

Wenn die Erde bebt:

Detailuntersuchungen vor dem Hintergrund der neuen Erdbebennorm mit LS-DYNA

Dipl.-Ing. Brendler Stefan, Regierungspräsidium Tübingen - Landesstelle für Bautechnik, Stuttgart

Dipl.-Ing. Thorsten Gerlinger, Kube GmbH, Unterensingen

Dr.-Ing. André Haufe, DYNAmore GmbH, Stuttgart-Vaihingen

Zusammenfassung

Weltweit entwickeln Forscher genauere Methoden zur rechnergestützten Beurteilung der Standsicherheit von Gebäuden unter Erdbebeneinwirkung. Im Blickfeld ist dabei meist der Einsturz eines Gebäudes. Erfahrungen aus den Schäden der „Schwachbeben“ in Deutschland zeigen jedoch ein anderes Bild. Die größte Gefahr für Menschen geht hier von sich ablösenden Gebäudeteilen aus. Einbauten fallen um, Dachziegel und Schornsteine stürzen auf Verkehrsflächen. Bei den nur wenigen Sekunden andauernden Erdbeben hat eine Person in der Regel keine Möglichkeit davonzulaufen. Die besagten Bauteile müssen daher sicher befestigt sein.

Hierzu gibt es bisher nur wenige Erfahrungen. Im vorliegenden Beitrag studieren die Autoren das Verhalten herunterfallender Dachziegel erstmals mit der Methode der Finiten Elemente an einer exemplarisch ausgewählten Dachkonstruktion bei variierender Dachneigung. Erwartungsgemäß lassen sich mit LS-DYNA systematische Untersuchungen zur Absturzsicherheit durchführen. Die Ergebnisse werden unter Berücksichtigung der neu überarbeiteten Erbebennorm DIN 4149 bewertet.

Schlüsselwörter

Finite Elemente
 Transiente Berechnung

Erdbeben
 Bemessungsbeben, DIN 4149, Erdbebenwirkkette, herabfallende Dachziegel, konstruktive Sicherungsmaßnahmen, Nachweis bestehender Gebäude

1 Allgemeines und Motivation

Erdbeben der letzten Jahre in aller Welt haben gezeigt: Wenn die Erde bebt, kann dies dramatische Folgen für Bauwerke haben. Fußpunktbeschleunigungen regen Bauwerke zum Schwingen an. Dies führt bei unangepasster Bauweise zu einfachen, lediglich die Gebrauchstauglichkeit beeinflussende Schäden an Bauteilen (i.d.R. Rissen) bis hin zum Einsturz (d.h. Totalversagen der Struktur). Gefährdet sind vor allem Tragwerke mit großen Kopfmassen, die zusätzlich horizontal nur schwach ausgesteift und unregelmäßig gegliedert (siehe Bild 1.1) sind.



Bild 1.1: Gebäude mit schwach ausgesteiftem Erdgeschoss, mehrere Bauteile ohne Fuge verbunden und damit mit unregelmäßigem Grund- und Aufriss

Erdbebensichere Bauweise kann Menschenleben retten und Sachschäden reduzieren. Die Wirksamkeit konsequent erdbebensicher gebauter Gebäude zeigt der Vergleich zwischen den Folgen des *Spitak*- und des *Loma*- Erdbebens (siehe Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Vergleich zwischen dem Spitak- und Loma- Erdbeben [7]

Erdbeben	Spitak Armenien	Loma Nord-Kalifornien
Datum	07.12.1988	17.10.1989
Magnitude	6,9	7,1
Tote	> 25.000	67
Verletzte	31.000	2.435
Obdachlose	514.000	7.362
Sachschäden	Unbekannt	6.800.000.000,- €

Beide Beben hatten etwa die gleiche Stärke und ereigneten sich in ähnlicher Topographie, Siedlungsstruktur und Bevölkerungsdichte. In Kalifornien wird nach modernen Gesichtspunkten der Erdbebenforschung gebaut. Altbauten waren teilweise ertüchtigt. Auch in Armenien standen viele neue Gebäude. Allerdings wurden Gestaltungsregeln für erdbebensicheres Bauen nicht bzw. nur geringfügig berücksichtigt.

Dieses Beispiel verdeutlicht den Nutzen erdbebensicherer Gebäude. Die bisher gültige DIN 4149 von 1981 ist veraltet. Die Bemessungsnormen für moderne Werkstoffe basieren auf dem sogenannten Teilsicherheitskonzept. Damit sind wirtschaftliche und situationsbezogene Dimensionierungen von Bauwerken möglich, da z. B. Festigkeitsstreuungen oder außergewöhnliche Risiken differenziert in die Betrachtung eingehen können.

