

**GEO FORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM**  
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

Gottfried Grünthal  
Christian Bosse

**Probabilistische Karte der  
Erdbebengefährdung der  
Bundesrepublik Deutschland -  
Erdbebenzonierungskarte für das  
Nationale Anwendungsdokument  
zum Eurocode 8**

Forschungsbericht

---

Scientific Technical Report STR96/10

## **Impressum**

GeoForschungsZentrum Potsdam  
Telegrafenberg A 17  
D-14473 Potsdam

Gedruckt in Potsdam  
Juni 1996

Gottfried Grünthal  
Christian Bosse

**Probabilistische Karte der  
Erdbebengefährdung der  
Bundesrepublik Deutschland -  
Erdbebenzonierungskarte für das  
Nationale Anwendungsdokument  
zum Eurocode 8**

Forschungsbericht

Scientific Technical Report STR96/10

# **Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland - Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8**

**Forschungsbericht  
im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin**

**von  
G. Grünthal und Ch. Bosse  
GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM**

## **1. Veranlassung**

Während der Sitzung des Normenausschusses Bauwesen (NABau) - des Koordinierenden Spiegelausschusses (KoSpA) „Erdbeben; Sonderfragen“ am 1. Februar 1994 in Stuttgart wurde vom Ausschuß beschlossen, für den Eurocode 8 - Teile 1-1, 1-2 und 1-3 ein Nationales Anwendungsdokument (NAD) zu erstellen (NABau 00.06.00 Nr. 14-94). Bestandteil dieses NAD ist eine Erdbebenzonierungskarte gemäß den Vorgaben im Eurocode 8, Teil 1-1, 4. Seismic Action, 4.1 Seismic Zones, wo folgender, hier sinngemäß zusammengefaßter Rahmen vorgegeben wird:

- (1) Nationale Territorien sind auf nationaler Ebene in seismische Zonen einzuteilen, wobei jede Zone einen bestimmten Grad der seismischen Gefährdung repräsentiert.
- (2) Für die meisten Anwendungen ist die Gefährdung durch einen Parameter zu beschreiben; d.h. durch den Wert  $a_g$  der effektiven Spitzenbodenbeschleunigung auf Fels oder festem Grund, fortan als „Design-Bodenbeschleunigung“ bezeichnet. Zusätzliche Parameter, gefordert für die spezifischen Bautypen, werden in den relevanten Teilen des Eurocode 8 genannt.
- (3) Die Design-Bodenbeschleunigung, für jede seismische Zone von den nationalen Gremien ausgewählt, entspricht einer mittleren Referenzwiederkehrperiode von  $[475]^1$  Jahren.

Diese Forschungsarbeit wurde im Auftrag und unter finanzieller Beteiligung des Deutschen Instituts für Bautechnik, Berlin, erstellt.

---

<sup>1)</sup> Werte in eckigen Klammern - sogenannte boxed values - besitzen im EUROCODE 8 empfehlenden Charakter

## 2. Abstimmung der Aufgabenstellung

Zur Umsetzung der o.g. Vorgaben des Eurocode 8 Teil 1-1 wurde vereinbart,

- 475 Jahre Wiederkehrperiode zu verwenden (10% Auftretens- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit in 50 Jahren Standzeit),
- die Karte für die makroseismische Intensität als Parameter auszulegen und die Berechnung für einen Gitterpunktabstand von ca. 10x10 km vorzunehmen,
- die Entscheidung über die Auswahl von Erdbebenzonen bei Vorliegen des Entwurfs der probabilistischen seismischen Gefährdungskarte zu fällen.

Die Zuordnung von effektiven oder Design-Bodenbeschleunigungswerten  $a_g$  zu den Intensitätsintervallen der Erdbebenzonenkarte ist nicht mehr Bestandteil dieser Forschungsarbeit. Ein entsprechender Vorschlag erfolgte seitens des Arbeitskreis (AK) „NAD“. (Bericht über die 1. Sitzung des AK „NAD“ zu „ENV<sup>1</sup> 1998-1-1, 1-2 und 1-3“ des NABau-KoSpA 00.06.00 „Erdbeben; Sonderfragen“ am 20.06.94; NABau 00.06.00 Nr. 31-94). Darüber hinaus sind die Bestrebungen zu erwähnen, die Erdbebenzonierungskarten der NAD der CEN<sup>2</sup>-Mitgliedsländer im mitteleuropäischen Raum in harmonisierter Form zu erstellen. Hierzu erfolgten Kontakte mit den entsprechenden nationalen Bearbeitern der benachbarten CEN-Mitgliedsländer. Eine Basis hierfür bildeten die Arbeiten zur Erstellung harmonisierter seismischer Gefährdungskarten im Rahmen des Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP), von dessen Regionalzentrum 3, ebenfalls am GeoForschungsZentrum Potsdam, die Leitung und Koordinierung diesbezüglicher Forschungsarbeiten für Mittel-, Nordwest- und Nord-Europa ausgeht.

## 3. Bisher vorliegende seismische Zonierungskarten für die Bundesrepublik Deutschland

Die Erdbebenzonierungskarte der bisher für die Bundesrepublik Deutschland gültigen DIN 4149 basiert auf dem Konzept maximal in der Historie beobachteter Intensitäten, welches aus den 30er Jahren stammt und nicht mehr dem Stand der Wissenschaft entspricht. Karten diesen Typs lassen sich keinem Wahrscheinlichkeitsniveau zuordnen und enthalten einmalige Intensitätsspitzen (z.B. für Alfhausen (Niedersachsen) anhand des gleichnamigen Bebens

---

<sup>1</sup>) Europäische Norm

<sup>2</sup>) Comité Européen de Normalisation

vom 3. September 1770 oder Torgau (Sachsen), wo angeblich am 17. August 1553 Gebäudeschäden verursacht worden sein sollen), welche im Hinblick auf zu erwartende Beben keine besondere Signifikanz besitzen. Künftige Beben werden für den Fall, daß solch ein singulärer Bebenherd wieder aktiv werden sollte, vielmehr in der Umgebung von lokal sehr eng begrenzten Gebieten erhöhter maximaler beobachteter Intensitäten zu erwarten sein. In gewisser Weise besitzt die Karte der DIN 4149 damit sogar mißweisende Aspekte und wird der mit einer Erdbebenzonierungskarte verfolgten Zielstellung, künftig zu erwartende Bebenauswirkungen abzudecken, nur bedingt gerecht.

Da die Karte der DIN 4149 und die NAD-Erdbebenzonierungskarte auf völlig unterschiedlichen Konzepten der Widerspiegelung der Erdbebengefährdung beruhen, lassen sich diese nicht direkt vergleichen. Während die Karte der DIN 4149 im wesentlichen die Intensitätsverteilungen der Beben der letzten 150-200 Jahre repräsentiert, werden mit der probabilistischen Karte zum NAD all die Gebiete mit Erdbebenzonen abgedeckt, in denen in der Zukunft mit der o. g. Auftretens- oder Überschreitenswahrscheinlichkeit die entsprechenden Intensitäten zu erwarten sind.

Mit der im EUROCODE 8 vorgeschlagenen probabilistischen Karte wird ein qualitativ grundlegend anderes, modernes Konzept verfolgt, mit dem an den Stand der Wissenschaft angeknüpft werden kann. Die mit der Erarbeitung der nun vorliegenden Erdbebengefährdungskarte verbundene kritische Prüfung und Überarbeitung methodischer Aspekte wie auch zumindest eines Teils der Eingangsdaten läßt erwarten, daß sich die neue Karte für die nächsten Jahre als bestandsfähig erweisen wird. Diese Bestandsfähigkeit ist in starkem Maße davon abhängig, inwieweit die bisherigen Interpretationen von historischen Erdbeben in den verwandten Bebenkatalogen einer kritischen Analyse standhalten (vgl. auch Abschnitt 4.2).

Probabilistische Karten für eine mittlere Wiederholungsperiode von 475 Jahren liegen bisher für die Bundesrepublik Deutschland nicht vor. Für Teile der Bundesrepublik Deutschland wurden probabilistische Erdbebengefährdungskarten mit der makroseismischen Intensität als Parameter von Ahorner und Rosenhauer (1986) für mittlere Wiederholungsperioden von 1.000 und 10.000 Jahren vorgelegt bzw. für die östlichen Teile von Grünthal (1989, 1991a, b) für mittlere Wiederholungsperioden von 308 und 615 Jahren (diesen Wiederholungsperioden entsprechen Auftretens- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeiten von 10% in 50 bzw. in 100 Jahren).



## 4. Methodik und Daten

### 4.1 Methodik nach Cornell

Die Grundlage der hier verwandten Methodik zur seismischen Zonierung bildet das weltweit vielfach bewährte Konzept nach Cornell (1968), worauf die inzwischen klassischen und, falls korrekt angewandt, in ihren Rechenergebnissen äquivalenten Computerroutinen nach McGuire (1976) oder Bender und Perkins (1987) beruhen.

