masselosen und starr gedachten Bauwerks, eingebettet im Baugrund (s. Bild 7: Kinematische Interaktion).
2. Teilproblem: Träge Wechselwirkung
  - Schritt 2: Ermittlung der dynamischen Steifigkeit und Dämpfung der Gründung. Hierbei spielt die Energieabstrahlung im Boden eine wichtige Rolle (s. Bild 7: Dynamische Impedanzen).
  - Schritt 3: Dynamische Berechnung des Bauwerksmodells auf den Impedanzen und angeregt durch die in Schritt 1 ermittelte Fundamentbewegung (s. Bild 7: Bauwerksanalyse). Bei Anwendung modaler Verfahren wird die Dämpfung aus Hysterese und Energieabstrahlung im Allgemeinen auf 15% (für Horizontal- und Drehschwingungen) bzw. 30% (für Vertikalschwingungen)



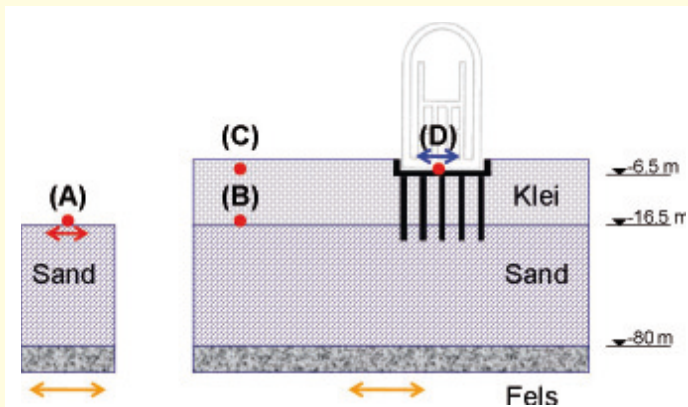


Bild 9a. Schematische Darstellung der Bodenschichten und der Pfahlgründung eines Reaktorgebäudes auf weichem Kleiboden

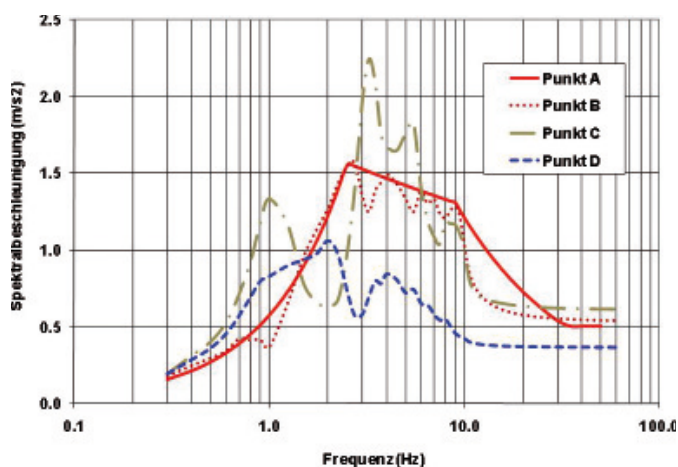


Bild 9b. Einfluss der kinematischen Wechselwirkung der Pfahlgründung und der oberen weichen Bodenschicht auf die Antwortspektren (Bild 9a)

der kritischen Dämpfung begrenzt. Für Berechnungen im Frequenzbereich (s. Tab. 1), die generell eine genauere Kenntnis und eine realitätsnähere Modellierung des Baugrunds voraussetzen, besteht diese Einschränkung nicht.

Der dynamische Schubmodul und die hysteretische Dämpfung des Bodens sind von der Schubdehnung und dem Spannungsniveau abhängig. Dies wird bei der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung berücksichtigt. In Bild 8 ist diese Abhängigkeit beispielhaft dargestellt. Bei der Auslegung der Bauwerke und bei Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung werden die Bodeneigenschaften breit variiert. Die resultierenden Ergebnisse werden konservativ eingehüllt.