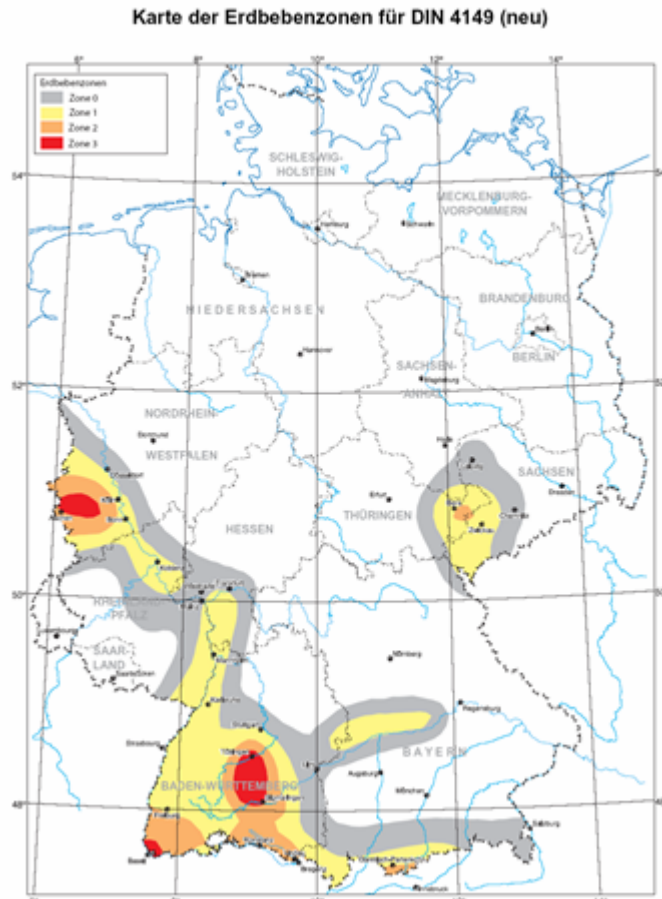


Bild 1.2 Erdbebenzonen in Deutschland nach DIN 4149:2005-04

Ein Erdbeben lässt sich zeitlich nicht voraussagen. Hinsichtlich einer möglichen räumlichen Ausdehnung und der zu erwartenden Intensität schätzt die DIN 4149:2005 von Erfahrungen vergangener Erdbeben auf den zu erwartenden Verlauf zukünftiger Beben. Die Wahrscheinlichkeit seines Auftretens mit einer gewissen Intensität spiegelt sich in der Karte der Erdbebenzonen wieder. Ihr liegt eine Referenz-Wiederkehrperiode von 475 Jahren zugrunde. Die Überschreitenswahrscheinlichkeit liegt bei 10 % in 50 Jahren. Die wahrscheinlichsten Orte für Erdbebenherde sind gruppiert - nach deren erwarteter Stärke - in vier Erdbebenzonen (EZON 0 - 3) in einer überarbeiteten „Erdbebenkarte“ dargestellt (Bild 1.2).

Das Land Baden-Württemberg kommt mit der Einführung der neuen DIN 4149 von 2005 seiner Verpflichtung zum Schutz von Leib und Leben der Bürger nach, da die moderne Norm Stand der Technik ist. Sie wurde auf der Grundlage von aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen, einer grundlegend veränderten Sicherheitsphilosophie in Anlehnung an den europäischen Eurocode 8 speziell für die Bedürfnisse in Deutschland angepasst.

Wirtschaftliche Bauten sind nur möglich, wenn Schäden (Risse etc.) toleriert werden. Ziel der DIN 4149:2005 ist es Einstürze zu verhindern. Damit ein Gebäude ein Erdbeben ohne Einsturz übersteht, ist ein erdbebensicherer Entwurf des Bauwerks entscheidend. Unsymmetrische Gebäude mit exzentrischen Massen werden während eines Erdbebens weitaus mehr beansprucht als ein sinnvoll konstruiertes Bauwerk mit regelmäßig gegliedertem Grund- und Aufriss. In der Planungsphase lassen sich diese Gesichtspunkte mit wenig Aufwand umsetzen, wenn der Bauherr erfahrene Architekten und Ingenieure beauftragt. Nur so wird ein ästhetisches, standsicheres und qualitativ hochwertiges Gebäude entstehen.

Die DIN 4149:2005 definiert vereinfacht und auf der sicheren Seite gewählte statische Ersatzlasten für den Erdbebennachweis. Im vorliegenden Artikel werden alternativ dazu Nachweismethoden mit transienten Finite Elemente Berechnungen vorgestellt. Damit lassen sich neue Bauprodukte wie z. B. Isolierungskörbe zur Befestigungen von Balkonplatten, aussteifende Elemente oder Fassadenverkleidungsbefestigungen realitätsnah und wirtschaftlich dimensionieren. Das Schwingungsverhalten mit den zugehörigen Beanspruchungen kann während dem „virtuellen Erdbeben“ diskutiert werden. So lassen sich Grundregeln zum erdbebensicheren Bauen erarbeiten und bestehende Forderungen wie

z. B. den Befestigungszwang von Dachziegeln bei Dächern über 35° in höheren Erdbebenzonen, überprüfen.

Zusätzlich bietet diese Berechnungsmethode eine Möglichkeit, bestehende Gebäude zu bewerten. Auf die Frage wie der Gebäudebestand bewertet werden soll, gibt es bisher keine verbindlichen Hinweise. Erste Erfahrungen werden im Erfassungsbogen unter www.erdbeben-bw.de gesammelt. Zahlreiche Mauerwerksbauten können mit den vereinfachten Rechenverfahren der DIN 4149:2005 nicht nachgewiesen werden.

LS-DYNA bietet hinreichend Kontaktformulierungen und Materialgesetze, um auch komplexe Geometrien unter realistischen Zeit-Beschleunigungs-Verläufen zu bewerten. So könnten viele Detailfragen, die bisher weder im Versuch noch rechnerisch untersucht wurden - wie z. B. die Tragfähigkeit gemauerter Kamine, die Lagesicherheit von Dachziegeln oder die Tragsicherheit von Betonplatten, die zur Wärmedämmung über Isolierungskörbe angehängt werden auch im Erdbebenfall bewertet werden. Gerade diese Anbauteile stellen die größte Gefahr dar, da sie schon lange vor dem Kollaps eines Gebäudes auf Verkehrsflächen und damit möglicherweise auf Menschen herabfallen können.

2 Auswirkungen von Erdbeben

2.1 Erdbebenwirkkette

Die Wellenbewegungen des Bodens entstehen am Erdbebenherd (Bild 2.1, Nr. 1). Ausgelöst vom Kontinentaldrift der Platten entstehen Spannungen im Untergrund, die sich bei Rutschungen spontan entspannen. Folge sind zyklische Bodenverschiebungen. Die Stärke eines Erdbebens wird als Magnitude auf der Richter-Skala angegeben. Die zugehörigen Werte entsprechen einem definierten Energiegehalt. Die sich ausbreitenden Wellen (Bild 2.1, Nr. 2) laufen durch den Untergrund (Bild 2.1, Nr. 3) bis sie schließlich zwischen 20 bis 80 m unter dem Gebäude in den sogenannten Baugrund (Bild 2.1, Nr. 4) eintreten. Im Unter- und Baugrund können sich die Wellen, abhängig von der Dichte und der Struktur deren Aufbauten (Fels, Sediment etc.), hinsichtlich Amplitude und Periode verschieben. Die Erdbebenwirkung auf das Gebäude ist für den bemessenden Ingenieur interessant und wird mit Intensitäten gemäß der Europäischen Makroseismischen Skala von 1998 (EMS98) bezeichnet. Wahrscheinliche Schäden am Gebäude werden in Klassen eingeteilt. Dies führt dazu, dass in Baden-Württemberg Bemessungsbeben der Intensität 7,5 bis 8 zu erwarten sind. Dabei sind an Gebäuden starke Schäden wie z. B. breite Risse wahrscheinlich. Teileinstürze (Giebelwände) oder gar der Einsturz eines Gebäudes sind bei den vorherrschenden Bauweisen eher unwahrscheinlich.

