

**Probabilistische seismische Gefährdungsanalysen auf der Grundlage
von Epizentrendichten und ihre ingenieurpraktischen
Anwendungsgebiete**

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor - Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Christian Golbs
aus Erfurt

Weimar im April 2008 Gutachter:

Dr.-Ing. J. Schwarz

Prof. Dr.-Ing. habil. C. Könke

Dr. rer. nat. G. Grünthal

Prof. Dr.-Ing. K. Meskouris

Prof. Dr.-Ing. S. Savidis

Tag der Disputation:

19.2.2009

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, eine neue Methodik der seismischen Gefährdungsberechnung vorzulegen, die nicht auf die Nutzung seismischer Quellzonen zurückgreift. Seismische Gefährdungsberechnungen und die gefährdungskonsistenten Methoden zur Ermittlung ingenieurseismologischer Bemessungsgrößen, und somit im weiteren Sinne der seismischen Einwirkungen benutzen größtenteils seismische Quellzonen. Die seismischen Quellzonen dienen der geographischen Abgrenzung von Gebieten unterschiedlicher tektonischer strukturgeologischer und Seismizitätseigenschaften.

Die Qualität der Gefährdungsanalysen und der ingenieurseismologischen Bemessungsgrößen hängt neben anderen Parametern auch von der Qualität der verwendeten seismischen Quellzonen ab. Das verwendete Modell seismischer Quellzonen sollte deshalb so gut wie möglich die seismotektonischen Eigenheiten abbilden. Ungenaue Ergebnisse können erwartet werden, wenn die Flächen der seismischen Quellzonen zu groß gewählt sind und so die Seismizität in ihnen nicht gleichmäßig verteilt ist. Ebenfalls sind ungenaue Ergebnisse zu erwarten, wenn die Flächen der seismischen Quellzonen zu klein gewählt werden und so nicht genügend Erdbebenaten vorhanden sind, um zuverlässige Erdbebenstärke-Häufigkeiten für die einzelnen seismischen Quellzonen zu ermitteln. Aufgrund der Komplexität, kann die Bestimmung der seismischen Quellzonen durch subjektive Faktoren beeinflusst werden. Auch wenn heute mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden die Abwägung zwischen alternativen seismischen Quellzonen die Reduzierung einiger Unsicherheiten erlaubt, ist es nicht möglich, damit den Prozess der Einteilung eines Gebietes in seismische Quellzonen selbst zu überprüfen.

Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode basiert auf Nachbarschaftsanalysen von Epizentren. Die Aufgliederung der Nachbarschaftsanalysen führt zu Epizentrendichte-Modellen, mit denen das Ziel einer seismischen Gefährdungsberechnung ohne die teils subjektiven Einteilungen in seismische Quellzonen erreicht werden kann. Die Zusammenfassung von Regionen mit ähnlicher Epizentrendichte erlaubt es, die Erdbebenstärke-Häufigkeiten für ein Modell mit größerer Verlässlichkeit zu bestimmen. Sie bilden so mit die Grundlage für eine realitätsnahe Abschätzung der seismischen Gefährdung und der ingenieurseismologischen Bemessungsgrößen.

Die mit der vorgestellten Epizentrendichte-Methode ermittelten Resultate für seismische Einwirkungen zeigen bei konsistenten Eingangsdaten eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen herkömmlicher Vorgehensweisen. Unter Verwendung der vorgestellten Epizentrendichte-Methode kann im Vergleich zu den herkömmlichen Vorgehensweisen seismischer Gefährdungsermittlung eine Reduzierung subjektiver Faktoren erreicht werden. Andererseits gestatten die quellzonenfreien Methoden nicht, vorhandenes Wissen zum seismogenen Potential von tektonischen Elementen zu berücksichtigen. Damit bleibt eine wichtige Eingangsgröße in Gefährdungsanalysen ungenutzt. Quellzonenfreie Methoden können daher z. B. in Zweifelsfällen zur vereinfachten Gefährdungseinschätzung herangezogen werden.

Abstract

In probabilistic seismic hazard analyses, the design of seismic sources by area zones is a standard method of risk estimation. The quality of probabilistic seismic hazard analyses depends essentially on the quality of the area zoning model that should reflect the local and regional seismic conditions. Unrealistic results may be expected if the area of seismic sources is too large and the seismicity is not uniformly distributed. Otherwise if the area of seismic sources is too small there are insufficient historic earthquakes recorded to assign the parameters of earthquake recurrence law.

However, where the combination between geology and seismicity is complicated, as it is in many areas, the determination of the zone geometry may become subjective. Even though consideration of alternative zonation models within a logic-tree approach allows elimination of some of the uncertainty, it does not verify the basic conditions of the zonation process itself.

An alternative method for seismic hazard estimation without the difficulties of source zonation is based on *Voronoi* diagrams fed with data from the regional earthquake catalogue. The examination of the *Voronoi* diagrams leads to epicenter density considerations. *Voronoi* regions with similar density characteristics regarding epicenter density are the goal of the visualised procedure.

By using aggregation of *Voronoi* regions with similar density characteristics and extreme value statistics it is possible to determine the earthquake size distribution with greater reliability. These density functions are the basis for a synthetic earthquake catalogue generated with Monte Carlo-simulations. The simulated depth of the synthetic earthquakes depends on their magnitude. The following seismic risk estimation uses the synthetic earthquake catalogue and simulated attenuation functions.

The results of initial cross-validation between common seismic source approach and the density procedures correspond very well. Contrary to seismic sources by area zones, the epicenter density procedures reduce some of the subjective elements of seismic zonation.

The advantage of these density functions are the greater reliability of earthquake size distribution, the decrease of subjective elements in seismic zonation and a realistic method to evaluate the seismic hazard for a site or area of interest.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Vorgehensweise	4
1.3	Ziele der Arbeit	4
2	Grundlagen der Gefährdungsanalyse	6
2.1	Daten historischer Erdbeben	6
2.2	Quantifizierung der Erdbebenstärke	6
2.2.1	Makroseismische Intensitäten	6
2.2.2	Magnitudenskalen	8
2.3	Raumzeitliche Verteilung von Erdbeben	9
2.4	Stationarität der Seismizität	12
2.5	Seismische Quellzonen	12
2.6	Erdbebenstärke-Häufigkeiten	15
2.6.1	<i>Gutenberg - Richter</i> - Relation	15
2.6.2	Verallgemeinerte <i>Gumbel</i> - Verteilung	15
2.7	Vollständigkeit historischer Erdbebendaten	16
2.8	Magnitudengrenzen	17
2.9	Abnahmebeziehungen	18
3	Methoden der Gefährdungsanalyse	20
3.1	Deterministische Methoden	20
3.2	Probabilistische Methoden	22
3.2.1	Prinzipielle Vorgehensweise	22
3.2.2	Zonengebundene Methoden	25
3.2.3	Zonenfreie Methoden	27
4	Epizentrendichte-Methode	30
4.1	Vorgehensweise und Bearbeitungsschritte	30
4.2	Raster-Einteilungen	31

4.3	Einordnung der Epizentrendichte-Methode	31
4.4	Bestimmung der Magnituden-Eintrittsraten	34
4.5	Ermittlung der Epizentrendichte	38
4.5.1	Geographische Verteilung der Erdbeben	38
4.5.2	<i>Voronoi</i> - Diagramme aus Epizentren	38
4.5.3	Epizentrendichte mit <i>Voronoi</i> - Regionen	41
4.6	Einteilung in Epizentrendichte-Klassen	43
4.7	Simulation der zu erwartenden Seismizität	45
4.7.1	Simulation von Epizentren und Erdbebenstärken	45
4.7.2	Herd-tiefen- und Herd-flächenmodell	47
4.7.3	Empirische Prüfung der Epizentrendichtehypothese	47
4.8	Berücksichtigung von Unsicherheiten	48
4.9	Berücksichtigung der Magnituden und Entfernungsabhängigkeit der Intensität durch Intensitäts - Zuordnungsbeziehung	49
5	Parameteruntersuchungen zur Epizentrendichte-Methode	51
5.1	Modellpunkte	51
5.2	Radius der Epizentrendichte-Modelle	53
5.3	Gewichtung der Extremwert-Zeitintervalle	55
5.4	Anzahl der Epizentrendichte-Klassen	55
5.5	Untersuchungen zur Größe maximaler Erdbeben	57
5.6	Anpassung der Modelle an eine veränderte Datenbasis	64
5.7	Simulation von Herdunsicherheiten	66
5.8	Einfluss von Vor- und Nachbeben	66
5.9	Feststellungen über den Einfluss von Parametern	69
6	Vergleichende Untersuchungen mit der Epizentrendichte-Methode	70
6.1	Vergleich an Modellpunkten in Südwestdeutschland	70
6.2	Vergleich am Modellpunkt Bonn	75
6.3	Vergleich am Modellpunkt Köln	77
6.4	Feststellungen und Schlussfolgerungen	77
7	Ingenieurpraktische Anwendungsgebiete	81
7.1	Beispielstandorte und Untersuchungsgebiete	81
7.2	Standortbezogene Gefährdungskurven	84
7.3	Seismische Gefährdungskarten	88
7.4	Deaggregation des Gefährdungshintergrundes	94
7.5	Ingenieurseismologische Kenngrößen	95
7.5.1	Maßgebliche Magnituden- und Entfernungsbereiche	95
7.5.2	Spektrale Abnahmebeziehung	96

7.6	Standorteffekte und Standortspezifische Einwirkungen	97
7.7	Gefährdungsbezogene Beschleunigungszeitverläufe	99
7.7.1	Auswahl von gemessenen Zeitverläufen	99
7.7.2	Generierung synthetischer Zeitverläufe	99
7.8	Verletzbarkeitsuntersuchungen	100
7.8.1	Übersicht	100
7.8.2	Beispiel 1: Modellrahmen, zweidimensional	101
7.8.3	Beispiel 2: Anwendung auf Modelle existierender Bauwerke	102
8	Schlussbetrachtungen	108
8.1	Ergebnisse	108
8.2	Anwendungsgrenzen und Hinweise	109
8.3	Ausblick	110
A	Anhang	139
A.1	Erdbeben-Kataloge für Deutschland und angrenzende Gebiete	139
A.1.1	<i>Ahorner</i> -Erdbeben-Katalog	139
A.1.2	EKDAG Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> et al.	139
A.1.3	EKDAG Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> et al.	140
A.1.4	BGR-Erdbeben-Katalog nach <i>Leydecker</i>	140
A.1.5	ECOS-Erdbeben-Katalog	141
A.1.6	GFZ-Erdbeben-Katalog nach <i>Grünthal</i> und <i>Wahlström</i>	141
A.2	Verwendete Algorithmen	142
A.2.1	<i>Voronoi</i> -Diagramme	142
A.2.2	Simulation und Zufallszahlen	156
A.3	Simulationen der Erdbeben-Bibliotheken	160
A.4	Gefährdungskurven für Epizentrendichte-Raster	182
A.5	Deaggregation der Gefährdung, Beispiele	183
A.6	Spektren	189
A.6.1	Gefährdungsbezogene Spektren	189
A.6.2	Spektren nach DIN 4149 (2005)	190
A.7	Synthetische Zeitverläufe	191
A.8	Verwendete Software	193

Kapitel 1

Einleitung

*Jede Vorhersage der Zukunft bedarf der schöpferischen Phantasie;
es ist daher nicht verwunderlich, wenn selbst erfahrene Seismologen
durch Irrlichter getäuscht werden.*

C. F. Richter

1.1 Motivation

Erdbeben zählen neben anderen Naturgefahren zu den Ereignissen, die katastrophale Folgen für Mensch und Umwelt hervorrufen können.

So ereigneten sich im zweiten Halbjahr 1999 zwei schwere Erdbeben; am 17. August kamen ca. 20.000 Menschen in Izmit und Umgebung (Türkei) bei einem Erdbeben mit einer Momentmagnitude von M_w 7.4 ums Leben; am 20. September wurde die Insel Taiwan von einem Erdbeben der Stärke M_w 7.6 Erdbeben erschüttert, dabei gab es ca. 3.400 Opfer. Die entstandenen direkten Schäden wurden von der Swiss Re [179] mit US\$ 20 Milliarden in der Türkei, 14 Milliarden in Taiwan geschätzt [193]. Auch in den folgenden Jahren waren schwere Erdbeben zu verzeichnen. Am 26. Dezember 2003 ereignete ein Erdbeben der Stärke M_w 6.6 in Bam, Südiran, mit ca. 41.000 Toten. Am 26. Dezember 2004 folgte das Erdbeben M_w 9.0 vor Sumatra, Indonesien. Das Erdbeben löste einen Tsunami aus, der in Indonesien, Indien, Malaysia, Malediven, Thailand, Sri Lanka, Somalia, Kenia und Tansania etwa 300.000 Opfer forderte. Am 8. Oktober 2005 kam es zu einem Erdbeben der Stärke M_w 7.6 in Kaschmir. Schätzungen gehen von ca. 73.000 Todesopfern allein im pakistanischen Teil Kaschmirs aus [183].

Da immer wieder das Versagen von Bauwerken oder Bauwerksteilen für ein Großteil der Opferzahlen verantwortlich ist, ist es erforderlich für eine verbesserte Widerstandsfähigkeit der Bauwerke zu sorgen. Eine möglichst genaue Kenntnis der seismischen Gefährdung durch den Ingenieur ermöglicht es, die Auslegungsparameter für Bauwerke und Anlagen sowie Maßnahmen zum Schutz von Mensch und Umwelt besser beurteilen zu können.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag zur Abschätzung der Erdbebengefährdung und der damit

verbundenen seismischen Einwirkungen geleistet werden. Die Abschätzung der seismischen Gefährdung eines Standortes mit der Angabe von seismischen Einwirkungen wie der Spitzenbodenbeschleunigung und den Beschleunigungsspektren dient dazu, Bauwerke und Anlagen gegen die schadensverursachenden Wirkungen von Erdbeben-Ereignissen konstruktiv auszulegen bzw. deren Auslegung nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu überprüfen.

Die Bestimmung der seismischen Gefährdung und somit der seismischen Einwirkungen sind aber nur ein Teil eines umfangreichen Prozesses der erdbebensicheren Auslegung von Bauwerken und Anlagen. Ein interdisziplinäres Zusammenwirken von Seismologie, Geologie, Bautechnik, Maschinenbau und angrenzenden Fachgebieten ist für die Abarbeitung der gesamten Nachweises und eine umfassende Risikobeurteilung von Bauwerken und Anlagen mit hoher Schutzbedürftigkeit erforderlich [93].

In den Ingenieurwissenschaften vollzieht sich ein Wandel in den Grundlagen der Bemessungskonzepte, die den Übergang von ursprünglich deterministischen Ansätzen der Gefährdungs- und Einwirkungsbeschreibungen in probabilistische Modelle erkennen lassen. Diese Entwicklung wird in der europäischen Baunormung (Eurocode 8), aber auch in der Entwicklung der deutschen Erdbebennorm DIN 4149 deutlich. In der Neufassung der DIN 4149 (2005) wird die deterministische Intensitätskarte, die auf den historisch maximal beobachteten Schütterwirkungen basiert, ersetzt durch eine probabilistische Gefährdungszonenkarte, die Intensitäten mit einer Eintretens- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren, d.h. einer mittleren Wiederkehrperiode von 475 Jahren, ausweist. Dieses Gefährdungsniveau steht für ein Bemessungsbeben, bei dem allgemeine Hochbauten zwar Schaden erleiden können, eine Einsturzgefahr jedoch ausgeschlossen ist.

Diese Entwicklung ist auch durch eine Differenzierung der Nachweisanforderungen gekennzeichnet. Die Auslegung der Gebäude bzw. baulichen Anlagen muss unterschiedlichen, von der Erdbebenstärke abhängigen Zielstellungen genügen, die in Form einer Auslegungsphilosophie zum Ausdruck gebracht werden.

Dies bedeutet, für Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten Verhaltensforderungen festzulegen, für die letztlich Nachweis- oder Akzeptanzkriterien bereitzustellen sind;

- Schädengrenzerdbeben (schwaches Erdbeben mit einer für den Standort erhöhten Eintretenswahrscheinlichkeit),
- Betriebserdbeben (starkes Erdbeben mit der durch die Zonenkarte verankerten Eintretenswahrscheinlichkeit),
- Sicherheitserdbeben (sehr starkes Erdbeben für Bauwerke mit erhöhtem sekundären Risiko bzw. besonderem Risikopotential mit geringer Eintretenswahrscheinlichkeit)

Die Zusammenführung der Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeit kann durch unterschiedliche Nachweiskonzepte realisiert werden. So werden im Allgemeinen im Hochbau auf einer kräftebasierten Auslegungsgrundlage die Zonenkarte und das zugehörige Bemessungsbeben definiert.

Für die anderen Auslegungsbeben sind Modifikationen in Faktoren festgelegt (Faktor ν zur Anpassung der Verformung an das Schadensgrenzerdbeben in EC 8). Mit diesen Auslegungserdbeben können unterschiedliche Vorstellungen der Nutzer oder der Gesellschaft in Bezug auf die Sicherheit bzw. die Anforderungen an das Gebäudeverhalten definiert werden.

Gelingt es, diese Zielstellung durch entsprechende Akzeptanzkriterien bzw. Nachweisgrößen und ihre zulässigen Grenzen zu definieren, vollzieht sich in dieser Weise der Übergang zu verhaltensbasierten Bemessungskonzepten (*performance based design*), die den Ingenieur vor die Anforderung stellt, Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten zu beschreiben.

Dies verdeutlicht eine Entwicklung, die dazu führt, dass Gefährdungsanalysen auf konkrete Aufgaben- bzw. Objektklassen ausgerichtet werden. Das ist gleichbedeutend mit einer Zielvorgabe, die sich auf einen Bereich der Eintretensrate beschränkt, für den realistische Ergebnisse vorzugeben sind. Die Entwicklung steht in Verbindung mit den verhaltensorientierten Bemessungskonzepten, so dass die beiden Probleme als Einheit zu betrachten sind, die sich gegenseitig bedingen.

In diesem Zusammenhang gewinnt die klassische seismologische Aufgabe der Gefährdungsanalyse auch für den Ingenieur an Bedeutung, da es ihm nicht immer möglich ist, die für eine probabilistische Gefährdungsanalyse erforderlichen Teilaufgaben zu realisieren. Dies betrifft insbesondere die Abgrenzung der seismischen Quellzonen und die Ermittlung der charakteristischen Kenngrößen. Da die notwendigen Daten in der Regel nicht oder in unterschiedlicher Qualität der Aufbereitung zur Verfügung stehen, sind Ansätze von Bedeutung, die ausschließlich die historische Erdbebentätigkeit zur Grundlage nehmen und in diesem Zusammenhang eine vertrauenswürdige Abschätzung der Gefährdungskenngrößen (Intensitäten, spektrale Bodenbewegung) ermöglichen.

Eine zonenfreie Methode wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit der Bezeichnung Epizentren-dichte-Methode in den Grundlagen vorgestellt und auf die verschiedenen, für das Erdbebeningenieurwesen relevanten Anwendungsgebiete bzw. Aufgabenbereiche übertragen.

Anwendungsgebiete der Epizentren-dichte-Methode werden durch Beispiele aus den folgenden Themenkomplexen vorgestellt:

- seismischen Gefährdungsanalyse,
- der standortbezogene Beschreibung der Gefährdungskenngrößen (Eintretensrate, abhängige Intensitäten bzw. Beschleunigungen),
- des Gefährdungshintergrundes zur Festlegung charakteristischer Auslegungsbedingungen in Form von Magnituden und Entfernungsbereichen,
- und Anwendung der Konzepte zur Bewertung der Verletzbarkeit ausgewählter Bauwerke bzw. zur Ableitung von Verletzbarkeitsfunktionen für Bauweisengruppen.

1.2 Vorgehensweise

Die Idee zur Epizentrendichte-Methode gab die folgende Hypothese:

“Regionen mit einer ähnlichen räumlichen Dichte an historisch berichteten Erdbeben-Ereignissen (Epizentren) weisen ähnliche Erdbebenstärke-Häufigkeiten auf.“

Sie wurde im Rahmen dieser Arbeit anhand von Datensätzen aus den regionalen Erdbeben-Katalogen für die untersuchten Gebiete (vgl. 5.1) überprüft und konnte empirisch bestätigt werden. Die Vorgehensweise der Überprüfung und deren Ergebnisse sind in 4.7.3 dargestellt. Die empirisch bestätigte Hypothese erlaubt es, Regionen mit einer ähnlichen Epizentrendichte für seismische Gefährdungsanalysen zu Epizentrendichte-Klassen zusammenzufassen. Die Epizentrendichte-Klassen müssen dabei nicht zwangsläufig auch geographisch zusammenliegen. Epizentrendichte-Klassen sind demnach Gebiete, die eine ähnliche Epizentrendichte historisch berichteter Erdbeben im Untersuchungsgebiet aufweisen.

Aufgrund der geringen Anzahl der Epizentrendichte-Klassen im Vergleich zu der Anzahl üblicher seismischer Quellzonen weisen die Epizentrendichte-Klassen einen durchschnittlich höheren Flächeninhalt auf. Infolge dieser vergleichsweise größeren Flächeninhalte der Epizentrendichte-Klassen steht für die Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten eine größere Datenmenge an historischen Erdbeben-Ereignissen zur Verfügung. Die Erdbebenstärke-Häufigkeiten lassen sich somit mit größerer Sicherheit bestimmen.

1.3 Ziele der Arbeit

Ziele dieser Arbeit sind es, dem Ingenieur ein Hilfsmittel in die Hand zu geben, mit der die seismische Gefährdung und damit die seismischen Einwirkungen, abgeschätzt werden können.

Die Abschätzung der seismischen Gefährdung und damit der ingenieurseismischen Bemessungsparameter soll dabei ohne die häufig angewandten und teils mit Unsicherheiten behafteten Einteilungen in seismische Quellzonen möglich sein, da zum einen die Einteilungen in seismische Quellzonen, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, immer wieder zu Diskussionen und Meinungsverschiedenheiten führen (vgl. *Brunzema* und *Hinzen* [34]) und zum anderen nicht in allen Regionen entsprechende Einteilungen vorliegen.

Ziel der vorgestellten Epizentrendichte-Methode ist es, unabhängig von einer Einteilung in seismische Quellzonen zu ermitteln, wie sich zukünftige Erdbeben geographisch verteilen und welche seismische Gefährdung von ihnen ausgeht.

Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode soll über die zu erwartende seismische Gefährdung und die ingenieurseismischen Bemessungsparameter Auskunft geben. Die vorgestellte Methode kann als zonenfreie probabilistische seismische Gefährdungsanalyse eingeordnet werden.

Die wesentlichen Zielstellungen, die sich in der Gliederung der der Arbeit widerspiegeln, können wie folgt zusammengefasst werden:

- Vorstellung von Methoden zur probabilistischen und deterministischen seismischen Gefährdungsanalyse (Kapitel 3);
- Einführung einer neuen zonenungebundenen Methode der probabilistischen Gefährdungsanalyse (Kapitel 4);
- Durchführung von Parameterstudien und Herausarbeitung des Einflusses von Parameterunsicherheiten (Kapitel 5);
- Einordnung und Vergleich der Ergebnisse mit herkömmlichen Methoden (Kapitel 6);
- Herausarbeitung von Besonderheiten der vorgestellten Methodik und Aufzeigen möglicher Anwendungsgebiete anhand von Beispielen (Kapitel 7);
- Diskussion der Anwendungsgrenzen und Nachweis der Anwendbarkeit der hier entwickelten und als ingenieurmäßig bezeichneten Methodik auf die baupraktischen Anwendungsgebiete (Kapitel 8).

Detaillierte seismische Gefährdungsanalysen für einzelne Standorte sind nicht Gegenstand der Arbeit.

Kapitel 2

Grundlagen der Gefährdungsanalyse

*In Wirklichkeit wissen wir nichts, denn die Wahrheit liegt
in der Tiefe
Demokrit von Abdera*

2.1 Daten historischer Erdbeben

Die in Tabelle 2.1 aufgeführten Erdbeben-Kataloge standen im Rahmen der Arbeit für Beispiel Untersuchungen zur Verfügung. Die Abbildung 2.1 zeigt für Deutschland, teils als Ausschnitt, die durch die Erdbeben-Kataloge abgedeckten Gebiete und gibt durch ihren vergleichenden Charakter einen ersten Eindruck von vorhandenen Differenzen zwischen den vorliegenden Katalogen. Auf die verschiedenen Skalen zur Erdbebenstärkebestimmung wird in Abschnitt 2.2 Bezug genommen. Mit den vorliegenden Erdbeben-Katalogen steht eine umfangreiche Datenbasis zur Verfügung, die es erlaubt, einen Überblick über die in der Vergangenheit aufgetretene Seismizität zu erhalten. Die Qualität der seismischen Gefährdungsanalysen hängt wesentlich von der Qualität dieser Datenbasis ab.

2.2 Quantifizierung der Erdbebenstärke

2.2.1 Makroseismische Intensitäten

Für die Einordnung der Erdbebenstärke ist es wichtig, die Stärke von Erdbeben-Ereignissen auf makroseismischen Intensitäts- und/oder Magnitudenskalen vergleichbar anzugeben. Die makroseismische Intensität variiert je nach Beobachtungsort und ermöglicht so eine differenzierte Betrachtung der Verteilung von Schütterwirkungen vom Epizentrum ausgehend.

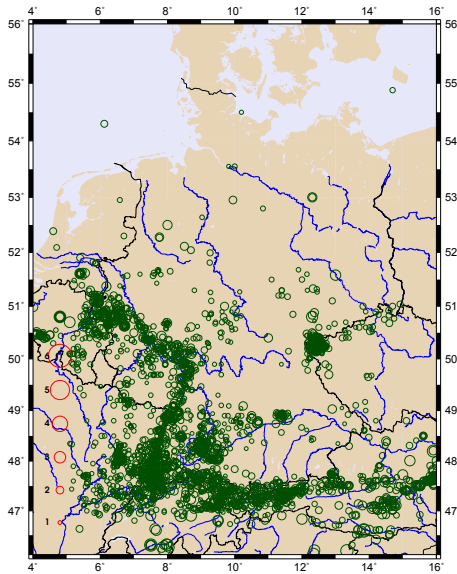
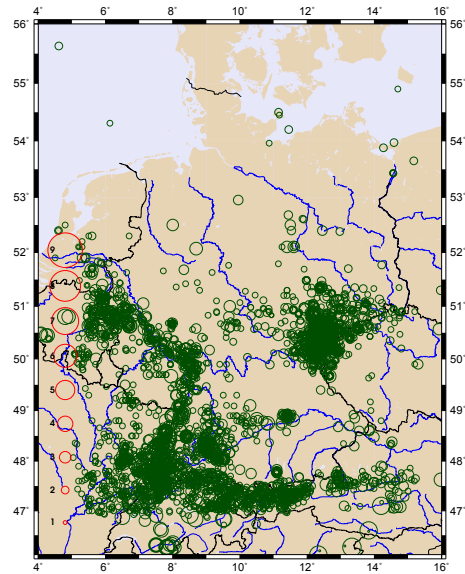
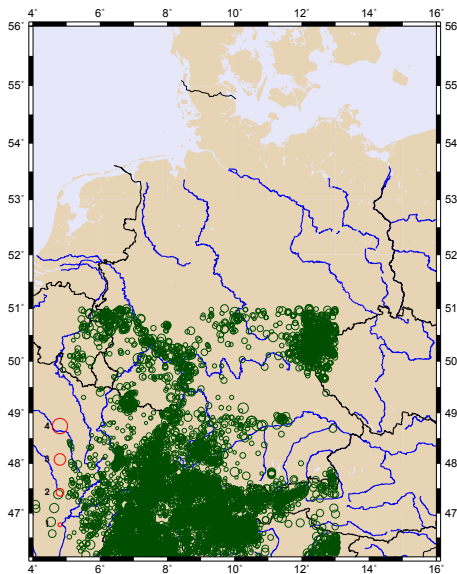
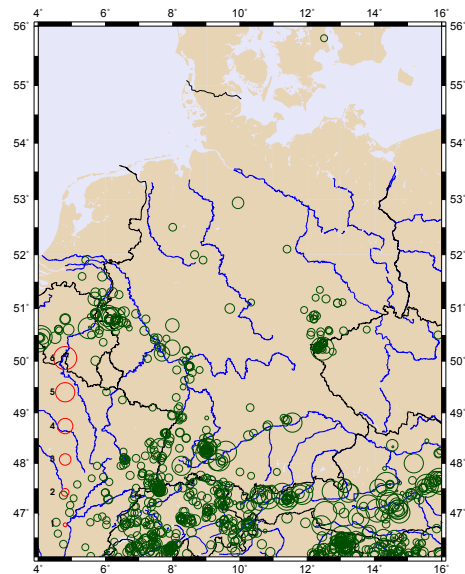
Ahorner-Erdbeben-Katalog (M_I) [7]BGR-Erdbeben-Katalog nach Leydecker (I) [118]ECOS-Erdbeben-Katalog (M_w) [49]Grünthal und Wahlström (M_w) [81]

Abb. 2.1: Erdbeben auf dem Gebiet von Deutschland und Umgebung, Ausschnitte aus den Erdbeben-Katalogen. Für die Darstellung wurde jeweils die Erdbebenstärke-Größe verwendet, für die die größte Zahl an Einträgen im jeweiligen Katalog vorlag.

Tab. 2.1: Erdbeben-Kataloge, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt wurden

Erdbeben-Kataloge	durch den Erdbeben-Katalog abgedecktes Gebiet	hauptsächlich verwendete Magnituden
Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7]	Deutschland	M_L
EKDAG Erdbeben-Katalog; <i>Ahorner, Amstein, Golbs, Meidow, Schwarz und Meidow</i> [9]	Deutschland und angrenzende Gebiete	M_L, M_w
<i>Grünthal und Wahlström</i> [81]	Zentral-, Nord- und Nordwest-Europa	M_w
ECOS [49]	Schweiz u. angrenzende Gebiete	M_w
BGR Erdbeben-Katalog nach <i>Leydecker</i> [118]	Deutschland	M_L
<i>Papazachos et al.</i> [138]	Griechenland	M_L
<i>Ambraseys und Bilham</i> [14]	Afghanistan	M_L

Die möglichst genaue Erfassung der Erdbebenauswirkungen auf Menschen, Bauwerke und Natur im betroffenen Gebiet bildet die Grundlage für die Bestimmung der Intensitäten auf Basis der Intensitätsskalen.

Als eine der ersten stellten *de Rossi* und *Forel* in den Jahren 1874 – 81 eine Skala mit 10 Intensitätsstufen für seismische Bodenbewegungen auf. Im Laufe der Zeit wurden die Intensitätsskalen auf Grund zahlreicher Beobachtungen und Erfahrungen vielfach modifiziert und aktualisiert.

Als jüngstes Beispiel für die Arbeiten zur Verbesserung der Intensitätsskalen ist die Europäische Makroseismische Skala (EMS) aus dem Jahr 1998 [75] zu nennen. Die Intensitätsangaben im weiteren Verlauf dieser Arbeit beziehen sich, soweit nichts anderes angegeben ist, auf die EMS Skala. Relationen zwischen verschiedenen Intensitätsskalen wurden z.B. von *Smit* untersucht [174].

Die Intensitäten sind statistische Größen bezogen auf eine Fläche, wie z. B. eine kleinere Stadt, sie können daher nicht mit den Schäden einzelner Bauwerke oder an den Beschreibungen einzelner Zeugen festgelegt werden. Neben den lokalen topographischen und geologischen Verhältnissen beeinflussen die Herdmechanismen und Abstrahlungsverhältnisse sowie die Reflexionen und Refraktionen der seismischen Wellen die Verteilung der Schütterwirkungen um das Epizentrum.

2.2.2 Magnitudenskalen

Die Angabe der Erdbebenstärke auf einer Magnitudenskala gibt Auskunft über die bei Erdbeben-Ereignissen freigesetzte Energie in Form von abgestrahlten seismischen Wellen. Sie benötigen im Gegensatz zu den makroseismischen Intensitäten, welche mit Hilfe von Beobachtungen bestimmt werden, Messgeräte für die Ermittlung ihrer Größen. Die Magnituden sind ein quantitatives Maß für die im Zusammenhang mit Erdbeben-Ereignissen freigesetzte Energie. Verschiedene Methoden zur Magnituden-Bestimmung führen auf unterschiedlichen Skalen zu differierenden

Ergebnissen. Da die Bestimmung von Magnitudenwerten immer mit Unsicherheiten verbunden ist, ist es erforderlich, die möglichen Auswirkungen auf die Gefährdungsanalysen zu betrachten. Entsprechende Untersuchungen wurden z.B. von *Veneziano et al.* [186] oder *Rhoades und Dowrick* [145] publiziert.

Die Magnituden M stellen ein logarithmisches Maß für die im Hypozentrum freigesetzte Energie dar. Die Magnitudenskalen sind theoretisch nach oben und unten offen. Eine obere Grenze der Magnituden wird jedoch durch den Aufbau der Erdkruste gesetzt. Die Ursache für diese Obergrenze ist die begrenzte Kapazität der Erdkruste, sich anstauende Spannungen aufzunehmen. Auf die Methoden und Probleme der Ermittlung von maximal möglichen Magnituden wird in Abschnitt 2.8 eingegangen.

2.3 Raumzeitliche Verteilung von Erdbeben

Für die Betrachtung von Auftretenswahrscheinlichkeiten von Erdbeben existieren zeitabhängige und zeitunabhängige Modelle. In den zeitabhängigen Modellen steigt die Auftretenswahrscheinlichkeit mit der Zeit, die seit dem letzten größeren Erdbeben-Ereignis in einer seismischen Quelle vergangen ist an (vgl. z.B. *Cramer et al.* [40], *Pace et al.* [137]). Für viele Regionen sind jedoch keine ausreichenden Daten für zeitabhängige Betrachtungen vorhanden.

Aus diesem Grunde beschreiben die gebräuchlichen Modelle und auch die hier vorgestellte Epizentrendichte-Methode das Auftreten von Erdbeben-Ereignissen mit einem *Poisson*-Prozess.

Ein *Poisson*-Prozess ist ein theoretisches Modell, welches innerhalb eines festen zeitlichen Intervalls das Eintreten einer festen Anzahl von Ereignissen beschreibt, die einer *Poisson*-Verteilung folgen. Das heißt, die Auftretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben-Ereignissen ist zeitunabhängig von früheren Erdbeben-Ereignissen. Die Eintrittsrate λ stellt den Erwartungswert der *Poisson*-Verteilung dar.

Es wird von der Modellannahme der Stationarität der Seismizität ausgegangen, die eine der Grundannahmen für seismische Gefährdungsanalysen ist. (vgl. Abschnitt 2.4). Die Verwendung der Modellannahme ermöglicht es, die Auftretenswahrscheinlichkeiten von Erdbeben auf der Grundlage statistischer oder probabilistischer Analysen zu ermitteln. Mit dem theoretischen Modell der *Poisson*-Verteilung wird die absolute Häufigkeit, mit der ein bestimmtes Ereignis eintritt, betrachtet. Die *Poisson*-Verteilung ist eine Verteilung für die Anzahl von Ereignissen, die innerhalb einer Zeiteinheit auftreten.

Gegeben ist ein stochastisches Ereignis, das im Mittel nur einmal in einem zeitlichen Intervall t_1 auftritt und ein Zeitraum t_2 . Die *Poisson*-Verteilung P_λ mit $\lambda = t_2/t_1$ gibt die Eintretenswahrscheinlichkeit an, dass im Zeitintervall t_2 genau n Ereignisse stattfinden. So ist λ die Wahrscheinlichkeit für das mittlere Auftreten eines Ereignisses in einem Intervall.

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion der *Poisson*-Verteilung ist definiert durch die Gleichung (2.1).

$$P_\lambda = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!} \quad n = 0, 1, 2, \dots, \infty \quad \lambda > 0 \quad (2.1)$$

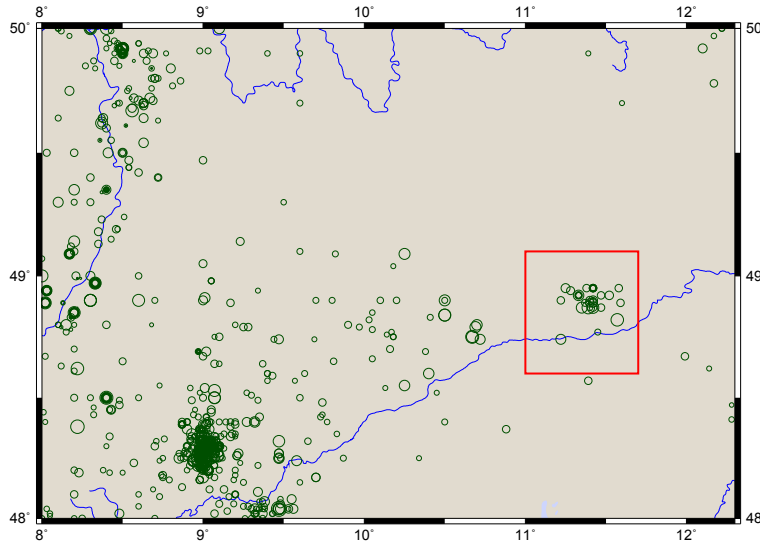


Abb. 2.2: Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1999

Das Auftreten mindestens eines Erdbeben-Ereignisses im Zeitraum t hat folglich eine Wahrscheinlichkeit von:

$$P_{(N \geq 1)} = 1 - e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

In ähnlicher Weise kann mit einem *Poisson*-Prozess (2.3) für ein bestimmtes Zeitintervall und eine bestimmte Überschreitenswahrscheinlichkeit die Eintretensrate λ bestimmt werden. Das Beispiel in (2.4) zeigt die Ermittlung der Rate für 10 % Überschreitenswahrscheinlichkeit in 50 Jahren.

$$\lambda = - \frac{\ln(1 - P_{(N \geq 1)})}{t} \quad (2.3)$$

$$\lambda = - \frac{\ln(1 - 0,1)}{50a} = 0,0021/a \quad (2.4)$$

Die in den Erdbeben-Katalogen enthaltenen Daten können als Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller jemals aufgetretenen und zukünftig noch auftretenden Erdbeben-Ereignisse angesehen werden. Mit Hilfe dieser Stichprobe wird auf die Verteilungsfunktion der Grundgesamtheit geschlossen und damit eine Überschreitenswahrscheinlichkeit ermittelt, die den Bereich der beobachteten Erdbeben-Ereignisse abdeckt. Durch eine Extrapolation der beobachteten Eintretenshäufigkeiten kann auf die Eintretenshäufigkeit von größeren, bisher nicht beobachteten, Beben-Ereignissen geschlossen werden.

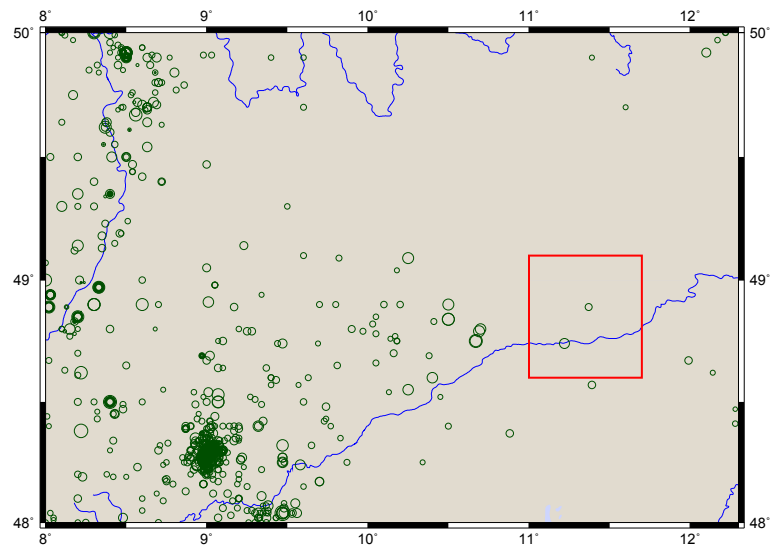


Abb. 2.3: Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1900 und 1930–1999

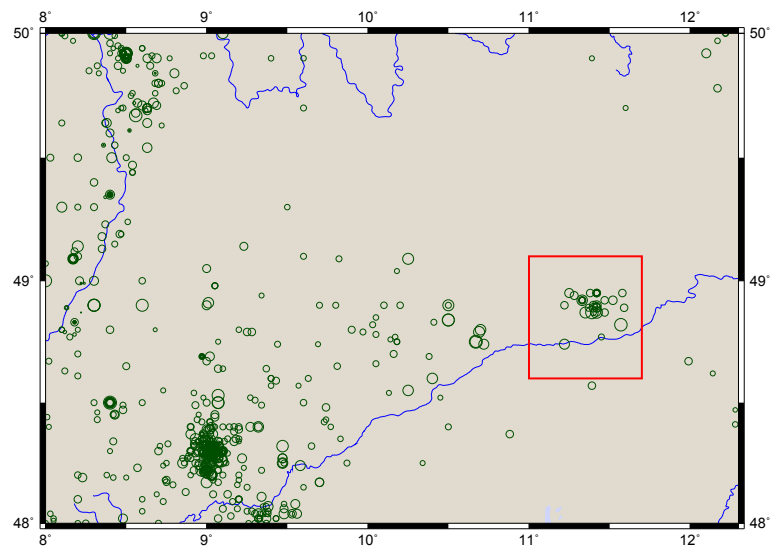


Abb. 2.4: Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1930 und 1960–1999

2.4 Stationarität der Seismizität

Seismische Gefährdungsanalysen beruhen auf der Grundannahme einer stationären Seismizität in Zeit und Raum. Aufgrund der relativ kurzen Beobachtungsreihen von Erdbeben-Ereignissen sind jedoch Instationaritäten des Erdbebenauftritts nicht völlig auszuschließen. Um diese Problematik an Beispielen zu erläutern, wird hier das Modellgebiet Südwestdeutschland aus Abschnitt 5.1 verwendet.

Die Abbildungen 2.2 und 2.3 zeigen beispielhaft Hinweise auf entsprechende Instationaritäten. So zeigt die Abbildung 2.2 alle Erdbeben des für dieses Beispiel verwendeten Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1999. In der Abbildung 2.3 fehlen die Erdbeben aus den Jahren 1900–1930, das sind ca. 3% des Beobachtungszeitraumes des verwendeten Erdbeben-Kataloges. Im Vergleich zur Abbildung 2.2 fehlen im rot markierten Bereich jedoch ca. 90% der Erdbeben. Für die folgenden 30 Jahre von 1930–1960 lassen sich in Abbildung 2.3 keine lokale Häufungen feststellen.

Indizien für eine Nichtstationarität der Seismizität in Zeit und Raum lassen sich auch an anderen Erdbeben-Katalogen und Regionen finden. Da der derzeitige Umfang an Datenmaterial noch nicht ausreichend ist, um die Frage der Stationarität, auch in größeren Gebieten, mit endgültiger Sicherheit zu klären, wird die Stationarität vorerst nur als Modellannahme seismischer Gefährdungsanalysen verwendet. Mit zunehmendem Prognosehorizont der seismischen Gefährdungsanalysen wächst die Unsicherheit in Bezug auf die Instationaritäten in Zeit und Raum.

2.5 Seismische Quellzonen

Die für die zonengebundenen Methoden seismischer Gefährdungsanalysen verwendeten seismischen Quellzonen dienen der Abgrenzung von Regionen mit unterschiedlichen seismischen Eigenschaften, dabei wird die in den einzelnen seismischen Quellzonen vorhandene Seismizität als gleichverteilt angenommen. In Gebieten wie der Bundesrepublik Deutschland mit geringer bis moderater Seismizität werden hauptsächlich flächenhafte seismische Quellzonen betrachtet. In Regionen mit größerer und gut dokumentierter Seismizität werden aber auch Linienquellen benutzt, um bekannte Verwerfungen und/oder Plattenränder zu erfassen.

Innerhalb einer seismischen Quellzone sollte:

- eine Gleichverteilung der Seismizität gegeben sein,
- ein einheitlicher Erdbeben-Mechanismus vorherrschen,
- ähnliche Übertragungseigenschaften der Erdbeben vorliegen und
- ausreichend viele Erdbeben-Ereignisse historisch belegt sein,

um eine sichere Abgrenzung der seismischen Quellzonen untereinander zu ermöglichen. Da einheitliche Erdbeben-Mechanismen nur lokal begrenzt nachgewiesen werden können und eine

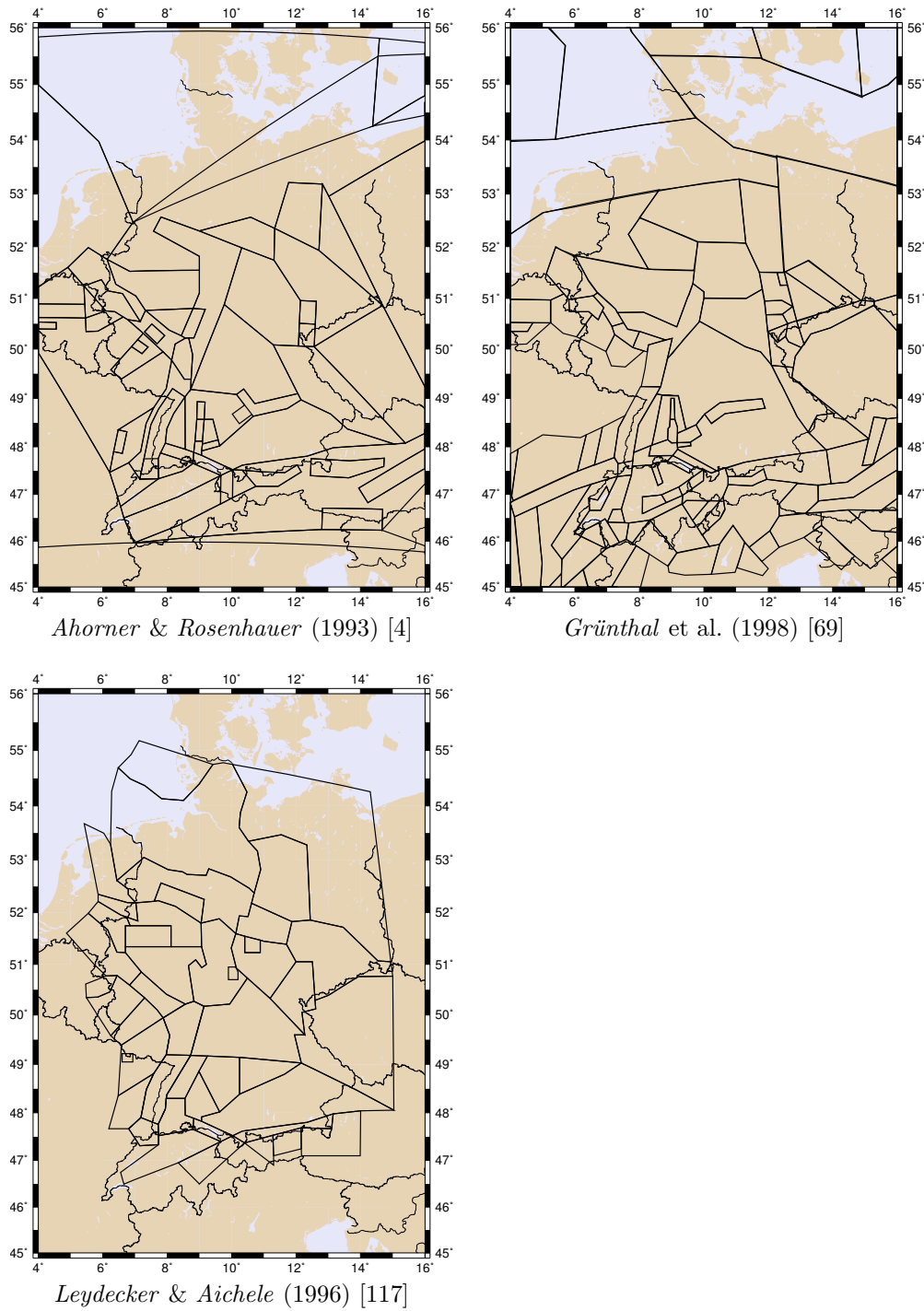


Abb. 2.5: Überblick über einige Einteilungen des Gebietes der Bundesrepublik in seismische Quellzonen, teils als Ausschnitt größerer Modelle

Gleichverteilung der Seismizität nicht immer zu erkennen ist, ist die Erstellung einer Einteilung in seismische Quellzonen zwangsläufig immer mit Unsicherheiten verbunden.

Von verschiedenen Autoren, wie z.B. *Ahorner* und *Rosenhauer*(1993) [4], *Grünthal* et al. (1998) [69] sowie von *Leydecker* und *Aichele* (1997) [117], liegen Modelle für die Einteilung der Bundesrepublik in seismische Quellzonen vor, die sich in einigen Regionen teils deutlich unterscheiden (vgl. Abbildung 2.5).

Von *Ahorner* und *Rosenhauer* [3] wurde ein Modell vorgestellt, dass die seismischen Quellzonen nach seismologischen und geologisch-tektonischen Kriterien abgrenzt. Das Modell wurde im Rahmen einer durch *König* und *Heunisch* koordinierten Forschungsarbeit erstellt, an der zahlreiche Fachleute mitgewirkt haben. Im Jahr 1993 wurden zu diesem Modell seismischer Quellzonen in [4] einige Detailänderungen publiziert.

Die Einteilung nach *Grünthal* und *Bosse* [69] wurde mit Fachleuten aus Österreich und der Schweiz abgestimmt und führte zu einer grenzüberschreitenden Einteilung in seismische Quellzonen für die betreffenden Staaten. Diese Einteilung bildete die Basis für die Erstellung der Erdbebengefährdungskarte in der DIN 4149 [45].

Die Abbildung 2.5 gibt einen Überblick der unterschiedlichen Einteilungen und spiegelt so die verschiedenen Meinungen der Autoren über die Einteilung der Bundesrepublik in seismische Quellzonen wider. Wird der Oberrheingraben beispielsweise in der von *Leydecker* und *Aichele* vorgeschlagenen Einteilung durch eine Region repräsentiert, teilen andere Autoren den Oberrheingraben in einen nördlichen, mittleren und in einen südlichen Teil ein.

Nach *Ahorner* und *Rosenhauer* [4] basiert die Ermittlung seismischer Quellzonen auf folgenden Punkten :

1. regionale Anordnung der in historischer Zeit aktiven Erdbebenherde
2. Häufigkeitsverteilung und Stärke der bisher beobachteten Erdbeben-Ereignisse
3. geologisch-tektonischer Aufbau des Gebietes mit Beachtung von jüngsten Bewegungsvorgängen im Quartär und der Bruchschollentektonik
4. seismotektonische Eigenheiten (vorherrschende Verschiebungsrichtungen, lokale Variationen des tektonischen Spannungsfeldes).

Je nach wissenschaftlicher Auffassung gelangen die beteiligten Autoren zu verschiedenartigen Einteilungen. Dadurch treten teils größere Differenzen bei der Festlegung von deterministischen Bemessungserdbeben nach KTA Regel 2201.1 auf (vgl. z.B. *Brunzema* und *Hinzen* [34]). Die Ergebnisse seismischer Gefährdungsanalysen hängen zum Teil von der Wahl des Modells seismischer Quellzonen ab. Dies hat zur Motivation, eine möglichst objektive zonenfreie seismische Gefährdungsanalyse zu entwickeln, beigetragen [143].

2.6 Erdbebenstärke-Häufigkeiten

2.6.1 Gutenberg - Richter - Relation

Die Tatsache, dass wesentlich mehr kleinere als größere Erdbeben-Ereignisse in der Natur vorkommen, veranlasste *Gutenberg* und *Richter* [88], empirische Magnituden-Häufigkeits-Relationen aufzustellen.

Nach *Gutenberg* und *Richter* folgt die Anzahl der Erdbeben N mit einer Magnitude größer als M der Beziehung (2.5), wobei a und b Parameter sind die je nach seismischer Herdregion variieren und die mittlere jährliche Häufigkeit für das Auftreten von Magnituden $\geq m$ mit λ bezeichnet wird.

$$\begin{aligned}\lambda_m(m \leq M) &= 10^{a-bm} & (2.5) \\ \text{bzw. mit } \alpha &= \ln(10)a \\ \text{und } \beta &= \ln(10)b \\ \lambda_m(m \leq M) &= e^{\alpha-\beta m}\end{aligned}$$

Um die zur Bestimmung der Parameter a und b notwendige Regressionsanalyse durchführen zu können, wird eine ausreichende Anzahl von Datensätzen unabhängiger Erdbeben-Ereignisse benötigt.

Aus historischen Gründen liegen die Erdbebendaten in verschiedenen Magnituden und Intensitätsskalen vor. Für die Regressionsanalysen sind entsprechende Umrechnungen auf eine einheitliche Magnitudenskala notwendig.

In Seismizitätsmodellen wird deshalb mit oberen und unteren Magnitudengrenzen gearbeitet. Die für die Obergrenze nötige maximal Magnitude wird empirisch festgelegt, die Untergrenze wird durch die verwendete Datenbasis bestimmt oder die kleinsten ingenieurmäßig relevanten Erdbeben.

2.6.2 Verallgemeinerte Gumbel - Verteilung

Für die Anpassung von Zeitreihen mit einer Extremwertcharakteristik eignen sich asymptotische Extremwert-Verteilungen wie z.B. die verallgemeinerte *Gumbel* - Verteilung [86].

In Bereichen größerer Wiederkehrperioden schlagen *Ahorne* und *Rosenhauer* vor, die Magnituden - Häufigkeits - Verteilungen mit extremwertstatistischen Methoden zu ermitteln und einen Parameter (τ) zu verwenden, der die asymptotische Annäherung an die maximal Magnitude (M_{max}) beschreibt [147].

Im Gegensatz zu der *Gutenberg* - *Richter* - Relation, die ohne die Festlegung einer empirischen Obergrenze eine Extrapolation bis zu beliebig großen Magnituden erlaubt, erreicht die Magnituden - Häufigkeitsrelation auf Basis der verallgemeinerten *Gumbel* - Verteilung eine empirische Obergrenze ($M < M_{max}$) stetig. Gefährdungsanalysen auf Basis der *Gutenberg* - *Richter* - Relation (z.B. *Cornell* [38]) betrachten aus diesem Grund die *Gutenberg* - *Richter* - Relation nur bis zur maximal Magnitude, was eine Unstetigkeitsstelle in der Verteilungsfunktion zur Folge hat.

Die Extrapolation für kleine Eintretensraten stellt dabei keine Prognose mit einer zeitlichen Zuordnung dar. Vielmehr wird der extrapolierte Wert im statistischen Mittel nur einmal in der angegebenen Wiederkehrzeit für eine unendliche Anzahl von Stichproben erwartet.

Es ist demzufolge zu überprüfen, inwieweit sich eine solche Datenvorauswahl, die in Abhängigkeit von der Seismizität der konkret ausgewerteten Seismizitätsklasse bzw. Zone unterschiedlich dargestellt, letztlich auf die konkreten Ergebnisse der seismischen Gefährdungsanalyse auswirkt.

2.7 Vollständigkeit historischer Erdbebendaten

Die historisch überlieferten und für die Erdbebenforschung verwertbaren Erdbebenaufzeichnungen reichen in Mitteleuropa, je nach Region und Intensität, bis etwa 1000 Jahre zurück. Eine systematische Erfassung von Erdbeben-Ereignissen begann jedoch erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Für die Erdbebenforschung verwertbar gelten historische Quellen, in denen das Erdbebengebiet und der Umfang der aufgetretenen Schütterwirkungen und/oder Schäden hinreichend gut dokumentiert sind.

Für das Gebiet der Bundesrepublik lässt sich festhalten, dass die Gebiete größerer Seismizität ungleichmäßig verteilt sind. Schadensverursachende Erdbeben-Ereignisse sind bisher verstärkt im Westen und Südwesten Deutschlands aufgetreten. Die Schwäbische Alb, der Oberrheingraben zwischen Basel und Wiesbaden und die Niederrheinische Bucht sind als die wichtigsten Erdbebengebiete zu nennen. Große Gebiete der Bundesrepublik sind, im Vergleich mit den genannten Regionen, als erdbebenarm einzuordnen.

Es ist davon auszugehen, dass nicht alle Erdbeben-Ereignisse vollständig überliefert worden sind. Je nach Intensität, historischem Hintergrund oder Region bestehen im Erdbebendatenbestand zeitliche und qualitative Datenlücken. Der Zeitraum, in dem instrumentelle Erdbebenaufzeichnungen vorliegen, ist nur etwa ein Zehntel so lang wie der Zeitraum, in dem ausschließlich historisch überlieferte Erdbebenberichte vorliegen.

Um eine hohe Qualität von seismischen Gefährdungsanalysen zu sichern, sind Vollständigkeitsanalysen der Erdbeben-Katalogdaten erforderlich. Methoden zur Abschätzung der Vollständigkeit der Erdbeben-Kataloge sind z.B. in *Grünthal et al.* [72] und *Stepp* [176] beschrieben worden.

Für die seismische Gefährdungsbestimmung auf Basis von Epizentrendichte-Klassen sind Vollständigkeitsanalysen erforderlich, da die Vollständigkeit der Erdbeben-Ereignisse auch von ihrer Stärke abhängig ist und diese Daten zur Einteilung der Epizentrendichte-Klassen genutzt werden. Aus der Tabelle 2.2 können die Vollständigkeitszeiträume für Deutschland und Österreich entnommen werden. Die Vollständigkeitszeiträume geben Auskunft darüber, ab welchem Jahr davon auszugehen ist, dass Erdbeben der jeweiligen Intensität in den Erdbeben-Katalogen enthalten sind.

Neben den Vollständigkeitsanalysen der Erdbeben-Katalogdaten ist auch eine möglichst zuverlässige Schätzung der Magnituden historischer Erdbeben von hoher Bedeutung für eine belastbare seismische Gefährdungsanalyse.

Tab. 2.2: Intensitätsabhängige Vollständigkeitszeiträume von Erdbeben (n. *Grünthal* et al. [72])

Region	Vollständigkeitszeiträume für I_0						
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Rheingebiet	1875	1825	1775	1500	1250	1250	-
Sachsen/Thüringen	1850	1770	1700	1400	-	-	-
Schweiz	1875	1875	1650	1575	1300	1300	-
übriges Deutschland	1925	1875	1875	1750	1625		
Österreich	1900	1900	1850	1670	1550	1200	-

2.8 Magnitudengrenzen

Ein Parameter für seismische Gefährdungsanalysen, dessen Einfluss mit zunehmendem Prognosehorizont wächst, ist die maximal mögliche Erdbebenstärke in Abhängigkeit von der untersuchten Region. Die Frage nach den maximal möglichen Erdbeben-Ereignissen ist dabei eng mit der Frage der maximalen Spannungsaufnahmefähigkeit der Erdkruste verknüpft.

Die große Bandbreite der Parameter der Erdkruste in Bezug auf ihren stofflichen und strukturellen Aufbau als auch der Veränderungen und Bewegungen in Zeit und Raum macht es schwer, mit einem physikalisch-mathematischen Modell eine genaue Antwort zu geben. Aus diesen Gründen kann die maximal zu erwartende Magnitude nur empirisch abgeschätzt werden.

Die maximal erwartete Erdbebenstärke beeinflusst den Verlauf der Erdbebenstärke-Häufigkeits-Beziehungen (vgl. Abschnitt 2.6). Der Einfluss der erwarteten maximalen Werte der Magnituden auf die seismischen Gefährdungsanalysen nimmt mit geringerer Eintretenswahrscheinlichkeit, wie von *Grünthal* und *Bosse* in [71] und *Grünthal* und *Wahlström* in [80] beschrieben, zu. Die Eintretenswahrscheinlichkeit für die maximalen Erdbeben-Ereignisse geht gegen Null. Sie wird im Modell mit den Erdbebenstärke-Häufigkeitsbeziehungen mit einer angepassten *Gutenberg - Richter* Relation (vgl. 2.6.1) oder mit der *Gumbel - Typ III - Verteilung* (vgl. 2.6.2) abgebildet.

Hauptursache für die Unsicherheiten bei der exakten Bestimmung von maximal möglichen Erdbeben-Ereignissen sind die relativ kurzen Beobachtungszeitreihen im Vergleich mit den gewünschten relativ langen Prognosezeiträumen von Erdbeben. Es ist deshalb davon auszugehen, dass die maximal möglichen Erdbeben-Ereignisse in den Beobachtungen nicht enthalten sind. Durch die verstärkte Einbeziehung von Paläoseismologie und Neotektonik kann eine verbesserte Absicherung maximal möglicher Erdbeben-Ereignisse erreicht werden. Anhaltspunkte für die Ermittlung der Größe maximaler Erdbeben-Magnituden sind z.B. in *Grünthal* [82] zu finden. Von *Ahorner* et al. wurde für das Gebiet der Bundesrepublik in [3] ein statistisch signifikanter Schätzwert der Magnitudenobergrenze von $M_{Lmax} = 6,75$ angegeben. Da die Überschreitensrate für den Schätzwert der Magnitudenobergrenze gleich Null ist, bedeutet dieses Ergebnis, dass bereits Erdbeben-Ereignisse mit einer Magnitude $M_L = 6,5$ eine sehr geringe Überschreitensrate aufweisen und für das Gebiet der Bundesrepublik als äußerst selten anzusehen sind.

2.9 Abnahmebeziehungen

Die Dämpfung der Energiedichte von seismischen Wellen mit zunehmender Laufzeit bzw. Entfernung vom Epizentrum beruht auf mehreren Ursachen. Als Ursachen für die Dämpfungsvorgänge der seismischen Wellen sind geometrisch und thermisch bedingte Phänomene zu betrachten.

Die geometrischen Ursachen lassen sich auf eine zunehmende Verteilung der Energie im Raum zurückführen. Die Gesamtenergie der seismischen Wellen im Raum bleibt dabei erhalten. Die Energiedichte der Oberflächenwellen nimmt geometrisch mit der Entfernung vom Herd ab, diejenige der Raumwellen mit $1/R^2$.

Im Gegensatz zu den geometrischen Ursachen beruhen die thermischen Dämpfungsursachen auf einer imperfekten Elastizität des von den seismischen Wellen durchlaufenen Gesteines, die eine irreversible Umwandlung der seismischen Wellenenergie in Gesteinswärme verursachen.

Die Komplexität der Eigenschaften des von den seismischen Wellen durchlaufenen Untergrundes macht eine getrennte Betrachtung der Dämpfungsursachen für die seismische Gefährdungsanalyse und die Ermittlung der ingenieurseismischen Bemessungsgrößen nicht sinnvoll. Für die Betrachtung der Absorption seismischer Wellen werden daher die geometrisch und thermisch bedingten Dämpfungsursachen gemeinsam betrachtet. Mit den gemessenen Erdbebendaten werden empirische Abnahmebeziehungen entwickelt, die die Vorgänge phänomenologisch beschreiben, um flexibel und effizient die Dämpfung seismischer Wellen zu beschreiben.

Durch die Frequenzabhängigkeit der Absorption, die gewisse regionale Unterschiede aufweist (vgl. Abschnitt 7.6), sollten die Abnahmebeziehungen seismischer Wellen für die Ermittlung ingenieurseismischer Bemessungsgrößen frequenzabhängig betrachtet werden.

Für die Abschätzung der seismischen Gefährdung allgemeiner Hochbauten in Form von Eintretensraten der Intensität oder der Spitzenbodenbeschleunigung wird die Verwendung von frequenzunabhängigen empirischen Abnahmebeziehungen im Allgemeinen als (noch) ausreichend betrachtet.

Empirische Abnahmebeziehungen für seismische Wellen werden anhand von gemessenen Seismogrammen größerer Erdbeben aus verschiedenen Magnituden und Entfernungsbereichen oder aus beobachteten Abnahmen von Intensitäten mit der Entfernung vom Epizentrum mit mathematischen Regressionen bestimmt.

Die Regressionsfunktionen der empirischen Abnahmebeziehungen reflektieren die Erwartungswerte für Intensitäten, Bodenbeschleunigungen oder Beschleunigungsspektren. Um die stochastische Charakteristik der Abnahme der Amplituden seismischer Wellen richtig zu erfassen und damit die seismische Gefährdung möglichst realitätsnah beurteilen zu können, ist es erforderlich, Abweichungen der empirischen Abnahmebeziehungen vom Erwartungswert zu berücksichtigen.

Aufgrund der Tatsache, dass nur wenige Messdaten von Beschleunigungszeitverläufen von größeren Erdbeben-Ereignissen für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland vorliegen, ist es angeraten, permanente seismische Messungen mit einem möglichst dichten Stationsnetz durchzuführen, um so über kurz oder lang in den Besitz von entsprechenden Starkbeben-Messdaten zu gelangen. Die so gewonnenen Messdaten können für die empirische Entwicklung und Absicherung von Abnahmebeziehungen verwendet werden. Letztendlich kann auch die Frage geklärt werden, inwieweit sich die Abnahmebeziehungen aus anderen Regionen auf das Bundesgebiet anwenden lassen.

Kapitel 3

Methoden der Gefährdungsanalyse

Es ist nicht unmöglich, daß einmal jedes große Erdbeben mit geeigneten Apparaten an irgendeinem Punkte des Festlandes aufgezeichnet werden kann.

J. Milne

3.1 Deterministische Methoden

Deterministische Methoden (**D**eterministic **S**eismic **H**azard **A**nalysis) (DSHA)) nutzen die vorhandene Seismizität für die Gefährdungsanalyse. Das Ziel deterministischer Methoden ist es, eine Antwort auf die Frage „Wie groß kann im schlimmsten Fall ein Erdbeben an dem zu untersuchenden Standort werden?“ zu finden. Die Antwort auf diese Frage ist dabei im Gegensatz zu den probabilistischen Methoden nicht mit einem Auftretenszeitraum oder einer Wahrscheinlichkeitsangabe verbunden.

Werden die subjektiven Faktoren der deterministischen Methode richtig eingeschätzt, kann davon ausgegangen werden, dass die ermittelten seismischen Einwirkungen sicher sind.

Deterministische Methoden bedingen nach *Reiter* [144] die Abarbeitung folgender Schritte:

1. Identifizierung und Charakterisierung aller seismischen Quellen, die das Potential besitzen, am Standort signifikante Bodenbewegungen zu verursachen. Die Charakterisierung von Erdbebenquellen bedeutet in diesem Zusammenhang die Spezifizierung der Quellgeometrie und Bestimmung maximal möglicher Erdbeben der einzelnen seismischen Quellenregionen.
2. Als nächster Schritt folgt die Bestimmung der kürzesten Abstände zwischen den jeweiligen seismischen Quellen und dem zu untersuchenden Standort.
3. Auswahl des Erdbebens, welches am Standort die größte Bodenbewegung hervorruft (maßgebendes Erdbeben). Die Auswahl erfolgt durch den Vergleich der am Standort hervorgerufenen

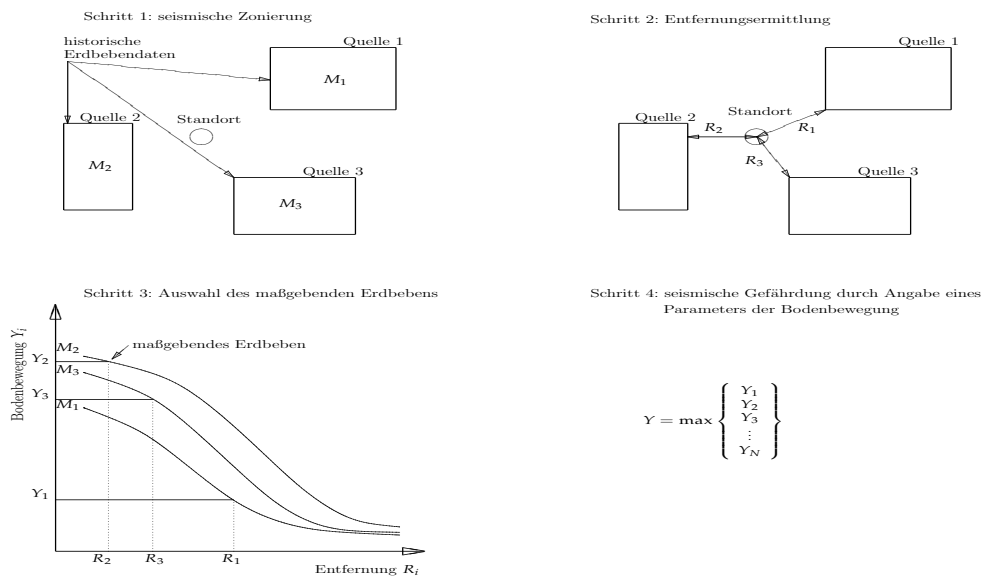


Abb. 3.1: Deterministische Gefährdungsanalyse in Schritten nach *Reiter* [144]

Bodenbewegung, verursacht durch die Erdbeben aus Schritt 1, mit der Epizentralentfernung aus Schritt 2. Das maßgebende Erdbeben ist das maximale Erdbeben einer seismischen Quellzone, welches an dem zu untersuchenden Standort die größten Bodenbewegungen hervorrufen würde.

