

Probekapitel

Mauerwerk-Kalender 2010

Schwerpunkt: Normen für Bemessung und Ausführung

Herausgeber: Wolfram Jäger

Copyright © 2010 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02940-4

2010

MAUERWERK KALENDER



Normen für
Bemessung und
Ausführung

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften
GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21, 10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

 **Ernst & Sohn**
A Wiley Company

I Erdbebenbemessung bei Mauerwerksbauten

Christoph Butenweg und Christoph Gellert, Aachen; Udo Meyer, Bonn

1 Einleitung

Im Hinblick auf die Einführung des Eurocode 8 als europäische Erdbebennorm erfolgte in den letzten Jahren eine weitgehende Überarbeitung der nationalen Normen in ganz Europa. Diese hatte in einigen Ländern die direkte Einführung des Eurocode 8 mit nationalen Anwendungsdokumenten zur Folge. Andere Länder wählten zunächst den Weg, überarbeitete nationale Normen in enger Anlehnung an den Eurocode 8 als Übergangslösungen einzuführen. Dieser Weg wurde in Deutschland mit der im Jahr 2005 eingeführten DIN 4149 gewählt, die 2010 durch die DIN EN 1998 (EC 8) abgelöst wird. Die praktische Anwendung der neuen Normenkonzepte führt jedoch bereits in Ländern mit moderaten Erdbebenbelastungen zu großen Problemen in der Nachweisführung traditioneller Mauerwerksbauten. In zahlreichen Forschungsprojekten wurde deshalb versucht, neue Bemessungs- und Modellierungsansätze zu entwickeln, mit denen die Reserven von Mauerwerksbauten besser ausgenutzt werden können. Der folgende Beitrag gibt einen Gesamtüberblick über den aktuellen Stand der europäischen Erdbebenbemessung von Mauerwerksbauten und illustriert die Anwendung der gängigen Berechnungs- und Bemessungsverfahren anhand von baupraktischen Beispielen.

2 Verhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung

Grundlage für die Bemessung von seismisch beanspruchten Tragwerken sind Rechenmodelle, mit denen das dynamische Verhalten ausreichend genau simuliert werden kann. Für Tragwerke aus Stahl oder Stahlbeton sind in der Regel linear-elastische Rechenmodelle ausreichend und allgemein akzeptiert. Unbewehrte Mauerwerksbauten lassen sich aber aufgrund der fehlenden Zugfestigkeit durch lineare Modelle nur unzureichend beschreiben. Bei dem Versuch, Mauerwerksbauten nichtlinear zu berechnen, wird der Berechnungsingenieur mit üblichen Rechenwerkzeugen vor nahezu unlösbare Probleme gestellt. Aber auch im wissenschaftlichen Bereich werden auf Knopfdruck funktionierende komplexe nichtlineare dynamische Modelle für Mauerwerksbauten in absehbarer Zeit nicht verfügbar sein. Die Problematik in der Erstellung von Rechenmodellen liegt grundsätzlich in dem Zusammenspiel zwischen den Nichtlinearitäten auf Wandebene und der Wandscheiben auf Tragwerkebene. Auf Wandebene lassen sich die in Bild 1 dargestellten Versagensformen unterscheiden.

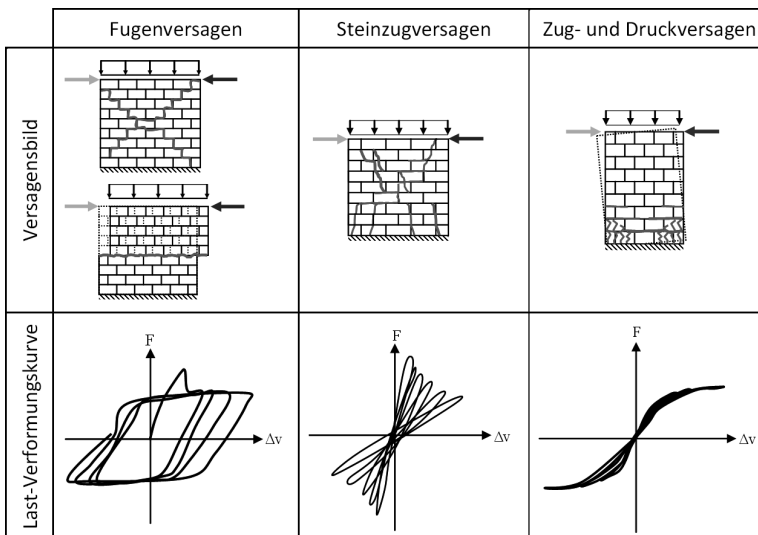


Bild 1. Schubversagen von Mauerwerkswänden

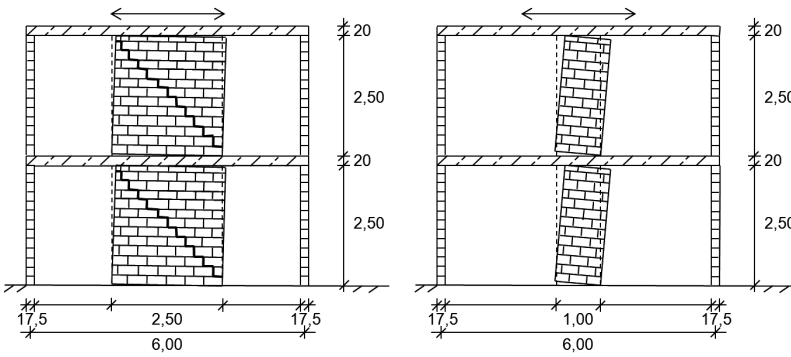


Bild 2. Lastabtrag von kurzen und langen Wänden in Mauerwerksbauten

Das globale Tragverhalten von Mauerwerksbauten ergibt sich aus der Konfiguration der Einzelwände im Grundriss in Interaktion mit den Geschossdecken. Bei einer horizontalen Belastung wirken die über mehrere Geschosse verlaufenden Mauerwerkswandscheiben nicht wie im Stahlbetonbau als durchgehende Scheiben mit Zugübertragung, sondern führen geschossweise Wandrotationen aus. Die Wände stellen sich auf und es bilden sich Druckdiagonalen zwischen den Wandecken aus. Durch das Aufstellen der Wände kommt es zu einer Einspannwirkung durch die Deckenscheiben. Diese Einspannwirkung ist bei kurzen Wänden durch die größeren Wandrotationen stärker als bei langen Wänden, die im Wesentlichen über Schub abtragen (Bild 2).

Da es sich bei Erdbeben um zyklische Belastungen handelt, wechselt die Richtung des Aufstellens der Wände und es kommt zu einer Variation des Einspanngrades am Wandkopf und in der Folge zu einer wechselnden Biegebeanspruchung der Decke. In Bild 3 sind die Verläufe des Einspanngrades für die Erdgeschosswände dargestellt. Hierbei entspricht der Wert 0,5 einer vollen Einspannung und der Wert 1,0 dem Kragarm. Es zeigt sich, dass die kurze Wand (1,0 m) bei einer Verschiebung von etwa 4 mm den vollen Einspanngrad erreicht hat. Die lange Wand (2,50 m) erreicht den vollen Einspanngrad hingegen nicht, da es bei einer Verschiebung

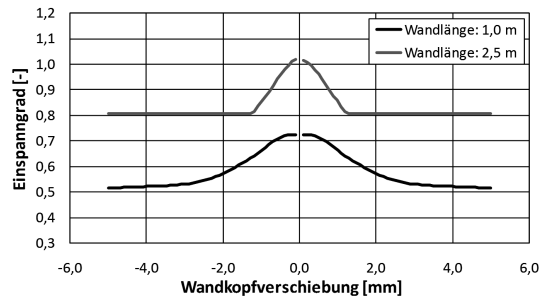


Bild 3. Verlauf des Einspanngrades für die Querwände im Erdgeschoss

von 1,2 mm zu einem Reibungsversagen zwischen Wand und Decke kommt und danach der Einspanngrad konstant bleibt.