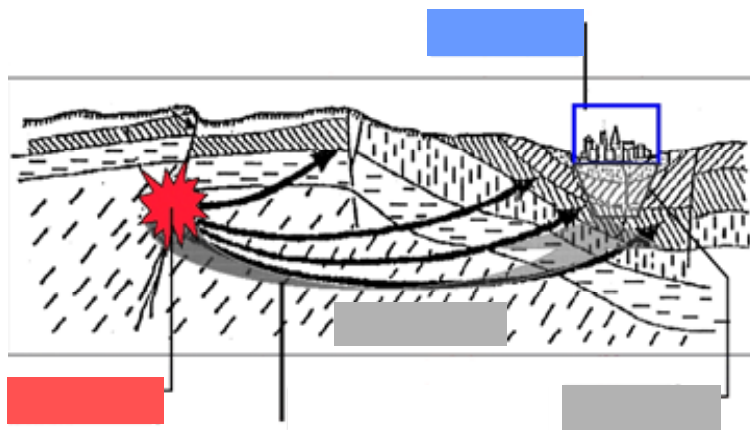


Bild 2.1 Erdbebenwirkkette

2.2 Geregelte Erdbebeneinwirkungen auf Gebäude

In DIN 4149:2005-04 werden die auftretenden Beschleunigungen in eine statische Ersatzlast nach der Antwortspektrenmethode umgerechnet. Energiedissipierende Eigenschaften einer Tragstruktur werden – je nach Werkstoff – nur überschlägig und pauschal berücksichtigt.

2.3 Realitätsnahe Erdbebeneinwirkungen auf Gebäude

Für die Deutsche Erdbebennorm wurden hunderte horizontal wirkende Zeit-Beschleunigungs-Verläufe berechnet. Eingangsdaten waren die Erdbebenzone, die Untergrund- und die Baugrundklasse. Mit

diesen Daten wurden der Verlauf der Erdbebenzonen und das elastische Antwortspektrum der DIN 4149:2005 festgelegt. Diese Einwirkungen dienen zum vereinfachten Erdbebennachweis. Üblicherweise werden im Bauwesen nur die horizontalen Bodenbeschleunigungen weiterverfolgt. Überschlägig ergeben sich die vertikalen Beschleunigungen etwa zu 70 % der Horizontalwerte. Soll das reale Verhalten einer Struktur während des Bebens beschrieben werden, sind diese Verläufe ungeeignet.

Mit LS-DYNA besteht die Möglichkeit, horizontal und vertikal wirkende Zeit-Beschleunigungs-Verläufe eines Bebens in einer transienten Berechnung direkt auf das Gebäudemodell einwirken zu lassen. Die Berechnungsergebnisse können nach verschiedenen Fragestellungen (auftretenden Spannungen, Verschiebungen etc.) ausgewertet werden.

Dieses Vorgehen ist baurechtlich bisher nicht abgesichert. Ein Gebäudemodell müsste beim Erdbebennachweis mit einer unendlichen Variation möglicher Beschleunigungsverläufe, die am Bauort auftreten könnten, untersucht werden. Schließlich ist nicht bekannt wie der Beschleunigungsverlauf des nächsten Erdbebens aussieht und welche Auswirkungen er auf das Gebäude haben wird. Dieses Vorgehen ist aber eine Möglichkeit komplexe Tragstrukturen angemessen zu untersuchen. Grundlage der Lasten der DIN4149:2005 sind letztlich nur eine endliche Zahl einhüllender Gebäudeantworten. Als Mindestvoraussetzung müssten die zu wählenden Zeit-Beschleunigungs-Verläufe zum Energiegehalt der genormten Erdbebenzone an diesem Ort und Untergrund passen, sowie das Gebäude oder das Bauteil in Nähe seiner Resonanzfrequenz anregen. Ein praktisch arbeitender Ingenieur kann dieses Verfahren erst nutzen, wenn einige spektrinkompatible Bemessungs-Zeit-Verläufe baurechtlich anerkannt werden.

Ein exemplarischer Beschleunigungsverlauf eines Erdbebens auf der Schwäbischen Alb (jedoch nicht das Bemessungsbeben mit einer Wiederkehrperiode von 475 Jahren!) ist in Bild 2.2 dargestellt.

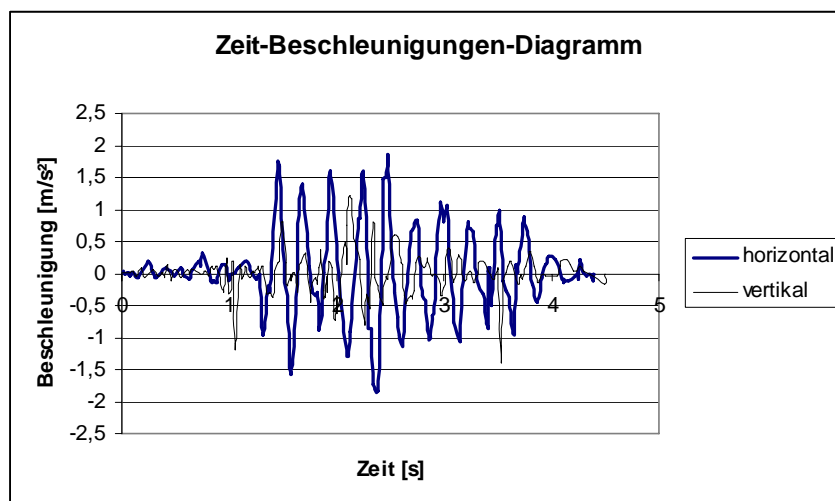


Bild 2.2 Zeit-Beschleunigungs-Verläufe eines Erdbebens auf der Schwäbischen Alb

Das bisher stärkste registrierte Erdbeben am 03.09.1978 dauerte etwa drei Sekunden mit horizontalen Spitzenbeschleunigungen zwischen etwa 2 und 3 m/s². Leider sind die Messwerte dieses Bebens verloren. Es ist problematisch, beliebige Zeit-Beschleunigungsverläufe als Einwirkungen zu verwenden. Teilweise beinhalten Seismographenmessungen langperiodische Störfaktoren, ein Verkippen oder ein Verdrehen des Seismographen können die Ursache hierfür sein. Nach der zweimaligen Integration erkennt man in entsprechenden Verläufen eine „unzyklische“ Verschiebung mit einem resultierenden Weg in eine Richtung. Nur ein Fachmann kann diese Problematik aus den Verläufen bewerten und ggf. herausrechnen. Aus den zur Verfügung stehenden Daten wurde auf Bodenverschiebungen von nur sechs Millimeter Verschiebungsamplituden zurückgerechnet. Bei Bemessungsbeben können hingegen durchaus Verschiebungen mit mehreren Zentimetern auftreten.

