D–A–CH – MITTEILUNGSBLATT

ISSN 1434–6591

ERDBEBENINGENIEURWESEN UND BAUDYNAMIK

Eine gemeinsame Publikation von

DGEB
Deutsche Gesellschaft für
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik
www.dgeb.org

OGE
Österreichische Gesellschaft für
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik
www.oge.or.at

SGEB
Schweizer Gesellschaft für
Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik
www.sgeb.ch

Inhalt

Aufsätze

Ch.Butenweg, W. Kuhlmann,
V. Bettzieche
Baudynmaische Untersuchungen
von Talsperren S 2

J. Schwarz, H. Maiwald, T. Langhammer
Erdbebenszenarien für deutsche
Großstädte ... S 7

Aktuelle Informationen & Berichte

H. Bachmann
Erdbebensicheres Bauen gefragt S 6

O. Lateltin
Zwischenbilanz bei der
Erdbebenvorsorge in der Schweiz S16

EDITORIAL

Nicht zuletzt wegen des Asien-Seebebens Ende letzten Jahres ist zur Zeit ein verstärktes Interesse der Öffentlichkeit an der Erdbebenproblematik festzustellen. Deshalb hoffen wir sehr, dass auch unsere nächste gemeinsame D-A-CH-Tagung, die für den 22./23. September 2005 in Köln geplant ist, von diesem Interesse profitieren wird.

Schon jetzt erbitten wir Konferenzbeiträge aus allen Gebieten des Erdbebeningenieurwesens und der Baudynamik, die Sie bitte (als abstract von max. 1 Seite) an dgeb@lbb.rwth-aachen.de schicken wollen. Wir hoffen, noch vor der Sommerpause ein interessantes und „rundes“ Programm zusammenstellen zu können, das allen Facetten des Themas gerecht wird. Es ist vorgesehen, dass uns die schriftlichen Fassungen der einzelnen Beiträge bis Mitte August erreichen, damit der entsprechende Band rechtzeitig zur Tagung fertig gestellt werden kann.
In den kommenden Wochen wird die DIN 4149 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ als Weißdruck erscheinen. Aus diesem Anlass veranstaltet die DGEB zusammen mit dem DIN eine Tagung mit dem Thema „Neue Regeln bei der Auslegung von Bauwerken – Überarbeitung der DIN 4149“. Sie findet am 21. April 2005 in der Filderhalle in Leinfelden-Echterdingen bei Stuttgart statt. Das Programm kann von http://www.dgeb.org heruntergeladen werden. Für DGEB-Mitglieder gilt ein ermäßigter Tagungsbeitrag von 391,-- Euro (normaler Tagungsbeitrag 460,-- Euro).
Nicht zuletzt möchten wir an die Internetseiten unserer Gesellschaften
http://www.dgeb.org
http://www.oge.or.at
http://www.sgeb.ch
erinnern und Sie dazu einladen, sich auf diesem Weg über die Arbeit der nationalen Gesellschaften zu informieren und vielleicht eine Mitgliedschaft in Betracht zu ziehen!

Konstantin Meskouris
Rainer Flesch
Thomas Wenk

Konstantin Meskouris (Vorsitzender DGEB)

Rainer Flesch (Generalsekretär OGE)

Thomas Wenk (Vorsitzender SGEB)

Baudynamische Untersuchung von Talsperren

Ch. Butenweg, W. Kuhlmann, V. Bettzieche

Zusammenfassung

Die Erdbebensicherheit von Talsperren ist auf Grund der Versorgungsfunktion und des vorhandenen Gefährdungspotentials in regelmäßigen Abständen nach den aktuell gültigen Normen nachzuweisen. Die rechnerischen Nachweise werden heute mit numerischen Modellen durchgeführt, deren Ergebnisqualität entscheidend von der realitätsnahen Erfassung der Materialeigenschaften und Systemrandbedingungen abhängig ist. Diese sind gerade bei älteren Talsperren nicht bekannt, so dass Annahmen getroffen werden müssen. Ein sinnvoller Weg ist deshalb die Kalibrierung der Rechenmodelle mit gemessenen Eigenfrequenzen und die Berücksichtigung der streuenden Eingangsparameter in den Modellen. Der vorliegende Beitrag stellt die baudynamische Untersuchung von Talsperren basierend auf Schwingungsmessungen und numerischen Modellen am Beispiel der Fürwiggetalsperre vor.

1 Einführung

Die Fürwiggetalsperre (**Bild 1**) des Ruhrverbands wurde zwischen 1902 und 1904 im Zulaufbereich der Verse erbaut und hat einen Stauinhalt von 1,65 Mio. m^3. Die Schwergewichtsmauer aus Bruchsteinen besitzt einen dreiecksförmigen Querschnitt mit einer Lehmvorlage, dem so genannten Intzekeil. Die Höhe der Staumauer beträgt 29 m, die Kronenlänge 166 m und die Breite der Krone 4 m. Im Grundriss weist die Mauer einen Radius von 120 m auf. Der Wasserablass wird über zwei 36 m hohe Schiebertürme mit einem äußeren Radius von 2,25 m geregelt. Sie sind im unteren Bereich fest und im oberen Bereich über einen Bediensteg mit der Staumauer verbunden.

Christoph Butenweg
Wolfram Kuhlmann
Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik
RWTH Aachen

Volker Bettzieche
Ruhrverband Essen
Abteilung Talsperrenüberwachung und Geotechnik

2 Rechenmodelle

Die Analyse des baudynamischen Verhaltens der Fürwiggetalsperre erfolgte auf der Grundlage eines dreidimensionalen Modells des Gesamtsystems, eines zweidimensionalen Modells der Staumauer und eines dreidimensionalen Balkenmodells für die Schiebertürme. Alle Modelle wurden mit dem Finite-Elemente Programmsystem ANSYS [10] erstellt. Die Materialeigenschaften für Mauerwerk, Untergrund und Intzekeil wurden vorhergehenden Untersuchungen entnommen [3, 5].

Das dreidimensionale Finite-Elemente Modell beinhaltet die Staumauer, die Schiebertürme, den Intzekeil und den Untergrund. Die Diskretisierung erfolgte für alle Modellbestandteile mit Volumenelementen (**Bild 2**). Der Untergrund wurde als masselos angenommen und an den Rändern in allen drei Richtungen fest gehalten. Die räumliche Modellausdehnung des Untergrundes wurde nach den Empfehlungen des Schweizer Bundesamtes für Wasser und Geologie [8] festgelegt. Die Wassermassen wurden als diskrete Massenelemente an der Außenseite der Staumauer nach dem Ansatz von Westergaard [7] und an der Innen- und Außenseite der Schiebertürme nach dem Ansatz von Liaw und Chopra [4] berücksichtigt. In dem 3D-Modell wurde die Kopplung zwischen der Staumauer und den Schiebertürmen

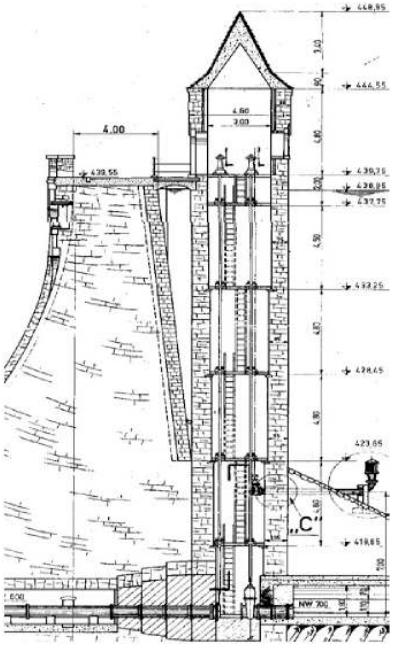


Bild 1. Ansicht der Staumauer und Regelquerschnitt der Schiebertürme (Quelle: Ruhrverband)

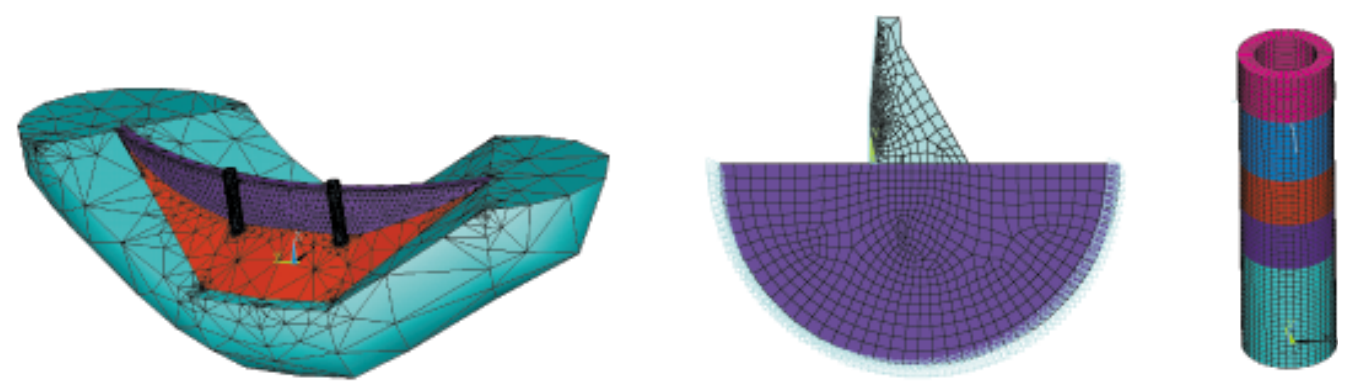


Bild 2. 3D-Modell des Gesamtsystems, 2D-Modell der Staumauer und Balkenmodell des Schieberturms

durch den Bediensteg berücksichtigt, was insbesondere für die realistische Abschätzung des Schwingungsverhaltens der Schiebertürme wichtig ist.
Das zweidimensionale Modell der Staumauer (Bild 2) stellt einen Schnitt durch die Staumauer in Staumauermitte dar. Die Diskretisierung erfolgte mit Elementen im ebenen Dehnungszustand. Durch die ebene Betrachtung können der Einfluss der Schiebertürme, die Krümmung im Grundriss und die Einspannwirkung aus den seitlichen Rändern der Staumauer nicht berücksichtigt werden. Die Beaufschlagung der Staumauer mit den mitschwingenden Wassermassen und die Randbedingen wurden aus dem Volumenmodell übernommen.
Für die Einzeluntersuchung der Schiebertürme wurde ein 3D-Balkenmodell (Bild 2) unter Berücksichtigung der Querschnittsänderung über die Höhe und einer Unterteilung des Ringquerschnitts in Umfangsrichtung erstellt. Der Untergrund wurde nicht berücksichtigt, da die Schwingungsuntersuchungen im 3D-Modell ergaben, dass die Schiebertürme im unteren Bereich der Staumauer als fest eingespannt betrachtet werden können. Die Höhe der Einspannung konnte aus dem 3D-Modell zu etwa 2/3 der Höhe des Intzekeils ermittelt werden. Die Berücksichtigung der Kopplung mit der Staumauer und dem Bediensteg erfolgte über die Anordnung von Federn senkrecht und parallel zur Staumauer. Die Federsteifigkeiten wurden in dem 3D-Modell ermittelt.

3 Sensitivitätsanalysen

Auf Grund des stark unterschiedlichen Idealisierungsgrades der verschiedenen Modelle sind Differenzen zwischen den Eigenfrequenzen von Staumauer und Schiebertürmen zu erwarten. Um diese Unterschiede sicher beurteilen zu können, wurden im Vorfeld Sensitivitätsanalysen durch Variation der in den vereinfachten Modellen nicht berücksichtigten Einflussparameter durchgeführt. Die Berücksichtigung der Kopplung zwischen Staumauer und Schiebertürmen führte zu einer Verringerung der Eigenfrequenz der Staumauer um 7%, die sich aus der geringen Steifigkeit der Türme bei gleichzeitig großer Masse ergibt, wodurch die Türme für die Staumauer wie Zusatzmassen wirken. Der Geometrieeinfluss der Staumauer wurde durch Variation der Länge des Mittelteils und der Steigung der seitlichen Ränder untersucht, wobei sich zeigte, dass die Eigenfrequenzen bei kürzer werdendem Mittelteil und zunehmender Steigung stark zunehmen (**Bild 3**).
Im Fall der Fürwiggetalsperre lag die Zunahme der 1. Eigenfrequenz im Vergleich zum 2D-Modell auf Grund des langen Mittelteils bei 10%. Die Untersuchungen des Krümmungseinflusses im Grundriss sowie der Berücksichtigung des Intzekeils ergaben, dass diese Einflüsse vernachlässigbar sind. Zusätzlich wurden Sensitivitätsanalysen bezüglich der gewählten räumlichen Ausdehnung des Untergrundes durchgeführt. Die Ergebnisse bestätigten, dass der gewählte Radius von 40 m ausreichend ist.