In Bild 9b ist der Einfluss der kinematischen Wechselwirkung auf die Antwortspektren einer Pfahlgründung und einer weichen Bodenschicht (Bild 9a) beispielhaft dargestellt. Das Antwortspektrum des Bemessungserdbebens (Freifeldantwortspektrum) wird meist auf einer tragfähigen Schicht vorgegeben (Punkt A in Bild 9a). Punkt B und C zeigen den Einfluss der weichen Kleischicht ohne die kinematische Wechselwirkung der Pfahlgründung. Die etwas modifizierte Bodenbewegung in Punkt B (im Vergleich zu Punkt A) ist bedingt durch die obere Kleischicht. Punkt D beinhaltet den Einfluss der weichen Schicht und der kinematischen Wechselwirkung einer großen Pfahlgründung aus ca. 250 Großbohrpfählen.

Tab. 1. Berechnungsverfahren und die zugehörigen Modelleigenschaften

	Ersatzkraftverfahren	Antwortspektrumverfahren	Frequenzbereichsanalyse	Nichtlineare statische Berechnung	Nichtlineare/Lineare dynamische Berechnung (Zeitverlaufsrechnung)
<b>Einsatzbereich</b>	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke	alle Bauwerke	regelmässige Bauwerke	alle Bauwerke
<b>Erdbebenanregung</b>	Bodenantwortspektrum	Bodenantwortspektrum	Zeitverlauf	Bodenantwortspektrum	Zeitverlauf
<b>Modell</b>	2D	2D oder 3D	2D oder 3D	2D	2D oder 3D
<b>Materialmodell</b>	linear	linear	linear	nichtlinear	nichtlinear
<b>berücksichtigte Eigenformen</b>	Grundform	alle	-	Grundform	-
<b>Dämpfungsmodell</b>	viskos	viskos	viskos und hysteretisch	viskos	viskos und hysteretisch
<b>Berücksichtigung Torsion</b>	Amplifikationsfaktor	linear	linear	Amplifikationsfaktor	nichtlinear
<b>Berücksichtigung Materialnichtlinearitäten*</b>	q-Faktor	q-Faktor	nicht möglich	nichtlineares Materialmodell	nichtlineares Materialmodell
<b>Ergebnisse</b>	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte und Verformungen	Schnittkräfte und Verformungen	lokaler Duktilitätsbedarf, Schnittkräfte und Verformungen	lokaler Duktilitätsbedarf, Schnittkräfte und Verformungen
<b>Typische Anwendung</b>	Auslegung	Auslegung	Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren)	Überprüfung bestehender Bauwerke	Spezialbauwerke
<b>Aufwand</b>	niedrig	mittel	mittel	mittel	hoch

(\*-Zulässigkeit orientiert sich an der entsprechenden sicherheitstechnischen Klassifizierung der Bauwerke)



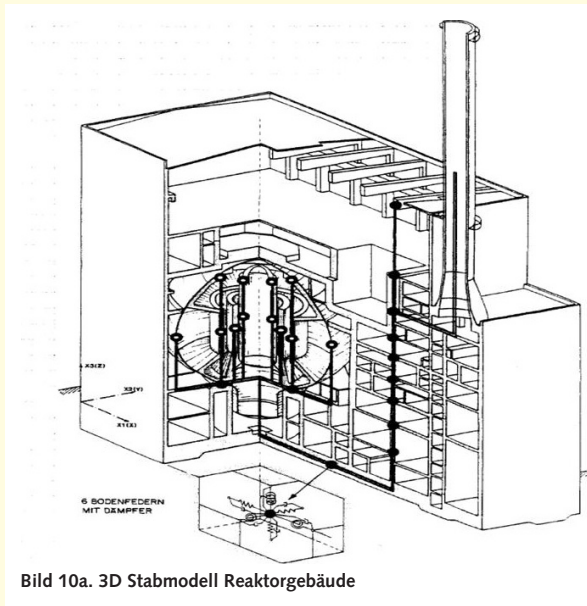
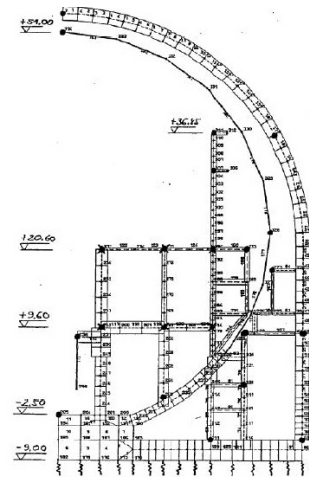