Das komplexe Zusammenspiel von nicht kraftschlüssig verbundenen Längs- und Querwänden wird am Beispiel des in Bild 4 a dargestellten Erdgeschosses eines zweigeschossigen Gebäudes verdeutlicht. Durch die Wandkonfiguration weisen die Querwände bereits exzentrische Vorbelastungen infolge Eigengewicht auf, was dazu führt, dass sich die Entwicklung der Einspanngrade in die Lastrichtungen deutlich unterscheiden. Eine

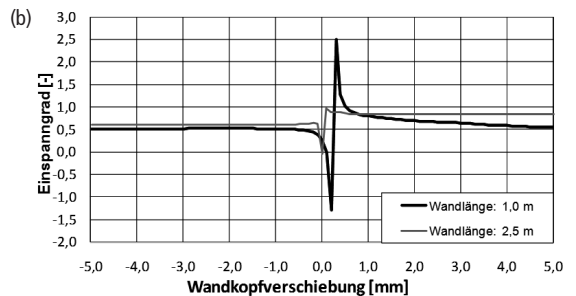
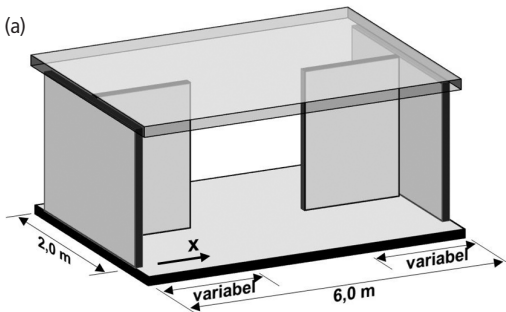


Bild 4. a) Erdgeschoss eines zweigeschossigen Gebäudes, b) Verlauf des Einspanngrades

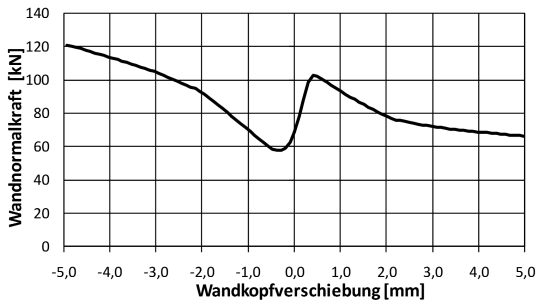


Bild 5. Verlauf der Wandnormalkraft über die Verformung

Belastung in die negative x -Richtung führt für die linke Wand wegen der exzentrischen Vertikallast unmittelbar zu einer vollen Einspannwirkung. Eine Belastung in die positive x -Richtung hebt zunächst die exzentrische Vorbelastung auf und baut dann durch eine Wandrotation in die andere Richtung wieder eine volle Einspannwirkung auf, die jedoch erst bei wesentlich größeren Verformungen erreicht wird (Bild 4 b).

Gleichzeitig führt eine Belastung in die positive x -Richtung durch die Wandrotation zur Umlagerung von Vertikalkräften der linken Querwand auf die Schubwand, die sich bei größer werdenden Verformungen über Rahmentragwirkung auf die gegenüberliegende Wand umlagern. Umgekehrt führt eine Belastung in die negative

x -Richtung im kleineren Verformungsbereich zu einer Umlagerung von Vertikalkräften von der Schubwand in die Querwand. Erst bei größer werdenden Verformungen führt die Wandrotation wieder dazu, dass die Schubwand der Querwand Lasten entzieht und damit stärker belastet wird. Den Verlauf der Wandnormalkraft in Abhängigkeit der Wandkopfverschiebung in positive und negative x -Richtung zeigt Bild 5.

Die einfachen Modellgrundrisse haben verdeutlicht, dass die bei einer wechselnden Horizontalbelastung aktivierten Kinematiken zu stark veränderlichen Randbedingungen der Einzelwände führen, welche die Trag- und Verformungsfähigkeiten positiv oder negativ beeinflussen können. Die hier nur ansatzweise beschriebenen Aspekte werden in verschiedenen Literaturstellen ausführlicher behandelt [12, 20, 25].

Da die Erdbebenbelastung nach den Normen in zwei Richtungen gleichzeitig wirkend anzusetzen ist, wird die rechnerische Erfassung der oben beschriebenen Einflüsse weiter erschwert. Beispielsweise kann eine Schubwand infolge der Rotation einer orthogonal anschließenden Wand durch die erste Erdbebenkomponente entlastet werden, was zu einer starken Reduzierung des Erdbebenwiderstandes führt. Bei gleichzeitiger Wirkung der zweiten Erdbebenkomponente kann dies direkt zum Versagen der orthogonal angeschlossenen Schubwand führen (Bild 6 a). Dieser Fall tritt nicht ein, wenn die erste Erdbebenkomponente in die andere Richtung wirkt (Bild 6 b). Welche Situationen letztendlich während eines Erdbebens auftreten, ist aufgrund der stochastischen Einwirkung infolge Erdbeben nicht vorhersehbar.

Zielsetzung für den Mauerwerksbau ist es, der Praxis anwendbare Berechnungs- und Bemessungskonzepte zur Verfügung zu stellen, mit denen die Tragwerksreserven bei gleichzeitig ausreichendem Sicherheitsniveau gut ausgenutzt werden können. Im Folgenden werden die zurzeit gängigen Berechnungs- und Bemessungsverfahren anhand von baupraktischen Beispielen erläutert und bewertet.

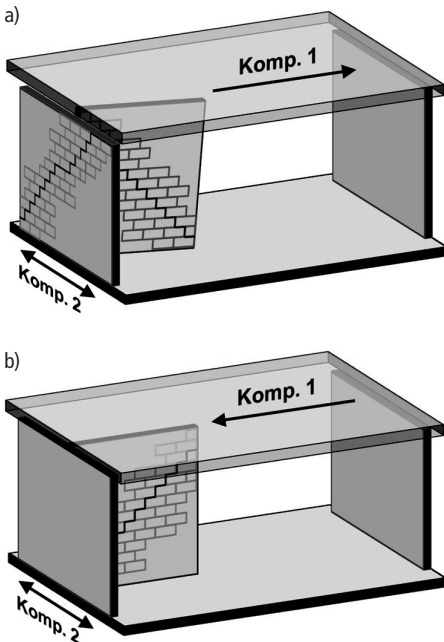


Bild 6. a) Versagen der Schubwand in Querrichtung durch Entlastung, b) ausreichender Widerstand der Schubwand in Querrichtung ohne Entlastung

3 Rechenverfahren für Mauerwerksbauten

Für den rechnerischen Nachweis von Mauerwerksbauten unter Erdbebenbelastung können folgende Rechenverfahren zum Einsatz kommen:

- Ersatzkraftverfahren,
- Antwortspektrenverfahren,
- Pushoverberechnung,
- Zeitverlaufsberechnung.