- Anschließend wird für jede Quelle mit Hilfe von Abnahmebeziehungen in Abhängigkeit von der Magnitude M und der Epizentralentfernung Δ die Größe der Bodenbewegungen abgeschätzt. Die seismische Gefährdung des zu untersuchenden Standortes wird bestimmt durch die maximale Größe der Bodenbewegung.

Schematisch ist dieses Vorgehen in der Abbildung 3.1 dargestellt.

Als Vorteile der deterministischen Methode sind folgende Punkte zu nennen:

- relativ einfache und schnelle Ermittlung der seismischen Gefährdung,
- konservative Ergebnisse, d.h. Ergebnisse mit großer Sicherheit.
- Eignung als Plausibilitätstests

Nachteile der deterministischen Methode:

- Die Festlegung der nächstgelegenen seismisch aktiven Störung und ihrer Geometrie ist oft nicht eindeutig möglich; verborgene Störungen werden nicht als solche erkannt.
- Die Quantifizierung maximal möglicher Erdbeben-Ereignisse ist mit großen Unsicherheiten verbunden.

Die Schwierigkeiten bei der Ermittlung der standortnächsten seismisch aktiven Störung, insbesondere bei verborgenen Störungen und in Regionen mit geringer oder moderater Seismizität, wurden durch die Einführung von flächigen seismischen Quellzonen zum Teil gelöst. Es treten jedoch, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, weitere Probleme bei der Einteilung dieser flächigen seismischen Quellzonen auf (vgl. *Brunzema* und *Hinzen* [34]).

Da bekannt ist, dass die deterministische Methode sehr konservativ ist, kann der Bearbeiter dazu neigen, nicht das maximal mögliche Erdbeben-Ereigniss anzusetzen. An Stelle des maximal möglichen Ereignisses könnte der Bearbeiter versucht sein, den Erwartungswert des Ereignisses für die erwartete Nutzungszeit des zu errichtenden oder zu überprüfenden Bauwerkes zu verwenden. Die deterministischen Methoden führen schnell und relativ einfach zu plausiblen Ergebnissen. Infolge der vorhandenen Nachteile und Unsicherheiten sollten diese Methoden nur angewendet werden, wenn sich die Folgeschäden im Versagensfall in Grenzen halten. Die Berücksichtigung der Unsicherheiten kann mit Berechnungsmethoden auf Basis logischer Bäume erfolgen. Für die Absicherung der nach der KTA Regel 2201.1 [104] geforderten „wissenschaftlichen Erkenntnisse“ sind zusätzliche Untersuchungen mit probabilistischen Methoden angeraten. Deterministische Methoden, welche sich fest an den bisher gemachten Erdbebenbeobachtungen orientieren, weisen aus diesem Grunde ein größeres Maß an Zufälligkeit der Ergebnisse seismischer Gefährdungsanalysen auf. Diese Thematik wurde bereits in verschiedenen Beiträgen beschrieben, beispielhaft seien hier die Arbeiten von *Ahorner* und *Budny* [3], *Brunzema* und *Hinzen* [34] sowie von *Raschke* und *Schwarz* [143] genannt.

3.2 Probabilistische Methoden

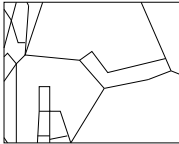
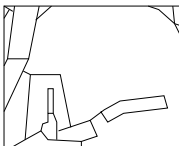
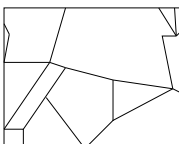
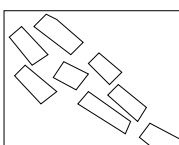
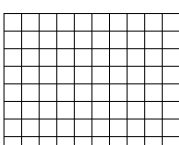
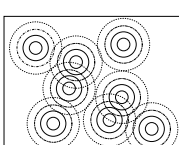
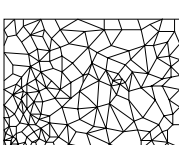
3.2.1 Prinzipielle Vorgehensweise

Die Aufsummierung von Überschreitenswahrscheinlichkeiten einer Bodenbewegungsgröße an einem Standort ermöglicht es, die seismische Gefährdung durch die Angabe von Wahrscheinlichkeiten zu bewerten. Im Allgemeinen wird eine Methode als probabilistisch bezeichnet, wenn das Eintreten von Ereignissen, wie z.B. Erdbeben mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten berechnet wird. Die Abbildung 3.2 zeigt das prinzipielle Vorgehen probabilistischer Gefährdungsanalysen.

Die von *Cornell* im Jahr 1968 vorgestellte probabilistische Methode [38] zur seismischen Gefährdungsanalyse auf Basis von seismischen Quellen bildet die Grundlage für die heute angewendeten probabilistischen Methoden.

Eine Vielzahl von Autoren (z.B. *McGuire* [124], *Algermissen* und *Perkins* [11], *Sägesser* und *Mayer-Rosa* [152], *Kárník*, *Schenkova* und *Schenk* [97], *Schenk*, *Grünthal* und *Schenkova* [154], *Grünthal* [70], *Ahorner* und *Rosenhauer* [4], *Frankel* [61], *Cramer* et al. [40] und *Pace* et al. [137]) hat auf Grundlage des von *Cornell* vorgelegten Beitrages weitere Untersuchungen durchgeführt. Erdbeben können aufgrund der Streuungen ihrer Parameter wie stochastische Ereignisse betrachtet werden. Probabilistische Methoden (**P**robabilistic **S**eismic **H**azard **A**nalysis(PSHA)) können im Gegensatz zu den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen deterministischen Methoden

Tab. 3.1: Schematische Darstellung von Einteilungen eines Untersuchungsgebietes in seismische Quellen zur Durchführung von seismischen Gefährdungsanalysen

Typ	Geometrie	Bezeichnung und Grundlagen	Beispiel
		seismotektonische Zonen	
zonengebunden		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben, besondere Berücksichtigung von freigesetzter Erdbebenenergie pro Fläche	<i>Ahorner</i> und <i>Rosenhauer</i> [3]
		seismische Quellzonen	
		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben, seismotektonische Kriterien, und beobachtete räumliche Erdbebenverteilung, Einordnung in europäisches Gesamtkonzept	<i>Grünthal</i> und <i>Bosse</i> [72]
		Erdbebengeographische Einteilung	
		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben, Einteilung in Quellzonen mit Bezug zur Geographie	<i>Leydecker</i> und <i>Aichele</i> [117]
		seismogenic boxes	
Übergangsbereich		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben, Modell wird nur für die Regionen gebildet, die sich durch eine hohe Seismizität auszeichnen	<i>Boncio</i> , <i>Lavecchia</i> und <i>Pace</i> [29]
		Raster	
		Verwendung eines fest definierten Rasters als eines von vier Teilmodellen	<i>Frankel</i> [61]
		Kernel	
zonenfrei		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben, Anwendung von Kernelfunktionen auf Epizentren	<i>Woo</i> [196]
		Epizentrendichte	
		Erdbeben-Kataloge historischer Erdbeben Nachbarschaftsanalyse der Epizentren mit <i>Voronoi</i> - Diagrammen	vorliegende Arbeit

Probabilistische seismische Gefährdungsanalysen auf der Grundlage von Epizentrendichten und ihre ingenieurpraktischen Anwendungsgebiete

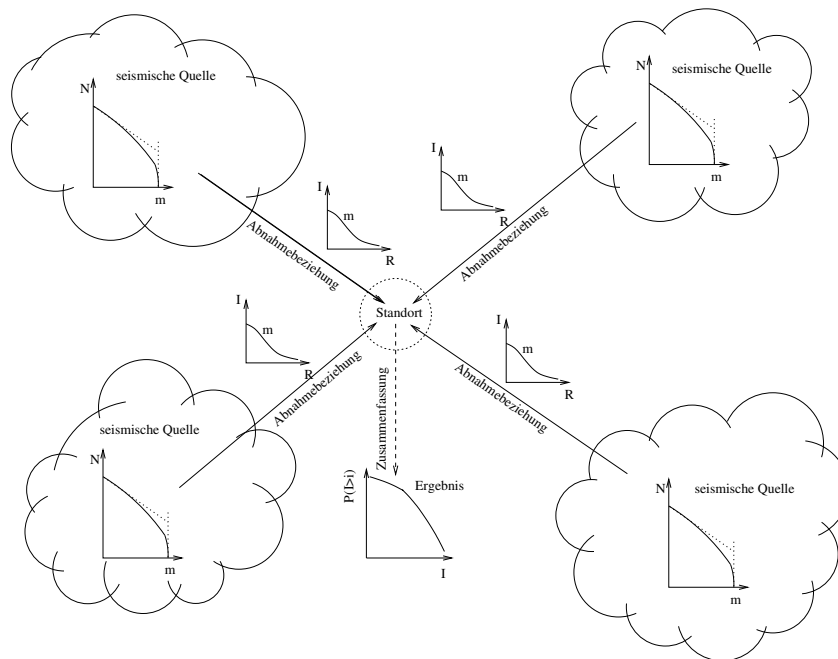


Abb. 3.2: Prinzip der probabilistischen Gefährdungsanalyse ohne Berücksichtigung des Modells der geographischen Einteilungen (zonengebunden, zonenfrei)

eine Überschreitungswahrscheinlichkeit für das Eintreten eines Erdbeben-Ereignisses mit einer bestimmten Größe in einem Zeitintervall abschätzen; dies ist einer der wesentlichen Vorteile gegenüber den in Abschnitt 3.1 beschriebenen deterministischen Methoden.

Die probabilistischen Methoden sind aus diesen Gründen heute die am häufigsten angewendeten Methoden in der Praxis der seismischen Gefährdungsanalyse. Sie eliminieren einige der aufgezeigten Nachteile der deterministischen Methoden, und ermöglichen die Untersuchung von größeren Datenmengen. Die Variablen des betrachteten Problems werden als stochastische Größen eingeführt, d.h. mit ihrem jeweiligen Verteilungstyp und den zugehörigen Parametern. Die vorhandenen Parameterunsicherheiten können mit der Entscheidungsbaum- oder der Monte Carlo - Methode, wie in Abschnitt 4.8 beschrieben, berücksichtigt werden.

Mit den Eintretenswahrscheinlichkeiten stehen dem auslegenden Ingenieur ungleich mehr Information zur Begründung seiner Auslegungs- und Konstruktionsentscheidungen zur Verfügung.

Als seismische Quellen können aktive Verwerfungen (Linien- oder Punktquellen) und flächenhafte seismische Quellen in Frage kommen. In Regionen in denen, wie in der Bundesrepublik, mit im internationalen Vergleich geringer bis moderater Seismizität und ohne bekannte und identifizierbare seismisch aktive Verwerfungen zu rechnen ist, wird oft mit Modellen gerechnet, die ausschließlich auf flächenhaften seismischen Quelle basieren. Diese flächenhaften seismischen Quellen werden zu entsprechenden Zonierungsmodellen zusammengefasst (vgl. Abschnitt 2.5). In Tabelle 3.1 sind

schematisch die in der Literatur verwendeten Einteilungen in seismische Quellen aufgezeigt.

Wie in Abschnitt 2.5 gezeigt wurde, sind auch die häufig verwendeten Einteilungen in seismische Quellzonen nicht frei von Kritik. Die in dem Abschnitt dargestellten Probleme führten in der jüngsten Vergangenheit zu Bestrebungen, entsprechende zonenfreie probabilistische Methoden zu entwickeln (vgl. 3.2.3). Als Beispiele für zonenfreie probabilistische Methoden sind die Arbeiten von *Frankel* [61], *Woo* [196] und *Crespo et al.* [41] zu nennen.

3.2.2 Zonengebundene Methoden

Um die seismische Gefährdung für einen Standort mit den zonengebundenen probabilistischen Methoden abschätzen zu können, wird ein Punkt betrachtet, der von seismischen Quellzonen umgeben ist. Ist kein seismisches Quellzonenmodell verfügbar, ist die Aufstellung eines solchen Modells der erste Schritt der hier beschriebenen Methode nach *Cornell* [38] (vgl. 3.3). Hinweise für die Aufstellung eines seismischen Quellzonenmodells sind in Abschnitt 2.5 zu finden.

Ferner werden für die Durchführung von probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen Erdbeben-Kataloge benötigt, die das Gebiet um den zu untersuchenden Standort großflächig abdecken. Jede der seismischen Quellzonen bekommt die Erdbeben-Ereignisse des Erdbeben-Kataloges zugeordnet, die sich auf dem geographischen Gebiet der Quellzone ereignet haben.

Nach der Zuordnung von Erdbeben-Ereignissen werden für jede der seismischen Quellzonen die aufgetretenen Erdbebenstärke-Häufigkeiten ermittelt. Die Spezifizierung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten kann dabei über die *Gutenberg/Richter* Relation (vgl. 2.6.1) oder mit der *Gumbel* Typ III Verteilung (vgl. 2.6.2) erfolgen. Es ist dabei insbesondere auf die Probleme bei der Bestimmung maximaler Magnituden zu achten.

$$\lambda = \sum_{i=1}^{N_i} \nu_i \int_{m_o}^{m_{max}} \int_0^{r_{max}} P[Y > y|m, r] f_M(m) f_R(r) dm dr \quad (3.1)$$

Diskretisierung von (3.1) für rechentechnische Verarbeitung

$$\lambda \approx \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_k} \nu_i P[Y > y|m_j, r_k] P_M[M = m_j] P_R[R = r_k] \quad (3.2)$$

Für (3.1) und (3.2) gilt :

$$\begin{aligned} P_M[M = m_j] &= f_M(m_j) \frac{(m_o - m_u)}{N_i} \\ P_R[R = r_k] &= f_R(r_k) \frac{r_{max}}{N_k} \\ m_j &= m_o + \frac{(j - 0,5)(m_o - m_u)}{N_i} \\ r_k &= \frac{(k - 0,5)r_{max}}{N_k} \end{aligned}$$

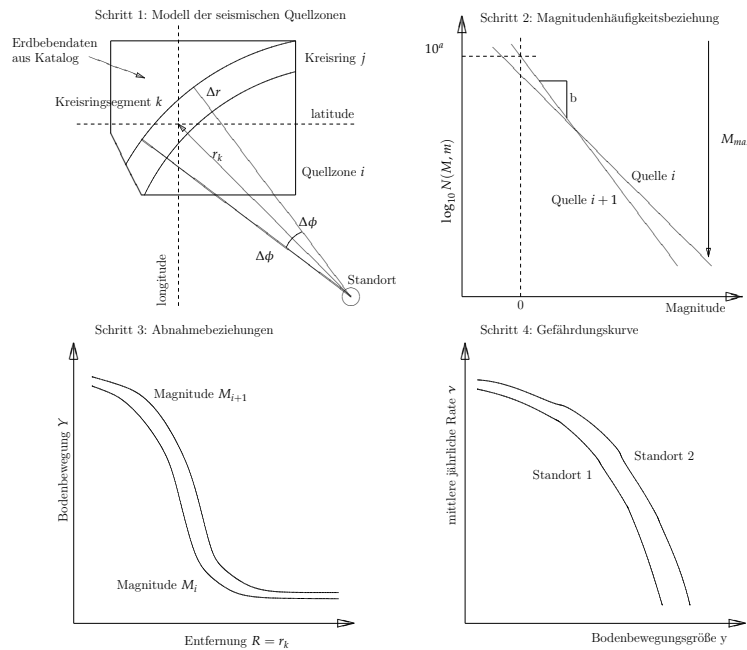


Abb. 3.3: Probabilistische Gefährdungsanalyse auf Basis einer zonengebundenen Methode (nach Cornell [38], Grafik nach Kramer [102])

mit den folgenden Variablen :

- N_i, N_k, N_j Anzahl der Quellzonen, Entfernungs- und Magnitudenintervalle;
- $f_M(m)$ Funktion der Erdbebenstärke (Magnitude, Intensität);
- m_o bzw. m_u obere bzw. untere Erdbebenstärke-Grenze;
- r_{max} maximal berücksichtigte Hypozentralentfernung des Untersuchungsgebietes;
- $f_R(r)$ Funktion der Entfernung.

Um die seismische Gefährdung für die nächsten (n) Jahre zu berechnen, wird zuerst eine Höhe des zu untersuchenden Bodenbewegungsgröße festgelegt. Mit dem Wissen um die Abnahme der Bodenbewegung mit zunehmender Entfernung (Δ) vom Epizentrum kann abgeschätzt werden, wie weit ein Erdbeben mit einer bestimmten Magnitude (M) entfernt sein muss, um die Bodenbewegungsgröße am Standort nicht zu überschreiten.

Es wird ein Kreis um den betrachteten Standort mit dem Radius (r) angenommen. Teilt der Kreisbogen seismische Quellzonen, ist zu untersuchen, welcher Teil der Fläche der seismischen Quellzonen innerhalb des Kreises liegt. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Erdbebens mit der Magnitude M innerhalb des Kreises und innerhalb einer seismischen Quellzone lässt sich aus dem Produkt von Flächenverhältnis (Fläche der seismischen Quellzone innerhalb des

Kreises/Gesamtfläche der Quellzone) und Eintretensrate innerhalb der seismischen Quellzone rechnerisch abschätzen (vgl. Abbildung 3.3).

Diese Berechnung ist für alle in Frage kommenden Magnituden und für alle seismischen Quellzonen zu wiederholen. Durch die Summation der einzelnen Überschreitungswahrscheinlichkeiten ergibt sich eine Gesamtüberschreitenswahrscheinlichkeit für die betrachtete Standortintensität im Zeitraum von n Jahren (3.1, 3.2). Die gesamte Berechnung wird für jede zu ermittelnde Standortintensität wiederholt.

Als Nachteil der zonengebundenen probabilistischen Methoden ist die Verwendung der mit Unsicherheiten behafteten seismischen Quellzonen zu nennen. Die Berücksichtigung der Unsicherheiten der seismischen Quellzonen kann mit logischen Bäumen oder durch die noch recht jungen Ansätze der zonenfreien Modelle erfolgen.

3.2.3 Zonenfreie Methoden

3.2.3.1 Übersicht

International gibt es Beiträge, die mit zonenfreien probabilistischen Methoden nach Möglichkeiten zu suchen, die Probleme zonenbasierter Methoden zu lösen. Die Epizentrendichte-Methode lässt sich in die zonenfreien probabilistischen Gefährdungsanalysen einordnen. Die zonenfreien Methoden sind Entwicklungen der jüngeren Vergangenheit. Mit den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse einer durchgeführten Quellenrecherche zu diesem Thema vorgestellt.

Lapajne et al. stellen in [111] eine Methode vor, mit der seismische Quellzonen auf Basis der Epizentren- und Energiedichte abgegrenzt werden können. Die Autoren weisen in ihrem Beitrag auf die begrenzten Anwendungsmöglichkeiten dieser seismischen Quellzonen hin und schreiben, dass infolge der kleinen Flächeninhalte ihre seismischen Quellzonen nur begrenzt anwendbar sind. Es waren mehrere Beiträge zu finden, die sich mit der von *Woo* vorgestellten zonenfreien Kernel-Estimation-Methode [196], [197] beschäftigten [41], [129]. Aus den gesichteten Beiträgen lässt sich ableiten, dass den konventionellen probabilistischen zonenbasierten Methoden [38], [124] nach wie vor ein großes Gewicht eingeräumt wird. Die gefundenen Beiträge, die sich mit einem Vergleich zonenfreier und zonengebundener Methoden beschäftigen, lassen noch keinen endgültigen Schluss zu, ob mit den neueren zonenfreien Methoden generell andere Ergebnisse der Gefährdungsanalysen zu erwarten sind.

Während *Crespo* und *Marti* in ihrem Beitrag [41] nahezu identische Ergebnisse mit zonenfreien und zonengebundenen Methoden vorstellen, zeigen *Molina*, *Lindholm* und *Bungum* in [129] Differenzen auf.

3.2.3.2 4-Modell Methode nach *Frankel*

Die von *Frankel* in [61] vorgestellte zonenfreie Methode beruht auf der Zusammenfassung von vier Teilmodellen, für die ein zeitunabhängiger *Poisson* - Prozess für das Eintreten von Erdbeben zugrunde gelegt wird (Einordnung vgl. Tabelle 3.1). Die Teilmodelle 1 und 2 basieren auf der Analyse der räumlichen Verteilung der Erdbeben. Teilmodell 1 verwendet dabei die kleineren

Erdbeben aus einem kürzeren Zeitraum. Teilmodell 2 verwendet einen größeren Zeitraum, jedoch ohne die kleinen Ereignisse. Für die Teilmodelle 1 und 2 erfolgt eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in ein Raster. Dabei wird eine Kantenlänge von ca. 11 km verwendet. Für die Ermittlung der Eintretensraten werden die Gleichungen (3.3) und (3.4) verwendet. Das Raster von n_i Werten wird mit einer *Gauss*-Funktion geographisch geglättet. Für jedes Rasterelement i ergibt sich der normalisiert und geglättete Wert \tilde{n}_i aus (3.3).

$$\tilde{n}_i = \frac{\sum_j n_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}}{\sum_j e^{-\Delta_{ij}^2/c^2}} \quad (3.3)$$

Die verwendete Korrelations Distanz ist c . Δ_{ij} ist die Entfernung zwischen dem i -ten und j -ten Rasterelement. Es wird die Summe über die Zellen j berechnet mit der Entfernung $3c$ der Zellen i . Für die weitere Bewechnung werden die \tilde{n}_i Werte in Klassen der Entfernung so zusammengefasst, dass N_k die Summer aller \tilde{n}_i Werte mit einer Entfernung ist. Die jährliche Überschreitensrate $\lambda(u > u_0)$ einer Bodenbewegungsgröße an einem Standort ermittelt sich dann nach (3.4),

$$\lambda(u > u_0) = \sum_k \sum_l 10^{(\log(N_k/T) - b(M_l - M_{ref}))} P(u > u_0 | D_k M_k) \quad (3.4)$$

wobei k der Index der Entfernungsklasse und l der Index der Magnitudenklasse ist. T ist die Zeit in Jahren die zur Bestimmung von N_k verwendet wird.

Mit Teilmodell 3 wird ein gleichverteilter Seismizitäts - Hintergrund über das gesamte Untersuchungsgebiet betrachtet. Die Analyse erfolgt wie in (3.4) mit dem Unterschied, dass N_k gleichverteilt ist.

Mit dem Teilmodell 4 werden die Eintretensraten an den bekannten tektonischen Störungen ermittelt, sofern ausreichend Daten vorhanden sind. Die Eintretensraten für das gesamte Untersuchungsgebiet werden anschließend interpoliert.

Die Eintrenensrate für das Gesamtmodell ermittelt sich aus der subjektiven Gewichtung der Eintretensraten der Teilmodelle. *Frankel* benutzt für das Beispiel in seinem Beitrag für die Teilmodelle 1 bis 4 eine Gewichtung von 0,5; 0,25; 0,25 und 1.

Für vier Standorte in Zentral- und Nordost Amerika ist ein Vergleich der Ergebnisse der 4-Modell Methode mit einer herkömmlichen zonenbehafeten seismischen Gefährdungsanalyse des Electric Power Research Institute (EPRI) [54] angegeben. Es konnte eine gute Übereinstimmung der zonenfreien 4-Modell Methode gezeigt werden.

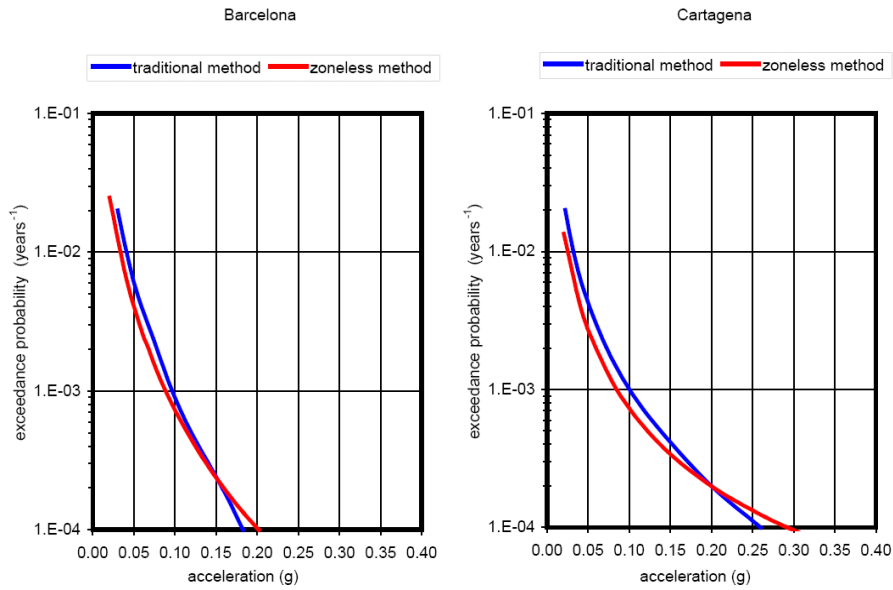
3.2.3.3 Kernel-Estimation-Methode nach *Woo*

Abb. 3.4: Vergleich zonenfrei vs. zonengebunden von *Crespo* und *Martí*, Abbildung entnommen aus [41]

Die Kernel-Estimation-Methode von *Woo* basiert auf Auswertungen der Erdbeben-Kataloge. Die Erdbeben-Katalog-Daten werden mit statistischen Kernel-Funktionen geographisch geglättet. Dabei wird auf die Verwendung von seismischen Quellzonen verzichtet.

Die Eintretensrate $\lambda(M, x)$ am Punkt x ist nach *Woo* definiert als Kernel $K(M, x)$ Summe über die historischen Daten, wobei der Beitrag jedes Ereignisses invers seiner effektiven Wiederholrate gewichtet ist. $T(x_i)$ ist dabei die effektive Zeit der Beobachtungs Periode.

$$\lambda(M, x) = \sum_{i=1}^N \frac{K(M, x - x_i)}{T(x_i)} \quad (3.5)$$

Crespo und *Martí* zeigen in [41] einen Vergleich der zonengebundenen Methode nach *Cornell* mit der zonenfreien Kernel-Estimation-Methode nach *Woo*. Sie zeigen vergleichbare Ergebnisse für die seismische Gefährdung beider Methoden am Beispiel von vier Standorten in Spanien. In Regionen mit niedriger bis moderater Seismizität empfehlen *Crespo* und *Martí* ausdrücklich die Abwendung der zonenfreien Methode nach *Woo* [196].

Kapitel 4

Epizentrendichte-Methode

*Am 1. November 1755 ereignete sich das Erdbeben von Lissabon, und verbreitete über die in Frieden und Ruhe schon eingewohnte Welt einen ungeheuren Schrecken. Eine große prächtige Residenz, zugleich Handels- und Hafenstadt, wird ungewarnt von dem furchtbarsten Unglück betroffen.
J. W. Goethe*

4.1 Vorgehensweise und Bearbeitungsschritte

Am Anfang stand die Suche nach einem geeigneten Verfahren zur Bestimmung der geographischen Verteilung einer Anzahl von Punkten (hier: Orte der Epizentren historisch berichteter Erdbeben-Ereignisse) in der Ebene. Nachdem mit den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Raster-Einteilungen keine wesentlichen Fortschritte zu erreichen waren, wurden die Untersuchungen mit *Voronoi*-Diagrammen fortgesetzt. Die von *Voronoi* eingeführten *Voronoi*-Diagramme für die Nachbarschaftsanalyse von Punkten in der euklidische Ebene erschienen für die Ermittlung der geographischen Verteilung der Epizentren besser geeignet zu sein, da sie dynamisch die Größe der *Voronoi*-Regionen an die Dichte der Epizentren anpassen (vgl. Abbildung 4.9).

Die geographische Verteilung der historisch überlieferten Erdbeben-Ereignisse werden aus diesem Grunde mit den nach *Voronoi* benannten Diagrammen bestimmt. Die *Voronoi* - Diagramme für die Nachbarschaftsanalyse und deren Ermittlung mit dem "Divide and Conquer" Algorithmus werden in Abschnitt A.2.1 ab Seite 142 und nachfolgend erläutert.

Die Auswertung der *Voronoi*-Diagramme führt zu Dichteverteilungen der überlieferten Erdbeben. Diese Dichteverteilungen werden dazu benutzt, Regionen mit ähnlicher Epizentrendichte in entsprechende Epizentrendichte-Klassen, wie in Abschnitt 4.6 beschrieben, einzuteilen.

Die so gewonnenen Einteilungen in Epizentrendichte-Klassen werden analog der üblichen Einteilungen in seismische Quellzonen mit der von *Ahorner* und *Rosenhauer* in [4] vorgestellten Methode ausgewertet. Dabei wird der Einfluss von synthetischen Erdbeben-Katalogen, welche mit Monte Carlo-Simulationen auf Grundlage der beobachteten Seismizität erstellt worden sind, auf einen zu betrachtenden Standort untersucht.

Hierbei werden stochastisch verteilte Parameter mit Monte Carlo-Simulation ausgespielt und deren Wirkung auf einen zu betrachtenden Standort wird nachfolgend untersucht. Die so simulierten Erdbeben, die eine Überschreitung der am Standort festgelegten Intensität verursachen, werden anschließend verwendet, um die seismische Gefährdung des Standortes zu bestimmen. Einteilungen in seismische Quellzonen könnten durch die vorgestellte Epizentrendichte-Methode abgelöst werden.

4.2 Raster-Einteilungen

Als einfachste Möglichkeit bietet sich die Einteilung des Untersuchungsgebietes in ein Raster an, wie sie auch von anderen Autoren wie z.B. *Frankel* in [61] vorgenommen wurde. Für die Ermittlung der Epizentrendichte wurden Untersuchungen mit verschiedenen Rastergrößen des Untersuchungsgebietes durchgeführt (vgl. Abbildung 4.1 und 4.1). Aufgrund der Tatsache, dass in einigen Regionen des Untersuchungsgebietes keine Daten von Erdbeben-Ereignissen und in anderen Gebieten eine relativ hohe Zahl von Daten vorliegt, ist es nicht einfach, eine passende Rastergröße zu wählen, da sich zeigte, dass die Ergebnisse zum Teil von der gewählten Rastergröße beeinflusst werden. Es lässt sich die folgende Schlussfolgerung ziehen:

Die Verwendung von Rastermodellen ist für die seismische Gefährdungsanalyse nur bedingt geeignet, da eine Variation der Rastergröße einen erheblichen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Beispielhaft für diese Aussage stehen die Ergebnisse der mit den Epizentrendichte-Rastern berechneten Gefährdungskurven für die 6 Modellpunkte in Südwestdeutschland (vgl. A.4).

4.3 Einordnung der Epizentrendichte-Methode

Die bisher verwendeten Verfahren für probabilistische seismische Gefährdungsanalysen in Regionen mit geringer bis moderater Seismizität basieren zu einem großen Teil auf Einteilungen in flächige seismische Quellzonen. Diese heute üblichen Verfahren sind in 3.2 beschrieben. Hinweise zu den seismischen Quellzonen und den damit verbundenen Problemen sind dagegen in Abschnitt 2.5 zu finden.

Die Qualität der seismischen Gefährdungsanalyse hängt wesentlich von der Qualität des Modells der seismischen Quellzonen ab, deshalb sollte das Modell der seismischen Quellzonen so gut wie möglich die regional differierenden Seismizitäten abbilden.

Die bisherigen Verfahren probabilistischer seismischer Gefährdungsanalysen basieren auf der Annahme, dass die regionale Verteilung der Erdbeben innerhalb dieser seismischen Quellzonen konstant ist. Das heißt, eine Funktion für die geographische Verteilung der Erdbeben-Ereignisse innerhalb der seismischen Quellzonen wird nicht weiter betrachtet.

Der relativ geringe Datenbestand in Deutschland und Umgebung erfordert es, eine möglichst großflächige Unterteilungen von seismischen Quellzonen vorzunehmen, um die Erdbebenstärke-Häufigkeiten sicher bestimmen zu können. Unrealistische Ergebnisse können erwartet werden, wenn die Flächen der seismischen Quellzonen zu groß sind, und so die Seismizität in ihnen nicht

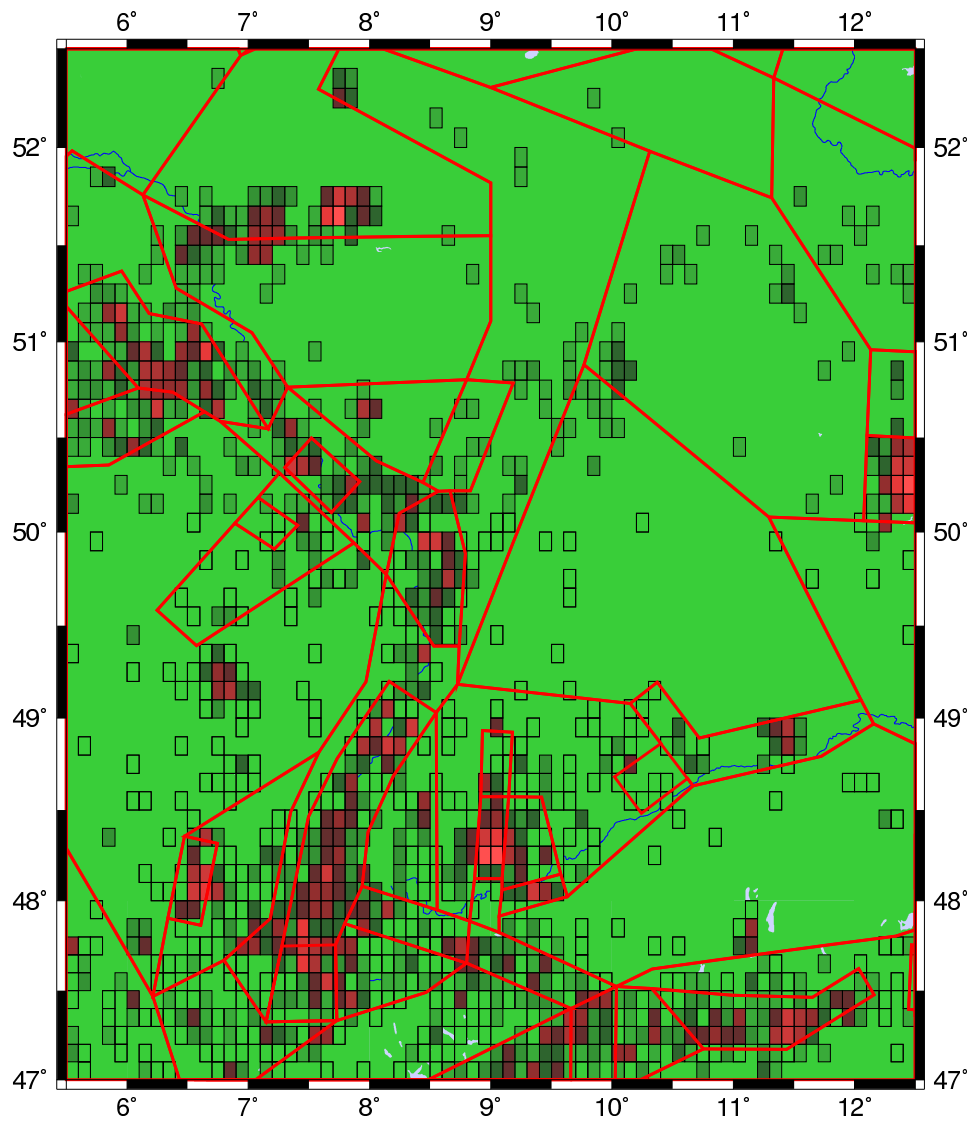


Abb. 4.1: Epizentrendichte-Raster-Modell des Oberrheingrabens mit einer Rasterweite von 0.1 Grad und die Zuordnung der Rasterelemente in Epizentrendichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach *Rosenhauer* und *Ahorner* (rote Linien)

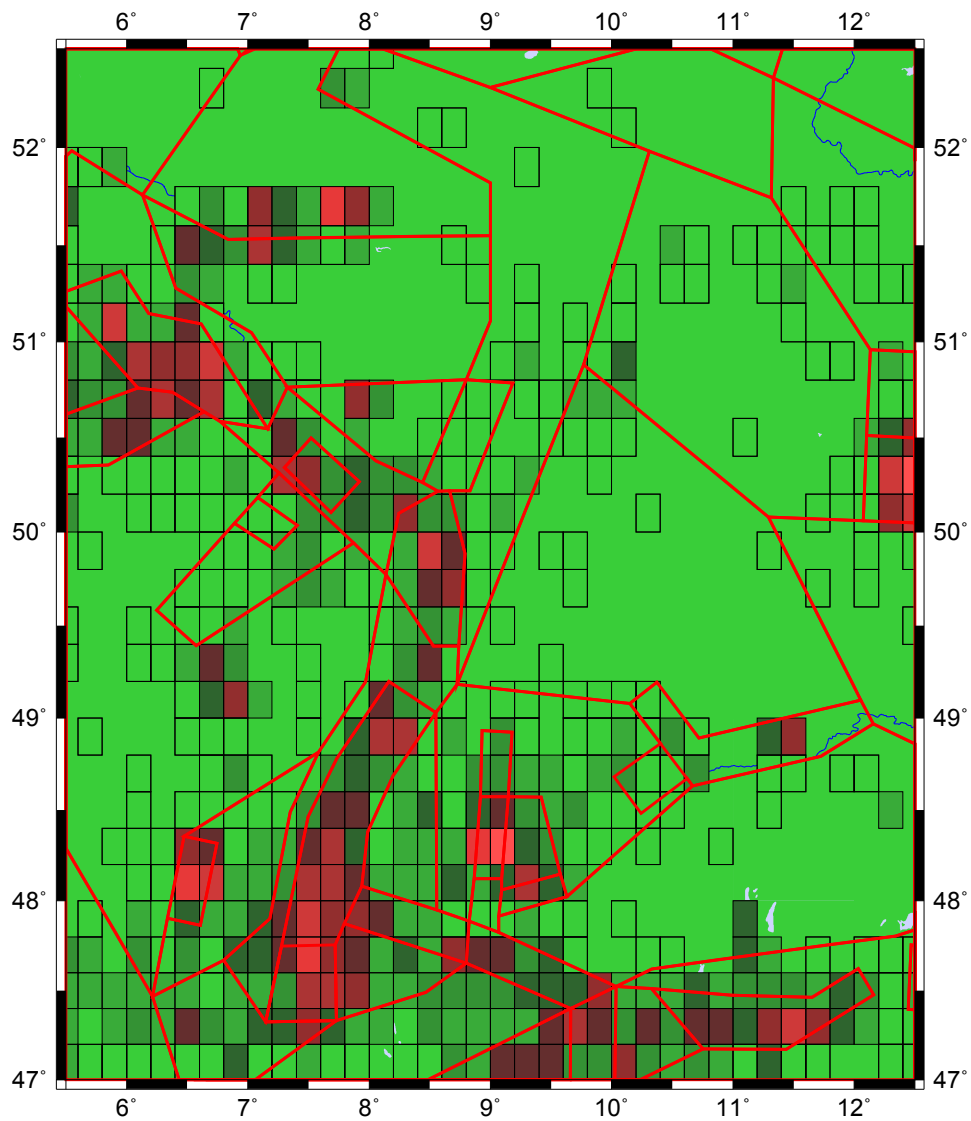


Abb. 4.2: Epizentrendichte-Raster-Modell des Oberrheingrabens mit einer Rasterweite von 0.2 Grad und die Zuordnung der Rasterelemente in Epizentrendichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach *Rosenhauer* und *Ahorner* (rote Linien)

gleichmäßig verteilt ist. Andererseits macht die Erfassung der regional differierenden Seismizität erforderlich, möglichst kleinflächige Unterteilungen vorzunehmen. Hier sind ebenfalls unrealistische Ergebnisse zu erwarten, wenn die seismischen Quellzonen zu klein gewählt werden und so nicht genügend Erdbeben­daten vorhanden sind, um die Erdbeben­stärke­Häufigkeiten in den seismischen Quellzonen ausreichend genau zu bestimmen. Die mit dieser Arbeit vorgestellte Epizentrendichte-Methode ist eine Möglichkeit, diesen Konflikt zu umgehen.

Um die räumliche Verteilung der historischen Erdbeben-Ereignisse gut erfassen zu können, werden Nachbarschaftsanalysen auf Grundlage von *Voronoi* - Diagrammen durchgeführt. Dazu wurden *Voronoi* - Diagramme mit Hilfe der in regionalen Erdbeben-Katalogen verzeichneten Epizentren berechnet. Die in den *Voronoi* - Diagrammen enthaltenen *Voronoi* - Regionen, konvexe Polygone in denen jeweils ein Epizentrum liegt, können zur Bestimmung der Epizentrendichte benutzt werden. Dazu ist es erforderlich, den Flächeninhalt der *Voronoi* - Regionen zu bestimmen. Je kleiner die Flächeninhalte der *Voronoi* - Regionen, umso größer die Epizentrendichte.

Voronoi - Regionen mit ähnlicher Epizentrendichte werden im Verlauf der Abarbeitung der Methode zu den Epizentrendichte-Klassen zusammengefasst. Es ist dabei nicht erforderlich, dass die Gebiete der einzelnen Epizentrendichte-Klassen auch räumlich zusammenhängend sind. Die Zusammenfassung zu Epizentrendichte-Klassen wird in Abschnitt 4.6 beschrieben. Mit Verwendung der zusammengefassten *Voronoi* - Regionen ähnlicher Epizentrendichte ist es möglich Erdbeben­stärke­Häufigkeiten mit einer größeren Zahl von Erdbeben­daten zu ermitteln. Aus diesem Vorgehen resultiert, aufgrund der breiteren Datenbasis eine größere Verlässlichkeit bei der Bestimmung von Erdbeben­stärke­Häufigkeiten.

Mit der hier vorgestellten Epizentrendichte-Methode können probabilistische seismische Gefährdungsanalysen vorgenommen werden, ohne die in Teilen subjektiven Einteilungen in seismische Quellzonen zu verwenden.

4.4 Bestimmung der Magnituden-Eintrittsraten

Wie in Abschnitt 2.6 gezeigt, können die Magnituden-Eintrittsraten (Erdbeben­stärke­Häufigkeiten) mit der *Gutenberg - Richter* - Beziehung oder mit der *Gumbel* - Typ III - Verteilung beschrieben werden. Letztere wird für die Beispiele in dieser Arbeit verwendet. Die Auswertung der Epizentrendichte-Klassen erfolgt dabei mit extremwertstatistischen Methoden, wie sie von *Gumbel* 1958 [86] beschrieben wurden. Der extremwertstatistischen Bestimmung der Magnituden-Eintrittsraten liegt die Annahme zugrunde, dass die recht seltenen diskreten Erdbeben-Ereignisse eine zeitlich konstante Eintrittsrate $\lambda_{(>x)}$ aufweisen, das heißt, ihr stochastisches Auftreten folgt der Charakteristik eines diskreten *Poisson* - Prozesses. Die Grundannahme dieser zeitlichen Verteilung ist in Abschnitt 2.3 näher erläutert.

Für die Ermittlung der Magnituden-Eintrittsraten seisischer Quellzonen sind in der Regel weniger Erdbeben-Daten vorhanden. Aus diesem Grunde ist es empfehlenswert die Magnituden-Eintrittsraten entsprechend des erwarteten Fehlers zu gewichten (vgl. Abschnitt 5.3). Wenn viele Erdbeben-Daten für die extremwertstatistischen Auswertungen vorhanden sind, wie es bei der

Epizentrendichte-Methode der Fall ist, kann eine Gleichgewichtung der Magnituden-Eintrittsraten als ausreichend betrachtet werden. Die in der Arbeit gezeigten Beispiele wurden auf diese Weise ermittelt.

Bei der extremwertstatistischen Auswertung der Erdbeben-Kataloge zeichnen sich unter Umständen Lücken im Datenbestand für einzelne Zeitintervalle einzelner Epizentrendichte-Klassen ab. In der Regel treten diese Datenlücken bei der Verwendung von Epizentrendichte-Klassen jedoch wesentlich seltener auf als bei der Verwendung von seismischen Quellzonen. Die Datenlücken sind auf die jeweiligen historischen Gegebenheiten (dünne Besiedlung, Kriege, verloren gegangenes Archivmaterial, kein Interesse an der Aufzeichnung usw.) zurückzuführen. Für die extremwertstatistische Auswertung sind diese Datenlücken aus den früheren Zeitabschnitten durch geschätzte sinnvolle Werte aufzufüllen. Dabei ist darauf zu achten, dass die aufgefüllten Werte plausibel sind. In der Regel sollten die Datenlücken mit kleineren Magnitudenwerten aufgefüllt werden als die der Erdbeben-Ereignisse der angrenzenden Zeiträume, da es unwahrscheinlich erscheint, dass von größeren Erdbeben keine Aufzeichnungen vorliegen.

Die Gleichung (4.1) zeigt die kumulative Wahrscheinlichkeitsverteilung der Extremwerte in den Perioden T .

$$G(x) = e^{-\lambda_{(>x)} * T} \quad (4.1)$$

Von *Rosenhauer* wurden die extremwertstatistischen Methoden nach *Gumbel* in dem Programm GUMBEL [148] implementiert. Dieses Programm wurde für die angeführten Beispiele zur Auswertung der Epizentrendichte-Klassen benutzt. Betrachtet werden die zu Klassen gleicher Epizentrendichte zusammengefassten *Voronoi* - Regionen. Die Extremwerte der Erdbebenstärken sind die in den jeweiligen Epizentrendichte-Klassen mit dem Flächeninhalt A in aufeinanderfolgenden Zeitintervallen T aufgetretenen Erdbeben mit den jeweils größten Magnituden M_1, M_2, \dots, M_n .

Der Erwartungswert $n_{(>M,T)}$ für die Anzahl von Überschreitungen eines Wertes M der Magnitude in einem Zeitintervall T (Bezugsperiode) wird formelmäßig gemäß der verallgemeinerten *Gumbel* - Verteilung [86], [147] mit den Parametern m , σ und τ angesetzt. Die Beziehungen 4.1 bis 4.5 wurden der Programmbeschreibung zu GUMBEL von *Rosenhauer* [148] entnommen.

$$n_{(>M,T)} = \lambda_{(>M)} * T \quad (4.2)$$

$$= \left(f_1 - f_2 \frac{M - m_0}{\sigma} \right)^{\frac{1}{\tau}}$$

$$m_0 = m_{0(A,T)}$$

$$\sigma = \sigma_{(A,T)}$$

$$0 < \tau \leq 1$$

$$f_1 = \Gamma(1 + \tau) \quad (4.3)$$

$$f_2 = \sqrt{\Gamma(1 + 2\tau) - f_1^2} \quad (4.4)$$

$$M_{(<M_{max})} = m + \frac{\sigma * f_1}{f_2} \quad (4.5)$$

Der Erwartungswert (mean) von $G(M)$ ist $m_0 = m_{0(A,T)}$ ist die Magnitude, die in der jeweiligen Epizentrendichte-Klasse im Mittel der Zeitintervalle T auftritt; σ ist die zugehörige Standardabweichung. M_{max} ist diejenige Magnitude, die gerade nicht mehr auftreten kann (Gleichung 4.6).

$$\lambda_{(>M_{max})} = 0 \quad (4.6)$$

Zur Berechnung wird die Gammafunktion verwendet. Sie ermöglicht eine Ausdehnung des Begriffs der Fakultät auf beliebige Zahlen. Die Gammafunktion ist mit den Gleichungen (4.7) und (4.8) auf zweierlei Weise definiert:

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} e^{-t} t^{(x-1)} dt \quad (4.7)$$

$$\Gamma(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n^x * n!}{x(x+1)(x+2) \dots (x+n)} \quad (4.8)$$

$$\Gamma(n+1) = n! \quad (4.9)$$

Infolge der Anwendung dieser Form der Magnitudeneintrittsrate ist es möglich, eine absolute Magnitudenobergrenze M_{max} stetig zu erreichen (vgl. Unterabschnitt 2.6.1).

Das stetige Erreichen der Magnitudenobergrenze wird im Berechnungsmodell durch den Parameter τ , der als Krümmungsparameter bezeichnet wird, gewährleistet. Die Magnituden - Eintretensrate in Form der *Gutenberg - Richter* - Relation lässt sich mit der *Gumbel* - Typ III - Verteilungsfunktion abbilden, für den Fall $\tau = 0$.

$$n_{(>M,T)} = \lambda_{(>M)} * T \quad (4.10)$$

$$= e \left(-e - \frac{\pi}{\sqrt{6}} * \frac{M-m}{\sigma} \right) \quad (4.11)$$

Für die in diesem Kapitel gezeigten Beispieluntersuchungen wurde für die Beschreibung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten die *Gumbel* - Typ III - Verteilung verwendet [86]. Die Ermittlung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten erfolgt dabei mit extremwertstatistischen Methoden (vgl. 2.6.2). Die Berechnung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten erfolgt hier mit dem Fortran - Programm GUMBEL von *Rosenhauer* [148], in dem die Algorithmen nach *Gumbel* implementiert sind [86]. Mit Hilfe der historisch beobachteten Seismizität werden mit der Extremwertstatistik Extrapolationen für höhere Erdbebeneintrittsraten vorgenommen.

Für die Bereitstellung der Extremwerte der Erdbebenstärke aus den Epizentrendichte-Klassen in den jeweiligen Zeitfenstern wird ein SQL - basiertes Abfrageprogramm verwendet, welches im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. Es greift auf die Erdbeben-Kataloge zu, die für diese Untersuchungen so aufbereitet wurden, dass sie in einer relationalen Datenbank gespeichert werden konnten. Ergebnis dieses SQL - Abfrageprogrammes ist eine Datei der Extremwerte, die direkt mit dem Programm GUMBEL eingelesen werden kann.

Für die Berechnung der seismischen Gefährdung mit dem Epizentrendichte-Modellen wird das Programm PSSAEL von *Rosenhauer* [149] eingesetzt, welches speziell für diesen Einsatzzweck in einigen Teilen modifiziert wurde. Die Art der Modifikationen ist in 4.7.1 beschrieben. Vorhandene Parameterunsicherheiten werden in PSSAEL mit Monte Carlo - Simulationen berücksichtigt.

Die Erdbebenstärke-Häufigkeiten sind als erstes Teilergebnis der gezeigten Beispielberechnungen anzusehen (vgl. Abschnitt 4.6). Sie werden als Maß der Seismizität der einzelnen Epizentrendichte-Klassen im Lauf der weiteren Berechnungen für die Monte Carlo-Simulationen der Erdbeben verwendet.

Die Ermittlung der Magnitudenhäufigkeiten erfolgt für die jeweiligen Epizentrendichte-Klassen getrennt. Die Einteilungen der Epizentrendichte-Klassen gehen dabei von der Epizentrendichte-Klasse 1 mit der höchsten Epizentrendichte, bis zu der Epizentrendichte-Klasse 10 mit der geringsten Epizentrendichte des Modells. Es werden dafür die historisch überlieferten Erdbeben-Ereignisse, die in den durch die Epizentrendichte-Klassen abgegrenzten Regionen stattgefunden haben, extremwertstatistisch mit dem Programm GUMBEL von *Rosenhauer* [148] ausgewertet (vgl. 2.6.2).

Bei der Betrachtung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten fällt auf, dass die Epizentrendichte-Klassen mit einer sehr hohen Epizentrendichte auch sehr hohe normierte Erdbebeneintretensraten aufweisen (vgl. 5.4). Empirisch wird dadurch die in Abschnitt 1.1 vorgestellte Hypothese der Epizentrendichte-Methode bestätigt, da sich in Abhängigkeit der verschiedenen Epizentrendichten jeweils andere Erdbebenstärke-Häufigkeiten nachweisen lassen. Für die Gesamtbewertung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten müssen jedoch auch die sehr unterschiedlichen Flächeninhalte der einzelnen Epizentrendichte-Klassen berücksichtigt werden, was die teils sehr hohen normierten Erdbebenstärke-Häufigkeiten wieder deutlich relativiert.

Während der Ermittlung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten der Epizentrendichte-Klassen kommt einer der wesentlichen Vorteile der vorgestellten Epizentrendichte-Modelle zum Tragen. Erdbebenstärke-Häufigkeiten werden für die einzelnen Epizentrendichte-Klassen bestimmt, in denen aufgrund ihres durchschnittlich größeren Flächeninhaltes mehr Erdbeben-Ereignisse enthalten sind als in den seismischen Quellzonen. Die Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten wird aufgrund der größeren Datenbasis um einiges vertrauenswürdiger im Vergleich zu den bisher verwendeten Methoden. Dies ist eines der Hauptmerkmale der vorgestellten Epizentrendichte-Methode.

Der Ablauf der Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten ist im Abschnitt 2.6 erläutert. Die Abbildung 5.4 gibt einen Überblick über die ermittelten Parameter der *Gumbel* - Typ III - Verteilung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten für die betrachteten Modellpunkte.

In den Abbildungen 6.5 bis 7.6 sind beispielhaft die Ergebnisse der durchgeführten seismischen Gefährdungsanalyse mit der vorgestellten Epizentrendichte-Methode für die in Abschnitt 5.1 gewählten Modellpunkte dargestellt.

4.5 Ermittlung der Epizentrendichte

4.5.1 Geographische Verteilung der Erdbeben

Als Funktion zur Bestimmung der geographischen Verteilung der historischen Erdbeben bieten sich *Voronoi*-Diagramme an, wie sie in Abschnitt A.2.1 beschrieben werden. Sie bestehen aus einer Menge von *Voronoi*-Regionen, konvexen Polygone, die jeweils ein Epizentrum umschließen (siehe 4.5.3). Die in dieser Arbeit verwendeten Nachbarschaftsanalysen auf Basis von *Voronoi*-Diagrammen werden auch in einigen anderen Beiträgen zur Lösung geowissenschaftlicher Fragen verwendet, zum Beispiel von *Sambridge* (1999) in [153].

Die Flächeninhalte der *Voronoi*-Regionen sind umso kleiner, je größer die Dichte der Epizentren der historisch berichteten Erdbeben ist. Die Flächeninhalte der *Voronoi*-Regionen eignen sich daher als Maß zur Bestimmung der Epizentrendichte.

Die verwendeten Epizentrendichte-Modelle basieren auf *Voronoi*-Diagrammen, die auf der Basis von Erdbeben-Katalogen konstruiert werden. Die Epizentrendichte-Modelle bilden dabei jeweils den aktuellen Stand der verwendeten Erdbeben-Kataloge ab. Da die als Berechnungsgrundlage verwendeten Erdbeben-Kataloge durch andauernde und aufwendige Recherchen immer wieder ergänzt und überarbeitet werden, kann noch kein abschließendes Epizentrendichte-Modell für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland angegeben werden.

Die freigesetzte seismische Energie pro Fläche und Zeit wird mit der Epizentrendichte-Methode, wie das Beispiel des Gebietes Vogtland und Nordwestböhmen belegt, noch nicht in vollem Umfang berücksichtigt. Das Gebiet weist eine relativ große Epizentrendichte durch die vorhandene Schwarmbebencharakteristik auf. Die in dieser Region in großer Zahl aufgetretenen Erdbeben weisen nur relativ kleine Magnituden auf. Durch die Einordnung einer solchen Region mit Schwarmbeben in Epizentrendichte-Klassen mit großer Epizentrendichte können andere Regionen mit großer Epizentrendichte, in denen keine Schwarmbeben auftreten, in ihrem Gefährdungspotential unterschätzt werden. Es zeigt sich, dass zu dieser Problematik noch weiterführende Untersuchungen erforderlich sind. Dies betrifft u.a. die Entscheidung über die zu verwendenden Ereignistypen und die Unterscheidung zwischen Vor- und Nachbeben. Die prinzipielle Vorgehensweise der vorgestellten Methode ist den schematischen Abbildungen 4.3 und 4.4 zu entnehmen.

4.5.2 *Voronoi*-Diagramme aus Epizentren

Die in Abschnitt 2.1 aufgeführten Erdbeben-Kataloge mit ihren Epizentren dienen als Datenbasis für die Konstruktion der *Voronoi*-Diagramme. Ziel ist, wie in den vorangegangenen Abschnitten beschrieben, die Ermittlung eines Epizentrendichte-Modells.

Die ermittelten *Voronoi*-Diagramme lassen sich in offene und geschlossene *Voronoi*-Regionen zerlegen. Die Anzahl der Regionen entspricht dabei der Anzahl der sich voneinander unterscheidenden Epizentren. Sollten zwei oder mehrere Epizentren an dem gleichen Ort liegen, so wird dies später dadurch berücksichtigt, dass der Flächeninhalt der *Voronoi*-Region durch die Anzahl der betreffenden Epizentren geteilt wird.

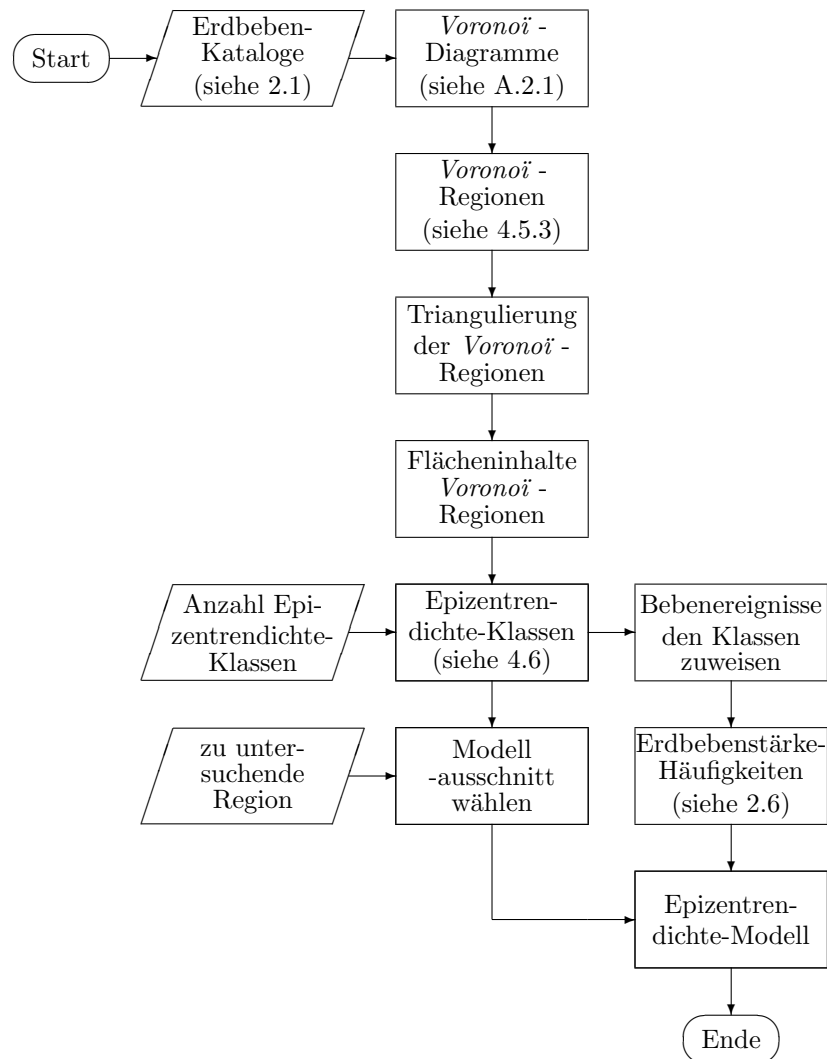


Abb. 4.3: Schema zur Erstellung eines Epizentrendichte-Modells

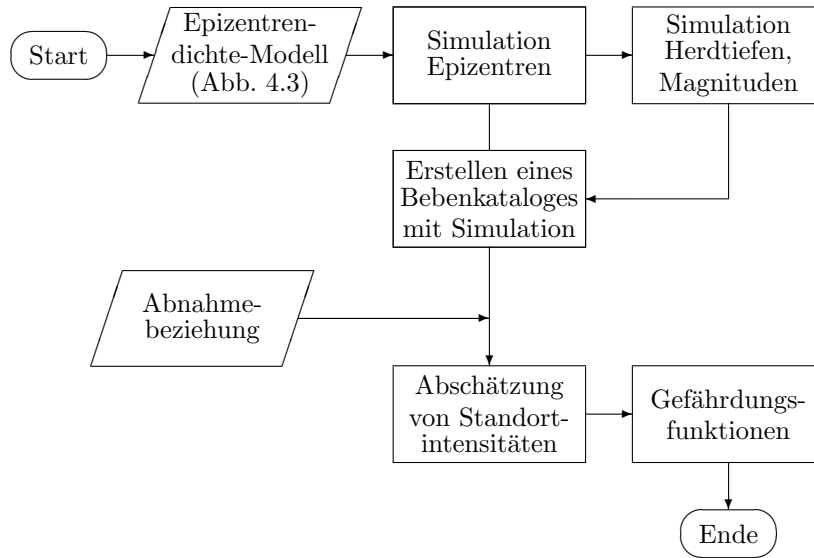


Abb. 4.4: Schematische Darstellung der seismischen Gefährdungsanalyse mit dem Epizentrendichte-Modell

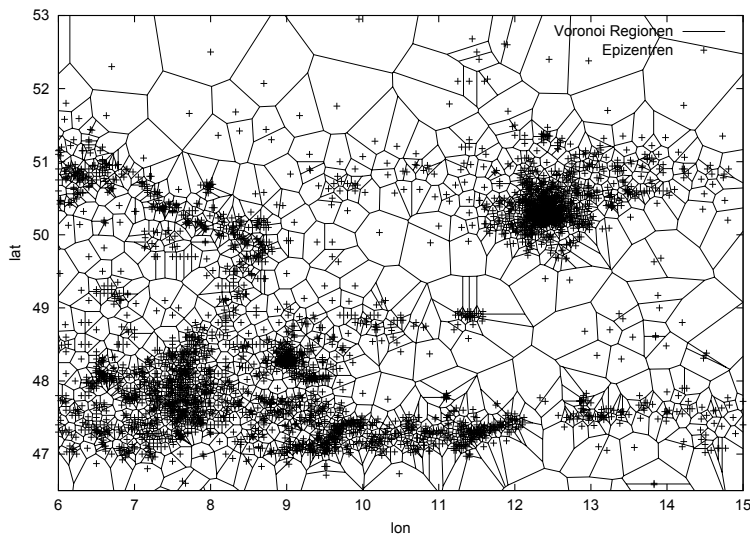


Abb. 4.5: Schematische Darstellung eines Ausschnittes aus einem *Voronoi*-Diagramms auf Basis des BGR Erdbeben-Kataloges nach *Leydecker*[118]

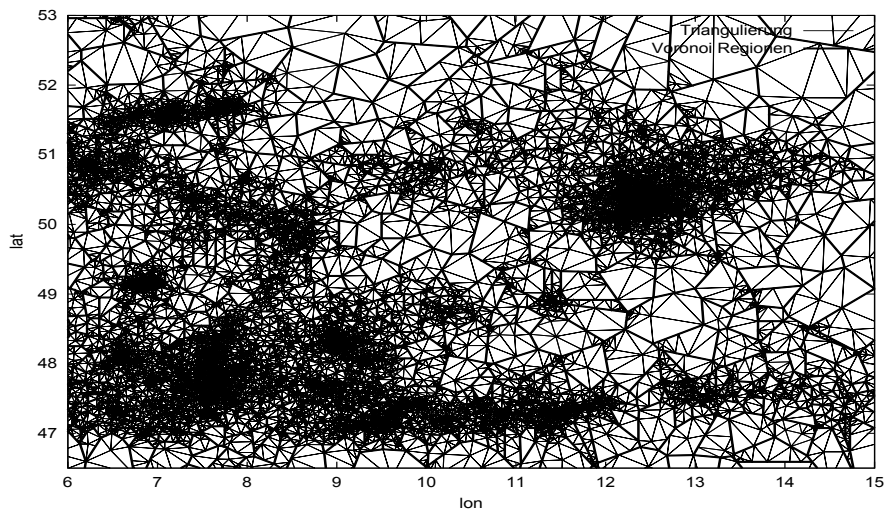


Abb. 4.6: Triangulierung der *Voronoi*-Regionen (Ausschnitt)

Offene *Voronoi* - Regionen sind die Gebiete, die am Rande des Untersuchungsgebietes auftreten und das Epizentrendichte-Modell begrenzen. Die geschlossenen *Voronoi* - Regionen sind konvexe Polygone, die alle Punkte der Ebene einschließen, die näher am zugehörigen Epizentrum liegen als an irgendeinem anderen Epizentrum.

Die geschlossenen Polygone, die sich am äußeren Rand des Untersuchungsgebietes befinden und die oft einen relativ großen Flächeninhalt aufweisen, können nicht für die Epizentrendichte-Modelle herangezogen werden. Sie spiegeln auf Grund der Konstruktion des *Voronoi* - Diagramms nicht die exakte Epizentrendichte wider, da die zur Konstruktion nötigen Erdbeben nicht mehr im verwendeten Erdbeben-Katalog enthalten sind. Aus diesen Gründen sind keine hinreichend genauen Aussagen an den Außenrändern des Untersuchungsgebietes möglich.

Bedingt durch die Konstruktion von *Voronoi* - Diagrammen ergeben sich in geographischen Regionen mit einer relativ großen Epizentrendichte *Voronoi* - Regionen mit relativ kleinen Flächeninhalten (vgl. Abbildung 4.5). Die Flächeninhalte der *Voronoi* - Regionen sind umgekehrt proportional zur regionalen Erdbebendichte.

4.5.3 Epizentrendichte mit *Voronoi* - Regionen

Die Epizentrendichte der *Voronoi* - Regionen ist umgekehrt proportional zum Flächeninhalt der *Voronoi*-Regionen. Um den Flächeninhalt der *Voronoi* - Region und damit die relative Dichte der Epizentren zu ermitteln, ist es erforderlich, die *Voronoi* - Region zu triangulieren. Diese Aufgabe kann ebenfalls mit dem *Delaunay* - Triangulierungs - Algorithmus, welcher im Programm

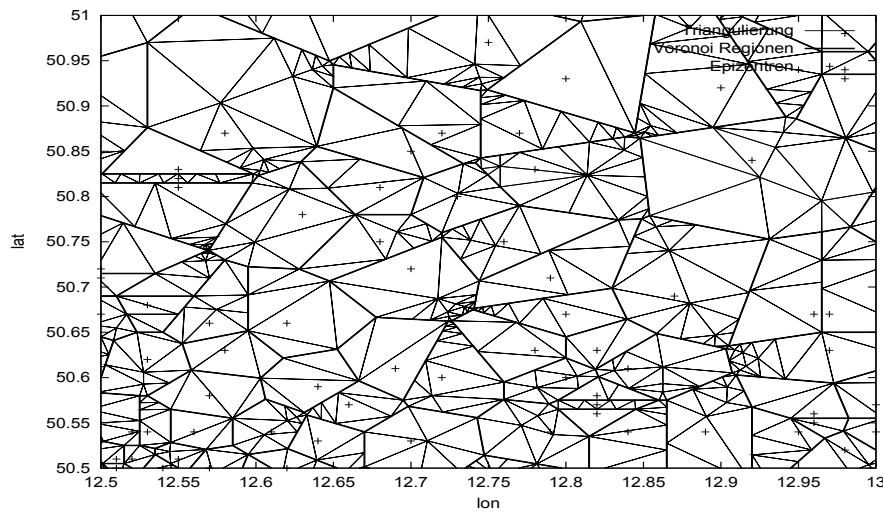


Abb. 4.7: Triangulierung der *Voronoi*-Regionen (Ausschnitt)

TRIANGLE von *Shewchuk* [167] implementiert ist, übernommen werden. Hinweise zum *Delaunay* - Triangulierungs - Algorithmus sind unter [167], [26], [27] und [151] zu finden.