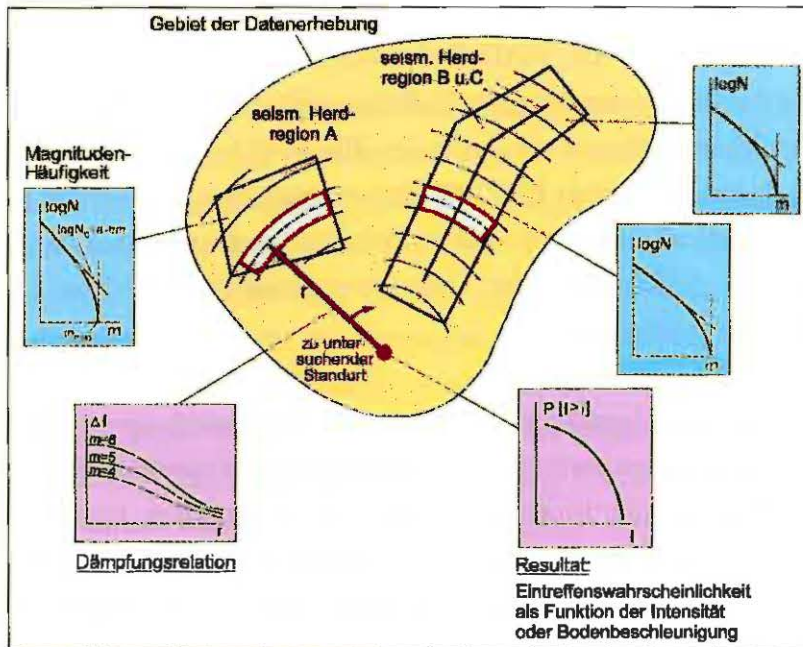


Abb. 1. Schematische Darstellung der Cornell - McGuire Methode zur Berechnung der seismischen Gefährdung.

Ortes zu bestimmen, wird das diesen Ort beeinflussende Gebiet in seismische Quellregionen aufgeteilt. Die Festlegung dieser Regionen erfolgt auf der Grundlage der seismotektonischen Gegebenheiten sowie der historischen und rezenten Bebenaktivität. Jede einzelne dieser Quellen bezeichnet im weiteren Vorgehen ein Gebiet, in dem die Seismizität als homogen angesehen wird. In die Gefährdungsberechnung gehen die Quellregionen in Form ihrer Geometrie und Lage sowie ihrer Magnituden - (bzw. Epizentralintensitäts -) Häufigkeits - Beziehung ein. McGuire (1976) verwendet für letztere folgende Relation:

Probleme bei der Berechnung von seismischen Gefährdungskarten können dagegen im Prozeß der Datenvorverarbeitung auftreten. Wie Beispiele belegen, erwiesen sich solche Probleme in der Vergangenheit als Ursache von Fehlleistungen.

In Abb. 1 ist die zugrundegelegte Methode skizziert: Um die Gefährdung eines

$$\frac{dN_j(m)}{dm} = v_j \cdot \frac{dF_{M,j}(m)}{dm} = v_j \cdot \begin{cases} 0 & \forall m \in (-\infty, m_{\min}) \\ \frac{\exp(-\beta_j m)}{A_j} & \forall m \in [m_{\min}, m_{\max}) \\ 0 & \forall m \in [m_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (1)$$

$$A_j = \frac{\exp(-\beta_j m_{\min}) - \exp(-\beta_j m_{\max})}{\beta_j}$$

( $N_j$ : jährliche Häufigkeit der Ereignisse in der  $j$ -ten Quelle;  $v_j$ : jährliche Häufigkeit der Ereignisse mit  $m \geq m_{\min}$ ;  $\beta_j$ : Verteilungsparameter der  $j$ -ten Quelle). Die Parameter  $v_j$  und  $\beta_j$  werden an die reale Aktivität der betreffenden Quellregion angepaßt.

Als weitere Eingangsgröße für die Gefährdungsberechnung ist in Abb. 1 die Dämpfungsrelation dargestellt. Sie ist der Erwartungswert des betrachteten Bodenbewegungsparameters  $i$  (z. B. Intensität oder Bodenbeschleunigung) unter der Bedingung, daß in der Entfernung  $r$  ein Ereignis der Größe  $m$  (Magnitude bzw. Epizentralintensität) stattfindet. Dieser Bodenbewegungsparameter wird im verwandten Computerprogramm EQRISK als mit  $\sigma$  normalverteilt angenommen. Aus den genannten Eingangsgrößen folgt unter Verwendung des Satzes von der Totalen Wahrscheinlichkeit sowie mittels Summation über alle Quellen für den Erwartungswert  $v$  der jährlichen Rate des Auftretens oder Überschreitens von  $i$  am untersuchten Ort:

$$v = \sum_j v_j \cdot \int_{Q_j} \int_M P[I \geq i | m \wedge r] dF_{M,j}(m) dF_{R,j}(r) \quad (2)$$

( $P[I \geq i | M=m \wedge R=r]$ : Wahrscheinlichkeit, daß am untersuchten Ort  $i$  erreicht oder überschritten wird unter der Bedingung, daß in der Entfernung  $r$  ein Ereignis der Größe  $m$  stattfindet;  $dF_{M,j}$ : siehe (1);  $dF_{R,j}$ : Verteilung des Abstandes des Ereignisses vom betrachteten Ort, abhängig von Geometrie und Lage der  $j$ -ten Quelle  $Q_j$ ).

Die Anzahl von Erdbeben in einem Zeitintervall  $\Delta t$  folgt i.a. in guter Näherung einer Poissonverteilung, sofern nur statistisch unabhängige Ereignisse betrachtet werden, d.h. wenn Vor- und Nachbeben aus dem Datenfile eliminiert sind:

$$P[K=k] = \frac{\lambda^k}{k!} \cdot \exp(-\lambda) \quad (3)$$

( $P[K=k]$ : Wahrscheinlichkeit, daß in  $\Delta t$  genau  $k$  Ereignisse eintreten;  $\lambda$ : Erwartungswert der Ereigniszahl in  $\Delta t$ ).



Die Summe poissonverteilter Zufallsgrößen ist ebenfalls poissonverteilt. Daher ist das Auftreten bzw. Überschreiten eines konkreten Wertes  $i$  des untersuchten Bodenbewegungsparameters am betrachteten Ort ebenfalls poissonverteilt und es gilt  $\lambda = v \cdot \Delta t$ . Wiederkehrperioden sowie Quantile können aus (3) berechnet werden. Danach ergibt sich z. B., daß innerhalb eines Zeitraumes von 475 Jahren (mittlere Wiederholungsperiode für die Karte zum NAD) die in der Karte ausgewiesenen Intensitäten mit einer Wahrscheinlichkeit von 63% auftreten bzw. überschritten werden.

#### *4.2 Ausgangsdaten und deren Vorverarbeitung*

Bebendaten hoher Qualität sind wesentlich für zuverlässige seismische Gefährdungsabschätzungen. Für die hier vorgelegten Zwischenergebnisse konnten weitgehend die jüngsten, i. d. R. unveröffentlichten, nationalen Seismizitätsdatenfiles nicht nur der Bundesrepublik Deutschland verwandt werden sondern auch die der Länder im Umkreis von mindestens 300 km außerhalb der Grenzen Deutschlands, um die makroseismische Beeinflussung von den entfernter liegenden Herdregionen sicher in die Berechnung einfließen zu lassen. Insbesondere sind dies die zumeist neuesten Versionen der verschiedenen nationalen Bebenkataloge. Hierzu gehören die Datensätze für Belgien (Verbeiren et al., 1994), Deutschland (Leydecker, 1986; Grünthal, 1988), Fennoskandien (Ahjos und Uski, 1992), Frankreich (SIRENE datafile excerpt, 1995), Großbritannien und Irland (Musson, 1994), die GUS (Kondorskaja und Shebalin, 1977; Nikonov 1992; Nikonov und Sildvee 1991; Boborikin et al., 1993), Italien (Postpischl, 1985; Stucchi, 1993), Kroatien (Zivčić, 1993a), die Niederlande (Houtgast, 1995), Österreich (nach Lenhardt, 1994), Polen (Pagaczewski, 1972; Guterch, 1995), Schweiz (Mayer-Rosa und Baer, 1994), Slowenien (Ribarič, 1982; Zivčić, 1993b), Tschechien (Schenkova, 1993), Ungarn (incl. Slowakei und Teilen von Rumänien, der Ukraine und Serbien) nach Zsíros et al. (1988).