2.4 Folgen von „Schwachbeben“ - Grundsätze für die Konstruktion

Am 03.09.1978 hat die Erde in Albstadt gut 3 Sekunden spürbar gebebt. In Mauerwerkswänden sind Risse entstanden. Einzelne Häuser mussten abgerissen werden. Hunderte von Kaminen sind von den Häusern abgebrochen und teilweise auf die Gehwege gefallen (Bild 3.2). Giebelwände ohne Ringan-

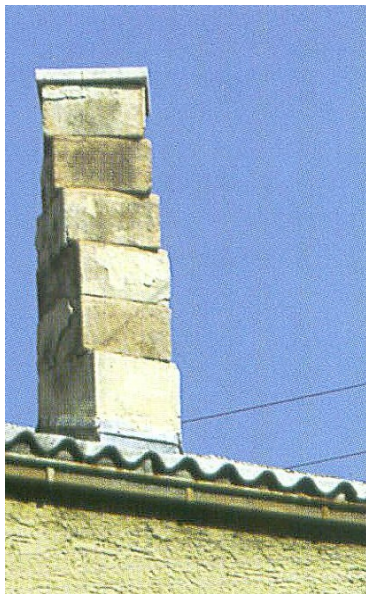
ker sind heruntergebrochen. Ferner zeigen die Erfahrungen aus den Erdbebenschäden auf der Schwäbischen Alb, dass unzählige Dachziegel auf Verkehrsflächen gefallen sind (Bild 3.3). Glück war, dass am frühen Sonntagmorgen keine Passanten unterwegs waren. Die Bilder verdeutlichen jedoch, wie wichtig konstruktive Sicherungsmaßnahmen an Gebäuden sind.

2.4.1 Schornsteine

Die Bilder 2.3 zeigen Schornsteine, die das Albstadtbeben beschädigte. Gemauerte Industriekamine und Hauskamine sind teilweise eingestürzt. Herabstürzende Teile einstürzender Hauskamine schlugen gegen das Dach und stürzten auf die Straße (Bild 2.4).

Allgemein wird zur Minimierung der Gefahr empfohlen, dass:

- Hauskamine mit "weichen" Fugen durch die Sparrenlage geführt werden
- Hauskamine mit gleitfesten Fugen zwischen den Formsteinen ausgeführt oder bewehrt werden. Zusätzlich sollten weit auskragende Kamine abgespannt werden (Bild 2.3 Mitte)



Bilder 2.3 Kamine [13], verdreht infolge Torsionsbeanspruchung, Abspannung zur Lagesicherung

Bild 2.4 Abgestürzter Kamin nach dem Erdbeben in Albstadt
Foto: Peter Doll

2.4.2 Dachziegel

Dächer und Dachstühle schwingen während des Erdbebens relativ zum Massivbau. Auftretende Beschleunigungen können dazu führen, dass Dachziegel großflächig abgleiten (Bild 2.5). Augenzeugen berichteten, dass die Dachziegel während des Erdbebens „flatterten“ bevor sie heruntergefallen sind.

Allgemein wird zur Minimierung der Gefahr empfohlen, dass:

- der Dachstuhl mit druck- und zugfesten Anschlüssen auszuführen ist
- Dachziegel mit Sturmhaken an den Dachlatten zu befestigen sind (Bilder 2.6)

Mit der baurechtlichen Einführung von der DIN 4149:2005 durch [10] wird bei steileren Dächern als 35° gefordert, dass die Dachziegel mit „... geeigneten Maßnahmen...“ gesichert werden. Der kritische Planer stellt sich die Frage, ob alle Dachziegel befestigt werden müssen oder ob vereinzelt befestigte Dachziegelflächen ausreichen würden. Es ist auch unklar, welche Haken die Dachziegel wirkungsvoll auf dem Dach halten und damit „geeignet“ sind.



Bild 2.5: Heruntergefallene Dachziegel nach dem Erdbeben in Albstadt 1978 Foto: Peter Doll

Die nachfolgenden Denkanstöße sind an Planende gerichtet. Ziel ist es, Personen vor herabfallenden Dachziegeln zu schützen, die Wirksamkeit ist im Einzelfall nachzuweisen:

- Die Bilder 2.6 zeigen unterschiedliche Sturmhaken zur Befestigung von Dachziegeln. In DIN 4149:1957-07, Abschnitt 6.07 war ein Hinweis enthalten, wonach „... 3 Ziegel je m²...“ zu verankern waren.
- Alternativ könnten auch mehrere Reihen von Schneefanggittern angeordnet werden. Als Diskussionsvorschlag wird ein maximaler Abstand von fünf Metern vorgeschlagen.
- Netze über der gesamten Dachfläche oder zwischen Gebäuden über engen Gassen wären optisch wenig ansprechend, aber eventuell kostengünstig.

Bisher gibt es keine Berechnungs- oder Forschungsergebnisse, welche die Wirksamkeit von Befestigungsmaßnahmen bestätigen würden. Nicht einmal die Wirkungsweise des Lageverlustes ist bekannt: Fallen Dachziegel nach einer vertikal nach oben gerichteten Beschleunigung, nachdem die Nasen den Halt auf den Dachlatten verloren haben, herunter? Schleudert ein schwingender Sparren die Dachziegel katapultartig vom Dach? Reicht möglicherweise schon die horizontale Erdbebenbeschleunigung für den Lageverlust?



Bilder 2.6: Beispiele von Sturmhaken zur Lagesicherung von Dachziegeln; Bilder Fa. FOS

Mit den nachfolgend vorgestellten Berechnungsmöglichkeiten mit LS-DYNA können verschiedene Einbausituationen und Befestigungsmöglichkeiten untersucht werden. Aufgrund der Komplexität der gebauten Dach- und Gebäudevarianten sowie der unterschiedlichen Dachziegel z. B. Biberschwänze, Betondachsteine, Mönch und Nonne etc., jeweils mit diversen Oberflächen und Formen sind allgemeingültige Aussagen nicht möglich.