4 Schwingungsmessungen

Die Schwingungsmessungen von Staumauer und Schiebertürmen erfolgten durch Beschleunigungsmessungen infolge der Anregung durch die natürliche Bodenunruhe. Diese so genannte ambiente Erregung besitzt die Eigenschaften eines Breitbandrauschens [1], [2]. Die Bauwerke nehmen die-

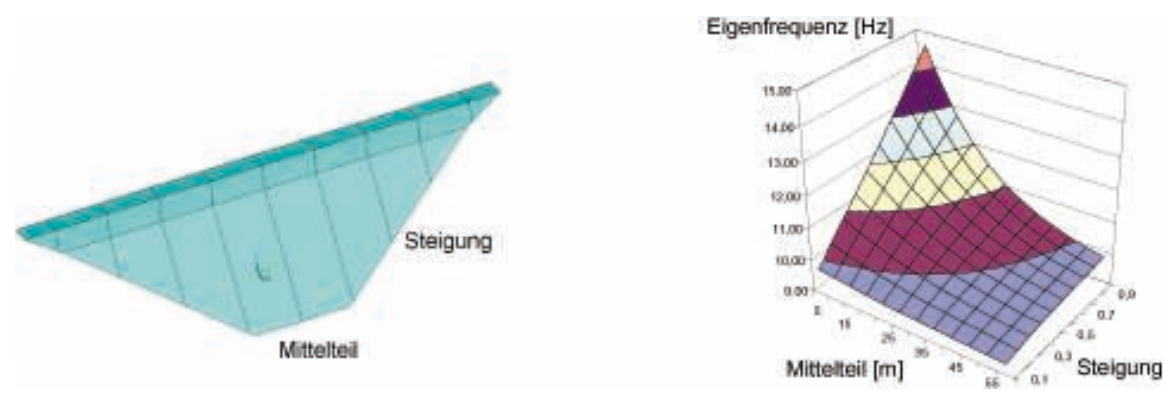


Bild 3. Einfluss der Staumauergeometrie auf die Eigenfrequenz

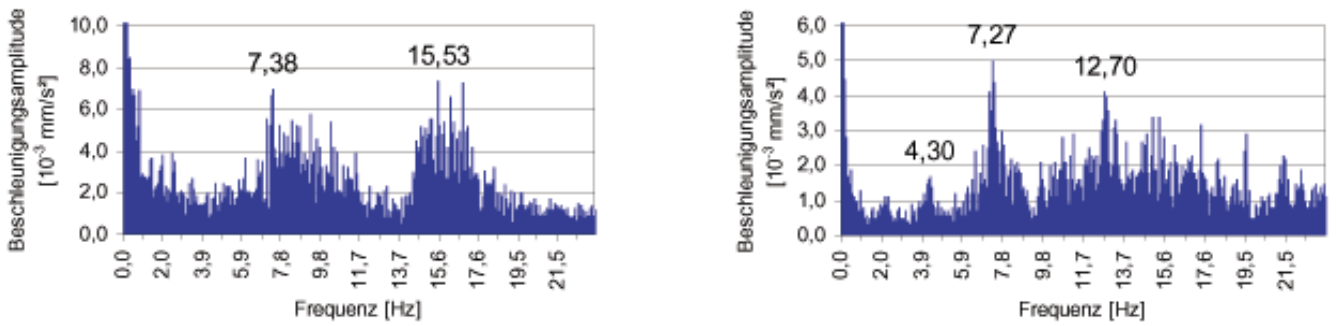


Bild 4. Messergebnisse: Spektren für Schieberturm (links) und Staumauer (rechts)

jenigen Frequenzanteile auf, die sich in der Nähe der Eigenfrequenzen des Bauwerks befinden. Diese Energie setzt das Bauwerk in Bewegungsenergie um. Die Bewegungen können mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen und mittels einer anschließenden Fast-Fourier-Transformation (FFT) vom Zeit- in den Frequenzbereich umgerechnet werden. Exemplarisch sind die Spektren für den Schieberturm und die Staumauer senkrecht zur Mauer in **Bild 4** dargestellt. Die erste Eigenfrequenz des Schieberturmes liegt bei 7,38 Hz und stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit mit der ersten Eigenfrequenz der Staumauer von 7,27 Hz überein. Diese deutet darauf hin, dass Mauer und Türme durch die Verbindung über den Bediensteg ein gekoppeltes Schwingungsverhalten aufweisen. Parallel zur Mauer ergaben die Messungen für den Turm auf Grund der geringeren Steifigkeit eine niedrigere Eigenfrequenz von 6,0 Hz. Für die Mauer konnten in Längsrichtung keine Eigenfrequenzen gemessen werden, da in dieser Richtung kein ausgeprägtes Schwingungsverhalten vorliegt.

5 Kalibrierung der Rechenmodelle

Die Kalibrierung erfolgte durch den Vergleich der berechneten und gemessenen ersten Eigenfrequenzen am 3D-Volumenmodell. Im Rahmen der Kalibrierung wurden die Bauwerkssteifigkeit und die Steifigkeit der Bedienstege zwischen Staumauer und Schiebertürmen bei konstanter Masseverteilung variiert. Als Ergebnis ergaben sich ein E-Modul von $1{,}3 \cdot 10^7$ kN/m² für das Bruchsteinmauerwerk und von $0{,}7 \cdot 10^7$ kN/m² für den Bediensteg. Mit diesen Steifigkeitswerten zeigte sich eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Eigenfrequenzen (**Tabelle 1**).
Für das 2D-Modell der Staumauer wurde der kalibrierte Materialkennwert aus dem 3D-Modell für das Bruchsteinmauerwerk angesetzt. Mit diesem Wert ergaben sich die erste Eigenfrequenz zu 6,1 Hz und die zweite Eigenfrequenz zu 14,3 Hz (Tabelle 1), die durch die Nichterfassung der Geometrie im Aufriss und die Nichtberücksichtigung der Schiebertürme eine Abweichung von ~17% gegenüber den Messergebnissen aufweisen.

Für das Modell der Schiebertürme wurde die Höhe der Einspannung mit etwa 2/3 des Intzekeils aus dem 3D-Modell übernommen. Der Bediensteg wurde durch Federn senkrecht und parallel zur Staumauer am Kopf des Turmes modelliert. Die Federsteifigkeiten wurden in dem kalibrierten Volumenmodell ermittelt. Mit diesen Werten ergab sich eine gute Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Eigenfrequenzen.

6 Probalistische Untersuchungen

In den numerischen Modellen wurden die Unsicherheiten in den Materialeigenschaften von Bauwerk und Boden durch den Ansatz von Gauß'schen Normalverteilungen für die Materialparameter berücksichtigt, wobei als Mittelwerte die im Rahmen der Kalibrierung bestimmten Steifigkeiten angesetzt wurden. Zusätzlich wurde in dem Balkenmodell der Schiebertürme die Einspannhöhe als streuende Größe berücksichtigt. In **Tabelle 2** sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Verteilungen zusammengefasst. Die probabilistischen Untersuchungen wurden mit Hilfe von Monte-Carlo Simulationen durchgeführt.
Als Ergebnis einer Monte-Carlo Simulation am dreidimensionalen Gesamtmodell sind in **Bild 5** beispielhaft das Histogramm und die Häufigkeitsverteilung für die erste Eigenfrequenz dargestellt. Mit der stochastischen Auswertung ist eine wesentlich bessere Interpretation der Rechenergebnisse durch die Verknüpfung mit einer Auftretenswahrscheinlich-

Tabelle 1. Vergleich der berechneten Eigenfrequenzen (Talsperre und Schiebertürme gefüllt)

	3D-Modell		2D-Modell		Balkenmodell		Messung	
n-te Eigenfrequenz	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
Schiebertürme (senkrecht zur Mauer)	7,3	14,4	-	-	7,3	13,6	7,4	15,0
Schiebertürme (parallel zur Mauer)	5,8	12,4	-	-	5,8	13,5	5,8	11,1
Staumauer	7,3	12,2	6,1	14,3	-	-	7,3	12,7

Tabelle 2. Mittelwerte und Standardabweichungen der streuenden Eingangsparameter

	E-Modul [kN/m²]			Einspannhöhe [m]
	Mauerwerk	Untergrund	Intzekeil	Schieberturm
Schieberturm	$\mu = 1{,}30 \cdot 10^7$ $\sigma = 0{,}30 \cdot 10^7$	-	-	$\mu = 9{,}0$ $\sigma = 3{,}0$
Staumauer		$\mu = 1{,}30 \cdot 10^7$ $\sigma = 0{,}30 \cdot 10^7$	-	-
Gesamtmodell			$\mu = 1{,}00 \cdot 10^5$ $\sigma = 0{,}25 \cdot 10^5$	-

keit möglich. Die Streuung der 1. Eigenfrequenz ist für das Antwortspektrenverfahren von Bedeutung, da sich durch eine Änderung der Eigenfrequenzen höhere Spektralbeschleunigungen ergeben können.

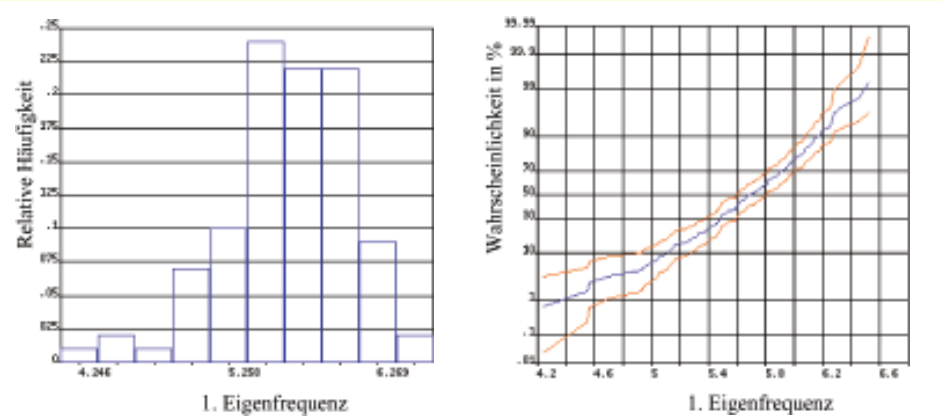


Bild 5. Histogramm und zugehörige Häufigkeitsverteilung der 1. Eigenfrequenz des 3D-Modells

7 Rechnerischer Nachweis der Schiebertürme

Der Nachweis der Standsicherheit der Schiebertürme wurde mit dem Balkenmodell nach dem Antwortspektrenverfahren mit und ohne Berücksichtigung des Steges durchgeführt. Für die sehr konservative Betrachtung eines Stegversagens wurden die Eingangsparameter deterministisch angesetzt. Die horizontalen Bemessungsspektren für das Betriebs- und Sicherheitserdbeben wurden entsprechend der Angaben des Geologischen Landesamtes [5] angesetzt, die vertikalen Beschleunigungen wurden aufgrund des geringen Einflusses auf die Schwergeschichtsmauer vernachlässigt. Für die Kombination der Schnittgrößen infolge der beiden horizontalen Bebenkomponenten wurden diese in jeder Richtung mit je 30% der Schnittgrößen der anderen Richtung überlagert. Unter Berücksichtigung der positiven und negativen Vorzeichen sowie des Betriebs- und Sicherheitserdbebens ergaben sich acht Lastfallkombinationen (je vier für Betriebs- und Sicherheitserdbeben). Bei der Berechnung nach dem Antwortspektrenverfahren wurden die ersten 25 Eigenformen berücksichtigt. Damit wurde entsprechend der Forderung der

E DIN 4149 [9] mehr als 90% der Gesamtmasse aktiviert. Im Anschluss an die Berechnungen nach dem Antwortspektrenverfahren wurde zusätzlich eine Zeitverlaufsberechnung der Schiebertürme durchgeführt.

7.1 Deterministischer Nachweis der Schiebertürme ohne Steg

Für die in E DIN 19700 [6] definierten Bemessungsfälle ergaben sich aus den maßgebenden Lastfallgruppen (Betriebs- und Sicherheitserdbeben) die in **Tabelle 3** angegebenen maximalen Druckspannungen. Die maximale Zugspannung ergab sich für die Lastfallgruppe 3 zu 0,382 MN/m². Die zugehörige klaffende Fuge im maßgebenden Schnitt geht nicht über die Hälfte des Mauerquerschnittes hinaus. Für die auftretenden Druck- und Zugspannungen sind die Nachweise nach E DIN 19700 erfüllt.