Zur Erstellung einer einheitlichen Seismizitätsdatenbasis wurden zuerst die Ausgangskataloge gemischt, ohne einzelne Einträge zu eliminieren. In den Fällen multipler Einträge werden die jeweils zuverlässigsten Interpretationen entsprechend markiert und für die Gefährdungsberechnung verwandt. Diese Arbeitsschritte erfordern eine große Sorgfalt, um Datenfehler zu minimieren. Die Erstellung eines homogenen und möglichst fehlerfreien Datenfiles für das Untersuchungsgebiet erwies sich als weitaus schwieriger als ursprünglich angenommen. Ursache hierfür sind die z. T. wesentlich voneinander abweichenden Interpretationen ein und desselben Ereignisses durch die Autoren der unterschiedlichen nationalen Kataloge.

Zu einer beträchtlichen Zahl von Erdbeben konnten im Gegensatz zu den genannten Ausgangskatalogen neuere Interpretationen zu den Herdparametern berücksichtigt werden bzw. Hinweise, daß bislang als tektonische Erdbeben geführte seismische Ereignisse keine Erdbeben waren und umgekehrt. Markante Beispiele solcher Neuinterpretationen sind folgende:

1412 November 28, Prignitz, vormals Erdbeben  $I_0 = V$ .

Nach eingehender Quellenkritik ist es zweifelsfrei als Sturmereignis anzusehen.

1504 August 23, Niederrhein, nach neuer Interpretation  $I_0 = VII$ . Im parametrisierten Katalog nicht enthalten.

In früherer Literatur, z. B. Sieberg (1940), wird zu diesem Datum ein Erdbeben in Westfalen erwähnt; maximale genannte Intensitäten V-VI. Untersuchungen von Vogt (1984) und Alexandre (1994) zeigen, daß es sich um ein Erdbeben im Raum Aachen mit einer maximalen Intensität von VII handelte.

1593 Februar 6, Nördlingen, vormals Erdbeben  $I_0 = VII$ .

Nach Quellenlage kein Erdbeben, sondern mit großer Wahrscheinlichkeit ein Sturmereignis (nach persönlicher Mitteilung durch Prof. G. Schneider, Stuttgart, 1994, sowie eigenen Recherchen).

1612 November 7, Raum Bielefeld, vormals  $I_0 = IV$ .

Nach Vogt und Grünthal (1994) ein Schadenbeben der Intensität  $I_0 = VI-VII$ .

1670 April 12, Dinkelsbühl, vormals Erdbeben  $I_0 = VII$ .

Der Einsturz der Zwingermauer beim Kapuzinerkloster in Dinkelsbühl ist nicht auf ein Erdbeben zurückzuführen. Die Ursache war ein Hangrutsch (nach persönlicher Mitteilung durch Prof. G. Schneider, Stuttgart, 1994).

1693 Dezember 26, Marktbreit, vormals Erdbeben  $I_0 = VII$ .

Bei Häulen (1743) ist dieses Ereignis als Erdbeben bezeichnet. Hinweise bei ihm wie: „Bäume wurden in Menge umgerissen, beladene Wagen umgeworfen...“ lassen jedoch auf einen Sturm schließen (vgl. auch Grünthal, 1988; S. 11).

1767 April 13, Rotenburg a. d. Fulda, im parametrisierten Bebenkatalog ein Einsturzbeben.

Aufgrund neuerer instrumenteller Beobachtungsbefunde wieder wie bei Ahorner u. a. (1970) als Beben mit  $I_0 = VI-VII$  eingeordnet (ebenso bei Grünthal, 1988).

1778 Januar 28, vormals Feldkirch/Breisgau  $I_0 = VI-VII$ .

Dieses Erdbeben wurde von Sieberg (1940) in seinem Katalog versehentlich von Bregenz in das Breisgau gelegt; daher die bislang fälschlichen Koordinaten des Epizentrums für den deutschen Ort Feldkirch im Breisgau. Richtig muß das Epizentrum auf der anderen Rheinseite in Bregenz angenommen werden. Das Beben am 28. Januar 1778 war vermutlich der Hauptstoß einer Bebenserie, die Teile der Schweiz und Österreichs in der Zeit von Dezember 1777 bis März 1778 erschütterte.

Dies ist eines der zahlreichen Beben, bei denen die Neuinterpretation zu grenz-

überschreitenden Korrekturen führte.

1822 Februar 8, Neuhausen (Landshut), vormals  $I_0 = VI-VII$ .

Bachmann und Schmedes (1993) zeigen, daß dieses vermeintliche Beben auf einer frei erfundenen Zeitungsmeldung beruht.

Die Abb. 2 zeigt die Epizentrenkarte des Untersuchungsgebietes. Diese Daten stellen die entscheidende Ausgangsgröße für die seismische Gefährdungsberechnung dar. Innerhalb der Bundesrepublik Deutschland sind die Gebiete erhöhter Erdbebengefährdung in Abb. 2 in der Regel durch eine erhöhte Dichte von Epizentren ausgewiesen, wie der Raum Albstadt, der Oberrheingraben, Nieder- und Mittelrhein; mit einer etwas geringeren Epizentrendichte die Gebiete Ostthüringens sowie Westsachsens, der östliche Teil der Fränkischen Alb, die nördliche Fortsetzung des Herdgebietes vom Raum Albstadt sowie das Bodenseegebiet.

Die für das Ingenieurwesen maßgeblichen Herde der Schadenbeben ( $I_0 \geq VI-VII$ ) sind in Abb. 3 dargestellt. Diese folgen in ihrer Mehrzahl den Hauptbebenzonen. Einzelne Schadenbeben finden sich aber auch außerhalb dieser Zonen. Hiermit sei verdeutlicht, daß Schadenbeben auch außerhalb der Erdbebenzonen, die die Abb. 7 zeigt, auftreten können, wobei deren Auftretenswahrscheinlichkeit unterhalb des Gefährdungsniveaus liegt, für das die Erdbebenzonierungskarte berechnet wurde.

In die Gefährdungsberechnung sind ca. 27.000 Beben eingeflossen, wobei Vor- und Nachbeben nicht berücksichtigt worden sind, da der verwandte Algorithmus poissonverteilte Ereignisse voraussetzt. Von Schwarmbeben ist ebenfalls nur der jeweilig stärkste Stoß in die Berechnung eingegangen.

Als nächster Arbeitsschritt wurde die Vollständigkeit der katalogisierten Daten analysiert. Hierzu wurde das Gesamtuntersuchungsgebiet in 7 Großregionen mit unterschiedlichen kulturhistorischen Aspekten bezüglich der Erfassung von Beben in lokalen Chroniken untergliedert. Zur Vollständigkeitsanalyse wurden die Methode nach Stepp (1972) und eine anschaulichere graphische Methode herangezogen. Letztere beruht darauf, daß ein