Bild 10a. 3D Stabmodell Reaktorgebäude

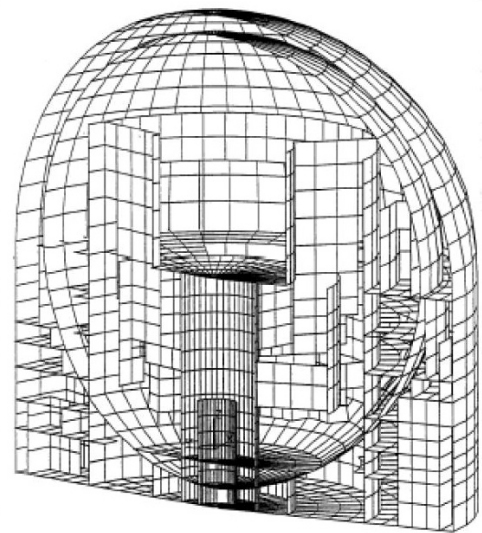


Rotationssymmetrische Schalen- und Volumenelemente

## 6 Bauwerksanalyse und Bemessung

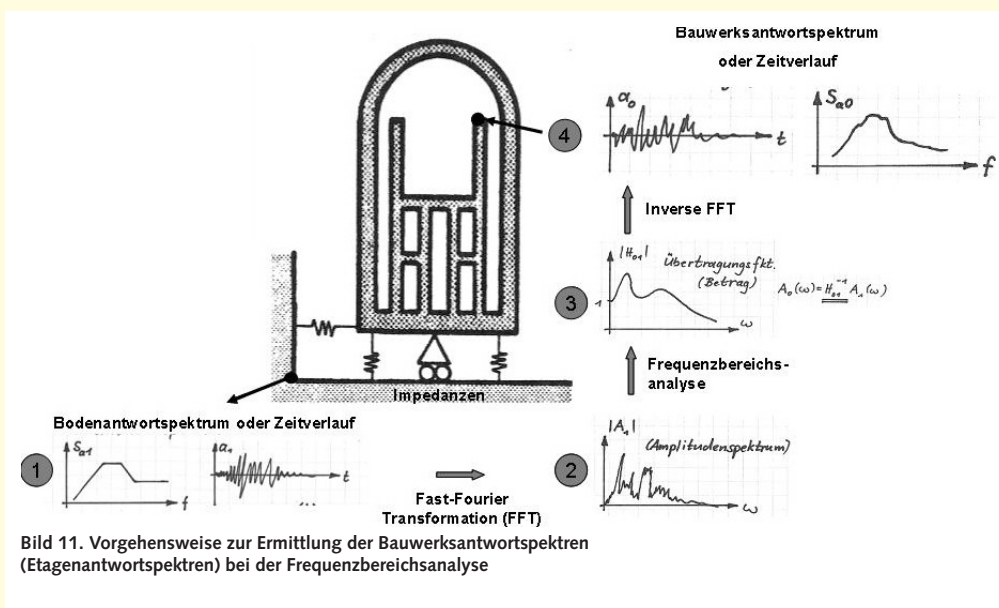
Bei der Bauwerksanalyse können unterschiedlich aufwendige und detaillierte Modelle und Berechnungsmethoden verwendet werden. Der Detaillierungsgrad und die Berechnungsmethoden variieren je nach Bauwerkskomplexität. Bei einfachen, regelmäßigen und symmetrischen Bauwerken reicht in der Regel ein einfaches 2D Modell mit dem Ersatzkraftverfahren. Bei komplexeren Bauwerken kommt das Antwortspektrumverfahren mit einem 3D-Modell zum Einsatz. In **Tabelle 1** sind die unterschiedlichen Berechnungsverfahren und die zugehörigen Modelleigenschaften dargestellt.