7.2 Probabilistischer Nachweis der Schiebertürme mit Steg

Für die Bestimmung der maximalen Druck- und Zugspannungen wurde eine probabilistische Untersuchung unter Berücksichtigung der Kopplung des Schieberturms mit der Staumauer durch den Bediensteg durchgeführt. Als streuende Eingangsparameter wurden der E-Modul des Bauwerks und die Einspannhöhe mit Mittelwert und Standardabweichung nach Tabelle 2 gewählt. Mit diesen Eingangsparametern wurde die Häufigkeitsverteilung der maximal auftretenden Druck- und Zugspannungen mittels einer Monte-Carlo-Simulation berechnet. Die durch die Zufallsmodelle ermittelte maximale Druckspannung ist mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % kleiner als 0,84 MN/m². Dieser Wert liegt deutlich unter dem zulässigen Wert von 3,84 MN/m². Die maximalen Zugspannungen des Querschnitts waren gering und führten nicht zu einer klaffenden Fuge bis zur Hälfte des Querschnitts. Damit sind die Nachweise auch bei Ansatz streuender Eingangsparameter nach E DIN 19700 erfüllt.

7.3 Zeitverlaufsberechnung

Die Zeitverlaufsberechnung erfolgte unter Berücksichtigung der Kopplung mit der Staumauer durch den Bediensteg. Da für den Standort kein Beschleunigungszeitverlauf eines realen Erdbebens vorlag, wurden fünf kompatible synthetische Beschleunigungszeitverläufe aus dem Spektrum des Sicherheitserdbebens generiert [11]. Als Berechnungsergebnis der Zeitverlaufsberechnungen trat in der Starkbebenphase eine maximale Druckspannung von 0,449 MN/m² auf, die deutlich unterhalb der Ergebnisse nach dem konservativeren Antwortspektrenverfahren liegt. Die auftretenden Zugspannungen waren gering und führten nicht zu einer klaffenden Fuge bis zur Hälfte des Querschnitts.

Tabelle 3. Druckspannungsnachweise ohne Berücksichtigung des Bediensteges

Lastfallgruppe	$\sigma_{x,min}$ [MN/m²]	zul. $\sigma_{x,min}$ [MN/m²]	Sicherheitsbeiwert η	Erf. η
1	-0,462	-3,84	8,31	2,1
2	-0,640	-3,84	6,00	1,7
3	-0,921	-3,84	4,17	1,2

8 Schlussfolgerungen

Die baudynamische Untersuchung von älteren Bauwerken ist auf Grund der häufig nur näherungsweise bekannten Materialeigenschaften und Randbedingungen eine schwierige Aufgabenstellung. Für Bauwerke hoher Bedeutung sollten die numerischen Modelle durch Schwingungsmessungen kalibriert werden, um das Schwingungsverhalten realitätsnah zu erfassen. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Streuungen der Eingabeparameter durch probabilistische Methoden verbessert die Interpretierbarkeit der Ergebnisse.

Literatur

[1] *Meskouris, K., Hinzen, K.-G.*: Bauwerke und Erdbeben Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003
[2] *Petersen, C.*: Dynamik der Baukonstruktionen, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1996
[3] *Hosser, D.*: Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke. Ergebnisse einer interdisziplinären Forschungsarbeit. Bauingenieur, Nr. 62, 1987, S. 567–574
[4] *Liaw, C-Y. / Chopra, A. K.*: Dynamics of Towers surrounded by water Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 3, 1974, pp. 33 – 49
[5] Schreiben des Geologischen Landesamtes Nordrhein-Westfalen an den Ruhrverband Essen vom 3.5.1995
[6] E-DIN 19700, Stauanlagen, Teil 11: Talsperren, Juli 2004
[7] DVWK-Merkblatt. Nr. 242, 1996
[8] Schweizer Bundesamt für Wasser und Geologie.: Basisdokument zu dem Nachweis der Erdbebensicherheit, 2003
[9] E DIN4149: 2004:06: Entwurfsfassung der neuen DIN 4149, 2004
[10] ANSYS: FEM-Software, Version 8.1, 2004
[11] *Wörndle, P.*: Baudynamische Untersuchung der Fürwiggetalsperre unter Erdbebenbelastung auf Grundlage von Messungen und Simulationen, Diplomarbeit, Lehrstuhl für Baustatik und Baudynamik, RWTH-Aachen, 2004

AKTUELLE INFORMATIONEN UND BERICHTE

Stiftung für Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen gegründet

Erdbebensicheres Bauen gefragt

Bauliche Maßnahmen zur Verbesserung des Erdbebenverhaltens von Gebäuden wären einfach und billig zu realisieren, werden aber immer noch oft vernachlässigt. Dem will eine neu gegründete Stiftung abhelfen.

Zur Förderung von wissenschaftlichen Tätigkeiten im Bereich des Bauingenieurwesens, insbesondere im Gebiet Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen, ist eine Stiftung gegründet worden. Sie bezweckt die Förderung innovativer Forschungsarbeiten, die periodische Ausrichtung eines Preises für hervorragende Leistungen sowie die Unterstützung weiterer relevanter Aktivitäten. Dem Stiftungsrat gehören an Prof. Dr. Dr. h.c. Hugo Bachmann, Dübendorf, Präsident, Dr. Martin Koller, Carouge, Vizepräsident, und Dr. Dario Somaini, Roveredo.
Einen Schwerpunkt setzt die Stiftung auf die Förderung der Kompetenzen im Bereich Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen in der schweizerischen Baupraxis. Insbesondere fördert sie praktisch tätige und gut qualifizierte Bauingenieure mit Stipendien zur Weiterbildung. Die Stiftung unterstützt damit die Bemühungen der ETH Zürich und der EPF Lausanne sowie der Schweizer Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik SGEB in ihrem Einsatz für erdbebensicheres Bauen. Diese Institutionen verfügen infolge fehlender Rechtsgrundlagen (keine Verfassungsbestimmung, kein Bundesgesetz) über viel zu geringe Mittel.
Die Baudynamik (www.baudyn.ch) befasst sich mit dem Schwingungsverhalten von Bau- und Tragwerken. Brücken, Türme, Hallen, Gebäude und andere Bauwerke werden immer schlanker und mit weniger Materialaufwand erstellt und sind dadurch oft erheblich schwingungsanfälliger als ähnliche ältere Bauwerke. Katastrophal können Schwingungen aus Bodenbewegungen infolge Erdbeben sein. Das Erdbebeningenieurwesen bezweckt die Bau- und Tragwerke wesentlich erdbebensicherer zu gestalten, um einen Einsturz zu vermeiden und die Schäden entscheidend zu verringern. Das Fachgebiet Baudynamik und Erdbebeningenieurwesen ist sehr anspruchsvoll und befindet sich in rasanter Entwicklung. Die neu gegründete Stiftung will die Einführung moderner Erkenntnisse in die Praxis und hervorragende theoretische und experimentelle Arbeiten unterstützen sowie den entsprechenden beruflichen und wissenschaftlichen Nachwuchs fördern.
Weitere Informationen:
www.baudyn.ch
Prof. em. Hugo Bachmann, Dübendorf
info@baudyn.ch
Tel. 0041 (01) 821 69 49

Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale

J. Schwarz, H. Maiwald, T. Langhammer

1 Zusammenfassung

Durch das Teilprojekt „Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale auf der Grundlage der EMS-98“ werden im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK) methodische Grundlagen einer GIS-basierten seismischen Risikobewertung entwickelt und an zwei Testgebieten erfolgreich zur Anwendung gebracht. Die Fallstudien der Kreisstadt Schmölln in Ostthüringen und der Großstadt Köln stellen aufgrund der Unterschiede in der urbanen Ausdehnung und im Bauwerksbestand qualitativ unterschiedliche Anforderungen an das (aufwandseffiziente) praktische Vorgehen. Sie ermöglichen jedoch aufgrund der vergleichbaren Gefährdung die Überprüfung von forschungsstrategischen Zielen und aktuellen Schwerpunkten des vorbeugenden Katastrophenmanagements.
Anhand der durch probabilistische Gefährdungsanalysen ermittelten Standortintensitäten (für unterschiedliche Wiederholungsperioden zwischen 475 und 10000 Jahren) werden die Eintretensraten festgelegt, die letztlich auch eine Einordnung der abgeschätzten Verluste in Risikokurven ermöglichen. Zur Quantifizierung der Schadenspotentiale und deren Streubreiten werden unterschiedliche methodische Vorgehensweisen getestet und die in die Bebenszenarien eingeführten Parameter variiert. Die Verlustschätzungen konzentrieren sich auf den strukturellen Schaden. Die Schadenserwartung wird bezogen auf unterschiedliche Flächeneinheiten bzw. Flächennutzungselemente differenziert dargestellt; Regionen mit erhöhter Schadenserwartung werden deutlich herausgearbeitet und können direkt in ein präventives Katastrophenmanagement eingeführt werden. Besonders exponierte öffentliche Gebäude und soziale Einrichtungen werden identifiziert. Damit sind auch die Voraussetzungen für weiterführende Arbeiten z.B. zur Klärung des Ertüchtigungsbedarfs gegeben.
Grundlagen für die wirklichkeitsnahe Schadensprognose bilden neben der Berücksichtigung lokaler Standorteffekte vor allem die in dieser Form beispielhafte Analyse und Bewertung der Bausubstanz in deutschen Großstadträumen am Maßstab der *European Macroseismic Scale* EMS-98.

Jochen Schwarz
Holger Maiwald
Tobias Langhammer
Erdbebenzentrum am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Bauhaus-Universität Weimar
Marienstr. 7, D-99421 Weimar
schwarz@bauing.uni-weimar.de

2 Veranlassung und Problem

Für die Erdbebengebiete der Bundesrepublik Deutschland stehen keine Erfahrungswerte zur Verletzbarkeit des gegenwärtigen Bauwerksbestandes zur Verfügung; es fehlt zugleich der Maßstab, um Ergebnisse seismischer Risikoabschätzungen bzw. Schadensszenarien kalibrieren zu können. Demzufolge war das im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK) bearbeitete Vorhaben als ein Kernstück der Wirkungskette Erdbeben aufzufassen, mit dem einerseits der Zusammenhang zwischen den Erdbebeneinwirkungen, der vorhandenen Bausubstanz und den Folgen hergestellt und andererseits konkrete Risikoaussagen durch die Verkettung bzw. Vernetzung des Informationsflusses bereitgestellt werden.
Die Forschungsarbeiten im Rahmen des DFNK-Vorhabens *B3.1 Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotenziale auf der Grundlage der EMS-98* verdeutlichen, dass die Erfassung des Bauwerksbestandes weiterhin mit erheblichen Aufwendungen verbunden sein wird. Diese Einschätzung ist u.a. wie folgt zu begründen (Schwarz et al., 2002b, 2003):

- Der Gebäudebestand liegt nicht in den für die Abschätzung der Verletzbarkeit erforderlichen Kenngrößen bzw. Parametern vor.
- Die im Katastrophenfall „überlebenswichtigen“ *Life-lines*-Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen mit Bedeutung für die Katastrophenbewältigung (Krankenhäuser, Feuerwehrgebäude usw.) sind bisher nicht systematisch überprüft worden.

Mit den durch das Teilprojekt B3.1 vorgelegten Ergebnissen zur seismischen Risikoabschätzung in Ostthüringen (Testgebiet Schmölln) und in der Niederrheinischen Bucht (Testgebiet Köln) besteht erstmals für deutsche Erdbebengebiete die Möglichkeit, eine vergleichende Analyse der Verletzbarkeit und Schadenserwartung vorzulegen. Wie Schwarz et al. (2003) unter Beschränkung auf die zu erwartenden Bauwerksschäden und möglichen Konsequenzen für die Bevölkerung begründen, wäre die öffentliche Aufmerksamkeit stärker als bisher auf den Bestand allgemeiner Hochbauten und auf die für die traditionellen Bauweisen kritischen Einwirkungsbedingungen auszurichten. Aufgrund der erhöhten Verletzbarkeit der Bausubstanz und teilweise auch aufgrund der standortbedingt höheren Erdbebenwirkungen können Kleinstadtgebiete im Ereignisfall lokal besonders betroffen sein. Diese Einschätzung deckt sich auch mit den in der Vergangenheit beobachteten Erdbebenschäden (u.a. Albstadt-Erdbeben 1978, Roermond 1992). Der Handlungsbedarf wäre somit nicht nur auf die (groß)städtischen Zentren zu konzentrieren.