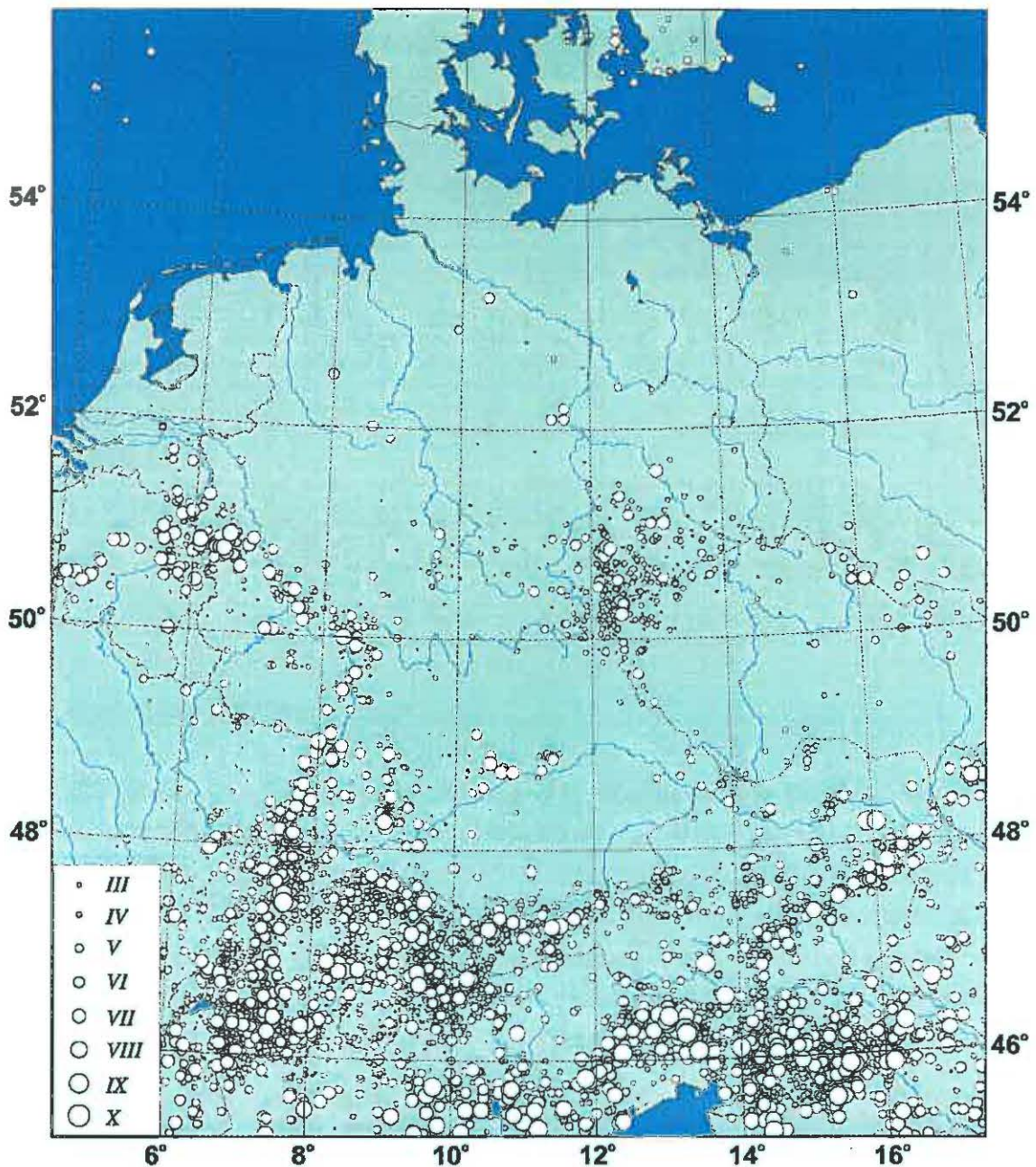


Abb. 2. Verwandte Seismizitätsdaten zur Berechnung der Erdbebengefährdung ab dem Jahre 1000 nach Chr. (aktualisiert nach Grünthal, 1994). Dargestellt sind die Epizentralintensitäten der Erdbeben.

konstanter Gradient in der kumulativen Ereigniszahl, aufgetragen über der Zeit, einen homogenen Zeitraum der Datenvollständigkeit für eine jeweilige Stärkeklasse repräsentiert. Das Ergebnis dieser Vollständigkeitsanalyse ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

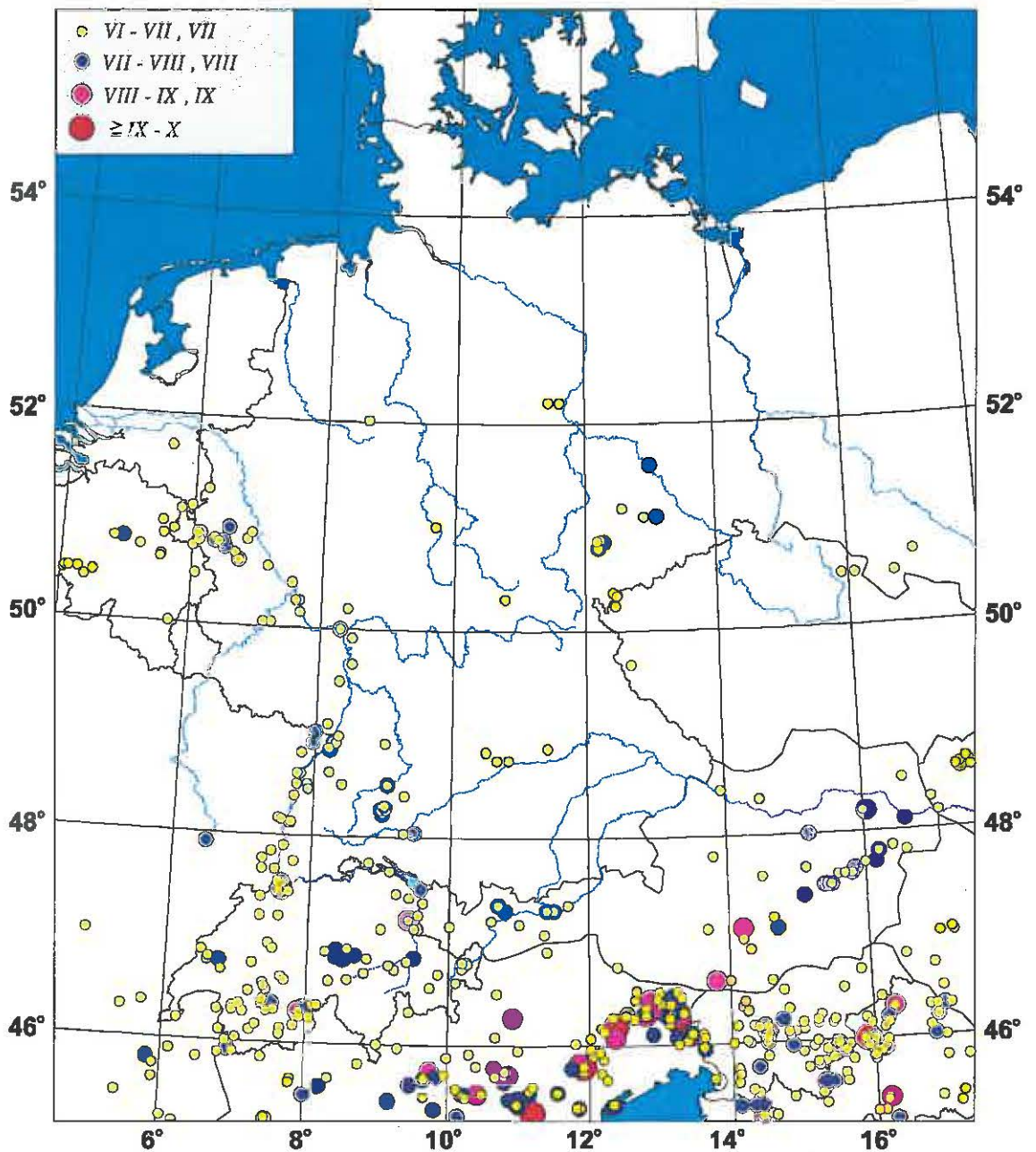


Abb. 3. Schadenbeben in der Bundesrepublik Deutschland und benachbarten Gebieten nach 1000 nach Chr. (aktualisiert nach Grünthal, 1994).



Tabelle 1. Vollständigkeitsanalyse für Intensitätsklassen ab IV Grad für sechs Teilgebiete des Gesamtuntersuchungsgebietes.

$I_0$	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Österreich	1900	1900	1850	1670	1550	1200	
Schweiz	1875	1875	1650	1575	1300	1300	
Norditalien	1875	1875	1750	1600	1200	1200	1100
Rheingebiet	1875	1825	1775	1500	1250	1250	
Sachsen/Thüringen	1850	1770	1700	1325			
übriges Deutschland	1925	1875	1875	1750	1625		
BENELUX - Staaten	1925	1875	1825	1675	1350		
Südkandinavien	1880	1775	1775	1700			

#### 4.3 Abgrenzung der Herdregionen

Zur Berechnung der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland sind für sämtliche Bebengebiete Herdregionen zu bestimmen, von denen das Untersuchungsgebiet makroseismisch beeinflusst werden kann. Dies ist im Süden der gesamte Alpenraum, d. h. das Gebiet der Schweiz, Österreichs, Norditaliens und Sloweniens; im Osten Niederösterreich, die Kleinen Karpaten, das Riesengebirge mit der sich östlich anschließenden Seismizitätszone; im Norden Teile Dänemarks und Südschwedens und im Westen die Benelux - Länder, das Bebengebiet der Straße von Dover sowie Nordost - Frankreich.