Die Triangulierung der *Voronoi* - Region ist auch für das von *Rosenhauer* geschriebene Programm PSSAEL erforderlich. Die generierten Dreiecke können analog der Oberdreiecke der bisher verwendeten seismischen Quellzonen genutzt werden (vgl. [149]).

Die Abbildungen 4.6 und 4.7 zeigen beispielhaft die Zerlegung der *Voronoi* - Region in Dreiecke. Die eigentliche Berechnung der Flächeninhalte erfolgt mit dem C-Programm AREA, welches ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurde. Es sind damit sowohl Berechnungen auf Basis des World Geodetic System 1984 (WGS84) als auch auf Basis von universal transversalen Mercatorprojektionen (UTM) möglich.

Da das UTM-System auch vom Programm PSSAEL benutzt wird, erwies es sich als sinnvoll, hier ebenso mit UTM-Koordinaten zu arbeiten. Bei der Berechnung der *Voronoi* - Diagramme großer Regionen kann es aufgrund der Verzerrungen der UTM-Projektion sinnvoll sein, mit dem WGS84-Koordinatensystem zu arbeiten. Für die Flächeninhaltsberechnungen der vergleichsweise kleinen *Voronoi*-Region erweist sich die Benutzung des UTM-Koordinatensystems jedoch als unkritisch. Die Koordinaten der bei der Triangulierung entstehenden Dreiecke und die Flächeninhalte der *Voronoi* - Regionen werden für spätere Berechnungen mit den Programmen GUMBEL und PSSAEL in einer relationalen Datenbank abgespeichert. SQL steht für Structured Query Language, diese Datenbanksprache wurde Ende der 1970er Jahre bei IBM als Abfragesprache für die relationale Datenbank DB2 entworfen. Sie findet heute in etlichen Datenbanken Anwendung.

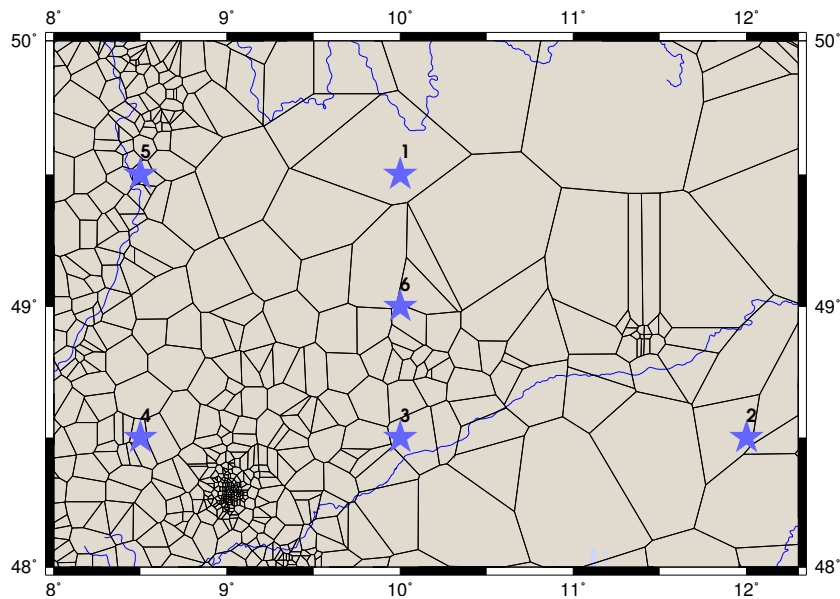


Abb. 4.8: Voronoi-Diagramm des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* [7]

Die Programme GUMBEL [148] und PSSAEL [149] wurden von *Rosenhauer* im Auftrag der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB) entwickelt. Als Datenbanksystem wurde MySQL von der Firma MySQL AB aus Schweden gewählt, das unter der GNU General Public License (GPL) veröffentlicht wurde.

4.6 Einteilung in Epizentrendichte-Klassen

Nachdem in dem vorangegangenen Abschnitt die Ermittlung der Epizentrendichte mit Nachbarschaftsanalysen auf der Grundlage von Voronoi - Diagrammen beschrieben worden ist, folgt in diesem Abschnitt die Beschreibung der Ermittlung der Epizentrendichte-Klassen.

Die Einteilung der Voronoi - Regionen in Epizentrendichte-Klassen wird vorgenommen, um Gebiete mit ähnlichen beobachteten Seismizitäten für die anschließende Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten zusammenzufassen. Das durch eine Epizentrendichte-Klasse abgegrenzte Gebiet ist dabei nicht zwangsläufig mit einem geographisch zusammenhängenden Gebiet identisch. Es können vielmehr mehrere geographische Regionen mit gleicher Epizentrendichte zusammengefasst werden. Neben den Vorteilen, die sich aus der Zusammenfassungen der Regionen ähnlicher Epizentrendichte ergeben, ist die Reduzierung der subjektiven Faktoren der seismischen Quellzonen zu nennen.

Die Voraussetzung für die Eingruppierung der Voronoi - Regionen in die Epizentrendichte-Klassen ist demnach die Ermittlung ihrer Flächeninhalte als umgekehrt proportionales Maß für die Epizentrendichte.

Befinden sich an einem Ort mehrere Epizentren, so wird der Flächeninhalt der daraus resultierenden

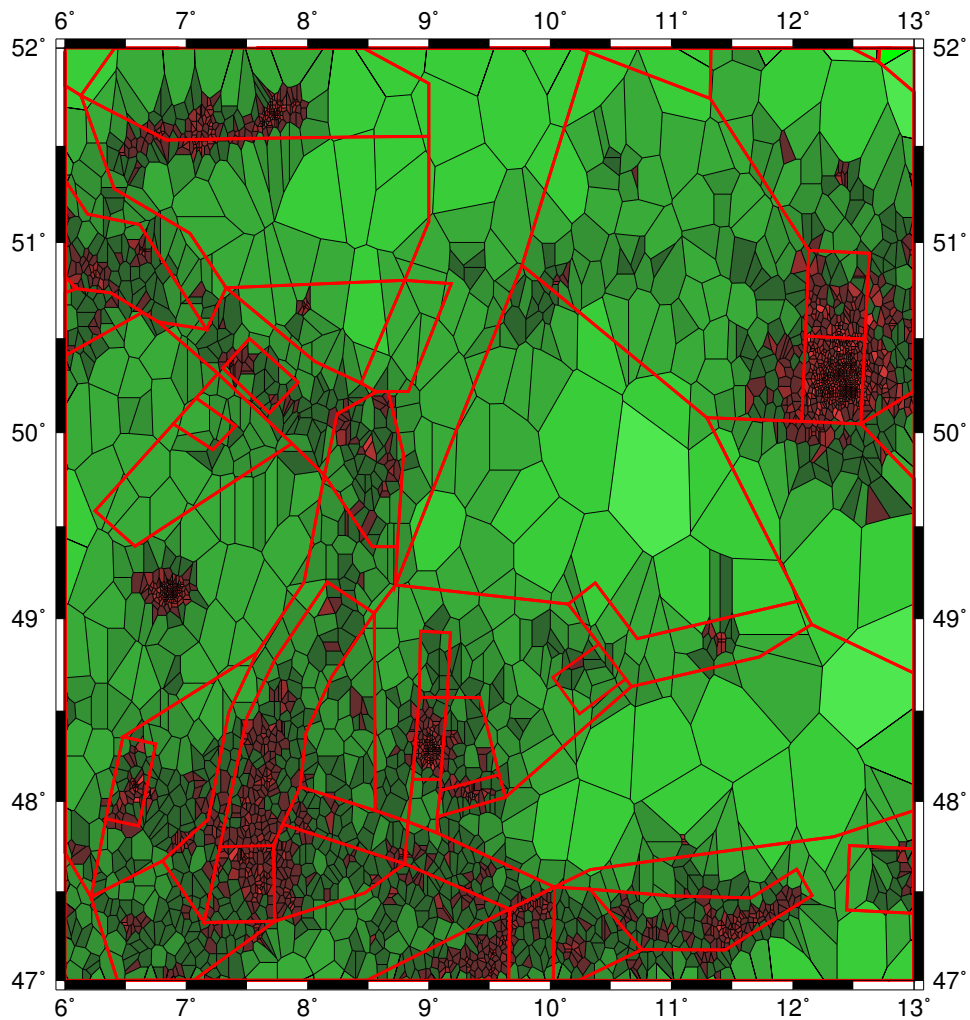


Abb. 4.9: Voronoi - Regionen des Oberrheingrabens und ihre Zuordnung zu den Epizentrendichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach *Rosenhauer* und *Ahorner* (rote Linien)

Voronoi - Regionen durch die Anzahl der Epizentren an diesem Ort geteilt, um diese *Voronoi* - Regionen richtig in die Epizentrendichte-Klassen einzuordnen.

Im Anschluss an die Ermittlung der Flächeninhalte werden die *Voronoi* - Regionen nach der Größe ihres Flächeninhaltes sortiert. Beginnend bei den *Voronoi* - Regionen mit den kleinsten Flächeninhalten (höchste Epizentrendichte) werden sie mit ansteigendem Flächeninhalt so den einzelnen Epizentrendichte-Klassen zugeordnet, dass in jeder Epizentrendichte-Klasse etwa gleich viele *Voronoi* - Regionen enthalten sind.

Für die vorliegenden Erdbeben-Kataloge wurden Untersuchungen mit 8 - 14 Epizentrendichte-Klassen durchgeführt. Die Anzahl der Epizentrendichte-Klassen sollte zum einen nicht zu klein gewählt werden, um die in großen Breiten variierenden Epizentrendichten gut zu erfassen. Zum anderen sollte die Anzahl der Klassen nicht zu groß gewählt werden, um den Vorteil der besseren Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten zu behalten. In diesem Zusammenhang bedeutet "nicht zu groß" deutlich weniger Epizentrendichte-Klassen als seismische Quellzonen in den üblichen Modellen.

Die in dieser Arbeit dargestellten Beispiele wurden mit Einteilungen in 10 Epizentrendichte-Klassen ermittelt. Die Wahl dieses Parameters ist in Abschnitt 5.4 anhand von empirischen Untersuchungen erläutert.

Die Epizentrendichte-Klassen mit einer hohen Epizentrendichte haben relativ kleine Anteile an der Gesamtfläche des Betrachtungsgebietes. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit den relativ hohen Erdbebenstärke-Häufigkeiten dieser Klassen zu sehen (vgl. Abbildung 5.4).

Dadurch, dass zu jedem Epizentrum der verwendeten Erdbeben-Kataloge eine *Voronoi* - Region mit ihrem Flächeninhalt in einer SQL - Datenbank vorliegt, ist es recht einfach, durch entsprechende SQL - Befehle die Daten der Erdbeben-Ereignisse für die jeweiligen Epizentrendichte-Klassen aus der Datenbank abzufragen. Abbildung 4.9 zeigt die Zuordnung der *Voronoi* - Regionen des Oberrheingrabens zu den gewählten Epizentrendichte-Klassen. Gleichfarbige *Voronoi* - Regionen gehören zur gleichen Epizentrendichte-Klasse. Um eine Einordnung zu ermöglichen, wurden die seismischen Quellzonen nach *Rosenhauer* und *Ahorner* mit dargestellt.

4.7 Simulation der zu erwartenden Seismizität

4.7.1 Simulation von Epizentren und Erdbebenstärken

Der erste Schritt für eine Monte Carlo - Simulation der zu erwarteten Seismizität ist die Simulation der Lage der Epizentren. Als Grundlage für die räumliche Verteilung der zu simulierenden Epizentren wird dazu das auf der beobachteten Seismizität beruhende Epizentrendichte-Modell verwendet. Entsprechend den auf die Fläche von 10^4 km^2 normierten Erdbebenstärke-Häufigkeiten, die für jede Epizentrendichte-Klasse ermittelt worden sind (vgl. Abschnitt 4.4), werden Epizentren im Untersuchungsgebiet simuliert. Die Epizentren werden dabei in jeder Epizentrendichte-Klasse gleichverteilt ausgespielt.

Für die technische Umsetzung der Simulation wird auf Arbeiten von *Ahorner* und *Rosenhauer*

zurückgegriffen. Die hier verwendeten Epizentrendichte-Klassen werden dabei analog der bisher verwendeten seismischen Quellzonen verwendet. Das zugrundeliegende seismologische Konzept wurde von *Ahorner* entwickelt und ist in [4] und [5] dargelegt. *Rosenhauer* hat in Form des Programms PSSAEL (**P**robabilistische **S**eismische **S**tandort **A**nalyse mit **E**rdbeben **L**ibraries) [149] die technische Umsetzung des Konzeptes vorgenommen und das Programm im Quelltext für die hier gemachten Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Das Programm PSSAEL [149] verwendet eine Gleichverteilung für die Epizentren entsprechend der jeweiligen Erdbebenstärke-Häufigkeiten. Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wurde das Programm PSSAEL, das als Fortran - Quellcode vorlag, so modifiziert, dass neben der Möglichkeit mit seismischen Quellzonen zu rechnen nun auch eine Berechnung mit Epizentrendichte-Modellen möglich ist.

In den im folgenden aufgeführten Punkten werden die Modifikationen des PSSAEL - Fortran - Quellcodes im Einzelnen beschrieben:

- Modifikationen an Felddimensionierungen,
- Änderungen der Einlesefunktion und der Ausgabedatei,
- In der Funktion, die Zufallszahlen bereitstellt wurde compilerspezifischer Fortran Code durch generischen ersetzt.

Zum Kompilieren des PSSAEL - Quelltextes wurde der GNU - Fortran - Compiler - g77 verwendet. Die Wahl fiel auf diesen Compiler, da die Prüfung der Eignung seines Zufallszahlengenerators erfolgreich war und er frei verfügbar ist. Die Prüfung des Zufallszahlengenerators wurde im Abschnitt A.2.2 erläutert.

Die Simulation der Erdbebenstärken (Magnituden) erfolgt anhand der in Abschnitt 4.4 ermittelten Erdbebenstärke-Häufigkeiten, bezogen auf die normierte Fläche von 10^4 km^2 für jede Epizentrendichte-Klasse. Dabei wird der in Abschnitt 2.3 beschriebene *Poisson* - Prozess als zeitliche Verteilung zugrunde gelegt.

Der erwartete relative Fehler liegt für eine Simulation der *Poisson* - Verteilung bei $1/\sqrt{n}$. Das heißt, für einen Fehler $<5\%$ sind >400 Simulationsspiele notwendig. Für einen möglichst geringen Fehler ist daher eine möglichst hohe Zahl von Simulationsspielen erforderlich. Die Anzahl der zu simulierenden Erdbeben hängt neben dem relativen Fehler aber auch von dem zu bestimmenden Prognosezeitraum ab.

Mit der Festlegung einer Mindestgröße für die Erdbebenstärke kann durch Ausschluss von Mikroerdbeben, welche nicht zur seismischen Gefährdung beitragen, die Rechenzeit erheblich verkürzt werden.

4.7.2 Herdtiefen- und Herdflächenmodell

Die Herdtiefe der Erdbeben-Ereignisse ist für Standorte in Mitteleuropa eine der wichtigsten Einflußgrößen für die Abschätzung der seismischen Gefährdung. Bei gleicher Magnitude ändert sich die Intensität stark in Abhängigkeit von der Herdtiefe. Die alleinige Betrachtung von Epizentralintensitäten verhindert eine differenzierte Betrachtung des Unterschiedes zwischen kleineren flachen Erdbeben und größeren tiefen Erdbeben. Herdtiefen besitzen einen Mindestwert von h_0 und eine geschätzte Obergrenze von h_{max} . Die Mindestherdtiefe wird von der Mächtigkeit der oberen Schichten bestimmt, in denen sich keine ausreichend großen Spannungen für Erdbeben-Ereignisse aufbauen können. Der Maximalwert für die Herdtiefen ergibt sich aus den größten Tiefen, die im zu untersuchenden Gebiet beobachtet worden sind. Für das Gebiet von Mitteleuropa wird im Allgemeinen von maximal möglichen Herdtiefen von bis zu 25 km ausgegangen.

In dem verwendeten Programm PSSAEL von *Rosenhauer* [149] wird vereinfachend mit einer ebenen kreisförmigen Herdfläche gerechnet. Der Winkel der Herdfläche γ gegen die Vertikale wird im Programm mit einer Monte Carlo - Simulation ausgespielt. Der Radius der vereinfacht angenommenen ebenen kreisförmigen Herdfläche wird nach den Korrelationen (4.12) von *Schick* [156] angesetzt.

$$\log_{10}(2r_M/[km]) = 0.5(M - 3.7) \quad (4.12)$$

Die Herdtiefe h wird im Programm PSSAEL mit 90% gleichverteilt in den oberen zulässigen Tiefenbereich zwischen $h_{min}(M, \gamma)$ und $(h_{min}(M, \gamma) + h_{max})/2$ und mit 10% gleichverteilt in den tieferen zulässigen Tiefenbereich gelegt. Die Magnitudenabhängigkeit der Herdtiefe wird durch das aufeinanderfolgende Simulieren von Magnitude und Herdtiefe erreicht.

4.7.3 Empirische Prüfung der Epizentrendichtehypothese

In Abbildung 5.4 wurden beispielhaft die auf eine Vergleichsfläche von 10^4 km^2 und einen Zeitraum von 10 Jahren normierten Erdbebenstärke-Häufigkeiten als *Gumbel* - Typ III - Verteilung für die einzelnen Epizentrendichte-Klassen des ECOS Erdbeben-Kataloges [49] dargestellt. Die in den Arbeiten von *Rosenhauer* verwendete Vergleichsfläche von 10^4 km^2 und der Betrachtungszeitraum von 10 Jahren wurden für eine bessere Vergleichbarkeit der Erdbebenstärke-Häufigkeiten der Epizentrendichte-Klassen in dieser Arbeit übernommen. Die Einteilung in die Epizentrendichte-Klassen erfolgt mit Flächeninhaltsbereichen (vgl. 4.6). Aufgrund der am Rande des Untersuchungsgebietes auftretenden Probleme, welche in 4.5.2 beschrieben sind, werden die *Voronoi* - Regionen am Rand des Untersuchungsgebietes nicht weiter berücksichtigt.

Die in Abbildung 5.4 dargestellte Tendenz, dass bei größerer Epizentrendichte (Epizentrendichte-Klasse 1) die Eintretensraten ansteigen, lässt sich auch für andere Erdbeben-Kataloge zeigen. Mit der Abbildung kann ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen Epizentrendichte und den Erdbebenstärke-Häufigkeiten gezeigt werden. Die Hypothese aus Abschnitt 1.1 kann damit für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland als empirisch bestätigt angesehen werden. Für andere Gebiete sollte der Zusammenhang ebenfalls gelten, dies wurde vom Autor nicht weiter untersucht.

4.8 Berücksichtigung von Unsicherheiten

Einige Parameter lassen sich nicht exakt bestimmen. Als Beispiele dafür sind die Abnahmebeziehungen oder die Geometrie der seismischen Quellzonen zu nennen. Die Verwendung von Entscheidungsbäumen oder Monte Carlo - Simulationen ermöglicht die Berücksichtigung von vorhandenen Unsicherheiten.

- Entscheidungsbäume

Die Erfassung von Modell-Unsicherheiten kann mit Hilfe der Entscheidungsbaumtechnik erfolgen (vgl. z.B. *Wahlström* und *Grünthal* [188]). Einzelne mit Unsicherheiten behaftete Werte werden mit ihrer Größe und einer Gewichtung angegeben. Die Gefährdungsanalyse wird für jeden Ast des logischen Baumes ausgeführt und die Einzelergebnisse werden abschließend statistisch zusammengefasst. Als Ergebnis können Erwartungswert und Fraktile für die seismische Gefährdung angegeben werden. Die Entscheidungsbaum-Technik kann auch eingesetzt werden, um mehrere mögliche seismische Quellzonen in die Berechnungen einfließen zu lassen.

- Monte Carlo - Simulationen

Monte Carlo - Simulationen erlauben die Simulation von beliebigen kontinuierlichen Verteilungen der Unsicherheiten. Es können Simulationen sowohl für einzelne Parameter und/oder ganze Funktionen vorgenommen werden.

Für die vorgestellte Epizentrendichte-Methode kommen die sogenannten Monte Carlo - Simulationen zur Anwendung. Als Monte Carlo - Simulationen werden Berechnungsverfahren bezeichnet, die nach dem Prinzip des Zufalls funktionieren. Die Verwendung eines Zufallszahlengenerators ist daher allen Monte Carlo - Verfahren gemeinsam. Um eine hohe Ergebnisqualität zu sichern, ist die statistische Verteilung der Zufallszahlen vor Verwendung des jeweiligen Zufallszahlengenerators zu überprüfen (vgl. A.2.2). Je nach Verteilung der durch die Natur bestimmten Parameter werden für die Simulationen Zufallszahlen benötigt, die diesen Verteilungen entsprechen. Diese werden mittels inverser Transformation aus den statistisch gleichverteilten Zufallszahlen des Zufallszahlengenerators ermittelt.

Monte Carlo - Simulationen werden in den Bereich der experimentellen Mathematik eingeordnet und sind stochastische Algorithmen, mit denen sich Integrale approximativ lösen lassen. Experimentell heißt in diesem Zusammenhang nicht etwa das Ermitteln einer Größe durch Experiment und Messung, vielmehr weist der Begriff in diesem Zusammenhang auf die Einbindung von Zufallsprozessen hin. Die Ergebnisse dieser experimentellen Mathematik sind in gewissem Umfang ähnlich unbestimmt wie bei realen Messungen. Die Verwendung von Zufallszahlen generiert also keine Lösung im deterministischen Sinne.

Ziel der hier verwendeten Berechnungsverfahren ist es, so wirklichkeitsnah wie nötig und so allgemein wie möglich, stochastische Parameterunsicherheiten in eine seismische Gefährdungsanalyse einfließen zu lassen. Um das gesteckte Ziel zu erreichen, werden Epizentren, Magnituden,

magnitudenabhängige Herdtiefen und Abnahmerelationen mit Monte Carlo - Simulationen entsprechend den beobachteten Verteilungen simuliert. Die Ermittlung der für die Simulation benötigten Zufallszahlen ist in Unterabschnitt A.2.2 beschrieben. Weitere Hinweise zur Verwendung von Monte Carlo - Simulationen bietet das Buch „Die Monte Carlo - Methode“ von *Sobol* [180].

4.9 Berücksichtigung der Magnituden und Entfernungsabhängigkeit der Intensität durch Intensitäts - Zuordnungsbeziehung

Die frequenzunabhängige Ermittlung der seismischen Gefährdung als Überschreitensrate einer Intensität am Untersuchungsstandort kann mit einer empirischen Abnahmebeziehung betrachtet werden. Als Eingangsgrößen werden die Magnituden, Herdtiefen und die Hypozentralentfernungen benötigt. Aufgrund des erheblichen Einflusses der Herdtiefe im herdnahen Bereich sollte auf die Anwendung von Abnahmebeziehungen ohne die Berücksichtigung der Herdtiefe verzichtet werden. Für die in dieser Arbeit gezeigte seismische Gefährdungsanalyse auf Grundlage der Epizentren-dichte werden ein Erdbeben-Kataloge mit Monte-Carlo - Simulationen erstellt.

Dabei werden mit dem Modell der Epizentren-dichte - Klassen die Verteilung der simulierten Erdbeben in der Fläche vorgenommen. Mittels der normierten Magnituden-Eintretensraten $\lambda_{0(>M)}$ wurde jedem simulierten Erdbeben eine Magnitude zugewiesen. Anschließend wurden magnitudenabhängige Herdtiefen, wie in Unterabschnitt 4.7.2 beschrieben, für jedes Erdbeben simuliert. Zum Abschluss wird der Einfluss der simulierten Erdbeben auf den Standort untersucht. Voraussetzung für diese Untersuchungen sind die empirischen Abnahmebeziehungen, mit denen aus der Magnitude M und der Hypozentralentfernung R eine am Standort wirkende Intensität berechnet werden kann.

Von verschiedenen Autoren wurden entsprechende Abnahmebeziehungen für die Erwartungswerte aufgestellt. Es ist jedoch mit stochastischen Abweichungen vom jeweiligen Erwartungswert um eine ganze Intensitätsstufe zu rechnen. Die Abweichungen sind Folge der Charakteristik des jeweiligen Erdbeben-Ereignisses und den stochastischen Übertragungseigenschaften der seismischen Wellen zu dem betrachtenden Standort.

Deterministische Berechnungsverfahren liefern nicht die Möglichkeit, diese Abweichungen vom Erwartungswert entsprechend zu modellieren. Das Programm PSSAEL [149] von *Rosenhauer* bietet die Möglichkeit einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Betrachtung mit der unter (4.13) gezeigten empirischen Abnahmebeziehung.

$$I_{(M,R)} = 1,5M - BM - AKH \log_{10} \left(\frac{R}{10} \right) - \frac{AKOF * R}{10} \quad (4.13)$$

Die Parameter BM, AKH und AKOF werden in dem verwendeten Programm PSSAEL, wie in der Tabelle 4.1 angegeben, mit Monte Carlo - Simulationen ausgespielt, und somit wird für jedes Erdbeben aus dem simulierten Erdbeben-Katalog mit einer eigenen Abnahmebeziehung

Tab. 4.1: Simulationsbereiche und Verteilungen für die Parameter der verwendeten Abnahmebeziehung (4.13) nach [149]

Term	Simulationsbereich	Verteilung
BM	50 % zwischen 0.4 und 1.0	gleichverteilt
	50 % zwischen 1.0 und 1.6	gleichverteilt
AKH	50 % zwischen 2.5 und 3.0	gleichverteilt
	50 % zwischen 3.0 und 4.0	gleichverteilt
AKOF	50 % zwischen 0.001 und 0.003	logarithmisch gleichverteilt
	50 % zwischen 0.003 und 0.01	logarithmisch gleichverteilt

gerechnet. Die Abweichungen vom Erwartungswert der Abnahmebeziehungen werden somit ausreichend gewürdigt. Die Beziehung 4.13 wurde von *Ahorner* für das Gebiet der Bundesrepublik aufgestellt. Sie wurde für die gezeigten Beispiele ohne eine weitere Prüfung verwendet. Für genauere Gefährdungsanalysen ist die Übertragbarkeit auf andere Gebiete noch zu überprüfen.

Kapitel 5

Parameteruntersuchungen zur Epizentrendichte-Methode

Aber dieses Zittern hat seine Ursache im Brodeln des Zentralfeuers. Die Erdkruste ist ja nichts weiter als die Wand eines Kessels. Unter dem Druck von Gasen vibriert die Kesselwand.
J. Verne

5.1 Modellpunkte

Für die Parameteruntersuchungen wurde ein Untersuchungsgebiet mit 6 Modellpunkten in Südwestdeutschland gewählt. Die gewählten Modellpunkte liegen südlich des Main und östlich des Rheins vgl. Tabelle 5.1.

Das Untersuchungsgebiet umfasst neben der Region der Schwäbischen Alb und Teilen des Oberrheingrabens mit vergleichsweise höherer Seismizität auch die Gebiete des Nordschwarzwaldes und der Fränkischen Alb mit geringerer Seismizität, des Weiteren sind auch Gebiete, in denen bisher keine oder sehr wenige Erdbeben-Ereignisse überliefert worden sind, enthalten.

Tab. 5.1: Übersicht über die ausgewählten Untersuchungsgebiete für Parameteruntersuchungen

Gebiet	Qualität der Daten	Auswahlkriterien
Südwestdeutschland	umfangreiche Datenbasis, weit in die Vergangenheit reichend	6 Punkte mit Variation der Seismizität, Vergleich mit [166] möglich
Standort Bonn	umfangreiche Datenbasis, weit in die Vergangenheit reichend	Vergleich mit [115] möglich

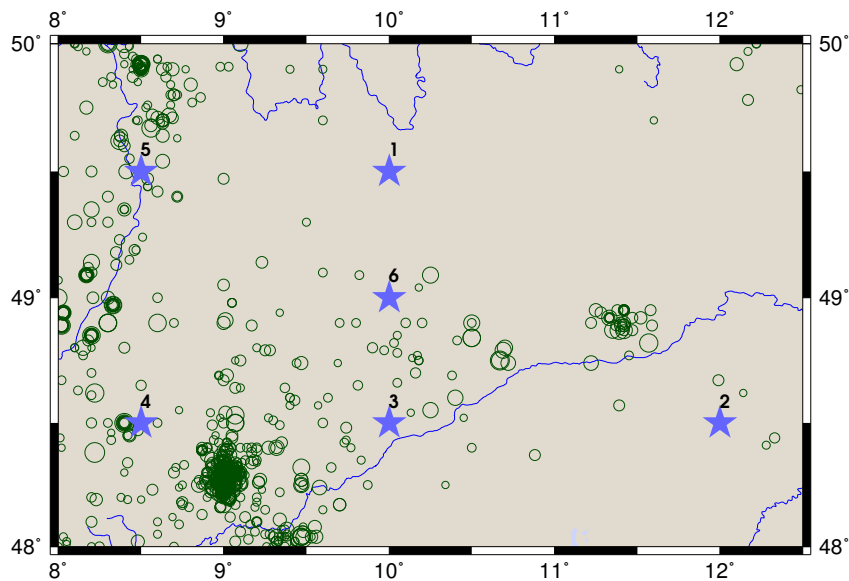


Abb. 5.1: Modellpunkte in Südwestdeutschland im Kontext der historisch berichteten Erdbeben-Ereignisse des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7]

Tab. 5.2: Charakteristik der Seismizität an den 6 Modellpunkten in Südwestdeutschland nach *Schwarz et al.* [166]

Modellstandort	Koordinaten	Seismizitätsbedingungen
MP1	10°00' E, 49°30' N	geringe Seismizität am Standort, in größerer Entfernung zu Gebieten mit höherer Seismizität
MP2	12°00' E, 48°30' N	geringe Seismizität am Standort, in größerer Entfernung zu Gebieten mit höherer Seismizität
MP3	10°00' E, 48°30' N	geringere Seismizität am Standort, umgeben von Gebieten mit höherer Seismizität
MP4	8°30' E, 48°30' N	moderate Seismizität am Standort, in größerer Entfernung befindliche Gebiete höherer Seismizität
MP5	8°30' E, 49°30' N	höherer Seismizität am Standort
MP6	10°00' E, 49°00' N	geringere Seismizität am Standort, geringe Entfernungen zu höherern Seismizitäten

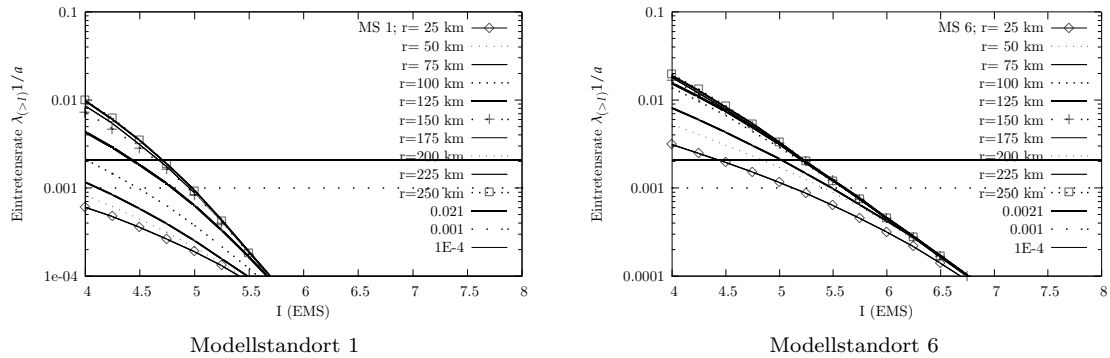


Abb. 5.2: Einfluss des Modellradius (Flächeninhalt des Modells) auf die berechneten seismischen Gefährdungsfunktionen am Beispiel der Modellpunkte 1 und 6 in Südwestdeutschland auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7]

Die Wahl des Gebietes fiel zum einen auf diese Region, da einerseits im Untersuchungsgebiet eine große Bandbreite vorhandener Seismizität anzutreffen ist und andererseits für die gewählten Modellpunkte im Untersuchungsgebiet schon Untersuchungsergebnisse mit anderen deterministischen und probabilistische Methoden der seismischen Gefährdungsanalyse von *Schwarz, Raschke* und *Rosenhauer* vorliegen, die für einen Vergleich der Ergebnisse herangezogen werden können [166]. Die genaue Lage der gewählten Modellpunkte kann der Abbildung 5.1 entnommen werden. Dieses Gebiet wird auch für vergleichende Untersuchungen mit anderen Methoden der seismischen Gefährdungsanalyse verwendet, welche nachfolgend in Kapitel 6 beschrieben sind. Abbildung 6.4 zeigt die gewählten Modellpunkte im Kontext der häufig verwendeten Einteilungen in seismische Quellzonen.

Für die Untersuchung des Einflusses der angesetzten Gewichtungen für ausgewertete Extremwert-Zeitintervalle bot sich der Modellstandort Bonn an, da es hier einen Beitrag von *Leydecker et al.* [115] gibt, der zum Vergleich der Ergebnisse herangezogen werden kann. Die Vorstellungen der Parameteruntersuchungen zur Gewichtung folgt in Abschnitt 5.3. Der Modellstandort Bonn wird ebenfalls im nachfolgenden Kapitel für vergleichende Untersuchungen verwendet.

5.2 Radius der Epizentrendichte-Modelle

Mit zunehmendem Abstand eines Erdbeben-Ereignisses von einem zu untersuchenden Standort nimmt die am Standort anzutreffende Intensität für dieses Ereignis nach den Regeln von Abnahmebeziehungen ab. Es zeigt sich, dass bis zu einem bestimmten Flächeninhalt des Epizentrendichte-Modells die seismische Gefährdung für einen betrachteten Standort zunimmt. Weiterhin zeigt sich, dass ab einem bestimmten Flächeninhalt des Modells die Zuwächse der seismischen Gefährdung so klein sind, dass sie keinen relevanten Einfluss mehr auf das für den untersuchten Standort ermittelte Gefährdungsniveau haben. Untersuchungsziel war es, herauszufinden, ab welchem Flächeninhalt (Radius um den Standort) des Epizentrendichte-Modells es nicht mehr sinnvoll ist,

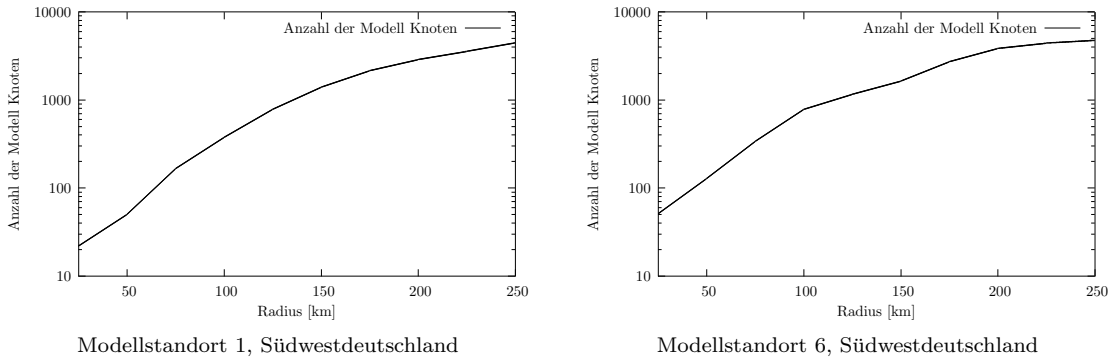


Abb. 5.3: Anwachsen der Komplexität der Epizentrendichte-Modelle in Abhängigkeit vom gewählten Modellradius am Beispiel eines Modells auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7]

größere Einflussgebiete auf einen Standort zu untersuchen. Der zu betrachtende Modell-Radius hängt dabei von dem zu untersuchenden Gefährdungsniveau ab. Anhand der durchgeführten Untersuchungen zum Modell-Radius kann festgestellt werden, dass eine Beschränkung des betrachteten Gebietes sinnvoll ist. Die Komplexität der Epizentrendichte-Modelle kann begrenzt werden (vgl. Abbildung 5.3), ohne einen Einfluss auf das Ergebnis zu nehmen. Im Umkehrschluß eignet sich die Kenntnis der Größe der gefährdungsbeeinflussenden Fläche zu einer Beurteilung, ob die vorliegenden Erdbeben-Kataloge zur seismischen Gefährdungsanalyse als ausreichend betrachtet werden können. Das heißt, dass die Erdbeben-Kataloge die benötigte Modell-Fläche in der Umgebung des zu untersuchenden Standortes vollständig abdecken.

Für Standortuntersuchungen in den Randgebieten der durch den verwendeten Erdbeben-Katalog abgedeckten Fläche ist ein Katalog für angrenzende Gebiete hinzuzuziehen. Die auftretenden Probleme bei der Arbeit mit mehreren aneinander angrenzenden oder sich überlappenden Erdbeben-Katalogen sind bereits ausführlich in dem Beitrag zum ECOS-Erdbeben-Katalog [49] aufgezeigt worden. Für die Untersuchungen wurden zunächst für die Modellpunkte aus Abschnitt 5.1 Berechnungen mit verschiedenen Modellradien durchgeführt. Anschließend wurden die Ergebnisse daraufhin untersucht, ab welchem Flächeninhalt (Radius) des Untersuchungsgebietes keine wesentlichen Änderungen am Ergebnis der Standortintensität mehr erfolgen. Dies ist in Zusammenhang mit dem zu untersuchenden Gefährdungsniveau (Eintrittsrate) zu sehen.

Nach Auswertung der Untersuchungsergebnisse, die beispielhaft in Abbildung 5.2 dargestellt sind, zeigte sich, dass die Berechnungen mit Radien größer ca. 150 km zu keiner signifikanten Erhöhung der seismischen Gefährdung am zu untersuchenden Standort führten. Auch war festzustellen, dass bei niedrigeren Eintretensraten standortnahe Erdbeben-Ereignisse ein größeres Gewicht bekommen und der Einfluss des Modellradiuses bei diesen niedrigeren Raten eine geringere Rolle spielt. Diese Beobachtungen waren an allen untersuchten Modellpunkten zu machen. Diese Feststellungen sind ebenfalls zu ziehen, wenn die in 7.4 dargestellten Untersuchungsergebnisse zur Analyse des Gefährdungshintergrundes mit Hilfe von Deaggregationen untersucht werden.

5.3 Gewichtung der Extremwert-Zeitintervalle

Dem Hauptkritikpunkt des *Gumbel*-Verfahrens, bei einer kleinen Anzahl von Eingangsdaten vom gewählten Zeitfenster abhängige instabile Ergebnisse zu erzeugen, wird zum einen dadurch begegnet, dass die Anzahl der Eingangsdaten durch die Zusammenfassung zu Epizentrendichte-Klassen erhöht werden, und zum anderen, dass mehrere Zeitfenster verwendet werden, die anschließend mit einem logischen Baum zusammengefasst werden (vgl. *Rosenhauer* [148]).

Für die Bestimmung der Magnituden-Eintrittsraten werden Extremwerte mehrerer Zeitintervalle (z.B. 100, 50, 20, 10 Jahresextremwerte) gegebenenfalls mit ihren Zusammenfassungen jeweils einzeln ausgewertet. Die Zusammenfassungen werden gebildet in dem jeweils (1, 2, 3, ..., n) Extremwerte zu einem Extremwert aus dem gemeinsamen Zeitintervall zusammengefasst werden. Anschließend werden die Teilergebnisse für jedes Zeitintervall mit einer vom Bearbeiter frei gewählten Gewichtung konsolidiert. Dabei hat die angesetzte Gewichtung der verwendeten Zeitintervalle einen entsprechenden Einfluss auf die Magnituden-Eintrittsraten.

Bei Verwendung der Epizentrendichte-Methode sind im Vergleich zu der herkömmlichen Berechnungsmethode mit seismischen Quellzonen mehr Erdbeben-Daten zur Bestimmung der Magnituden-Häufigkeiten vorhanden. Aus diesem Grund ist der Einfluss der gewählten Gewichtung der Zeitintervalle bei der Epizentrendichte-Methode geringer, wie am Vergleich der Abbildungen 5.4 (Epizentrendichte-Methode) und 5.5 (herkömmliche Methode mit seismischen Quellzonen) zu erkennen ist. In Abbildung 6.6 sind die für dieses Beispiel verwendeten Zonen dargestellt.

Die Abbildung 5.4 zeigt die Magnituden-Eintrittsraten in Abhängigkeit der Gewichtung der verwendeten Zeitintervalle. Die gezeigten Werte wurden jeweils mit einer Gleichgewichtung bzw. mit einer 90% Gewichtung der jeweils kleinsten bzw. größten Teilergebnisse der Magnituden-Eintrittsraten ermittelt. Die dargestellten 90% Gewichtungen sind lediglich zur Anschaulichkeit des Effektes gewählt wurden. Üblicherweise wird eine Gleichgewichtung oder eine Gewichtung entsprechend des erwarteten Fehlers (vgl. Abschnitt 4.7) gewählt.

5.4 Anzahl der Epizentrendichte-Klassen

Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode verwendet Unterteilungen des Untersuchungsgebietes in Epizentrendichte-Klassen. Sie können als eine Art Ersatzmodell für die bisher häufig verwendeten seismischen Quellzonen betrachtet werden.

Die Anzahl der verwendeten Epizentrendichte-Klassen ist dabei ein frei wählbarer Parameter. Mit einer sinnvollen Wahl dieses Parameters kommen die Vorteile der Epizentrendichte-Methode voll zur Geltung (vgl. Abschnitt 1.1). Die Anzahl der Epizentrendichte-Klassen sollte daher weder zu klein noch zu groß gewählt werden.

Eine zu kleine Anzahl von Epizentrendichte-Klassen erlaubt keine ausreichende Differenzierung zwischen den variierenden Seismizitäten der einzelnen Epizentrendichte-Klassen und verwischt lokale Seismizitätsanhäufungen zu sehr. Andererseits wird mit einer zu hohen Zahl von Epizentrendichte-Klassen auf die Vorteile verzichtet, die sich aus der gemeinsamen Ermittlung von

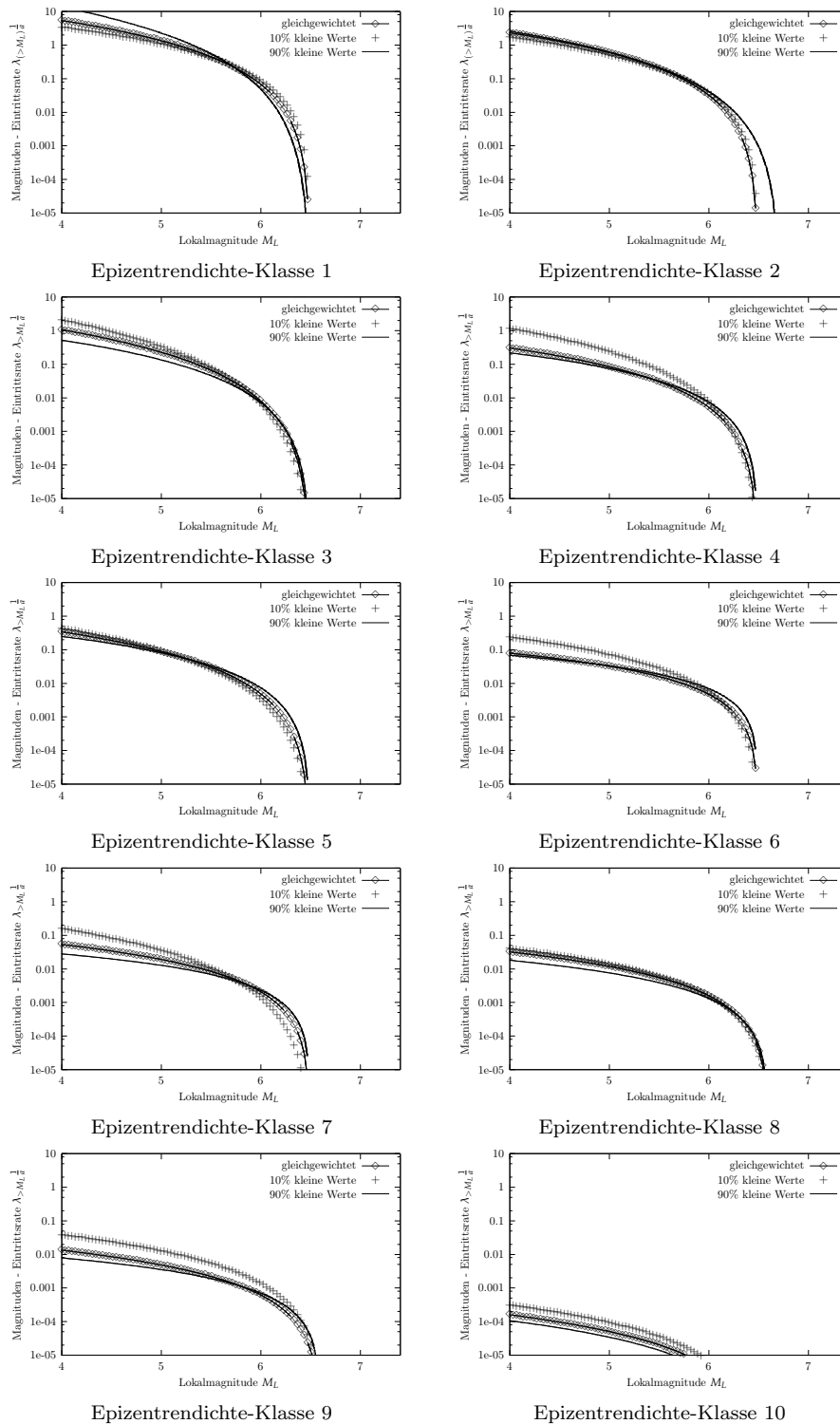


Abb. 5.4: Einfluss der angesetzten Gewichtungen auf Magnituden-Eintrittsraten für den Erdbeben-Katalog nach *Ahorner et al. [9]*, Epizentrendichte-Modell eingeteilt in 10 Epizentrendichte-Klassen

Probabilistische seismische Gefährdungsanalysen auf der Grundlage von Epizentrendichten und ihre ingenieurpraktischen Anwendungsgebiete

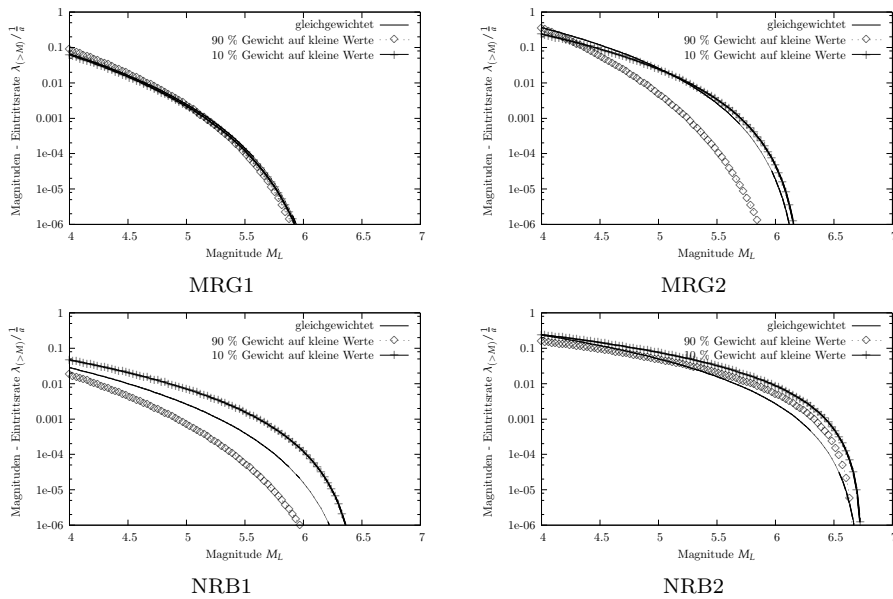


Abb. 5.5: Einfluss der angesetzten Gewichtungen der ausgewerteten Zeitintervalle auf Magnituden-Eintrittsraten mit *Gumbel* - Typ III - Verteilung für den Erdbeben-Katalog nach *Ahorne* et al. [9], seismische Quellzonen MRG1, MRG2, NRB1, NRB2 des *Ahorne/Rosenhauer*-Modell

Erdbebenstärke-Häufigkeiten für zusammengefasste Regionen ähnlicher Epizentrenrichtungen ergeben (vgl. Abschnitt 2.6).

Die Anzahl der Epizentrenrichte-Klassen sollte niedriger liegen als die Anzahl der seismischen Quellzonen in den bisher verwendeten Modellen. Aufgrund der daraus folgenden vergleichsweise größeren Flächeninhalte der Epizentrenrichte-Klassen steht für die Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten eine größere Datenmenge an historischen Erdbeben-Ereignissen zur Verfügung. Die Erdbebenstärke-Häufigkeiten lassen sich somit mit größerer Konfidenz bestimmen, was zu einer Verbesserung der seismischen Gefährdungsanalyse führt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Untersuchungen mit Einteilungen in 6–15 Epizentrenrichte-Klassen durchgeführt. Die Variationen in dieser Bandbreite führten zu vergleichbaren Ergebnissen der seismischen Gefährdung.

Weniger als 6 bzw. mehr als 15 Epizentrenrichte-Klassen lassen jedoch die in den vorangegangenen Absätzen beschriebenen Probleme auftreten. Für die Aufstellung der Epizentrenrichte-Modelle wird vom Autor die Verwendung von 10 Epizentrenrichte-Klassen empfohlen. Die gezeigten Beispiele wurden ebenfalls mit Einteilungen in 10 Epizentrenrichte-Klassen berechnet.

5.5 Untersuchungen zur Größe maximaler Erdbeben

Ein weiterer wichtiger Parameter für die probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen ist die maximal mögliche Erdbebenstärke von potentiellen Erdbeben-Ereignissen im untersuchten Gebiet.

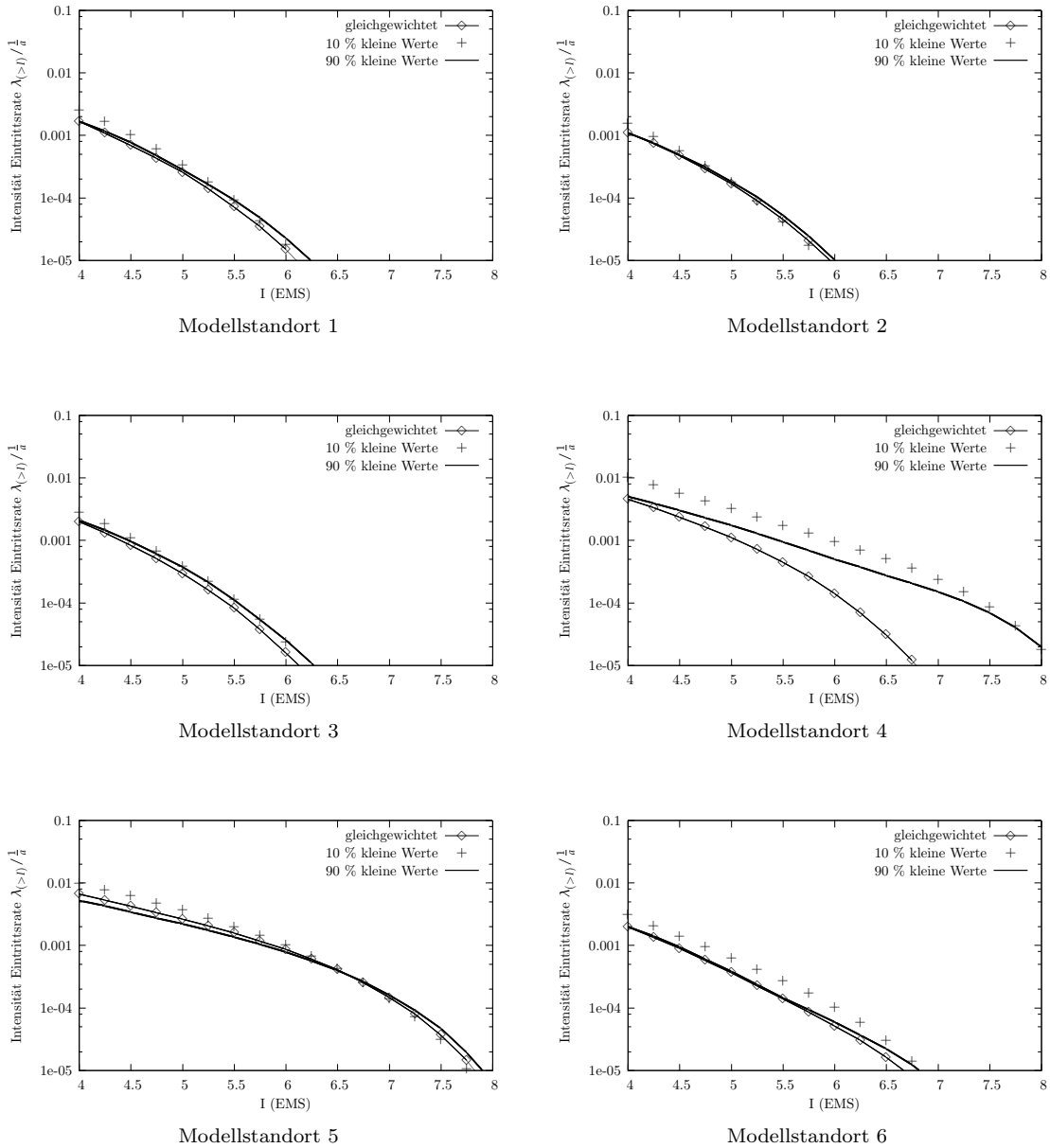


Abb. 5.6: Einfluss der angesetzten Gewichtungen auf Intensitäts-Eintrittsraten an den Modellpunkten nach 6.1, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9]

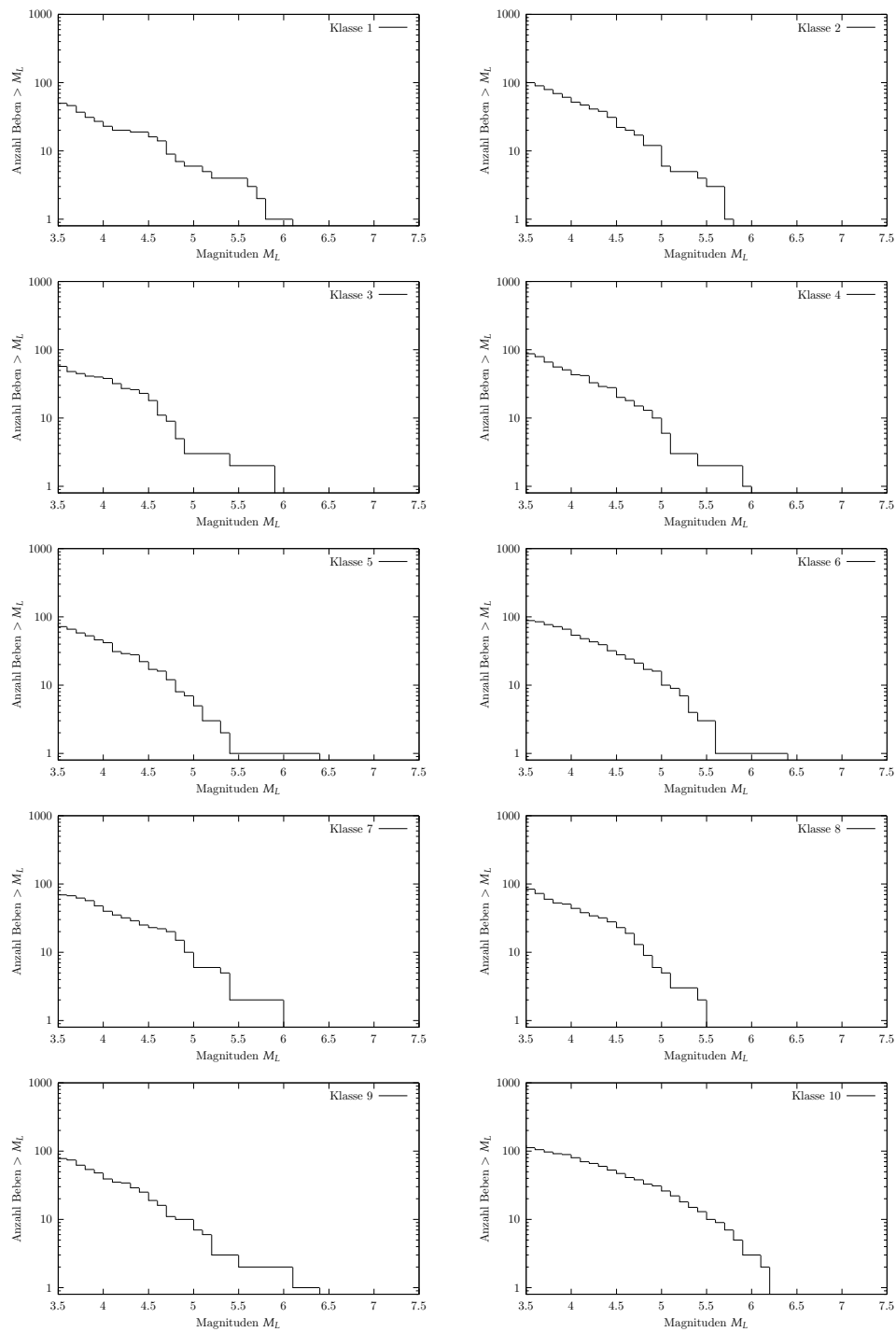


Abb. 5.7: Verteilung der Magnituden in den Epizentren-dichte-Klassen unter Verwendung des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7]

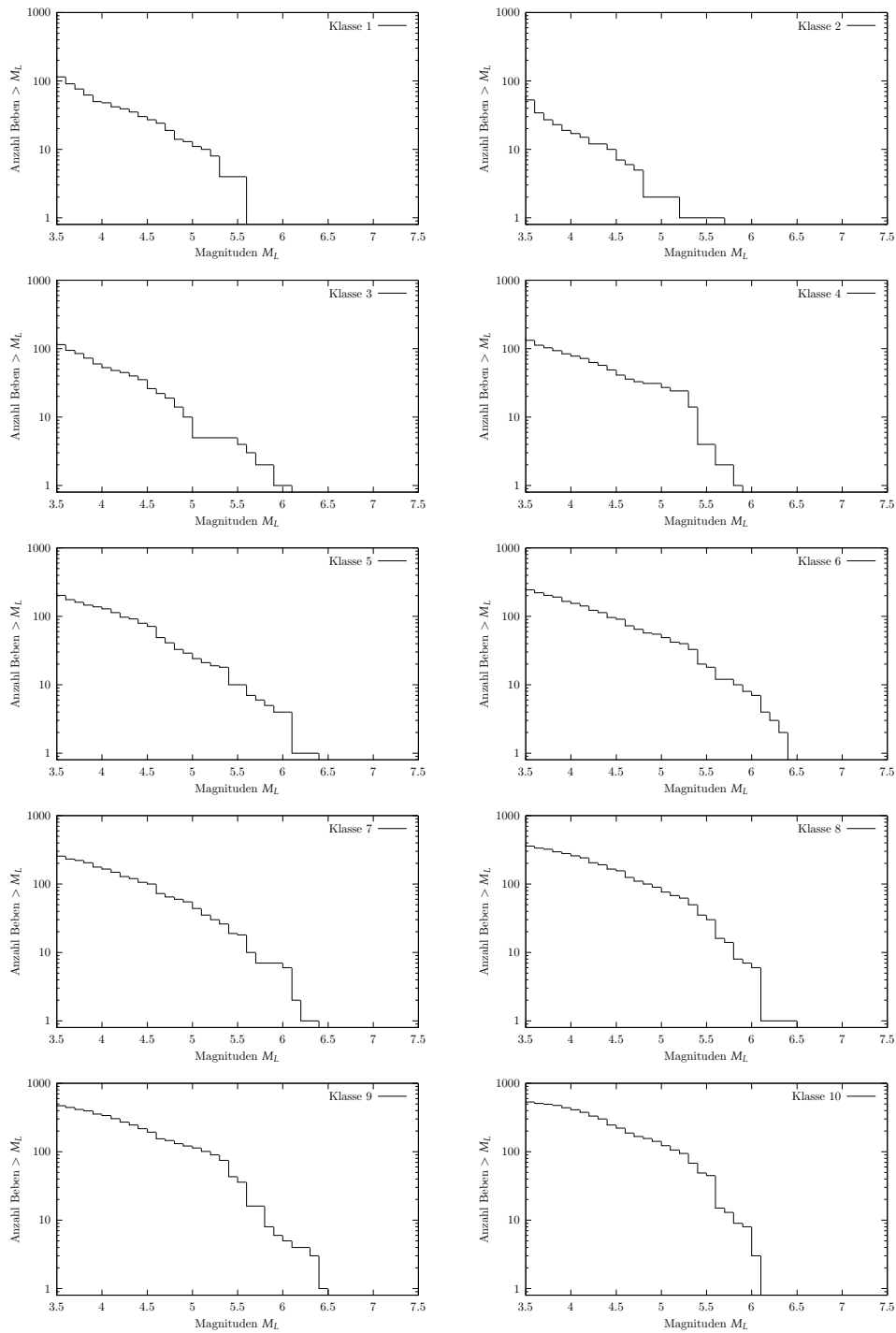


Abb. 5.8: Verteilung der Magnituden in den Epizentrendichte-Klassen unter Verwendung des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9]

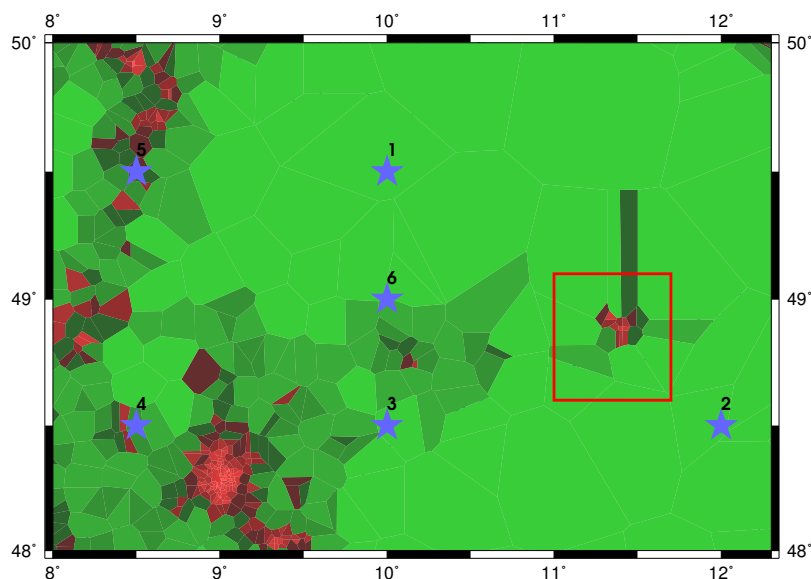


Abb. 5.9: Epizentrendichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1999

Der Einfluss dieses Parameters ist bei kurzen Prognosezeiträumen gering und nimmt mit kleiner werdenden Eintretensraten bzw. mit langen Prognosezeiträumen zu. Wie in 2.8 beschrieben lassen sich aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten in der derzeit verfügbaren Datenbasis noch keine exakten Werte für die Erdbebenstärken der seltenen maximal möglichen Erdbeben-Ereignisse angeben. Die Diskussionen unter den beteiligten Fachleuten um die Bestimmung und den Wert der maximal möglichen Erdbebenstärken dauern an. Es ist zu vermuten, dass eine exakte Bestimmung der maximal möglichen Erdbebenstärken wohl auch in naher Zukunft nicht möglich ist.

Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen die Verteilung der Magnituden-Werte in den festgelegten Epizentrendichte-Klassen für die Erdbeben-Kataloge nach *Ahorner* [7] und nach *Ahorner et al.* [9]. Für die deterministisch festgelegten Maximalwerte bleibt anzumerken, dass aufgrund der kleinen Datenbasis eine Vertrauenswürdigkeit noch nicht im vollem Umfange hergestellt ist. Aus diesem Grund sind die in den Beispielen gezeigten maximal möglichen Erdbebenstärken in den Epizentrendichte-Klassen durch weitere Untersuchungen auf ihre Vertrauenswürdigkeit zu prüfen. Aufgrund des relativ geringen Einflusses auf die Ergebnisse der seismischen Gefährdungsanalyse für Eintretensraten von bis zu 10^{-4} [1/a] wurde hier auf weitere Untersuchungen verzichtet und es wird empfohlen, den auch von *Ahorner* und *Budny* in [3] vorgeschlagenen Maximalwert von $M_L = 6,75$ für seismische Gefährdungsanalysen auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland zu verwenden.