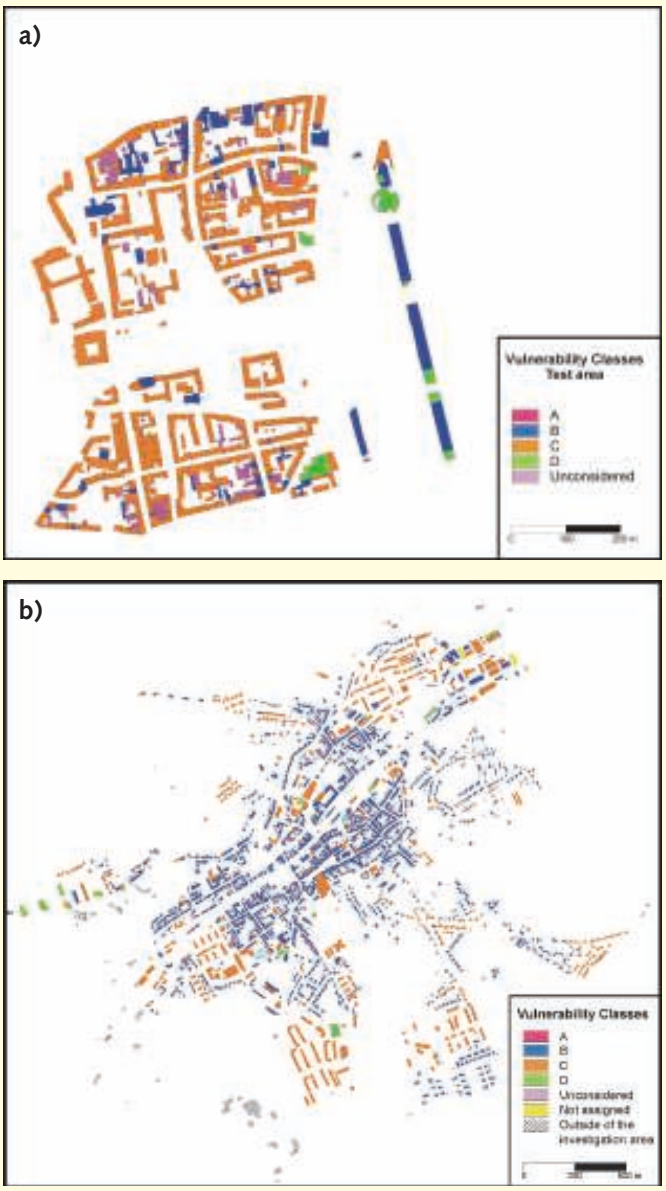


Bild 1. Darstellung der Testgebiete (durch Vor-Ort-Begehungen im Detail aufgenommen) und Einordnung der einzelnen Gebäude in Verletzbarkeitsklassen (*vulnerability classes*) nach EMS-98.
a) Köln-Testgebiet b) Schmölln

3 Vorgehensweise

3.1 Auswahl der Testgebiete

Eine zentrale Aufgabe seismischer Risikostudien besteht in der Aufnahme und Bewertung der Bausubstanz. Aufgrund der Notwendigkeit, Grundlagen zu entwickeln und bausteinartig (modular) zusammenzufügen, werden beispielhafte Anwendungen vorgelegt und die Methodik durch Fallstudien getestet. Zur Realisierung dieser Aufgaben wurden zwei Testgebiete ausgewählt, die – wie anhand der Zonenzuordnung in den Karten der E DIN 4149 (2002) bzw. der noch geltenden DIN 4149 (1981) begründet werden kann – sich durch eine vergleichbare Qualität der Seismizität bzw. der seismischen Gefährdung auszeichnen (Schwarz et al., 2003a). Unterschiede zwischen beiden Fallstudien (Testgebieten) bestehen in der Größe des betroffenen Gebietes (und natürlich auch der betroffenen Bevölkerung) sowie in der Anzahl der Gebäude, verbunden mit grundsätzlich unterschiedlichen methodischen Anforderungen an die Aufnahme und Bewertung der Bausubstanz. Folgende Vorgehensweisen wurden gewählt:

- In *Schmölln* (einer Kleinstadt in Ostthüringen, in der Nähe von Gera) wurde nahezu der gesamte Gebäudebestand (im Ist-Zustand) vor Ort inspiziert und anhand von Auswertebögen in den wesentlichen Bauwerksparametern (Bauweise, Tragwerkstyp, Höhe, Geschosszahl) dokumentiert. Zur Unterstützung der Einordnung in ein Schema von Verletzbarkeitsklassen wurde jedes Bauwerk hinsichtlich der Einhaltung elementarer Grundregeln erdbebentauglicher Konstruktionen sowie hinsichtlich des Erhaltungszustandes (hier nach fünf Stufen des Sanierungs- und Ertüchtigungsbedarfs) bewertet (Schwarz et al., 2001a).
- Aus Zeit- und Kapazitätsgründen war eine solche Vorgehensweise für das Untersuchungsgebiet *Köln* von vornherein auszuschließen. Hier bestand die Aufgabe darin, ausgehend von einem kleinräumigen, ebenfalls vor Ort aufgenommenen Gebiet, geeignete (letztlich doch nicht verfügbare) Modelle der geostatistischen Extrapolation zur Anwendung zu bringen. Im Testgebiet wurden zunächst ca. 800 Bauwerke aufgenommen. Grundaussagen zur Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz und zu den Schadensszenarien beziehen sich auf diese Auswertungen. Die für den Großstadtraum Köln verfügbaren Bebauungsdaten wurden zusammengetragen und im GIS-Format aufbereitet, wobei verschiedene Auflösungen der Objektbeschreibung (Einzelobjekte, Blockstruktur, Stadtviertel usw.) überprüft und korreliert werden. Der Gebäudebestand wird danach über einfache Eingangsparameter (z.B. Alter, Etagenzahl usw.) einheitlich beschrieben, um schließlich in größere Strukturen hochgerechnet zu werden. Die Aufbereitung der vorhandenen Bebauungsangaben und Klassifikation der Bausubstanz unter Verwendung der unterschiedlich detaillierten Datenebenen ist u.a. Schwarz et al. (2002c) zu entnehmen.

Begleitend zu den Untersuchungen wurde eine Reihe von Publikationen für die Testgebiete Ostthüringen (u.a. Schwarz et al., 2001a, b, 2002a,b) und Köln (Schwarz et al. 2002c, 2003, 2004a,b) vorgelegt, auf die nachfolgend bei der Wiedergabe von Ergebnissen verwiesen wird.

3.2 Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes

Eine detaillierte Aufschlüsselung zur Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz nach den vorherrschenden Bauweisen ist u.a. Schwarz et al. (2003) zu entnehmen. Die Vulnerabilität (Verletzbarkeit) der verschiedenen Bauweisen und Bauwerkstypen wird am Maßstab der *European Macroseismic Scale* EMS-98 (Grünthal et al., 1998) anhand der Bauwerkstypen bzw. Bauweisen, des Alters und Erhaltungszustandes sowie der dynamischen Charakteristik bewertet. Bauwerksperioden werden auf der Basis der Geschosszahl/Gebäudehöhe bauweisenabhängig abgeschätzt und in Einzelfällen messtechnisch verifiziert.

Die Einordnung der Bauweisen in Verletzbarkeitsklassen führt zur regionalen Verteilung in den Testgebieten gemäß **Bild 1a** bzw. **1b**; die Aufschlüsselung der prozentualen Beiträge an der gesamten Gebäudesubstanz geben die **Bilder 2a** bzw. **2b**. Folgende Feststellungen sind zu treffen:

- Ein Hauptteil des Bauwerksbestandes in Köln wurde in den letzten 50 Jahren errichtet; es dominieren demzufolge Bauwerke und Bauweisen geringerer Verletzbarkeit.

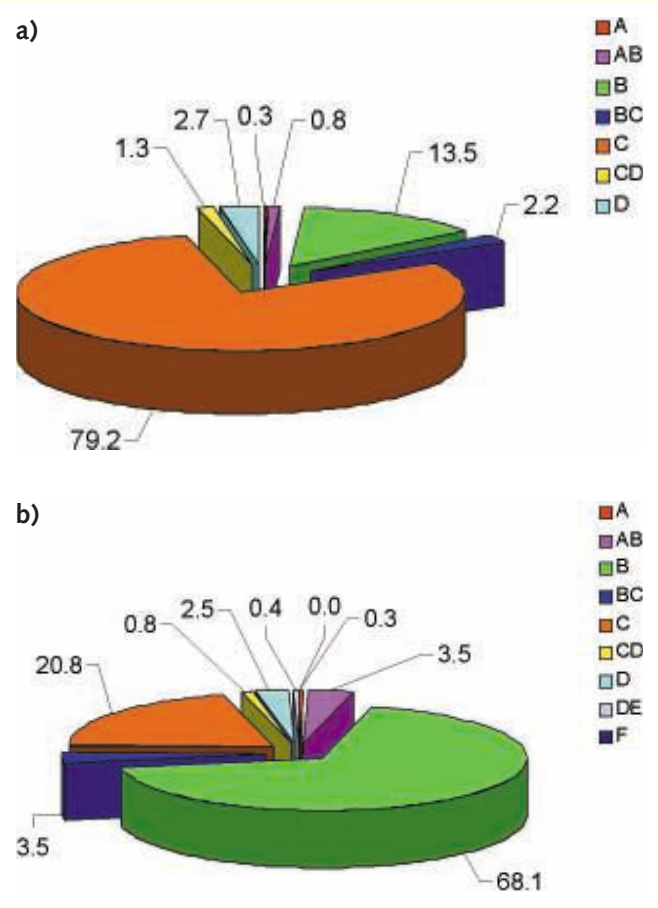


Bild 2. Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz in den Testgebieten nach Bauwerkstyp (*building type*) und Verletzbarkeitsklasse (*vulnerability class*) gemäß EMS-98.
a) Köln-Testgebiet b) Schmölln

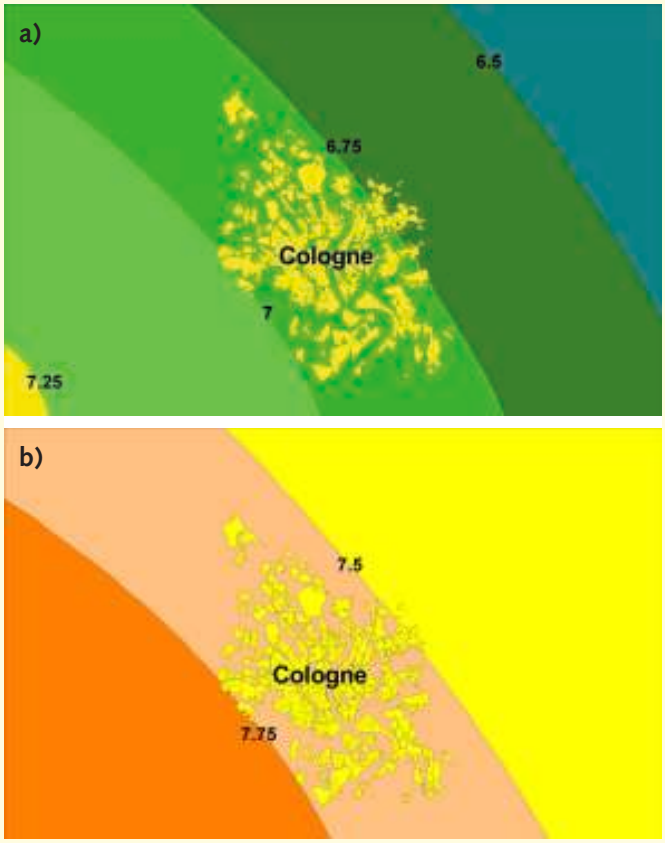


Bild 3. Ergebnisse probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen (unter Berücksichtigung von Unsicherheiten) für das Gebiet Köln/Aachen nach Grünthal und Wahlström (2004): Intensitätskarten (50 % Fraktilen)
a) für Wiederkehrperiode von 475 Jahre
b) für Wiederkehrperiode von 2475 Jahren

Ca. 80 % der Bauwerke sind der Verletzbarkeitsklasse C und weniger als 15 % der Verletzbarkeitsklasse B zuzuordnen (**Bild 2a**).

– Im Bauwerksbestand des Untersuchungsgebietes Schmölln (Ostthüringen) stellen wie in vielen anderen Kleinstadtregionen die traditionellen Mauerwerksbauten mit Holzbalkendecken die vorherrschende Bauweise dar. Diese Bauwerke besitzen erfahrungsgemäß eine erhöhte Verletzbarkeit und sind u.a. aufgrund ihres Baualters als weniger erdbebenresistent einzuschätzen. Etwa 70 % der Bauwerke sind der Verletzbarkeitsklasse B und nur 21 % der Klasse C zuzuordnen (**Bild 2b**).

Es kann somit geschlussfolgert werden, dass der Bauwerksbestand im Testgebiet Schmölln gegenüber dem Untersuchungsgebiet Köln eine erhöhte Verletzbarkeit besitzt. Bei gleicher Intensität wäre somit von einer höheren Schadenserwartung auszugehen.