Insgesamt wurden so für das Untersuchungsgebiet Bundesrepublik Deutschland 96 seismische Herdregionen abgegrenzt (Abb. 4). Diejenigen Herdregionen, welche die seismische Gefährdung maßgeblich bestimmen, konnten in den meisten Fällen anhand gut definierter seismotektonischer Kriterien festgelegt werden und stimmen zudem weitgehend überein mit der beobachteten räumlichen Verteilung der Beben. Letzteres Kriterium diene vornehmlich der Abgrenzung von Regionen in den seismisch schwächer aktiven Gebieten. Deren konkrete Geometrie ist allerdings von sehr untergeordneter Bedeutung für die Gefährdungseinschätzung in den Gebieten starker oder gar höchster Bebenaktivität, welche schließlich als Erdbebenzonen ausgewiesen werden. Die Erwähnung sämtlicher seismotektonischer Details, die der gewählten Herdregionenabgrenzung zugrunde liegen, würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es sei hier lediglich exemplarisch darauf verwiesen, daß die

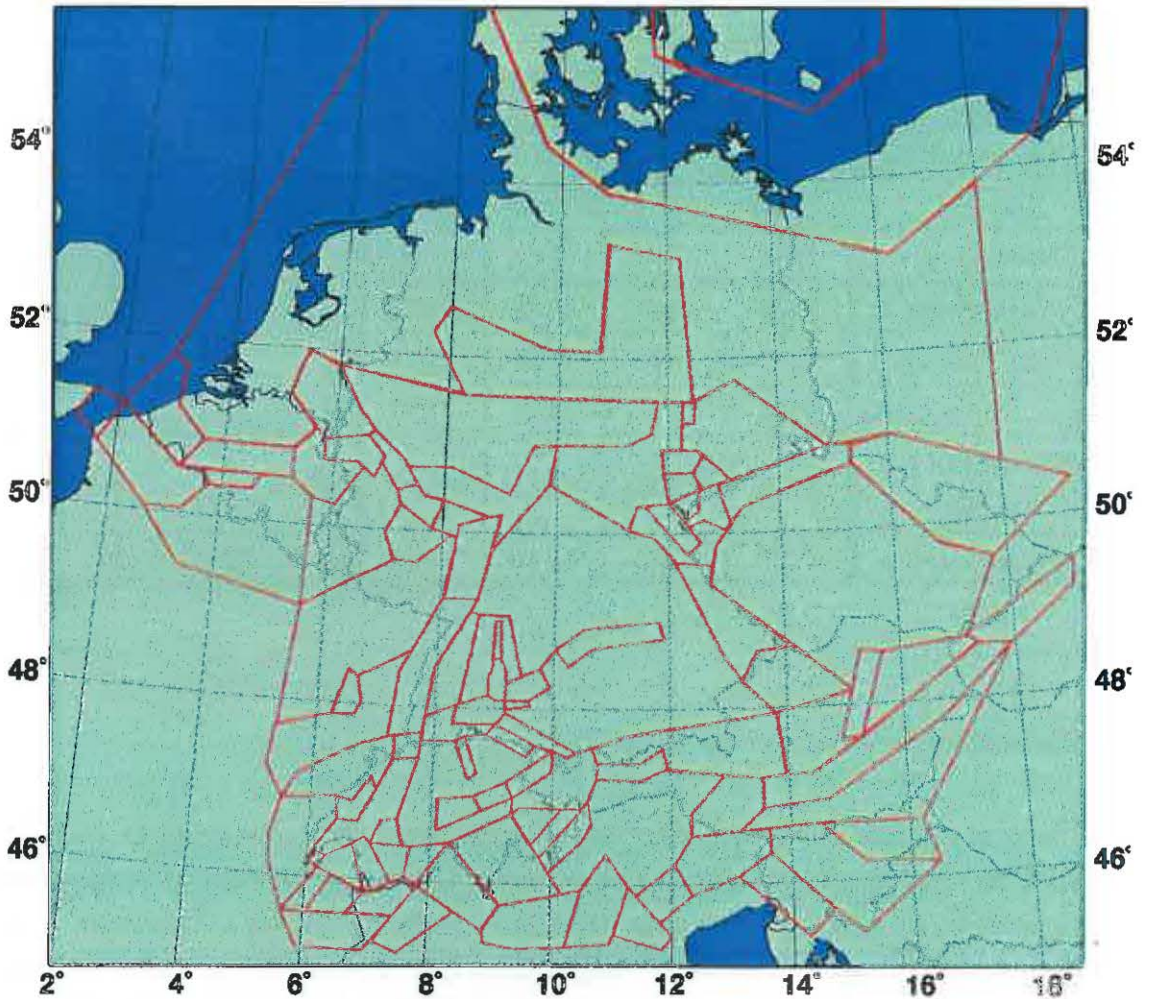


Abb. 4. Abgrenzung von seismischen Herdregionen in Mitteleuropa.

Herdregionen des Ober-, Mittel- und des Niederrheingebietes entsprechend den Befunden der Neo- und Aktuo-Tektonik bestimmt wurden, die Nord-Süd entlang des neunten Längengrades ausgerichtete Seismizitätszone mit dem Schwerpunkt der Bebenaktivität im Raum Albstadt, die „book shelf“-Tektonik, die vom Raum Basel bis in die westliche Fränkische Alb beobachtet wird, die Ost-West Seismizitätszone des London Brabanter Massivs, die Hainaut-Zone in Belgien, die Mur-Mürz-Zone im Südosten Österreichs, die Umrandung des Böhmisches Massivs u. s. w. Recht grobe, stark vereinfachende Abgrenzungen konnten für die Gebiete zugrunde gelegt werden, welche das Resultat der Gefährdungseinschätzung in der Bundesrepublik Deutschland nur unwesentlich beeinflussen und keinerlei Auswirkungen auf den Verlauf der Erdbebenzonen (vgl. Abb. 7) haben. Hierzu gehört z. B. der südkandinavische Raum oder die Erdbebenzonen Norddeutschlands.

In das Gesamtkonzept von Herdregionen von der Straße von Dover im Westen bis zu den



Kleinen Karpaten im Osten, von Schweden im Norden bis zur Lombardei im Süden sind in starkem Maße Detailuntersuchungen nationaler bzw. lokaler Bearbeiter eingeflossen. Hier sind besonders hervorzuheben die Regionenabgrenzung für den süddeutschen Raum, die weitgehend auf Hinweise von Prof. G. Schneider, Stuttgart, zurückgeht (persönliche Mitteilungen, 1994, 1995), Konsultationen bei Prof. Ahorner, Köln/Bensberg (persönliche Mitteilungen, 1994, 1995), die Regioneneinteilung für die Schweiz, die in Abstimmung mit den nationalen Bearbeitern im wesentlichen identisch ist mit der von Sägesser und Mayer-Rosa (1978), für Norditalien nach Scandone (1990), für Österreich nach W. Lenhardt, Wien (persönliche Mitteilung, 1994), sowie für die Niederlande und Belgien in Abstimmung mit Th. de Crook, DeBilt, und Th. Camelbeeck, Brüssel (persönliche Mitteilungen, 1995).

#### 4.4 Dämpfungsrelation, charakteristische Herdtiefe und obere Grenzintensität

Die Dämpfungsrelation der Intensität mit der Entfernung nach Sponheuer (1960) beschreibt am besten die Beobachtungen im Untersuchungsgebiet:

$$\overline{I(I_0, r)} = I_0 - 3 \cdot \left( \log \frac{r}{h} + \alpha \cdot \log_e (r - h) \right);$$

$r$  - Hypozentraldistanz;  $h$  - Herdtiefe;  $r$  und  $h$  in km

Diese wird daher für die meisten Gefährdungsabschätzungen in Mitteleuropa verwandt. Aufgrund spezieller Untersuchungen zur Intensitätsabnahme konnte der anfänglich für  $\alpha$  gewählte Wert von  $0,001 \text{ km}^{-1}$  auf  $0,002 \text{ km}^{-1}$  verbessert werden. Die genannte Dämpfungsrelation nach Sponheuer (1960) konnte durch detaillierte makroseismische Untersuchungen von Beben hauptsächlich der letzten 20 Jahre verifiziert werden. Sie repräsentiert die mittlere Intensitätsabnahme mit der Entfernung und nicht die Intensitätsüberhöhung durch ungünstige, erschütterungsverstärkende Baugrundverhältnisse. Durch derartige Baugrundsituationen lokal, d. h. innerhalb eines Ortsteiles, höher ausgebildete Schadensgrade (oder andere makroseismische Effekte) sind bei der Intensitätsbestimmung für einen Ort nach der MSK-64 Skala und ihren Aktualisierungen ohnehin nicht ausschlaggebend sondern die im Mittel aufgetretenen Bebenwirkungen; eine Intensitätskorrektur im Hinblick auf solche Untergrundeffekte verbietet sich per Definition des verwandten Parameters, der makroseismischen Intensität (vgl. Anleitungen zur makroseismischen Praxis in Grünthal, 1993).

Für jede Herdregion wurde eine charakteristische Herdtiefe aus den Tiefenangaben der drei bis fünf stärksten Beben jeder Region bestimmt. In Fällen, in denen diese Vorgehensweise nicht anwendbar war, wurde die Tiefe zu 10 km gesetzt. Die berechneten charakteristischen

Herdiefen variieren im Bereich von 5 bis 20 km.