3 Dynamische Simulation mit LS-DYNA

3.1 Allgemeines

Zur Simulation von Gebäuden mit komplexer, unregelmäßiger Geometrie oder aus Werkstoffen mit stark nichtlinearem Materialverhalten (z. B. Mauerwerk) ist ein Finite Elemente Modell zu verwenden, das die Massen- und Steifigkeitsverhältnisse des Gebäudes realitätsnah abbildet. Auf dieses aufwändige Modell wird ein Beschleunigungs-Zeitverlauf des Bebens aufgebracht und die daraus resultierenden Spannungen und Verformungen (Bilder 3.3 und 3.4) berechnet. Die Zeit läuft in diesen Berechnungen gleich zum realen Erdbeben. Im Bauwesen wurde das Programmsystem LS-DYNA regelmäßig und erfolgreich zur Klärung dynamischer Detailfragen, wie z. B. der dynamischen Windeinwirkung auf Vordächer [15], der Simulationen von Pendelschlagversuchen auf absturzsichernde Verglasungen [16] oder der explosionshemmenden Wirkung nachgiebiger Bauteile [14] eingesetzt. Aufgrund der Vielzahl der zur Verfügung stehenden linearen und nichtlinearen Materialgesetze sowie der flexiblen Kontaktformulierungen können damit auch Detailfragen oder die Beurteilung bestehender Gebäude, auf die ein Erdbeben wirkt, geklärt werden.

3.2 Modellierung

Am Volumenmodell einer Dachhälfte (Bild 3.1) mit Dachziegeln, Dachlatten und Sparren wurden die Einflüsse des Löseverhaltens der Dachziegel studiert. Für den vorliegenden Bericht wurden Dachziegel des Typs „Biberschwanz“ gewählt. Diese Art enthält keine Falze am Dachziegelrand und wird erwartungsgemäß bei geringeren seismischen Einwirkungen herunterfallen als andere Dachsteine. Das dreidimensionale Finite Elemente Modell beinhaltet Kontaktmöglichkeiten und Reibung zu jedem einzelnen Dachziegel und zu den Dachlatten. Es entspricht der realen Verlege- und Wirkungsweise der Dachziegel auf einem Dachstuhl.

Biberdach 30deg

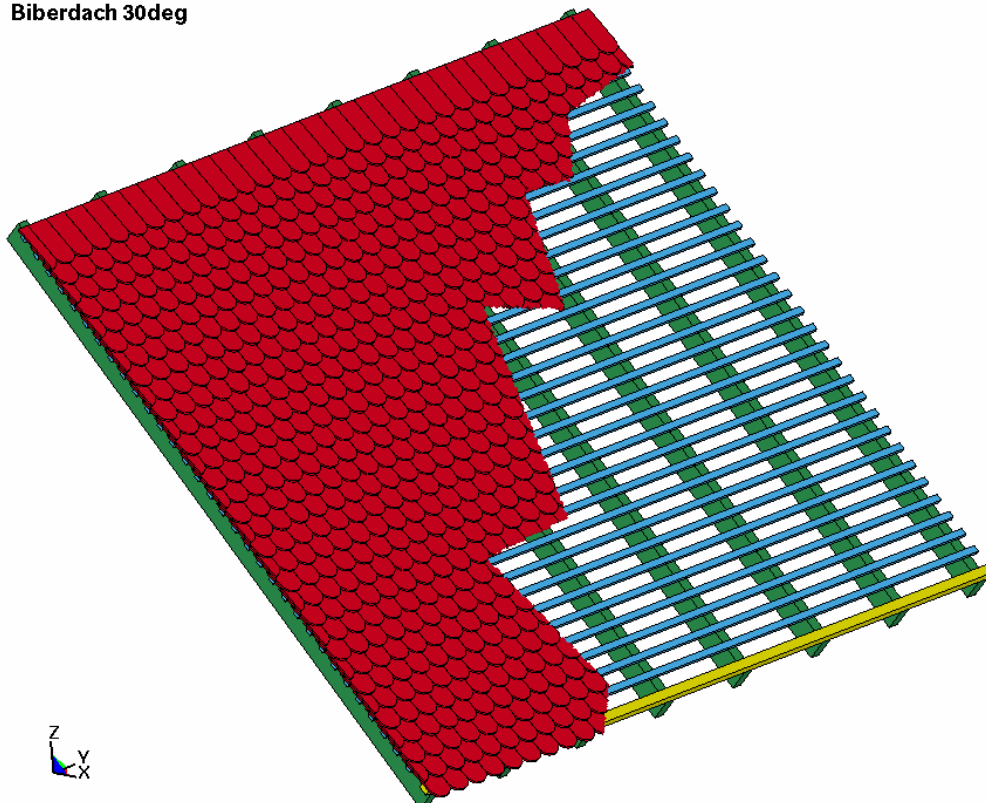
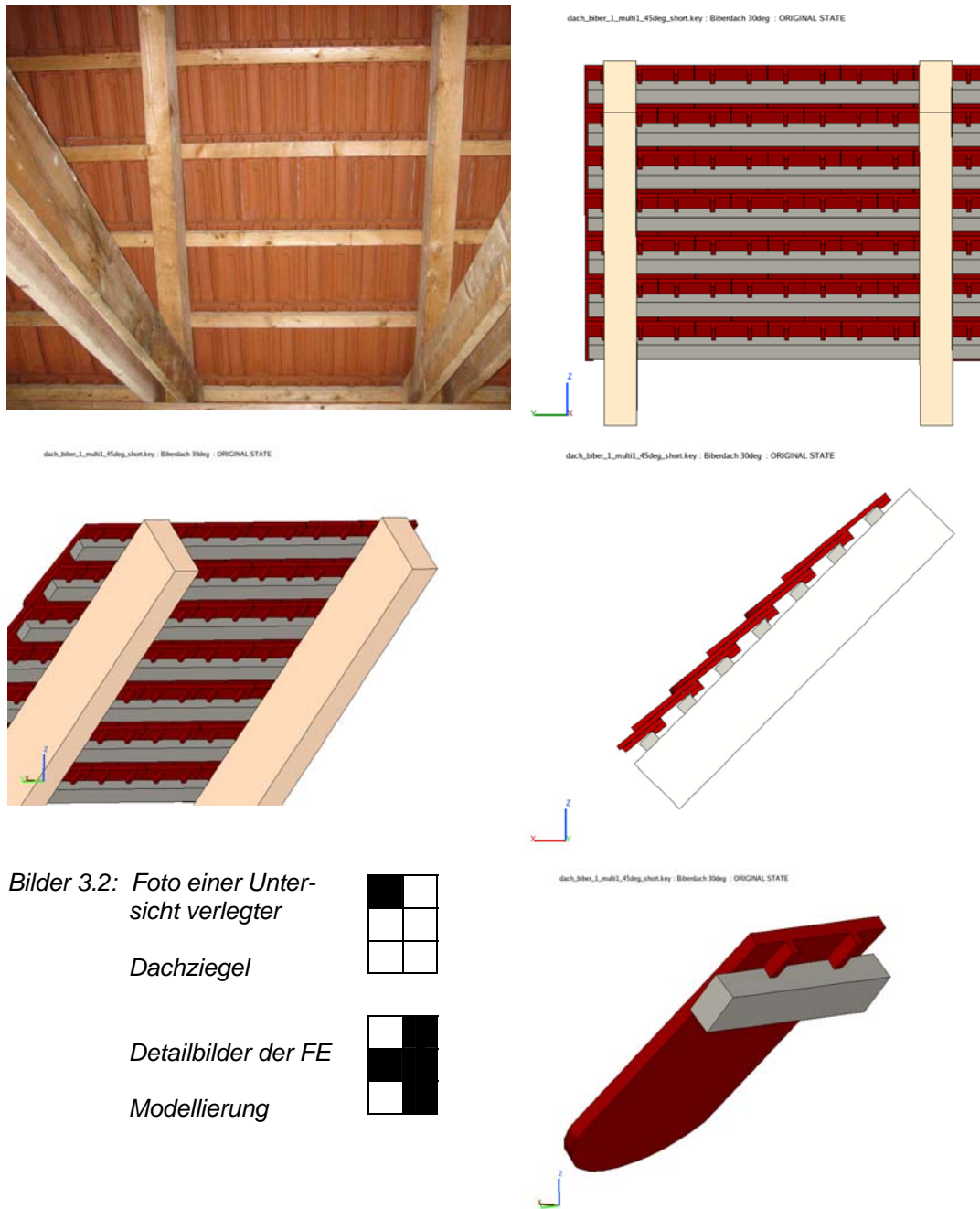