3.3 Erdbebenszenarien und Umsetzung in ingenieurseismologische Kenngrößen

Unter Erdbebenszenarien werden hier seismische „Initialereignisse“ verstanden, für die die standortspezifische Bodenbewegung und das Verhalten der Bausubstanz (in Form von Schadensgraden) in ihrer flächenmäßigen Verteilung ermittelt werden.

Die **probabilistische Beschreibung der Erdbebenszenarien** erfolgt über Eintretensraten der ingenieurseismologischen Kenngrößen (Intensität, Magnitude, Bodenbewegungs- oder auch Spektralbewegungsgrößen) bzw. über Gefährdungskarten bestimmter Wiederkehrperiode.

Ergebnisse probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen liegen für das Gebiet Köln/Aachen durch ein DFNK-Teilprojekt vor (Grünthal und Wahlström, 2004). Diese Ergebnisse werden übernommen.

Aus dem normtypischen Niveau einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren folgen die Eintretensrate von P = 0.0021/a bzw. eine mittlere Wiederkehrperiode T_R von 475 Jahren. Neben diesem Szenarium werden weitere, u.a. für mittlere Wiederkehrperioden von 1000, 2475, 10000 und 50000 Jahren durchgespielt. Für das Katastrophenmanagement und die potentiellen Nutzer wären die Szenarien für 2475 und 10000 Jahre als extreme Ereignisse (in optimistischer bzw. pessimistischer Abschätzung) zu bewerten, die eine geringe Wahrscheinlichkeit besitzen, am Standort aber nicht ausgeschlossen werden können.

Bild 3a und **3b** zeigen die in 0.25-Graden abgestuften Intensitätskarten für mittlere Wiederkehrperioden von 475 bzw. 2475 Jahren nach den Angaben von Grünthal und Wahlström (2004). Wie Bild 3 verdeutlicht, sind damit für 370 Stadtviertel Kölns nahezu einheitliche Intensitäten verbunden.

Die **deterministische Beschreibung der Erdbebenszenarien** erfolgt für konkrete Erdbebenherde. Das Initialereignis ist demzufolge eine Punktquelle; die Ausbreitung der Bodenbewegung unter Berücksichtigung der regionalen Abnahmecharakteristik kann verfolgt werden. In Verbindung mit der Magnitude der Ereignisse können für die jeweilige

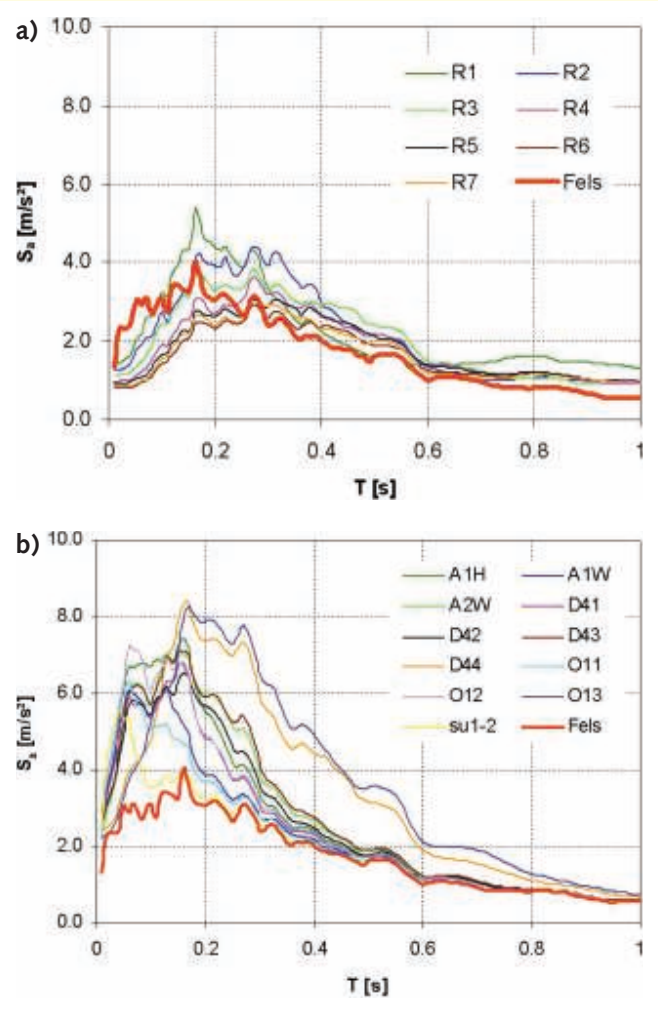


Bild 4. Ergebnisse von Standortanalysen an den für das jeweilige Testgebiet (flächendeckenden) repräsentativen Modellprofilen
a) Köln-Testgebiet b) Schmölln

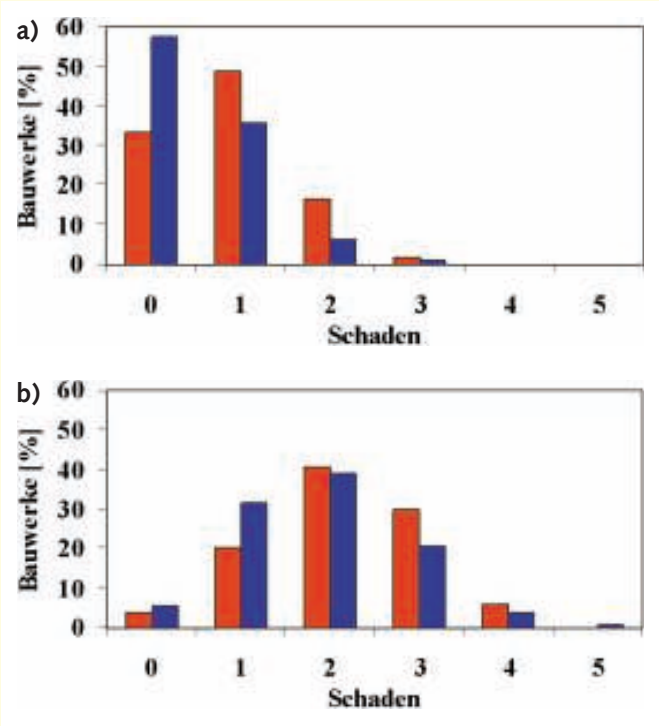


Bild 5. Schadenserwartung in den beiden Untersuchungsgebieten für unterschiedliche Bebenszenarien (Balken links/ rot: Schmölln; Balken rechts/blau: Köln); aus: Schwarz et al. (2004a).
a) Intensität I (EMS) = 6.5 b) Intensität I (EMS) = 8.0

Herdentfernung Boden- oder Spektralbewegungsgrößen bestimmt werden, die auch für Standortanalysen verwendet werden können.

– Die deterministischen Ereignisszenarien für Schmölln konzentrieren sich ausschließlich auf herdnahe Ereignisse, was durch den Herd des Mitteldeutschen Bebens von 1872 begründet erscheint (vgl. Schwarz et al., 2001a, bzw. Grünthal und Schwarz, 2001).
– Die Schadensszenarien für die Stadt Köln werden unter Berücksichtigung der historischen Bebentätigkeit bzw. der vorhandenen Störungen und Verwerfungslinien (Erft-Sprung) zunächst für unterschiedliche (z.T. auch hypothetische) Epizentren (E_i) aufbereitet, die bereits einen Eindruck von der Streubreite der Ergebnisse vermitteln (Schwarz et al., 2004a, b).

3.4 Standortspezifische seismische Einwirkungen

Die Qualität der Aussagen wird durch die eingehende Würdigung des lokalen Verstärkungspotentials infolge durchgeführter Mikrozonierungsarbeiten, die Aufbereitung eines räumlichen Tiefenprofils und die rastermäßige Bereitstellung der mit dem Szenarium konsistenten Bebenkenngrößen gewährleistet (Schwarz et al., 2002c). Die Aufbereitung standortspezifischer seismischer Einwirkungen erfolgt im mesoskaligen Maßstab. Folgende Aussagen können abgeleitet werden:

– Der Großstadtraum und das Testgebiet in Köln zeichnen sich in Topografie und Untergrund im Vergleich zu der Region Schmölln (Ostthüringen) durch eine relativ homogene Struktur bzw. allmähliche Übergänge der Untergrundsituation aus. Die mächtigen Sedimentschichten in Köln wirken in dem für allgemeine Hochbauten charakteristischen Periodenbereich eher dämpfend (Schwarz et al. 2002c), vgl. **Bild 4a.**
– Der Untergrund in Schmölln ist durch anstehenden Fels, der durch Sedimentschichten geringer Mächtigkeit (zwischen 10 und 15 m) überlagert ist, gekennzeichnet. Derartige Tiefenprofile lassen in dem für allgemeine Hochbauten charakteristischen Periodenbereich signifikante Verstärkungseffekte erwarten, die sich auch anhand der ermittelten Beschleunigungsspektren in **Bild 4b** nachweisen lassen (Schwarz et al., 2001b). Auffällig sind die Amplitudenunterschiede bei gleicher Basisanregung im Fels. Wird das Spektrum für den Fels (dicke, durchgehende Linie in Bild 4) als Referenzspektrum herangezogen, lässt sich feststellen, dass gerade in Regionen mit topografischen und untergrundbezogenen Besonderheiten wie im Stadtgebiet von Schmölln schadensbegünstigende Verstärkungen der seismischen Bodenbewegung auftreten können.

Zweifellos sind seismische Risikoanalysen mit höheren Anforderungen und Aufwendungen verbunden, wenn die lokalen Bedingungen starken Variationen unterlegen sind. Insofern stellt sich die Situation in Schmölln als Allgemeinfall, die in Köln als Sonderfall dar.

Um den Kontext zwischen Bodenbewegung und Bauwerksanregung zu präzisieren, werden die ermittelten standort-

spezifischen Spektren in Periodenbereiche eingeteilt, wobei sich an den charakteristischen Grundperioden ausgewählter Bauweisen bzw. Bauwerksgruppen orientiert wird; z.B. gibt die mittlere Spektralbeschleunigung im Periodenbereich T = 0.1 bis 0.2 s die typische Einwirkung für Wohnbauten in niedriger Bebauung (insbesondere zweigeschossige Mauerwerksbauten). Entsprechende Karten der Spektralbeschleunigung werden für beide Testgebiete aufbereitet (Schwarz et al., 2001b, Schwarz et al. 2002c).

4 Quantifizierung der Schadenspotentiale

4.1 Bearbeitungsstufen

Die Untersuchungen erfolgen nach unterschiedlichen Bearbeitungsstufen:

Stufe I: Standortunabhängige Vorgehensweise

Bei den deterministischen Erdbebenszenarien wird zunächst nur die Intensitätsabnahme mit zunehmender Entfernung vom Herd berücksichtigt.

Stufe II: Standortabhängige Vorgehensweise

Der Einfluss der standortspezifischen Unterschiede in der Bodenbewegung wird berücksichtigt. Zur Gewährleistung einer konsistenten Bearbeitung werden die lokalen Übertragungseigenschaften für repräsentative Standortgruppen berechnet. Über die Standortperiode oder charakteristische Merkmal des Schichtaufbaus werden Profilgruppen definiert bzw. zusammengefasst. Die Bodenbewegung wird dann über die verschiedenen Modellprofile rasterförmig festgelegt. (Dieses Raster konnte in Köln aufgrund der homogenen Untergrundsituation wesentlich größer festgelegt werden als in der Kleinstadt Schmölln). Aus den ermittelten Spektren werden in den charakteristischen Periodenbereichen allgemeiner Geschossbauten in Abhängigkeit von Bauwerkshöhe und Bauweise die seismischen Einwirkungen differenziert und schließlich die lokale Intensität ermittelt. Diese Intensitätsinkremente führen letztlich zu den Unterschieden in der Schadensverteilung gegenüber Bearbeitungsstufe I (Schwarz et al., 2004b).

Stufe III: Vorgehensweise unter Betrachtung der dynamischen Bauwerkseigenschaften

Während bei den Bearbeitungsstufen I und II die verschiedenartigen Bauweisen über die Verletzbarkeitsklassen in die Schadensanalysen eingehen, berücksichtigt Stufe (*Level*) III zusätzlich die dynamischen Bauwerkseigenschaften. Die Zusammensetzung der Gebäude nach ihrer Höhe bzw. Geschosszahl führt zu einer weiteren Modifikation der Schadenserwartung innerhalb der einzelnen Verletzbarkeitsklassen. Wobei erneut eine Intensitätskorrektur in Form von "Delta-Intensitäten" vorgenommen wird (vgl. Raschke, 2003). Ergebnisse der Bearbeitungsstufe III wären zugrunde zu legen, wenn Gebiete erhöhter Schadenserwartung oder besonders exponierte („kritische") Bauwerke zu identifizieren wären.