Die oberen Grenzwerte von Bebenstärken sind bei probabilistischen Gefährdungseinschätzungen Bestandteil der Rechenprozedur und bezeichnen die Werte, die mit einer Auftretens- oder Überschreitenswahrscheinlichkeit von Null zu erwarten sind. In Übereinstimmung mit der aktuell international geübten Praxis moderner Erdbebengefährdungseinschätzungen wird ein Zuschlag zu den in den Herdregionen maximal beobachteten Intensitäten eingeführt. Nach Abschätzung einer für Mitteleuropa geeigneten Vorgehensweise wird in Abstimmung mit europäischen Partnern wie folgt verfahren:

$$I_{\max} = I_{\max \text{ obs}} + 1,5 (\pm 0,5);$$

mit folgenden Zusatzkriterien:  $I_{\max}$  ist stets  $\geq VII$ , sowie  $\leq X$ . Lediglich für Teile Norditaliens und anderer Gebiete höchster Bebenaktivität mit  $I_{\max \text{ obs}} = X$  gilt  $I_{\max} = X-XI$ . Die Wahl dieses oberen Grenzwertes bestimmt in erster Linie die Erdbebengefährdungsabschätzungen im Bereich von Gefährdungsniveaus, die kleiner als der hier betrachtete Wert sind.

#### 4.5 Intensitäts - Häufigkeits - Relationen

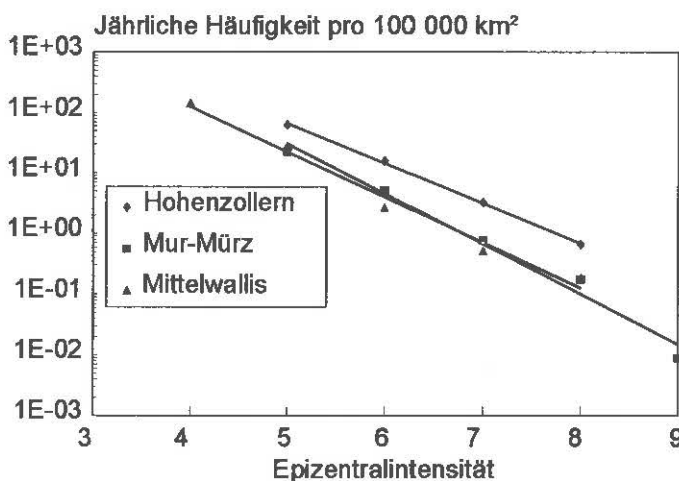


Abb. 5. Kumulative Intensitäts- Häufigkeitsbeziehung für drei verschiedene Herdregionen (nach Grünthal, 1995).

Gut belegte lineare Verläufe der Relation  $\log N_a = a - bI_0$  (siehe Gleichung (1)) konnten für nahezu alle Herdregionen gewonnen werden. Abb. 5 zeigt hierfür einige Beispiele. In den Gebieten mit sehr geringer Bebenaktivität wurden die b-Werte aus einem größeren Umfeld der jeweiligen Region bestimmt und die a-Werte den konkreten Seismizitätsdaten dieser Region angepaßt. Ein

spezifisch neues Element dieser Prozedur stellt die Behandlung der ungenauen Intensitätsangaben dar. So wurden z. B. bei Intensitätsangaben wie V-VI jeweils 50% der Daten der nächsthöheren sowie der nächstunteren Klasse zugeordnet. Dieses Verfahren führt zu jährlichen Raten in den kumulativen Verteilungen, die größer als in früheren Abschätzungen sind.

## 5. Neueinschätzung der seismischen Gefährdung

Als Resultat der probabilistischen seismischen Gefährdungseinschätzung ergibt sich für eine mittlere Wiederholungsperiode von 475 Jahren die in Abb. 6 dargestellte Gefährdungskarte. Diese konnte im Verlaufe der Arbeiten an diesem Forschungsvorhaben, nicht zuletzt anhand zahlreicher Hinweise aus dem NAD - Arbeitskreis, durch Einführung der oben beschriebenen Innovationen und sukzessive Anpassung von Ausgangsparametern an möglichst realistische Bedingungen mehrfach verbessert werden. Die Isolinien in Abb. 6 repräsentieren makroseismische Intensitäten. Sie wurden erst ab einer Intensität von V dargestellt, da kleinere Werte keinerlei ingenieurtechnische Relevanz besitzen. Ein direkter Vergleich dieser Karte mit deterministischen Gefährdungskarten oder mit früheren Gefährdungsberechnungen für die Bundesrepublik Deutschland ist nur bedingt möglich, da das gewählte Gefährdungsniveau von 10% Auftretens- oder Überschreitungswahrscheinlichkeit in 50 Jahren für frühere Gefährdungseinschätzungen in diesem Raum nicht verwandt wurde.

Wie nicht anders zu erwarten, reflektiert die neue Gefährdungskarte sehr gut die Gebiete erhöhter Seismizität. Im Ergebnis eingehender Diskussionen im NAD - Arbeitskreis wurden Intensitätsintervalle festgelegt, anhand derer aus der probabilistischen Gefährdungskarte die Erdbebenzonierungskarte entwickelt wurde. Als Optimum in Hinblick auf die Belange des Eurocode 8 erwies sich die in Tab. 2 wiedergegebene Zoneneinteilung. Die sich aufgrund dieser Einteilung ergebende Erdbebenzonierungskarte zeigt die Abb. 7.

Interessante Hinweise ergeben sich aus dem Vergleich der beiden Gefährdungskarten anhand der Neueinschätzung mit analogen Resultaten. So stimmt die vorliegende probabilistische Gefährdungseinschätzung für Mitteleuropa, die in Abb. 6 auftragsgemäß nur innerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland gezeigt ist, auffallend gut mit sämtlichen vorliegenden neuesten Gefährdungsabschätzungen zum gleichen Gefährdungsniveau überein; so mit der Abschätzung für die Niederlande nach de Crook (1993, 1995), mit der für die Schweiz nach Rüttener (1995), für Italien nach (Bramerini u. a., 1995) sowie mit der für Großbritannien nach Musson (1996). Für weitere angrenzende Länder, wie Belgien, Frankreich Österreich, Polen, Dänemark, Schweden und Tschechien liegen neben den am GFZ berechneten Gefährdungskarten derzeit keine entsprechenden Karten vor.