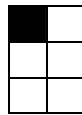
Bild 3.1: Finite Elemente Modell der Dachfläche

Die einzelnen Dachziegel wurden im Modell lose übereinandergelegt. Die Erdbeschleunigung zieht die Dachziegel aufeinander und gegen die Dachlatten, so wird die Dachfläche in sich fest gehalten. Die Bilder 3.2 zeigen die Verlegeweise und die lagesichernden Nasen der Dachziegel.



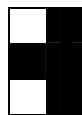
Bilder 3.2: Foto einer Untersicht verlegter

Dachziegel



Detailbilder der FE

Modellierung



3.3 Einwirkungen

Bisher standen für die Berechnungen lediglich vertikal und horizontal wirkende Zeit-Beschleunigungs-Verläufe nach Bild 2.2 zur Verfügung. Die Verläufe wurden von einem Seismographen aufgezeichnet und für diese Arbeit von einem Ausdruck digitalisiert. Ferner standen einige repräsentative Verläufe von Bodenbeschleunigungen der Erdbebenzone 3 nach DIN 4149:2005 zur Verfügung.

3.4 Berechnungsverlauf

Zunächst muss der statische Eigengewichtslastfall der auf der Dachfläche liegenden Ziegel simuliert werden. Im Anschluss erfolgt die Beanspruchung mit dem Erdbeben. Im Finite Elemente Modell liegen die Dachziegel, diskretisiert als *rigid bodies*, lose aufeinander; zwischen den Ziegeln bzw. zwischen den Ziegeln und den Dachlatten wirkt lediglich die Reibung. Im expliziten Berechnungsverlauf wird in der ersten Sekunde die Erdbeschleunigung auf $9,81 \text{ m/s}^2$ gesteigert. Damit die Dachziegel infolge der gegenseitigen Kontakte nicht weggeschleudert werden, wird die Erdbeschleunigung linear bis zum

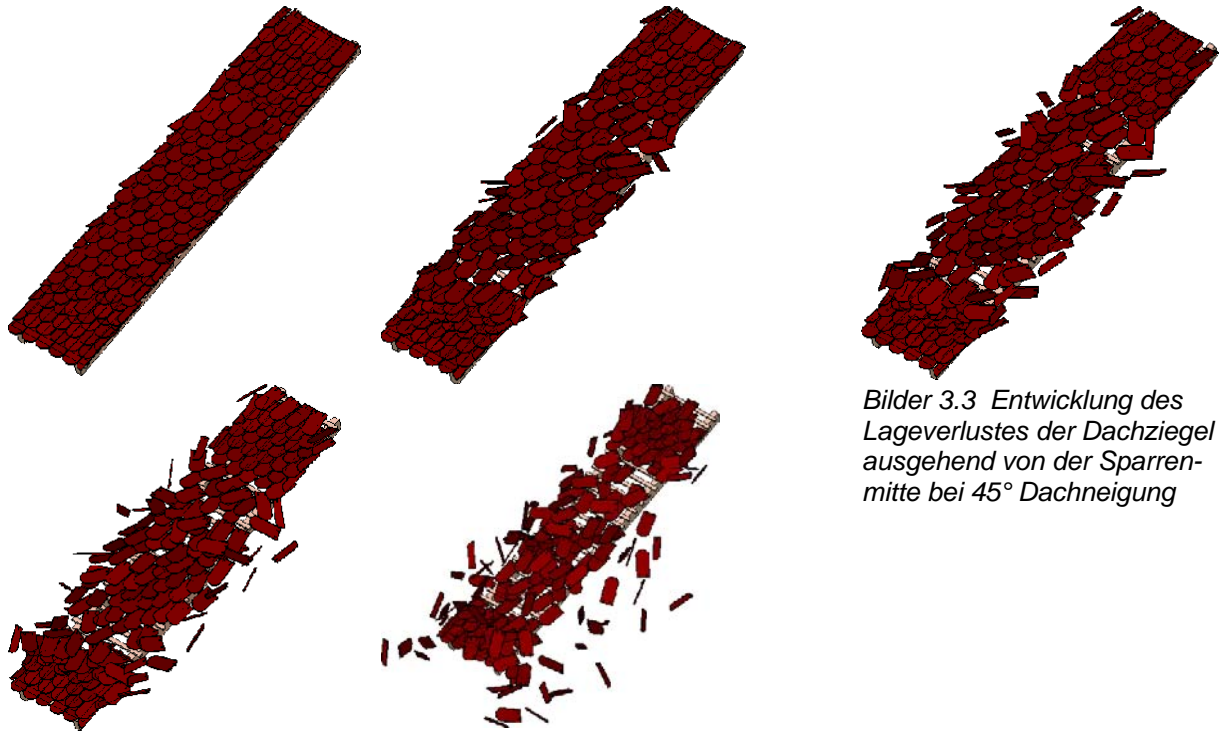
Maximalwert gesteigert, damit sich die Dachziegel „sanft“ aneinander anlegen. Anschließend können die Erdbebenbeschleunigungen auf diesen statischen Zustand wirken.