Bei Anwendung der Rechenverfahren ist zu beachten, dass die DIN 4149 [16] nichtlineare statische Berechnungen und Zeitverlaufsberechnungen generell ausschließt, während die DIN EN 1998 (EC 8) [18] alle Verfahren zulässt. Mit Fertigstellung des Nationalen Anwendungsdokumentes und Einführung der DIN EN 1998 werden aber ab 2010 auch in Deutschland alle

Tabelle 1. Zusammenstellung der entscheidenden Eigenschaften der Berechnungsverfahren

	Berechnungsverfahren			
	Ersatzkraftverfahren	Antwortspektrenverfahren	Nichtlineare statische Berechnung (Pushover)	Zeitverlaufsrechnung
Verfahren	statisch	statisch	statisch	dynamisch
Tragwerksmodell	linear	linear	nichtlinear	nichtlinear
	2-D	2-D, 3-D	2-D, 3-D	2-D, 3-D
Torsionseinfluss	vereinfachte Ansätze	2-D: vereinfachte Ansätze 3-D: im Modell enthalten	2-D: vereinfachte Ansätze 3-D: im Modell enthalten	2-D: vereinfachte Ansätze 3-D: im Modell enthalten
Berücksichtigung Nichtlinearitäten	pauschal: Verhaltensbeiwert	pauschal:- Verhaltensbeiwert	im Modell enthalten	im Modell enthalten
Einwirkung	Antwortspektrum	Antwortspektrum	Antwortspektrum	Zeitverlauf
Berechnung	Tragwerksanalyse mit statischen Ersatzlasten	modale Analyse mit quadratischer Überlagerung der Zustandsgrößen	Pushoverberechnung mit monoton anwachsenden äußeren Kräften	mindestens 3 Zeitverlaufsrechnungen mit statistischer Auswertung
Ungenauigkeiten	Modellbildung, Tragwerksdynamik, Materialverhalten	Modellbildung, Tragwerksdynamik, Materialverhalten	Modellbildung, Tragwerksdynamik	Modellbildung
Anforderungen an Regelmäßigkeit	sehr hoch	2-D: hoch 3-D: keine	2-D: hoch 3-D: keine	2-D: hoch 3-D: keine
Nachvollziehbarkeit	sehr gut	gut	gut	schwierig
Ausnutzung der Tragwerksreserven	gering	gering	gut	sehr gut
Aufwand	gering	mäßig	vertretbar	sehr hoch

Rechenverfahren einsetzbar sein. An dieser Stelle wird darauf verzichtet, die Theorie der einzelnen Rechenverfahren zu erläutern. Statt der theoretischen Beschreibung werden hier die Verfahren nach den für die praktische Anwendung wesentlichen Kriterien in Kurzform bewertet (Tabelle 1).

Als Standardrechenverfahren werden für den Mauerwerksbau das Ersatzkraftverfahren oder das Antwortspektrenverfahren angewendet. Diese beiden Verfahren bieten aufgrund ihrer einfachen Handhabung und der vergleichsweise einfachen Modellbildung die Möglichkeit für die üblicherweise kleinen bis mittelgroßen Tragwerke aus Mauerwerk den Nachweis effizient und damit kostengünstig zu führen. Zudem sind die Resultate aus den linearen Nachweisen einfach auszuwerten und zu interpretieren. Nachteilig ist hingegen die schlechte Ausnutzung der Tragwerksreserven, die es bereits in Erdbebenzone 2 schwierig macht, realistische Grundrisse nachzuweisen. Die Anwendung der linearen Verfahren wird in Abschnitt 5 erläutert.

Der Schritt zu einer Nachweisführung mit nichtlinearen Nachweisverfahren wird trotz der sich daraus ergebenden Chancen hinsichtlich der besseren Ausnutzung von Tragwerksreserven üblicherweise als zu aufwendig eingeschätzt. Dies ist insbesondere für die nichtlinearen Zeitverlaufsrechnungen zutreffend. Für übliche Mau-

erwerksbauten stehen die zeitintensive nichtlineare Modellierung und die damit verbundenen großen Rechenzeiten und dem großem Aufwand in der Auswertung und Interpretation der Ergebnisse in keinem Verhältnis zum Nutzen. Insgesamt kann man resümieren, dass nichtlineare Zeitverlaufsrechnungen für Mauerwerksbauten in der Praxis zurzeit nicht anwendbar sind. Pushoverberechnungen hingegen sind im Bereich der Tragwerksplanung für Stahlbeton oder Stahl bereits lange anerkannte und oft angewendete verformungsbasierte Nachweisverfahren. Die nichtlinearen statischen Verfahren ermöglichen eine gute Ausnutzung der Tragwerksreserven und lassen sich auch für Mauerwerksbauten so aufbereiten, dass eine Anwendung in der Baupraxis möglich ist. Insbesondere durch ein stetig wachsendes Angebot an geeigneten Software Lösungen [1, 24, 26, 30], die auf Mauerwerksbauten und ihre Anforderungen an Tragwerks- und Materialmodellierung speziell zugeschnitten sind, bieten sich diese Verfahren dem Tragwerksplaner als echte Alternative zur klassischen linearen Nachweisführung an. Mit ihnen können nichtlineare Tragwerksreserven ohne spürbare Aufwandssteigerung nachgewiesen werden. Die Nachweisführung mit nichtlinearen statischen Verfahren wird in Abschnitt 6 vorgestellt.

4 Mauerwerksbauten ohne rechnerischen Nachweis

4.1 Überblick

Auf einen rechnerischen Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit kann für Mauerwerksbauten der Bedeutungskategorien I bis III nach DIN EN 1998 (EC 8) und DIN 4149 vollständig verzichtet werden, wenn folgende Bedingungen eingehalten sind:

- Die mit einem Verhaltensbeiwert von $q = 1,0$ ermittelte horizontale Gesamterdbebenkraft ist kleiner als die Horizontalkraft, die sich aus anderen ständigen und vorübergehenden Bemessungssituationen ergibt (z. B. Wind in Kombination mit ständigen Lasten und Verkehrslasten).
- Die Kriterien des erdbebengerechten Entwurfs sind erfüllt.