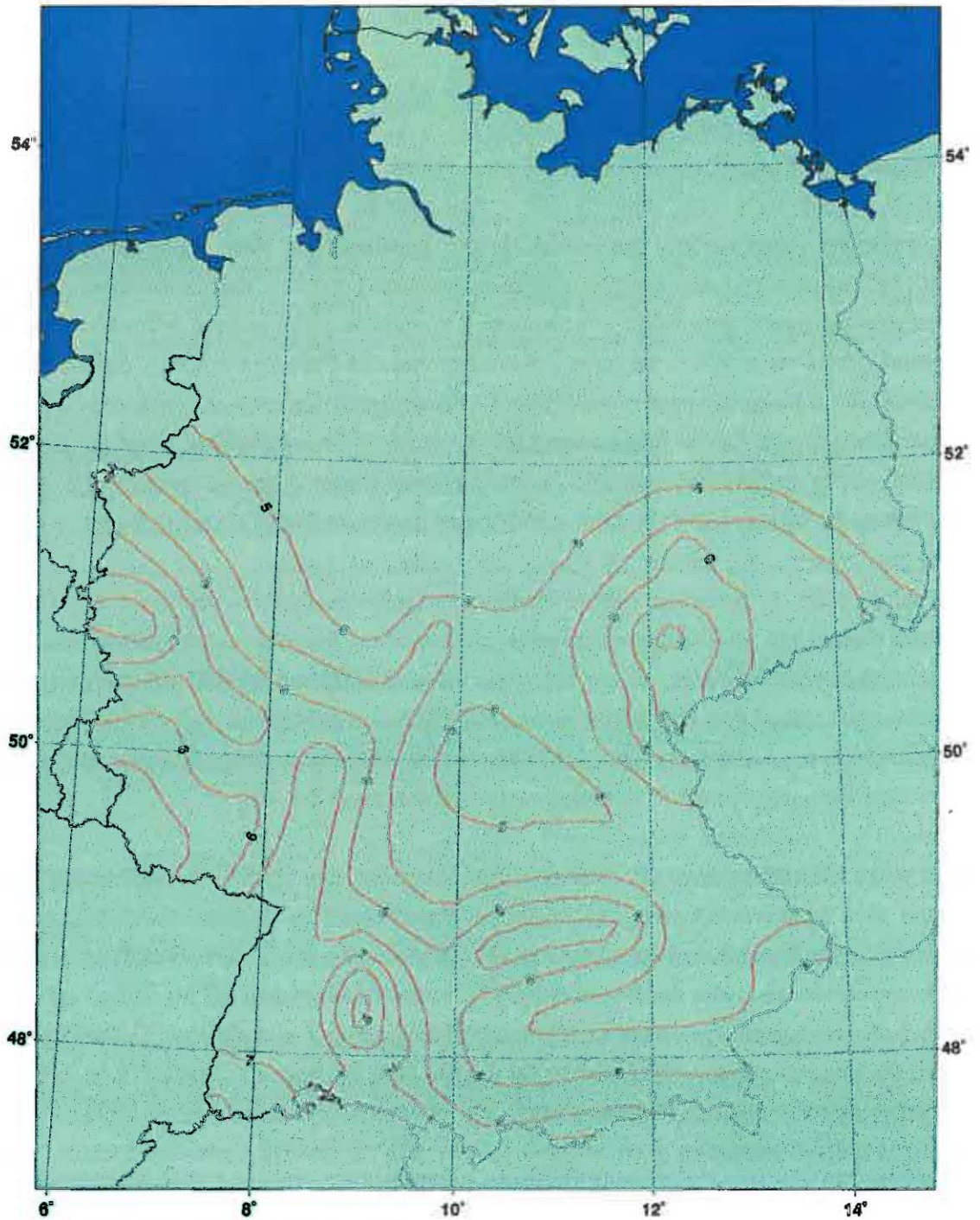


Abb. 6. Probabilistische seismische Gefährdungskarte für die Bundesrepublik Deutschland für eine Auftretens- oder Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10% innerhalb von 50 Jahren (mittlere Wiederholungsperiode von 475 Jahren). Die Isolinien repräsentieren makroseismische Intensitäten  $I \geq V$ .



Bemerkenswert gut ist in weiten Teilen auch die Übereinstimmung der neuen Erdbebenzonierungskarte mit der entsprechenden Karte der DIN 4149 in der Fassung von Dezember 1992. Generell ist zu bemerken, daß die Form von Erdbebenzonen nach der probabilistischen Methodik einen glatteren Verlauf besitzt als nach der deterministischen Methode. Gebiete, in denen bestimmte Erdbebenintensitäten mit der vorgegebenen Eintretenswahrscheinlichkeit erwartet werden, sich aber im zugrundeliegenden Beobachtungszeitraum nicht ereigneten, werden jetzt als entsprechende Erdbebenzonen ausgewiesen, während in anderen Gebieten, in denen in der Vergangenheit bestimmte Intensitäten einmalig auftraten und die in der DIN 4149 als Erdbebenzonen erscheinen, die Auftretenswahrscheinlichkeit kleiner als 10% in 50 Jahren ist. Somit sind derartige Gebiete in der neuen Zonierungskarte nicht mehr durch eine entsprechende Erdbebenzone belegt. Die Gebiete der Karte der DIN 4149, die durch die höchsten Intensitäten ausgewiesen sind, d. h. die Gebiete der Zonen 3 und 4 (Raum Aachen/Düren, Raum Albstadt und dessen südliche Fortsetzung, Raum Basel) sind jetzt durch die neue Erdbebenzone 3 bzw. ihr Randgebiet belegt. Weitere Gebiete, die bisher der Erdbebenzone 2 zugeordnet wurden, wie z. B. im Oberrheingebiet, gehören nach der neuen Einschätzung zur Zone 1. Die Erdbebenzone 2 im Gebiet des Werra - Kalisalzbauwerks erscheint in der neuen Karte nicht mehr. Letztere beschränkt sich auf die Gefährdung durch natürliche, tektonische Erdbeben. Für die Bergbaugengebiete, in denen bergbaubedingte seismische Schadensereignisse auftreten können, sei auf entsprechende bergrechtliche Regelungen verwiesen.

Tabelle 2. Zuordnung von Intensitätsintervallen zu Erdbebenzonen.

<b>Zone</b>	<b>Intensitätsintervall für T=475a</b>
1	$6,25 \leq I < 7,0$
2	$7,0 \leq I < 7,5$
3	$7,5 \leq I < *$

\* oberer Grenzwert  $I = 8,1$

Für die Zuordnung von Effektivbeschleunigungen zu den Erdbebenzonen sollte von folgenden Bezugsintensitäten ausgegangen werden: 6,5 (Zone 1), 7,25 (Zone 2), 7,75 (Zone 3).

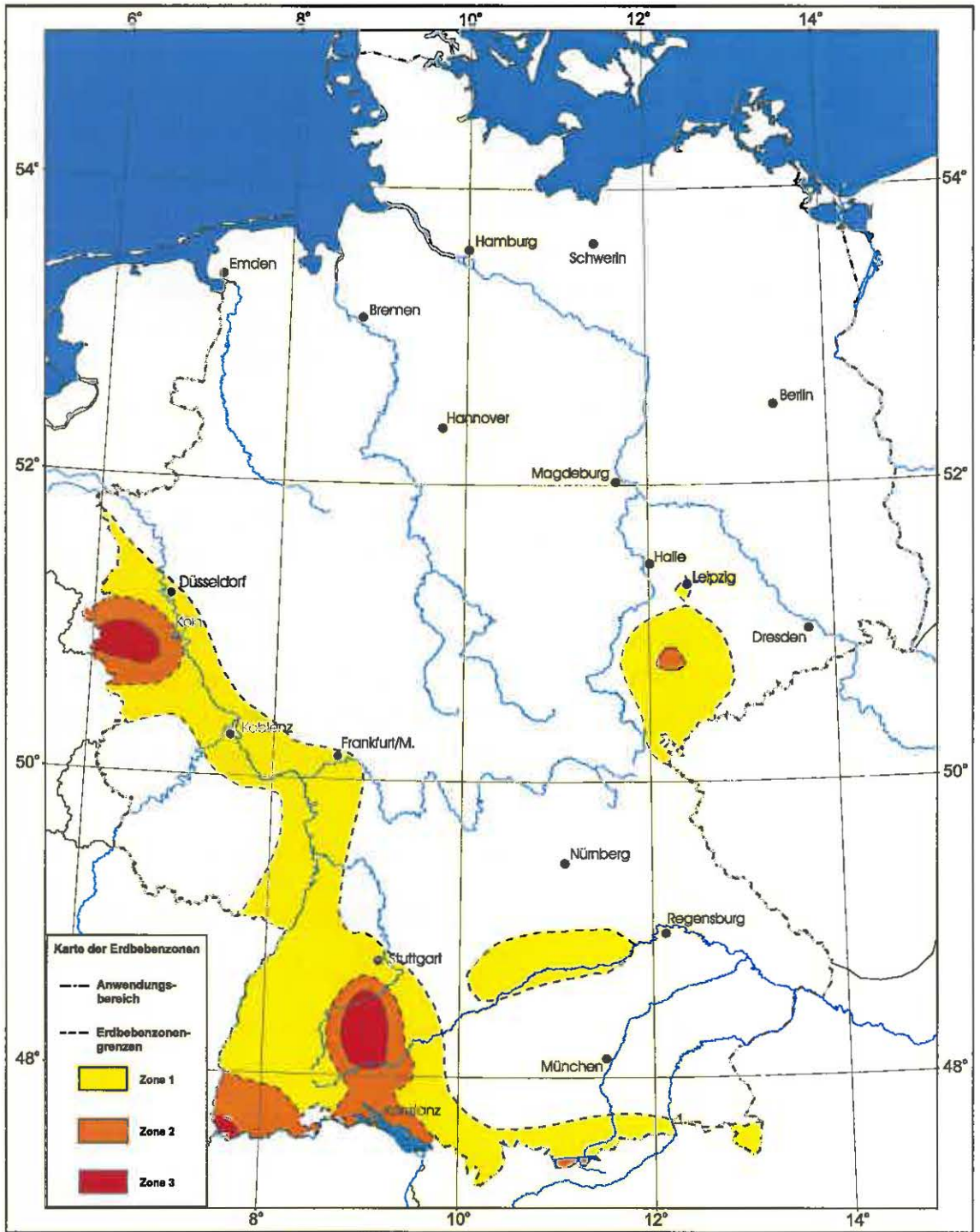


Abb. 7. Erdbebenzonierungskarte für das Nationale Anwendungsdokument zum EUROCODE 8 (vgl. Tabelle 2).