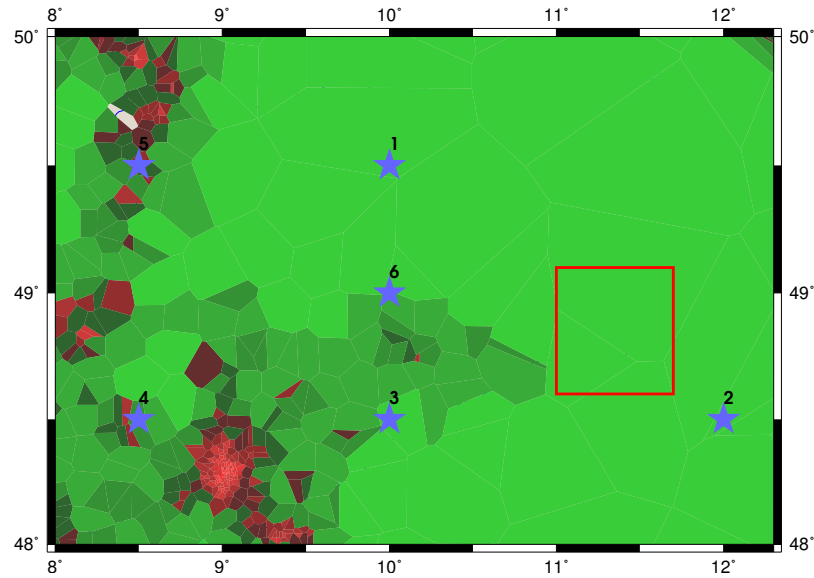


Abb. 5.10: Epizentrendichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1900 und 1930–1999

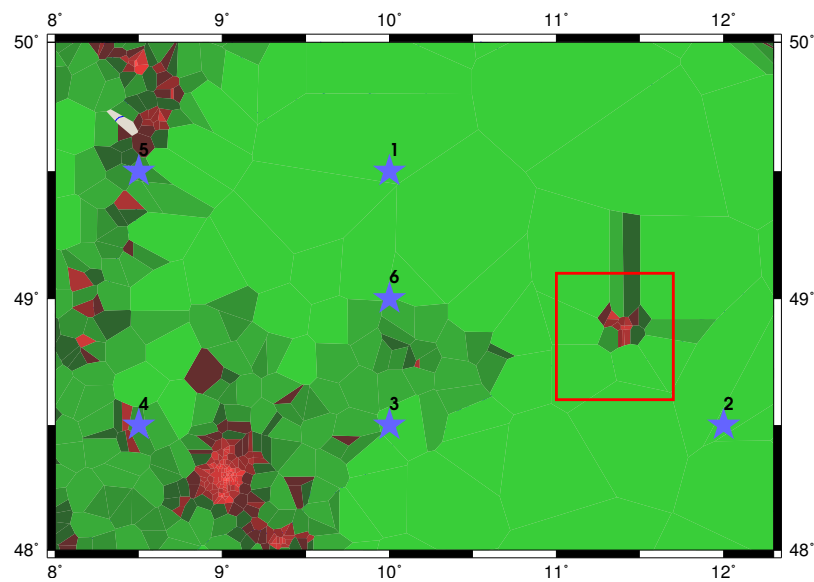


Abb. 5.11: Epizentrendichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* [7] für die Jahre 1021–1930 und 1960–1999

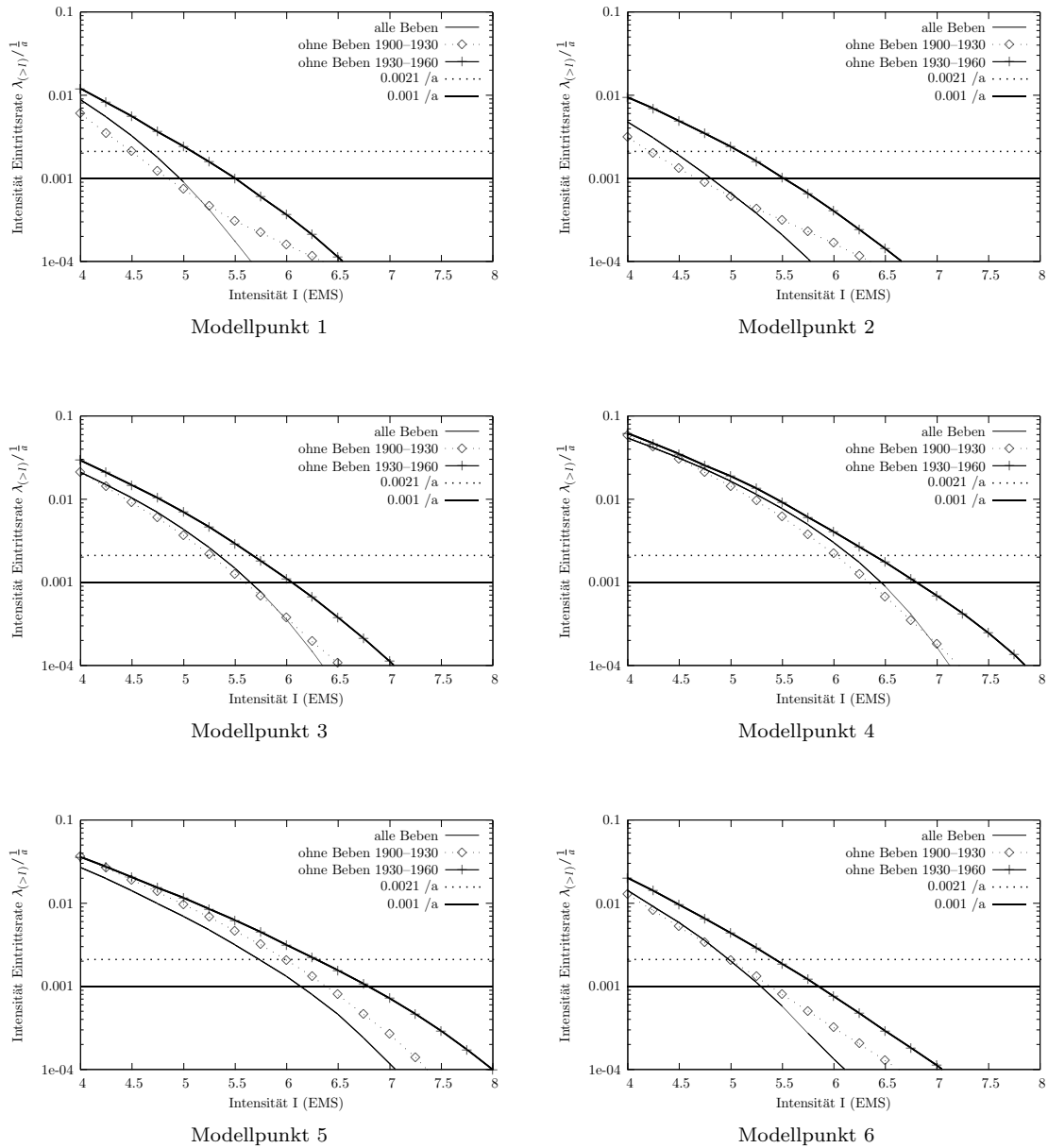


Abb. 5.12: Einfluss der Zeiträume 1900–1930 und 1930–1960 auf die Intensitäts - Eintretensraten der Modellpunkte nach 6.1

5.6 Anpassung der Modelle an eine veränderte Datenbasis

Bezugnehmend auf die Betrachtungen zur Stationarität von Erdbebenereignissen in Abschnitt 2.4, Abb. 2.2–2.4 ist in den Abb. 5.9–5.11 der Einfluss einer geänderten Datenbasis auf die Epizentrendichte - Modelle dargestellt. Die Abbildungen 5.9–5.11 zeigen den Einfluss der verwendeten Epizentren der Erdbebenkataloge auf die sich daraus ergebenden Epizentrendichte - Modelle, die aus der jeweils verwendeten Datenbasis resultieren.

Das für die hier gezeigten Berechnungsbeispiele ermittelte Epizentrendichte-Modell basiert auf Nachbarschaftsanalysen von Epizentren historisch berichteter Erdbeben-Ereignisse mit einem *Voronoi* - Diagramm, wie es in der Abbildung 4.8 dargestellt ist (vgl. A.2.1).

Da die nichttektonischen Erdbeben-Ereignisse aufgrund von menschlichen Aktivitäten (z.B. Bergbau) für lange Prognosezeiträume nur schwer vorhersagbar sind, wird bei der Erstellung der Epizentrendichte-Modelle ausschließlich mit den tektonischen Erdbeben-Ereignissen gearbeitet. Die nichttektonischen Erdbeben-Ereignisse sind zum großen Teil von den Autoren der verwendeten Erdbeben-Kataloge gekennzeichnet worden und können so leicht aussortiert werden.

Die seismische Gefährdung infolge der nichttektonischen Erdbeben-Ereignisse ist im Falle von Bauwerken und Anlagen mit hohem Sekundärrisikopotential gegebenenfalls gesondert zu berücksichtigen.

Die Epizentrendichte-Modelle für die gezeigten Berechnungsbeispiele sind in den Abbildungen 6.1–6.3 dargestellt. Die Modelle sind mit Hilfe eines *Voronoi*-Diagramms auf Grundlage des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* ermittelt worden (vgl. A.1.3). Die verwendete Vorgehensweise zur Erstellung der Epizentrendichte-Modelle auf Grundlage historischer Erdbeben-Kataloge wurde vom Verfasser im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und ist ausführlich in Kapitel 4, “Epizentrendichte-Methode“, beschrieben worden.

Die Abbildungen 6.1–6.3 zeigen das für die Berechnungsbeispiele verwendete Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit den heute gebräuchlichen Einteilungen in seismische Quellzonen. Das Epizentrendichte-Modell für die in diesem Kapitel vorgestellten Berechnungsbeispiele seismischer Gefährdungsanalysen für die Modellpunkte wurden mit einem Modellradius von 200 km Umkreis und mit einer Einteilung in 10 Epizentrendichte-Klassen ermittelt.

Die Auswahl dieser Modellparameter ist in Kapitel 5, beschrieben. Regionen, die zu einer Epizentrendichte-Klasse gehören, sind in den Abbildungen 6.1–6.3 jeweils mit der gleichen Farbe gekennzeichnet. Dabei sind die Epizentrendichte-Klassen von sehr dicht (Epizentrendichte-Klasse 1, dunkles Rot) bis zu einer geringen Epizentrendichte (Epizentrendichte-Klasse 10, helles Grün) abgestuft. Nachdem die Einteilung des Untersuchungsgebietes in die Epizentrendichte-Klassen vorgenommen worden ist, werden die Erdbebenstärke-Häufigkeiten für die einzelnen Epizentrendichte-Klassen bestimmt.

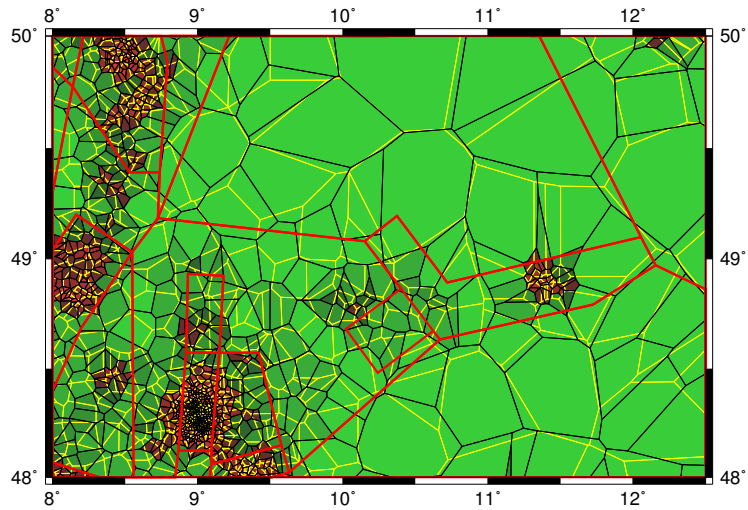


Abb. 5.13: Simulierte Herdunsicherheiten von $\pm 10\text{km}$ und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischer Quellzonen von *Ahorner/Rosenhauer*

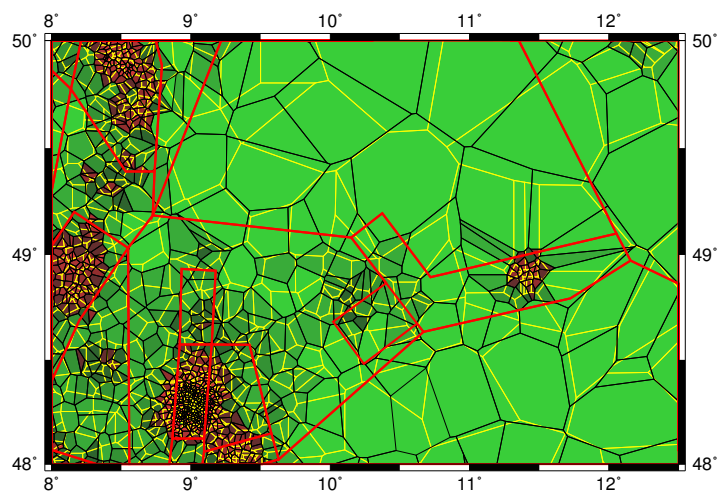


Abb. 5.14: Simulierte Herdunsicherheiten von $\pm 20\text{km}$ und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischen Quellzonen von *Ahorner/Rosenhauer*

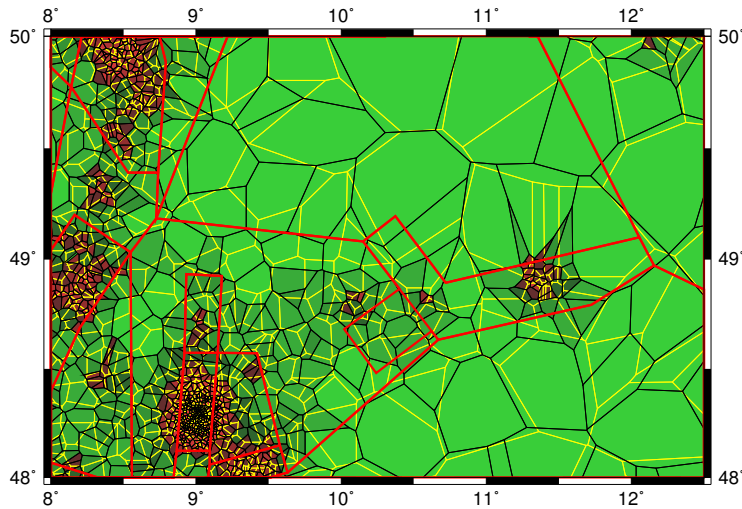


Abb. 5.15: Simulierte Herdunsicherheiten von $\pm 30\text{km}$ und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischer Quellzonen von *Ahorner/Rosenhauer*

5.7 Simulation von Herdunsicherheiten

Im Rahmen der Arbeit wurden Untersuchungen über den Einfluss von Herdunsicherheiten in den Erdbeben-Katalogen durchgeführt. Es wurden dazu Simulationen vorgenommen, die die Epizentren der vorliegenden Erdbeben-Kataloge mit einem zufälligen Verschiebungsvektor von maximal 10, 20 und 30km verschoben. Die Abbildungen 5.13 und 5.15 zeigen die Anpassungsfähigkeit des Epizentrendichte-Modells an die jeweils simulierten Herdunsicherheiten und demonstrieren einmal mehr den Vorteil der Epizentrenmethode, flexibel auf Änderungen in der Datenlage reagieren zu können.

Die in der Abbildung 5.16 gezeigten Gefährdungskurven, welche mit den beschriebenen Simulationen der Herdunsicherheiten ermittelt wurden, lassen den geringen Einfluss etwaiger Herdunsicherheiten auf das Ergebnis erkennen.

5.8 Einfluss von Vor- und Nachbeben

Die Abbildung 5.17 zeigt beispielhaft den Einfluss einer Berücksichtigung von Vor- und Nachbeben für seismische Gefährdungsanalysen. Für die Untersuchungen wurden die die 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. 6.1) gewählt. Als Datenbasis für die mit der Epizentrendichte-Methode berechneten Gefährdungsfunktionen diente der Erdbeben-Katalog nach *Ahorner et al.* [9].

Bei einer Nichtberücksichtigung von Vor- und Nachbeben ist eine Reduktion der berechneten seismischen Gefährdung um bis zu $1/4$ Intensitätsstufen festzustellen.

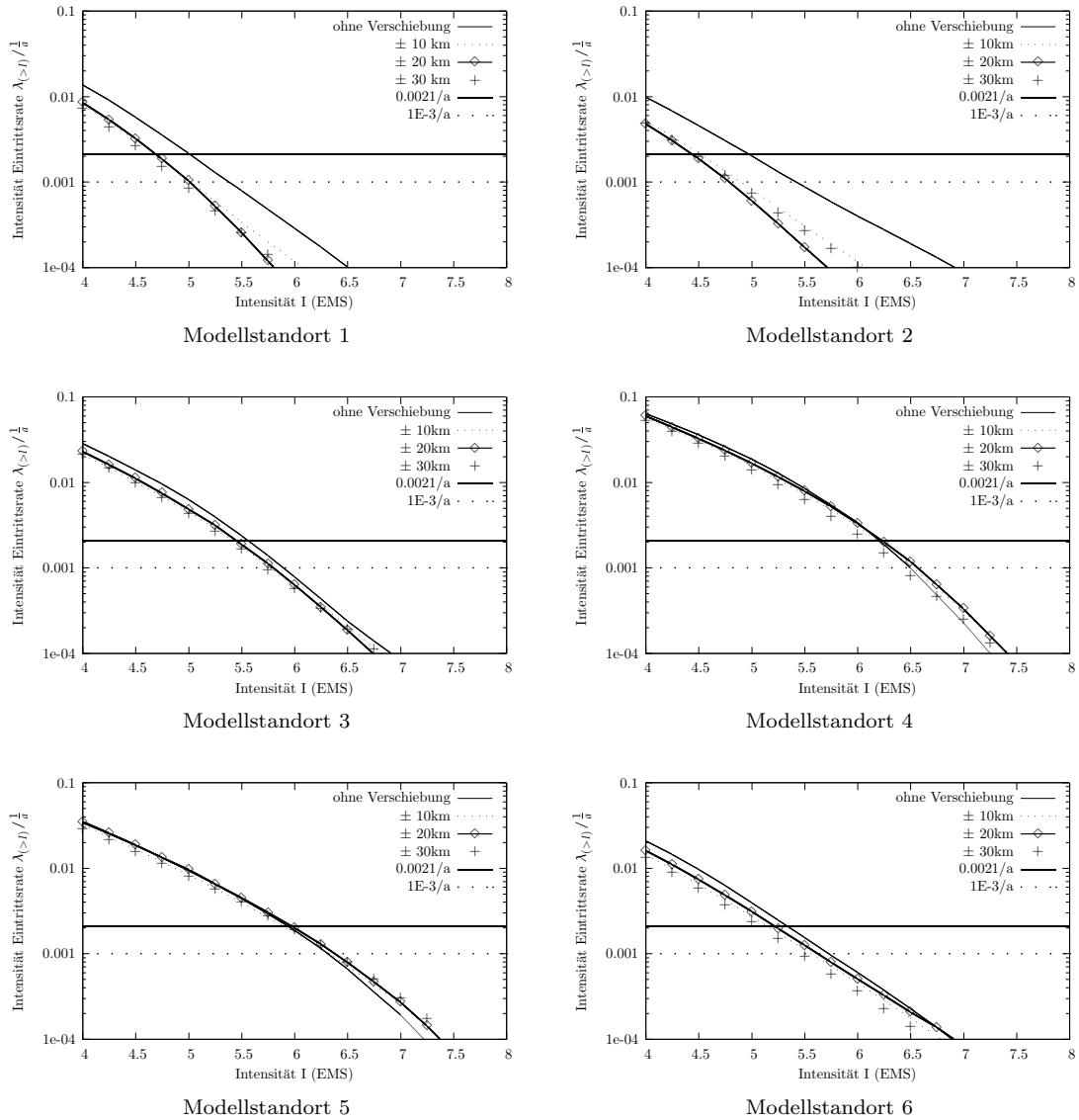


Abb. 5.16: Einfluss von ± 10 , ± 20 und ± 30 km Herdunsicherheiten auf die seismischen Gefährdung, berechnet für die 6 Modellpunkte in Südwestdeutschland auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner* [7]

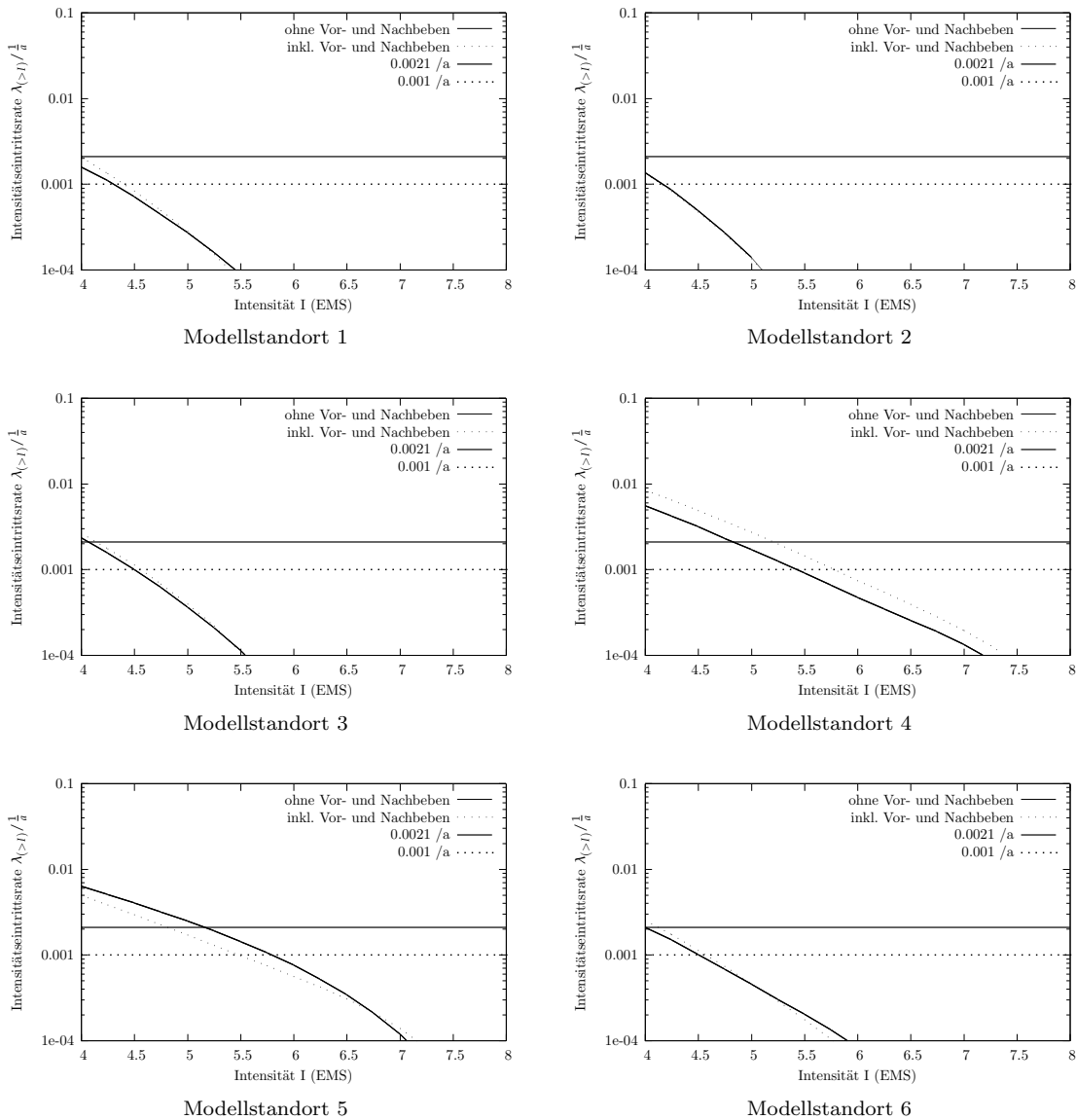


Abb. 5.17: Einfluss von Vor- und Nachbeben am Beispiel der 6 Modellpunkte in Südwestdeutschland, dargestellt sind mit der Epizentrendichte-Methode berechnete Gefährdungsfunktionen auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach Ahorner et al. [9] zum einen inkl. Vor- und Nachbeben und zum anderen ohne Vor- und Nachbeben

5.9 Feststellungen über den Einfluss von Parametern

Tab. 5.3: Schematische Darstellung des Einflusses von Parametern

Parameter	Wirkung
Verkleinerung des Modell-Radius der Epizentrendichte-Modelle (vgl. Abschnitt 5.2)	
Verkleinerung der deterministisch festgelegten maximal Magnituden (vgl. Abschnitt 5.5)	
Berücksichtigung von Herdunsicherheiten (vgl. Abschnitt 5.7)	
Berücksichtigung von vielen kleinen Erdbeben-Ereignissen bei der Bestimmung der Erdbebenstärke-Häufigkeiten	

Die Tabelle 5.3 zeigt schematisch den Einfluss von Parametern auf die seismischen Gefährdungsfunktionen. Es ist festzustellen, dass eine Verkleinerung des Modell-Radius zu einer Reduzierung der ermittelten Gefährdung im Bereich größerer Eintretensraten, eine Verkleinerung der maximal Magnituden bzw. die Berücksichtigung von Herdunsicherheiten zu einer Reduzierung der ermittelten Gefährdung im Bereich kleiner Eintretensraten und die Berücksichtigung der kleineren Erdbeben zu einer zu einer höheren Gefährdung im Bereich größerer Eintretensraten und einer Reduzierung im Bereich kleiner Eintretensraten führen.

Kapitel 6

Vergleichende Untersuchungen mit der Epizentrendichte-Methode

*Erregt ist ganz Messina - ... Auch auf der Erde, so fest sie
ruht auf den ewigen, alten Säulen, wankt das Glück und will
nicht weilen
F. Schiller*

6.1 Vergleich an Modellpunkten in Südwestdeutschland

Als Untersuchungsobjekt werden hier die sechs Modellpunkte aus dem Gebiet Südwestdeutschland verwendet, welche bereits für die Parameteruntersuchungen in dem vorangegangenen Kapitel verwendet wurden. Eine detaillierte Beschreibung der Modellpunkte mit ihrer seismischen Situation ist aus diesem Grunde schon in Abschnitt 5.1 auf Seite 51 zu finden.

Die für den Vergleich verwendeten Daten, das Epizentrendichte-Modell, die Bebenstärke-Häufigkeiten und die Ergebnisse der an den gezeigten Modellpunkten durchgeführten seismischen Gefährdungsanalysen auf Basis der Epizentrendichte-Methode werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt (vgl. Kapitel 4). Ebenfalls werden in den folgenden Abschnitten Vergleiche mit den Ergebnissen der probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse auf Basis der seismotektonischen Einteilung von *Ahorner* und *Rosenhauer* [4] aus [166] gezogen und vorgestellt. In der Abbildung 6.5 sind Gefährdungskurven der herkömmlichen zonenbasierten Methode und der Epizentrendichte-Methode vergleichend gegenübergestellt. Die Gefährdungskurven für die herkömmliche Methode sind dem Beitrag von *Rosenhauer* et al. entnommen aus [166]. Die Gefährdungskurven der Epizentrendichte-Methode wurden vom Autor basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* et al. ermittelt. Für alle 6 Modell-Punkte lässt sich eine gute bis sehr gute Übereinstimmung in den Ergebnissen zeigen.

Tab. 6.1: Übersicht über die ausgewählten Modellpunkte für die im Folgenden vorgestellten vergleichenden Untersuchungen

Gebiet	Qualität der Daten	Auswahlkriterien
Modellpunkte in Südwestdeutschland		6 Modell-Punkte mit Variation der Seismizität, Vergleich mit <i>Schwarz</i> et al. [166] möglich
Modellpunkt Bonn	umfangreiche Datenbasis, weit in die Vergangenheit reichend	Vergleich mit <i>Leydecker</i> et al. [115] möglich
Modellpunkt Köln		Vergleich mit <i>Grünthal</i> et al. [84] möglich

Tab. 6.2: Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für die Modellstandorte Südwestdeutschland

	Literatur / Quelle	eigene Berechnung
Methode	<i>Rosenhauer</i> [148], [149]	Epizentrendichte-Methode
Einteilung der seismischen Quellzonen	Regionen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> (Ausschnitt) [3]	Epizentrendichte-Modell auf Basis des verwendeten Erdbeben-Kataloges, eingeteilt in 10 Epizentrendichte-Klassen
Erdbeben-Katalog	Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7]	<i>Ahorner</i> et al. [9]
Berücksichtigung von Modell-Unsicherheiten	begrenzte Berücksichtigung	begrenzte Berücksichtigung
Ermittlung der Erdbeben-Häufigkeiten	Extremwertstatistik nach <i>Gumbel</i>	Extremwertstatistik nach <i>Gumbel</i> [86]
Programm	PSSAEL [149]	PSSAEL [149]

Probabilistische seismische Gefährdungsanalysen auf der Grundlage von Epizentrendichten und ihre ingenieurpraktischen Anwendungsgebiete

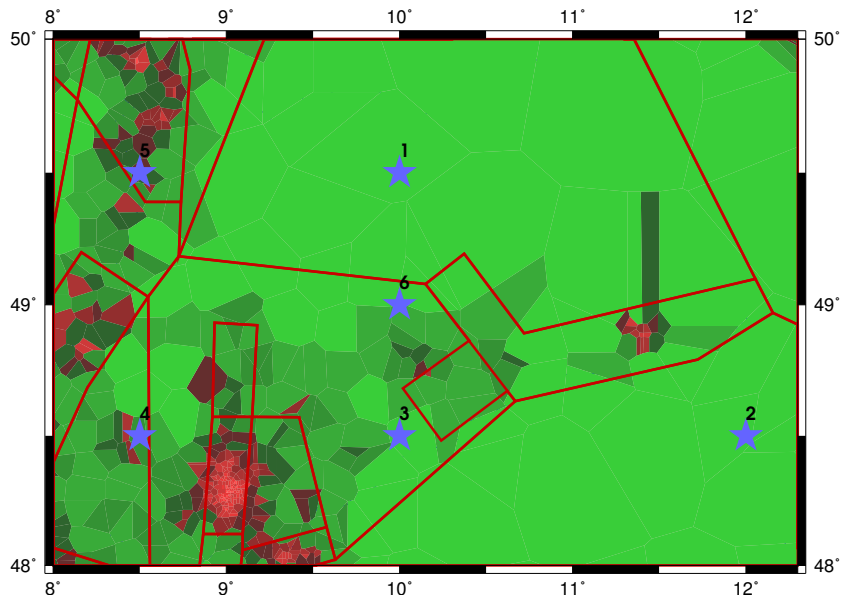


Abb. 6.1: Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell *Ahorner / Rosenhauer*; Erläuterung: rote Flächen → hohe Epizentrendichte bis hellgrün → geringe Epizentrendichte

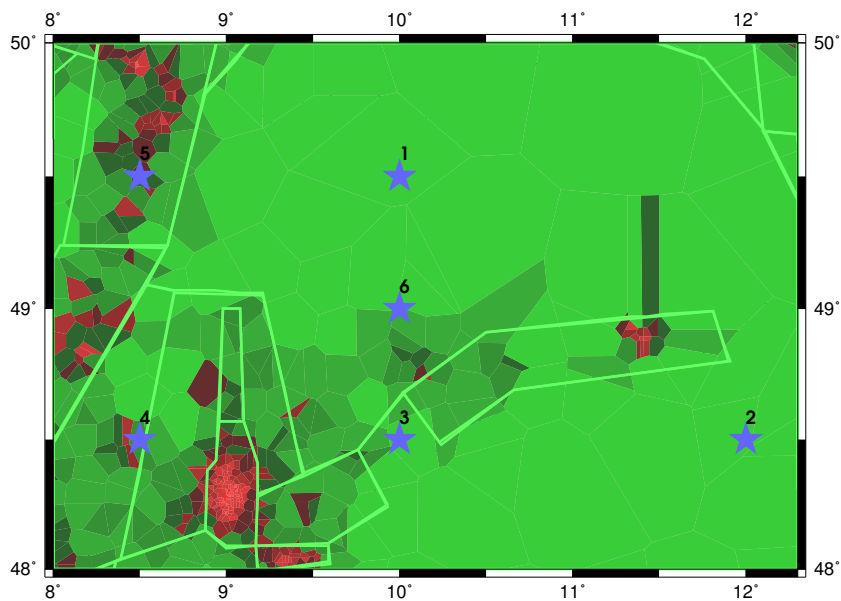


Abb. 6.2: Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell *Grünthal / Bosse*; Erläuterung: rote Flächen → hohe Epizentrendichte bis hellgrün → geringe Epizentrendichte

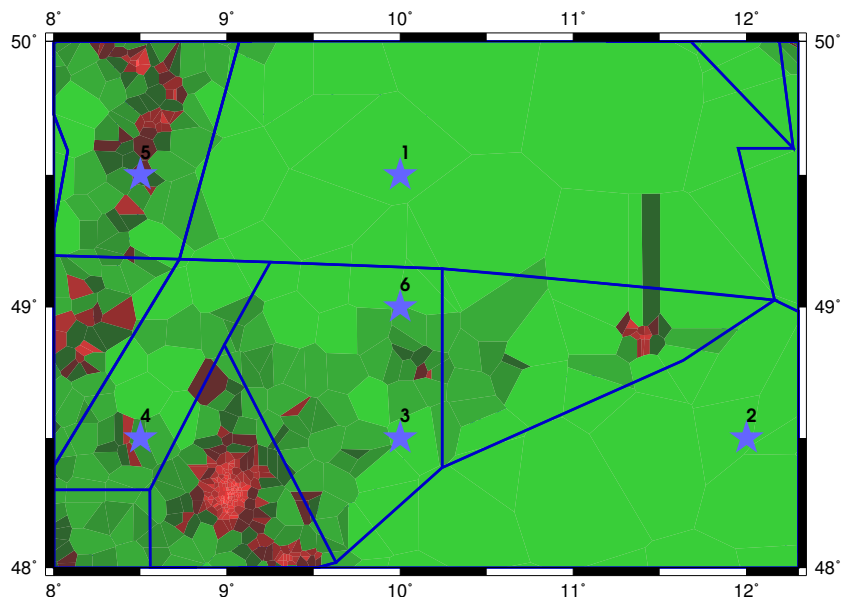


Abb. 6.3: Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell *Leydecker / Aichele*; Erläuterung: rote Flächen → hohe Epizentrendichte bis hellgrün → geringe Epizentrendichte

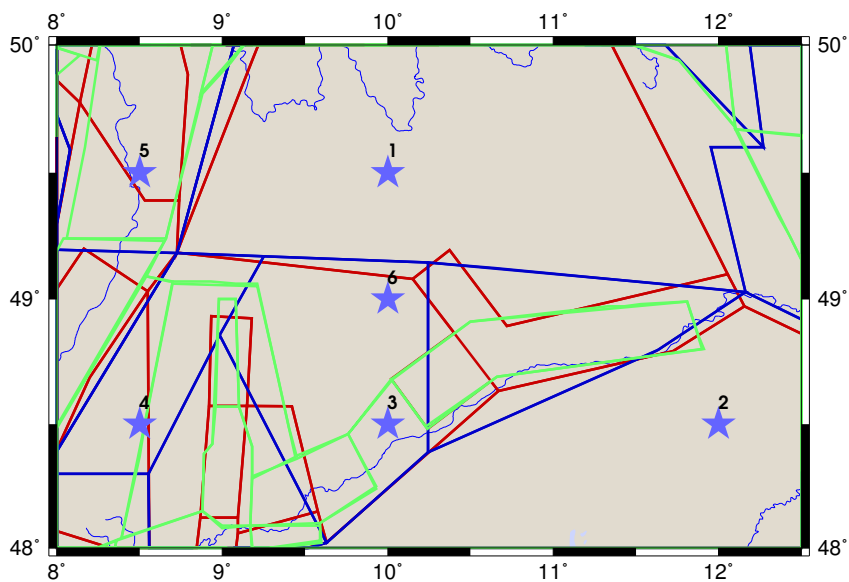


Abb. 6.4: Gewählte Modellpunkte in Südwestdeutschland im Kontext der seismischen Quellzonen; grüne Linien: Modell *Grünthal et al.*; Erläuterung: rote Linien → Modell *Ahorner* und *Rosenhauer*; blaue Linien → Modell *Leydecker* und *Aichele*

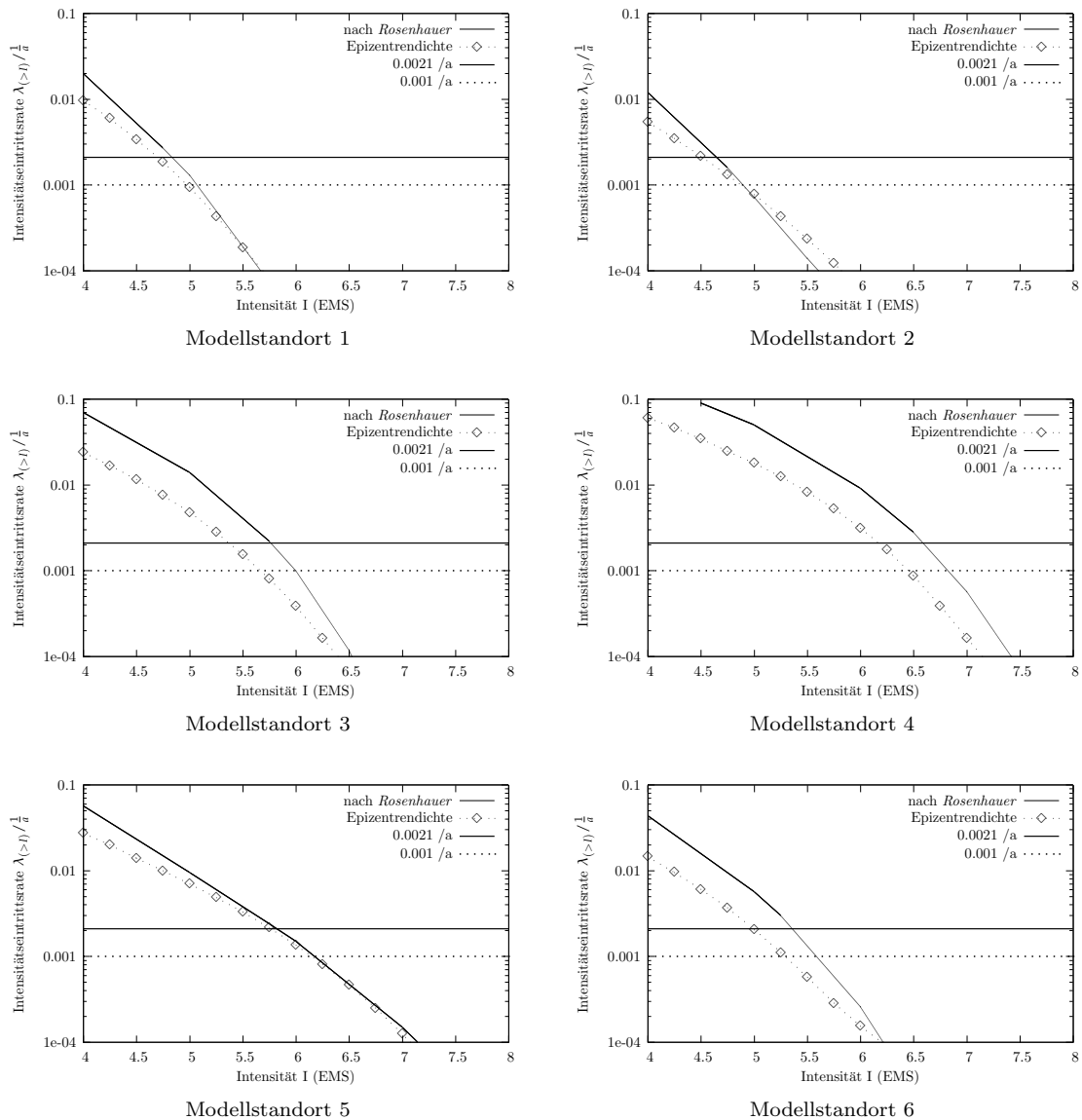


Abb. 6.5: Vergleich der Gefährdungskurven für die 6 Modellpunkte Südwestdeutschland, berechnet von *Rosenhauer* in [166] mit dem herkömmlichen PSSAEL - Modell und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des *Ahorner* - Erdbeben-Kataloges [7]

Tab. 6.3: Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für den Modellstandort Bonn

	Literatur / Quelle	eigene Berechnung
Methode	<i>Cornell/McGuire</i> [38],[124]	Epizentrendichte-Methode
Einteilung der seismischen Quellzonen	Ausschnitt aus den erdbebengeographischen Regionen nach <i>Leydecker/Aichele</i> [117]	Epizentrendichte-Modell auf Basis des verwendeten Erdbeben-Kataloges, eingeteilt in 10 Epizentrendichte-Klassen
Erdbeben-Katalog	BGR ErdbebenKatalog nach <i>Leydecker</i> [118]	ErdbebenKatalog nach <i>Ahorner et al.</i> [9]
Berücksichtigung von Modell-Unsicherheiten	keine Angaben	begrenzte Berücksichtigung
Ermittlung der Erdbeben-Häufigkeiten	<i>Gutenberg/Richter</i>	Extremwertstatistik nach <i>Gumbel</i> [86]
Programm	EQRISK [124]	PSSAEL [149]

6.2 Vergleich am Modellpunkt Bonn

Der Modellpunkt Bonn (MP7; 7°06'E, 50°42'N) liegt in der Region Mittelrhein in der Nähe zur Niederrheinischen Bucht. Aus der Vergangenheit sind mehrere Schadensbeben aus der Umgebung des Modellpunktes bekannt. Der Modellpunkt wurde gewählt, um die Ergebnisse der vorgestellten Epizentrendichte-Methode mit dem Beitrag von *Leydecker, Schmitt* und *Busche* [115] vergleichen zu können.

Die Abbildungen 6.6 und 6.7 zeigen die für den Vergleich verwendeten Quellzonenmodelle mit der für die Nachrechnung verwendeten Triangulierung. Im Beitrag von *Leydecker, Schmitt* und *Busche* [115] werden nur die seismischen Quellzonen der Niederrheinische Bucht für die Gefährdungsanalyse betrachtet, da die Erdbeben aus anderen Regionen nach Angabe der Autoren zu schwach oder zu weit entfernt sind, um am Modellpunkt größere Erschütterungen zu erzeugen. Bei der vergleichenden Gefährdungsanalyse mit der Epizentrendichte-Methode wird jedoch mit einem Modell gerechnet, welches den gesamten 200 km Radius einschließt. Die Abbildung 6.8 zeigt die Gefährdung für den Modellpunkt Bonn. Dargestellt ist die Gefährdungskurve mit $\sigma = 0$ von *Leydecker et al.* entnommen aus [115] im Vergleich mit Gefährdungskurven, welche auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* berechnet wurden. Dies sind im Einzelnen eine Gefährdungskurve auf Basis eines Ausschnittes des *Ahorner/Rosenhauer* Modells, eine Gefährdungskurve auf Basis eines Ausschnittes des *Leydecker/Aichele* Modells, und eine Gefährdungskurve auf Basis des Epizentrendichte-Modells. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Modelle mit Ausnahme des Epizentrendichte-Modells im Bereich niedriger Eintrittsraten. Dies lässt sich mit der Modellgeometrie des Epizentrendichte-Modells erklären, da im Falle des Epizentrendichte-Modells mit einem Modell mit 200 km Radius gerechnet wird und so eine andere Fläche zu Grunde liegt, um die Erdbeben geringer Eintretensraten zu simulieren (vgl. A.3).

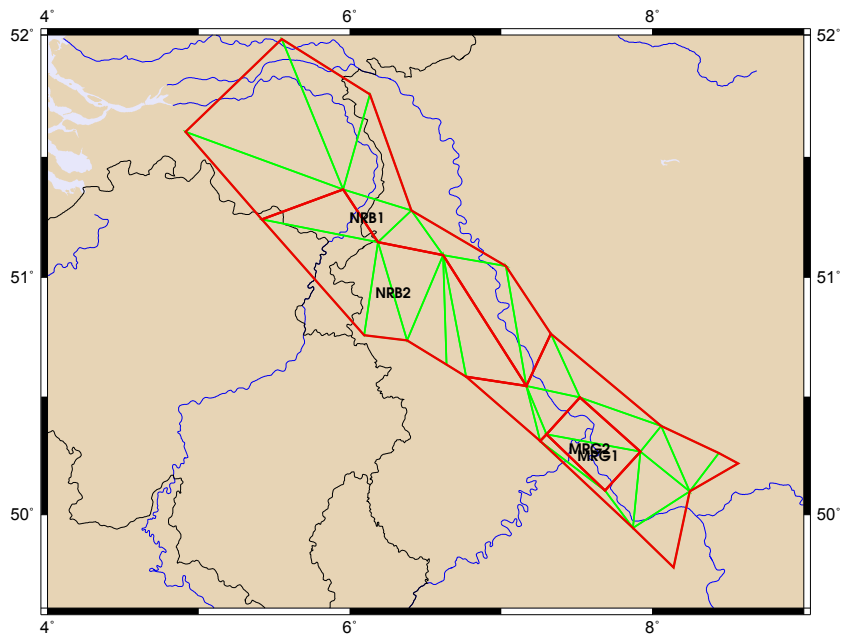


Abb. 6.6: Ausschnitt des *Ahorner/Rosenhauer*-Modells seismischer Quellzonen. Dargestellt sind die Regionen MRG1, MRG2, NRB1 und NRB2 mit Darstellung der zur Berechnung mit PSSAEL notwendigen Triangularisierung

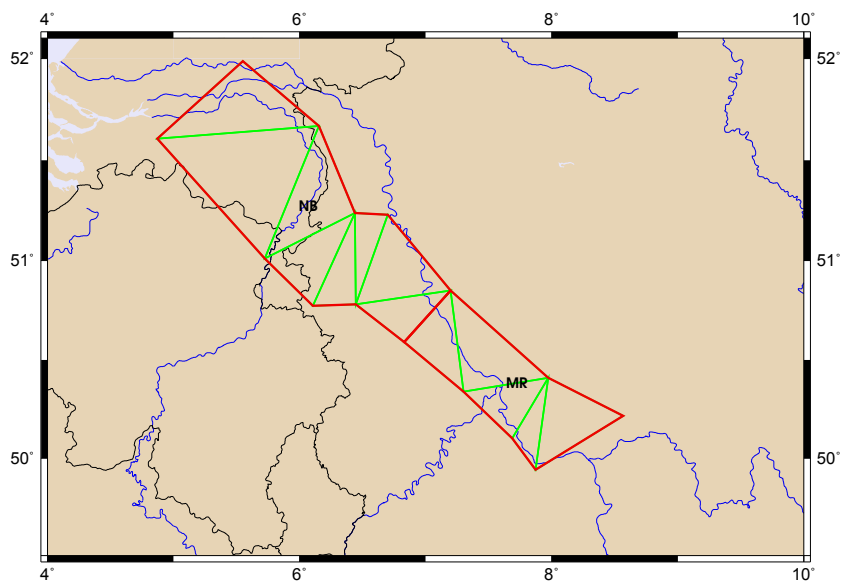


Abb. 6.7: Ausschnitt des *Leydecker/Aichele*-Modells seismischer Quellzonen. Dargestellt sind die Regionen NB und MR mit Darstellung der zur Berechnung mit PSSAEL notwendigen Triangularisierung

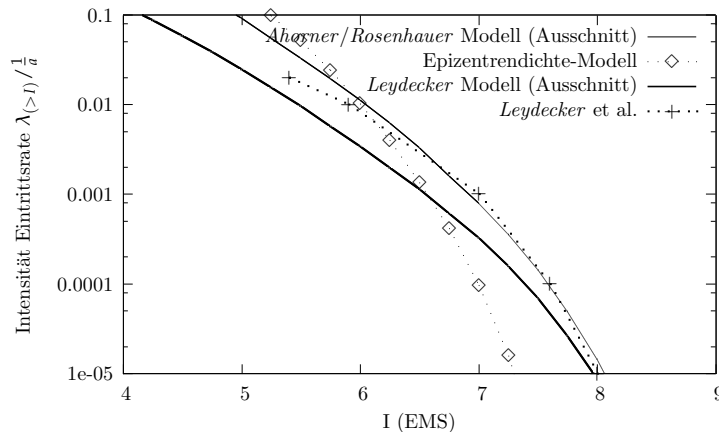


Abb. 6.8: Vergleich der seismischen Gefährdungskurven nach *Leydecker et al.* (Werte entnommen aus [115]) und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9] für den Modellpunkt Bonn

6.3 Vergleich am Modellpunkt Köln

Im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK) wurden von Januar 2000 bis Dezember 2003 Untersuchungen zu Risiken durch Naturgefahren in Deutschland untersucht. Der vorgelegte Abschlussbericht enthält eine Multi-Risiko Bewertung für die Stadt Köln. Köln wurde als Modellpunkt (MP8) gewählt wegen seiner hohen Bevölkerungsdichte und der damit zusammenhängenden Werte-, Kultur- und Industriekonzentration. Das Gebiet um Köln gehört zu den erdbebengefährdetsten Gebieten in Europa nördlich der Alpen.

Die im DFNK Abschlussbericht von *Grünthal et al.* [84] gezeigte seismische Gefährdungsfunktion des Modellpunktes Köln ist in der Abbildung 6.9 einer Gefährdungsfunktion auf Basis der Epizentren-Methode gegenübergestellt.

Die Abbildung 6.9 zeigt die Gefährdung für den Modellpunkt Köln. Dargestellt ist eine Gefährdungskurve berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* im Vergleich mit der Mittelwert und der Median Kurve nach *Grünthal et al.* entnommen aus [84]. Im Vergleich zeigen sich größere Differenzen der gegenübergestellten seismischen Gefährdungsfunktionen. Mögliche Ursachen für die aufgezeigten Differenzen sind in dem nachfolgenden Abschnitt beschrieben.

6.4 Feststellungen und Schlussfolgerungen

Die in den vorangegangenen Abschnitten 6.1 bis 6.3 gezeigten Vergleiche von seismischen Gefährdungsfunktionen sowie die in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen lassen vergleichbare Ergebnisse der Gefährdungsfunktionen, welche mit den herkömmlichen Methoden und der Epizentrendichte-Methode berechnet worden sind, erkennen. Bei Modellpunkten relativ hoher Epi-

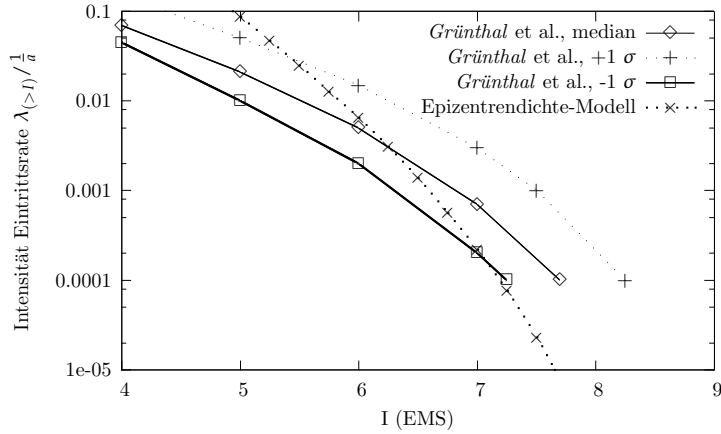


Abb. 6.9: Vergleich der seismischen Gefährdungskurven nach *Grünthal et al.* (Werte entnommen aus [84]) und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9] für den Modellpunkt Köln

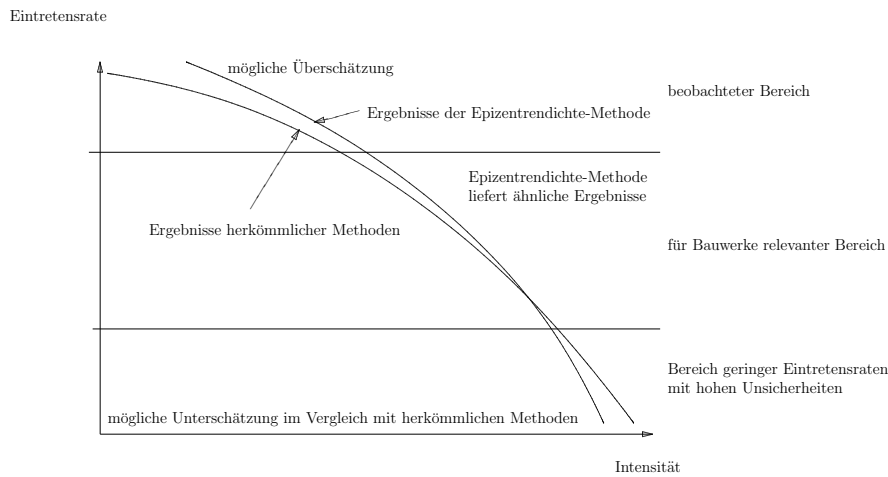


Abb. 6.10: Schematische Gegenüberstellung der Gefährdungskurven herkömmlicher Methoden mit denen der Epizentrendichte-Methode im Bereich relativ hoher Epizentrendichten (vgl. Tabelle 5.3)

Tab. 6.4: Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für den Modellstandort Köln

	Literatur / Quelle	eigene Berechnung
Methode	<i>Cornell/McGuire</i> [38],[124]	Epizentrendichte-Methode
Einteilung der seismischen Quellzonen	Ausschnitt aus D-A-CH Modell <i>Grünthal</i> et al. [72] und neue Regionalisierungsmodelle der seismischen Quellzonen für die Niederrheinische Bucht [84]	Epizentrendichte-Modell auf Basis des verwendeten Erdbeben-Kataloges, eingeteilt in 10 Epizentrendichte-Klassen
Erdbeben-Katalog	<i>Grünthal</i> und <i>Wahlström</i> 2003 [81]	<i>Ahorner</i> et al. [9]
Berücksichtigung von Modell-Unsicherheiten	Berücksichtigung mit Fehlerbaum	begrenzte Berücksichtigung
Ermittlung der Erdbeben-Häufigkeiten	<i>Gutenberg/Richter</i>	Extremwertstatistik nach <i>Gumbel</i> [86]
Programm	EQRISK [124]	PSSAEL [149]

zentrendichte treten kleinere Differenzen auf. Im Bereich größerer Eintretensraten werden mit der Epizentrendichte-Methode im Vergleich zu herkömmlichen probabilistischen Methoden geringfügig größere seismische Gefährdungen ermittelt. Im für Bauwerke relevanten Bereich stimmen die Ergebnisse gut mit den herkömmlichen Methoden überein. Im Bereich kleiner Eintretensraten kommt es bei hohen Epizentrendichten zu geringeren Werten für die seismische Gefährdung im Vergleich zu herkömmlichen Methoden. Dieses Verhalten ist schematisch in Abbildung 6.10 dargestellt. Der Betrag der festgestellten Differenzen bei den ermittelten seismischen Gefährdungen liegt im Bereich der Unsicherheiten, wie sie auch von anderen Autoren gezeigt werden (vgl. z.B. *Leydecker* et al. [115]).

Als Ursachen für die festgestellten Differenzen kommen die im Folgenden aufgezählten Faktoren in Betracht:

- Verwendung unterschiedlicher Erdbeben-Kataloge
- Differenzen in den verwendeten Abnahmebeziehungen
- Verwendung von unterschiedlicher Berechnungs-Modelle, (seismische Quellzonen, Epizentrendichte)
- Abweichungen in der Geometrie der Untersuchungsgebiete durch differierende Modelle
- Verwendung unterschiedlicher Methoden für die Bestimmung der Bebenstärke-Häufigkeiten, (*Gutenberg/Richter*, Extremwertstatistik).

Insbesondere für die im Bauwesen erforderlichen Eintretensraten weisen die mit der Epizentrendichte-Methode ermittelten seismischen Gefährdungen nur geringe Differenzen zu den seismischen Gefährdungen, welche mit den herkömmlichen probabilistischen Methoden ermittelt wurden, auf. Aus diesem Grunde kann die Anwendung der Epizentrendichte-Methode für die Ermittlung der seismischen Gefährdung in Gebieten erfolgen, für die sonst keine anderen Daten für die seismischen Einwirkungen auf Bauwerke und Anlagen vorliegen. Desgleichen kann die Epizentrendichte-Methode zur Überprüfung der vorgegebenen Werte für seismische Einwirkungen herangezogen werden.

Im dem Bereich kleinerer bis mittlerer Epizentrendichten sind keine signifikanten Differenzen zwischen den mit herkömmlichen Methoden und den mit der Epizentrendichte-Methode ermittelten seismischen Gefährdungen festzustellen.

Kapitel 7

Ingenieurpraktische Anwendungsgebiete

Die systematische Untersuchung eines Erdbebens beruht auf Beobachtungen seiner Stoßrichtungen oder aber des Zeitpunktes seines Eintrittes an thunlichst zahlreichen Punkten. Zur Feststellung der Fortpflanzungsrichtung dienen die als Seismographen bezeichneten Instrumente
H. Credner

7.1 Beispielstandorte und Untersuchungsgebiete

Für eine Demonstration der Anwendungsgebiete der Epizentrendichte-Methode werden in diesem Kapitel die Modellpunkte und -gebiete nach Tabelle 7.1 verwendet. Unter Bezugnahme auf die hier beschriebenen Modellpunkte und Untersuchungsgebiete werden mit den folgenden Abschnitten jeweils einzelne Anwendungsgebiete vorgestellt und die Ermittlung ingenieurseismologischer Kenngrößen erläutert.

Die Modellpunkte aus dem Gebiet Südwestdeutschland wurden bereits für die in Kapitel 5 beschriebenen Parameteruntersuchungen verwendet. Eine detaillierte Beschreibung und Einordnung dieser Modellpunkte ist aus diesem Grunde schon in Abschnitt 5.1 zu finden.

Die Modellpunkte aus dem Gebiet der Niederrheinischen Bucht zeichnen sich einerseits dadurch aus, dass sie nahe beieinander liegen und so eine relativ ähnliche seismische Gefährdung aufweisen, andererseits sind große Differenzen in den lokalen Untergrundsituationen vorhanden, die über die resultierenden Bodeneigenschaften große Differenzen in den resultierenden Beschleunigungs-Spektren aufweisen. Als Beleg dafür sind im Anhang unter A.6.2 die Spektren nach DIN für die Modellpunkte der Niederrheinischen Bucht dargestellt. Die Punkte 1–5 liegen auf der Achse Aachen–Düsseldorf und die Punkte 6–11 auf einer Achse von Koblenz in den Nordwesten (vgl.

Tab. 7.1: Übersicht über die ausgewählten Untersuchungsgebiete für Anwendungsbeispiele

Gebiet	Qualität der Daten	Auswahlkriterien	gezeigte Anwendung
Südwestdeutschland	umfangreiche Datenbasis weit in die Vergangenheit reichend	6 Punkte mit Variation der Seismizität, Vergleich mit [166] möglich	Gefährdungskurven
Niederrheinische Bucht	umfangreiche Datenbasis weit in die Vergangenheit reichend	nahe beieinanderliegende Punkte mit großer Bandbreite der Untergrundparameter	Gefährdungskurven
Griechenland	sehr umfangreiche Daten, jedoch nicht weit zurückreichend	relativ hohe Seismizität	Gefährdungskarten
Afghanistan	es steht nur eine sehr begrenzte Anzahl an Daten zur Verfügung	Gebiet bisher wenig untersucht	Gefährdungskurven

Tabelle 7.2). Die Tabelle 7.2 gibt eine Einordnung der Modellpunkte in die Erdbebenzonen und Untergrundklassen nach DIN 4149. Sowohl für die Modellpunkte in Südwestdeutschland als auch für die Modellpunkte in der Niederrheinischen Bucht wurde als Datenbasis der Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* [7] bzw. der Katalog nach *Ahorner et al.* [9] verwendet.

Für das Untersuchungsgebiet Griechenland liegt eine Vielzahl von gemessenen und beobachteten Erdbeben-Daten vor, wenn auch nur in einem begrenzten historischen Zeitraum. Für die Untersuchungen wurde der Erdbeben-Katalog von *Papazachos et al.* verwendet [138]. Mit der Anwendung der Epizentrendichte-Methode auf dieses Gebiet wurde gezeigt, dass es möglich ist, die Methode auf ein Gebiet hoher Seismizität anzuwenden. Die Situation scheint geeignet, um auch auf angrenzende Erdbebengebiete, wo eine ausgezeichnete Datenbasis bezüglich der Schädigung von allgemeinen Hochbauten zur Verfügung steht (Türkei), übertragen zu werden. Als Untersuchungsgebiet wurde die Region des Golfes von Korinth gewählt. Hier ereignete sich am 15. Juni 1995 ein Erdbeben in der Nähe der Stadt Aíyion. Das Untersuchungsgebiet ist mit den Koordinaten $19^{\circ}30'$ im Westen, $23^{\circ}30'$ im Osten, $37^{\circ}30'$ im Süden und $41^{\circ}00'$ im Norden abgegrenzt (vgl. Abbildung 7.9). Die Wahl fiel auf dieses Gebiet, da mit wesentlich höheren Gefährdungen zu rechnen ist. Des Weiteren liegt auch für diese Region eine Gefährdungskarte vor, die im Rahmen des Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) erarbeitet wurde. Sie kann zu einer Überprüfung der Ergebnisse herangezogen werden und ermöglicht so eine Einordnung der Epizentrendichte-Methode. Die für dieses Gebiet durchgeführten Untersuchungen beschränken sich auf das Erstellen und den Vergleich der Gefährdungskarte.

Für die Anwendung der Epizentrendichte-Methode auf das Untersuchungsgebiet Afghanistan wird auf einen von *Ambraseys* und *Bilham* publizierten Erdbeben-Katalog [14] zurückgegriffen. Das Untersuchungsgebiet Afghanistan ist mit den Koordinaten $62^{\circ}00'$ im Westen, $72^{\circ}00'$ im Osten,

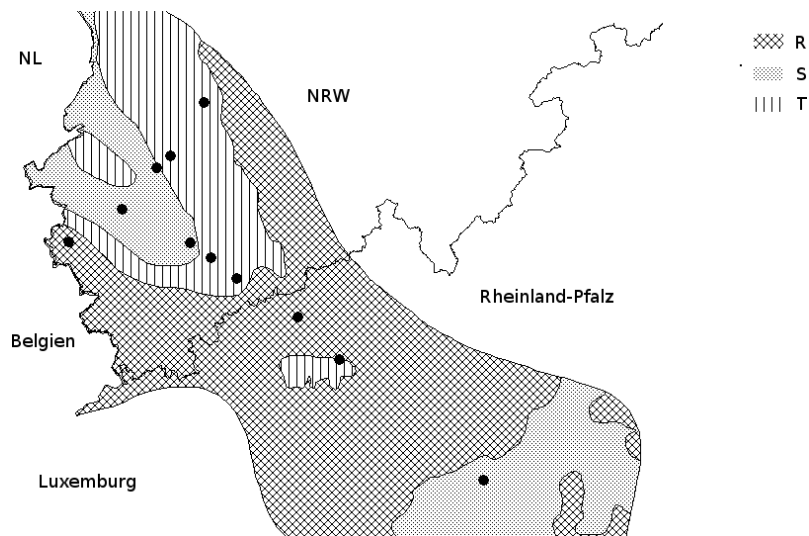


Abb. 7.1: untersuchte Punkte im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht (R \Rightarrow Festgestein; S \Rightarrow tiefe Sedimentbecken; T \Rightarrow flache Sedimentbecken und Übergangszonen); Grafik nach DIN 4149 [45]

Tab. 7.2: untersuchte Punkte im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht (NB), Angaben nach DIN 4149 (2005), R \Rightarrow Festgestein; S \Rightarrow tiefe Sedimentbecken; T \Rightarrow flache Sedimentbecken und Übergangszonen

Modellpunkt	lon.	lat.	Erdbebenzone	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung [m/s^2]	Geologische Untergrundklassen
NB 1	6,11	50,80	2	0,6	A-R, B-R, C-R
NB 2	6,39	50,91	3	0,8	B-T, C-T
NB 3	6,57	51,05	2	0,6	B-T, C-T
NB 4	6,64	51,09	2	0,6	C-S
NB 5	6,82	51,27	1	0,4	C-S
NB 6	6,75	50,80	2	0,6	B-T, C-T
NB 7	6,86	50,75	2	0,6	C-S
NB 8	7,00	50,68	1	0,4	C-S
NB 9	7,32	50,55	1	0,4	A-R, B-R, C-R
NB 10	7,54	50,41	1	0,4	C-S
NB 11	8,29	50,00	0	-	B-T, C-T

29°00' im Süden und 37°00' im Norden abgegrenzt (vgl. Abbildung 7.4 und 7.5). Es existieren nur wenige Beiträge, welche sich mit der Thematik der Seismizität in diesem Gebiet befassen.

Mit der Wahl dieses Gebietes wird gezeigt, dass die Epizentrendichte-Methode verwendet werden kann, um dem Ingenieur ein Hilfsmittel an die Hand zu geben, mit dem er die seismische Gefährdungsanalyse auf Basis eines Erdbeben-Kataloges durchführen kann.

7.2 Standortbezogene Gefährdungskurven

Die Möglichkeit der Bestimmung von Eintretensraten ist im Vergleich zu den deterministischen Methoden einer der wesentlichen qualitativen Vorteile der probabilistischen Gefährdungsanalysen. Die seismischen Gefährdungskurven als Ergebnis probabilistischer Gefährdungsuntersuchungen geben Auskunft über die Eintretensraten der Intensitäten $\lambda(> I)$ am betrachteten Standort.

Die Eintretensraten der Intensitäten erlauben es, für das gesellschaftlich geforderte Auslegungsniveau durch die Wahl einer geeigneten Bemessungsintensität den Risikogesichtspunkt bei der Konstruktion von Bauwerken und Anlagen angemessen und quantitativ zu berücksichtigen.

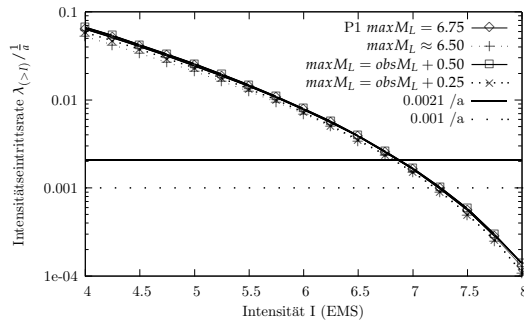
Bei der Verwendung von seismischen Gefährdungskurven ist zu beachten, dass topographische Effekte und lokal spezifische geologische Untergrundbedingungen einen Einfluss auf die ermittelte Standortgefährdung haben können (vgl. Abschnitt 7.6). Sie sind für sicherheitstechnisch anspruchsvolle Bauwerke und Anlagen durch gesonderte Untersuchungen zu analysieren.

Die seismischen Gefährdungskurven als ein Teilergebnis der vorgestellten probabilistischen Epizentrendichte-Methode geben Auskunft über die Eintrittsrate der Erdbebenintensität an den untersuchten Standorten (vgl. Abschnitt 5.1). Als Grundlage für die Bestimmung der seismischen Gefährdung wurden die simulierten Erdbeben herangezogen, die am untersuchten Standort eine Überschreitung der Standortintensität verursachten. In Abschnitt A.3 sind die Ergebnisse der Simulationen für die 6 Modellstandorte im Untersuchungsgebiet Südwestdeutschland beispielhaft dargestellt.

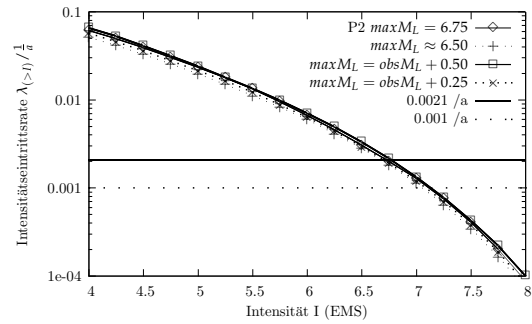
Die Abbildungen 6.5 und 7.6 zeigen die mit der Epizentrendichte-Methode ermittelten Gefährdungskurven für die untersuchten Standorte in den Gebieten Südwestdeutschland und Afghanistan bis zu einer Eintretensrate von $\lambda(> I) = 10^{-4} [1/a]$.

Die mit der Epizentrendichte-Methode berechneten Gefährdungskurven stimmen im Wesentlichen mit den von *Schwarz*, *Raschke* und *Rosenhauer* ermittelten Gefährdungen für die Modellpunkte überein [166]. Die Abweichungen liegen im Rahmen der Schätzunsicherheiten von einer 1/2 Intensitätsstufe. Größere Abweichungen gibt es bei kleinen Eintrittsraten für Modellpunkte, die in Gebieten mit einer geringeren Seismizität liegen.

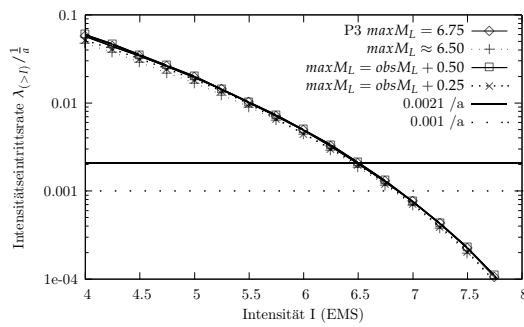
In diesen Fällen werden für die kleinen Eintrittsraten $\lambda(> I) = 10^{-4} [1/a]$ bis zu einer Intensitätsstufe größere Gefährdungen ermittelt.