Darüber hinaus kann auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet werden, wenn die Anforderungen für „einfache Mauerwerksbauten“ (DIN 4149, Abschn. 11.6 bzw. DIN EN 1998, Abschn. 9.7) erfüllt werden. Diese umfassen Vorgaben an Mauerwerksbaustoffe in Erdbebengebieten, Kriterien des erdbebengerechten Entwurfs, Vorgaben an die maximale Geschossanzahl, konstruktive Regeln der Grundrissgestaltung und Mindestanforderungen an Schubwandflächen. Diese Anforderungen werden in den europäischen Erdbebennormen in Abhängigkeit der seismischen Belastung, der Anzahl der Vollgeschosse und der Steifigkeitsklasse als auf die Geschossgrundrissfläche bezogene Mindestquerschnittsflächen von Schubwänden je Geschossrichtung angegeben. Der Nachweis mit Berechnung der Mindestquerschnittsflächen für Schubwände ist einfach und schnell durchführbar und sollte daher, wenn möglich, dem rechnerischen Nachweis vorgezogen werden. Hinzu kommt, dass der vereinfachte Nachweis in vielen Fällen

erbracht werden kann, in denen ein linearer rechnerischer Nachweis nicht möglich ist. Der Grund hierfür liegt darin, dass die erforderlichen Schubwandflächen auf neueren Erkenntnissen und Erfahrungen basieren. In der Baupraxis hat sich aber gezeigt, dass der Nachweis mittels konstruktiver Regeln für „einfache Mauerwerksbauten“ in den meisten Fällen nicht anwendbar ist, da die Gebäude die sehr restriktiven Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung im Grund- und Aufriss häufig nicht erfüllen. Zur Realisierung architektonischer Ansprüche und moderner Nutzungsanforderungen ist somit der rechnerische Nachweis unverzichtbar. Eine weitere Einschränkung in der Anwendung der Tabellen zur Ermittlung der Mindestschubwandflächen liegt darin, dass Zulassungsprodukte nicht abgedeckt werden, da die Tabellenwerke in der Regel nur auf Normsteine anwendbar sind. Hier besteht noch Regelungsbedarf. Da in Deutschland in den meisten Fällen Zulassungsprodukte verwendet werden, ist in der Regel ein rechnerischer Nachweis unter Berücksichtigung der speziellen Zulassungsanforderungen erforderlich. Die genannten Einschränkungen verdeutlichen, dass der rechnerische Nachweis den Regelfall für die Erdbebenbemessung von Mauerwerksbauten darstellt.

4.2 Anwendungsbeispiel

Die Anwendung der Regeln für „einfache Mauerwerksbauten“ nach DIN 4149 wird für den Grundriss eines typischen Reihenhauses mit über die Höhe durchgehenden Innen- und Außenwänden aus Kalksandsteinen der Steindruckfestigkeitsklasse 12 vorgestellt (Bild 7). Das Haus liegt in der Erdbebenzone 1, die Untergrundverhältnisse sind B-R und nach DIN 4149, Tabelle 3 wird die Bedeutungskategorie II mit einem Bedeutungsfaktor $\gamma_1 = 1,0$ gewählt. Der Keller ist als steifer Kasten

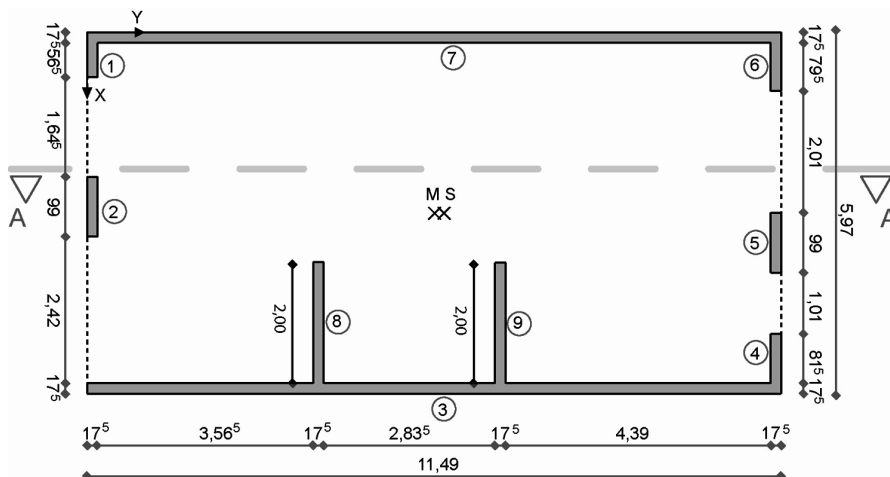


Bild 7. Grundriss des Reihenhauses

Tabelle 2. Überprüfung der Anforderungen an Mauerwerksbauten nach DIN 4149, Absatz 11.1 bis 11.3

Absatz	Anforderung	Erfüllt
11.1 (1)	Horizontallastabtrag über Mauerwerksschubwände	ja
11.2 (1)	Anforderungen an die Mauerwerksbaustoffe (für Kalksandsteine der Steindruckfestigkeitsklasse 12 nach DIN 1053-1 erfüllt)	ja
11.3 (1)	Einhaltung der Konstruktionsmerkmale nach DIN 4149, Abschnitt 4.2	ja
11.3 (2)	Geschossdecke als starre Scheibe ausgebildet	ja
11.3 (3)	Mindestanforderung an die Länge aussteifender Wände nach DIN 4149, Tabelle 14 für Erdbebenzone 1 : $l = 0,74$ m Mindestanforderungen für die Wandschlankheit (h_w/t) nach DIN 1053-1	ja ja

Tabelle 3. Nachweis durch Einhaltung konstruktiver Regeln nach DIN 4149, Absatz 11.6

Absatz 11.6	Konstruktionsregel	Erfüllt
(1)	Erfüllung der allgemeinen Anforderungen der Abschnitte 11.1 bis 11.3	ja
(2)	Kompakter, annähernd rechteckiger Grundriss Längenverhältnis von $b/l = 5,97/11,49 = 0,52 \geq 0,25$	ja ja
(3)	Anzahl der Vollgeschosse: $2 < 4$ (DIN 4149, Tabelle 8 für EZ 1, BK II) Maximale Geschosshöhe: $2,84 \text{ m} \leq 3,50 \text{ m}$	ja ja
(4)	Steifigkeitsmittelpunkt und Massenschwerpunkt liegen nahe beieinander Ausreichende Torsionssteifigkeit	ja ja
(5)	Aussteifende Wände über alle Geschosse durchgehend	ja
(6)	Aussteifende Wände tragen den überwiegenden Teil der Vertikallasten Vertikallasten verteilen sich auf die aussteifenden Wände in beiden Gebäuderichtungen	ja ja
(7)	Mindestschubwandflächen nach Tabelle 15 der Norm: Eingangswerte $a_g = 0,4 \text{ m/s}^2$ (DIN 4149, Tabelle 2, Erdbebenzone 1) $S = 1,25$ (DIN 4149, Tabelle 4, Untergrundkombination B-R) $\gamma_1 = 1,0$ (DIN 4149, Tabelle 3, Wohngebäude) $A_g = 68,6 \text{ m}^2$ (Geschossgrundrissfläche) $l_{ax} = 1,240 \text{ m}$ (mittlere Wandlänge in x-Richtung) $l_{ay} = 11,23 \text{ m}$ (mittlere Wandlänge in y-Richtung) Erforderliche Schubwandflächen	ja
	Querrichtung	Längsrichtung
	Beiwert k_x $k_x = 1$ (Anteil Schubwände $> 2 \text{ m}$: 29% $< 70\%$) Linke Spalte in Tabelle 15 der Norm $a_g \cdot S \cdot \gamma_1 = 0,5 \leq 0,06 \cdot 9,81 \cdot k_x = 0,59$ Erforderliche Schubwandfläche A_{sx} erf. $A_{sx} = 2\% \cdot 68,6 \text{ m}^2 = 1,37 \text{ m}^2$	Beiwert k_y $k_y = 1 + (l_{ay} - 2)/4 = 3,31 \leq 2$ (Anteil Schubwände $> 2 \text{ m}$: 100% $> 70\%$) Linke Spalte in Tabelle 15 der Norm $a_g \cdot S \cdot \gamma_1 = 0,5 \leq 0,06 \cdot 9,81 \cdot k_y = 1,18$ Erforderliche Schubwandfläche A_{sy} erf. $A_{sy} = 2\% \cdot 68,6 \text{ m}^2 = 1,37 \text{ m}^2$
	Vorhandene Schubwandflächen	
	Querrichtung	Längsrichtung
	$A_{S1} = 0,175 \cdot 0,74 = 0,13 \text{ m}^2$ $A_{S2} = 0,175 \cdot 0,99 = 0,17 \text{ m}^2$ $A_{S4} = 0,175 \cdot 0,99 = 0,17 \text{ m}^2$ $A_{S5} = 0,175 \cdot 0,99 = 0,17 \text{ m}^2$ $A_{S6} = 0,175 \cdot 0,97 = 0,17 \text{ m}^2$ $A_{S8} = 0,175 \cdot 2,00 = 0,35 \text{ m}^2$ $A_{S9} = 0,175 \cdot 2,00 = 0,35 \text{ m}^2$ vorh. $A_{sx} = 1,51 \text{ m}^2 > \text{erf. } A_{sx} = 1,37 \text{ m}^2$	$A_{S3} = 0,175 \cdot 11,32 = 1,98 \text{ m}^2$ $A_{S7} = 0,175 \cdot 11,14 = 1,95 \text{ m}^2$ vorh. $A_{sy} = 3,93 \text{ m}^2 > \text{erf. } A_{sy} = 1,37 \text{ m}^2$
(8)	Je Gebäuderichtung mindestens zwei Wände mit $l \geq 1,99 \text{ m}$	ja