## 6. Literaturverzeichnis

- Ahjos, T. und Uski, M., 1992. Earthquake epicenters in Northern Europe. *Tectonophysics* 207, 285-295.
- Ahorner, L., Murawski, H. und Schneider, G., 1970. Die Verbreitung von schadenverursachenden Erdbeben auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. *Zeitschr. f. Geophys.*, 36, 313-343.
- Ahorner, L. and Rosenhauer, W., 1986. Regionale Erdbebengefährdung, in: Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke, Kap. 9. Abschlußbericht an das Institut für Bautechnik Berlin. König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Frankfurt; Erdbebenstation Bensberg der Universität Köln; Institut für Geophysik der Universität Stuttgart.
- Alexandre, P., 1994. Historical seismicity of the lower Rhine and Meuse valleys from 600 to 1525: A new critical review. *Geologie en Mijnbouw*, 73, 431-438.
- Bachmann, Ch. und Schmedes, E., 1993. Ein Schadensbeben in Neuhausen, Landkreis Landshut am 7. Februar 1822 - eine Zeitungsentee. *Z. angew. Geol.* 39/2, 106-107.
- Bender, B. und Perkins, D. M., 1987. SEISRISK III: A computer program for seismic hazard estimation. *U.S. Geological Survey Bulletin* 1772.
- Boborikin, A. M., Garezky, R. G., Emelyanow, A. P., Sildvee, H. H. und Suveysdis, P. I. 1993. Zemlyetryaseniya Byelarusi i Pribaltiki. Sovremennoye sostoyaniye seismicheskikh nablyudenii i ich obobshtshenii. Akademiya Nauk Belarusi, Minsk.
- Bramerini, F., Di Pasquale, G., Orsini, G., Pugliese, A., Romeo, R., Sabetta, F., 1995: Rischio sismico del territorio Italiano. Sintesi del rapporto tecnico del Servizio Sismico Nazionale SSN/RT/95/1. 10pp.
- Cornell, C. A., 1968. Engineering seismic risk analysis. *Bull. Seismol. Soc. America*, 58, 1503-1606.
- de Crook, Th., 1993. Probabilistic seismic hazard assessment for The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 72, 1-13.
- de Crook, Th., 1995. The new zoning map conform Eurocode and practical earthquake parameter relation for The Netherlands, *Geologie en Mijnbouw* (in Druck).
- DIN 4149, Teil 1, 1992. Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten. Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e. V.



- Grünthal, G., 1988. Erdbebenkatalog des Territoriums der Deutschen Demokratischen Republik und angrenzender Gebiete von 823 bis 1984. Zentralinst. für Physik der Erde Nr. 99, 177pp.
- Grünthal, G., 1989. A method for seismic hazard assessment, based on digitized macroseismic maps - applied on the GDR data base, 4th International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk, Sept. 4-9, 1989: 18-19.
- Grünthal, G., 1991a. A new probabilistic seismic zoning procedure - based on digitized macroseismic maps. *Annales Geophysicae*, Vol. 9 Suppl., C87, 1991.
- Grünthal, G., 1991b. Die seismische Gefährdung im östlichen Teil Deutschlands und deren Berücksichtigung in erdbebengerechten Baunormen. Tagungsband Kolloquium Erdbebeningenieurwesen, Potsdam, 7.-9.1.1991, Knoll, P. und Werner, D. (Hrsg.), DGEB-Publ. Nr. 5: 9-38.
- Grünthal, G., 1994: The GSHAP-Regional Centre in Potsdam: Progress report. In: *Proceed. XXIV. ESC General Assembly* Sept. 19-24, Vol. III, 1535-1541, Athens.
- Grünthal, G., Editor (1993). European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK Scale), in *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* no. 7, Luxembourg.
- Grünthal, G., 1995. Seismic hazard assessment in northern Europe - Review of the activities of the GSHAP-Regional Centre 3. *Proceed. International School of Solid Earth Geophysics. 11<sup>th</sup> Course: Active faulting studies for seismic hazard assessment.* Erice - Sicily 27 Sept. - 5 Oct. 6pp.
- Grünthal, G., Bosse, Ch., Mayer-Rosa, D., Rüttener, E., Lenhardt, W., Melichar, P. 1994. Joint seismic hazard assessment project for Austria, Germany, and Switzerland. *Proceed. 10<sup>th</sup> European Conf. on Earthquake Engineering*, Wien, 28. Aug. - 2. Sept.
- Guterch, B., 1995. Polnisches Erdbebendatenfile. Unveröff. Computerfile.
- Häulen, C. C., 1743. *Jahr-Buch alter und neuer Nachrichten*, Onolzbach und Maynbernheim, S 88.
- Houtgast, G., 1995. Erdbebendatenfile der Niederlande. Unveröff. Computerfile.
- Kondorskaja und Shebalin, 1977. *Nowyj katalog silnych semljetrjasenij na territorii SSSR s drevnejshich wremen do 1975g.* Akademija Nauk SSSR. Mezhduwedomstwjenyj Sowjet po Seismologii i Seismostoikomu Stroitelstwu pri presidiume an SSSR. Moskau.

- Lenhardt, W. 1994. Österreichisches Erdbebendatenfile (1201-1993), Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien. Unveröff. Computerfile.
- Leydecker, G., 1986. Erdbebenkatalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000 - 1981. Geologisches Jahrbuch Reihe E, 36, 83pp.
- Mayer-Rosa, D. und Baer, M., 1994. Earthquake catalogue of Switzerland 1295-1992, Swiss Seismological Service, Zurich, Computer-file.
- McGuire, R. K., 1976. FORTRAN computer program for seismic risk analysis. United State Department of the Interior Geological Survey: Open-File Report 76-67.
- Musson, R., 1994. A catalogue of British Earthquakes. British Geological Survey. Technical Report WL/94/04. Seismology series.
- Musson, R., 1996. Seismic hazard of the UK. British Geological Survey, Edinburgh (unpublished).
- Nikonov, 1992. Distribution of maximum observed tremors and zones of possible occurrence of earthquakes in Estonia, *Isvestya. Earth Physics*, 28, No. 5.
- Nikonov, A. A. und Sildvee, H. 1991. Historical Earthquakes in Estonia and their Seismotectonic Position. *Geophysica* 27, 1-2, 79-93.
- Pagaczewski, J., 1972. Catalogue of earthquakes in Poland in 1000 - 1970 years. Katalog trzęsień ziemi w Polsce z lat 1000 - 1970. Veröff. d. Inst. f. Geoph. Polnische Akad. d. Wiss., Warschau 51, 3-36.
- Postpischl, D., 1985. Catalogo die Terremoti Italiani dall' anno 1000 al 1980, CNR. P.F.G., 239pp. Computerfile.
- Ribarič, V., 1982. Earthquake Catalogue of Slovenia (792-1981). Seismological Institute, Ljubljana, SZ SRS Publication, 650pp.
- Rüttener, E., 1995: Earthquake hazard evaluation for Switzerland. Ph. D. thesis Diss. ETH No. 11048. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. 107pp.
- Sägesser, R. und Mayer-Rosa, D., 1978. Erdbebengefährdung in der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung SIA, 3-18.
- Scandone, P., Patacca, E., Meletti, C., Bellatalla, M., Perilli, N. und Santini, U., 1990. Struttura geologica, evoluzione cinematica e schema sismotettonico della penisola italiana. In: Atti del Convegno 1990 Vol. 1. Zonazione e riclassificazione sismica, GNDT Editor, Tip. Moderna, Bologna, 119-133.
- Schenkova, Z., 1993. Tschechisches Erdbebendatenfile (841-1984). Unveröff.

Computerfile.

- Sieberg, A., 1940. Beiträge zum Erdbebenkatalog Deutschlands und angrenzender Gebiete für die Jahre 58 bis 1799. Mitt. Deutsch. Reichs-Erdbebendienst 2, 112 pp.
- SIRENE, data set extracted from the French Macroseismic database SIRENE (BRGM/EDF/IPSN), 1995.
- Stapp, J. C., 1972. Analysis of completeness of the earthquake sample in the Pudget sound area and its effect on statistical estimates on earthquake hazard. Proceed. Int. Conf. on Microzonation, 2, 897-910.
- Sponheuer, W., 1960. Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. Freiburger Forschungshefte, C88, Geophysik. Akademieverlag Berlin, 117 S.
- Stucchi, M., 1993. Italienisches Erdbebendatenfile. Unveröff. Computerfile.
- Verbeiren, R., Camelbeeck, Th. und Alexandre, P., 1994. Erdbebendatenfile für Belgien. Brüssel. Unveröff. Computerfile.
- Vogt, J., 1984. Révision de deux séismes majeurs de la région d'Aix-la-Chapelle - Verviers - Liège: 1504, 1692. In: Tremblements de terre, Histoire et Archéologie, IVèmes Rencontres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, 2-4 novembre 1983, Valbonne: 9-21.
- Vogt, J. und Grünthal, G., 1994. Die Erdbebenfolge vom Herbst 1612 im Raum Bielefeld, Geowissenschaften, 12, Heft 8, 236-240.
- Zivčić, M., 1993a. Kroatisches Erdbebendatenfile. Seismol. Surv. of Slovenia, Ljubljana. Unveröff. Computerfile.
- Zivčić, M., 1993b. Slowenisches Erdbebendatenfile, Seismol. Surv. of Slovenia, Ljubljana.
- Zsíros, T., Mónus, P. und Tóth, L., 1988 Hungarian earthquake catalogue (456 - 1986). Publ. Seismol. Obs. GGRI, H.A.S., Budapest, 182 pp.