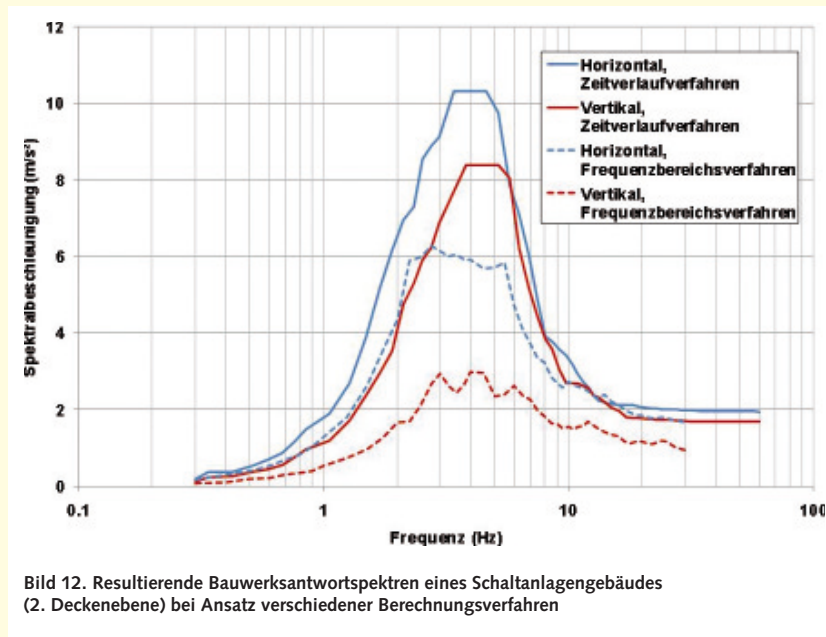
Die Kapazitätsspektrum-Methode (Capacity-Spectrum Method, ATC40 [9]) und die Verschiebungskoeffizienten-Methode (Coefficient Method, FEMA 356 [10]) sind aus der nichtlinearen statischen Berechnung abgeleitete Berechnungsverfahren, die für kerntechnische Anlagen kaum verwendet werden.



3D Schalenmodell

Bild 10b. Verschiedene Bauwerksmodelle für ein Reaktorgebäude





Für die Auslegung von Kernkraftwerken wird in der Regel das Antwortspektrumverfahren und für die Ermittlung von Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren) die Frequenzbereichsanalyse oder die Zeitverlaufsberechnung angewandt. In Bild 10a-b sind typische Bauwerksmodelle dargestellt.

Bauwerke haben die Möglichkeit, durch plastisches Materialverhalten zusätzlich große Mengen der Erdbebenenergie zu absorbieren (s. Tab. 1, q-Faktor). Durch das plastische Verhalten wird das Bauwerk zudem weicher und entzieht sich hohen Erdbebenbelastungen. Diese Effekte werden bei der Auslegung von normalen Industrieanlagen oder Bauwerken berücksichtigt und ausgenutzt. Bei der Auslegung von Kernkraftwerken bleiben diese nichtlinearen Materialreserven jedoch im Wesentlichen ungenutzt.

## 7 Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren, Sekundärspektren)

Für die Auslegung von Anlagenteilen, Komponenten und Rohrleitungen werden Bauwerksantwortspektren (Etagenantwortspektren) verwendet. Diese beschreiben die Anregung an einem Punkt oder auf einer bestimmten Ebene im Gebäude.

Die Ermittlung der Bauwerksantwortspektren erfolgt in der Regel mit der Frequenzbereichsanalyse (Bild 11). Alternativ können auch Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt werden. Bei diesen ist die Berücksichtigung der Bodenimpedanzen jedoch nur noch näherungsweise möglich, es sei denn, die Gesamtkette Boden-Bauwerk wird zusammen modelliert. Der Modellierungs- und Berechnungsaufwand wäre jedoch enorm.

In Bild 12 sind die Bauwerksantwortspektren eines Schaltanlagegebäudes bei Ansatz verschiedener Berechnungsverfahren dargestellt.