ausgebildet und die Masse der Dachkonstruktion trägt weniger als 50% des darunter liegenden Geschosses. Damit verfügt das Haus nach DIN 4149 über zwei anrechenbare Vollgeschosse.

Voraussetzung für die Anwendung der vereinfachten konstruktiven Regeln ist nach Absatz 11.6 (1) der DIN 4149 die Einhaltung der in den Abschnitten 11.1 bis 11.3 festgelegten allgemeinen Anforderungen für Mauerwerksbauten.

Tabelle 2 zeigt, dass die Anforderungen der Abschnitte 11.1 bis 11.3 der DIN 4149 erfüllt sind, sodass der vereinfachte Nachweis nach Abschnitt 11.6 erfolgen darf. Der Nachweis der Einhaltung der konstruktiven Regeln ist in Tabelle 3 zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die Konstruktionsregeln eingehalten werden und auf einen rechnerischen Nachweis verzichtet werden kann. Der Nachweis gelingt jedoch nur in Erdbebenzone 1. Für die Erdbebenzone 2 kann der vereinfachte Nachweis in Querrichtung nicht mehr geführt werden, da in diesem Fall die erforderliche Gesamtschubwandfläche nicht mehr ausreichend ist.

5 Nachweis mit linearen Verfahren

Anhand von zwei Beispielen werden im Folgenden das Ersatzkraftverfahren und das multimodale Antwortspektrenverfahren erläutert. Das Augenmerk liegt dabei mehr auf der Methodik bis hin zur Schnittgrößenermittlung

und weniger auf den Bauteilnachweisen nach einschlägigen und hinreichend bekannten Mauerwerksnormen.

5.1 Ersatzkraftverfahren

Das Ersatzkraftverfahren wird für ein Mehrfamilienhaus mit dem in Bild 8 dargestellten Grundriss durchgeführt. Der Keller ist als steifer Kasten ausgebildet, dem sich drei Vollgeschosse mit starren Geschossdecken anschließen. Da die Masse der Dachkonstruktion weniger als 50% des darunter liegenden Vollgeschosses beträgt, wird die Masse des Dachgeschosses dem darunter liegenden Vollgeschoss aufgeschlagen. Die Mauerwerksinnenwände werden aus Kalksandsteinen (240 mm, Steindruckfestigkeitsklasse 20) und die Außenwände aus Hochlochziegeln (365 mm, Steindruckfestigkeitsklasse 6) in Kombination mit Dünnbettmörtel ausgeführt. Der Standsicherheitsnachweis wird nach DIN 4149 für die Erdbebenzone 2 mit der Untergrundkombination C-S geführt.

5.2 Ersatzsystem für die Ermittlung der Beanspruchungsgrößen

Als Ersatzsystem für das dreidimensionale Gebäude kann aufgrund der Gebäuderegelmäßigkeit ein einfacher Dreimassenschwinger gewählt werden (Bild 9). Die in Tabelle 4 zusammengestellten Einzelmassen des Schwingers m_i ergeben sich aus dem Eigengewicht und

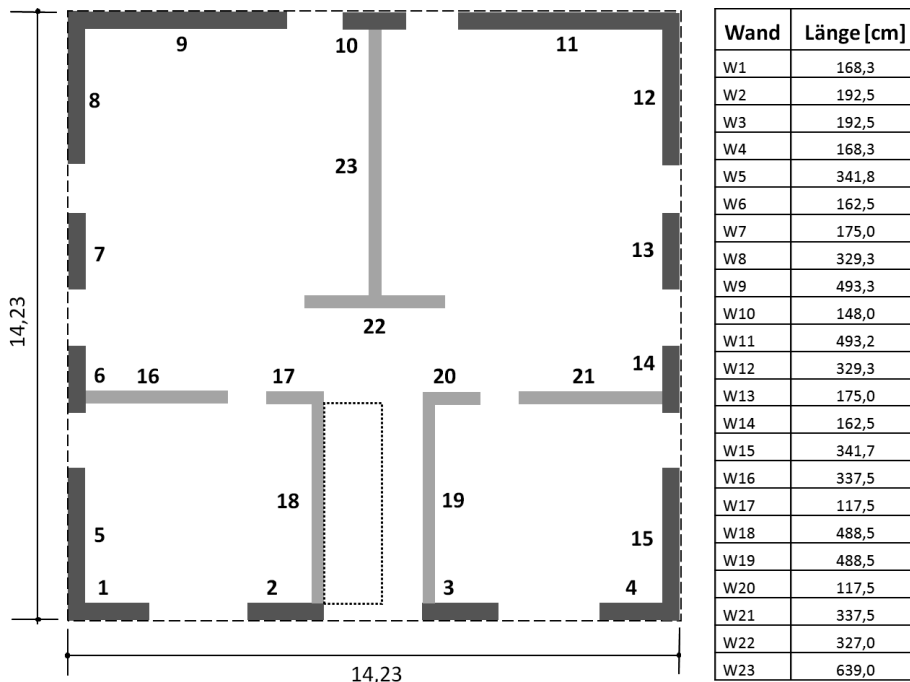


Bild 8. Grundriss des Mehrfamilienhauses

Tabelle 4. Zusammenstellung der Stockwerksmassen

	A	g _k	q _{k1}	ψ _{2,1}	q _{k2}	ψ _{2,2}	M _w	φ	M _{St}
	[m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[-]	[kN/m ²]	[-]	[t]	[-]	[t]
Decke 1	195,88	6,00	2,70	0,30	0,00	0,00	62,51	0,50	190,40
Decke 2	195,88	6,00	2,70	0,30	0,00	0,00	62,51	0,50	190,40
Decke 3	195,88	7,20	2,70	0,30	0,45	0,50	31,26	1,00	195,68