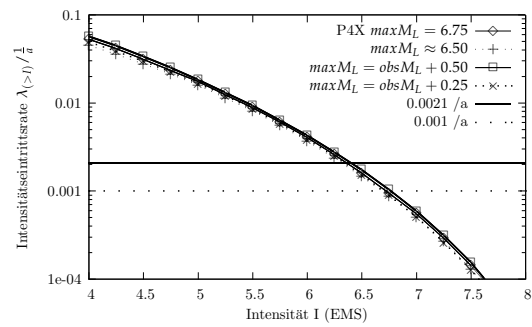
Modellstandort NB 1, Niederrheinische Bucht



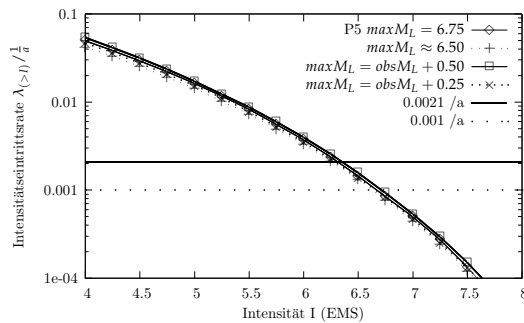
Modellstandort NB 2, Niederrheinische Bucht



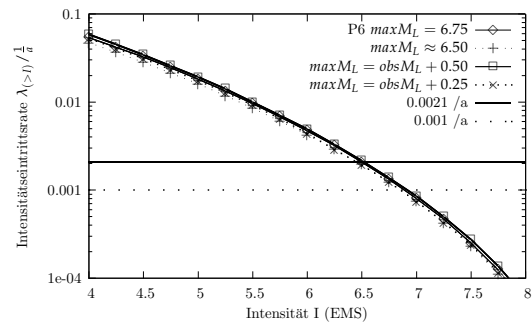
Modellstandort NB 3, Niederrheinische Bucht



Modellstandort NB 4, Niederrheinische Bucht

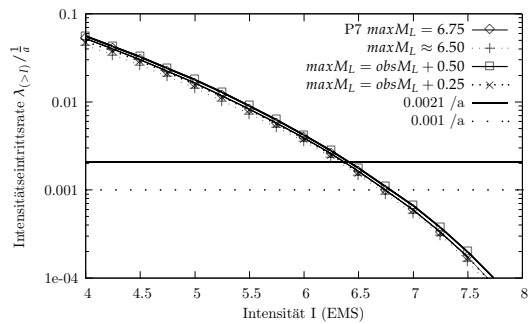


Modellstandort NB 5, Niederrheinische Bucht

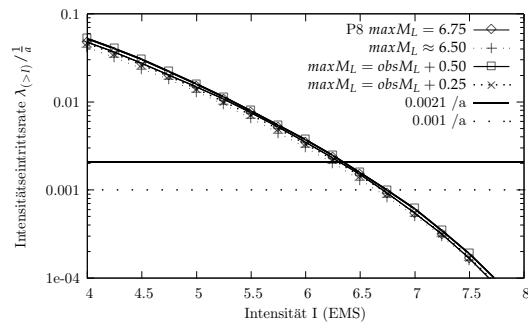


Modellstandort NB 6, Niederrheinische Bucht

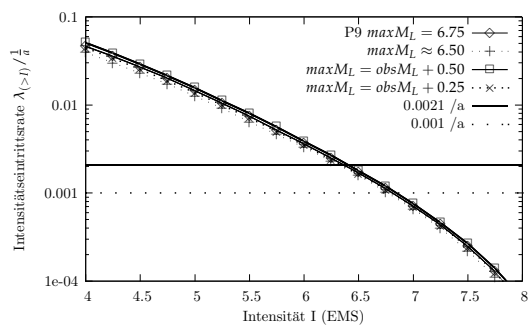
Abb. 7.2: Vergleich der Gefährdungskurven für die Modellpunkte NB 1–NB 6 im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9]



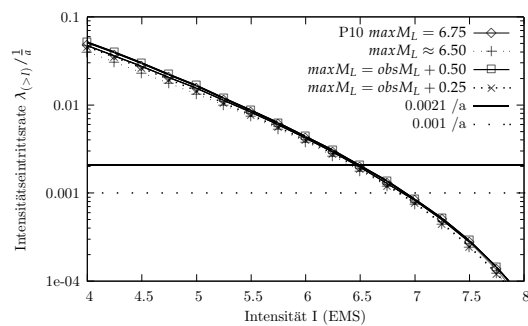
Modellstandort NB 7, Niederrheinische Bucht



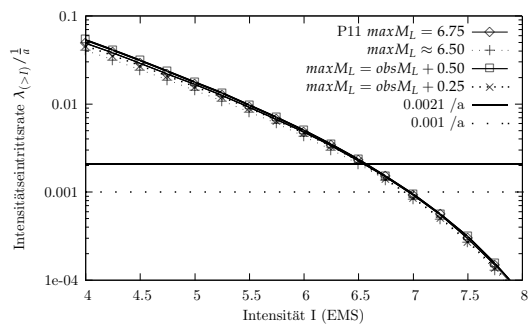
Modellstandort NB 8, Niederrheinische Bucht



Modellstandort NB 9, Niederrheinische Bucht



Modellstandort NB 10, Niederrheinische Bucht



Modellstandort NB 11, Niederrheinische Bucht

Abb. 7.3: Vergleich der Gefährdungskurven für die Modellpunkte NB 7–NB 11 im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht, berechnet mit der Epizentrenmethode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach *Ahorner et al.* [9]

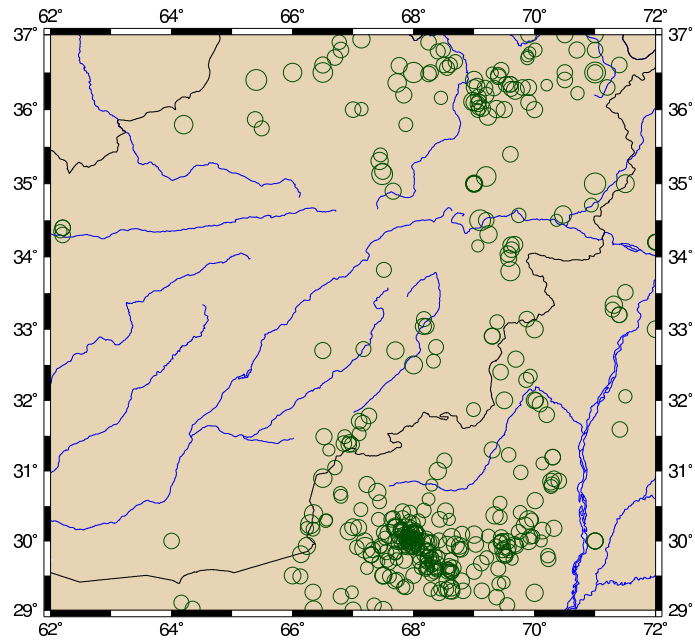


Abb. 7.4: Modellgebiet Afghanistan mit Ausschnitt des Erdbeben-Kataloges von *Ambraseys* und *Bilham* [14]

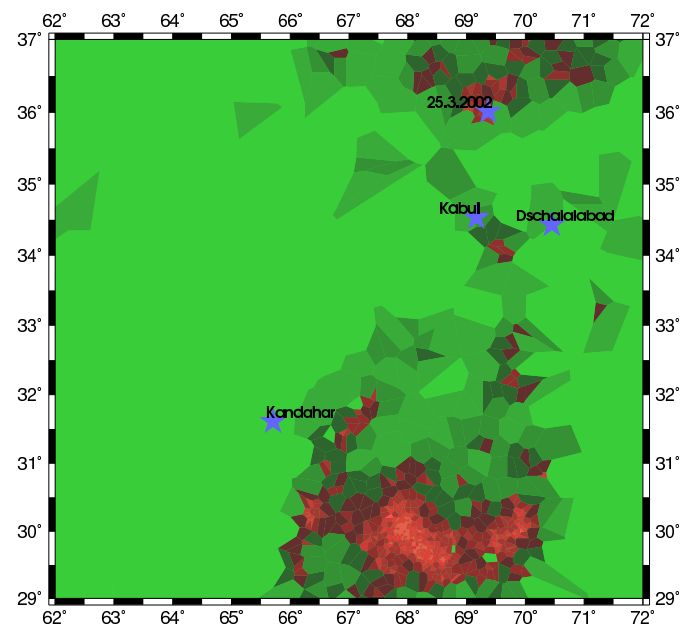


Abb. 7.5: Epizentrendichte-Modell für Modellgebiet Afghanistan

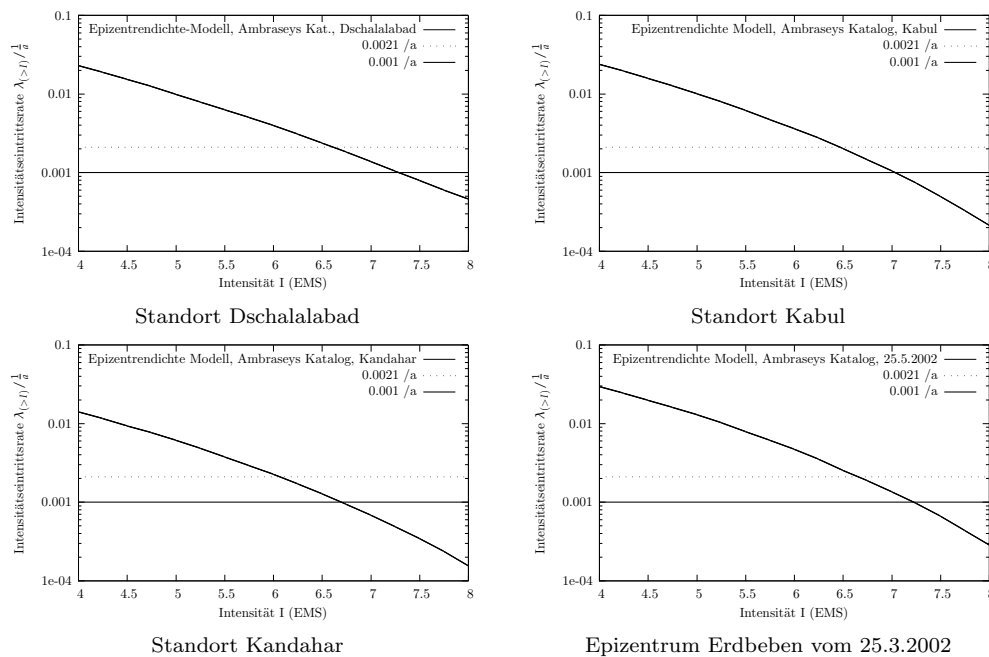


Abb. 7.6: Vergleich der Gefährdungskurven für die Standorte im Untersuchungsgebiet Afghanistan, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Katalogs von *Ambraseys* und *Bilham* [14]

7.3 Seismische Gefährdungskarten

Als ein weiteres ingenieurpraktisches Anwendungsgebiet der vorgestellten Epizentrendichte-Methode ist die Erstellung probabilistischer Karten der seismischen Gefährdung. Probabilistische Gefährdungskarten geben die gebietsmäßige Verteilung von erwarteten Intensitäten für jeweils eine Eintrittswahrscheinlichkeit (Wiederkehrperiode) an. Die vorgestellten seismischen Gefährdungskarten basieren auf dem in dieser Arbeit beschriebenen Epizentrendichte-Modell. Für die Erstellung der Karten werden für ein Raster von Punkten jeweils nacheinander für vorgegebene Eintrittsraten Intensitäten für die einzelnen Rasterpunkte bestimmt. In den probabilistischen Gefährdungskarten werden die zu den vorgegebenen Wahrscheinlichkeiten gehörenden Erdbebenintensitäten an den Rasterpunkten eines Gebietes dargestellt. Die für die Kartendarstellung notwendigen Zwischenwerte werden mittels Interpolationen ermittelt.

Die ermittelten Erdbebengefährdungskarten geben einen groben Überblick über die seismische Gefährdung eines größeren Gebietes. Im Vergleich zu den deterministischen Erdbebenzonenkarten, welche die maximal erwarteten Intensitäten zeigen, weisen die probabilistisch ermittelten Gefährdungskarten einige grundlegende Verbesserungen auf:

- Probabilistische Gefährdungskarten nach Epizentrendichte-Methode berücksichtigen die Instationaritäten der Seismizität in den Grenzen der Epizentrendichte-Klassen. Die durch größere Erdbeben-Ereignisse ausgelösten Entspannungen der Erdkruste lassen vermuten, dass

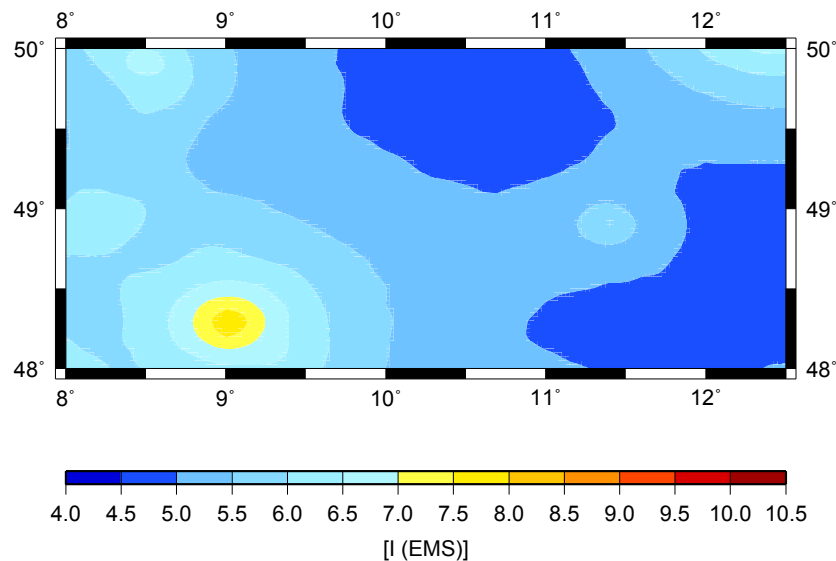


Abb. 7.7: Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebiets Südwestdeutschland für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren

die folgenden größeren Erdbeben-Ereignisse sich an anderen Orten ereignen und erst nach einer längeren Zeit der Spannungsakkumulation wieder an den gleichen Epizentren möglich sind. In den Grenzen der verwendeten Epizentren-dichte-Klassen kann dies berücksichtigt werden.

- Mit den probabilistischen Gefährdungskarten ist es möglich, Gebiete mit ihrem effektiv vorhandenen seismischen Gefährdungspotential voneinander abzugrenzen, da nicht nur die maximal erwartete Intensität, sondern auch eine Eintretenshäufigkeit der Erdbeben-Ereignisse betrachtet wird. In einigen älteren Erdbebenzonenkarten blieb dieser Aspekt unbeachtet.

Die Verbesserungen erlauben es, das vorhandene seismische Gefährdungspotential direkt aus den Karten abzulesen. Dabei sind die probabilistischen Gefährdungsanalysen als Prognose für die nahe Zukunft zu verstehen. Die seismischen Gefährdungskarten stellen dem Ingenieur ein Hilfsmittel zur Verfügung, die seismische Gefährdung eines größeren Gebietes schnell zu überblicken, und ermöglichen so z.B., die Gefährdung in die Standortwahl sicherheitstechnisch relevanter Bauwerke und Anlagen einfließen zu lassen. Die Abbildungen 7.7 und 7.8 zeigen die mit der Epizentren-dichte-Methode berechnete seismische Gefährdung des Modellgebietes Südwestdeutschland für Wiederkehrperioden von 475 und 1000 Jahren. Hierzu wurden die seismischen Gefährdungen für ein Raster von ca. 1000 Modellpunkten bestimmt. Die Werte der Gefährdung für die Flächen zwischen den Punkten wurden über lineare Interpolationen ermittelt. Für diese Untersuchung wurden mit dem Programm PSSAEL mehrere Millionen Simulationsspiele durchgeführt, die anschließend, wie in Kapitel 4 beschrieben, für die einzelnen Rasterpunkte ausgewertet wurden.

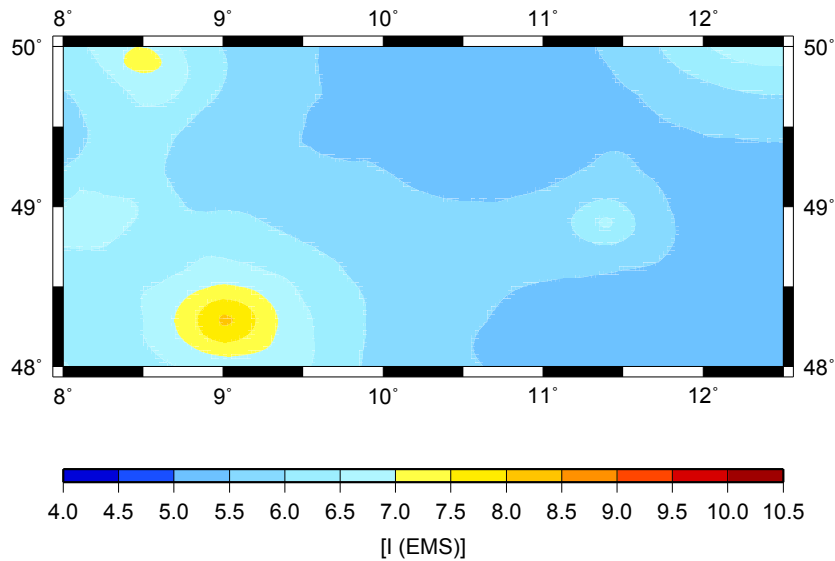


Abb. 7.8: Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebiets Südwestdeutschland für eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren

Die in Abbildung 7.7 dargestellte seismische Geährdung des Untersuchungsgebietes für Wiederkehrperioden von 475 Jahren stimmt mit den von *Grünthal, Mayer-Rosa* und *Lenhardt* [72] sowie von *Habenberger, Raschke* und *Schwarz* [90] vorgestellten Gefährdungskarten im Wesentlichen überein. Die Gefährdungskarte für eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren (7.8) lässt sich mit der von *Ahorner* und *Rosenhauer* vorgestellten Karte vergleichen [3]. Die Differenzen sind erwartungsgemäß für die Wiederkehrperioden von 1000 Jahren etwas größer. Sie sind erklärbar durch die in Teilen differierende Datenbasis und die mit größeren Wiederkehrperioden zunehmenden Prognoseunsicherheiten.

Die Abbildung 7.11 zeigt die mit der Epizentrendichte-Methode berechnete seismische Gefährdung des Modellgebiets Griechenland für eine Wiederkehrperioden von 475 Jahren. Die seismische Gefährdung wurde für ein Raster von 2000 Punkten bestimmt. Die Werte für die Flächen zwischen den Rasterpunkten wurden über lineare Interpolationen ermittelt. Für diese Untersuchung wurden mit dem Programm PSSAEL mehrere Millionen Simulationsspiele durchgeführt, die anschließend, wie in Kapitel 4 beschrieben, für die einzelnen Rasterpunkte ausgewertet wurden. Für eine qualitative Einordnung der berechneten Gefährdungswerte kann die „European - Mediterranean Seismic Hazard Map“ [68] herangezogen werden. Die seismische Gefährdung wird in dieser Quelle mit Spitzenbeschleunigungswerten angegeben, so dass ein direkter Vergleich der beiden Gefährdungskarten nicht möglich ist. Die Verwendung üblicher Intensitätsbeschleunigungskorrelationen lässt jedoch ein ähnliches Gefährdungsniveau erkennen. Die Anwendbarkeit der vorgestellten Epizentrendichte-Methode konnte mit diesem Beispiel auch für Gebiete außerhalb Deutschlands demonstriert werden.

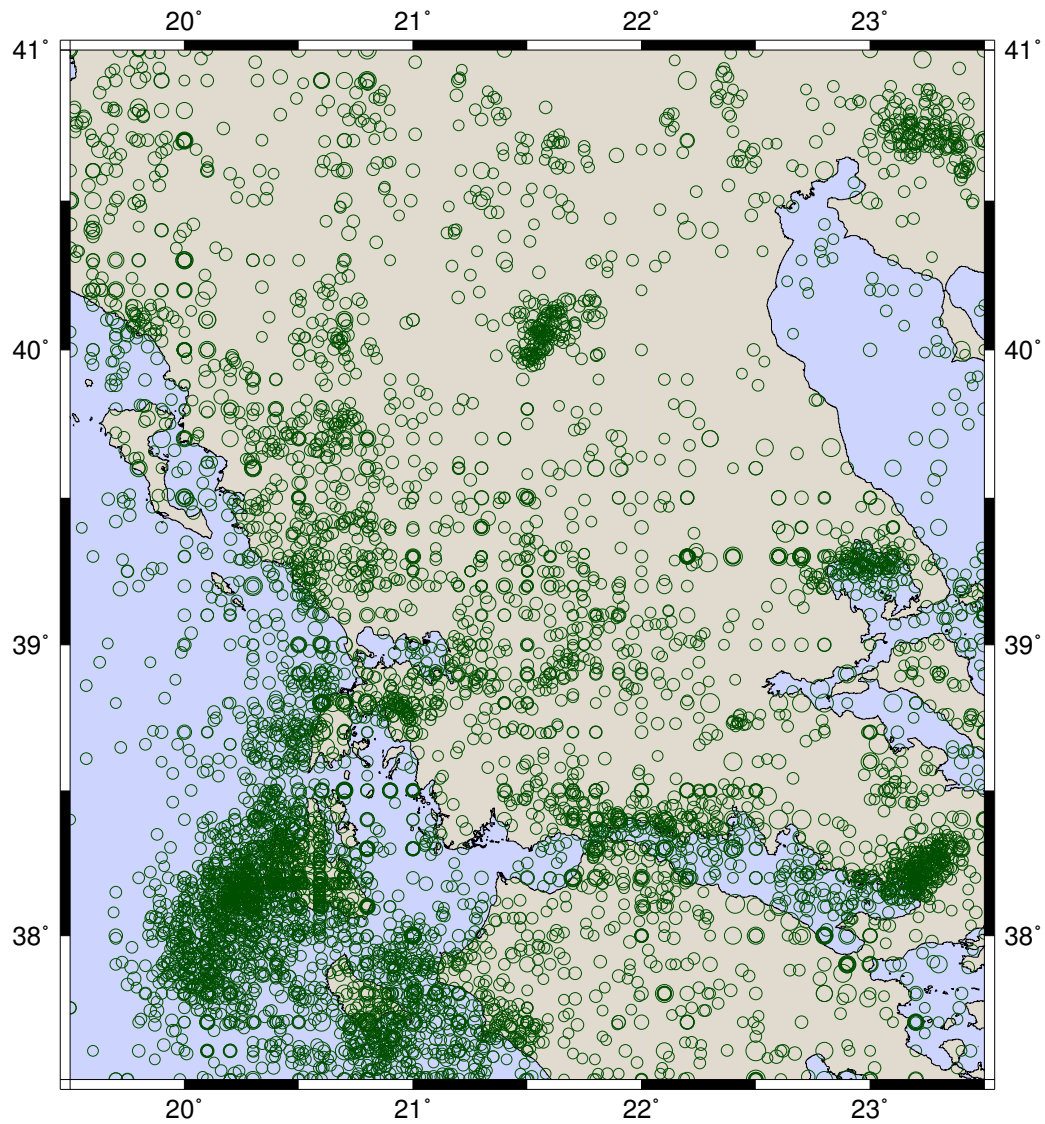


Abb. 7.9: Modellgebiet in Griechenland mit Erdbeben des Erdbeben-Katalogs von *Papazachos, Cominakis, Karakaisis, Karakostas, Papaioannou, Papazachos* und *Scordilis* [138]

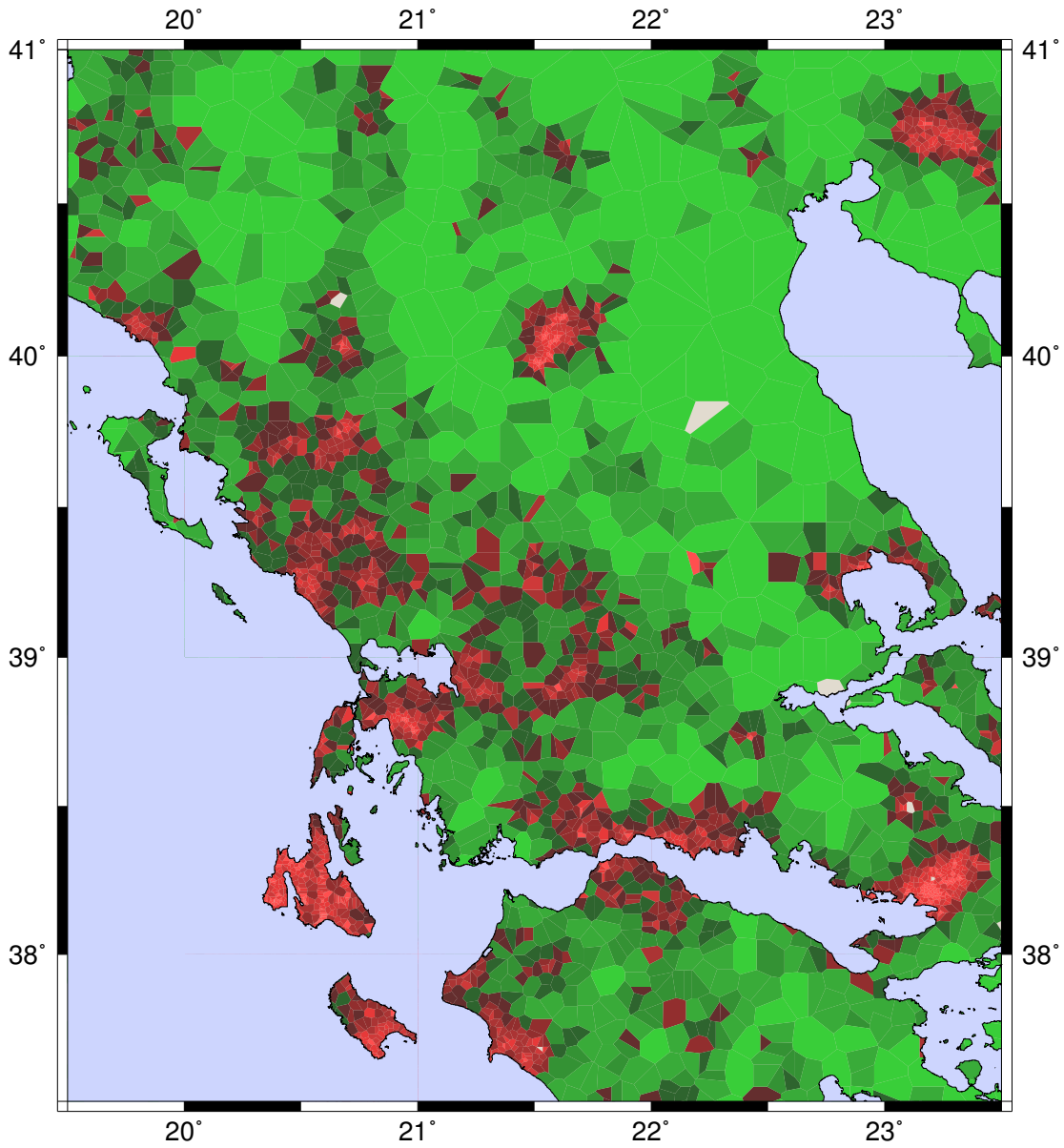


Abb. 7.10: Epizentren-dichte-Modell für das untersuchte Modellgebiet in Griechenland

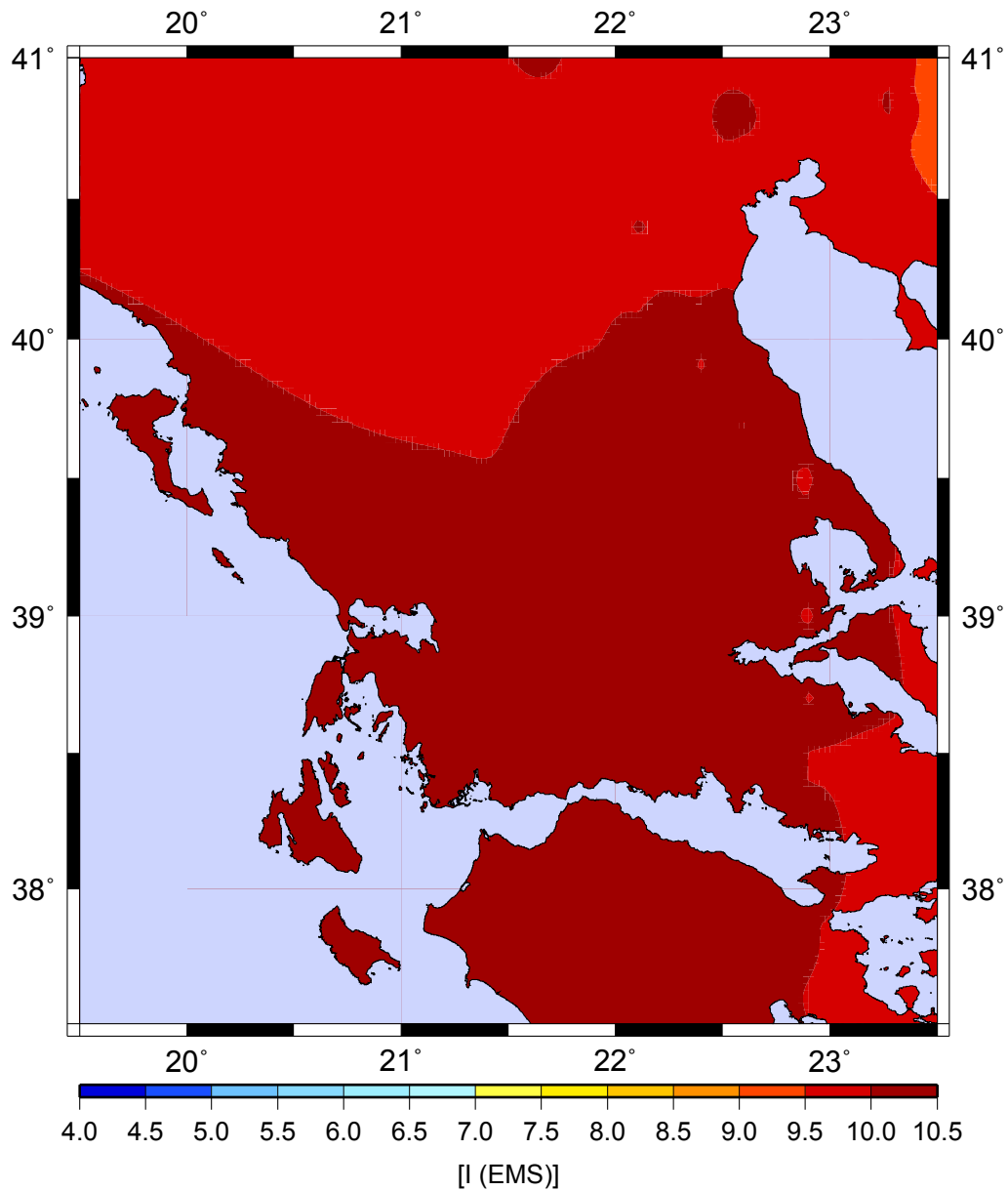


Abb. 7.11: Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebietes in Griechenland für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren

7.4 Deaggregation des Gefährdungshintergrundes

Die Charakterisierung repräsentativer Erdbeben erfolgt über den seismischen Gefährdungshintergrund. Dieser wird über Magnituden - Herdentfernungsklassen (Bins) beschrieben und mit Deaggregation der Gefährdung bestimmt. Dafür werden aus den simulierten Erdbeben-Katalogen die Erdbeben herausgesucht, die am Standort zu einer Überschreitung einer vorgegebenen Intensität führen würden. Diese simulierten Erdbeben-Ereignisse werden anhand ihrer Magnituden und Herdentfernungen in die entsprechenden Bins einsortiert. Anschließend werden die Bins hinsichtlich der Anzahl der enthaltenen Erdbeben untersucht. In Relation zur Gesamtanzahl der simulierten Erdbeben kann der Anteil jeder Magnituden-Entfernungs-Klasse an der Gefährdung des untersuchten Standortes festgestellt werden. Diese Auswertungen erfolgten mit dem Programm PSSAEL von *Rosenhauer*.

International ist es üblich, auf Basis von Magnituden-Entfernungs-Bins gefährdungskonsistente Spektren mit entsprechenden Abnahmebeziehungen zu berechnen. Die im folgenden Abschnitt dargestellten gefährdungskonsistenten Spektren basieren ebenfalls auf den hier gezeigten Magnituden-Entfernungs-Klassen. Für eine Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit könnte jedoch auch der simulierte Erdbeben-Katalog als Ganzes herangezogen werden, da Ungenauigkeitsfehler, die auf einer nicht Gleichverteilung der simulierten Erdbeben innerhalb der Magnituden-Entfernungs-Klassen beruhen, ausgeschlossen werden würden.

Tab. 7.3: Erwartete Standortintensität der Modellpunkte für verschiedene Eintrittsraten

Eintrittsraten $\lambda(> I)$	Intensitäten (EMS) an den Modellpunkten					
	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	MP 6
$1/475 [1/a]$	$\approx 5,0$	4,5-5,0	$\approx 5,5$	5,75-6,0	$\approx 6,0$	≈ 5.25
$10^{-3} [1/a]$	$\approx 5,25$	$\approx 5,25$	$\approx 5,75$	$\approx 6,5$	$\approx 6,25$	≈ 5.75
$10^{-4} [1/a]$	$\approx 6,5$	$\approx 6,75$	6,75-7,0	7,25-7,5	7,25-7,5	6,75-7,0

Die Tabelle 7.3 gibt einen Überblick über die ermittelte seismische Gefährdung an den Modellstandorten. Für diese Gefährdungen wird die Zusammensetzung des simulierten Erdbeben-Kataloges mit einer Deaggregation analysiert.

Die Ergebnisse der Deaggregationen der Gefährdung sind im Anhang in den Abbildungen A.44–A.47 enthalten. Sie zeigen die Zusammensetzung der simulierten Erdbeben-Kataloge (vgl. 4.7) nach ihren Magnituden und ihrer Herdentfernung vom untersuchten Standort. Diese standortspezifischen Magnituden-Entfernungs-Bins können als Grundlage für die Ermittlung von gefährdungskonsistente Spektren verwendet werden.

7.5 Ingenieurseismologische Kenngrößen

7.5.1 Maßgebliche Magnituden- und Entfernungsbereiche

Für die Auslegung von Gebäuden und Anlagen gegen den Lastfall Erdbeben werden konkrete Berechnungs- und Bemessungsgrößen, wie die erwarteten Spitzenboden- bzw. die Spektralbeschleunigungen am Standort benötigt. Die Aufgabe der Ingenieurseismologie ist es, diese für bestimmte Eintrittswahrscheinlichkeiten bereitzustellen.

Für die Bereitstellung der Berechnungs- und Bemessungsgrößen in Form von Beschleunigungswerten und Spektren existieren herkömmliche zonenbezogene und gefährdungskonsistente Vorgehensweisen. Bei den herkömmlichen zonenbezogenen Vorgehensweisen, wie sie zum Beispiel in der DIN 4149 "Bauten in deutschen Erdbebengebieten" [45] angewendet werden, ist die Gestalt des verwendeten (Norm-) Spektrums unabhängig von der Größe und der Zusammensetzung der seismischen Gefährdung des Standortes. Es wird bei dieser Vorgehensweise ein (Norm-) Spektrum abhängig von einer festgelegten seismischen Gefährdungzone des zu untersuchenden Standortes mit einem Faktor frequenzunabhängig skaliert. Änderungen an der Gestalt des zugrunde liegenden (Norm-) Spektrums erfolgen bei den zonenbezogenen Verfahren in der Regel nicht. Im Gegensatz zu den herkömmlichen Gefährdungsangaben, die sich auf Erdbebenzonen beziehen, spiegeln die in diesem Abschnitt gezeigten gefährdungskonsistenten Einwirkungsgrößen (Spitzenbodenbeschleunigung, Spektralbeschleunigungen) den Frequenzgehalt und die Größe der Amplituden für das anzutreffende seismische Gefährdungsniveau des zu untersuchenden Standortes wider.

Die größer werdende Zahl von Publikationen zu dieser Thematik in den letzten Jahren, vgl. *Douglas* (2003) [48], zeigt die zunehmende Bedeutung von gefährdungskonsistenten Vorgehensweisen. Stellvertretend für die große Zahl von Beiträgen seien hier die Arbeiten von *Ambraseys, Simpson* und *Bommer* (1996) [12], *Pugliese* und *Sabetta* (1989) [141], *Boore, Joyner* und *Fumal* (1997) [30] sowie von *Tento, Franceschina* und *Marcellina* (1992) [182] genannt. Da sich durch neuere Erdbebenaufzeichnungen die Zahl der zur Verfügung stehenden Daten weiter vergrößern wird, ist auch in Zukunft mit weiteren Arbeiten auf dem Gebiet der spektralen Abnahmebeziehungen zu rechnen.

Die Beachtung der bebenstärke- und entfernungsabhängigen Abnahme der spektralen Beschleunigungsamplituden von Erdbebenherden in der Standortumgebung ist das charakteristische Merkmal der gefährdungskonsistenten Vorgehensweise. Die Verwendung der simulierten Erdbeben-Bibliotheken ermöglicht es, unmittelbar Aussagen zum Gefährdungshintergrund zu machen, indem die simulierten Erdbeben-Kataloge auf ihre Zusammensetzung nach Magnituden - Herdentfernungs - Kombinationen analysiert werden.

Die Gefährdung für die einzelnen Magnituden - Entfernungs - Bins kann so als normalisierter Anteil der gesamten seismischen Gefährdung eines Standortes angegeben werden. Die Summe der normalisierten Anteile ergibt dabei 100 %. Mit Hilfe von spektralen Abnahmebeziehungen, wie in 7.5.2 beschrieben, können aus dem so charakterisierten Gefährdungshintergrund anschließend spezifische ingenieurseismologische Bemessungsgrößen für einzelne Standorte abgeleitet werden.

Das Ergebnis einer solchen Deaggregation des Gefährdungshintergrundes ist exemplarisch in den Abbildungen A.44 und A.45 dargestellt. Mit der ermittelten Deaggregation der seismischen Gefährdung, in der die Gefährdung auf den Einfluss der einzelnen Seismizitätsquellen zurückgeführt wird, ist es möglich, die Zusammensetzung der seismischen Gefährdung nach wahrscheinlichsten Erdbebenstärken und Herdentfernungen zu spezifizieren. Dies gilt insbesondere für die Anwendung von gefährdungskonsistenten Spektren, in denen die Spektralbeschleunigung über die einzelnen Periodenbereiche, die in den üblichen Resonanzbereichen von Bauwerken liegen, durch die Charakteristik des Gefährdungshintergrundes bestimmt werden kann. Die zu ermittelnden Spektren sind als abhängig von den lokalen Bodeneigenschaften zu betrachten. Diese Abhängigkeiten können entweder über die spektrale Abnahmebeziehung, wie z.B. in [12] beschrieben oder wie mit dem Programm SHAKE [157] über speziell für das anstehende Bodenprofil ermittelte Übertragungsfunktionen berücksichtigt werden.

Für die Beispiele wurden die Beziehungen (7.1) bis (7.5) aus [12] für 5% Dämpfung ausgewählt, um die Anwendung der hier beschriebenen Methode zu demonstrieren. Die Gleichung (7.1) wird dazu verwendet, die Spektren für Fels sowie für steife und weiche Böden zu ermitteln.

$$\log(y) = C'_1 + C_2 M + C_4 \log(r) + C_A S_A + C_S S_S + \sigma P \quad (7.1)$$

$$\log(a) = -1,48 + 0,266 M_S - 0,922 \log(r) + 0,117 S_A + 0,124 S_S + 0,25 P \quad (7.2)$$

$$\log(a) = -1,334 + 0,216 M - 0,777 \log(r) + 0,158 G_B + 0,254 G_C + 0,21 P \quad (7.3)$$

$$\text{mit } r = \sqrt{d^2 + h_0^2} \quad (7.4)$$

$$\text{und } M = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10,7 \quad (7.5)$$

Die Steuerung des Bodentypes erfolgt über die Parameter S_A und S_S bzw. mit G_B und G_C in (7.3). Eine Tabelle für die periodenabhängigen Parameter C'_1 , C_2 , h_0 , C_4 , C_A , C_S und σ ist dem Beitrag von *Ambraseys, Simpson und Bommer* (1996) [12] zu entnehmen. Die Ermittlung der spektralen Maximalbodenbeschleunigungen kann mit den Gleichungen 7.2 und 7.3 aus [12] jeweils entfernungsabhängig erfolgen.

7.5.2 Spektrale Abnahmebeziehung

Gefährdungskonsistente Spektren der Bodenbeschleunigung zeichnen sich durch die Berücksichtigung entfernungsabhängiger Abminderungen der Spektralamplituden aus [162].

Die frequenzabhängige Ermittlung der ingenieurseismischen Bemessungsgrößen erfordert eine Analyse des Gefährdungshintergrundes. Dazu werden die Erdbeben des simulierten Erdbeben-Kataloges, die eine Überschreitung einer festzulegenden Intensität am Untersuchungsstandort hervorrufen, in Magnituden - Entfernungs - Bins eingeteilt. Dabei wird ihr prozentualer Anteil an der seismischen Gefährdung festgestellt.

Das Beschleunigungsspektrum für die betrachtete Intensität mit ihrer spezifischen Eintretensrate ergibt sich aus der Summe der Spektren, die für jede der Magnituden - Entfernungs - Kombinationen gewichtet, mit ihrem Anteil an der gesamt vorhandenen seismischen Gefährdung ermittelt

werden. Die Ermittlung der Beschleunigungsspektren für jede der Magnituden - Entfernung - Kombinationen erfolgt mit frequenzabhängigen empirischen Abnahmebeziehungen, wie sie z.B. von *Ambraseys*, *Simpson* und *Bommer* [12] publiziert worden sind.

7.6 Standorteffekte und Standortspezifische Einwirkungen

Die mit Gefährdungsanalysen ermittelten Bodenbewegungsgrößen beziehen sich, mit Ausnahme der Intensität und wenn nichts anderes angegeben ist, auf einen felsigen Untergrund. Für Standortuntersuchungen muss der lokale Untergrund mit seinen in großen Bandbreiten variierenden Bodenparametern wie Steifigkeit und Schichtmächtigkeit berücksichtigt werden, da er einen wesentlichen Einfluss auf die Übertragung von Erdbebenwellen und damit auf die zu erwartenden Einwirkungen bzw. Schäden hat.

Im Gegensatz zu einem Standort auf festem Fels führen weiche und mittelsteife Untergrundbedingungen zu einer frequenzabhängigen Modifikation seismischer Wellen. Inwieweit diese spezifischen geologischen Standortbedingungen den Frequenzgehalt und die Amplituden von Erdbebenwellen im Detail beeinflussen, ist aufgrund der schmalen Datenbasis noch mit einigen Unsicherheiten verbunden. Diese Unsicherheiten wirken sich auch auf die lokal prognostizierte seismische Gefährdung aus. Durch eine Vergrößerung des bereits vorhandenen Datenpools und weitere empirische Untersuchungen zu diesem Thema ist in der Zukunft eine weitere Reduktion dieser Unsicherheiten wahrscheinlich.

Das in diesem Zusammenhang gut untersuchte Mexico City - Erdbeben, welches sich im Jahr 1985 ereignete, zeigte den Einfluss des Standortuntergrundes noch einmal deutlich auf. Ungeachtet einer relativ großen Entfernung zum Epizentrum erreichten die Intensitäten des Ballungszentrums von Mexico City wesentlich größere Werte als herdnähere Gebiete. Es waren zudem erhebliche lokale Unterschiede der Intensitätswerte innerhalb des Stadtgebietes zu beobachten. Bei näheren Untersuchungen fiel der Zusammenhang zum Untergrund auf. Die Stadtgebiete, welche sich über teils mächtigen Sedimenten befanden, ließen ein deutlich höheres Maß an geschädigten Bauwerken erkennen als die Stadtgebiete, die nicht auf Sedimenten, sondern direkt auf dem anstehenden Fels gegründet waren (vgl. z.B. *Kramer* [102]). Auch für Erdbeben-Ereignisse, die sich in Regionen mit großen Streubreiten der lokalen Untergrundparameter ereignet haben, konnten diese standortspezifischen Dämpfungs-, Verstärkungs- und Phasenverschiebungseffekte nachgewiesen werden. Einige hundert Meter Standortdifferenz können so teils erhebliche Differenzen der geotechnischen Eigenschaften des Untergrundes aufweisen, die wesentliche Änderungen der lokalen Erdbebengefährdung nach sich ziehen. Auch wenn Untersuchungen der Verstärkungspotentiale des Untergrundes für ganze Regionen mit Mikrozonierungen (vgl. z.B. *Field* [59]) vorliegen, sollte die spezifische geotechnische Untergrundsituation mit ihren möglichen Dämpfungs-, Verstärkungs-, und Phasenverschiebungseffekten der Bodenbewegung an jedem Standort sicherheitsrelevanter Bauwerke gesondert untersucht und beurteilt werden. Die vorgestellte Epizentrendichte Methode kann die lokal spezifischen Effekte der Untergrundbedingungen nicht berücksichtigen; diese wären im Einzelfall gesondert zu untersuchen.

Die Berücksichtigung von Frequenzinhalt und zugehörigen Amplituden der jeweiligen seismischen Gefährdung kennzeichnet die gefährdungskonsistenten Spektren, welche in der Literatur auch als "uniform hazard spectra" (UHS) bezeichnet werden (vgl. [162]).

Wesentlich für die Bestimmung der gefährdungskonsistenten Spektren ist die Analyse des untersuchten Standortes hinsichtlich des Gefährdungshintergrunds mit einer Deaggregation der Gefährdung. Die seismische Gefährdung wird dabei in ihre Anteile aus wahrscheinlichen Bebenstärke - Herdentfernungs - Kombinationen (Bins) zerlegt (vgl. 7.4). Für diese Zerlegung der Gefährdung ist es von Vorteil, dass die Epizentrendichte-Methode simulierte Erdbeben-Kataloge verwendet, die entsprechend ausgewertet werden können.

Der Einfluss der unterschiedlichen Bebenstärke - Herdentfernungs - Kombinationen spielt infolge der differierenden spektralen Abnahmebeziehungen eine wesentliche Rolle bei der Ermittlung des Frequenzgehaltes der seismischen Einwirkungen.

Als wesentliche Einflussgrößen auf gefährdungskonsistente Spektren sind die folgenden Parameter zu nennen.:

- Herdvorgang (Herdmechanik), Ausbreitungscharakteristik der Erdbebenwellen,

- dominante Bebenstärke - Herdentfernungen und Herdtiefen.

In der Implementierung des Ansatzes gefährdungskonsistenter Spektren liegt die Möglichkeit, zu einer Harmonisierung der Einwirkungsbeschreibungen für Bauwerke und Anlagen mit hohem Sekundärrisikopotential sowie zu einer Bestimmung realistischer seismischer Einwirkungen zu gelangen.

Ziel der Ermittlung gefährdungskonsistenter Spektren ist es, realistische ingenieurseismische Bemessungsparameter für die dynamische Berechnung von Bauwerken und Anlagen zu gewinnen. Anhand der durchgeführten Beispieluntersuchungen konnte demonstriert werden, dass das Ziel mit der vorgestellten Epizentrendichte-Methode erreicht werden kann.

Abschließende Bewertungen der mit der Epizentrendichte-Methode bestimmten gefährdungskonsistenten Spektren erfordern jedoch weitergehende Untersuchungen.

Unter Berücksichtigung von spektralen Abnahmebeziehungen kann für jede Herdentfernungskombination ein Beschleunigungsspektrum am Standort angegeben werden. Für die Ermittlung der gezeigten Beispiele wurde die spektrale Abnahmebeziehung nach *Ambraseys, Simpson* und *Bommer* (1996) [12] verwendet. Mit Hilfe einer anschließenden Superposition der Spektren für jede Herdentfernungskombination entsprechend ihrer jeweiligen Anteile können gefährdungskonsistente Beschleunigungsspektren für die untersuchten Modellstandorte angegeben werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse für die gewählten Modellstandorte sind in der Abbildung A.50 zusammenfassend für Eintrittsraten von $\lambda(> I)$ von $1/475 [1/a]$ und $10^{-4} [1/a]$ dargestellt. Die gezeigten Beschleunigungsspektren auf Basis der Epizentrendichte-Methode korrespondieren mit den von *Schwarz, Raschke* und *Rosenhauer* in [166] vorgestellten Spektren.

7.7 Gefährdungsbezogene Beschleunigungszeitverläufe

7.7.1 Auswahl von gemessenen Zeitverläufen

Die Zusammensetzung der seismischen Gefährdung nach den wahrscheinlichsten Magnituden-Herdentfernungs-Kombinationen ergibt sich aus der Zerlegung des Gefährdungshintergrundes bzw. aus der Analyse der Erdbeben-Bibliotheken (vgl. 7.4). Diese Aufschlüsselung der seismischen Gefährdung kann genutzt werden, um aus Starkbebenbanken Zeitverläufe der Beschleunigung auszuwählen, die dem ermittelten seismischen Gefährdungsniveau entsprechen.

Da für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland Daten von Starkbeben - Beschleunigungsmessungen nicht in ausreichender Anzahl verfügbar sind, muss für die Auswahl von Zeitverläufen auf Starkbeben - Messungen aus anderen Regionen zurückgegriffen werden. Eine gute Zusammenstellung dieser Daten ist zum Beispiel in der „European Strong-Motion Database“ [13] zu finden. Inwieweit sich die gemessenen Beschleunigungszeitverläufe anderer Regionen mit potentiellen Erdbeben im Bundesgebiet vergleichen lassen, ist aufgrund der begrenzten Datenbasis noch nicht vollständig geklärt.

In dem Beitrag „Auswertung von Strong - Motion - Daten in den für deutsche Erdbebengebiete maßgebenden Magnituden- und Entfernungsbereichen“ von *Schwarz, Habenberger* und *Schott* [164] sind Hinweise für die Auswahl von entsprechenden Starkbebenzeitverläufen zu finden.

7.7.2 Generierung synthetischer Zeitverläufe

Die zunehmende Nutzung von numerischen Modellen wie dynamischen Zeitverlaufsverfahren für die Quantifizierung von Strukturantworten erfordert die Bereitstellung von Erdbeben-Zeitverläufen der Beschleunigung als Eingangsgröße. Da nur in begrenztem Umfang entsprechend gemessene Starkbeben - Beschleunigungszeitverläufe zur Verfügung stehen, ist im Zuge von Analogiebetrachtungen die Verwendung von synthetisch generierten Beschleunigungszeitverläufen für Zeitverlaufsmethoden angebracht.

Da die Zahl der verfügbaren Erdbebenaufzeichnungen von stärkeren Erdbeben-Ereignissen sehr begrenzt ist, gab es Arbeiten, die sich mit der Simulation kompatibler Zeitverläufe der Beschleunigungen befasst haben. Dieses Vorgehen ist nach KTA 2201.4 Regel [107] ausdrücklich vorgesehen:

Werden Freifeld-Zeitverläufe verwendet, so dürfen diese auch spektrumkompatible künstliche Zeitverläufe sein. Ein künstlicher Zeitverlauf gilt als spektrumkompatibel, wenn das von ihm erzeugte Spektrum das vorgegebene Antwortspektrum bei einer hinreichenden Zahl von Frequenzen einhüllt.

Stellvertretend sind hier die Arbeiten am Computerprogramm SIMQKE von *Gasparini* und *Vanmarcke* [66] sowie *Vanmarcke, Fenton* und *Zavoni* [185] zu nennen. Sie beziehen sich auf die von *Clough* und *Penzien* in [36] sowie von *Lin* in [119] vorgestellte Theorie zufälliger Schwingungen, wie sie im Zusammenhang mit Erdbeben-Ereignissen auftreten.

In dem genannten Beitrag haben *Gasparini* und *Vanmarcke* einen statistischen Zusammenhang zwischen den Amplituden und dem Antwortspektrum der Beschleunigungszeitverläufe aufgestellt, der als Grundlage für ihr Programm SIMQKE dient.

Mit der in Abschnitt 7.6 vorgestellten Methode zur Ermittlung von gefährdungskonsistenten Einwirkungen können die Eingangsparameter für die Ermittlung von synthetischen Zeitverläufen bestimmt werden. Es ist somit möglich, synthetische Beschleunigungszeitverläufe zu generieren, die zur gefährdungskonsistenten Quantifizierung von Strukturantworten eingesetzt werden können. Unter Verwendung der in Abbildung A.50 gezeigten gefährdungskonsistenten Beschleunigungsspektren ist es möglich, entsprechende Beschleunigungs-Zeitverläufe zu generieren. Die hier angewendete Vorgehensweise der Erzeugung synthetischer Zeitverläufe ist in von *Lestuzzi* [114] und von *Vanmarcke, Fenton* und *Zavoni* [185] beschrieben worden. Zu beachten ist, dass die synthetisch generierten Beschleunigungszeitverläufe für ein vorgegebenes Bemessungsspektrum in der Regel einen höheren Energieinhalt auf als die zur Festlegung des Bemessungsspektrums verwendeten gemessenen Bebenaufzeichnungen aufweisen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die synthetisch generierten Zeitverläufe das vorgegebenen Bemessungsspektren möglichst gut über den ganzen Frequenzbereich abdecken. Die Abbildungen A.52 und A.53 zeigen beispielhaft je einen Zeitverlauf für die gezeigten Beschleunigungsspektren der untersuchten Modellstandorte. Dabei ist für jeweils ein Spektrum aus Abbildung A.50 ein Zeitverlauf dargestellt. Zur Ermittlung der dargestellten Zeitverläufe kam ein entsprechendes Programm von *Kaufmann* zum Einsatz. Die dargestellten Zeitverläufe wurden mit den folgenden Parametern ermittelt: Dämpfung 5%; Anstiegszeit 2s; Starkbebenzeit 18s; Abfallzeit 10s

7.8 Verletzbarkeitsuntersuchungen

7.8.1 Übersicht

Aus der Widerstandsfähigkeit der Infrastruktur gegenüber seismischen Einwirkungen, beschrieben durch Spitzenbodenbeschleunigungen, spektrale Beschleunigungen, Erdbeben-Dauern etc., kann die Vulnerabilität der Infrastruktur abgeleitet werden. Die Widerstandsfähigkeit als Relation zwischen seismischen Einwirkungen und der daraus resultierenden Schädigung ist der Kern entsprechender Vulnerabilitätsuntersuchungen. Die Vulnerabilität kann durch einen geeigneten Entwurf von Bauwerken (z.B. Regularität der Masse- und Steifigkeitsverteilung) und konstruktive Maßnahmen (z.B. Auslegung, Bewehrungsführung, Aussteifung, Duktilität usw.) reduziert werden und trägt so zu einer Verminderung des seismischen Risikos bei. Der Zusammenhang zwischen der standortabhängigen Erdbebenstärke (vgl. 2.2.1) und dem erwarteten Schadensausmaß infolge von Erdbeben-Ereignissen kann qualitativ durch entsprechende Verletzbarkeitsfunktionen beschrieben werden. Umgekehrt spielt das durch die Schütterwirkung von Erdbeben-Ereignissen hervorgerufene Schadensausmaß eine entscheidende Rolle in der Makroseismik. Hier wird das Schadensausmaß von Erdbeben-Ereignissen zur Bestimmung der standortabhängigen Erdbebenstärke auf den verschiedenen Intensitätsskalen herangezogen.

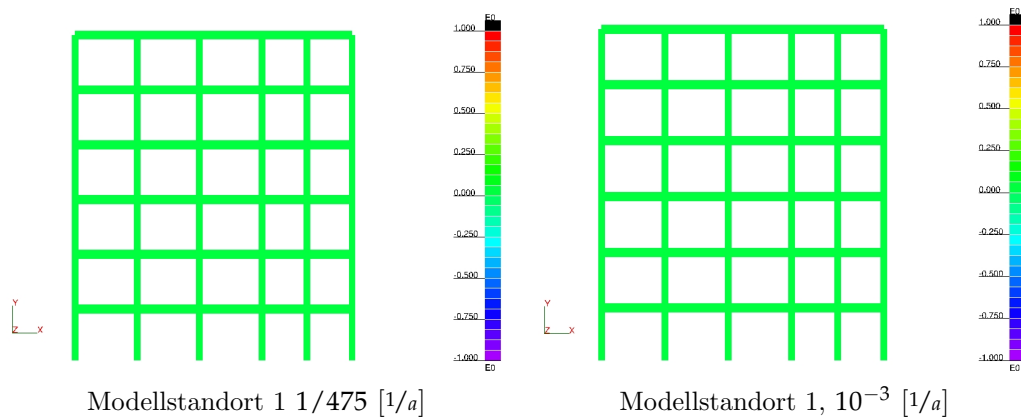


Abb. 7.12: Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens am Beispiel des Modellstandortes Südwestdeutschland 1 in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben

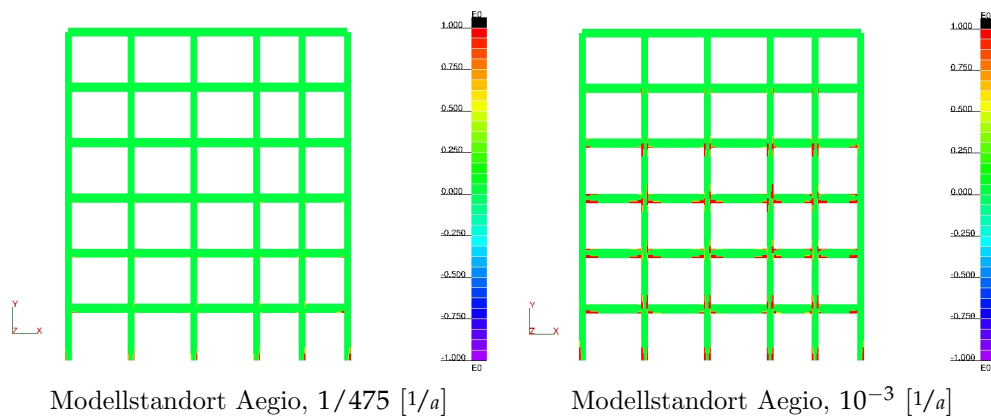


Abb. 7.13: Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens am Beispiel des Modellstandortes Aegio in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben

7.8.2 Beispiel 1: Modellrahmen, zweidimensional

Um den Einfluss der ermittelten gefährdungskonsistenten Beschleunigungszeitverläufe auf ein Rahmentragwerk beispielhaft zu zeigen, wurden Zeitverlaufsuntersuchungen durchgeführt. Zum Einsatz kam dabei das Programm SLANG, welches im Laufe der letzten Jahre am Institut für Strukturmechanik der Bauhaus-Universität Weimar entwickelt wurde.

“SLang kombiniert stochastische Methoden mit der Finite Elemente Methode. Dies erfolgt auf einem Niveau, das ausreichend ist, die meisten Ingenieurprobleme zu lösen. Die Berechnungsabläufe werden dabei in einzelnen übersichtlichen Arbeitsschritten dargestellt und ausgeführt. Zusätzlich erlauben interaktive Werkzeuge zur Ablaufsteuerung und umfangreiche Grafikerunterstützung die Programmbedienung und Ablaufkontrolle.” [22]

Für dieses Beispiel wurde ein zweidimensionaler Modellrahmen nach Keintzel [98] gewählt. Als

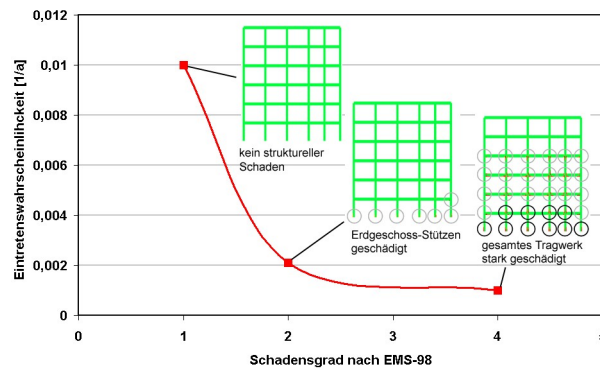


Abb. 7.14: Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben am Beispiel des Modellstandortes Aegio

Standorte wurden der Modellpunkt 1 in Südwestdeutschland bzw. die griechische Stadt Aegio angenommen. Als Eingangsgrößen für die Zeitverlaufsberechnungen wurden Beschleunigungszeitverläufe verwendet. Die Abbildungen 7.12 und 7.13 zeigen die wahrscheinlichen Schädigungen an dem Modellrahmen in Anhängigkeit vom seismischen Gefährdungsniveau. Die Abbildung 7.14 zeigt den mit geringer werdender Eintretensrate zunehmenden Schadensgrad am Standort Aegio. Für den Modellpunkt 1 in Südwestdeutschland werden aufgrund des geringen Einwirkungs-niveaus keine Schädigungen ermittelt, so dass hier auf eine Abbildung verzichtet wurde.

Aufgrund des Umfangs der Ergebnisse werden hier ausschließlich die Ergebnisse für die erwarteten Schädigungen des Gebäudes, in Abhängigkeit von den wahrscheinlichen Beschleunigungszeitverläufen gezeigt. Die dargestellten Ergebnisse vermitteln einen ersten Eindruck der Verletzbarkeit des Gebäudes durch erdbebenverursachte Bodenbewegungen an Modellstandorten für Erdbebenwiederkehrperioden von 475 und 1000 Jahren (vgl. Abbildungen 7.12 u. 7.14).

Mit diesen Beispielberechnungen wird noch einmal deutlich, dass die seismische Gefährdung neben der Intensitätseintretensrate auch von der Zusammensetzung wahrscheinlicher Magnituden und Herdentfernungskombinationen bestimmt wird, da diese Parameter wesentlich für die Form des erwarteten Beschleunigungsspektrums sind.

7.8.3 Beispiel 2: Anwendung auf Modelle existierender Bauwerke

Um den Einfluss der ermittelten seismischen Einwirkungen auf Gebäude zu zeigen, wurden Beispielberechnungen für den Standort Aegio in Griechenland durchgeführt. Für Eintretensraten am Standort von $1/250$, $1/475$ und $1/750$ [1/a] wurden jeweils Kapazitätsberechnungen durchgeführt. Für die Berechnungen wurden Gebäudemodelle vergleichbarer ortstypischer Stahlbetonrahmenkonstruktionen aus der Türkei verwendet, die im Rahmen von Projekten des Earthquake Damage Analysis Center (EDAC) der Bauhaus-Universität Weimar erstellt wurden.

Die Abbildungen 7.15 – 7.17 geben einen Überblick für das Beispiel-Gebäude aus Izmit und die Abbildungen 7.20 und 7.21 für das Beispiel-Gebäude aus Sultandagi. Mit den vorliegenden



Abb. 7.15: Gebäude in Izmit, Türkei

Tab. 7.4: Schädigungsstufen

Schädigungsstufen (<i>Performance Levels</i>)	Bezeichnung	
B	<i>operational</i>	funktionsfähig
IO	<i>Immediate Occupancy</i>	sofort beziehbar
LS	<i>Life Safety</i>	noch sicher
CP	<i>Collapse Prevention</i>	Einsturz gefährdet
C	<i>Collapse</i>	Einsturz

Daten der Beispielgebäude, entnommen aus [1] [110] und [109], konnten Untersuchungen für den ungeschädigten Zustand und einen vorgeschädigten Zustand infolge eines Erdbeben-Ereignisses vorgenommen werden. Aufgrund der am untersuchten Standort vorhandenen ähnlichen Bauweise wurde in diesem Beispiel unterstellt die vorgestellten Gebäude befinden sich in Aegio.

Die Abbildungen 7.19 und 7.23 zeigen für die ausgewählten Beispiel-Gebäude, welche Schädigung anhand der Schnittpunkte von Kapazitätskurve und Einwirkungen unterschiedlicher Wiederkehrperiode zu erwarten sind. Es werden die Ergebnisse für den ungeschädigten und den vorgeschädigten Zustand gegenübergestellt. Die Abbildungen 7.18 und 7.22 zeigen schematisch die Entwicklung der Schadenszonen und ihrer räumlich - strukturellen Verteilung an den Modellen der Bauwerke. Die in Tabelle 7.4 gezeigten Schädigungsstufen dienen als Grundlage für die in 7.18 und 7.22 gezeigten Legenden.