Wie die Ergebnisse in **Bild 7** zeigen, unterscheidet sich regionale Schadensverteilung infolge der drei Bearbeitungsstufen. Dabei ist hervorzuheben, dass gerade die Bearbeitungsstufen II und III mit erhöhten Aufwendungen (für Datenerhebungen, Standortuntersuchungen u.ä.) verbunden sind.

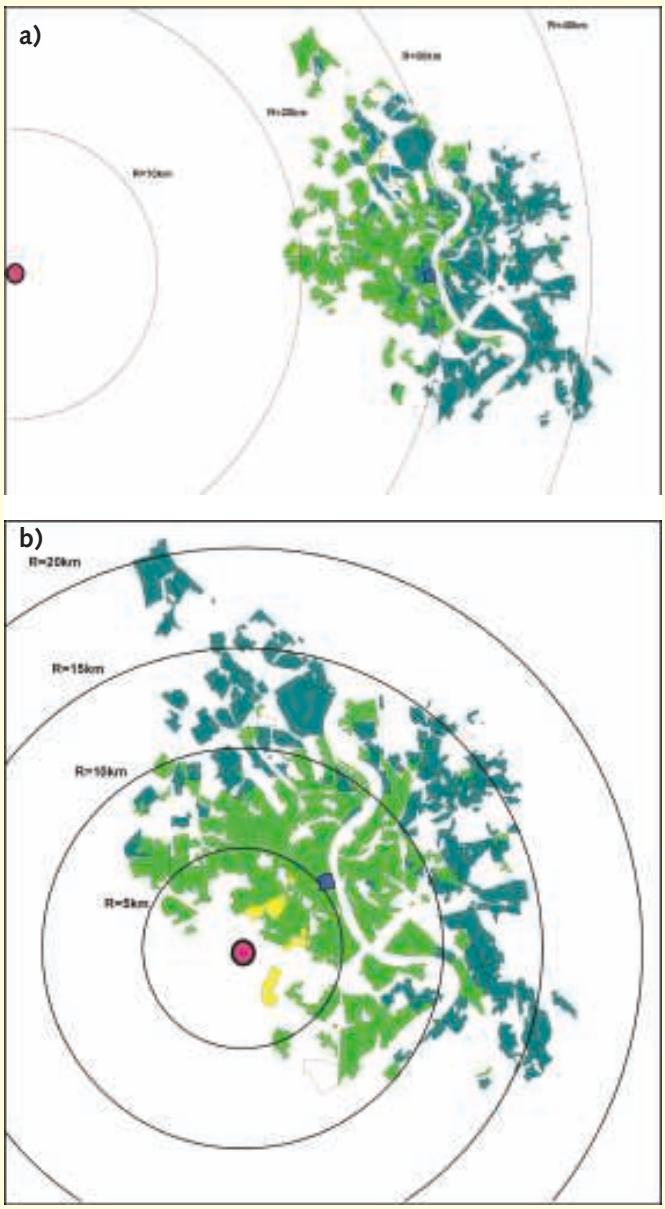


Bild 6. Ergebnisse für den Großstadtraum Köln: Mittlere Schadengrade D_m (Durchschnittswerte in den Stadtvierteln) bei Wiederholung historischer Erdbeben; aus: Schwarz et al. (2004a).
a) Szenarium E4: I = 8.0 (26.08.1878, Tollhausen)
b) Szenarium E5: I = 7.0 (24.10.1841, Köln)

4.2 Schädigungsparameter und Ergebnisdarstellung

Schadenserwartungen in Form der konkreten Schadensgrade D_i (nach EMS-98) können die im Detail aufgenommenen Gebäude vorgelegt werden. Entsprechende Ergebnisse liegen für Schmölln für das gesamte Stadtgebiet (ca. 3000 Gebäude) und in Köln für das aufgenommene Testgebiet (ca. 800 Objekte) vor (mikroskaliger Maßstab). Für die Darstellung der Ergebnisse wird jedoch ein mesoskaliger Maßstab gewählt und auf Elemente des Flächennutzungsplanes (Schmölln) oder auf Stadtviertel (Köln) ausgerichtet. Das heißt, die Resultate werden über die Angabe eines mittleren Schadensgrades (D_m) – bezogen auf die Bauwerke im jeweiligen Flächenelement – von Detailaussagen weggeführt und somit „anonymisiert" (Schwarz et al., 2001b). Der mittlere Schadensgrad D_m (*mean damage grade*) wird aus den prozentualen Anteilen der einzelnen Schadensgrade D_i bestimmt.

Zur Verdeutlichung zeigt Bild 5 die Schadenserwartung in den beiden Untersuchungsgebieten für unterschiedliche Bebenszenarien, wobei in den Simulationen für die Intensitäten I(EMS) = 6.5 und I(EMS) = 8.0 die lokalen Untergrundbedingungen differenziert eingehen (Stufe II). Aus der so prognostizierten Schadensverteilung lässt sich der mittlere Schadensgrad innerhalb der Darstellungsebenen des jeweiligen Testgebietes bestimmen.

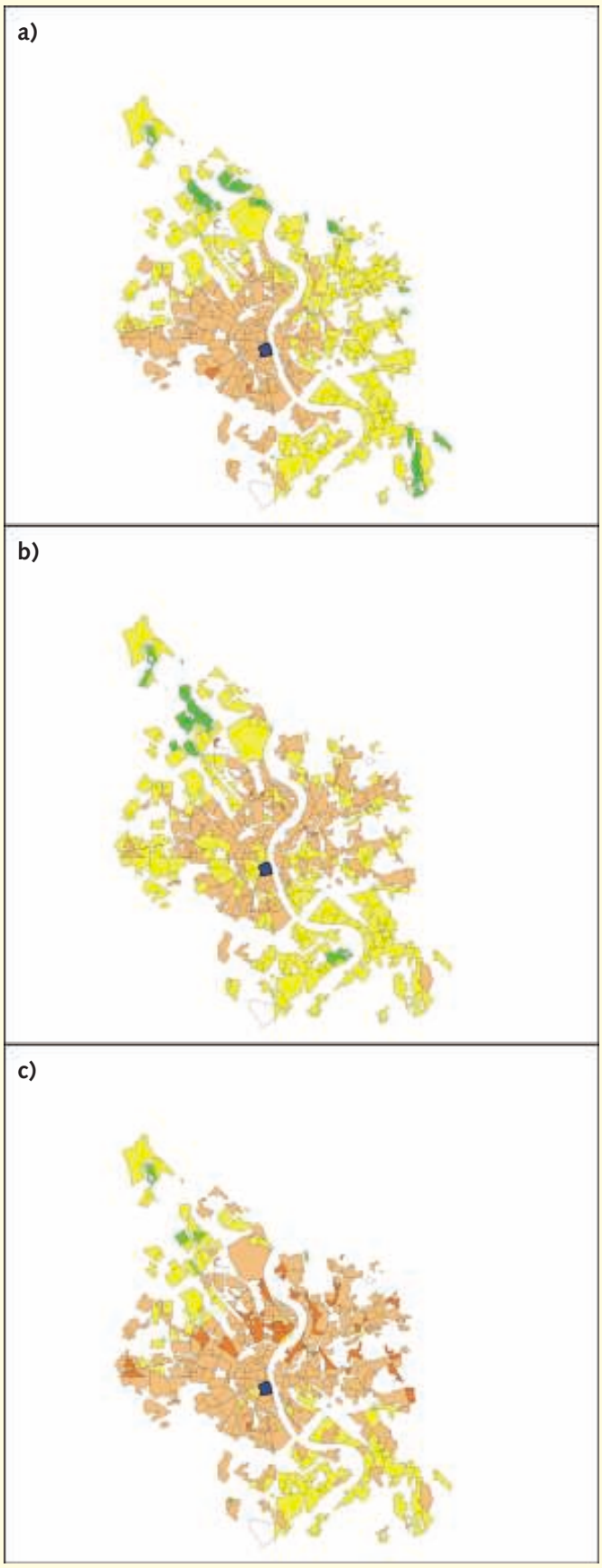
Liegt ein Wertekataster für das Untersuchungsgebiet vor, können über Zusammenhänge zwischen dem mittleren Schadensgrad D_m und dem mittleren Schadensverhältnis (*mean damage ratio* MDR) Verluste quantifiziert werden. Dabei wird unterstellt, dass das Schadensverhältnis MDR mit dem prozentualen Verlust (bezogen auf den Gesamtwert des Gebäudes) gleich gesetzt werden kann. Diesbezügliche Zusammenhänge können in erster Näherung als bauweisenunabhängig betrachtet werden, da versicherungstechnisch gesehen, über den Schadensgrad eine qualitative Vergleichbarkeit der Schädigung gewährleistet scheint. Aus Ingenieursicht ist hier eine weitere Differenzierung erforderlich, auf die jedoch in den beiden Testgebieten (nicht zuletzt aufgrund der Dominanz vorherrschenden Mauerwerksbauten) verzichtet wurde (vgl. auch Schwarz et al., 2004c).

In dem hier vorgestellten DFNK-Teilprojekt waren die Szenarien bis zum Schaden zu verfolgen. Einflüsse des methodischen Vorgehens auf den ökonomischen Verlust können Schwarz et al. (2004b) bzw. in Fortführung dieser Untersuchungen Schwarz et al. (2004c) entnommen werden.

4.3 Schadensverteilung bei Wiederholung historischer Erdbeben

Nachfolgend werden Ergebnisse für den Großstadtraum Köln vorgestellt. Arbeiten für Schmölln sind u.a. in Schwarz et al. (2001a, 2001b) umfänglich dokumentiert worden.

Stellvertretend werden Schadenserwartungen für Szenarioereignisse wiedergegeben, die sich rein **deterministisch** aus der Wiederholung der stärksten, historisch dokumentierten Ereignisse in der Standortumgebung von Köln ableiten lassen. Epizentrum E4 folgt aus der Herdlage des Erdbebens vom 26.08.1878 bei Tollhausen (I = 8.0); Epizentrum E5 bezieht sich auf ein Beben 24.10.1841 bei Köln, das die Intensität I = 7.0 erreicht haben soll. Gerade bei diesem Ereignis ist anzumerken, dass die Herdparameter im konkreten Fall aus aktuellen Bebenkatalogen unkritisch übernommen, im Falle des Mitteldeutschen Bebens von 1872 (maßgeblich für die Stadt Schmölln) einer Neubewertung unterzogen wurden (Grünthal und Schwarz, 2001). **Bild 6** veranschaulicht den (eher begrenzten) Schadensumfang, der bei einfacher



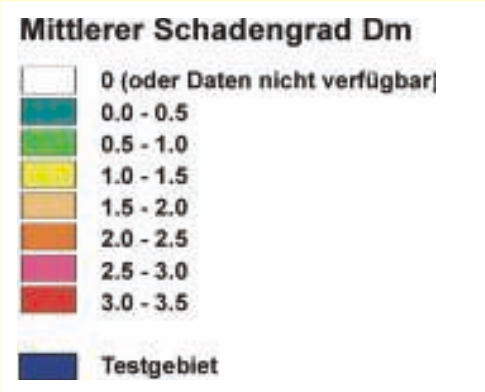


Bild 7. Ergebnisse für den Großstadtraum Köln: Mittlere Schadengrade D_m (Durchschnittswerte in den Stadtvierteln) für Intensität I(EMS) = 8.0 in Abhängigkeit von der gewählten Stufe (*Level*) der Bearbeitung
a) Level I
b) Level II
c) Level III