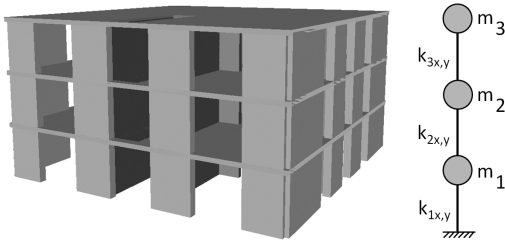


Bild 9. 3-D-Gebäudeansicht und dynamisches Ersatzsystem

den veränderlichen Masseanteilen infolge von Verkehrslasten auf den Stockwerkebenen. Die Steifigkeiten des Ersatzstabes sind die Geschosssteifigkeiten $k_{i,x,y}$, die sich aus der Summe der Wandsteifigkeiten in eine Richtung berechnen. Die Ermittlung der Erdbebenersatzkräfte und der daraus resultierenden Wandbeanspruchungen erfolgt getrennt für die x- und y-Richtung. Bei der Berechnung der Steifigkeiten sollten die Schubverformungen berücksichtigt werden [27]. Eine Kombination der Beanspruchungsgrößen ist nach DIN 4149, Abschnitt 6.2.4.1 (5) für mit Wänden ausgesteifte Systeme nicht erforderlich. An dieser Stelle sei aber darauf hingewiesen, dass diese Sonderregelung mit Einführung der DIN EN 1998 (EC 8) entfällt, und zukünftig eine Überlagerung der Erdbebenrichtungen erfolgen muss.

5.2.1 Ermittlung der Erdbebenersatzkräfte

Mit den mittels einer Modalanalyse berechneten Eigenperioden von 0,19 s in x-Richtung und 0,13 s in y-Richtung werden die Ersatzkräfte ermittelt. Mit den Perioden werden die zugehörigen Spektralbeschleunigungen nach DIN 4149 aus dem Antwortspektrum bestimmt. Dabei wird ein Verhaltensbeiwert von $q = 1,5$ für unbewehrtes Mauerwerk nach DIN 4149, Tabelle 17 angesetzt. Bild 10 zeigt, dass sich für beide Richtungen eine Spektralbeschleunigung von $0,75 \text{ m/s}^2$ ergibt. Aus der Gesamtmasse des Tragwerks und den Spektralbeschleunigungen werden die Gesamterdbebenkräfte berechnet. Die Gesamterdbebenkräfte können noch mit dem Korrekturfaktor λ abgemindert werden, da nicht die gesamte Masse dynamisch mitwirkt: x-Richtung: $F_{b,x} = S_d(T_1) \cdot M \cdot \lambda = 0,75 \cdot 576,48 \cdot 0,85 = 367,51 \text{ kN}$

y-Richtung: $F_{b,y} = S_d(T_1) \cdot M \cdot \lambda = 0,75 \cdot 576,48 \cdot 0,85 = 367,51 \text{ kN}$

Die Verteilung der Gesamterdbebenkräfte erfolgt vereinfachend höhen- und massenproportional auf die einzelnen Stockwerkebenen (Tabelle 5).

5.2.2 Verteilung der Erdbebenersatzkräfte auf die Wandscheiben

Die Summe der Erdbebenlasten je Geschoss wird entsprechend der jeweiligen Wandsteifigkeiten auf die Einzelwände verteilt. Dafür sind die Verteilungszahlen s_{ix} für die Bebenkomponente in x-Richtung und s_{iy} für die Bebenkomponente in y-Richtung zu ermitteln [27]. Bei der Berechnung der Verteilungszahlen sind die Tor-

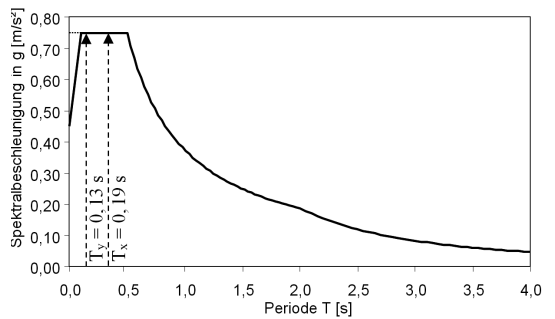


Bild 10. Bemessungsspektrum, Erdbebenzone 2, UK C-S, $q = 1,5$

Tabelle 5. Stockwerkskräfte aus höhen- und massenproportionaler Verteilung

Kraftverteilung	Stockwerkskräfte		
	x-Richtung	y-Richtung	
	F ₃	186,3 kN	186,3 kN
	F ₂	120,8 kN	120,8 kN
	F ₁	60,4 kN	60,4 kN
	F _b	367,5 kN	367,5 kN

sionswirkungen infolge der tatsächlichen Exzentrizität e_0 , der zusätzlichen Exzentrizität e_2 und der zufälligen Exzentrizität e_1 nach DIN 4149, Abschnitt 6.2.2.4.2 zu berücksichtigen. Aus diesen ergeben sich die anzusetzenden Exzentrizitäten e_{\min} und e_{\max} , die getrennt für beide Untersuchungsrichtungen zu bestimmen sind. Für den hier betrachteten Grundriss wurden die in Tabelle 6 angegebenen Exzentrizitäten berechnet und bei der Ermittlung der Verteilungszahlen angesetzt.

5.2.3 Standsicherheitsnachweise nach DIN 1053-100

Zur Durchführung der Standsicherheitsnachweise nach DIN 1053-100 [15] sind die horizontalen Erdbebenlasten infolge Erdbeben mit den Vertikallasten infolge Eigengewicht zuzüglich 30 % der Verkehrslasten zu überlagern. Die Berechnung der Wandnormalkräfte erfolgte hierbei mit dem Programm MINEA [30] über Lasteinzugsflächen (Bild 11).

Mit den Beanspruchungen werden die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit für zentrische und exzentrische Druckbeanspruchung sowie für den Schub am Wandfuß nach DIN 1053-100 geführt. Die Ergebnisse dieser Nachweise sind für alle Wände in Tabelle 7

Tabelle 6. Anzusetzende Exzentrizitäten nach DIN 4149

	Tatsächliche (e_0)	Zufällige (e_1)	Zusätzliche (e_2)	e_{\min}	e_{\max}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
x	0,011	0,712	0,060	-0,706	0,783
y	2,193	0,712	2,846	0,385	5,750