Nach Ermittlung der Spektren auf der gegebenen Ebene (Punkt 4 in Bild 11) werden diese eingehüllt und verbreitert. Etagenantwortspektren werden nur für solche Komponenten, Anlagenteile und Systeme verwendet, deren Masse das Schwingverhalten der Baustruktur nicht maßgeblich beeinflusst. Ist die Masse größer, sind gekoppelte Modelle erforderlich.

## Literatur

- [1] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten- Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, 2005
- [2] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, 2004
- [3] KTA 2201: Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Kerntechnischer Ausschuss KTA, 1990
- [4] Kausel, E., Whitman, R.V., Morray, J.P., Elsabee, F.: The spring method for embedded foundations, Nuclear Engineering and Design 48, 1978
- [5] IAEA Requirements NS-R-1 – Safety of Nuclear Power Plants: Design; International Atomic Energy Agency, Vienna 2000
- [6] IAEA Safety Guide NS-G-3.3 – Evaluation of Seismic Hazards for Nuclear Power Plants; International Atomic Energy Agency, Vienna 2002
- [7] IAEA Safety Guide NS-G-1.6 – Seismic Design and Qualification for Nuclear Power Plants; International Atomic Energy Agency, Vienna 2003
- [8] European Utility Requirements for LWR Nuclear Power (EUR), Volume 2, Revision C – Generic Nuclear Island Requirements, 2001
- [9] ATC-40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, ATC-40 Report, Volumes 1 and 2, Applied Technology Council, Redwood City, California, 1996
- [10] FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000

## Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten

Mit dem Vordringen in den Bereich mehrgeschossiger Bauten und den strengeren Erdbebenbestimmungen in den heutigen Normen stellt sich auch beim Holzbau die Frage der Erdbebensicherheit. Eine neue Publikation der Lignum „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“ bietet dem Ingenieur einen systematischen Einstieg in die Erdbebenproblematik und entsprechende Bemessungshilfen für die Planung von Holzbauten.

Die beiden einführenden Kapitel „Grundlagen“ sowie „Tragwerksanalyse und Bemessung“ geben eine Einführung in die Thematik Erdbeben und zeigen auf, wie diese in den SIA-Tragwerksnormen umgesetzt wird. Im anschließenden Kapitel „Erdbebengerechtes Entwerfen und Konstruieren“ werden die wichtigsten Grundsätze spezifisch für mehrgeschossige Holzbauten erarbeitet, um ein robustes und zugleich wirtschaftliches Bauwerk zu entwerfen. Werden bei Neubauten die Regeln des erdbebengerechten Entwurfs konsequent eingehalten, gelingen die rechnerischen Nachweise der Erdbebensicherheit meist ohne Mehraufwand. Dies gilt generell für niedrige bis mittlere Seismizität, d.h. für alle drei D-A-CH-Länder.

Der zentrale Teil der Publikation ist das Kapitel „Anwendungsbeispiel“, in dem die einzelnen Entwurfs-, Berechnungs- und Bemessungsschritte bei einem viergeschossigen Holzbau exemplarisch dargestellt werden. Dabei handelt es sich um ein Wohnhaus auf mittlerem Baugrund (Baugrundklasse C) in der höchsten Erdbebenzone Z3b der Schweiz. Für das Tragwerk wurde die höchste Duktilitätsklasse DCH gemäß Eurocode 8, bzw. Tragwerkstyp D gemäß SIA 265, gewählt. Neben der Duktilität erwies sich die horizontale Steifigkeit des Tragwerks als entscheidendes Bemessungskriterium. Abgestimmt auf die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit bezüglich Wind wird ein einfaches Vorgehen für



SIA SGBB mit HEV Schweiz Lignum  
Technische Dokumentation „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“: 126 Seiten im Format A4 erschienen im Juni 2011 bei Lignum in Zürich.

Entwurf und Vorbemessung vorgeschlagen. Die einzelnen Schritte der Tragwerksanalyse und der Bemessung werden sowohl für das Ersatzkraftverfahren als auch für das Antwortspektrumverfahren ausführlich dargestellt, jeweils zuerst formal und anschließend numerisch. Das Kapitel „Bemessungshilfen“ erklärt abschließend, wie die maßgebende Gesamtsteifigkeit von Holzrahmenbauteilen effizient mit der Schubfeldtheorie berechnet werden kann, und gibt Bemessungshilfen für typische Anwendungsfälle in der Praxis.