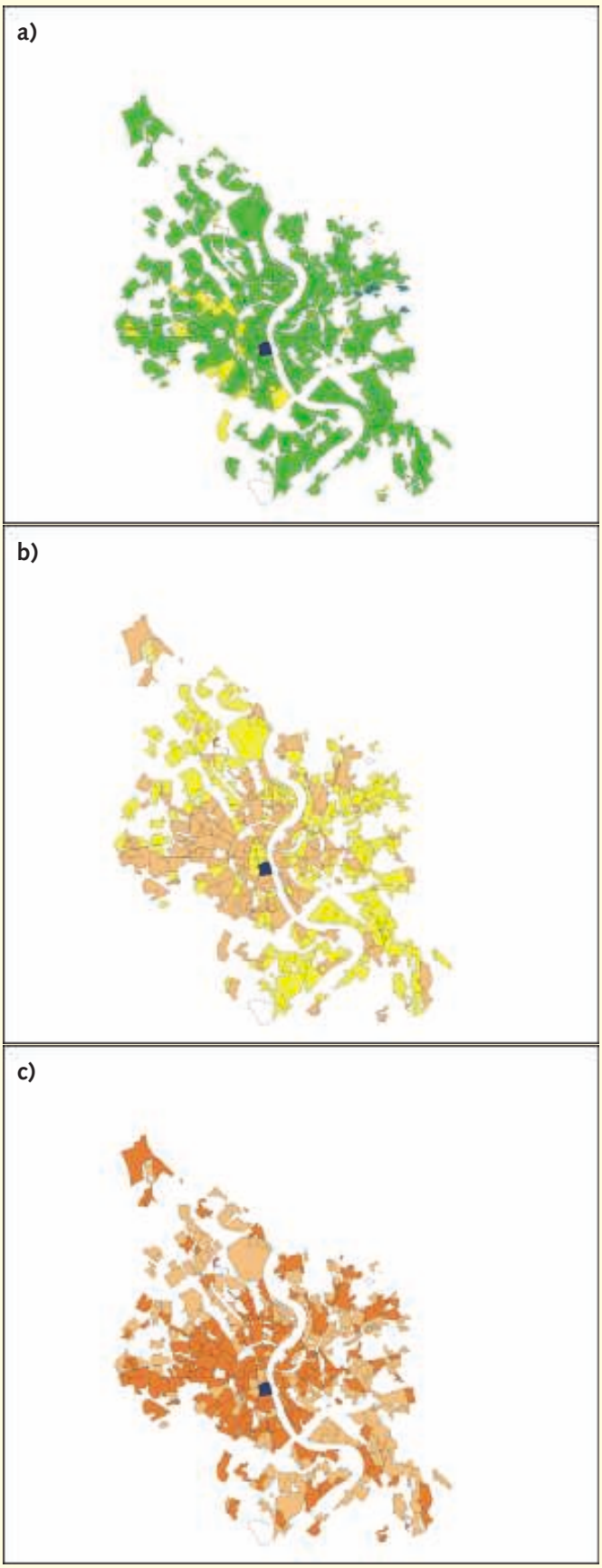


Bild 8. Verteilung der mittleren Schadensgrade D_m (Durchschnittswerte in den Stadtvierteln) infolge der probabilistisch bestimmten Intensitätskarten gemäß Bild 3 (50%-Fraktilen, Median) für unterschiedliche Wiederkehrperioden (in der Bearbeitungsstufe I).
a) 475 Jahre
b) 2475 Jahre
c) 10000 Jahre

Wiederholung der beiden genannten historischen Ereignisse in Köln zu erwarten wäre. Ergebnisse beziehen sich auf den mittleren Schadensgrad in den einzelnen Stadtvierteln.

4.4 Schadensverteilung in Abhängigkeit von den Bearbeitungsstufen

Im Rahmen der durchgespielten **deterministischen Szenarien** wurden die Intensitäten der Epizentren in Halbgraden der Intensität gesteigert und von I(EMS) = 6.5 bis I (EMS) = 9 ausgewertet. **Bild 7** zeigt für Epizentrum E5 Ergebnisse für die Intensität I(EMS) = 8.0 in Abhängigkeit von der Bearbeitungsstufe. Wie die drei Karten mit der flächenmäßigen Verteilung der mittleren Schadensgrade D_m verdeutlichen, führen die Bearbeitungsstufen zu Unterschieden in der regionalen Verteilung der zu erwartenden Schadensgrade. (Der Einfluss auf den mittleren Schadensgrad für das Gesamtgebiet von Köln wird durch **Bild 9** veranschaulicht.)

4.5 Schadensverteilung bei Szenarien vorgegebener Eintretenswahrscheinlichkeit

Wie bereits in Abschnitt 2.3 angemerkt, bilden die Ergebnisse der seismischen Gefährdungsanalysen für das Gebiet Köln/Aachen durch Grünthal und Wahlström (2004) die Grundlage für die probabilistisch begründeten Erdbebenszenarien. Wobei aus den vorliegenden Ergebnissen der Median (50%-Fraktile) der ermittelten Intensitäts-Eintrittsraten zugrunde gelegt wird.

In Schwarz et al. (2003) werden die Bebenszenarien in der Form kombiniert, dass die für die Koordinaten des Stadtzentrums von Köln (jeweils blau gekennzeichnetes Stadtviertel, das mit dem Testgebiet identisch ist) probabilistisch berechneten Intensitäten mit den Intensitäten infolge deterministischer Szenarien (Verfolgung der Intensitätsabnahme ausgehend von den historischen bzw. potentiellen Erdbebenherden E1 bis E5 außerhalb Kölns) übereinstimmen.

Es ist nahe liegend, dass diese Szenarien, die im methodischen Vorgehen den Gefährdungsbeitrag unterschiedlicher Herdregionen aufsummieren und sich rein flächenmäßig durch ausgeprägte Regionen nahezu gleicher Intensität auszeichnen, zu konservativen Ergebnissen führen.

Bild 8 zeigt die Verteilung der mittleren Schadensgrade infolge der probabilistisch bestimmten Intensitätskarten (50%-Fraktilen, Median) für mittlere Wiederkehrperioden von 475 und 2475 bzw. 10000 Jahren (in der Bearbeitungsstufe I).

Aus der Gesamtheit der mittleren Schadensgrade für die einzelnen Stadtviertel kann der mittlere Schadensgrad für Köln bestimmt werden. Die Risikokurve in **Bild 9** vermittelt einen Eindruck von den Eintretensraten bestimmter mittlerer Schadensgrade, die mit den hier untersuchten Szenarien vorgegebener Wiederkehrperioden korrespondieren.

Ergebnisse für Schmölln zeigen bei gleichen Eintretensraten etwa um ein halbes Schadensgrad erhöhte mittlere Schadensgrade, wobei auch auf **Bild 5** zu verweisen ist (Schwarz et al., 2004a). **Bild 9** gibt den Vergleich der so berechneten deterministischen und probabilistischen Schadenskurven. Unterstellt man die 16% bzw. 84 % Fraktilen ergibt sich ein Streubereich, der zunächst ausschließlich durch die Ergebnisse probabilistischer Gefährdungsanalysen unter Berücksichtigung von Unsicherheiten begründet wäre. (Dies mag die Auffassung der Autoren unterstreichen, dass Risikoanalysen weiterhin mit erheblichen Streubreiten und Unsicherheiten verbunden sind, jedoch in der

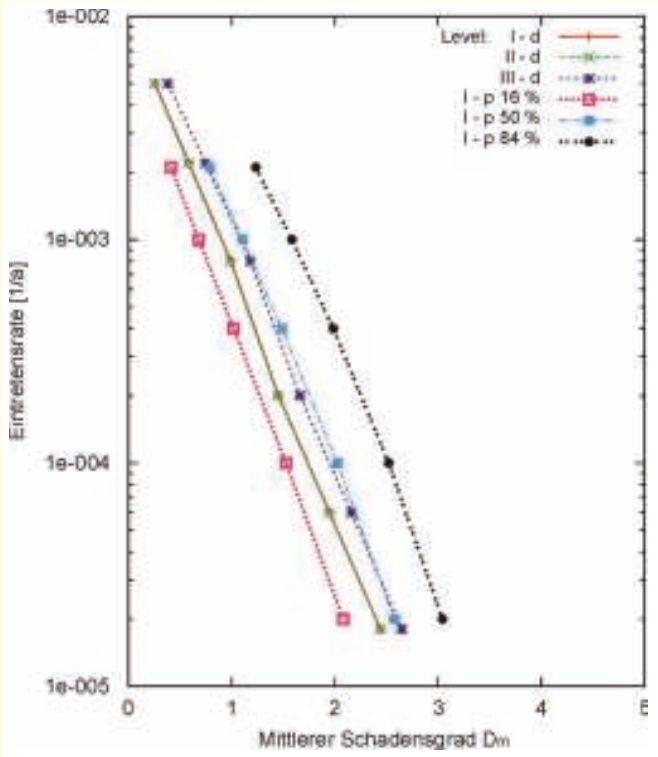


Bild 9. Vergleich der für deterministische (d) und probabilistische Szenarien (p) berechneten Schadenskurven. in Abhängigkeit von der Stufe der Bearbeitung (bezogen auf den aus der Gesamtheit der mittleren Schadensgrade für die einzelnen Stadtviertel bestimmten mittleren Schadensgrad des Gesamtgebietes Köln)

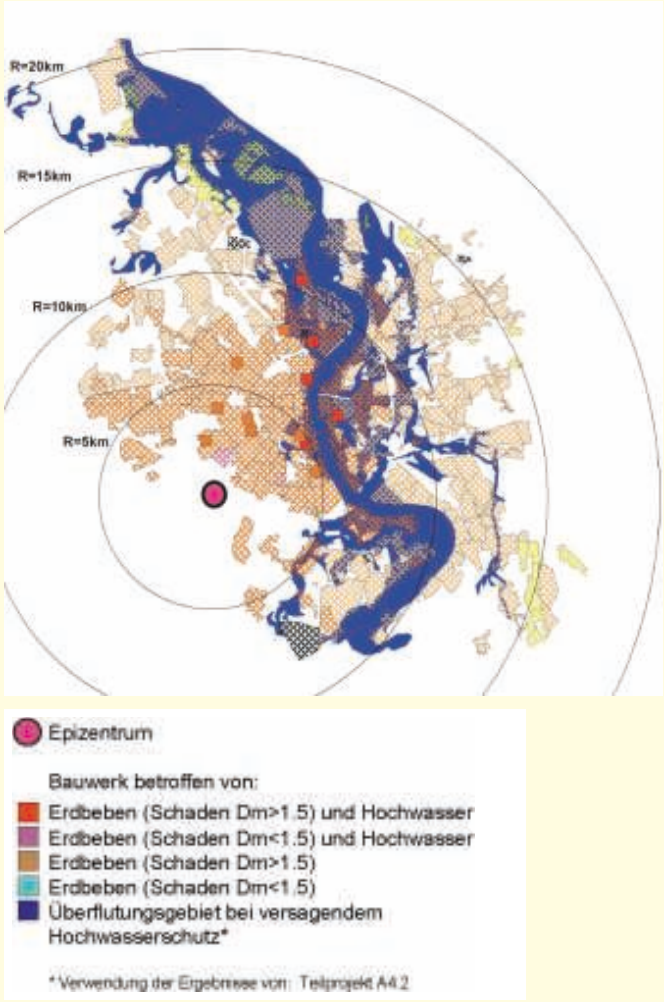


Bild 10. Einordnung von Krankenhäusern in die von extremen Erdbeben (E5 mit I (EMS) = 8.5) und extremen Hochwasser (HQ500) mit hoher Wahrscheinlichkeit betroffenen Gebiete Kölns.

Lage sind, wichtige Tendenzen und besonders betroffene („kritische“) Gebiete aufzudecken.)

5 Identifikation der im Katastrophenfall überlebenswichtigen Einzelobjekte

Als Nebenprodukt der Arbeiten ist die Identifikation der im Katastrophenfall überlebenswichtigen Einzelobjekte zu verstehen. Als solche sind zu betrachten: Krankenhäuser, Feuerwehrgebäude, Schulen sowie die Spezialbauwerke der „Lebenslinien“ (Wasser, Energie, Kommunikation, Verkehr u.ä.). Die Identifikation dieser Objekte erfolgt mittels der GIS-Datenebenen. Kriterien zur Begründung einer Hierarchie der besonders gefährdeten Objekte könnten aus den Schadensszenarien und dem Grad der jeweiligen Standortgefährdung herausgearbeitet werden. Die Untersuchungen gestatten erste Antworten auf die Fragestellungen: wo passiert etwas und wo liegen im Katastrophenfall die Schwerpunktregionen (Orte mit erhöhter Schadensdichte)?
Infolge der zeitlichen Beschränkung der Arbeiten konnten die positiven Aspekte der Synopse der Naturgefahren Wasser, Erdbeben, Sturm und die interessanten Perspektiven einer komplex ausgerichteten Gebiets-, Städte- und/oder Bauwerksplanung noch nicht praxiswirksam umgesetzt werden. Die Ansatzpunkte einer effizienten Strategie liegen in der grundsätzlich einheitlichen Bewertung der Verletzbarkeit der vorhandenen Bausubstanz gegenüber den Einwirkungen aus den Naturgefahren (vgl. Grünthal et al., 2004).
Bild 10 soll am Beispiel von Krankenhausgebäuden exemplarisch verdeutlichen, wie durch mehrere Naturgefahren bedrohte Objekte (im Sinne eines *multi-hazard approach*) identifiziert werden können, wobei im Beispiel Ergebnisse aus Teilprojekt A4.2 einbezogen werden. Die im Stadtgebiet Köln prognostizierten mittleren Schadensgrade infolge Erdbeben werden mit den Überflutungsflächen (HQ500) überlagert. Mit diesen beiden Darstellungs- bzw. Ergebnisebenen könnten qualitative Anforderungen an präventive bauliche Maßnahmen, die beiden Einwirkungsarten gerecht würden, begründet werden.