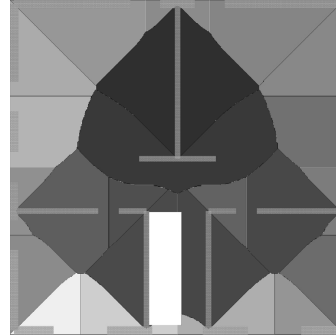


Bild 11. Lasteinzugsflächen der Einzelwände

Tabelle 7. Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit aller Wände

Wand	N_{Ed}	V_{Ed}	M_{Ed}	N_{Rd}	V_{Rd}	N_{Ed}/N_{Rd}	V_{Ed}/V_{Rd}
	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[-]	[-]
W1	131,58	9,57	56,02	667,73	47,11	0,20	0,20
W2	147,87	14,16	82,90	645,45	47,69	0,23	0,30
W3	154,72	14,16	82,91	685,23	50,40	0,23	0,28
W4	131,32	9,57	56,04	666,09	47,00	0,20	0,20
W5	220,37	30,97	181,22	1423,93	93,85	0,15	0,33
W6	94,72	3,72	21,77	935,81	42,40	0,10	0,09
W7	231,30	4,62	27,04	1217,52	55,19	0,19	0,08
W8	251,56	27,97	163,66	1599,48	98,49	0,16	0,28
W9	368,69	78,10	457,48	1967,59	162,80	0,19	0,48
W10	81,16	2,72	15,95	872,92	36,99	0,09	0,07
W11	367,64	78,14	457,72	1961,72	162,34	0,19	0,48
W12	251,21	27,97	163,68	1597,89	98,47	0,16	0,28
W13	229,94	4,62	27,04	1216,39	55,11	0,19	0,08
W14	93,08	3,72	21,77	929,29	42,17	0,10	0,09
W15	217,86	30,95	181,10	1408,86	92,84	0,15	0,33
W16	402,37	94,39	552,62	1256,29	95,62	0,32	0,99
W17	123,96	4,51	26,41	1497,80	51,80	0,08	0,09
W18	343,17	80,79	473,09	4255,71	194,13	0,08	0,42
W19	447,28	81,18	475,45	5518,11	251,56	0,08	0,32
W20	124,15	4,51	26,41	1499,15	51,82	0,08	0,09
W21	402,25	94,39	552,62	1254,68	95,53	0,32	0,99
W22	587,34	69,10	404,58	3784,64	221,24	0,16	0,31
W23	717,00	147,16	861,81	7972,19	409,90	0,09	0,36

zusammengestellt. Hierbei wurde der Schubnachweis mit dem genaueren Verfahren nach DIN 1053-100, Abschnitt 9.9.5 geführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Wände 16 und 21 voll ausgenutzt sind und das Gebäude weder bei ungünstigeren Bodenverhältnissen in Erdbebenzone 1 noch in Erdbebenzone 2 nachgewiesen werden könnte. Es wird deutlich, dass ein rechnerischer Nachweis mit diesem Verfahren schon bei offensichtlich gut ausgesteiften Gebäuden in den Erdbebenzonen 1 und 2 Probleme bereitet. Grund hierfür ist die vereinfachte Systemmodellierung als Kragarm in Kombination mit dem linearen wandbezogenen Nachweiskonzept.

5.3 Unregelmäßige Tragwerke

Wenn die Bedingungen für regelmäßige Tragwerke verletzt sind, dann ist entsprechend den Normen eine Berechnung nach dem multimodalen Antwortspektrenverfahren

mit einem dreidimensionalen Tragwerksmodell durchzuführen. Mit diesem lassen sich Torsionseffekte und der Kraftfluss in komplexen Tragwerken genauer erfassen. Wenn das Antwortspektrenverfahren eingesetzt wird, können nur lineare Rechenmodelle verwendet werden, was für Mauerwerk eigentlich nicht zutreffend ist. Da aber die DIN 4149 nur lineare Rechenverfahren zulässt und auch in der DIN EN 1998 (EC 8) das Antwortspektrenverfahren das Standardrechenverfahren ist, kann das Antwortspektrenverfahren auf unregelmäßige Mauerwerksbauten angewendet werden.

Als Berechnungsbeispiel wird das Mehrfamilienhaus aus Abschnitt 5.2 betrachtet, jedoch nun mit einem Staffelgeschoss als dritte Stockwerksebene. Das Staffelgeschoss weist mehr als 50% der Masse des darunterliegenden Geschosses auf und kann deshalb nicht dem darunterliegenden Geschoss als Masse aufgeschlagen werden. Entsprechend der normativen Anforderungen wird ein dreidimensionales Rechenmodell für den Erdbebennachweis

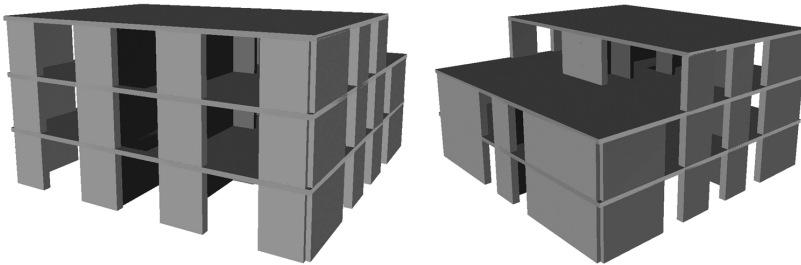


Bild 12. 3-D-Ansichten des Mehrfamilienhauses

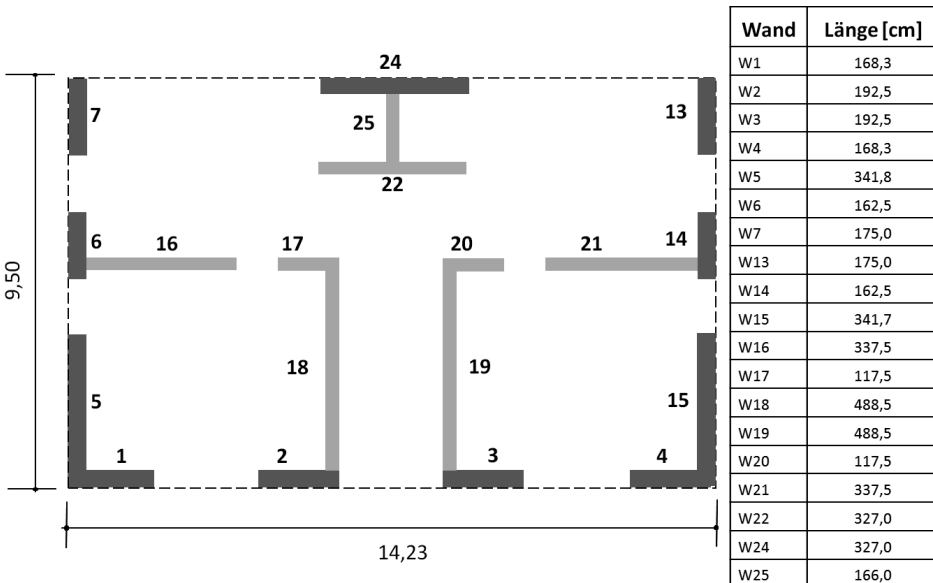


Bild 13. Grundriss des Staffelgeschosses

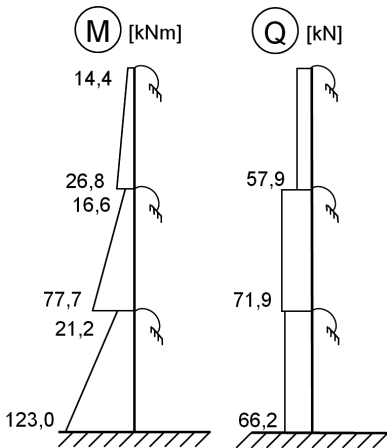


Bild 14. Schnittgrößenverläufe der Wand 16 im EG für die Erdbebenkombination (EZ 2, UK C-S)

verwendet. Die Erdbebeneinwirkungen in die horizontalen Richtungen werden als gleichzeitig wirkend angesetzt und entsprechend den Normen vereinfacht mit der 30%-Regel überlagert. Wiederum erfolgt der Nachweis für Erdbebenzone 2 und die Untergrundkombination C-S. Bild 12 zeigt in zwei Ansichten das dreidimensionale Modell mit dem Staffelgeschoss. Der Grundriss des Staffelgeschosses ist in Bild 13 dargestellt.