Für die Erdbebenbemessung der mechanischen Verbindungen zwischen Beplankung und Rippen – im Anwendungsbeispiel die Verklammerung der Tragwand in Holzrahmenbauweise – sind bei der Duktilitätsklasse DCH die Regeln der Kapazitätsbemessung zu beachten. Für die Holzrahmenbauweise bedeu-

tet dies, dass die mechanischen Verbindungen zwischen Beplankung und Rippen als plastifizierende Bereiche mit ausreichender Duktilität unter Erdbebeneinwirkung ausgelegt werden müssen. Alle übrigen Tragwerksteile (Rippen, Beplankungen, Anschlüsse usw.) werden mit zusätzlichem Tragwiderstand versehen, damit sie elastisch bleiben, wenn die plastifizierenden Bereiche ihre Überfestigkeit (Kapazität) entwickeln. Somit kann frühzeitiges sprödes Versagen außerhalb der mechanischen Verbindungen verhindert werden.

Im März/April 2011 bietet die Lignum in Zusammenarbeit mit der SGBB eintägige Fortbildungskurse „Erdbebengerechte mehrgeschossige Holzbauten“ basierend auf der neuen Publikation in fünf Orten der Deutsch-Schweiz an. Kurse auf Französisch sind für Herbst 2011 vorgesehen. Das Anmeldeformular und weitere Informationen befinden sich auf [www.lignum.ch/erdbeben](http://www.lignum.ch/erdbeben) oder [www.sgeb.ch](http://www.sgeb.ch)

Thomas Wenk

### Thomas Furtmüller. Numerische und experimentelle Untersuchungen von Mauerwerk in Gründerzeitbauten in Hinblick auf deren Erdbebensicherheit.

Dissertation (Betreuer: Univ.Prof. Dr. Christoph Adam) Universität Innsbruck, Dezember 2010.

#### Kurzfassung:

Diese Dissertation befasst sich mit der numerischen Simulation von Mauerwerk der Gründerzeit im Rahmen von Finite Elemente (FE-) Berechnungen. Ausgehend von experimentellen Untersuchungen, die an Ziegeln, Mörtel und kleinteiligen Mauerwerksprobekörpern durchgeführt wurden, werden geeignete Materialparameter bzw. Materialmodelle für die Einzelkomponenten des Mauerwerks ermittelt. Zur Anwendung kommt hierbei ein im verwendeten FE-Programm verfügbares Werkstoffmodell für Beton. Da für die Berechnung größerer Strukturen nur eine verschmierte Modellierung von Mauerwerk, also ohne Berücksichtigung der Mörtel- und Ziegelteile, zielführend ist, wird ein solches sogenanntes Makromodell im Rahmen der mehrflächigen Plas-

tizitätstheorie implementiert. Das Modell berücksichtigt verfestigendes bzw. entfestigendes Materialverhalten sowie die wesentlichen Versagensarten von Mauerwerk, wobei es sich auf das Verhalten in der Wandebene beschränkt. Die Materialkennwerte des Makromodells werden durch eine Homogenisierung ermittelt, da deren experimentelle Bestimmung für das betrachtete historische Mauerwerk schwierig bzw. unmöglich ist. Dabei werden zwei- und dreidimensionale Einheitszellen verwendet, die sowohl Geometrie als auch Materialverhalten von Mauerwerk der Gründerzeit berücksichtigen, wobei die im ersten Schritt bestimmten Parameter des Betonmodells verwendet werden. Den Abschluss bilden numerische Simulationen zur Untersuchung des Verhaltens eines Gebäudes der Gründerzeit unter Erdbebenbelastung im Rahmen der Kapazitätsspektrum-Methode. Durch Bestimmung der Pushover-Kurve der maßgebenden Mauerwerkswand unter Verwendung des Makromodells kann der Nachweis der Erdbebensicherheit erbracht werden.