6 Fazit

Betrachtet man die Erdbebenzonenkarte der Bundesrepublik Deutschland (E DIN 4149, 2002) fällt auf, dass keine Großstadt in einer Haupterdbebenzone liegt, sondern die Großstädte eher durch die Wirkungen von Erdbeben in anderen Regionen betroffen werden. Grundsätzlich anders stellt sich die Situation für die Mehrzahl der deutschen Kleinstädte dar. In der Ingenieurverantwortung liegt es, darauf hinzuweisen, dass die öffentliche Aufmerksamkeit stärker auf den Bestand allgemeiner Hochbauten und auf die für die traditionellen Bauweisen kritischen Einwirkungsbedingungen auszurichten ist.
Mit der Angabe des mittleren Schadensgrades D_m infolge der unterschiedlichen Szenarien steht ein Parameter zur Verfügung, der in das mittlere Schadensverhältnis (*mean damage ratio* MDR) überführt werden kann und somit die Quantifizierung der Schadenspotentiale ermöglicht. Entsprechende

Verlustabschätzungen (*loss estimation*) werden u.a. durch Schwarz et al. (2004a, b) vorgelegt. Bei einem Maximalereignis wird der Schaden in Köln bei 25 bis 30 Mrd. EURO erwartetet. Die prognostizierte Schadenserwartung bei Wiederholung historischer Starkbeben in Höhe von 300 bis 500 Mio. EURO ist um ein Vielfaches kleiner.
Die entwickelten methodischen Grundlagen sind grundsätzlich auf andere Modell- bzw. Erdbebenregionen übertragbar. Die Autoren räumen dennoch ein, dass zur gesicherten Verallgemeinerungsfähigkeit der vorliegenden Arbeiten weiterführende Untersuchungen erforderlich sind, die sich u.a. auf die statistische Auswertung des Gebäudebestandes, die Zusammensetzung sowie die historische und regionale Entwicklung der Bauweisen konzentrieren sollten.

Literatur

- *Allmann, A., Rauch, E., Smolka, A.* (1998): New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe. Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. *Proceedings 11th European Conference on Earthquake Engineering*, Paris. Balkema Rotterdam.
- DIN 4149 (1981): Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- E DIN 4149 (2002): Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Vorgesehen als Ersatz für DIN 4149–1:1981–04 und DIN 4149–1/A1:1992–12. Gelbdruck Oktober 2002.
- *Grünthal, G. (ed.), Musson, R., Schwarz, J. and Stucchi, M.* (1998): European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Geodynamique et de Seismologie, Volume 15, Luxembourg 1998.
- *Grünthal, G., Schwarz, J.* (2001): Reinterpretation der Parameter des Mitteldeutschen Bebens von 1872 und Ableitung von Erdbebenszenarien für die Region Ostthüringen. Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, *Thesis* Heft 1 /2 2001*: Ingenieurseismologie und Erdbebeningenieurwesen,* 32 – 48.
- *Grünthal, G., Wahlström, R.* (2004): New generation of probabilistic seismic hazard assessment for the area Cologne/ Aachen considering the uncertainties of the input data. *Natural Hazards*. Special Issue: German Research Network Natural Disasters (in press)
- *Grünthal, G., Thieken, A.H., Schwarz, J., Smolka, A. and Merz, B.*: 2004, Comparative risk assessments for the City of Cologne – storms, floods, earthquakes, *Natural Hazards*. Special Issue: German Research Network Natural Disasters (in press)
- *Raschke, M.* (2003): Die Korrelation zwischen Erdbebenschaden und Erdbebenstärke und deren Anwendung in der Erdbebenrisikoanalyse, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Bauhaus-Universität Weimar, 2003.
- *Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H.* (2001a): Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmölln/ Ostthüringen (1): Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes. Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, *Thesis* Heft 1 /2 2001*: Ingenieurseismologie und Erdbebeningenieurwesen,* 180–199.
- *Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H.* (2001b): Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmölln/ Ostthüringen (2): Modellereignisse, lokale Verstärkungseffekte und Schadensszenarien. Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, *Thesis* Heft 1 /2 2001*: Ingenieurseismologie und Erdbebeningenieurwesen,* 200–219.
- *Schwarz J., Raschke, M. and Maiwald, H.* (2002a): Seismic Risk Studies for Central Germany on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., Paper Reference 295.
- *Schwarz, J., Raschke, M. und Maiwald, H.* (2002b): Seismische Risikokartierung auf der Grundlage der EMS-98 – Fallstudie Ostthüringen. Tagungsband zum 2. Forum Naturkatastrophen 25. bis 27.09.2001, Leipzig, S. 325–336.
- *Schwarz, J. Raschke, M., Gerstberger, A.* (2002c): Seismische Schadenspotentiale in deutschen Großstadträumen – Fallstudie Köln. In: Meskouris, K., Hinzen, K.-G. (Hrsg.) Schutz von Bauten gegen natürliche und technische Erschütterungen. DGEB-Publikation Nr. 11, 69–83.
- *Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H.* (2003): Schadenspotentiale in deutschen Erdbebengebieten – Ergebnisse von Fallstudien. Tagungsband zum 3. Forum Naturkatastrophen 06. bis 08.10.2002, Potsdam (Beitrag eingereicht).
- *Schwarz J., Maiwald, H., Raschke, M.* (2004a): Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale. Bericht zu Teilprojekt B31. In: Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen – Abschlussbericht (Hrsg. B. Merz, H. Apel), Reihe: Scientific Technical Reports (STR) Nr.: 04/01, GeoForschungsZentrum Potsdam.
- *Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H.* (2004b): Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. *Natural Hazards* Special Issue: German Research Network Natural Disasters (in press)
- *Schwarz J., Langhammer, T., Maiwald, H., Smolka, A.* (2004c): Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions – Damage and Loss Assessment for the City of Cologne. *Proceedings 13th WCEE* Vancouver, August 1–6, 2004, Paper No. 238.

Zwischenbilanz bei der Erdbebenvorsorge in der Schweiz

Unter dem Eindruck der Erdbebenkatastrophe in Südasien hat der Bundesrat am 12. Januar 2005 eine Zwischenbilanz gezogen bei der Erdbebenvorsorge des Bundes und das weitere Vorgehen bis ins Jahr 2008 festgelegt. So sollen die bisher eingeleiteten Maßnahmen für erdbebengerechtes Bauen weitergeführt werden. Der Bundesrat hat zur Kenntnis genommen, dass der Vorsteher des Eidgenössisches Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) die Erdbebenprävention in der Schweiz mit den Kantonen bespricht und geeignete Maßnahmen prüfen wird.

Während die Erdbebengefährdung im südasiatischen Raum stark bis sehr stark ist, gilt die seismische Gefahr in der Schweiz als mittel. Auf Grund der hohen Konzentration von Sachwerten, könnte ein Beben hierzulande aber immense Schäden verursachen. Weil auch bei den Bauten und Anlagen des Bundes große Lücken bei der Vorbeugung bestehen, hat der Bundesrat Ende 2000 ein erstes Maßnahmenprogramm zur Erdbebenvorsorge beim Bund beschlossen und dafür eine Koordinationsstelle geschaffen. Das auch heute noch gültige Hauptziel bestand darin, Menschen und Sachwerte mit präventiven Mitteln vor den zerstörerischen Auswirkungen von Erdbeben zu schützen.

Der Bund hat die Initiative ergriffen

Als Sofortmaßnahme wurden in den vergangenen vier Jahren 322 bestehende Bundesbauten und 400 Brücken in den besonders gefährdeten Gebieten inventarisiert und auf ihre Erdbebensicherheit überprüft. Bei 38 zusätzlich geprüften Sanierungsprojekten mussten in neun Fällen konkrete Schutzmaßnahmen veranlasst werden. Alle neuen, vom Bund finanzierten oder subventionierten Bauwerke müssen heute strikte die geltenden Erdbebennormen einhalten.
Konkrete Schritte wurden auch bei der Grundlagenarbeit eingeleitet. So hat die Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge beim Bundesamt für Wasser und Geologie mehrere praxisorientierte Umsetzungshilfen veröffentlicht für die Unterstützung von Bauherren, Ingenieuren und Architekten. Der Schweizerische Erdbebendienst der ETH Zürich erarbeitete eine Erdbebengefährdungskarte, die als Grundlage dient für die neuen, seit dem 1. Juli 2004 geltenden Baunormen 260 bis 267 des Schweizerischen Ingenieur- und Architektenvereins SIA. Die neuen Normen sollen dafür sorgen, dass die Erdbebensicherheit von Bauwerken bei deren Planung und Dimensionierung ausreichend berücksichtigt wird. Das Bundesamt für Bevölkerungsschutz publizierte zudem den « Expertenbericht Erdbeben und Kulturgüter » und ein « Einsatzkonzept für den Fall eines Erdbebens in der Schweiz ».
Siehe auch « Erdbebenvorsorge des Bundes 2001–2004 – Detailbericht » unter der Adresse http://www.bwg.admin.ch/themen/natur/d/pdf/edbbvb.pdf

Rechtsgrundlage unverändert

Keine Änderung gab es bei den Maßnahmen „Verbesserung der Rechtsgrundlagen“ und „Möglichkeiten der Finanzierung von Großschäden aus Erdbeben“. Nach dreijährigen Vorarbeiten lehnte die zuständige Nationalratskommission am 18. November 2003 die von ihr selbst ausgearbeitete parlamentarische Initiative für einen Verfassungsartikel über den Schutz vor Naturgefahren ab. Im Lichte der jüngsten Ereignisse in Südasien hat der Bundesrat auch darüber diskutiert, die Kompetenz zur Erdbebenvorsorge mit einem Verfassungsartikel dem Bund zu übertragen. Er kam aber zum Schluss, dass die bisherige Aufgabenverteilung vorläufig beibehalten werden soll. Heute ist der Bund bei der Erdbebenvorsorge nur für seine eigenen Bauten und Anlagen zuständig. Bei allen andern Bauwerken liegt es an den Kantonen und Gemeinden, die bestehenden Normen und Richtlinien umzusetzen. Bereits sind rund ein Dutzend Kantone aktiv im Bereich ihrer öffentlichen Gebäude.

Umsetzung und weitere Sensibilisierung nötig

Mit der Genehmigung des Berichts 2001–2004 hat der Bundesrat die weiteren Maßnahmen für den Zeitraum 2005–2008 beschlossen (Kasten). Im Vordergrund stehen hier die Einhaltung der Normen, die Weiterführung des Inventars sowie die Erdbebensicherung bestehender Bauwerke im Rahmen von Sanierungen.

Dr. Olivier Lateltin
Koordinationsstelle für Erdbebenvorsorge BWG, Biel www.bwg.admin.ch/themen/natur/d/index.htm

Erdbebenvorsorge des Bundes: Maßnahmen 2005 – 2008

1. Erstellen eines Instrumentariums zuhanden der Baufachorgane des Bundes für die Kontrolle der Erdbeben-Normenanwendung.
2. Fortsetzung des Inventars der Erdbebensicherheit bundeseigener Bauwerke und Ausdehnung der Inventarisierung auf die geringste Erdbebengefährdungszone.
3. Überprüfung der Erdbebensicherheit bestehender Bauwerke des Bundes im Rahmen von Sanierungen. Bei wesentlichen Mängeln sind, unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der Kosten, Schutzmaßnahmen durchzuführen.
4. Aufgrund des Inventars 2001 – 2004 sind bei bestehenden Bauwerken des Bundes innerhalb der nächsten 20 Jahre Schutzmaßnahmen zur Erdbebenertüchtigung durchzuführen.
5. Der Vorgehensplan des VBS betreffend Erdbebensicherung von Kulturgütern und Einsatzkonzept Erdbeben wird umgesetzt.
6. Das Einsatzkonzept für den Fall eines größeren Erdbebens ist auf Stufe Bund umzusetzen und die Koordination internationaler Hilfe im Inland zu regeln.
7. Ein Instrumentarium zur Ermittlung und Untersuchung der Erdbebensicherheit kritischer Infrastrukturen (Lifelines) im Einflussbereich des Bundes ist zu erstellen.
8. Die Wartung und der Betrieb des nationalen Erdbebenüberwachungsnetzes, die Organisation des 24-Stunden Pikettdienstes und die Warnung von Behörden ist fortzusetzen sowie die neue Generation der Erdbebengefährdungsabschätzung zu realisieren.