Die dreidimensionale Berechnung wird mit dem Programm MINEA [30] auf Grundlage der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Die Spannungsnachweise sind aufgrund der Unregelmäßigkeit in jedem Stockwerk am Wandkopf und am Wandfuß zu führen, was zu einem großen Ausgabebumfang führt. Exemplarisch wird hier der Nachweis für die im zweidimensionalen Modell voll ausgenutzte Wandscheibe 16 am Wandfuß im Erdgeschoss geführt. Für diese Wandscheibe ergibt sich der in Bild 14 dargestellte Momenten- und Querkraftverlauf für die Erdbebenkombination. Anders als bei dem Kragarmmodell liefert das 3-D-Modell durch die Rahmentragwirkung Einspannmomente auf Höhe der Geschosdecken.

Mit den Bemessungsschnittgrößen wird der maßgebende Schubnachweis für die Wand 16 mit einer Auslastung von 32 % erfüllt. Auch alle übrigen Wände in den drei Stockwerken erfüllen die rechnerischen Nachweise. Deshalb erfolgt zusätzlich der Versuch, den Nachweis auch für die Erdbebenzone 3 mit den Untergrundverhältnissen C-S zu führen. Hier wird der Nachweis von der Wand 16 eine Auslastung von 38 % erfüllt und auch alle übrigen Wände erfüllen in den drei Stockwerken den rechnerischen Nachweis.

Die Anwendung des dreidimensionalen Rechenmodells ermöglicht den Nachweis von beliebigen Mauerwerksgebäuden und kann in vielen Fällen die Nachweisituation durch die räumliche Tragwirkung verbessern. Allerdings kann es durchaus auch zu negativen Effekten kom-

men, da es in einem 3-D-Modell zu der in Abschnitt 2 beschriebenen Entlastung von Wänden kommen kann. Abschließend ist festzustellen, dass die Anwendung des multimodalen Antwortspektrenverfahrens auf Mauerwerksbauten eine zulässige und in der Praxis handhabbare Möglichkeit für die Erdbebenberechnung darstellt.

6 Nichtlineare statische Nachweisverfahren

6.1 Kurzbeschreibung des Nachweiskonzepts

Im Rahmen des verformungsbasierten Konzepts erfolgt die Nachweisführung nicht durch den Vergleich von einwirkenden und aufnehmbaren Kräften, sondern durch den Vergleich der Verformungsfähigkeit des Bauwerks und der erforderlichen Verformungsfähigkeit infolge der seismischen Beanspruchung. Grundlage des Nachweises ist die nichtlineare Lastverformungskurve des Bauwerks, die mit einer statisch nichtlinearen Berechnung durch sukzessive Steigerung einer Horizontallastverteilung entsprechend der maßgebenden Eigenformen zu bestimmen ist. Die ermittelte Last-Verformungskurve wird im Anschluss mittels eines äquivalenten Einmassenschwingers in das Spektralbeschleunigungs-Spektralverschiebungsdiagramm (S_a - S_d -Diagramm) transformiert und mit dem Antwortspektrum aus der jeweiligen Erdbebennorm überlagert. Kann ein Schnittpunkt („Performance Point“) der beiden Kurven im stabilen Bereich der Kapazitätsspektralkurve ermittelt werden, so ist die Standsicherheit gewährleistet. Die Bestimmung des Kurvenschnittpunktes erfolgt iterativ unter Berücksichtigung einer verformungsabhängigen effektiven Bauwerksdämpfung, die sich aus dem Anteil der viskosen Dämpfung und der äquivalenten viskosen Dämpfung infolge hysteretischen Verhaltens zusammensetzt (Bild 15). Das beschriebene verformungs-

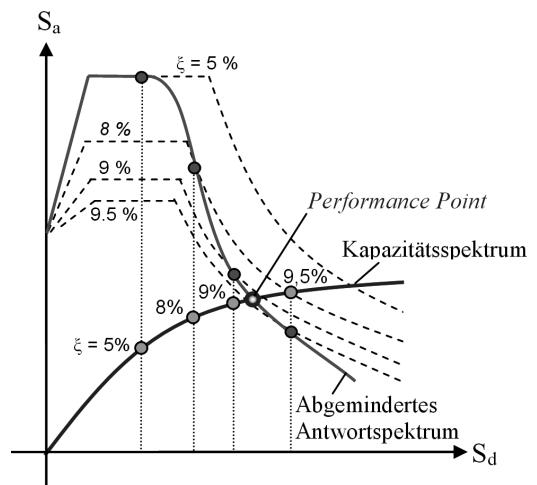


Bild 15. Bestimmung des „Performance Point“

Jäger, W. (Hrsg.)

Mauerwerk-Kalender 2010

Schwerpunkt: Normen für Bemessung und Ausführung

Der Vielseitigkeit von Mauerwerk als Tragstrukturelement, Wandbaustoff mit bauphysikalischen und ästhetischen Funktionen, als Träger von Innovationen in der Fertigteilbauweise und für energiesparendes Bauen wird das Werk im 35. Jahrgang mit einem ausgewogenen Verhältnis von aktuellen und überarbeiteten Beiträgen gerecht. Sämtliche zulassungsbedürftige Neuentwicklungen und die Baustoffeigenschaften aller Mauerwerkarten, Mauersteine und Mauermörtel werden mit der Aktualität eines Jahrbuches vorgestellt.

Der Schwerpunkt dieser Ausgabe liegt auf den Normen in Deutschland, Österreich und anderen europäischen Ländern.

(XXVI, 520 Seiten, 374 Abb., 138 Tab.. Gebunden. Erschienen)



Aus dem Inhalt:

- A BAUSTOFFE BAUPRODUKTE
- BAUPHYSIK - BRANDSCHUTZ
- KONSTRUKTION BAUAUSFÜHRUNG
BAUWERKSERHALTUNG
- NORMEN - ZULASSUNGEN - REGELWERK
- C BEMESSUNG
- FORSCHUNG

Fax-Antwort an +49(0)30 47031 240

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis
	978-3-433-02940-4	Mauerwerk-Kalender 2010	€ 135,- / sFr 213,- *Fortsetzungspreis € 115,- / sFr 182,-
	2116	Fachzeitschrift Mauerwerk - 1 Probeheft	kostenlos
	904852	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos

Ja, ich möchte per E-Mail über Neuigkeiten aus dem Verlag informiert werden

Liefer- und Rechnungsanschrift: privat geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner		Telefon	
UST-ID Nr./VAT-ID No.		Fax	
Straße/Nr.		E-Mail	
Land	-	PLZ	Ort

Wilhelm Ernst & Sohn
Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften GmbH & Co. KG
Rotherstraße 21
10245 Berlin
Deutschland
www.ernst-und-sohn.de

Ernst & Sohn
A Wiley Company

Datum / Unterschrift

*Fortsetzungsbezug: Sie sparen € 20,- / sFr 32,-. Beim Fortsetzungsbezug erhalten Sie die jährliche Ausgabe direkt nach Erscheinen (Dezember) zum günstigeren Fortsetzungspreis zugesandt. Die automatische Belieferung können Sie jederzeit jährlich bis zum 30. September für die folgende Ausgabe stoppen. **€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: April 2010 (homepage_Leseprobe)