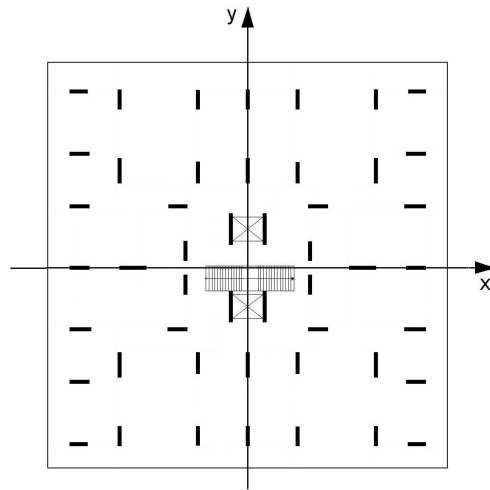


Abb. 7.16: Gebäude in Izmit, schematische Übersicht Achsen

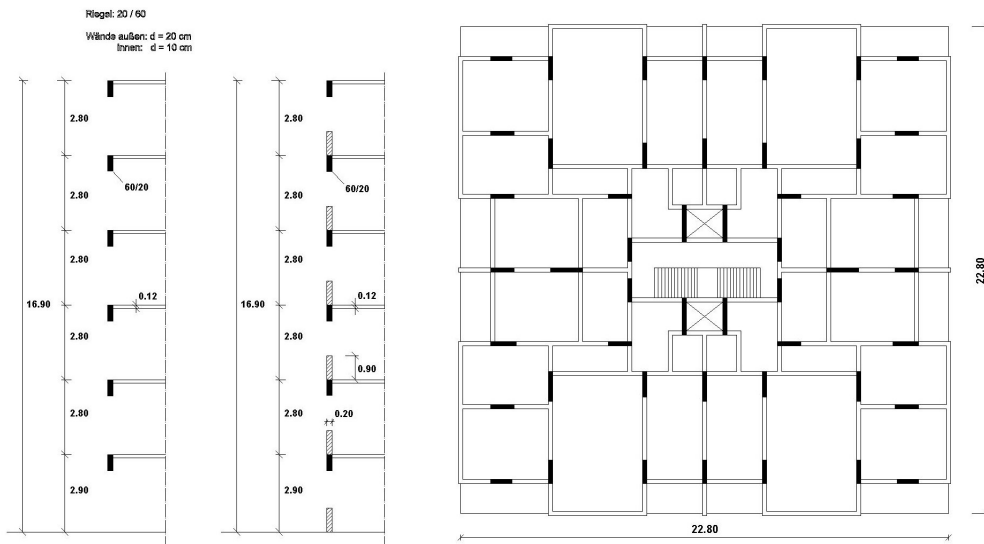


Abb. 7.17: Gebäude in Izmit, schematische Darstellung Schnitt, schematische Übersicht Stützen und Riegel

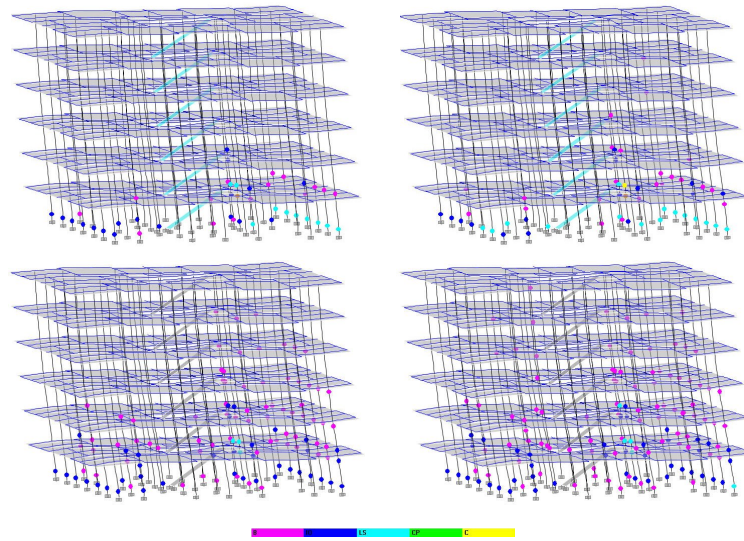


Abb. 7.18: Schematische Darstellung des Verlaufes der Schädigung am Beispiel des untersuchten Gebäudes in Izmit, Türkei; Legende nach Tabelle 7.4

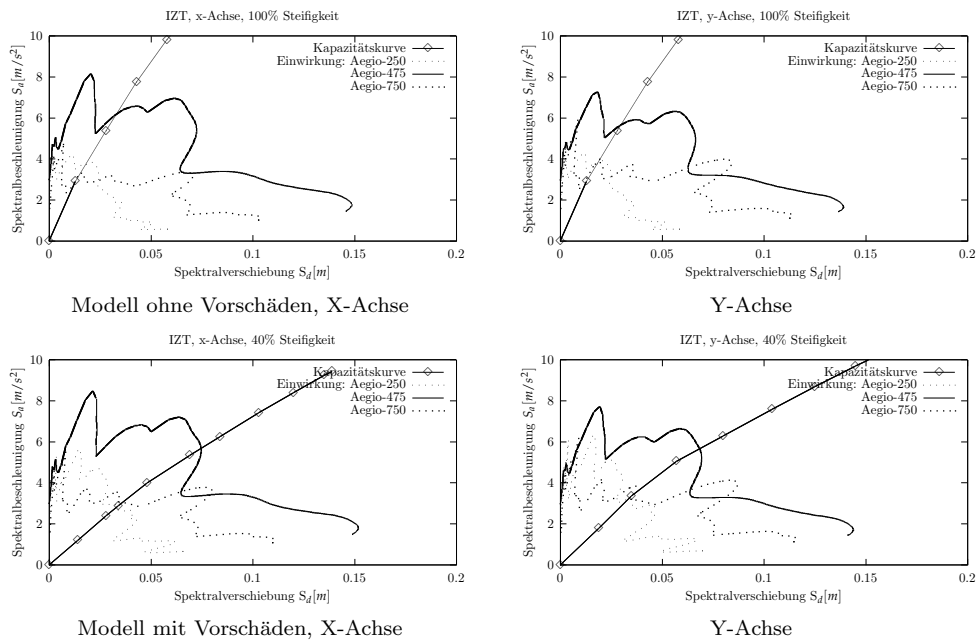


Abb. 7.19: Kapazitätskurve für Beispiel-Gebäude aus Izmit



Abb. 7.20: Gebäude in Sultandagi, Türkei

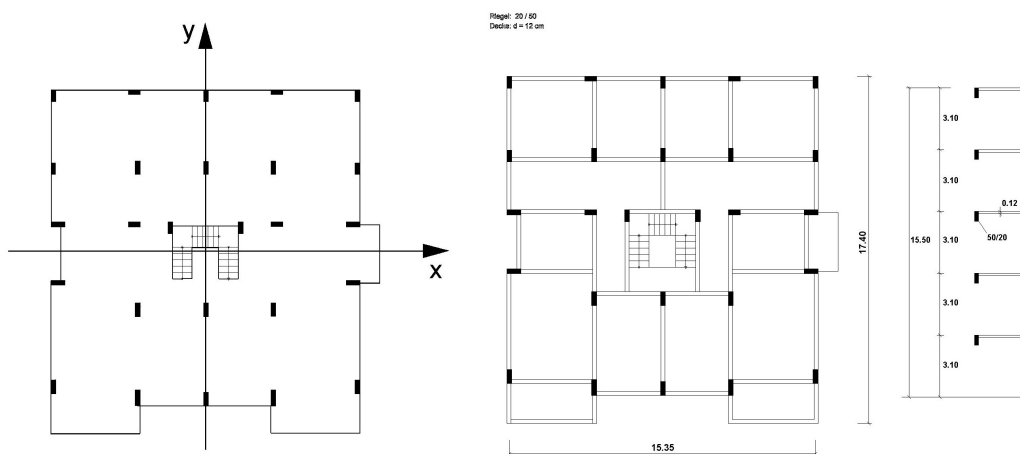


Abb. 7.21: Gebäude in Sultandagi, Türkei

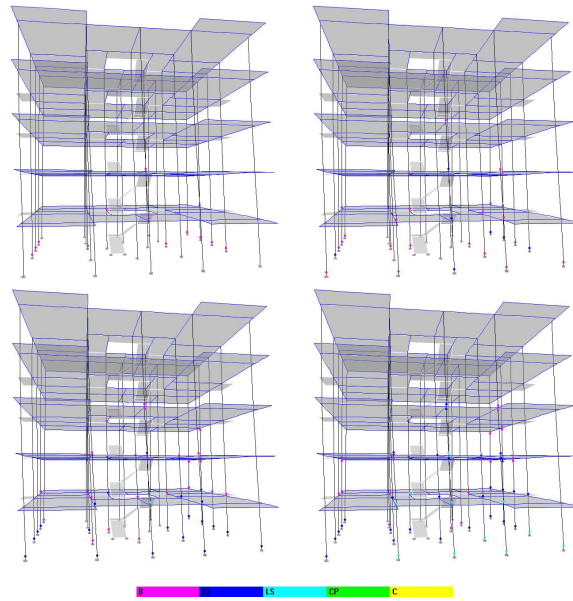


Abb. 7.22: Schematische Darstellung des Verlaufes der Schädigung während eines Erdbeben-Ereignisses am Beispiel des untersuchten Gebäudes in Sultandagi, Türkei; Legende nach Tabelle 7.4

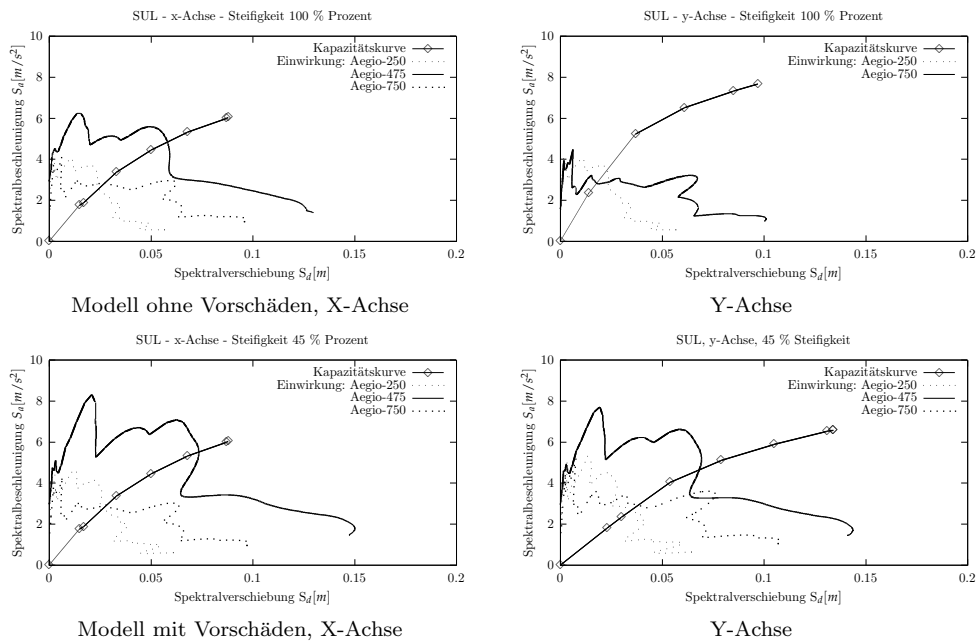


Abb. 7.23: Kapazitätskurve für Beispiel-Gebäude aus Sultandagi

Kapitel 8

Schlussbetrachtungen

Der weitverbreitete Glaube, gefährbringende Erschütterungen seien im Jahrhundert nur zwei- oder dreimal am gleichen Orte zu erwarten, verleitet dazu, mit keckem Wagemut auf den Ruinen wieder aufzubauen . . .

A. Sieberg

8.1 Ergebnisse

Diese Arbeit erhebt nicht den Anspruch, alle Entwicklungen der seismischen Gefährdungsanalyse und Einwirkungsbeschreibung umfassend widerzuspiegeln. Sie beschränkt sich auf die Möglichkeiten, die sich aus der Analyse der räumlichen Dichte von historisch berichteten Epizentren auf Grundlage von Nachbarschaftsanalysen mit *Voronoi* - Diagrammen ergeben. Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode ordnet sich dabei in die zonenfreien probabilistischen Methoden der seismischen Gefährdungsanalyse ein.

Das mit der Epizentrendichte-Methode vorgestellte zukunftsorientierte Konzept der seismischen Gefährdungsanalyse kann dabei helfen, einige Unsicherheiten seismischer Quellzonen zu umgehen und mit ingenieurmäßigem Vorgehen schnell und vertrauenswürdig zu entsprechenden seismischen Gefährdungsanalysen zu gelangen. Darüber hinaus lassen sich mit der vorgestellten Methode ingenieurseismische Parameter wie maximale Bodenbeschleunigung, Spektren, und Zeitverläufe der Bodenbewegung gefährdungskonsistent abschätzen.

Die Entwicklung der Epizentrendichte-Methode stützte sich auf die in großer Zahl vorliegenden Veröffentlichungen anderer Autoren zum Thema seismischer Gefährdungsanalysen. Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode ist als gleichberechtigte Ergänzung der herkömmlichen Methoden seismischer Gefährdungsanalysen zu verstehen. Die Epizentrendichte-Methode kann z.B. als ein Ast eines logischen Baumes im Rahmen einer seismischen Gefährdungsanalyse neben anderen Methoden eingesetzt werden.

Im Wissen, dass es bei der Modellierung auf der Widerstandsseite von Strukturen in den letzten Jahren, zum Beispiel mit der Kapazitätsbemessung, Fortschritte gegeben hat, beschränkt sich

die vorliegende Arbeit auf die Beschreibung der seismischen Einwirkungen. Die Sicherheit der betroffenen Bauwerke und Anlagen ist aber nicht ausschließlich von der Sicherheit der Einwirkungsbeschreibung abhängig.

8.2 Anwendungsgrenzen und Hinweise

Die Methoden zur Prognose der seismischen Gefährdung setzen eine stationäre Seismizität voraus. Inwieweit diese Modellannahme auch langfristig abgesichert ist, kann mit der heute verfügbaren Datenbasis noch nicht in vollem Umfang geklärt werden. Aufgrund der vorhandenen Datenbasis existiert für jede seismische Gefährdungsanalyse eine Grenze des vertrauenswürdigen Prognosehorizontes. Da die Unsicherheiten mit dem Prognosezeitraum zunehmen, kann ein Prognosehorizont von 10^{-4} bis $10^{-5}[1/a]$ angegeben werden.

An den Rändern der durch die Erdbeben-Kataloge abgedeckten Flächen kann es zu Unterschätzungen der seismischen Gefährdung kommen. Um dieses zu vermeiden, ist bei Anwendung der Epizentrendichte-Methode darauf zu achten, dass der in 5.2 beschriebene Modell-Radius vollständig durch den verwendeten Erdbeben-Katalog abgedeckt wird.

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf den in Abschnitt 2.9 vorgestellten simulierten Abnahmebeziehungen. Für standortspezifische Untersuchungen ist zu überprüfen, ob diese auch im jeweiligen Fall angewendet werden können.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Epizentrendichte-Methode kann es passieren, dass Gebiete, die zwar eine hohe Epizentrendichte aufweisen, jedoch keine größeren Erdbeben-Ereignisse hervorbringen, in der Gefährdung überschätzt werden. Regionen wie das durch zahlreiche Schwarmbeben gekennzeichnete Vogtland sind ein Beleg dafür. Bei einer zukünftigen Betrachtung von freigesetzter Bebenenergie pro Fläche sollten sich solche Fehleinschätzungen vermeiden lassen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dieses Problem noch nicht gelöst werden. Da Regionen mit einer solch ausgeprägten Schwarmbebencharakteristik, wie sie im Vogtland zu finden ist, selten sind, sind sie für Gefährdungsanalysen gegebenenfalls gesondert zu betrachten. Als eine Maßnahme zur Begrenzung dieser Phänomene sei eine Verringerung des Modellumfanges empfohlen (vgl. Abschnitt 5.2).

Die Epizentrendichte-Methode, wie sie in dieser Arbeit vorgestellt wurde, eignet sich nicht zur Berücksichtigung von systembedingten Fehlern wie z.B. die Verwendung einer ungeeigneten Abnahmebeziehung. Um diese Fehler dennoch zu berücksichtigen, kann die Epizentrendichte-Methode innerhalb eines logischen Baumes mehrfach wiederholt werden. Die Teilergebnisse lassen sich mit Gewichtungen zusammenfassen und erlauben so die systembedingten Unsicherheiten über die Angabe von Fraktilwerten zu berücksichtigen (vgl. z.B. *Scherbaum et al.* [155], *Wahlström und Grünthal* [188]).

8.3 Ausblick

Die vorgestellte Epizentrendichte-Methode kann als Ergänzung zu den herkömmlichen Methoden zur Bestimmung der seismischen Gefährdung angesehen werden. Die Epizentrendichte-Methode hilft dabei, das Wissen über die räumliche und quantitative Verteilung der seismischen Gefährdung zu mehren. Dieses gilt als Voraussetzung für eine Begrenzung des Umfangs von Erdbebenkatastrophen sowie die Planung und Ergreifung von adäquaten Maßnahmen für die Katastrophenbewältigung. Die Kenntnis der seismischen Gefährdung ermöglicht es, in Zusammenhang mit der Vulnerabilität der menschlichen Infrastruktur entsprechende Risikobetrachtungen durchzuführen. In der Folge kann das durch Erdbeben-Ereignisse hervorgerufene Risiko in ökonomisch angemessener Weise durch entsprechende Gegenmaßnahmen begrenzt werden.

Mit ihrer Vorgehensweise bildet die vorgelegte Arbeit den Wandel in den Grundlagen der Bemessungskonzepte mit dem Übergang von den ursprünglich deterministischen Ansätzen der Gefährdungs- und Einwirkungsbeschreibung hin zu probabilistischen Methoden ab.

Als Beispiel für diesen Wandel ist die Entwicklung in der europäischen Baunormung durch den Eurocode 8, aber auch die Entwicklung der deutschen Erdbebennorm DIN 4149 zu nennen. In der Fassung der DIN 4149 aus dem Jahr 2005 [45] wird die bisherige deterministische Intensitätskarte, die auf den historisch maximal beobachteten Schütterwirkungen basiert, ersetzt durch eine probabilistische Gefährdungszonenkarte, die Intensitäten mit einer Eintretens- bzw. Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren, d.h. einer mittleren Wiederkehrperiode von 475 Jahren, ausweist. Dieses seismische Gefährdungsniveau steht für Bemessungsbeben, bei dem allgemeine Hochbauten zwar Schäden erleiden dürfen, eine Einsturzgefahr jedoch nicht bestehen darf. Diese Entwicklung ist auch durch eine Differenzierung der Nachweisanforderungen gekennzeichnet. Die Auslegung der Gebäude bzw. baulichen Anlagen muss unterschiedlichen, von der Erdbebenstärke abhängigen Zielstellungen genügen, die in Form einer Auslegungsphilosophie zum Ausdruck gebracht werden kann. Die Verknüpfung der Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeit kann durch unterschiedliche Nachweiskonzepte realisiert werden. Nachweiskonzepte für Bauwerke und Anlagen mit erhöhtem sekundärem Risiko erfordern die Angabe von Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten. Für den allgemeinen Hochbau wird auf einer kräftebasierten Auslegungsgrundlage die Erdbeben-Zonenkarte und das zugehörige Bemessungserdbeben definiert.

Gelingt es, diese Zielstellung durch entsprechende Akzeptanzkriterien bzw. Nachweisgrößen und ihre zulässigen Grenzen zu definieren, vollzieht sich in dieser Weise der Übergang zu verhaltensbasierten Bemessungskonzepten, die den Ingenieur vor die Anforderung stellt, Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten zu beschreiben. Diese Entwicklung hin zu einer Differenzierung der Nachweisanforderungen kann mit den probabilistischen Methoden, wie der vorgestellten Epizentrendichte-Methode, umgesetzt werden. Dies bedeutet, dass für Erdbeben unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten Verhaltensforderungen festzulegen sind, für die letztlich Nachweis- und/oder Akzeptanzkriterien bereitzustellen sind.

Mit diesen Auslegungs- und Bemessungserdbeben können die verschiedenen Vorstellungen der Nutzer bzw. der

Gesellschaft in Bezug auf die Erdbeben-Sicherheit und die Anforderungen an das Gebäudeverhalten berücksichtigt werden. Der Übergang zu verhaltensbasierten Bemessungskonzepten stellt den Ingenieur vor die Anforderung, mit Erdbeben-Einwirkungen unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten zu arbeiten. In diesem Zusammenhang gewinnt die probabilistische seismische Gefährdungsanalyse für den Ingenieur an Bedeutung.

Da es viel Expertenwissen erfordert, die für probabilistische Gefährdungsanalysen erforderlichen Teilaufgaben zu realisieren, dies betrifft insbesondere die Abgrenzung der seismischen Quellzonen, ist es notwendig, nach neuen praktikablen Ansätzen zu suchen. Dies gilt insbesondere für das Aufstellen eines Modells seismischer Quellzonen. Da die für seismische Gefährdungsanalysen notwendigen Modelle in der Regel nicht überall zur Verfügung stehen, sind zonenfreie Ansätze wie die vorgestellte Epizentrendichte-Methode von zunehmender Bedeutung, da sie ausschließlich die historische Erdbeben-tätigkeit zur Grundlage nehmen und in diesem Zusammenhang eine vertrauenswürdige Abschätzung der Gefährdungskenngrößen (Intensitäten, spektrale Bodenbewegung) ermöglichen.

Die in der Arbeit vorgestellten Ergebnisse sind zur Quantifizierung der seismischen Gefährdung global einsetzbar. Die Ergebnisse der mit der vorgestellten Epizentrendichte-Methode untersuchten Beispiele zeigen bei gleichen Eingangsdaten eine gute Korrelation mit anderen probabilistischen seismischen Gefährdungsanalysen bis zu einer Eintretensrate von 10^{-5} [1/a]. Für Analysen, die über das Gefährdungsniveau von 10^{-5} [1/a] hinausgehen, treten teils größere Differenzen auf. Das Gefährdungsniveau von 10^{-5} [1/a] jedoch auch die von anderen Autoren anerkannte Grenze des vertrauenswürdigen Prognosebereichs (vgl. z.B. *Ahorner et al.* [3]).

Mit dieser Arbeit wird gezeigt, dass die Epizentrendichte-Methode zur probabilistischen seismischen Gefährdungsanalyse plausible und vertrauenswürdige Ergebnisse liefert. Die Epizentrendichte-Methode hat ihre Vorteile insbesondere in den Regionen, für die noch keine seismischen Quellzonen Modelle vorliegen. Es wird dem Ingenieur somit ein Hilfsmittel in die Hand gegeben, mit dem er schnell und ohne die Hilfe von aufwendig zu erstellenden seismischen Quellzonenmodellen die seismische Gefährdung und die erdbebenspezifischen Einwirkungsgrößen abschätzen kann. Für die Fortführung der mit dieser Arbeit umgesetzten Idee bietet sich neben der Einbindung in einen Fehlerbaum eine stärkere Fokussierung auf die freigesetzten Bebenenergien pro Fläche an.

Literaturverzeichnis

- [1] *Abrahamczyk L., Schott C., Schwarz J. and T.M. Swain*: Vulnerability of RC Frame Structures in Turkish Earthquake Regions (Part 2): Modelling and Analysis, Paper 220, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [2] *Ahorner, L.*: Seismicity and Neotectonic Structural Activity of the Rhine Graben System in Central Europe. Ritsema, A. R. and Gürpınar, A. (Eds.), Seismicity and Seismic Risk in the Offshore North Sea Area, 101–111, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland
- [3] *Ahorner, L. und M. Budny*: Realistische Seismische Lastannahmen für Bauwerke, Abschlußbericht an das Institut für Bautechnik Berlin. König und Heunisch, Beratende Ingenieure, Frankfurt/Erdbebenstation Bensberg der Universität Köln/Institut für Geophysik der Universität Stuttgart 1986
- [4] *Ahorner, L. und W. Rosenhauer*: Seismische Risikoanalyse. Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung. Bericht zur IDNDR, Deutsche Forschungsgemeinschaft, und identisch in DGEb-Publikation Nr. 6, jeweils S. 177–190, VCH-Verlag, Weinheim, 1993
- [5] *Ahorner, L. and W. Rosenhauer*: Seismic Hazard Assessment for the Lower Rhine Embayment before and after the 1992 Roermond Earthquake, *Geologie and Mijnbouw* 73: 415–424, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- [6] *Ahorner, L.*: Möglichkeiten und Grenzen paläoseismologischer Forschung in mitteleuropäischen Erdbebengebieten. - DGEb-Publikation 9 1998, Paläoseismologie, Eurocode 8 und Schwingungsisolierung (Hrsg. S.A. Savidis), S. 9–42.
- [7] *Ahorner, L.*: Erdbeben-Katalog, unveröffentlichtes Computerfile, welches dem Autor für diese Arbeit freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.
- [8] *Ahorner L.*: Abschätzung der statistischen Wiederkehrperiode von starken Erdbeben im Gebiet von Köln auf Grund von geologisch-tektonischen Beobachtungen an aktiven Störungen, <http://www.gfz-potsdam.de/pb2/dgg/mitteilungen/mitteilungen2_2001/ahorner.html>
- [9] *Ahorner, L., Amstein, S., Golbs, Ch., Meidow, H. and J. Schwarz*: An earthquake catalogue for Germany and adjacent areas considering engineering demands. First European Conference

- on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES). Geneva, Switzerland, 3-8 September 2006, Abstract 373.
- [10] *Allmann, A., Rauch, E. and A. Smolka*: New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe: Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. - Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-7; Balkema, Rotterdam. (1998)
- [11] *Algermissen S. and D. Perkins*: A probabilistic estimate of maximum acceleration in rock in the contiguous United States, U.S. Geol. Surv. Open-File Rep. 76-416, 45 pp. Reston, Va., 1976
- [12] *Ambraseys N.N., Simpson K.A. und J.J. Bommer*: Prediction of horizontal response spectra in Europe, Earthquake Engineering and structural dynamics, **25**, 371-400, 1996
- [13] *Ambraseys, N., Smit P., Sigbjörnsson, R., Suhadolc, P. and B. Margaris*: the European Strong-Motion Database, European Commission, Research-Directorate General, Environment and Climate Programme, 2002, <<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>>
- [14] *Ambraseys N., R. Bilham*: Earthquakes in Afghanistan, in Seismological Research Letters **74**, Number 2, March/April 2003, <<http://cires.colorado.edu/bilham/Afghan.pdf>>, <http://www.seismosoc.org/publications/SRL/SRL_74/srl_74-2_ambraseys_esupp1.html>
- [15] *Amstein, S., Lang, D.H. und J. Schwarz*: Schütterwirkung historischer Erdbeben und aktuelle Anwendungsgebiete für das Erdbebeningenieurwesen. Bautechnik 82 (2005), Heft 9, 641-656.
- [16] *Amstein, S. und J. Schwarz*: Das Schurwald Erdbeben vom 03. August 1940 in der Gegend von Göppingen, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, 2004
- [17] *Anderson, J.G. and J.N. Brune*: Probabilistic hazard analysis without the ergodic assumption, Seism. Res. Lett. 70, 19-23., 1999
- [18] *Aurenhammer, F.*: Voronoi diagrams A survey of a fundamental geometric data structure. ACM Comput. Surv., **23**, 345-405, 1991.
- [19] *Aurenhammer, F. und R. Klein*: Voronoi diagrams. Informatik Berichte 198, FernUniversität Hagen, 1996. <<http://wwwpi6.fernuni-hagen.de/Publikationen/tr198.pdf>>
- [20] *Atkinson G.M.*: An overview of developments in seismic hazard analysis, Paper 5001, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1-6, 2004
- [21] *Baier B.*: Fragebogen für die Beobachtung von Erdbeben <<http://www.geophysik.uni-frankfurt.de/tns/mseisq.pdf>>

- [22] *Bayer V., Brehm M., Bucher C., Ebert M., Finn R., Herz E., Huth O., Macke M., Moritzen K., Most T., Pfefferkorn G., Purkert G., Riedel J., Roos D., Schorling Y., Unger J. F., Winkel B., Zabel V.*: SLang the Structural Language, Institut für Strukturmechanik, Bauhaus-Universität Weimar, <<http://www.uni-weimar.de/Bauing/ism/Slang/slang.Allgem.html>>
- [23] *Bazurro, P.*: Probabilistic seismic damage analysis, PhD Thesis, Stanford University, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford, CA, 1998
- [24] *Benjamin, J.R.* and *C.A. Cornell*: Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw-Hill Book Company, 1970
- [25] *Berckheimer, H.*: Grundlagen der Geophysik. Darmstadt, 1990
- [26] *Bern, Marshall* and *Eppstein*: Mesh Generation and Optimal Triangulation pp. 23–90 of Computing in Euclidean Geometry, World Scientific, Singapore, 1992. <<http://www.cs.cmu.edu/quake-papers/related/BernEppstein.ps>>
- [27] *Bern, Eppstein* and *Gilbert*: Provably Good Mesh Generation, Journal of Computer and System Sciences 48(3): 384–409, June 1994. <<http://www.cs.cmu.edu/quake-papers/related/BernEppsteinGilbert.ps>>
- [28] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, (BGR), Homepage <<http://www.bgr.de>>
- [29] *Boncio, P., Lavecchia, G.* and *B. Pace*: Defining a model of 3D seismogenic sources for Seismic Hazard Assessment applications: The case of central Apennines (Italy), Journal of Seismology **8**: 407–425, 2004
- [30] *Boore, D.M., Joyner, W.B.* and *T.E. Fumal*: Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from Western North American earthquakes: A summary of recent work. Seismological Research Letters **68** 1, 128–148, 1997
- [31] *Bormann, P.*: Magnitude of seismic events. In: Seismology, Seismic Hazard Assessment and Risk Mitigation. International Training Course 1999, **1**, Scientific Technical Report STR99/13, Potsdam 1999
- [32] *Bormann, P.*: Seismic scalling relations. In: Seismology, Seismic Hazard Assessment and Risk Mitigation. International Training Course 1999, **1**, Scientific Technical Report STR99/13, Potsdam 1999
- [33] *Bortkiewicz, L. von.*: Das Gesetz der kleinen Zahlen, Leipzig, Teubner 1898
- [34] *Brunzema* und *Hinzen*: Poster gezeigt auf der DGG Tagung 2001 in Frankfurt <http://www.seismo.uni-koeln.de/projects/kta/poster_1.htm>

- [35] *Burnikel, C.*: Exact Computation of *Voronoi* diagrams and Line Segment Intersections, Dissertation, 1996
- [36] *Clough R.W.* and *J. Penzien*: Dynamics of Structures, Mc- GrawHill Kogakusha, Ltd, Tokyo, 1975
- [37] *Coppersmith, K. J.*: Conclusions regarding maximum earthquake assessment. In: The Earthquakes of Stable Continental Regions, **1**: Assessment of Large Earthquake Potential. Electric Power Research Institute (EPRI) TR-102261-V1, 6-1-6-24, 1994
- [38] *Cornell, C.A.*: Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, **58**, pp. 1583–1606. 1968
- [39] *Cornell, C.A.*: Statistical analysis of maximum magnitudes. In: The Earthquakes of Stable Continental Regions, **1** Assessment of Large Earthquake Potential. Electric Power Research Institute (EPRI) TR-102261-V1, 5-1-5-27, 1994
- [40] *Cramer, C.H., Petersen M.D., Cao T., Topozada T.R.* and *M. Reichle*: A Time-Dependent Probabilistic Seismic-Hazard Model for California, Bulletin of the Seismological Society of America, **90**, 1, pp. 1–21, February 2000
- [41] *Crespo M.J., Martí J.*: The use of a zoneless method in four LNG sites in Spain, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Proceedings Paper 306, 9–13 September 2002, London, UK
- [42] *Comartin C.* and *E. Reis*: Financial Formulation and Application of Performance Based Engineering Procedures, Paper No. 1039, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [43] *Cuibas L.*, and *J. Stolfi*: Primitives for the Manipulation of General Subdivisions and the Computation of Voronoi Diagram, ACM Transactions on Graphics (TOG), **4**, Issue 2, Seiten 74 – 123, 1985, ISSN: 0730-0301
- [44] *Dewey, J.W.*: A consumer's guide to instrumental methods for determination of hypocenters, A. W. Hateway and C. R. McClure, Jr., eds Geology in the Siting of Nuclear Power Plants, Geologic Society of America Reviews in Engineering Geology, **4**, pp. 109–117, (1979)
- [45] DIN 4149: Bauten in deutschen Erdbebengebieten. Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Deutsches Institut für Normung, Berlin, April 2005
- [46] *Dirichlet, G.L.*: Über die Reduktion der positiven quadratischen Formen mit drei unbestimmten ganzen Zahlen. J. Reine Angew. Math. 40 (1850), 209–227.
- [47] Ekström, G. & Dziewonski, A. M.: Evidence of bias in estimations of earthquake size, Nature, 332, 319, 1988.

- [48] *Douglas, J.*: Reissue of ESEE Report No. 01-1: A comprehensive worldwide summary of strong-motion attenuation relationships for peak ground acceleration and spectral ordinates (1969–2000) with corrections and additions. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London. 09/2003
- [49] Earthquake Catalogue of Switzerland (ECOS), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, <http://histserver.ethz.ch/intro_d.html>
- [50] ECEE: Proceedings of the 11th European Conference on Earthquake Engineering (ECEE), Paris 1998
- [51] ECEE: Proceedings of the 12th European Conference on Earthquake Engineering (ECEE), London, September 9–13, 2002
- [52] *Edelsbrunner, H.*: Algorithms in Combinatorial Geometry. Springer, Berlin; Heidelberg; New York, 1987.
- [53] EERI: Seventh U.S. National Conference on Earthquake Engineering (7NCEE), Theme: Urban Earthquake Risk, Proceedings CD-ROM, July 21–25, 2002, Boston, Massachusetts, Earthquake Engineering Research Institute <<http://www.eeri.org>>
- [54] Electric Power Research Institute: Seismic hazard methodology for the central and eastern United States, **10**, EPRI report NP-4726, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1986 <<http://epri.com>>
- [55] *Ende C. und J. Schwarz*: Einfluss von Analysemethoden auf spektrale Abnahmebeziehungen der Bodenbewegungen, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsbeurteilung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, 2004
- [56] EduPro Civil Systems: ProShake User's Manual, Ground Response Analysis Program, Version 1.1. - EduPro Civil Systems, Inc.; Redmond. (1999) <<http://www.proshake.com>>
- [57] European Committee for Standardization, Brüssel, Belgium: Eurocode 8, Part 1: Design of structures for earthquake resistance. General rules, seismic action and rules for buildings, May 2002. Draft No. 5.
- [58] *Field E. H.*: Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), A Primer, <http://www.relm.org/tutorial_materials/PSHA_Primer_v2.pdf>
- [59] *Field E. H.*: Earthquake Ground-Motion Amplification in Southern California, U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-164, 2001 <<http://www.scec.org/phase3/overview.html>>

- [60] *Fischer J., Grünthal G. und J. Schwarz*: Das Erdbeben vom 7. Februar 1839 in der Gegend von Unterriexingen, Artikel aus der Zeitschrift: Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar Nr. 1/2, 45. Jahrgang, Seite 8-30, 2001 ISSN: 1433-5735
<<http://edoc.gfz-potsdam.de/gfz/get/4360/0/b5a8d1004cd2f2293dc15189f89255b6/4360.pdf>>
- [61] *Frankel A.*: Mapping Seismic Hazard in the Central and Eastern United States, Seismological Research Letters, **66**, N. 4, July – August 1995, pp 8 – 21.,1995
- [62] *Frankel A.D., Petersen M.D., Mueller C.S., Haller K.M., Wheeler R.L., Leyendecker E.V., Wesson R.L., Harmsen S.C., Cramer C.H., Perkins D.M. and K.S. Rukstales*: Documentation for the 2002 Update of the National Seismic Hazard Maps, Open-File Report 02-420, U.S. Geological Survey 2002
- [63] Free Software Foundation, free Fortran 77 compiler
- [64] *Fuhrmann, A.*: Approximation konvexer Polyeder in der Hausdorff-Metrik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1998.
- [65] *García-Pérez J., Castellanos F. and Díaz O.*: Two methods to attain optimum zoning of a region of known seismicity, Paper No. 3043, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [66] *Gasparini D. A., and E. H. Vanmarcke*: Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. MIT Civil Engineering Research Report R76-4, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1976
- [67] *Geiger L.*: Probability method for the determination of earthquake epicenters from the arrival time only. Bulletin of St. Louis University, **8/1**, 56–71 pp., 1912
- [68] *Giardini D., Jimenez M. J. and G. Grünthal* (Editors): European-Mediterranean Seismic Hazard Map, International Geological Correlation Program, Project no. 382: SESAME, February 2003
- [69] *Grünthal, G. und C. Bosse*: Probabilistische Karte der Erdbebengefährdung der Bundesrepublik Deutschland – Erdbebenzonierungskarte für das nationale Anwendungsdokument zum Eurocode 8, Scientific Technical Report STR 96/10 (1996)
- [70] *Grünthal, G.*: Seismische Gefährdung, in Hurtig, E., Stiller, H. (Hrsg.), Erdbeben und Erdbebengefährdung, Kap. 8 Berlin: Akademie-Verlag (1984)
- [71] *Grünthal, G. und C. Bosse*: Seismic hazard assessment for low seismicity areas Case study: Northern Germany. Natural Hazards 14, 127–139. (1997)
- [72] *Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. und W.A. Lenhardt*: Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz. Bautechnik, 75 Jahrgang, 10 / 1998

- [73] *Halchuk S. and J. Adams*: Deaggregation of seismic hazard for selected Canadian Cities, Paper 2470, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [74] *Grünthal, G., Musson, R.M.W., Schwarz, J. and M. Stucchi* (eds.): EMS (1992): European Macroseismic Scale 1992. European Seismological Commission. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. **7**, Conseil de l'Europe, Luxembourg.
<http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/en/ems/ems_e.html>
- [75] *Grünthal, G., Musson, R.M.W., Schwarz, J. and M. Stucchi* (eds.): EMS (1998): European Macroseismic Scale 1998. European Seismological Commission. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. **15**, 99 pp. Conseil de l'Europe, Luxembourg.
<http://www.gfz-potsdam.de/pb5/pb53/projects/en/ems/ems_e.html>
- [76] *Grünthal, G. und J. Fischer*: eine Serie irrtümlicher Schadenbeben im Gebiet zwischen Nördlingen und Neuburg an der Donau vom 15. bis zum 18. Jh., Mainzer naturwiss. Archiv **39** (2001), 15–32
- [77] *Grünthal, G. and J. Schwarz*: Hazard-consistent description of seismic action for a new generation of seismic codes, a case study considering low seismicity regions of Central Europe. In 12th Conference on Earthquake Engineering, 2000. paper 0443
- [78] *Grünthal, G. und J. Schwarz*: Reinterpretation der Parameter des Mitteldeutschen Bebens von 1872 und Ableitung von Erdbebenszenarien für die Region Ostthüringen, Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar 1./2. Heft 2001, 47. Jahrgang
- [79] *Grünthal G., Mayer-Rosa D. und W.A. Lenhardt*: Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz, Bautechnik, Oktober 1998, Heft 10
- [80] *Grünthal, G. und R. Wahlström*: Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. Journal of Earthquake Engineering, **5**, No. 3: 309–328, 2001
- [81] *Grünthal, G. and R. Wahlström*: An M_w based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions; Journal of Seismology **7**: 507–531, 2003
- [82] *Grünthal, G.*: Verteilungsfunktionen maximal erwarteter Magnituden mit Anwendungen auf Südwestdeutschland, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 69–76, 2004
<<http://edoc.gfz-potsdam.de/gfz/get/9391/0/1744a8af67de6d7e8f3d37eead26777d/9391.pdf>>

- [83] *Grünthal, G. and R. Wahlström*: An earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe based on M_w magnitudes, Scientific Technical Report STR03/02, GeoForschungsZentrum Potsdam <<http://www.gfz-potsdam.de/bib/pub/str0302/0302.htm>>
- [84] *Grünthal G., Wahlström R., Stromeyer D., Schelle H. und C. Bosse*: Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen, in Risiken durch Naturgefahren in Deutschland, Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK), *Merz B. und H. Apel* (Hrsg.), GeoForschungsZentrum Potsdam, Juni 2004, <<http://www.gfz-potsdam.de/bib/pub/str0401/0401.pdf>>
- [85] *Grünthal, G. und W. Minkley*: Bergbauinduzierte seismische Aktivität als Quelle seismischer Belastungen - Zur Notwendigkeit der Ergänzung der Karte der Erdbebenzonen der DIN 4149:2005-04, Bautechnik 2005, Band 82, Heft 8, 508 – 513
- [86] *Gumbel E. J.*: Statistik of Extremes, Columbia University Press 1958
- [87] *Gutenberg B.*: Grundlagen der Erdbebenkunde, Sammlung Borntraeger Bd. 12, Verlag von Gebrüder Borntraeger Berlin (1927)
- [88] *Gutenberg, B. and C.F. Richter*: Frequency of Earthquakes in California Bulletin of the Seismological Society of America, **34**, No. 4, pp. 1985–1988, 1944
- [89] *Habenberger, J., Raschke, M. und J. Schwarz*: Modelle zur Beschreibung der Magnituden Häufigkeits - Beziehung, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 61–68, 2004
- [90] *Habenberger, J., Raschke, M. und J. Schwarz*: Ein Modell zur Berücksichtigung der regionalen Seismizität in der probabilistischen Gefährdungsberechnung, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 165–171, 2004
- [91] *J. Habenberger, C. Golbs und J. Schwarz*: A Zoneless Approach in Probabilistic Seismic Hazard Analysis using Density Functions of Epicenters. 29th General Assembly of the European Seismological Society (ESC), Potsdam 2004.
- [92] *Hainzl, S.*: Erdbeben und selbstorganisierte Kritizität, Modellierung der raumzeitlichen Erdbebendynamik, Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam, 1999, <<http://pub.ub.uni-potsdam.de/1999/0012/hainzl.pdf>>
- [93] *Hampe, E.*: Interdisziplinäre Kooperationsnotwendigkeiten zur Erdbebenuntersuchung von Spezialbauwerken der Life-Lines. Bauplanung-Bautechnik 37 (1983) 7, 308-313

- [94] *Hanks, T.C. and H. Kanamori*: A moment magnitude scale. - J. Geophys. Res. 84, pp. 2348–2350. 1979
- [95] *Hosser, D. und H. Klein*: Realistische Seismische Lastannahmen für bauliche Anlagen mit erhöhtem Sekundärrisiko. Abschlußbericht im Auftrage des Institutes für Bautechnik Berlin. König und Heusch, Beratende Ingenieure, Frankfurt (1983)
- [96] *Kagan Y.Y. and D.D. Jackson*: Probabilistic forecasting of Earthquakes. Geophys. J. Int. (2000) **143**, 438–453
- [97] *Kárník, V., Schenkova, Z. and V. Schenk*: Seismic hazard estimates for low seismicity region - example of Bohemia, PAGEOPH 119, S. 1077–1092 (1981)
- [98] *Keintzel, E.*: Vereinfachte Berechnung und Konstruktion von Stahlbetonhochbauten in Schwachbebengebieten auf der Grundlage von Eurocode 8. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben “Harmonisierung Europäischer Baubestimmungen“. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Technische Universität Karlsruhe
- [99] *Kennedy, R. P.*: Performance-goal based (risk informed) approach for establishing the SSE site specific response spectrum for future nuclear power plants RPK Structural Mechanics Consulting, 28625 Mountain Meadow Road, Escondido, CA 92026, Transactions, SMiRT 19, Toronto, August 2007
- [100] *Kerz W.*: Einführung in die Geophysik. B.I. Hochschultaschenbücher, Band 275. Wissenschaftsverlag, Mannheim, 232 pp., 1969.
- [101] *Klein, R.*: Concrete and Abstract Voronoi Diagrams. Number 400 in Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin; Heidelberg; New York, 1989.
- [102] *Kramer, S.L.*: Geotechnical Earthquake Engineering. Prentice Hall, 1. edition, 1996.
- [103] KTA 2201, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Juni 1990
- [104] KTA 2201.1, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 1: Grundsätze, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Juni 1990
- [105] KTA 2201.2, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 2: Baugrund, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Juni 1990
- [106] KTA 2201.3, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen, Sicherheitstechnische Regel des KTA, Fassung Juni 1990, Entwurf
- [107] KTA 2201.4, Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen; Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektronische Anlagenteile, Fassung Juni 1990

- [108] *Kulkarni, R.B., Youngs, R.R. and K.J. Coppersmith*: Assessment of confidence intervals for results of seismic hazard analysis, Proceedings, 8th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), San Francisco, 1, pp. 263–270
- [109] *Lang D.H.*: Damage potential of seismic ground motion considering local site effects. scientific technical reports 01 (2004), Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (ed.), ISBN: 3-86068-227-X
- [110] *Lang D.H., Ende C. and J. Schwarz*: Vulnerability of RC Frame Structures in Turkish Earthquake Regions (Part 1): Instrumental Testing, Paper 216, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [111] *Lapajne J.*: Sket-Motnikar B., Zabukovec B., Zupancic P., 1997, Preliminary Seismic Hazard maps of Slovenia. Natural Hazards, I, 14, Nos. 2–3, pp. 155–164.
- [112] *Lenhardt W.A.*: The Austrian catalogue, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Hauptabteilung Geophysik <<http://www.zamg.ac.at/>>
- [113] *Lenhardt W.A.*: Erdbeben der vierten Art - Lokales seismisches Gefährdungspotential durch Eingriffe in die Natur, Bautechnik 75. Jahrgang 10 / 1998
- [114] *Lestuzzi P.*: Dynamisches plastisches Verhalten von Stahlbetontragwänden unter Erdbebeneinwirkung, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 2000, <http://imacwww.epfl.ch/imac/Team/Lestuzzi/Publication/These/These_Lest.pdf>
- [115] *Leydecker, G., Schmitt, T. und H. Busche*: Erstellung ingenieurseismologischer Gutachten -Leitfaden-, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover 2006, ISBN 3-510-95952-3
- [116] *Leydecker, G.*: Erdbeben-Katalog für die Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 1000–1981. Geolog. Jahrbuch Reihe E, 36, 83pp., 1986.
- [117] *Leydecker, G. und H. Aichele*: The seismographical regionalization for Germany. – Prime example of third level regionalization. Geol. Jahrb. E55. 1996
<http://www.bgr.bund.de/cn_029/nm_457146/DE/Themen/Seismologie/Bilder/Sei_ger3map_g.html>
- [118] *Leydecker, G.*: Erdbeben-Kataloge der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, (BGR), <<http://www.bgr.de/quakecat/>>
- [119] *Lin Y. K.*: Probabilistic theory of structural dynamics Robert E. Krieger Publishing CO., Inc., New York 1976.
- [120] *Lomnitz C.*: Global Tectonics and Earthquake Risk, Developments in Geotectonics 5, Elsevier Scientific Publishing Company

- [121] *Mallard D.*: Zone-Free Modelling, David Mallard reports the SECED half-day meeting held on January 19th 2000, in SECED Newsletter **14** No 3, December 2000, <<http://www.seced.org.uk/newsletters/v14n3.pdf>>
- [122] *Marin S., Avouac J., Nicolas M. and A. Schlupp*: A Probabilistic Approach to Seismic Hazard in Metropolitan France, Bulletin of the Seismological Society of America, **94**, No. 6, pp. 2137–2163, December 2004
- [123] *Martin C., Secanell R., Combes Ph. and G. Lignon*: Preliminary Probabilistic Seismic Hazard Assessment of France, 12th European Conference on Earthquake Engineering, September 9–13, 2002, Paper Ref. 870, pub. By Elsevier Science Ltd.
- [124] *McGuire, R. K.*: Fortran Computer Program for Seismic Risk Analysis. U.S. Geological Survey (<<http://www.usgs.gov>>), Open File Report 67–76, 90p.
- [125] *McGuire, R. K.*: FRISK88M User's Manual. Risk Engineering Inc., Boulder (Co.), 1996
- [126] *McGuire, R. K.*: Seismic Hazard and Risk Analysis, Earthquake Engineering Research Institute, EERI Publication No. MNO-10, ISBN 0-943198-01-1, 2004
- [127] *Meiser, S.*: Zur Konstruktion abstrakter Voronoidiagramme, S. Meiser, Dissertation, 1993
- [128] *Mercalli G.*: Sulle Modificazioni proposte alla Scala sismica da Rossi-Forel. Bollettino della Società sismologica italiana, **VIII**, 1902/03, pag. 184
- [129] *Molina S., Lindholm C.D. and H. Bungum*: Probabilistic seismic hazard analysis: zoning free versus zoning methodology, Bollettino Di Geofisica Teorica ED Applicata, **42**, N. 1–2, pp. 19–39; Mar.–Jun. 2001
- [130] *Münch, O.*: Das *Voronoi* - Diagramm in der Airline-Metrik: Untersuchung der strukturellen Eigenschaften und Veranschaulichung durch ein Java-Programm, FernUniversität Gesamthochschule in Hagen 1998
- [131] Münchener Rück topics, Jahresrückblick der Naturkatastrophen 1999, <http://www.munichre.com/pdf/pm_2000_02_29_anhang2.d.pdf>
- [132] *Musson, R.M.W.*: WizmapII, British Geological Survey Internal Report 1998.
- [133] *Musson, R.M.W.*: Objective Validation of Seismic Hazard Source Models, Paper 2492, 13th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, August 1–6, 2004
- [134] *Nawrotzki, P.*: Stahlfedern und Visco Dämpfer zur Optimierung der Erdbebenbeanspruchung von Bauwerken, GERB Schwingungsisolierungen GmbH & Co. KG, D-A-CH Tagung 2001, Innsbruck, <<http://www.gerb.com/de/bibliothek/downloads/dokumente/AbsInns.pdf>>

- [135] *Pacheco, J. F., Scholz, C. H. and L. R. Sykes*: Changes from frequency-size relationship from small to large earthquakes, *Nature*, 355, 71, 1992.
- [136] *Neumann W., Jacobs F. und B. Tittel*: Erdbeben; BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1986
- [137] *Pace B., Peruzza L., Lavecchia G. and P. Boncio*: Layered Seismogenic Source Model and Probabilistic Seismic-Hazard Analyses in Central Italy, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**, No. 1, pp. 107–132, February 2006
- [138] *Papazachos B.C, Comninakis P.E., Karakaisis G.G., Karakostas B.G., Papaioannou Ch.A., Papazachos C.B. and Scordilis E.M.*: A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the preiod 550BC–1999. In: *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology IASPEI*, 2000
- [139] *Petersen M.D., Cramer C.H. and A.D. Frankel*: Monte Carlo uncertainty analysis for the hazard from the Cascadia Subduction Zone in the Pacific Northwest of the United Staates <http://www.tokyo.rist.or.jp/ACES_WS2/extended_abstract/PDF/MarkPetersen.pdf>
- [140] *Power, M.S., Coppersmith, K.J., Youngs, R.R., Schwartz, D.P. and R.H. Swan*: Seismic Exposure Analysis for the WNP-2 and WNP-1/4 Site: Appendix 2.5K to Amendment No. 18 Final Dafety Analysis Report for WNP-2, Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, 63 pp.
- [141] *Pugliese, A. und F. Sabetta*: Stima di spettri di risposta da registrazioni di forti terremoti italiani, *ingegneria sismica* 6 1989, **2**, 3–14.
- [142] *Raschke, M.*: Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerksschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse, Dissertation, Weimar 2004
- [143] *Raschke, M. und J. Schwarz*: Bemessungserdbeben für Bauwerke hohen Risikopotenzials nach den sicherheitstechnischen Regeln des KTA 2201.1, *Schriften der Bauhaus-Universität Weimar*, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 131–143, 2004
- [144] *Reiter, L.*: *Earthquake Hazard Analysis*, Columbia University Press, New York, 252 p.
- [145] *Rhoades D.A. and Dowrick D.J.*: Effects of magnitude uncertainties on seismic hazard estimates, Paper 1179, 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), Auckland, 2000
- [146] *Richter, C. F.*: *Elementary Seismology*, June 1958, Publisher: W.H. Freeman

- [147] *Rosenhauer W.* und *Ahorner L.*: Spezielle Untersuchungen zur Magnituden-Häufigkeits-Relation für die seismische Risikoanalyse, IV. Kolloquium Erdbebeningenieurwesen, Nationale Gruppe für Erdbebeningenieurwesen, Telegrafenberg, Potsdam und Deutsche Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik e.V. (DGEB) 9.–11.1.1991; Hrsg.: P. Knoll und D. Werner
- [148] *Rosenhauer W.*, Benutzungs-Anleitung für das Programm GUMBEL, Bericht im Auftrag der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB), August 1999
- [149] *Rosenhauer W.*: Benutzungs-Anleitung für das Programm PSSAEL zur probabilistischen seismischen Standort Analyse, Bericht im Auftrag der Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V. (VGB), August 1999
- [150] Stellungnahme der Arbeitsgruppe Seismologie des RSK-Ausschusses Anlagen- und Systemtechnik (3/2002),
<<http://www.rskonline.de/stellungnahmen/STELLUNGNAHME%20AG%20SE.pdf>>
- [151] *Ruppert, J.*: A Delaunay Refinement Algorithm for Quality 2-Dimensional Mesh Generation, *Journal of Algorithms* 18(3) 548–585, May 1995 <<http://www.cs.cmu.edu/quakepapers/related/Ruppert.ps>>
- [152] *Sägesser, R.* und *D. Mayer-Rosa*: Erdbebengefährdung in der Schweiz. Schweizerische Bauzeitung 96, S. 107–123, 1978
- [153] *Sambridge, M.*: Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm – I. Searching a parameter space. *Geophys. J. Int.* (1999) **138**, 479–494,
<<http://www.rses.anu.edu.au/malcolm/papers/pdf/gji876.pdf>>
- [154] *Schenk, V., Grünthal, G., Schenkova, Z.*: Seismic Hazard Assessment of the GDR. *Engineering Geology* 1983
- [155] *Scherbaum, F., Bommer, J.J., Bungum, H., Cotton, H.* and *N.A. Abrahamson*: Composite Ground-Motion Models and Logic Trees: Methodology, Sensitivities, and Uncertainties, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **95**, pp. 1575–1593, October 2005
- [156] *Schick R.*: Untersuchungen über die Bruchausdehnung und Bruchgeschwindigkeit bei Erdbeben mit kleinen Magnituden, *Z. Geophysik*, 34, 267–286, Würzburg, 1968
- [157] *Schnabel, P.B., Lysmer, J.,* and *H.B. Seed*: SHAKE; A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC 72–12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California. 1972
- [158] *Schneider G.*: Erdbeben, Entstehung - Ausbreitung - Wirkung, Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1975

- [159] *Schneider G.*: Erdbebengefährdung, Darmstadt: Wiss. Buchges. 1992
- [160] *Schwarz, J.*, und *G. Grünthal*: Zukunftsorientierte Konzepte zur Beschreibung seismischer Einwirkungen für das Erdbebeningenieurwesen, Bautechnik, Heft 10, Oktober 1998, 737–752, 75. Jahrgang
- [161] *Schwarz, J.*, *Grünthal G.* und *C. Golbs*: Gefährdungskonsistente Erdbebeneinwirkungen für deutsche Erdbebengebiete - Konsequenzen für die Normenentwicklung, Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar 1./2., 50–68, Heft 2001, 47. Jahrgang
- [162] *Schwarz J.*: Harmonisierung von seismischer Gefährdung und seismischen Einwirkungen in Erdbebenbaunormen - Gefährdungsbezogene Einwirkungsgrößen und Parameter. DGEb-Publikation Nr. 7. Seismische Einwirkungen auf Bauwerke unterschiedlichen Risikopotentials; Europäische Regelwerke (Hrsg. E. Hampe und J. Schwarz), 79–96
- [163] *Schwarz, J.*, *Habenberger J.* und *C. Golbs*: Parameteruntersuchung zur probabilistischen Gefährdungsberechnung, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 173–180, 2004
- [164] *Schwarz, J.*, *Habenberger J.* und *C. Schott*: Auswertung von Strong - Motion - Daten in den für deutsche Erdbebengebiete maßgebenden Magnituden - Entfernungsbereichen, Fallstudie für felsige Untergrundbedingungen, Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar 1./2., S. 80–91, Heft 2001, 47. Jahrgang
- [165] *Schwarz, J.*, *Lang, D.* und *C. Golbs*: Erarbeitung von Spektren für die DIN 4149 - neu unter Berücksichtigung der Besonderheiten deutscher Erdbebengebiete und der Periodenlage von Mauerwerksbauten. Forschungsbericht im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Mauerwerksbau (DGFM). Bauhaus-Universität Weimar, September 1999
- [166] *Schwarz, J.*, *Raschke, M.* und *W. Rosenhauer*: Konservativität der seismischen Bemessungsgrößen nach KTA 2201.1 am Maßstab probabilistischer Gefährdungsanalysen, Schriften der Bauhaus-Universität Weimar, Seismische Gefährdungsberechnung und Einwirkungsbeschreibung, Zentrum für die Ingenieuranalyse von Erdbebenschäden (Erdbebenzentrum) am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus-Universität Weimar, 116, S. 145–162, 2004
- [167] *Shewchuk, J. R.*: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, First Workshop on Applied Computational Geometry (Philadelphia, Pennsylvania), pages 124–133, ACM, May 1996. <<http://www.cs.cmu.edu/quake-papers/triangle.ps>>
- [168] *Shamos, M. I.*, und *D. Hoey*: Geometric intersection problems. In Proceedings 17th Annu. IEEE Sympos. Found. Comput. Sci. (1976), pp. 208–215.

- [169] *Sieberg A.*: Der Erdball seine Entwicklung und seine Kräfte, Verlag von J.F. Schreiber, Esslingen und München, Oktober 1908
- [170] *Sieberg A.*: Über die makroseismische Bestimmung der Erdbebenstärke. Leipzig Verlag von Wilhelm Engelmann 1912
- [171] *Sieberg A.*: Erdbebenkunde. Gustav Fischer Verlag, Jena 1923
- [172] *Sieberg A.*: Beiträge zum Erdbeben-Katalog Deutschlands und angrenzender Gebiete für die Jahre 58 bis 1799. Mitt. Deutsch. Reichs-Erdbebendienst 2, 112 pp. (1940)
- [173] *Sieberg A.*: Erdbeben-Katalog Deutschland für die Jahre 1935 bis 1939. Mitt. Deutsch. Reichs-Erdbebendienst, 1, pp. 1–28, Berlin (1940)
- [174] *Smit P.*: Datenerfassung und Bestimmung der Abminderung der Bodenbewegung bei Erdbeben in der Schweiz. ISBM 3-260-05402-2. Publikation No. 108, Schweizerischer Erdbebendienst, ETH Zürich. Juris Druck+Verlag AG, Dietikon 1996
- [175] *Stepken G.*: MySQL Datenbankhandbuch <<http://www.little-idiot.de/mysql>>
- [176] *Stepp, J. C.*: Analysis of completeness of the earthquake sample in the Pudget sound area and its effect on statistical estimates on earthquake hazard. Proceedings International Conference on Microzonation, 2, 897–910, 1972.
- [177] *Stromeyer D., Grünthal G. and R. Wahlström*: Chi-square regression for seismic strength parameter relations, and their uncertainties, with applications to an M_w based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe
- [178] *Studer, J. A. und M. G. Koller*: Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme; Springer Verlag, Oktober 1997
- [179] sigma Nr. 2/2000, Swiss Re <<http://www.swissre.com>>
- [180] *Sobol I.M.*: Die Monte-Carlo-Methode., Verlag H. Deutsch 1991.
- [181] *Tavakoli B. and D. Monterroso*: Monte Carlo seismic hazard maps for northern Central America, covering El Salvador and surrounding area, Special Paper 375: Natural Hazards in El Salvador: pp. 423–433. Uppsala University, Department of Earth Sciences, Seismology, Uppsala, Sweden
- [182] *Tento, A., Franceschina, L. und A. Marcellina*: Expected ground motion evaluation for italian sites. Proceedings of the 10th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), I, 489–494, Madrid 1992
- [183] Homepage des U.S. Geological Survey <<http://www.usgs.gov>>

- [184] USNRC, Identification and charakterisation of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion. U.S. Nuclear Regulatory Commission <<http://www.nrc.gov>>, Regulatory Guide 1.165, March 1997
- [185] *Vanmarcke E., Fenton G. A. and E. Heredia-Zavoni*: SIMQKE-II, Conditioned Earthquake Ground Motion Simulator, User's Manual, Version 2.1, Princeton University, Mar 19, 1999 <<http://nisee.berkeley.edu/software/simqke2/>>
- [186] *Veneziano D., Cornell C.A. and T. O'Hara*: Historical method of seismic hazard analysis, Elect. Power Res. Inst. Rep. NP-3438, Palo Alto., 1984
- [187] *Voronoi, G. M.*: Nouvelles applications des parametres continus a la théorie des formes quadratiques. premier M moire: Sur quelques propriétés des formes quadratiques positives parfaites. J. Reine Angew. Math. 133 (1907), 97–178.
- [188] *Wahlström R. and G. Grünthal*: Probabilistic Seismic Hazard Assessment (Horizontal PGA) for Fennoscandia Using the Logic Tree Approach for Regionalization and Nonregionalization Models, Seismological Research Letters, **72**, Number 1, 1/2 2001
- [189] *Watson-Lamprey J. A. and N. A. Abrahamson*: Use of minimum cav in seismic hazard analyses, Ninth Canadian Conference on Earthquake Engineering, Ottawa, Ontario, Canada, 26–29 June 2007
- [190] *Wegener A.*: Die Entstehung der Kontinente, Geologische Rundschau Band III, Heft 4, Verlag Engelmann W., Leipzig Juli 1912, S. 219–296
- [191] *Wells, D.L & Coppersmith, K.J.*: Empirical relations among magnitude, rupture length, rupture area, and surface displacement, Bulletin of the Seismological Society of America, **84**, pp. 974–1002. 1994
- [192] *Y. K. Wen, B. R. Ellingwood, D. Veneziano and Bracci J.*: Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering, MAE Center Project FD-2 Report, February 12, 2003, <<http://mae.ce.uiuc.edu/Research/Whitepaper.pdf>>
- [193] *Wenzel F.*: Reduzierung von Erdbebenschäden – eine Herausforderung f r Geo- und Ingenieurwissenschaften, Karlsruhe, DGG Mitteilungen 2002/2, <http://www.dgg.tu-berlin.de/dgg/mitteilungen/2000_2/reduzierung-von-Erdbebeschaeden.html>
- [194] *Wessel, P., Smith, W.H. et al.*: GMT Generic Mapping Tool <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>>
- [195] *Williams, T., Kelley C. et al.*: gnuplot - an interactive plotting program <<http://www.dartmouth.edu/rc/tools/docs/gnuplot.html>>
- [196] *Woo, G.*: Kernel estimation methods for seismic hazard area source modelling. Bulletin of the Seismological Society of America, **86**, pp. 1–10, 1996

- [197] *Woo, G.*: A Comparative Assessment of Zoneless Models of Seismic Hazard, 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering (USNCEE), Conference Proceedings, Seattle 1998, 12 pp.
- [198] *Wu, S.-C., Cornell, A. and S. R. Winterstein*: A hybrid recurrence model and its implication on seismic hazard results, *Bulletin of the Seismological Society of America* **85**, 1–16, 1995

Tabellenverzeichnis

2.1	Erdbeben-Kataloge, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt wurden	8
2.2	Intensitätsabhängige Vollständigkeitszeiträume von Erdbeben (n. <i>Grünthal</i> et al. [72])	17
3.1	Schematische Darstellung von Einteilungen eines Untersuchungsgebietes in seismische Quellen zur Durchführung von seismischen Gefährdungsanalysen	23
4.1	Simulationsbereiche und Verteilungen für die Parameter der verwendeten Abnahmebeziehung (4.13) nach [149]	50
5.1	Übersicht über die ausgewählten Untersuchungsgebiete für Parameteruntersuchungen	51
5.2	Charakteristik der Seismizität an den 6 Modellpunkten in Südwestdeutschland nach <i>Schwarz</i> et al. [166]	52
5.3	Schematische Darstellung des Einflusses von Parametern	69
6.1	Übersicht über die ausgewählten Modellpunkte für die im Folgenden vorgestellten vergleichenden Untersuchungen	71
6.2	Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für die Modellstandorte Südwestdeutschland	71
6.3	Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für den Modellstandort Bonn	75
6.4	Gegenüberstellung der wichtigsten Eingangsparameter für den Modellstandort Köln	79
7.1	Übersicht über die ausgewählten Untersuchungsgebiete für Anwendungsbeispiele	82
7.2	untersuchte Punkte im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht (NB), Angaben nach DIN 4149 (2005), R \Rightarrow Festgestein; S \Rightarrow tiefe Sedimentbecken; T \Rightarrow flache Sedimentbecken und Übergangszonen	83
7.3	Erwartete Standortintensität der Modellpunkte für verschiedene Eintrittsraten	94
7.4	Schädigungsstufen	103
A.1	Statistische Tests zur Überprüfung von Zufallszahlengeneratoren	157
A.2	Verwendete Software	193

Abbildungsverzeichnis

2.1	Erdbeben auf dem Gebiet von Deutschland und Umgebung, Ausschnitte aus den Erdbeben-Katalogen. Für die Darstellung wurde jeweils die Erdbebenstärke-Größe verwendet, für die die größte Zahl an Einträgen im jeweiligen Katalog vorlag. . .	7
2.2	Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1999 . .	10
2.3	Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1900 und 1930–1999	11
2.4	Erdbeben des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1930 und 1960–1999	11
2.5	Überblick über einige Einteilungen des Gebietes der Bundesrepublik in seismische Quellzonen, teils als Ausschnitt größerer Modelle	13
3.1	Deterministische Gefährdungsanalyse in Schritten nach <i>Reiter</i> [144]	21
3.2	Prinzip der probabilistischen Gefährdungsanalyse ohne Berücksichtigung des Modells der geographischen Einteilungen (zonengebunden, zonenfrei)	24
3.3	Probabilistische Gefährdungsanalyse auf Basis einer zonengebundenen Methode (nach <i>Cornell</i> [38], Grafik nach <i>Kramer</i> [102])	26
3.4	Vergleich zonenfrei vs. zonengebunden von <i>Crespo</i> und <i>Martí</i> , Abbildung entnommen aus [41]	29
4.1	Epizentrendichte-Raster-Modell des Oberrheingrabens mit einer Rasterweite von 0.1 Grad und die Zuordnung der Rasterelemente in Epizentrendichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach <i>Rosenhauer</i> und <i>Ahorner</i> (rote Linien)	32
4.2	Epizentrendichte-Raster-Modell des Oberrheingrabens mit einer Rasterweite von 0.2 Grad und die Zuordnung der Rasterelemente in Epizentrendichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach <i>Rosenhauer</i> und <i>Ahorner</i> (rote Linien)	33
4.3	Schema zur Erstellung eines Epizentrendichte-Modells	39
4.4	Schematische Darstellung der seismischen Gefährdungsanalyse mit dem Epizentrendichte-Modell	40

4.5	Schematische Darstellung eines Ausschnittes aus einem <i>Voronoi</i> -Diagramms auf Basis des BGR Erdbeben-Kataloges nach <i>Leydecker</i> [118]	40
4.6	Triangulierung der <i>Voronoi</i> -Regionen (Ausschnitt)	41
4.7	Triangulierung der <i>Voronoi</i> -Regionen (Ausschnitt)	42
4.8	<i>Voronoi</i> -Diagramm des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7]	43
4.9	<i>Voronoi</i> - Regionen des Oberrheingrabens und ihre Zuordnung zu den Epizentren-dichte-Klassen im Vergleich mit den Einteilungen in seismische Quellzonen nach <i>Rosenhauer</i> und <i>Ahorner</i> (rote Linien)	44
5.1	Modellpunkte in Südwestdeutschland im Kontext der historisch berichteten Erdbeben-Ereignisse des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7]	52
5.2	Einfluss des Modellradius (Flächeninhalt des Modells) auf die berechneten seismischen Gefährdungsfunktionen am Beispiel der Modellpunkte 1 und 6 in Südwestdeutschland auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7]	53
5.3	Anwachsen der Komplexität der Epizentren-dichte-Modelle in Abhängigkeit vom gewählten Modellradius am Beispiel eines Modells auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7]	54
5.4	Einfluss der angesetzten Gewichtungen auf Magnituden-Eintrittsraten für den Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner et al.</i> [9], Epizentren-dichte-Modell eingeteilt in 10 Epizentren-dichte-Klassen	56
5.5	Einfluss der angesetzten Gewichtungen der ausgewerteten Zeitintervalle auf Magnituden-Eintrittsraten mit <i>Gumbel</i> - Typ III - Verteilung für den Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner et al.</i> [9], seismische Quellzonen MRG1, MRG2, NRB1, NRB2 des <i>Ahorner/Rosenhauer</i> -Modell	57
5.6	Einfluss der angesetzten Gewichtungen auf Intensitäts-Eintrittsraten an den Modellpunkten nach 6.1, berechnet mit der Epizentren-dichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner et al.</i> [9]	58
5.7	Verteilung der Magnituden in den Epizentren-dichte-Klassen unter Verwendung des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7]	59
5.8	Verteilung der Magnituden in den Epizentren-dichte-Klassen unter Verwendung des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner et al.</i> [9]	60
5.9	Epizentren-dichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1999 .	61
5.10	Epizentren-dichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1900 und 1930–1999	62
5.11	Epizentren-dichte-Modell des Untersuchungsgebietes Südwestdeutschland (vgl. 6.1), basierend auf dem Erdbeben-Katalog nach <i>Ahorner</i> [7] für die Jahre 1021–1930 und 1960–1999	62

5.12 Einfluss der Zeiträume 1900–1930 und 1930–1960 auf die Intensitäts - Eintretensraten der Modellpunkte nach 6.1	63
5.13 Simulierte Herdunsicherheiten von ± 10 km und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischer Quellzonen von <i>Ahorner/Rosenhauer</i>	65
5.14 Simulierte Herdunsicherheiten von ± 20 km und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischen Quellzonen von <i>Ahorner/Rosenhauer</i>	65
5.15 Simulierte Herdunsicherheiten von ± 30 km und deren Auswirkungen auf das Epizentrendichte-Modell im Vergleich mit dem Modell seismischen Quellzonen von <i>Ahorner/Rosenhauer</i>	66
5.16 Einfluss von ± 10 , ± 20 und ± 30 km Herdunsicherheiten auf die seismischen Gefährdung, berechnet für die 6 Modellpunkte in Südwestdeutschland auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> [7]	67
5.17 Einfluss von Vor- und Nachbeben am Beispiel der 6 Modellpunkte in Südwestdeutschland, dargestellt sind mit der Epizentrendichte-Methode berechnete Gefährdungsfunktionen auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner et al.</i> [9] zum einen inkl. Vor- und Nachbeben und zum anderen ohne Vor- und Nachbeben	68
6.1 Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell <i>Ahorner / Rosenhauer</i> ; Erläuterung: rote Flächen \rightarrow hohe Epizentrendichte bis hellgrün \rightarrow geringe Epizentrendichte	72
6.2 Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell <i>Grünthal / Bosse</i> ; Erläuterung: rote Flächen \rightarrow hohe Epizentrendichte bis hellgrün \rightarrow geringe Epizentrendichte	72
6.3 Gewählte Modellpunkte und Epizentrendichte-Modell ohne nichttektonische Erdbeben-Ereignisse im Vergleich mit Modell <i>Leydecker / Aichele</i> ; Erläuterung: rote Flächen \rightarrow hohe Epizentrendichte bis hellgrün \rightarrow geringe Epizentrendichte	73
6.4 Gewählte Modellpunkte in Südwestdeutschland im Kontext der seismischen Quellzonen; grüne Linien: Modell <i>Grünthal et al.</i> ; Erläuterung: rote Linien \rightarrow Modell <i>Ahorner</i> und <i>Rosenhauer</i> ; blaue Linien \rightarrow Modell <i>Leydecker</i> und <i>Aichele</i>	73
6.5 Vergleich der Gefährdungskurven für die 6 Modellpunkte Südwestdeutschland, berechnet von <i>Rosenhauer</i> in [166] mit dem herkömmlichen PSSAEL - Modell und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des <i>Ahorner</i> - Erdbeben-Kataloges [7]	74
6.6 Ausschnitt des <i>Ahorner/Rosenhauer</i> -Modells seismischer Quellzonen. Dargestellt sind die Regionen MRG1, MRG2, NRB1 und NRB2 mit Darstellung der zur Berechnung mit PSSAEL notwendigen Triangularisierung	76
6.7 Ausschnitt des <i>Leydecker/Aichele</i> -Modells seismischer Quellzonen. Dargestellt sind die Regionen NB und MR mit Darstellung der zur Berechnung mit PSSAEL notwendigen Triangularisierung	76

6.8	Vergleich der seismischen Gefährdungskurven nach <i>Leydecker</i> et al. (Werte entnommen aus [115]) und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> et al. [9] für den Modellpunkt Bonn	77
6.9	Vergleich der seismischen Gefährdungskurven nach <i>Grünthal</i> et al. (Werte entnommen aus [84]) und der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> et al. [9] für den Modellpunkt Köln	78
6.10	Schematische Gegenüberstellung der Gefährdungskurven herkömmlicher Methoden mit denen der Epizentrendichte-Methode im Bereich relativ hoher Epizentrendichten (vgl. Tabelle 5.3)	78
7.1	untersuchte Punkte im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht (R \Rightarrow Festgestein; S \Rightarrow tiefe Sedimentbecken; T \Rightarrow flache Sedimentbecken und Übergangszonen); Grafik nach DIN 4149 [45]	83
7.2	Vergleich der Gefährdungskurven für die Modellpunkte NB 1–NB 6 im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> et al. [9]	85
7.3	Vergleich der Gefährdungskurven für die Modellpunkte NB 7–NB 11 im Untersuchungsgebiet Niederrheinische Bucht, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges nach <i>Ahorner</i> et al. [9]	86
7.4	Modellgebiet Afghanistan mit Ausschnitt des Erdbeben-Kataloges von <i>Ambraseys</i> und <i>Bilham</i> [14]	87
7.5	Epizentrendichte-Modell für Modellgebiet Afghanistan	87
7.6	Vergleich der Gefährdungskurven für die Standorte im Untersuchungsgebiet Afghanistan, berechnet mit der Epizentrendichte-Methode auf Basis des Erdbeben-Kataloges von <i>Ambraseys</i> und <i>Bilham</i> [14]	88
7.7	Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebiets Südwestdeutschland für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren	89
7.8	Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebiets Südwestdeutschland für eine Wiederkehrperiode von 1000 Jahren	90
7.9	Modellgebiet in Griechenland mit Erdbeben des Erdbeben-Kataloges von <i>Papazachos</i> , <i>Comninakis</i> , <i>Karakaisis</i> , <i>Karakostas</i> , <i>Papaioannou</i> , <i>Papazachos</i> und <i>Scordilis</i> [138]	91
7.10	Epizentrendichte-Modell für das untersuchte Modellgebiet in Griechenland	92
7.11	Ermittelte seismische Gefährdung des Modellgebietes in Griechenland für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren	93
7.12	Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens am Beispiel des Modellstandortes Südwestdeutschland 1 in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben	101
7.13	Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens am Beispiel des Modellstandortes Aegio in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben	101

7.14 Schematische Darstellung der Schädigung eines Rahmens in Abhängigkeit von der Eintretenswahrscheinlichkeit von Erdbeben am Beispiel des Modellstandortes Aegio	102
7.15 Gebäude in Izmit, Türkei	103
7.16 Gebäude in Izmit, schematische Übersicht Achsen	104
7.17 Gebäude in Izmit, schematische Darstellung Schnitt, schematische Übersichts- zungen und Riegel	104
7.18 Schematische Darstellung des Verlaufes der Schädigung am Beispiel des untersuch- ten Gebäudes in Izmit, Türkei; Legende nach Tabelle 7.4	105
7.19 Kapazitätskurve für Beispiel-Gebäude aus Izmit	105
7.20 Gebäude in Sultandagi, Türkei	106
7.21 Gebäude in Sultandagi, Türkei	106
7.22 Schematische Darstellung des Verlaufes der Schädigung während eines Erdbeben- Ereignisses am Beispiel des untersuchten Gebäudes in Sultandagi, Türkei; Legende nach Tabelle 7.4	107
7.23 Kapazitätskurve für Beispiel-Gebäude aus Sultandagi	107
A.1 Konstruktion des einfachsten <i>Voronoi</i> Diagramm für 2 Punkte	143
A.2 Konstruktion eines einfachen <i>Voronoi</i> Diagramms für 4 Punkte ohne geschlossene <i>Voronoi</i> Region (1-5) und Überprüfung des Diagrammes (6)	144
A.3 Konstruktion eines einfachen <i>Voronoi</i> Diagramms für 4 Punkte mit geschlossener <i>Voronoi</i> Region (1-4) und Überprüfung des Diagrammes (5)	145
A.4 Punkte der Ausgangssituation, eingeteilt in zwei Hälften	147
A.5 Schritt 1: linkes <i>Voronoi</i> - Diagramm für 3 Punkte (A, B, C)	147
A.6 Schritt 2: rechtes <i>Voronoi</i> - Diagramm für 3 Punkte (D, E, F)	147
A.7 Schritt 3: Finden konvexer Hüllen ($\triangle ABC, \triangle DEF$) und der Hilfslinien ($\overline{AE}, \overline{CF}$)	148
A.8 Schritt 4: Zusammenführen der <i>Voronoi</i> Diagramme aus 1 und 2	148
A.9 Schritt 5: Suchen des 1. Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{AE}) mit einem der <i>Voronoi</i> Diagramme	149
A.10 Schritt 6: Suchen des 1. Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{AD}) mit einem der <i>Voronoi</i> Diagramme	149
A.11 Schritt 7: Suchen des nächsten Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{BD})	150
A.12 Schritt 8: Suchen des nächsten Schnittpunktes mit Mittelsenkrechten auf Hilfslinie \overline{CF}	150
A.13 <i>Voronoi</i> Diagramm, nach dem Entfernen der überflüssigen Linien	151
A.14 Überprüfung des <i>Voronoi</i> Diagrammes durch Kreise	152
A.15 Berechnen der Abstände zwischen einem Epizentrum B und den Knotenpunkten	153
A.16 Bestimmen der Strecken der <i>Voronoi</i> Region	154
A.17 Bestimmen der Strecken der <i>Voronoi</i> Region	154
A.18 Ermittelte <i>Voronoi</i> Region (K_1, K_6, K_5, K_4)	155

A.19 Wahrscheinlichkeitsdichte- und Verteilungsfunktion von gleichverteilten Zufallszahlen 156

A.20 Verteilung von generierten Zufallszahlen vs. theoretische Gleichverteilung 159

A.21 Histogramm und Verteilungsfunktion der empirischen Verteilung 160

A.22 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 161

A.23 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 162

A.24 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 163

A.25 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 164

A.26 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 165

A.27 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ 166

A.28 Anteile der Epizentrendichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$ in Abhängigkeit von der Epizentrendichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) 167

A.29 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $10^{-3} [1/a]$ 168

A.30 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $10^{-3} [1/a]$ 169

A.31 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a] . . .	170
A.32 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a] . . .	171
A.33 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]	172
A.34 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]	173
A.35 Anteile der Epizentrendichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a] in Abhängigkeit von der Epizentrendichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) . . .	174
A.36 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]	175
A.37 Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]	176
A.38 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a] . . .	177
A.39 Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a] . . .	178
A.40 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach <i>Ahorner / Rosenhauer</i> und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]	179

A.41 Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a] 180

A.42 Anteile der Epizentrendichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a] in Abhängigkeit von der Epizentrendichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) . . . 181

A.43 Gefährdungskurven der Raster-Modelle mit 0,1; 0,2 und 0,3 Grad Rasterweite im Vergleich mit den Ergebnissen der Epizentrendichte-Methode am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) 182

A.44 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 183

A.45 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 184

A.46 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-4} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 185

A.47 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-4} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 186

A.48 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-5} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 187

A.49 Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-5} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner* 188

A.50 Spektren der Bodenbewegungen der 6 Modellstandorte in Südwestdeutschland für felsigen Untergrund und Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [1/a] und 10^{-4} [1/a], berechnet mit Abnahmebeziehung nach *Ambraseys* et al. [12] auf Basis der Epizentrendichte-Methode mit dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* et al. [9] . . . 189

A.51 Spektren nach DIN 4149 (2005) an den Modellstandorten der Niederrheinischen Bucht (vgl. Abschnitt 7.2)	190
A.52 Synthetische - Beschleunigungszeitverläufe an den 6 Modellstandorten in Südwest- deutschland für Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475 [1/a]$	191
A.53 Synthetische - Beschleunigungszeitverläufe an den 6 Modellstandorten in Südwest- deutschland für Erdbeben-Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von $10^{-4} [1/a]$	192

A

Anhang

A.1 Erdbeben-Kataloge für Deutschland und angrenzende Gebiete

A.1.1 *Ahorner*-Erdbeben-Katalog

Der Erdbeben-Katalog nach *Ahorner* besteht aus bisher unveröffentlichten Computerdateien, die dem Autor freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurden.