3.5 Berechnungsergebnisse

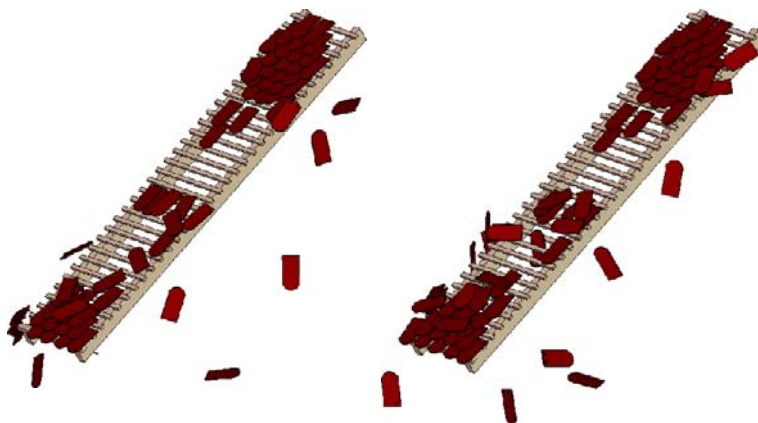
Ziel der Autoren war es, die in Baden-Württemberg zu erwartenden Erdbeben realitätsnah zu erfassen. So hat die Arbeit für diesen Artikel mit Zeit-Beschleunigungs-Verläufen nach Bild 2.2 begonnen. Registriert waren Amplituden bis horizontal $1,85 \text{ m/s}^2$ und Vertikal bis $1,4 \text{ m/s}^2$. Ferner wurden einige ausgewählte horizontale Beschleunigungsverläufe von Bemessungsbeben verwendet. Bei diesen Einwirkungen sind in den Berechnungsmodellen keine Dachziegel heruntergefallen.

Bis zur Drucklegung konnten die Hintergründe und gewählte Überhöhungsfaktoren zur Gebäuderesonanz, die Grundlage der Antwortspektrenmethode der DIN 4149:2005 nicht abschließend in Erfahrung gebracht werden. So ergeben sich zunächst folgende Erkenntnisse:

- Die Zeitverläufe der Grundlage der DIN 4149:2005 wurden während der europäischen Harmonisierung in der Normentstehungsphase an bestehende Erfahrungen angepasst. Die errechneten Einwirkungen entstanden für die Antwortspektrenmethode und nicht vor dem Hintergrund der hier vorgestellten realistischen Simulation der physikalischen Vorgänge. So sind diese Einwirkungen für die hier vorgestellte Methode nicht als Bemessungseinwirkung geeignet.
- Mit den der DIN 4149:2005 zugrundeliegenden horizontalen Bodenbeschleunigungen fallen zwischen 25° und 45° Dachneigung keine Dachziegel von der Dachfläche. Damit sind starre Gebäude hinsichtlich der Lagesicherung von Dachziegel als günstig zu bewerten.
- Wirken ausschließlich horizontale Beschleunigungen auf die Modelle ein, sind bei 25° , 35° und sogar bei 45° Dachneigung selbst bei zehnfachen überhöhten Beschleunigungen des Bebens (Spitzenwerte: 14 m/s^2 vertikal; $18,5 \text{ m/s}^2$ horizontal) keine Dachziegel heruntergefallen.
- Wirken vertikale und horizontale Beschleunigungen zusammen, konnte der Lageverlust der Dachziegel rechnerisch nachvollzogen werden. Vertikal nach oben gerichtete Beschleunigungen führen dazu, dass die Dachziegel abheben und die Nasen über die Dachlatten rutschen können. Die Sparren speichern elastische Energie der Beschleunigung, diese wird durch Schwingungen – dabei entstehen vertikale Beschleunigungen – frei. Die Dachziegel werden in der Folge herunter geschleudert. Auf der oberen Reihe der Bildern 3.3 ist das Abheben der Dachziegel in Sparrenmitte deutlich zu sehen.
- Eine Erhöhung der vertikalen und horizontalen Beschleunigungen um den Faktor fünf (Spitzenwerte: 7 m/s^2 vertikal; $9,25 \text{ m/s}^2$ horizontal), führen beim 45° -Dach gerade noch nicht zum Lageverlust. Mit dem Faktor zehn mit Spitzenbeschleunigungen bis 14 m/s^2 ; $18,5 \text{ m/s}^2$ (jeweils vertikal und horizontal) fallen die Dachziegel, beginnend von der Sparrenmitte, herunter Bilder 3.3. Bei einer Dachneigung von 45° wurde die Dachfläche vollständig abgeräumt.
- Die Bilder 3.4 zeigen ein 35° steiles Dach. Hier sind die Dachziegel auch bei zehnfacher Beschleunigungserhöhung an den Sparrenenden fast vollständig liegengeblieben. Obwohl die oberste Reihe Ziegel nicht wie üblich mit halbrunden Firstziegeln gesichert waren.
- Beim Einmassenschwinger, mit ausschließlich horizontalen Einwirkungen, berechnet sich bei der Antwortspektrenmethode ein Erhöhungsfaktor der Beschleunigungen im Massenschwerpunkt von 2,5 gegenüber der Bodenbeschleunigung. Zur Klärung der Frage, ob eine Erhöhung der Bodenbeschleunigungen um den Faktor zehn möglich ist, wurden die resultierenden Beschleunigungen zweier Knoten am Massivbauwerk nach Abschnitt 3.2.2, an einer Gebäudeecke in Höhe des Erdbodens bzw. an der obersten Decke, ausgewertet. Es ergab sich eine Steigerung um den Faktor 12. Infolge von Resonanz des Gebäudes oder von Gebäudeteilen können an den Bauteilen deutlich höhere Beschleunigungen als am Boden entstehen. Damit hat das gesamte Schwingungsverhalten des Gebäudes großen Einfluss auf die Lagesicherheit der Dachziegel oder der Kamine.