Das Merkmal des von *Ahorner* in langjähriger Tätigkeit permanent aktualisierten und am Maßstab geologisch-tektonischer Bedingungen verifizierten Erdbeben-Kataloges ist, dass die Erdbeben in einer einheitlichen Form durch Magnituden beschrieben werden. Diese Magnitudeneinträge sind die Voraussetzung, um in probabilistischen Gefährdungsanalysen aktuelle Modelle zur Beschreibung der seismischen Bodenbewegung Abnahmebeziehungen zur Anwendung bringen zu können.

Die vorliegende Variante des Erdbeben-Kataloges basiert auf M_L - Magnituden sowie EMS - Intensitäten und umfasst 4022 Erdbeben-Ereignisse für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und Umgebung. Dabei sind Erdbeben-Ereignisse aus dem Zeitraum von 1021 bis 1988 enthalten. Weiterführende Dokumentationen zu diesem Erdbeben-Katalog liegen nicht vor.

Etliche Beispiele dieser Arbeit basieren auf diesem Katalog. Er wurde ausgesucht, weil er das Gebiet der Bundesrepublik vollständig abdeckt, homogene Daten auf Magnitudenbasis auch für kleinere Erdbeben enthalten sind und Ergebnisse von Gefährdungsanalysen mit diesem Katalog vorliegen, die für einen Vergleich herangezogen werden können.

A.1.2 EKDAG Erdbeben-Katalog nach *Ahorner et al.*

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Magnitudenorientierten Erdbeben-Kataloges für Deutschland und angrenzende Gebiete (EKDAG) [9] waren verschiedene Erdbeben-Kataloge für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und angrenzende Länder verfügbar, da es für deutsche Erdbebengebiete im Gegensatz zu anderen Ländern, bei denen historische Erdbebendaten durch einen nationalen Erdbebendienst hoheitlich gepflegt, aktualisiert und somit auf dem aktuellen Stand gehalten werden, keine vergleichbare Institution, die für eine solche Aufgabe autorisiert und längerfristig mit den erforderlichen Kapazitäten ausgestattet wäre, gibt.

Aufgrund von ersichtlichen Diskrepanzen in Bezug auf relevante Parameter in den vorliegenden Katalogen wurde an der Bauhaus-Universität Weimar entschieden, die Arbeit an einem neuen überarbeiteten Katalog zu beginnen. Verschiedene Techniken für den Vergleich der bestehenden Kataloge und das Daten Management wurden von den Autoren erarbeitet und angewandt, um die Veröffentlichung dieses Kataloges zu ermöglichen.

Die Basis-Daten lieferte der von *Ahorner* entwickelte und über mehrere Dekaden von ihm betreute Katalog [7]. Die in letzter Zeit publizierten Reinterpretationen historischer Erdbeben-Ereignisse wurden bei der Erstellung des neuen Kataloges mit aufgenommen. Falsche Ereignisse und Inkonsistenzen zwischen Erdbeben-Katalog-Daten wurden identifiziert und mit den Original Quellen, soweit sie auffindbar waren, abgeglichen. Für eine große Zahl von relevanten Erdbeben-Ereignissen mit Intensitäten $I \geq 5.0$ wurden die referenzierten Quellen untersucht.

Dieser Erdbeben-Katalog wird aktuell vom Erdbebenzentrum der Bauhaus-Universität Weimar gepflegt.

A.1.3 EKDAG Erdbeben-Katalog nach *Ahorner et al.*

Zum Zeitpunkt der Erstellung des Magnitudenorientierten Erdbeben-Kataloges für Deutschland und angrenzende Gebiete (EKDAG) [9] waren verschiedene Erdbeben-Kataloge für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland und angrenzende Länder verfügbar, da es für deutsche Erdbebengebiete im Gegensatz zu anderen Ländern, bei denen historische Erdbeben Daten durch einen nationalen Erdbebendienst hoheitlich gepflegt, aktualisiert und somit auf dem aktuellen Stand gehalten werden, keine vergleichbare Institution, die für eine solche Aufgabe autorisiert und längerfristig mit den erforderlichen Kapazitäten ausgestattet wäre, gibt.

Aufgrund von ersichtlichen Diskrepanzen in Bezug auf relevante Parameter in den vorliegenden Katalogen wurde an der Bauhaus-Universität Weimar entschieden, die Arbeit an einem neuen überarbeiteten Katalog zu beginnen. Verschiedene Techniken für den Vergleich der bestehenden Kataloge und das Daten Management wurden von den Autoren erarbeitet und angewandt, um die Veröffentlichung dieses Kataloges zu ermöglichen.

Die Basis-Daten lieferte der von *Ahorner* entwickelte und über mehrere Dekaden von ihm betreute Katalog [7]. Die in letzter Zeit publizierten Reinterpretationen historischer Erdbeben-Ereignisse wurden bei der Erstellung des neuen Kataloges mit aufgenommen. Falsche Ereignisse und Inkonsistenzen zwischen Erdbeben-Katalog-Daten wurden identifiziert und mit den Original Quellen, soweit sie auffindbar waren, abgeglichen. Für eine große Zahl von relevanten Erdbeben-Ereignissen mit Intensitäten $I \geq 5.0$ wurden die referenzierten Quellen untersucht.

Dieser Erdbeben-Katalog wird aktuell vom Erdbebenzentrum der Bauhaus-Universität Weimar gepflegt.

A.1.4 BGR-Erdbeben-Katalog nach *Leydecker*

Von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) wurden in Zusammenarbeit mit nationalen und internationalen Seismologen Erdbeben-Kataloge historischer und neuzeitlicher

Erdbeben-Ereignisse erstellt. Auf ihrer Internetseite bietet die BGR einige dieser Erdbeben-Kataloge zum Download an [28]. Darunter befindet sich auch eine Version des Erdbeben-Kataloges der Bundesrepublik Deutschland mit Randgebieten ab dem Jahre 800 AD inklusive Erläuterungen [118]. Der BGR-Erdbeben-Katalog ist in seiner Zusammensetzung auf diverse Vorgängerkataloge zurückzuführen.

Für die Beispiele in dieser Arbeit wurde der Erdbeben-Katalog jedoch nicht mit einbezogen, da sich bei der Erstellung des Erdbeben-Kataloges auf die Epizentralintensitäten konzentriert wurde und für einen Großteil der Erdbeben keine Magnitudenwerte mit angegeben wurden.

A.1.5 ECOS-Erdbeben-Katalog

Der „Earthquake Catalogue of Switzerland“ (ECOS) [49] wurde vom Schweizerischen Erdbebedienst (SED) für das Gebiet der Schweiz und angrenzende Gebiete zusammengestellt. Die angebotene Version enthält alle Erdbeben mit einer Magnitude von $M_w \geq 2.5$, über die entweder makroseismische oder instrumentelle Daten vorliegen. Der Erdbeben-Katalog ist das Ergebnis einer Überarbeitung aller bisherigen Erdbeben-Kataloge der Schweiz. Die Arbeit am „Earthquake Catalogue of Switzerland“ wurde im Jahr 2002 abgeschlossen. Seitdem steht der ECOS-Erdbeben-Katalog im Internet zum Download bereit.

Im makroseismischen Untersuchungsteil wurden alle Erdbeben ab einer Intensität von V-VI in der Schweiz und ihrer Umgebung neu beurteilt. Intensitätspunkte für Orte außerhalb der Schweiz wurden aus allen verfügbaren Erdbeben-Katalogen importiert. Erdbeben mit einer Epizentralintensität von $I_0 < VI$ wurden ab dem Beginn instrumenteller Messungen 1878 systematisch, vorher nach Verfügbarkeit historischer Quellen mitbearbeitet.

Die seismologische Stärke aller Erdbeben mit einer hinreichenden Zahl von Intensitätsangaben wurde mit einem Regressionsverfahren bestimmt und die Quellparameter (Epizentrum, Tiefen des Hypozentrums, Epizentralintensität, Maximalintensität, makroseismische Magnitude) abgeleitet. Dazu wurden Seismogramme größerer Schweizer Erdbeben aus den wichtigsten europäischen Erdbeben-Observatorien seit Beginn des 20. Jahrhunderts analysiert und daraus eine Magnituden - Intensitäts - Kalibrierung abgeleitet. Zudem wurden die seit Ende der 70er Jahre vorhandenen digitalen Wellenformen dazu verwendet, um die M_L -Skala des SED neu zu kalibrieren und um Regressionsgleichungen für verschiedene Magnitudenskalen zu erstellen. Der ECOS-Erdbeben-Katalog liefert daher nun eine inhaltlich vergleichbare Magnitudenschätzung für alle Erdbeben-Ereignisse. Da die Daten nur das Gebiet der Schweiz und angrenzende Regionen abdecken, kann der Katalog nur für die südlichen Teile der Bundesrepublik Deutschland verwendet werden. [49]

A.1.6 GFZ-Erdbeben-Katalog nach *Grünthal* und *Wahlström*

Vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) wird ein auf M_w - Magnituden basierender Erdbeben-Katalog nach *Grünthal* und *Wahlström* für Zentral-, Nord- und Nordwesteuropa im Internet zum Download angeboten [83].

Er basiert auf einer Zusammenstellung und Neubearbeitung von Erdbebendaten aus 25 lokalen

Erdbebenkatalogen und 30 speziellen Untersuchungen. Für die Einordnung der verschiedenen Erdbebenstärke Parameter sei auf den Beitrag [177] verwiesen. Der Erdbeben-Katalog umfasst den Zeitraum von 1300 bis 1993 und Erdbeben-Ereignisse mit Magnituden von $M_w \geq 3,5$. Den Erdbeben Datensätzen des Kataloges wurden M_w -Magnituden zugewiesen, die teils mit Korrelationsbeziehungen aus anderen Magnitudenskalen und teils aus makroseismischen Aufzeichnungen gewonnen wurden.

A.2 Verwendete Algorithmen

A.2.1 Voronoï-Diagramme

A.2.1.1 Postamtproblem

Die *Voronoï* - Diagramme gehen aus Überlegungen der Geometrie hervor, benannt nach *Voronoï*, der sie in einem Beitrag aus dem Jahre 1907 [187] vorgestellt hat. Das Konzept der Diagramme wurde jedoch schon im Jahre 1850 von *Dirichlet* [46] betrachtet (*Dirichlet* - Tesselation). Mittlerweile sind die *Voronoï* - Diagramme zu einer bedeutenden Datenstruktur der Algorithmischen Geometrie gereift.

Motiviert wurde die Einführung der *Voronoï* - Diagramme durch das sogenannte Postamtproblem (*post - office problem*). Bei diesem Problem ist eine Menge von Postämtern in der Ebene gegeben und eine Menge von Anfragen zu beantworten. Jede Anfrage soll für einen beliebigen Haushalt in der Ebene das nächstgelegene Postamt ermitteln. Ist die Zahl der Anfragen ausreichend groß, lohnt es sich, ein *Voronoï* - Diagramm zu konstruieren und zu verwenden.

Der Gedanke des *Voronoï* - Diagramms wird heute in einer Vielzahl von Bereichen angewandt, in denen entsprechende Daten zur Untersuchung vorliegen.

Definition für *Voronoï* - Diagramme :

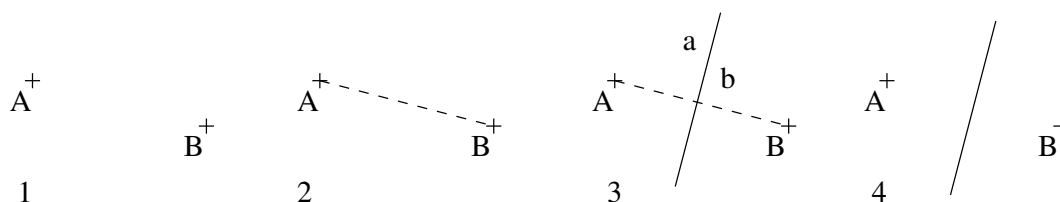
Sei eine Menge S von n Punkten $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ mit $n \geq 2$ in einer Ebene X . Die Punkte von S werden Orte genannt. Das *Voronoï* - Diagramm $V(S)$ von S ist die Zerlegung der Ebene X in Regionen $(R_p)_{p \in S}$ für jeden Ort. Die Region R_p enthält genau diejenigen Punkte, welche näher an p liegen als an irgend einem anderen Ort $q \in S$.

Zur Definition von $V(S)$ muss festgelegt werden, welche Objekte betrachtet werden und was mit denjenigen Punkten geschehen soll, die mehr als einen nächsten Nachbar in S haben.

In der Ebene bildet folglich die Mittelsenkrechte bezüglich der durch zwei Punkte $p_1, p_2 \in S$ definierten Strecke das einfachste nicht triviale *Voronoï* - Diagramm (vgl. Abbildung A.1).

In dem in dieser Arbeit beschriebenen Einsatzfall sind die Orte die Epizentren der historisch berichteten Erdbeben-Ereignisse.

Weiterführende Erläuterungen zum Themenkomplex der Nachbarschaftsanalysen von Punkten auf Grundlage der *Voronoï* - Diagramme sind z.B. in den Beiträgen von *Aurenhammer* [18], *Aurenhammer* und *Klein* [19] sowie in [52], [64], [101] und [130] enthalten.

Abb. A.1: Konstruktion des einfachsten *Voronoi* Diagramm für 2 Punkte

A.2.1.2 Konstruktion einfacher *Voronoi* - Diagramme

Die Abbildungen A.1, A.2 und A.3 zeigen die Vorgehensweise bei der Konstruktion von einfachen *Voronoi* - Diagrammen in einer Ebene.

Dabei zeigt die Abbildung A.1 die Konstruktion des einfachst möglichen nicht trivialen *Voronoi* - Diagramms in vier Schritten. Als Eingangsparameter sind zwei Punkte (A, B) in einer Ebene erforderlich. Das einfachst mögliche nicht triviale *Voronoi* - Diagramm besteht nur aus den Punkten A und B und der Mittelsenkrechten der Strecke \overline{AB} . Die Mittelsenkrechte teilt die Ebene dabei in die zwei Teilebenen a und b . Alle Punkte, die in der Teilebene a bzw. b liegen, sind näher an dem Punkt A bzw. B . In den Abbildungen A.2 und A.3 wird die Konstruktion von *Voronoi* Diagrammen für jeweils vier Punkte dargestellt. Dabei ist in Abbildung A.3 die Konstruktion eines *Voronoi* Diagrammes mit geschlossener *Voronoi* Region dargestellt. Die gestrichelten Hilfslinien zeigen die *Delaunay* - Triangulierung der verwendeten Ausgangspunkte.

In der jeweils letzten Teilabbildung wird die Überprüfung der *Voronoi* - Diagramme mit Hilfe von Kreisen dargestellt. Kreismittelpunkt ist jeweils ein *Voronoi* - Knoten. Ist die Konstruktion der *Voronoi* - Diagramme ordnungsgemäß erfolgt, liegen die Ausgangspunkte der jeweiligen *Voronoi* - Regionen auf dem Kreisbogen.

A.2.1.3 Konstruktion komplexer *Voronoi* - Diagramme

Da die Verwendung von Erdbeben-Katalogen mit mehreren tausend Epizentren die Konstruktion von *Voronoi* Diagrammen sehr schnell zu einer komplexen Aufgabe werden lässt, ist ein effizienter Lösungsansatz erforderlich.

Zur Verfügung standen die inkrementelle Methode, beschrieben von *Cuibas* und *Stolfi* [43], und der von *Shamos* und *Hoey* [168] entwickelte „divide and conquer“ Algorithmus. Aufgrund der Geschwindigkeitsvorteile und des im C Quellcode zur Verfügung stehenden Programmes TRIANGLE von *Shewchuk* [167] fiel die Wahl auf den „divide and conquer“ Algorithmus nach *Shamos* und *Hoey*.

Shamos und *Hoey* haben das *Voronoi* - Diagramm einer endlichen Menge von Punkten in der Ebene betrachtet und einen „divide and conquer“ Algorithmus entwickelt, mit dem das *Voronoi* - Diagramm in der optimalen Zeit $O(n \log(n))$ berechnet werden kann. Diese Entdeckung hat Lösungsmöglichkeiten für viele geometrischen Probleme geliefert.

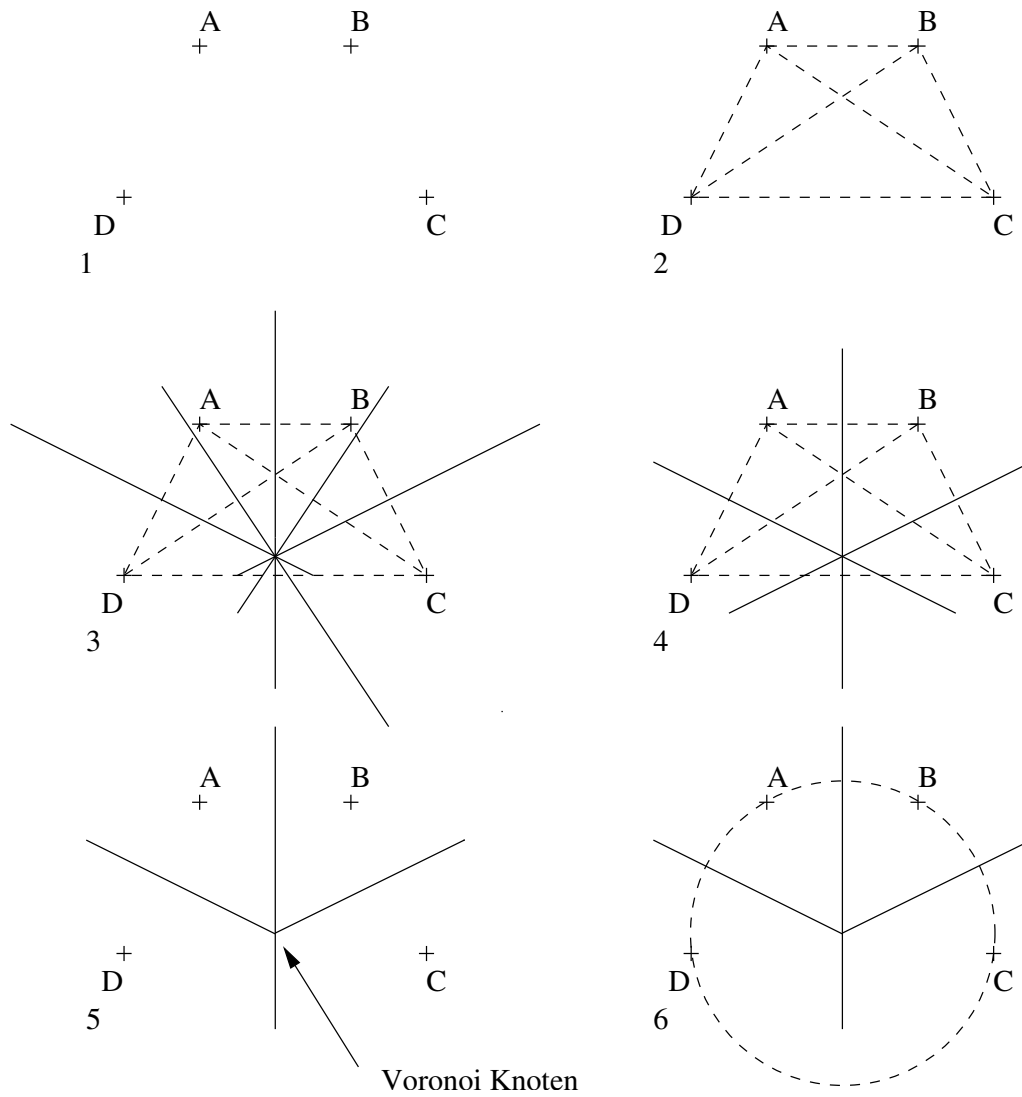


Abb. A.2: Konstruktion eines einfachen *Voronoi* Diagramms für 4 Punkte ohne geschlossene *Voronoi* Region (1-5) und Überprüfung des Diagrammes (6)

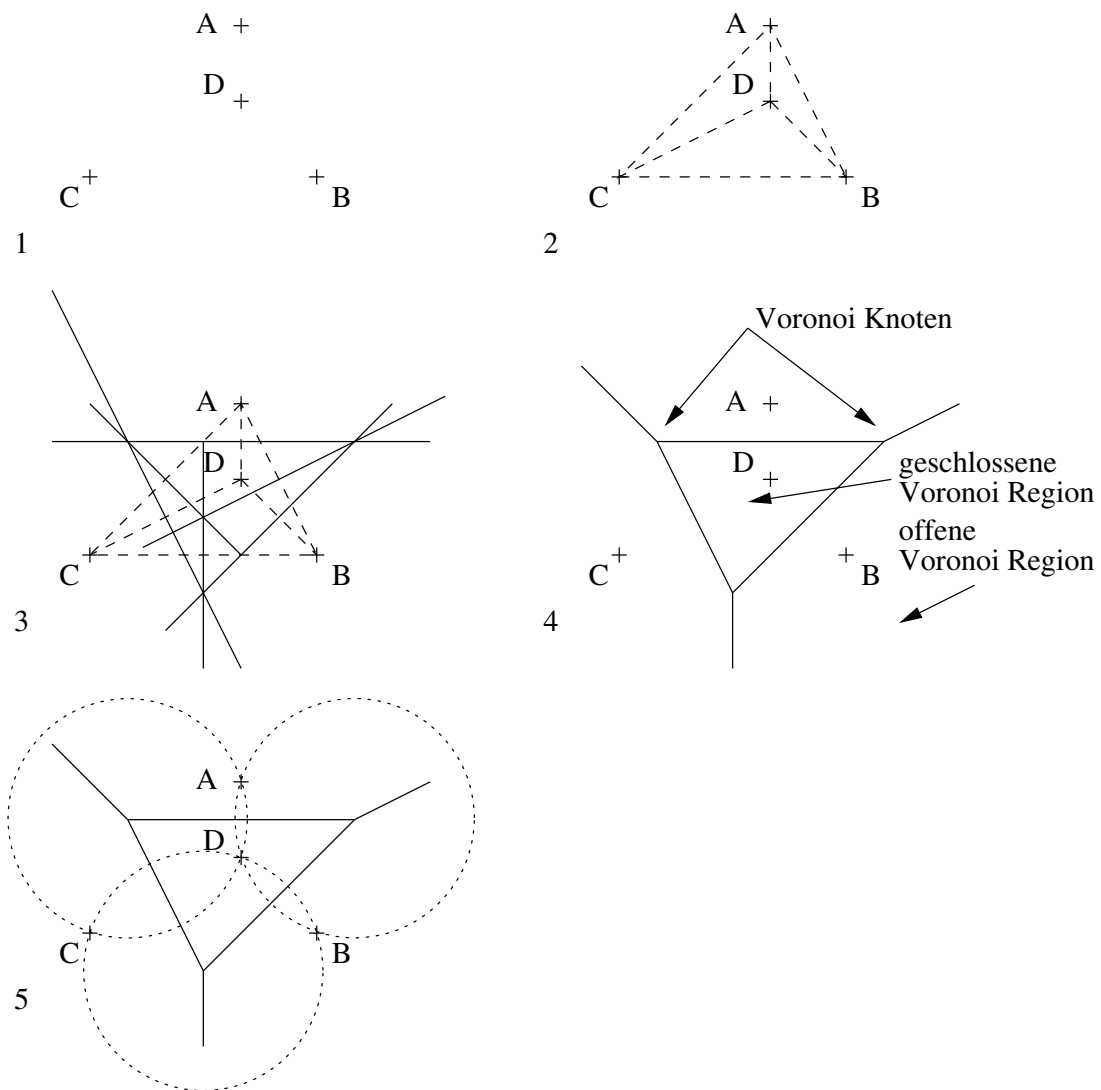


Abb. A.3: Konstruktion eines einfachen *Voronoi* Diagramms für 4 Punkte mit geschlossener *Voronoi* Region (1-4) und Überprüfung des Diagrammes (5)

Teilen und Herrschen ist eine der üblichen Herangehensweisen zur Lösung von komplexen Problemen. Der „divide and conquer“ Algorithmus basiert auf einer Teilung des Gesamtproblems in kleinere und somit leichter lösbare Teilprobleme. Nach der Lösung der Teilprobleme werden die Teillösungen zur Gesamtlösung zusammengesetzt.

Die Abbildungen A.4 bis A.14 zeigen an einem einfachen Beispiel eines *Voronoi* Diagrammes mit sechs Ausgangspunkten beispielhaft den Ablauf des verwendeten „divide and conquer“ Algorithmus:

- Teilen der Punkte in eine rechte (A, B, C) und linke (D, E, F) Hälfte (Abbildung A.4)
- Konstruktion der einfacheren *Voronoi* Diagramme für jede Hälfte (Abbildungen A.5 und A.6)
- Finden der konvexen Hüllen und damit der Hilfslinien ($\overline{AE}, \overline{CF}$ obere und untere Verbindungslinie zwischen rechten und linkem Teil) für das Zusammenfügen (Abbildung A.6)
- Zusammenfügen der Hälften an der Stelle an der vorher die Punkte getrennt wurden (Abbildung A.6)
- Einzeichnen der Mittelsenkrechten auf der Hilfslinie \overline{AE} , suche des ersten Schnittpunktes der Mittelsenkrechten mit einem Strahl der *Voronoi* Diagramme. (Abbildung A.9)
- Einzeichnen weiterer Mittelsenkrechten auf den Hilfslinien ($\overline{AD}, \overline{BD}$ und \overline{CF}) zwischen den rechten und linken Punkten. Finden weiterer Schnittpunkte. Den Abschluss bildet dabei der letzte Schnittpunkt mit der Mittelsenkrechten der unteren Hilfslinie \overline{CF} (Abbildungen A.10, A.11 und A.12)
- An den gefundenen Schnittpunkten der Mittelsenkrechten mit den Strahlen des rechten bzw. linken *Voronoi* Diagramm kürzen und alle Hilfslinien entfernen (A.13).
- Überprüfung des fertigen *Voronoi* Diagrammes mit Kreisen. Dabei liegen die Kreismittelpunkte jeweils in den *Voronoi* Knoten und die Ausgangspunkte der angrenzenden *Voronoi* Region liegen auf den Kreisbögen (Abbildung A.14).

A.2.1.4 Berechnung der *Voronoi* - Diagramme

Zur Berechnung der *Voronoi* - Diagramme wurde das Programm TRIANGLE in der Version 1.3 benutzt. Das Programm beinhaltet einen zweidimensionalen Netz-Generator nach *Delaunay* und wurde 1996 von *Shewchuk* an der School of Computer Science / Carnegie Mellon University geschrieben.

Den Quellcode des C Programms TRIANGLE kann von [167] bezogen werden. In dem Programm wird der von *Shamos* und *Hoey* [168] entwickelte „divide-and-conquer“ Algorithmus benutzt. Dieses Programm TRIANGLE wurde für diese Arbeit ausgewählt, weil es schnell und zuverlässig auf mehreren Computerarchitekturen arbeitet und als Quellcode vorliegt, so dass die Möglichkeit

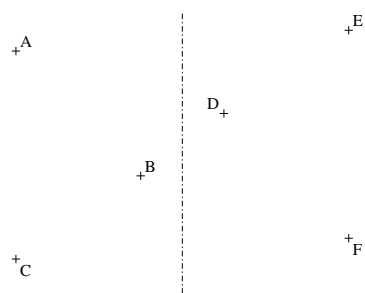
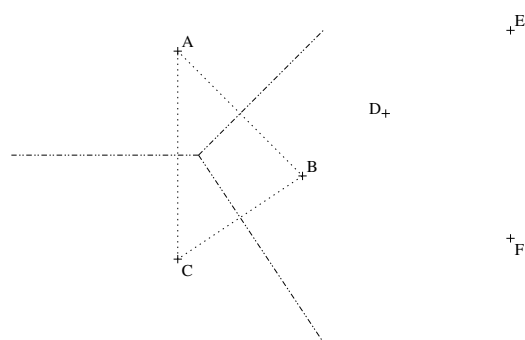
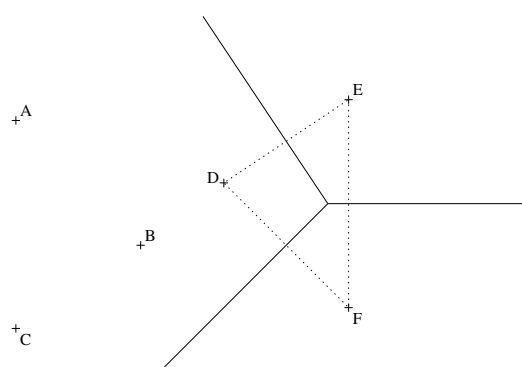


Abb. A.4: Punkte der Ausgangssituation, eingeteilt in zwei Hälften

Abb. A.5: Schritt 1: linkes *Voronoi* - Diagramm für 3 Punkte (A, B, C)Abb. A.6: Schritt 2: rechtes *Voronoi* - Diagramm für 3 Punkte (D, E, F)

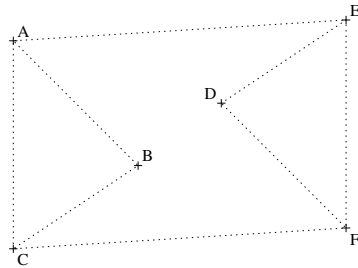


Abb. A.7: Schritt 3: Finden konvexer Hüllen ($\triangle ABC, \triangle DEF$) und der Hilfslinien ($\overline{AE}, \overline{CF}$)

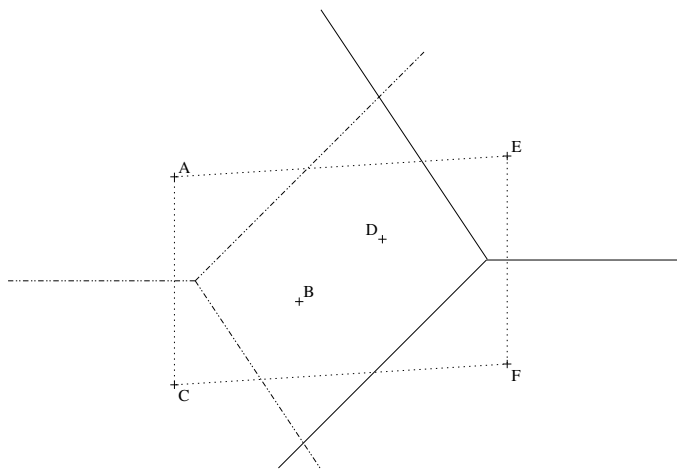


Abb. A.8: Schritt 4: Zusammenführen der *Voronoi* Diagramme aus 1 und 2

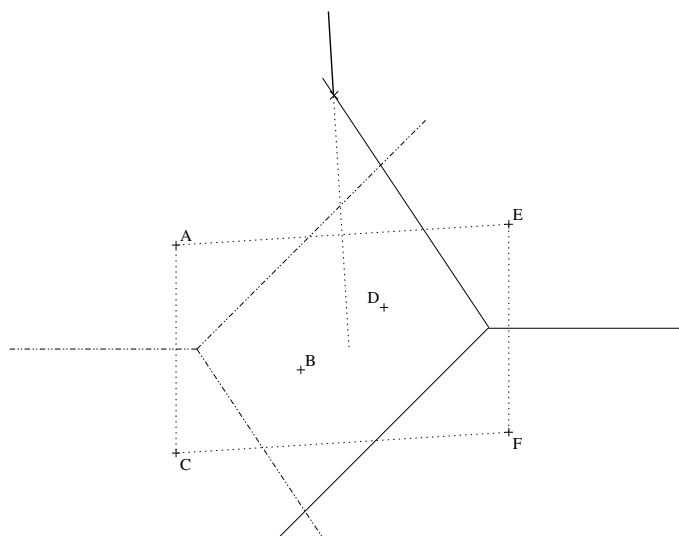


Abb. A.9: Schritt 5: Suchen des 1. Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{AE}) mit einem der *Voronoi* Diagramme

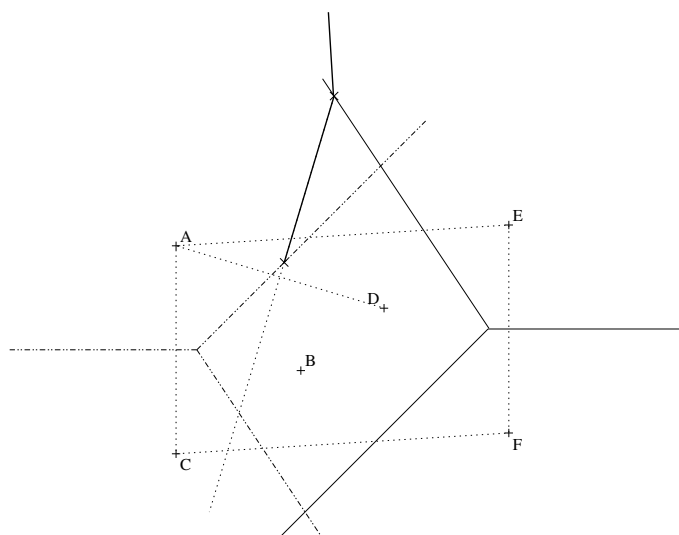


Abb. A.10: Schritt 6: Suchen des 1. Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{AD}) mit einem der *Voronoi* Diagramme

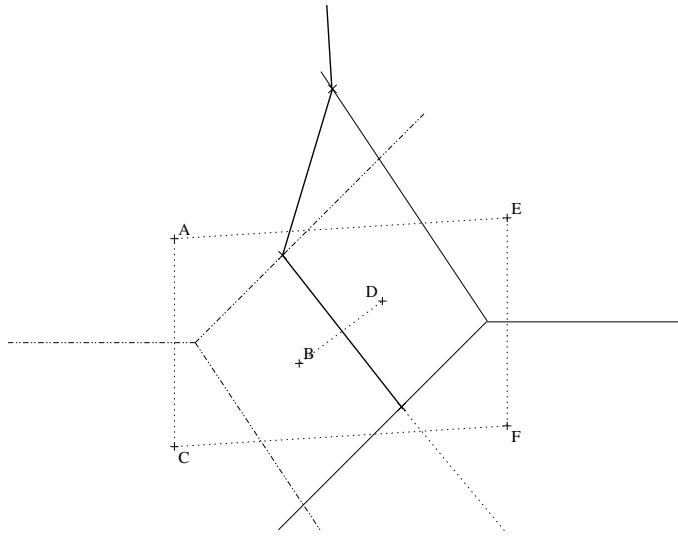


Abb. A.11: Schritt 7: Suchen des nächsten Schnittpunktes der Mittelsenkrechten (der Hilfslinie \overline{BD})

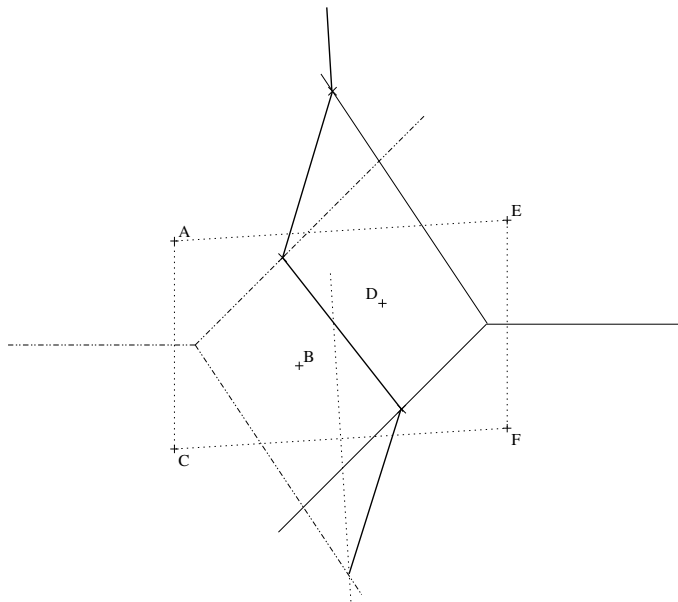


Abb. A.12: Schritt 8: Suchen des nächsten Schnittpunktes mit Mittelsenkrechten auf Hilfslinie \overline{CF}

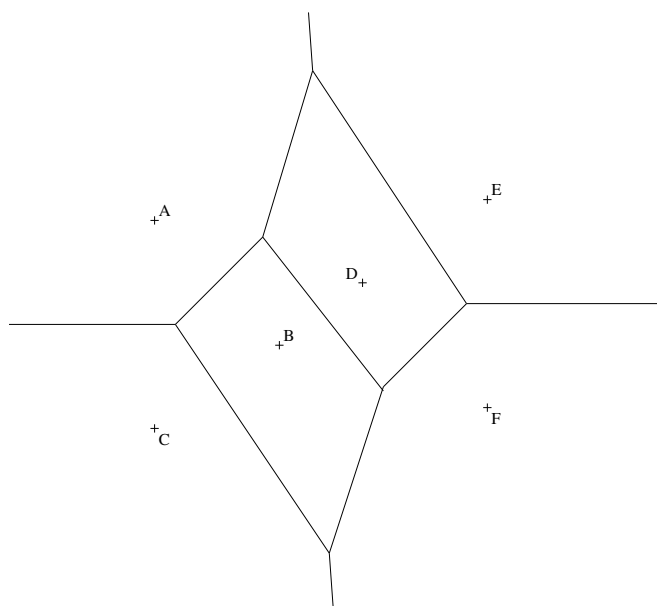


Abb. A.13: *Voronoi* Diagramm, nach dem Entfernen der überflüssigen Linien

besteht, eventuell Anpassungen vorzunehmen, was sich im weiteren Verlauf der Bearbeitung der Thematik jedoch als nicht erforderlich zeigte.

Die ermittelten *Voronoi* - Diagramme können mit dem Programm SHOWME, welches ebenfalls von *Shewchuk* geschrieben wurde, betrachtet werden [167].

TRIANGLE erzeugt exakte, gezwungene und qualitätskonforme *Delaunay* - Triangulierungen. Die gezwungenen und qualitätskonformen *Delaunay* - Triangulierungen werden hier nicht verwendet, da sie zusätzliche *Steiner*-Punkte (Postämter bzw. Epizentren) generieren würden. *Steiner*-Punkte sind Punkte, die erzeugt werden, um einen minimalen Winkel und eine maximale Fläche der bei der Triangulierung entstehenden Dreiecke zu vermeiden bzw. die Längen des entstehenden Netzes zu minimieren. Sie dienen somit der Verfeinerung des Netzes, wie es bei der Finite Element Methode benötigt wird. Diese Netzverfeinerungen sind im Programm TRIANGLE enthalten, da es ursprünglich zur Netzgenerierung für die Finite Elemente Methode entwickelt wurde. Die in dieser Arbeit verwendete exakte *Delaunay*-Triangulierung erzeugt jedoch keine neuen *Steiner*-Punkte, so dass daraus exakte *Voronoi* - Diagramme erzeugt werden können. Die exakten *Voronoi* - Diagramme sind die Basis für die in späteren Abschnitten beschriebenen Epizentrendichten.

A.2.1.5 Ermittlung der *Voronoi* - Regionen

Voronoi - Regionen, auch als *Voronoi* - Zellen bezeichnet, sind die Gebiete eines *Voronoi* - Diagrammes, in denen sich jeweils ein Ausgangspunkt (Postamt bzw. Epizentrum) befindet, alle anderen Punkte der *Voronoi* - Regionen liegen näher an diesem Ausgangspunkt als an einem der anderen Ausgangspunkte.

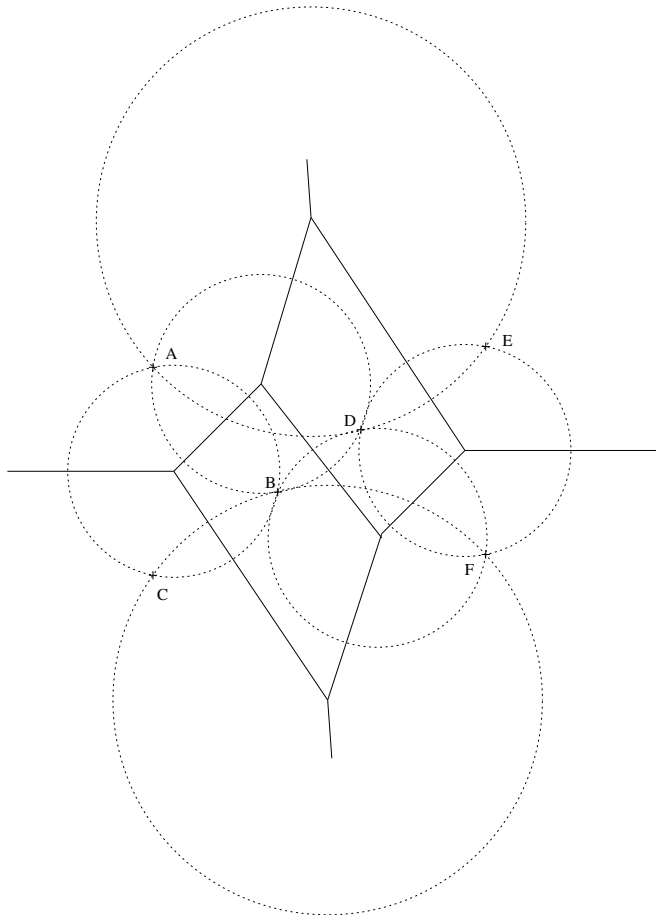


Abb. A.14: Überprüfung des *Voronoi* Diagrammes durch Kreise

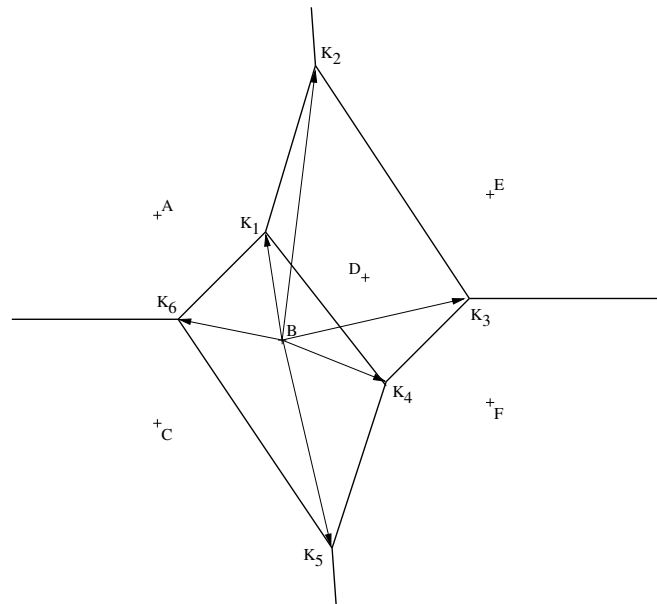


Abb. A.15: Berechnen der Abstände zwischen einem Epizentrum B und den Knotenpunkten

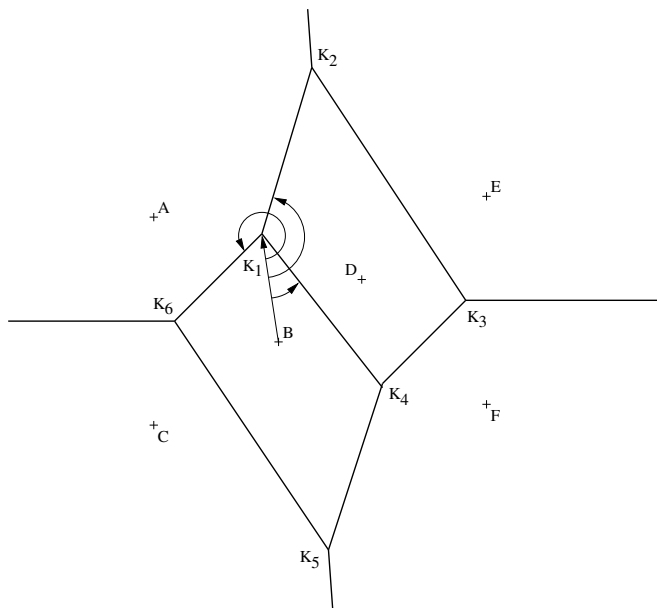
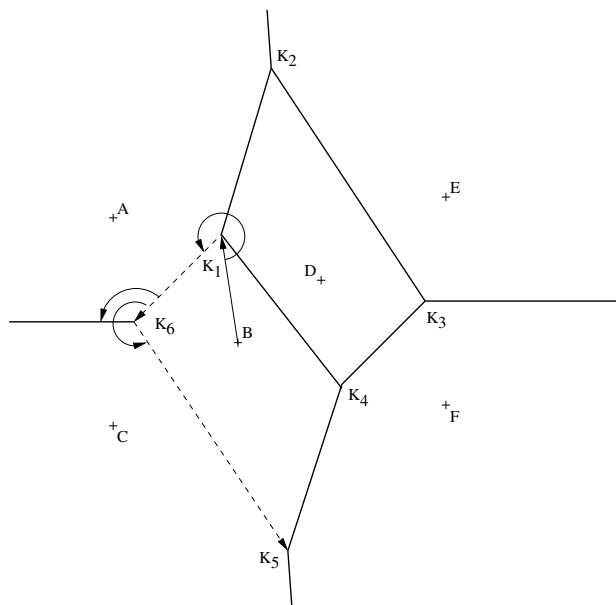
Das Ergebnis der in A.2.1.3 beschriebenen “divide and conquer“ Methode ist ein *Voronoi* - Diagramm, bestehend aus einer Menge von Punkten, Strahlen und Strecken. Die Punkte sind die Orte, an denen Epizentren in den verwendeten Erdbeben-Katalogen verzeichnet sind. Die Strahlen gehen vom Rand der *Voronoi* - Diagramme aus, sie gehören zu den offenen *Voronoi* - Regionen. Offene *Voronoi* - Regionen sind an den Rändern der Gebiete zu finden, die durch die ErdbebenKataloge abgedeckt werden.

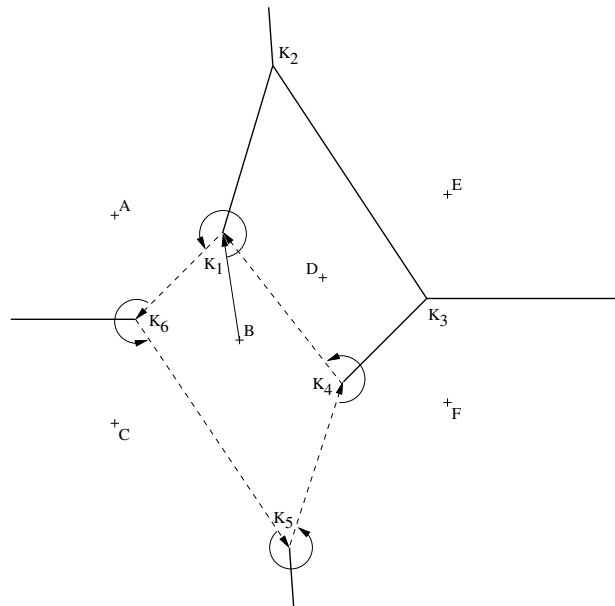
Da eine Bestimmung der Epizentrendichte im Bereich der Ränder der Erdbeben-Kataloge nicht sinnvoll ist, beschränkt sich die Bestimmung der Epizentrendichte auf die geschlossenen *Voronoi* - Regionen (vgl. Abbildung A.3).

Um die Epizentrendichte im Bereich der geschlossenen *Voronoi* - Regionen bestimmen zu können, sind eine Ermittlung der einzelnen *Voronoi* - Regionen und eine anschließende Flächenberechnung der gefundenen *Voronoi* - Regionen notwendig.

Für die Ermittlung der *Voronoi* - Regionen ist das Finden der kleinsten konvexen Polygone um die Ausgangspunkte (Epizentren) des *Voronoi* Diagrammes aus der Menge aller Strecken des *Voronoi* Diagrammes notwendig. Mit Hilfe der Hinweise von *Rücker* wurde für diesen Zweck das C++ Programm FINDPOLY geschrieben. Es hat die Aufgabe, für jeweils ein Epizentrum die umgebende *Voronoi* - Region aus der Menge der Strecken des *Voronoi* - Diagramms zu finden.

Im Folgenden ist der Ablauf der Ermittlung einer *Voronoi* Regionen am Beispiel des in A.2.1.3 konstruierten *Voronoi* - Diagramms beschrieben und in den Abbildungen A.15 - A.18 dargestellt. Ermittelt wird in diesem Beispiel die *Voronoi* Regionen um den Punkt B aus Abbildung A.15.

Abb. A.16: Bestimmen der Strecken der *Voronoi* RegionAbb. A.17: Bestimmen der Strecken der *Voronoi* Region

Abb. A.18: Ermittelte *Voronoi* Region (K_1, K_6, K_5, K_4)

1. Berechnung aller Abstände zwischen einem Epizentrum B und allen Knotenpunkten K_1, K_2, \dots, K_n des *Voronoi* Diagrammes (Abbildung A.15)
2. Suche des Knotenpunktes K_i mit dem kürzesten Abstand zum Epizentrum (Punkt B). Sollten zwei Knotenpunkte den gleichen Abstand zum Epizentrum haben, wird ein Knotenpunkt frei ausgewählt. In diesem Beispiel wurde K_1 gewählt.
3. Suche aller Strecken und Strahlen, die vom Knotenpunkt K_1 ausgehen.
4. Bestimmen aller Winkel zwischen der Strecke $\overline{BK_1}$ und den Strecken $\overline{K_1K_2}$, $\overline{K_1K_6}$ und $\overline{K_1K_4}$ (Abbildung A.16)
5. Auswahl der Strecke $\overline{K_1K_6}$, die den größten Winkel mit Strecke $\overline{BK_1}$ bildet.
6. Suche aller Strecken und Strahlen, die vom Knotenpunkt K_6 ausgehen.
7. Bestimmen der Winkel zwischen der Strecke $\overline{K_1K_6}$ und der Strecke $\overline{K_6K_5}$ bzw. dem Strahl von K_6 (Abbildung A.17)
8. Auswahl der Strecke $\overline{K_6K_5}$, die den größten Winkel mit Strecke $\overline{K_1K_6}$ bildet.
9. Überprüfen, ob der Endknotenpunkt der Strecke ($\overline{K_6K_5}$) mit dem Ausgangsknotenpunkt K_1 übereinstimmt. Wenn nicht, analog 6. weitere Strecken finden, wenn ja, wurde die *Voronoi* Regionen um den Punkt B gefunden und die nächste *Voronoi* Regionen kann gesucht werden.

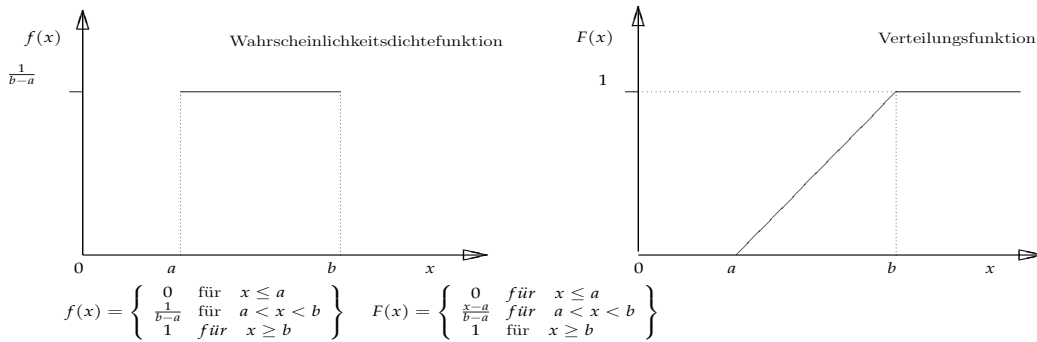


Abb. A.19: Wahrscheinlichkeitsdichte- und Verteilungsfunktion von gleichverteilten Zufallszahlen

Nach Abschluss der Ermittlung aller *Voronoi* Regionen kann über den Flächeninhalt der *Voronoi* Regionen die Epizentrenichte ermittelt werden. Je kleiner der Flächeninhalt der *Voronoi* Regionen, umso größer die Epizentrenichte.

A.2.2 Simulation und Zufallszahlen

A.2.2.1 Überprüfung von Zufallszahlengeneratoren

Die Abbildung A.19 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte- und die Verteilungsfunktionen von gleichverteilten Zufallszahlen, welche als Eingangsgröße für inverse Transformationen hin zu beliebigen statistischen Verteilungen von Zufallszahlen benutzt werden.

Um möglichst gute Simulationsergebnisse zu erhalten, sollte der verwendete Zufallszahlengenerator auf stochastische Unabhängigkeit und Gleichverteilung der Zufallszahlen überprüft werden.

Bei der Erstellung von Software, die auf Zufallszahlen angewiesen ist, wird oft auf die im verwendeten Compiler implementierten Algorithmen zur Zufallszahlenerzeugung zurückgegriffen. Die Zufallszahlen, welche auf implementierten Algorithmen basieren, werden auch als Pseudo-Zufallszahlen bezeichnet, da sie nicht das Ergebnis stochastischer Prozesse sind. Wichtig ist dabei, dass die mit Hilfe von Algorithmen berechneten Zufallszahlenreihen Eigenschaften aufweisen, die es gestatten, Zufallsgrößen nachzubilden. Das heißt, dass die Zufallszahlen in statistischer Hinsicht annähernd gleiche Eigenschaften wie die nachzuahmende reale Zufallsgröße aufweisen sollen.

Der Fortran Quellcode und die Programmdokumentation des Programms PSSAEL [149] wurden freundlicherweise von *Rosenhauer* zur Verfügung gestellt. Nach der Auswahl eines geeigneten Fortran Compilers (GNU Fortran 77 Compiler [63]) war es möglich, dessen Zufallszahlengenerator auf Eignung zu überprüfen. Ziel dieser Untersuchungen war es, eine Gleichverteilung und eine Unabhängigkeit der Zufallszahlen sicherstellen bzw. zu überprüfen.

Die Testverfahren für Zufallszahlengeneratoren lassen sich in empirische und theoretische Verfahren unterteilen. Bei den theoretischen Testverfahren werden, aus den zur Generierung der Zufallszahlen verwendeten Algorithmen, Schlussfolgerungen auf die Eigenschaften der Zufallszahlenfolgen gezogen.

Tab. A.1: Statistische Tests zur Überprüfung von Zufallszahlengeneratoren

	Gleichverteilung	Unabhängigkeit
Kolmogorow-Smirnow-Test	⊕	⊖
Chi-Quadrat-Test	⊕	⊖
RUN Tests	⊖	⊕

Die Idee hinter den empirischen Tests ist, dass die von dem Zufallszahlengenerator erzeugten Zufallszahlen in Stichproben statistischen Tests unterzogen werden.

Da die Quellcodes des Fortran Compiler vorlagen, lagen Informationen über das theoretische Verfahren zur Zufallszahlengenerierung vor. Aus Zeitgründen wurde jedoch den empirischen Testverfahren (vgl. Tabelle A.1) der Vorzug bei der Überprüfung der Zufallszahlen gegeben.

Es wird bei den empirischen Verteilungstests der Vergleich zwischen einer Grundgesamtheit mit einer unbekanntem Verteilungsfunktion $F(x)$ und einer bekannte Verteilungsfunktion $F_{(0)}(x)$ gemacht.

Die Aufgabe eines Verteilungstests besteht dann darin zu prüfen, ob die Verteilungsfunktion $F(x)$ aus einer Stichprobe von Zufallszahlen (Z_1, Z_2, \dots, Z_n) mit der hypothetischen Verteilungsfunktion $F_{(0)}(x)$ vereinbar ist. Die hypothetische Verteilungsfunktion ist in diesem Fall eine Gleichverteilung. Es ist das Ziel der empirischen Verteilungstests, eine Entscheidung über die Ablehnung oder Beibehaltung der aufgestellten Nullhypothese (A.1) zu ermöglichen.

$$H_0 : F(x) \approx F_{(0)}(x) \quad (\text{A.1})$$

Test der Zufallszahlen auf Gleichverteilung mit χ^2 Die Nullhypothese wird mit dem χ^2 Test wie nachfolgend beschrieben überprüft:

1. Unterteilung der Stichprobenwerte der Zufallszahlen in k Klassen (I_1, I_2, \dots, I_k) . Jede der Klassen I_i sollte mindestens 5 Werte der Stichprobe enthalten.
2. Ermittlung der Besetzungszahlen (Anzahl der Zufallszahlen pro Klasse) (n_1, n_2, \dots, n_k) der Klassen wobei $n = \sum_{i=1}^k n_i$.
3. Für jede der Klassen I_i wird unter Verwendung der als richtig angenommenen Verteilungsfunktion (in unserem Fall eine Gleichverteilung) $F_{(0)}(x)$ zunächst die Wahrscheinlichkeit p_i und daraus die Anzahl $n_i^* = n * p_i$ der theoretisch zu erwartenden Stichprobenwerte je Klasse I_i berechnet.
4. Der Prüfwert χ^2 ist dann:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n_i^*)^2}{n_i^*} \quad (\text{A.2})$$

5. Mit einer gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit α wird die kritische Grenze c nach Bedingung (A.3) bestimmt.

$$P(\chi^2 < c)_{H_0} = 1 - \alpha \quad (\text{A.3})$$

Das entsprechende c für spezielle Werte von P in Bezug zum Freiheitsgrad f kann in entsprechenden Tabellenwerken nachgeschlagen werden.

Der Freiheitsgrad ermittelt sich aus $f = k - 1$.

6. Fällt der Prüfwert χ^2 in den Annahme Bereich (nicht kritischer Bereich), so wird die Nullhypothese H_0 (A.1) beibehalten und es handelt sich um die vermutete Verteilung, andernfalls wird die Nullhypothese abgelehnt.

$$\chi^2 \leq c \quad (\text{A.4})$$

Test auf Gleichverteilung mit Kolmogorow-Smirnow-Test Bei dem *Kolmogorow-Smirnow-Test* erfolgt ein Vergleich der empirischen Verteilungsfunktion $F(x)$ der generierten Zufallszahlen und der theoretischen Verteilungsfunktion $F_{(0)}(x)$ der kontinuierlichen Gleichverteilung.

$$F_{(0)}(x) = x \quad (\text{A.5})$$

$$F(x) = \frac{N^*}{N} \quad (0 \leq x \leq 1) \quad (\text{A.6})$$

Dabei ist N die Gesamtanzahl der Zufallszahlen und N^* Anzahl der Zufallszahlen, deren Wert $\leq x$ ist. Die Irrtumswahrscheinlichkeit α gibt Auskunft über die Qualität der gestesteten Gleichverteilung.

Der Algorithmus des *Kolmogorow-Smirnow-Tests* in 4 Schritten.

1. Sortierung der Zufallszahlen der Größe nach.

$$Z_1 \leq Z_2 \leq \dots \leq Z_N \quad (\text{A.7})$$

2. Ermittlung der maximalen Abweichungen

$$D = \max \left\{ \left| \max_{(1 \leq i \leq N)} \left\{ \frac{i}{N} - Z_i \right\} \right|, \left| \max_{(1 \leq i \leq N)} \left\{ Z_i - \frac{i-1}{N} \right\} \right| \right\} \quad (\text{A.8})$$

3. Berechnung des kritischen Wertes D_α für eine gegebene Irrtumswahrscheinlichkeit (α) und die Anzahl N der Zufallszahlen.

$$D_\alpha = \frac{\sqrt{-0.5 * \ln \left(\frac{\alpha}{2} \right)}}{N} \quad (\text{A.9})$$

4. Vergleich von D und D_α . Wenn ein beobachteter D Wert, den D_α Wert erreicht oder überschreitet, kann davon ausgegangen werden, dass keine Gleichverteilung auf dem Niveau von D_α vorliegt.