Bilder 3.3 Entwicklung des Lageverlustes der Dachziegel ausgehend von der Sparrenmitte bei 45° Dachneigung



Bilder 3.4 Bei 35° Dachneigung an First und Traufe liegen gebliebene Dachziegel

4 Zusammenfassung

Mit der Veröffentlichung der DIN 4149:2005 [5] wurde der dokumentierte Stand des Wissens zum Stand der Technik dargestellt. Gegenüber [4] haben sich die Einwirkungen und die Art der Nachweisführung verändert. Die Veränderung der Erdbebenzonen basiert auf probabilistischen Berechnungen die sich auf unzählige seismische Messungen und Erfahrungen stützt. Das Vorgehen ist konsequent, verständlich und wissenschaftlich abgesichert. Das tatsächliche Erdbebenrisiko bleibt unverändert. Wir können es mit der DIN 4149:2005 genauer einschätzen. Die Norm regelt vereinfachte Nachweise für übliche Neubauten. Zeit-Beschleunigungs-Verläufe am Boden während eines Bemessungsbebens sind in der Norm nicht geregelt.

Bei bestehenden Gebäuden oder einzelnen Bauprodukten kann die Standsicherheit während des Erdbebens mit transienten Berechnungen mit LS-DYNA realistisch bewertet werden. Erstmals wurden in der Erdbebenforschung auch Detailfragen zur Tragfähigkeit von Anbauteilen untersucht. Am Beispiel der herabfallenden Dachziegel wird gezeigt, dass auch komplexe Geometrien mit zahlreichen Kontaktmöglichkeiten mit aktuellen, leistungsfähigen Softwarepaketen wie LS-DYNA simuliert werden können. Allerdings fehlen bisher spektrinkompatible Zeit-Beschleunigungs-Verläufe, die als geregelte Einwirkung für entsprechende Berechnungen verwendet werden dürfen. Mit den Ergebnissen aus

weiteren Parameterstudien ließe sich beurteilen, welche Einflüsse und Gebäudetypen (Schwingungsverhalten, Exzentrizitäten, Werkstoffe etc.) die Lagesicherheit erhöhen oder reduzieren.

Das bisherige Kriterium nach dem Dachziegel in hohen Erdbebenezonen zu befestigen sind - Dachneigung steiler als 35° - erscheint nicht umfassend geeignet. Bei schwingungsanfälligen Dachformen (Sparrendächer, Überständen oder weit gespannten Sparren etc.) erscheint es nach Meinung der Autoren immer erforderlich, dass die Dachziegel in der Lage befestigt werden. Klammern, die dauerhaft das zweifache Dachziegeleigengewicht zusammen halten, dürften in der Regel zum Schutz der darunter liegenden Verkehrsflächen ausreichen. Allgemeingültige Befestigungsvorschläge für Dachziegel in Erdbebengebieten können nur mit weiteren Parameterstudien erarbeitet werden.

5 Literatur

- [1] DIBt, „Technische Regeln für die Verwendung liniengelagerter Verglasungen“, Fassung 1998
- [2] DIN 1055-4:2005-4 „Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 4 Windlasten“
- [3] DIN 1055-5:2005-07 „Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5 Schnee- und Eislasten“
- [4] DIN 4149:1981-04 „Bauen in deutschen Erdbebengebieten- Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“
- [5] DIN 4149:2005-04 „Bauen in deutschen Erdbebengebieten- Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“
- [6] Gränzer, M.: „Erdbebenschäden auf der Schwäbischen Alb“, Vortrag am Lehrstuhl für Baumechanik der TU München 1987
- [7] Ehlers, W., Markert, B.: Erbebenbeanspruchung von Bauwerken, Vorlesungsskriptum der Universität Stuttgart 2002/2003
- [8] Geologische Übersichtskarte von Baden-Württemberg M 1:350.000
- [9] Innenministerium, Karte der Erdbebenezonen und Untergrundklassen für Baden-Württemberg 1:350.000 1. Auflage 2005,
- [10] Liste der technischen Baubestimmungen Baden-Württemberg
- [11] Meskouris, K., Flesch, R., Wenk, T.: Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik, Bauingenieur Band 79, S. S1-S14
- [12] Peil, U., Ummenhofer, T. Ingenieursozietät IPP, Homepage mit Informationen zum Erdbeben <http://www.ipp-bs.de/>
- [13] Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Erdbebensicher Bauen, 1999
- [14] Haufe, A.: „ALE- und FSI-Konzepte in LS-DYNA zur Berechnung von Explosionslasten auf deformierbare Strukturen“, Tagungsband 4. LS-DYNA Forum 2005, ISBN 3-9809901-1-7
- [15] Brendler, S.: „Untersuchung zu dynamischen Einwirkungen auf Vordächer mit Hilfe von Fluid-Struktur-Interaktion“, Tagungsband 4. LS-DYNA Forum 2005, ISBN 3-9809901-1-7
- [16] Brendler, S., Haufe, A., Ummenhofer, Th.: „Absturzsichernde monolithische Verglasungen und Mehrscheiben-Isolierverglasungen unter stoßartiger Beanspruchung: Rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit durch numerische Simulation des Pendelschlagversuchs“, Bauingenieur 3/2005, S. 123 - S.130
- [17] Ernst, H.: „Aktuelles zur bauaufsichtlichen Regelsetzung. Bekanntmachung der Erdbeben-norm DIN 4149 als technische Baubestimmung“, Tagungsband Arbeitstagung der Vereinigung der Prüfengeure für Baustatik 2005 in Freudenstadt
- [18] Meskouris, K.: Konzepte der DIN 4149, RWTH Aachen, Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik
- [19] DIN V ENV 1998-1-4, Eurocode 8 Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben Teil 1-4: Grundlagen - Verstärkung und Reparatur von Hochbauten, Fassung September 1999

6 Kontakt

stefan.brendler@rpt.bwl.de, www.bautechnik-bw.de
thorsten.gerlinger@khoch3.de, www.khoch3.de
andre.haufe@dynamore.de, www.dynamore.de