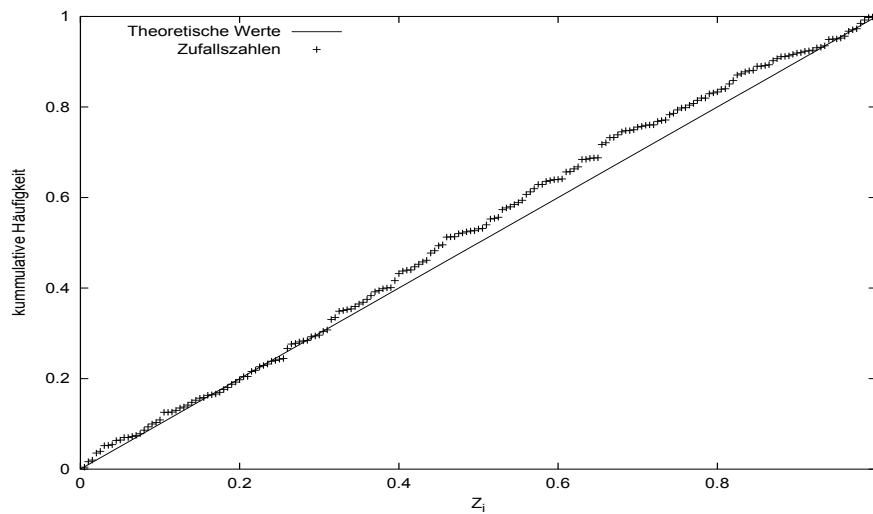


Abb. A.20: Verteilung von generierten Zufallszahlen vs. theoretische Gleichverteilung

Test auf Unabhängigkeit mit RUN Test Mit Hilfe des Run Tests kann überprüft werden, wie viele Zufallszahlen aufeinanderfolgend ohne Unterbrechung aufwärts ansteigen bzw. abwärts abfallen. Mit diesem statistischen Test kann eine schlechte Zufallszahlenfolge nachgewiesen werden. Zur Interpretation der Run-Tests ist es erforderlich, in entsprechenden Tabellen nachzuschlagen.

A.2.2.2 Verteilungen von Zufallszahlen

Die wenigsten Parameter seismischer Gefährdungsanalysen lassen sich streng deterministisch bestimmen, der Zufall spielt eine große Rolle. Aus diesen Gründen lässt sich die seismische Gefährdung in der Regel auch nicht exakt vorhersagen. Es wird deshalb von einer seismischen Gefährdungsanalyse gesprochen. Die einzelnen Parameter sind jedoch keinesfalls völlig unbestimmt, sie liegen als stochastische Größe mit einer bestimmten Verteilung vor. Die Anzahl der möglichen Verteilungen ist unbegrenzt. Dennoch lassen sich viele experimentelle Verteilungen durch bestimmte, theoretisch hergeleitete Verteilungen (z.B. Gaußverteilung) approximieren. Um Zufallszahlen zu gewinnen, die z. B. einer logarithmisch gleichverteilten oder empirischen Verteilung genügen, wird von gleichverteilten Zufallszahlen des Intervalls $(0, \dots, 1)$ ausgegangen, welche in die geforderten Verteilung transformiert werden.

Folgende zwei Schritte sind somit für beliebig verteilter Zufallszahlen notwendig:

1. Erzeugung gleichverteilter Zufallszahlen mit einem Zufallszahlengenerator
2. mittels inverser Transformation Zufallszahlen in eine beliebige Verteilung bringen

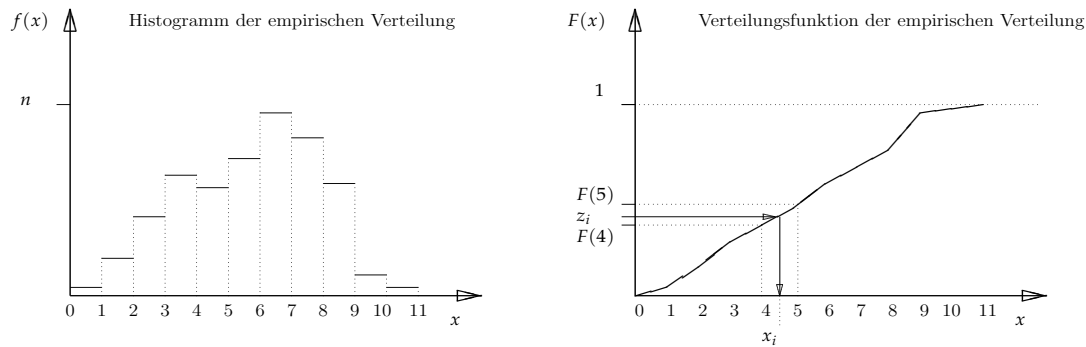


Abb. A.21: Histogramm und Verteilungsfunktion der empirischen Verteilung

Beispiel empirisch verteilter Zufallszahlen Empirische Verteilungen kommen zum Einsatz, wenn für stochastische Parameter keine sinnvollen theoretischen Verteilungstypen ermittelt werden können. Die empirisch verteilten Zufallszahlen können über Histogramme bestimmt werden. Die Achse der möglichen Ergebniswerte werden in diskrete Intervalle (Klassen) unterteilt und anschließend werden über jedem Intervall die Anzahl der Werte, die in diesem Intervall liegen, als Balken dargestellt. Jede Klasse des Histogrammes ist somit durch den Mittelwert der Klassengrenzen und das Intervall gekennzeichnet. Es wird dabei angenommen, dass die Werte innerhalb einer Klasse gleichverteilt sind.

Wenn sehr viele Werte für die Parameter vorliegen, kann von einem Histogramm zu einer kontinuierlichen Verteilungsfunktion übergegangen werden. Das in Abbildung A.21 schematisch gezeigte Histogramm und die zugehörige Verteilungsfunktion ist somit als das Ergebnis der vorliegenden Parameterdaten anzusehen. Als Beispiel für empirische Verteilungen sei die Verteilung der Herdtiefen von Erdbeben genannt.

Mit Hilfe von Erdbeben-Katalogen können Angaben darüber gewonnen werden, mit welcher Häufigkeit die Parameter (z.B. Herdtiefen) in Klassen des Histogramm Wertebereichs fallen.

A.3 Simulationen der Erdbeben-Bibliotheken

Die folgenden Abbildungen A.22 bis A.42 zeigen die simulierte Erdbeben-Bibliotheken sowie ihre Zusammensetzung (Magnituden / Epizentralentfernungen) in Abhängigkeit vom verwendeten Modell, die im Rahmen der Beispieluntersuchungen im Modellgebiet Südwest-Deutschland durchgeführt wurden (vgl. 4.7, 5.1).

Es werden die simulierten Erdbeben-Ereignisse gezeigt, die für Wiederkehrperioden von 475, 1000 und 10000 Jahren am untersuchten Modellstandort zu einer Überschreitung der Intensität (vgl. Abbildung 6.5) geführt haben. Dabei werden die simulierten Erdbeben-Kataloge der Epizentrendichte Methode und der herkömmlichen Methode nach *Ahorner/Rosenhauer* vergleichend gegenübergestellt.

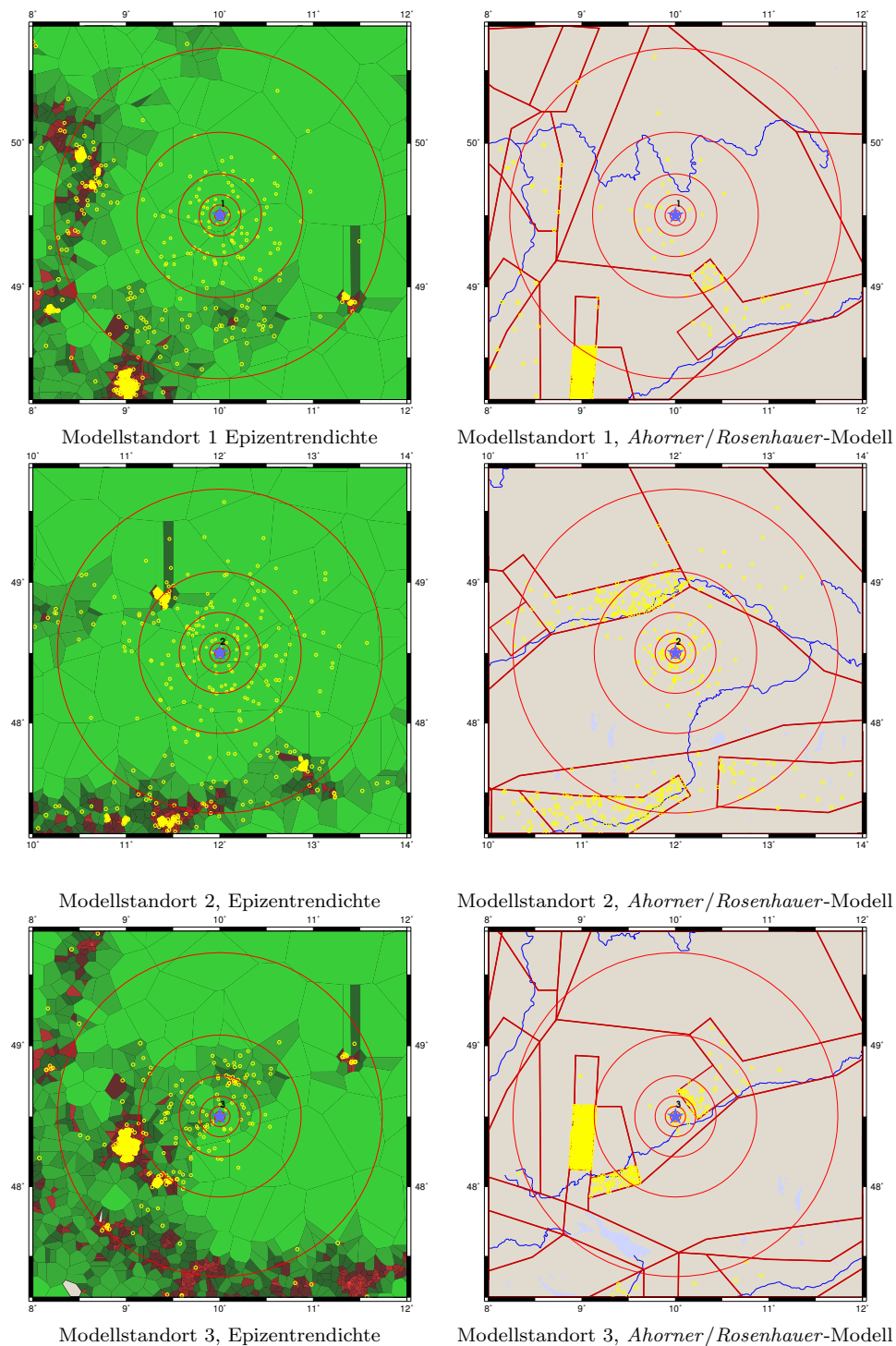


Abb. A.22: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentren-dichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$

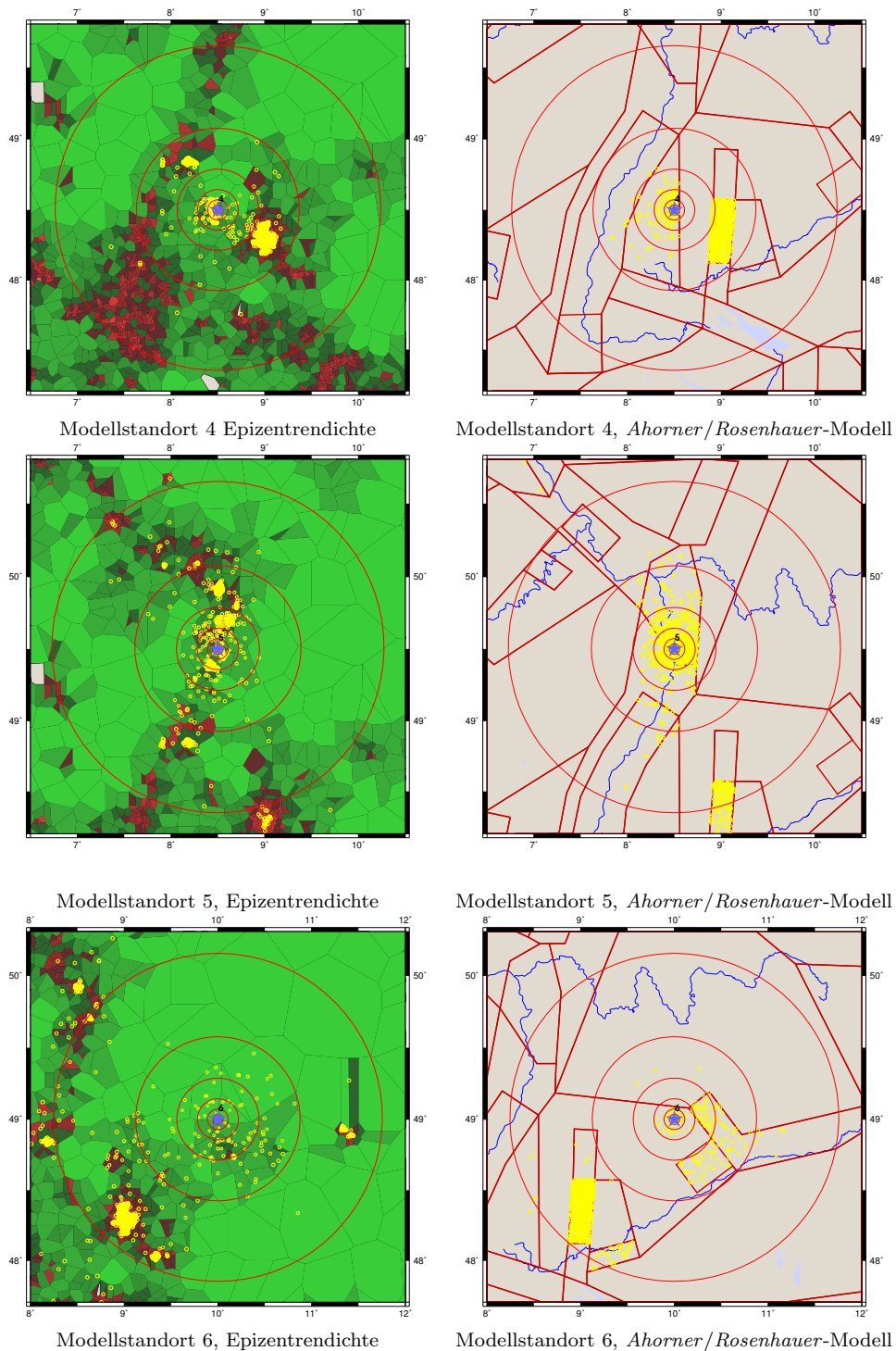


Abb. A.23: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach Ahorner / Rosenhauer und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$

Probabilistische seismische Gefährdungsanalysen auf der Grundlage von Epizentrendichten und ihre ingenieurpraktischen Anwendungsgebiete

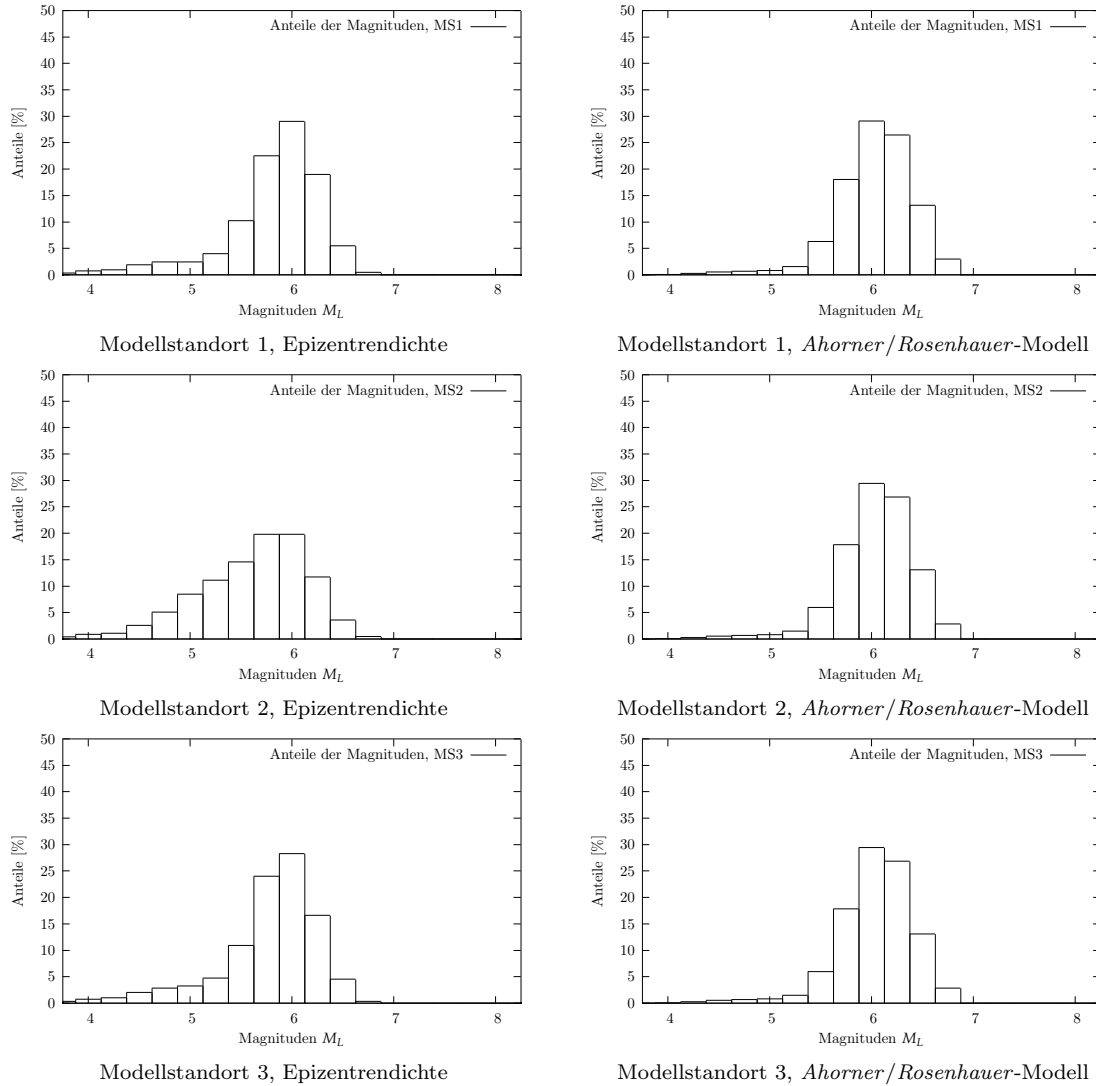


Abb. A.24: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrenrichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$

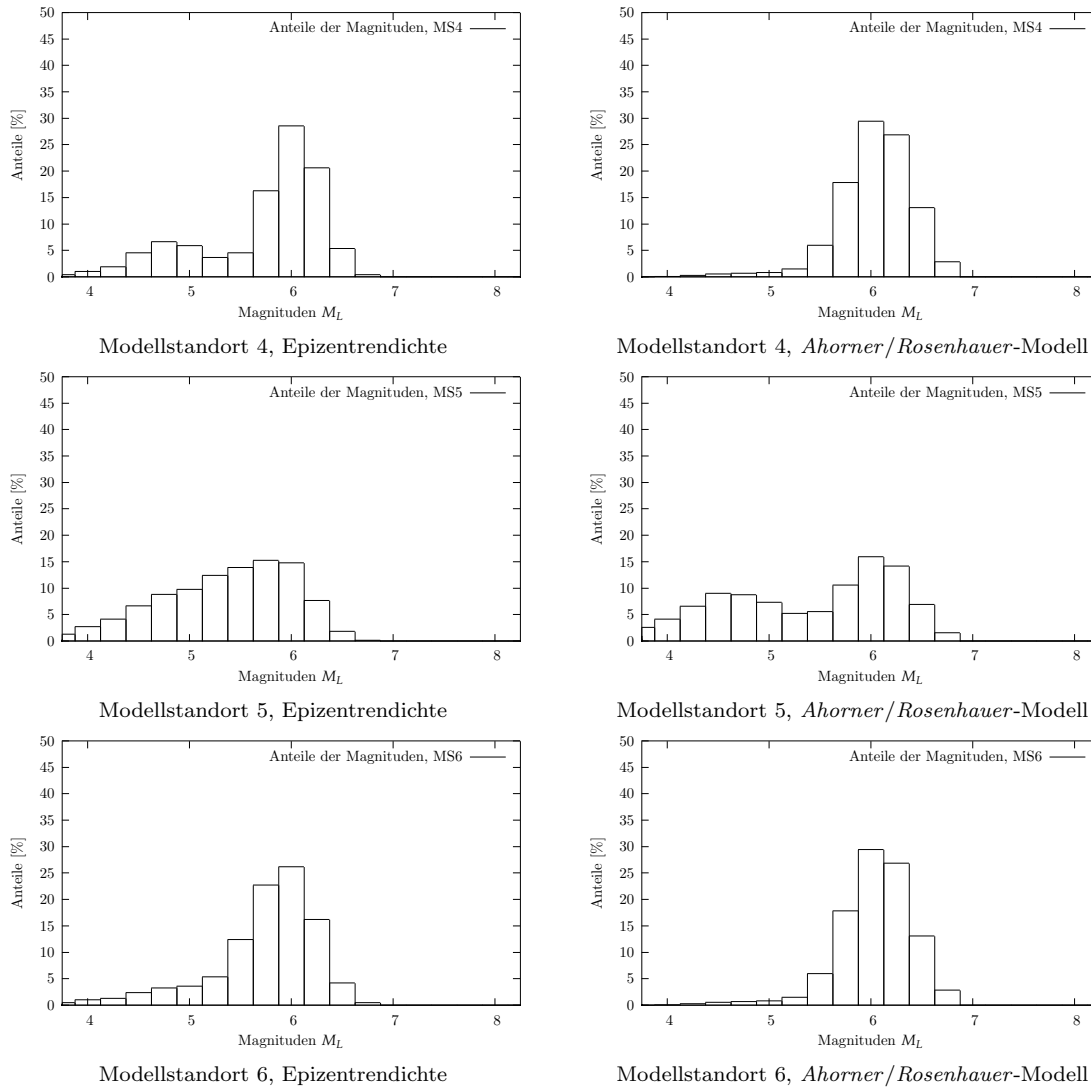


Abb. A.25: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrenrichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$

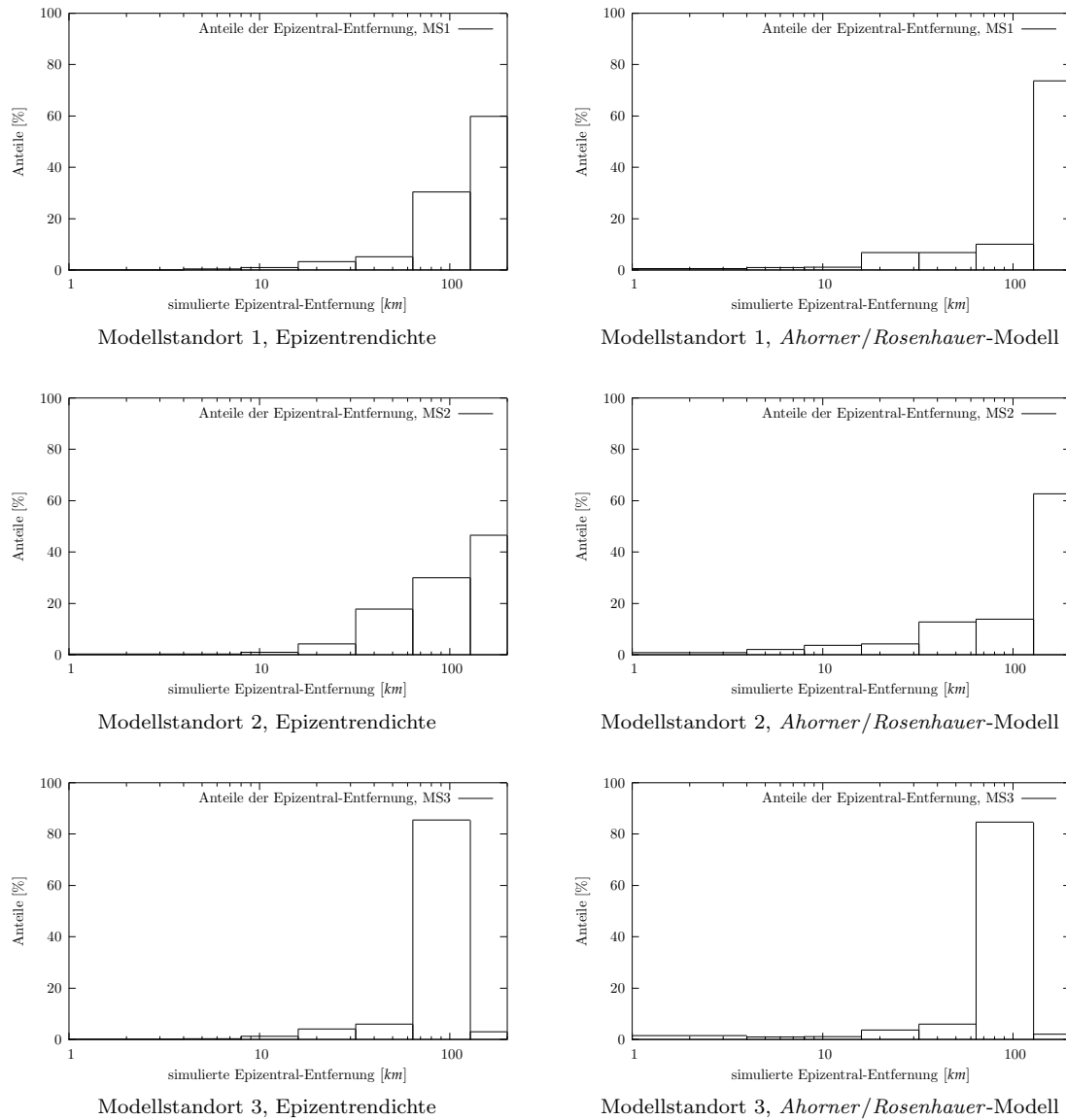
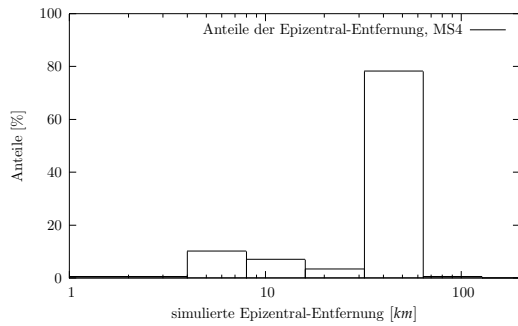
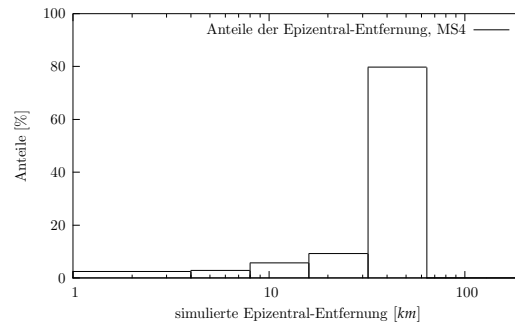


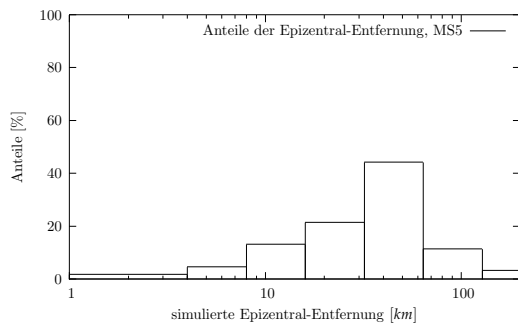
Abb. A.26: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$



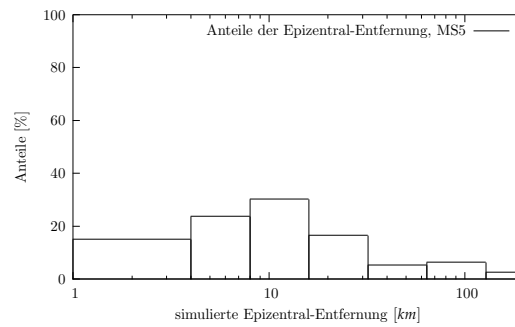
Modellstandort 4, Epizentrendichte



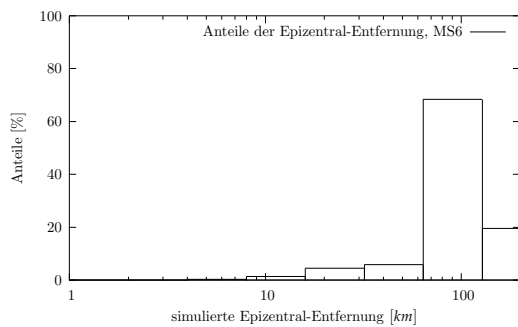
Modellstandort 4, Ahorner/Rosenhauer-Modell



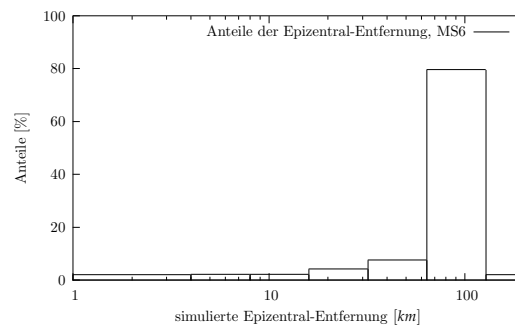
Modellstandort 5, Epizentrendichte



Modellstandort 5, Ahorner/Rosenhauer-Modell



Modellstandort 6, Epizentrendichte



Modellstandort 6, Ahorner/Rosenhauer-Modell

Abb. A.27: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach Ahorner / Rosenhauer und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von $1/475 [1/a]$

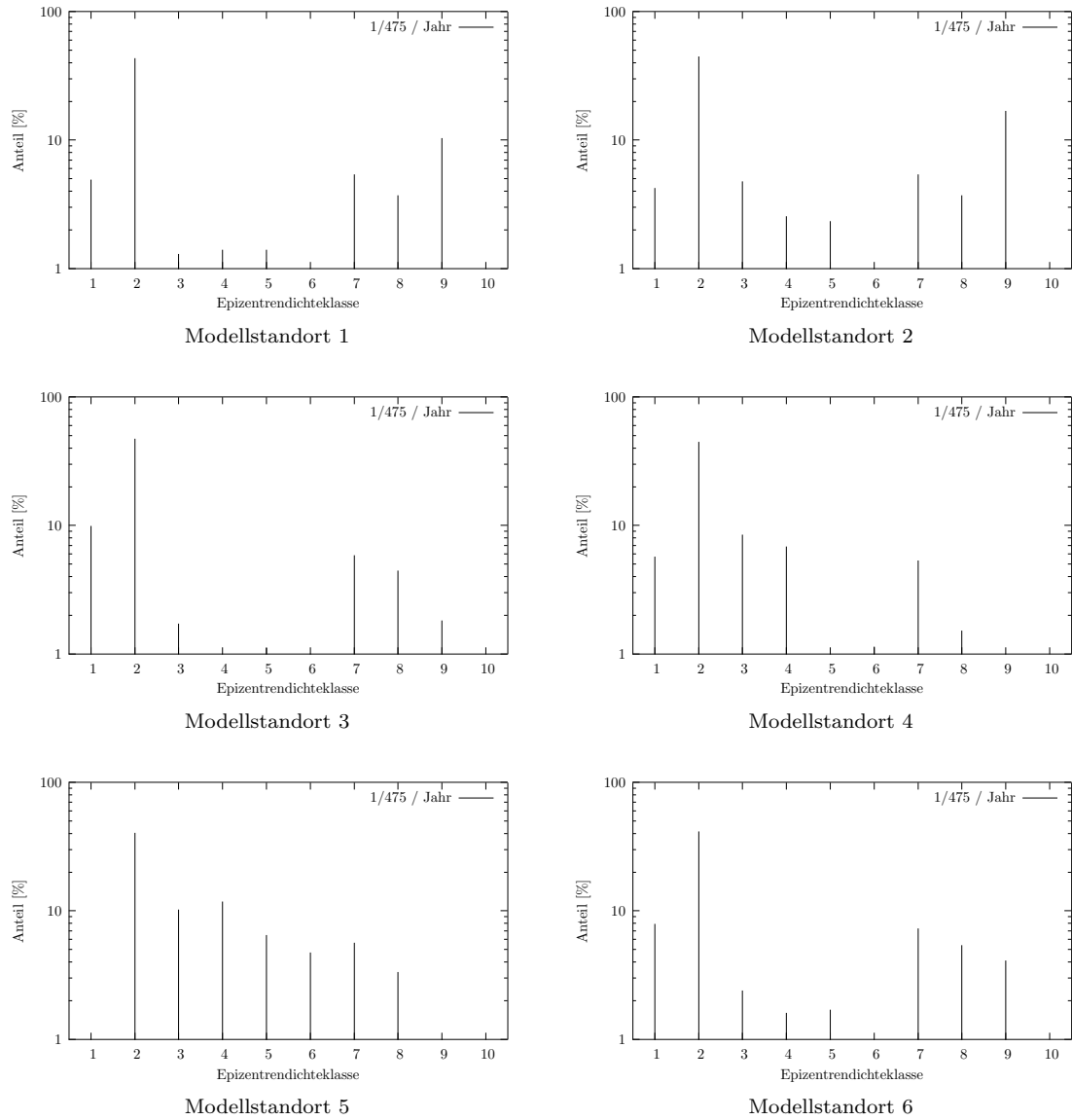


Abb. A.28: Anteile der Epizentrendichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von $1/475$ [$1/a$] in Abhängigkeit von der Epizentrendichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1)

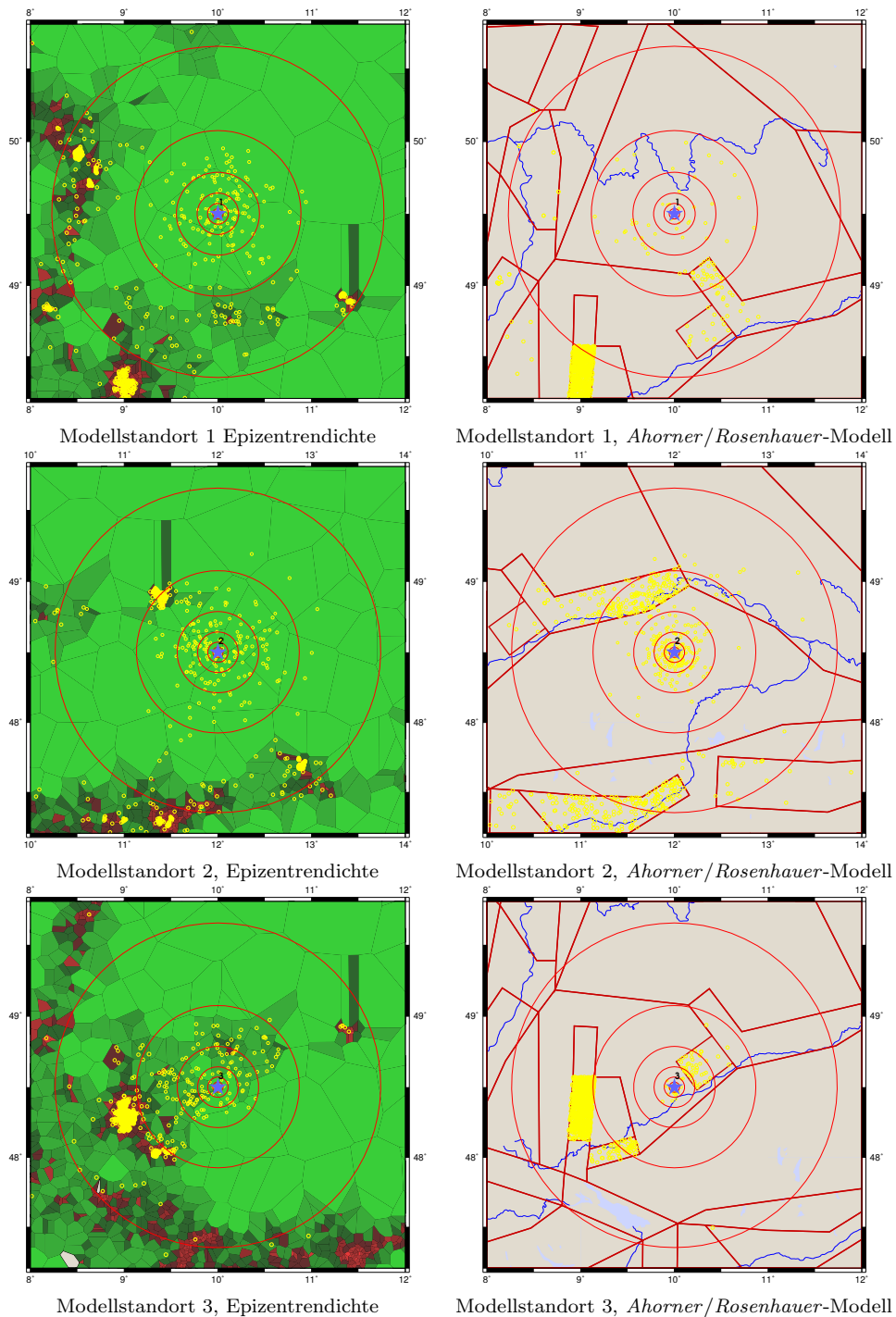


Abb. A.29: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner/Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungs-niveau von 10^{-3} [1/a]

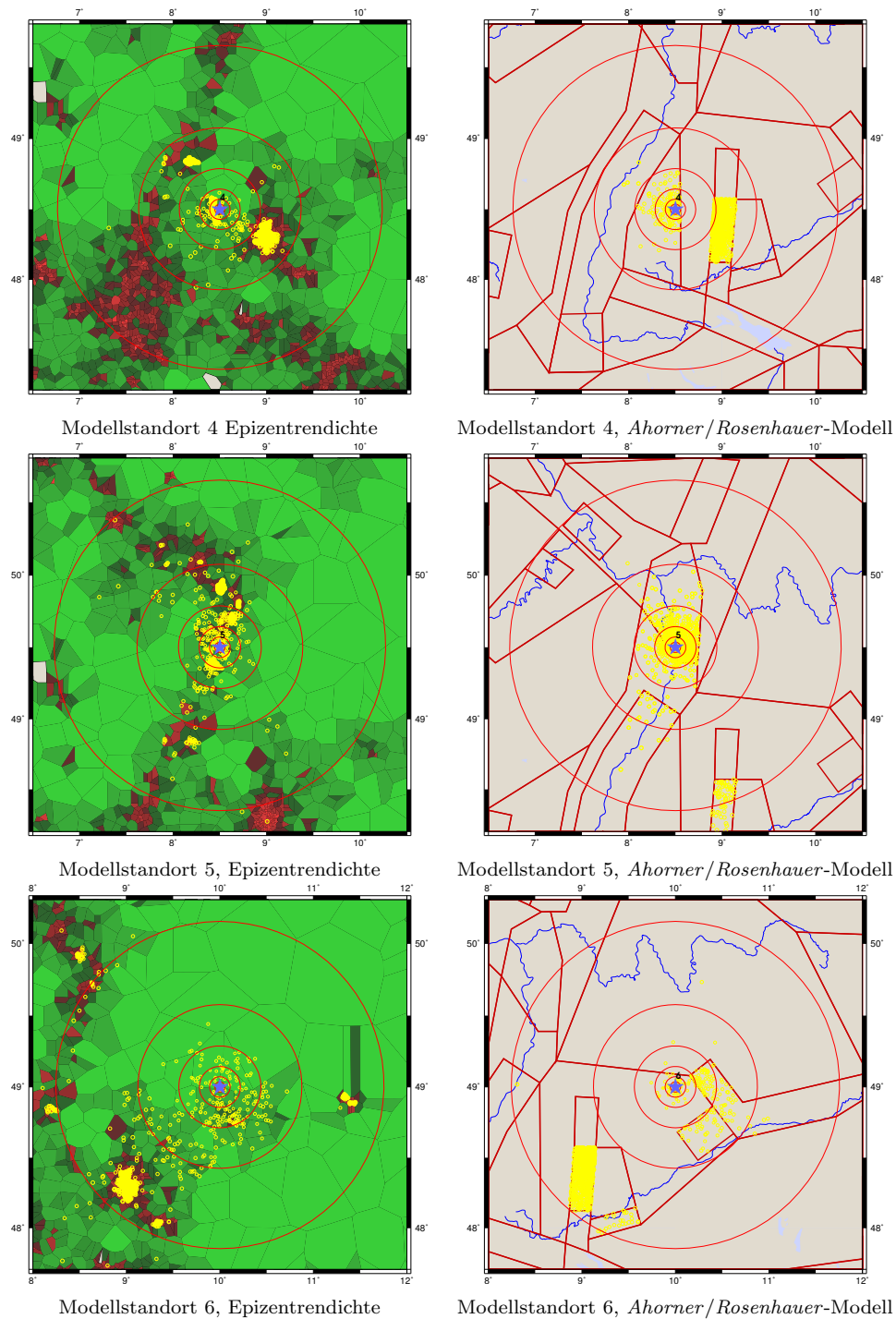
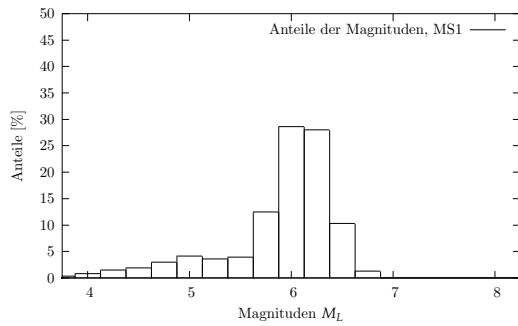
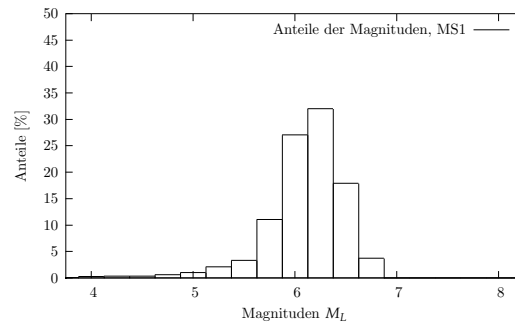


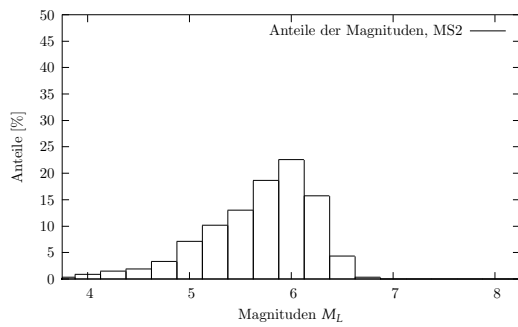
Abb. A.30: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentren-dichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]



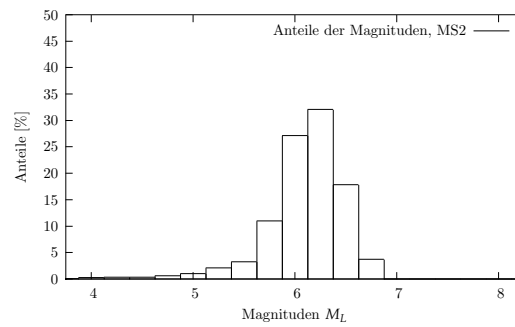
Modellstandort 1, Epizentrenmethode



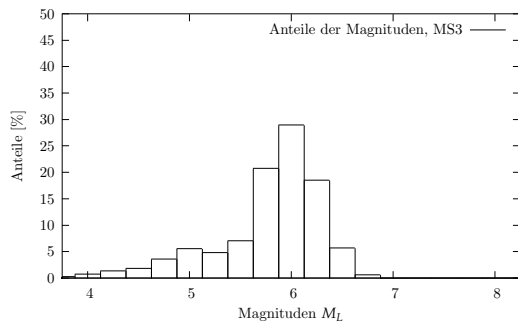
Modellstandort 1, Ahorner/Rosenhauer-Modell



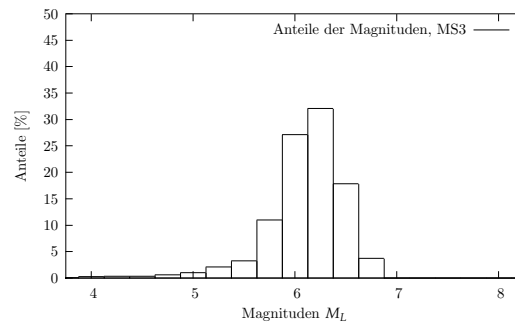
Modellstandort 2, Epizentrenmethode



Modellstandort 2, Ahorner/Rosenhauer-Modell

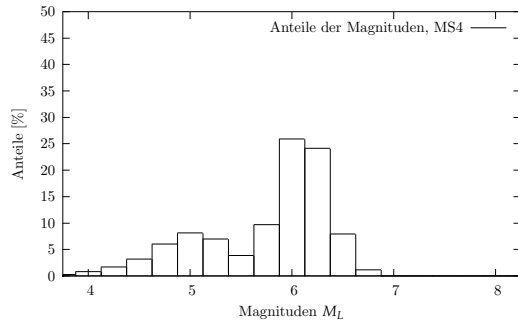


Modellstandort 3, Epizentrenmethode

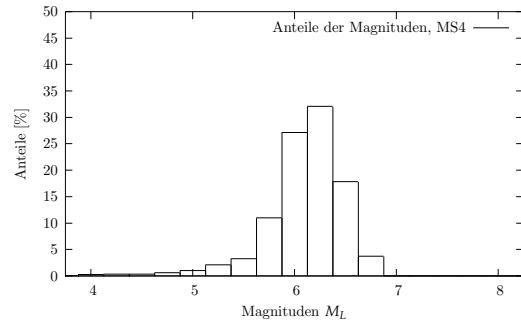


Modellstandort 3, Ahorner/Rosenhauer-Modell

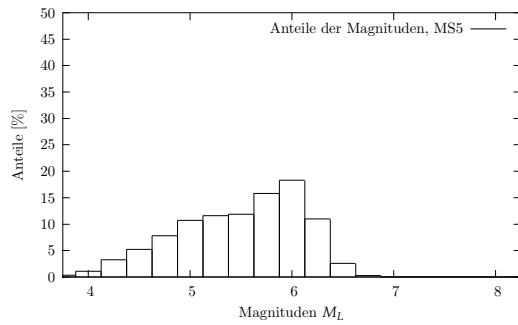
Abb. A.31: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach Ahorner / Rosenhauer und der Epizentrenmethode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]



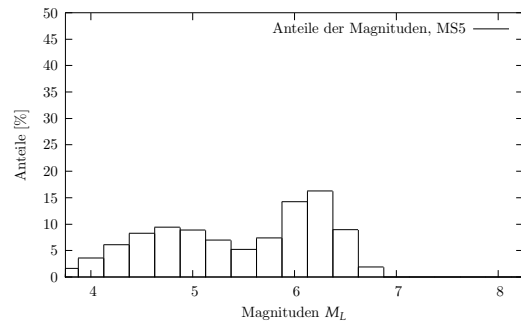
Modellstandort 4, Epizentrendichte



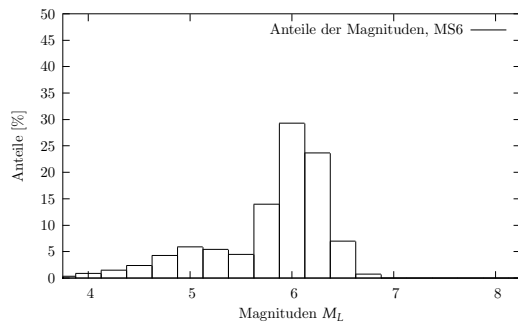
Modellstandort 4, Ahorner/Rosenhauer-Modell



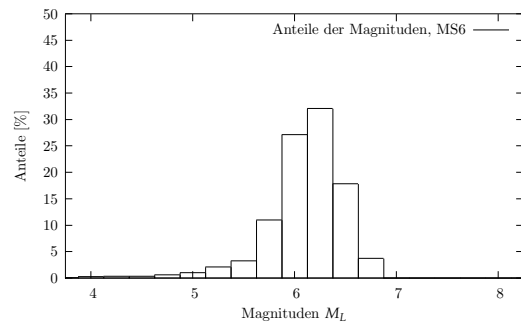
Modellstandort 5, Epizentrendichte



Modellstandort 5, Ahorner/Rosenhauer-Modell

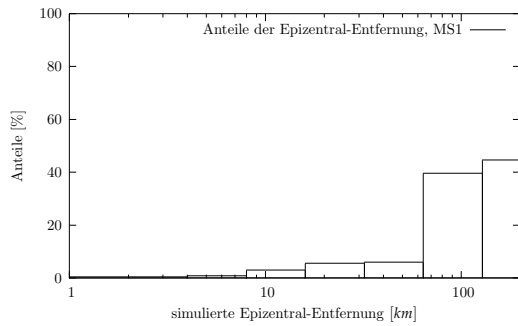


Modellstandort 6, Epizentrendichte

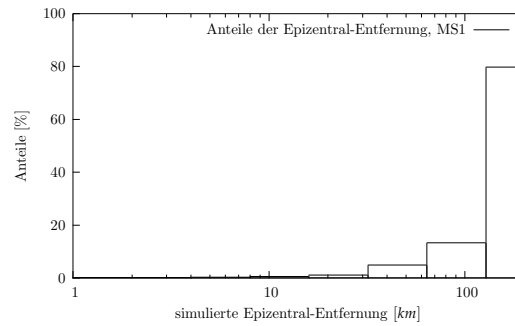


Modellstandort 6, Ahorner/Rosenhauer-Modell

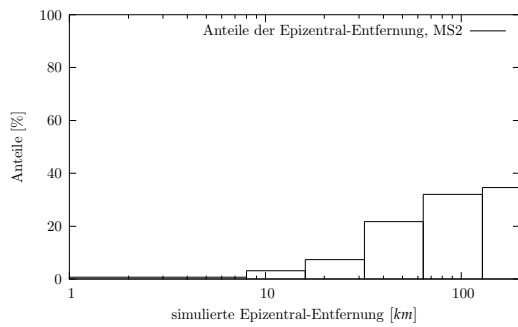
Abb. A.32: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach Ahorner / Rosenhauer und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]



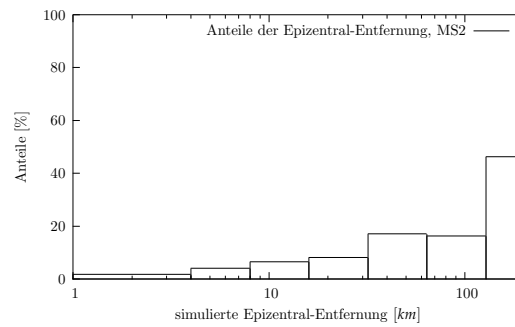
Modellstandort 1, Epizentrendichte



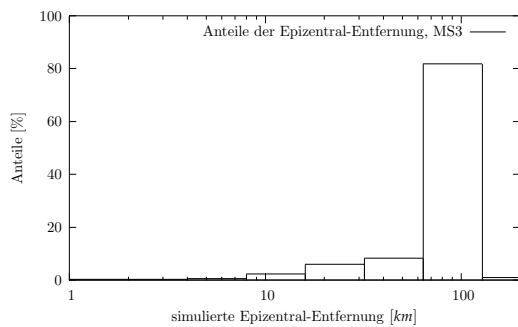
Modellstandort 1, Ahorner/Rosenhauer-Modell



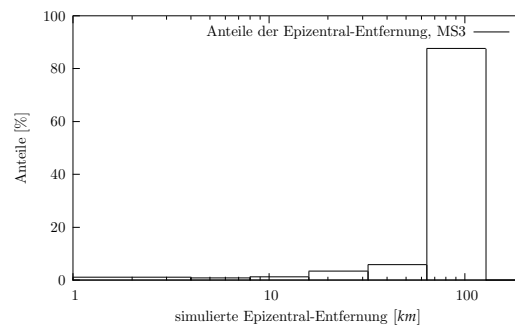
Modellstandort 2, Epizentrendichte



Modellstandort 2, Ahorner/Rosenhauer-Modell



Modellstandort 3, Epizentrendichte



Modellstandort 3, Ahorner/Rosenhauer-Modell

Abb. A.33: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} $[1/a]$

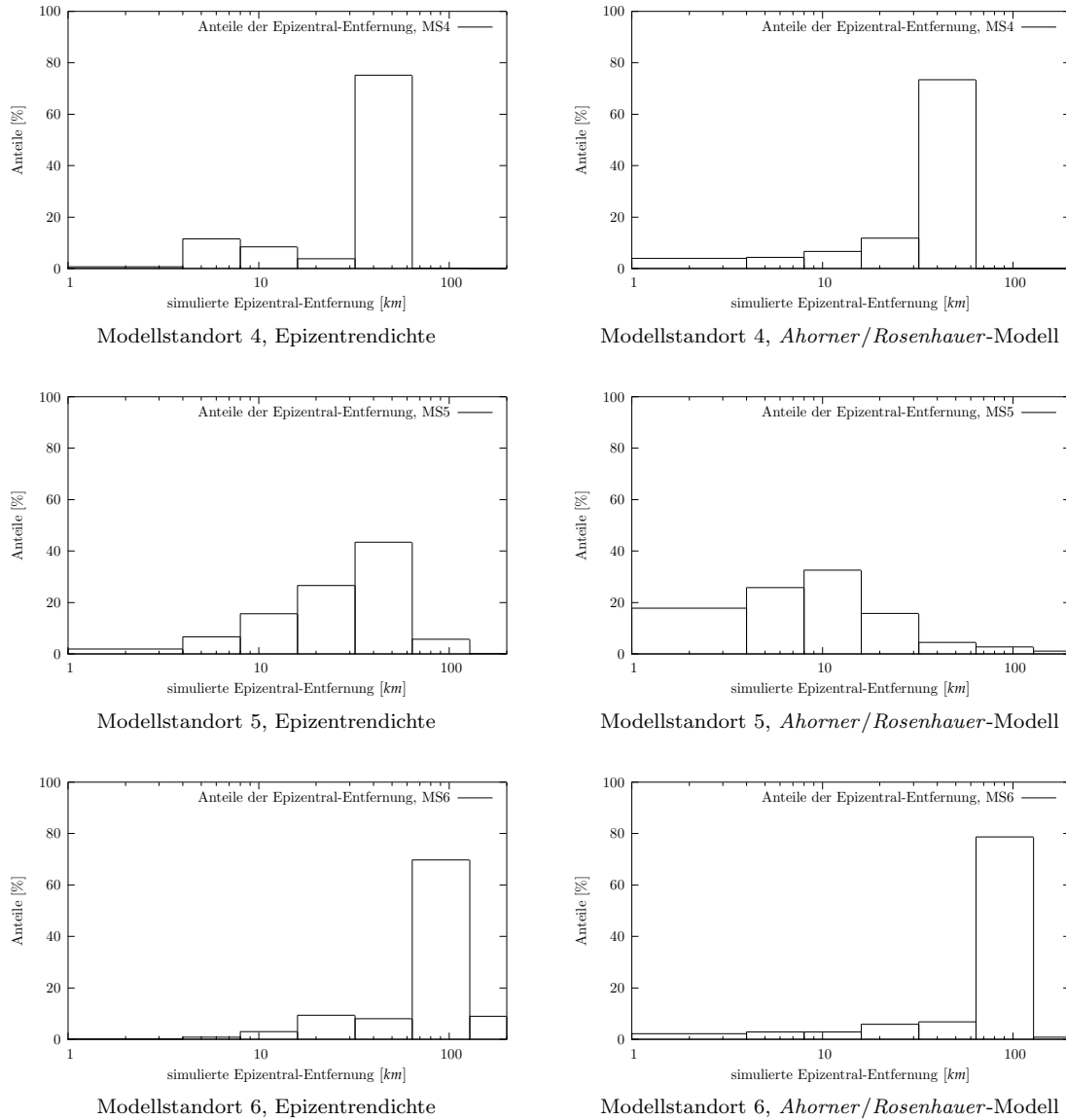


Abb. A.34: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrenrichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [1/a]

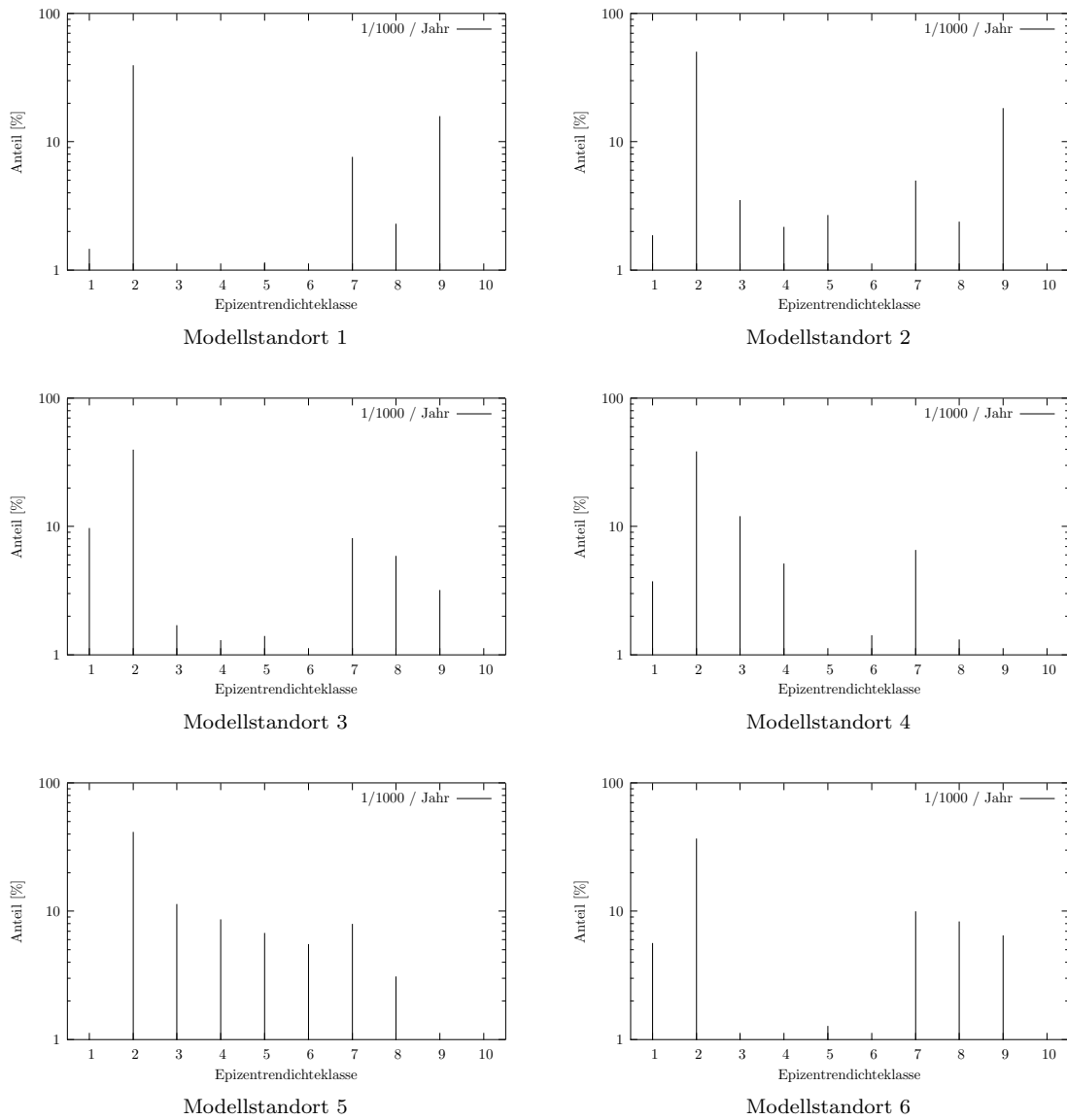


Abb. A.35: Anteile der Epizentrenrichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von 10^{-3} [$1/a$] in Abhängigkeit von der Epizentrenrichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1)

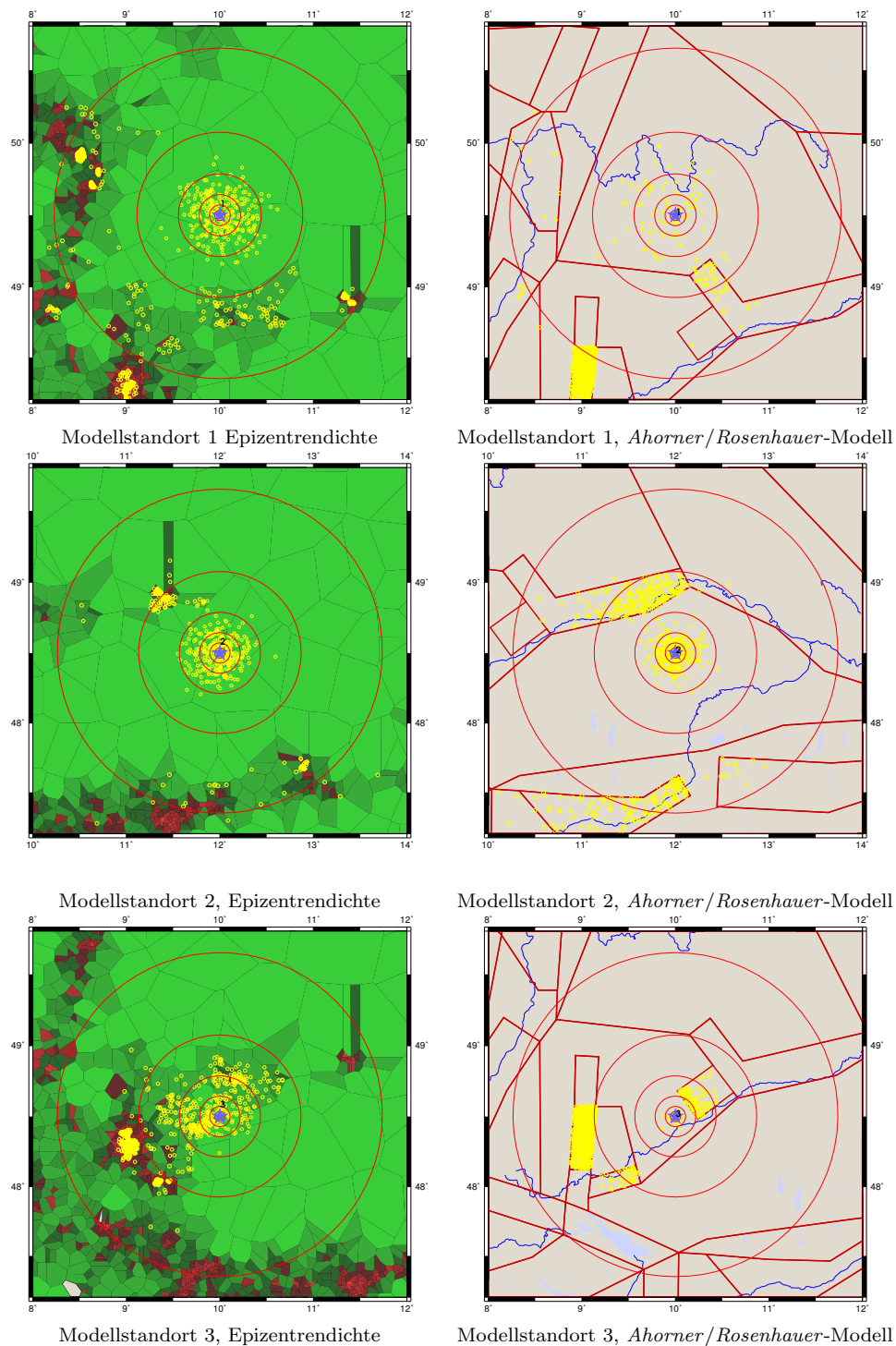


Abb. A.36: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentren-dichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]

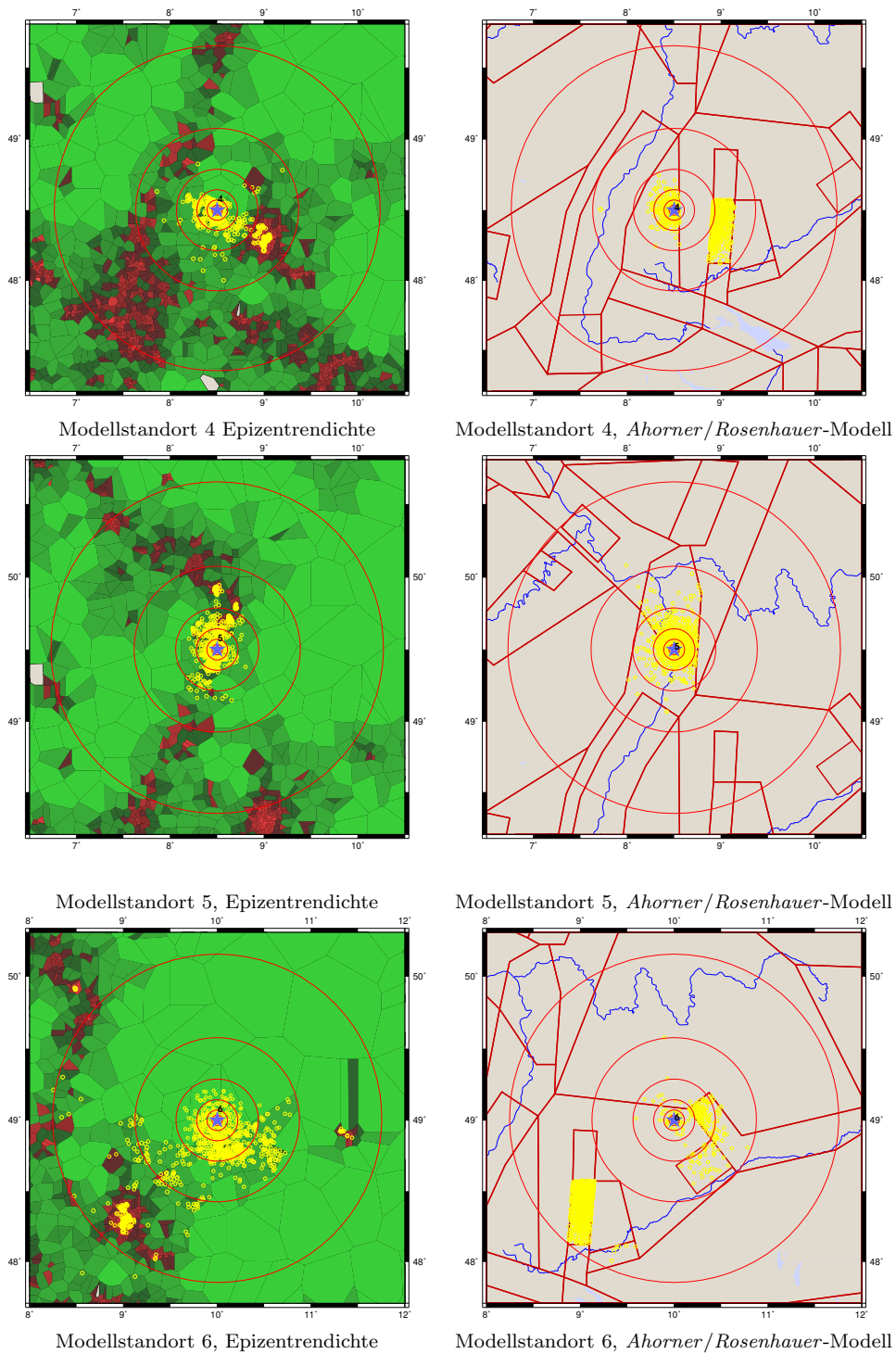


Abb. A.37: Vergleich von simulierten Erdbeben an den Modellstandorten 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. 5.1) zwischen einer herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [$1/a$]

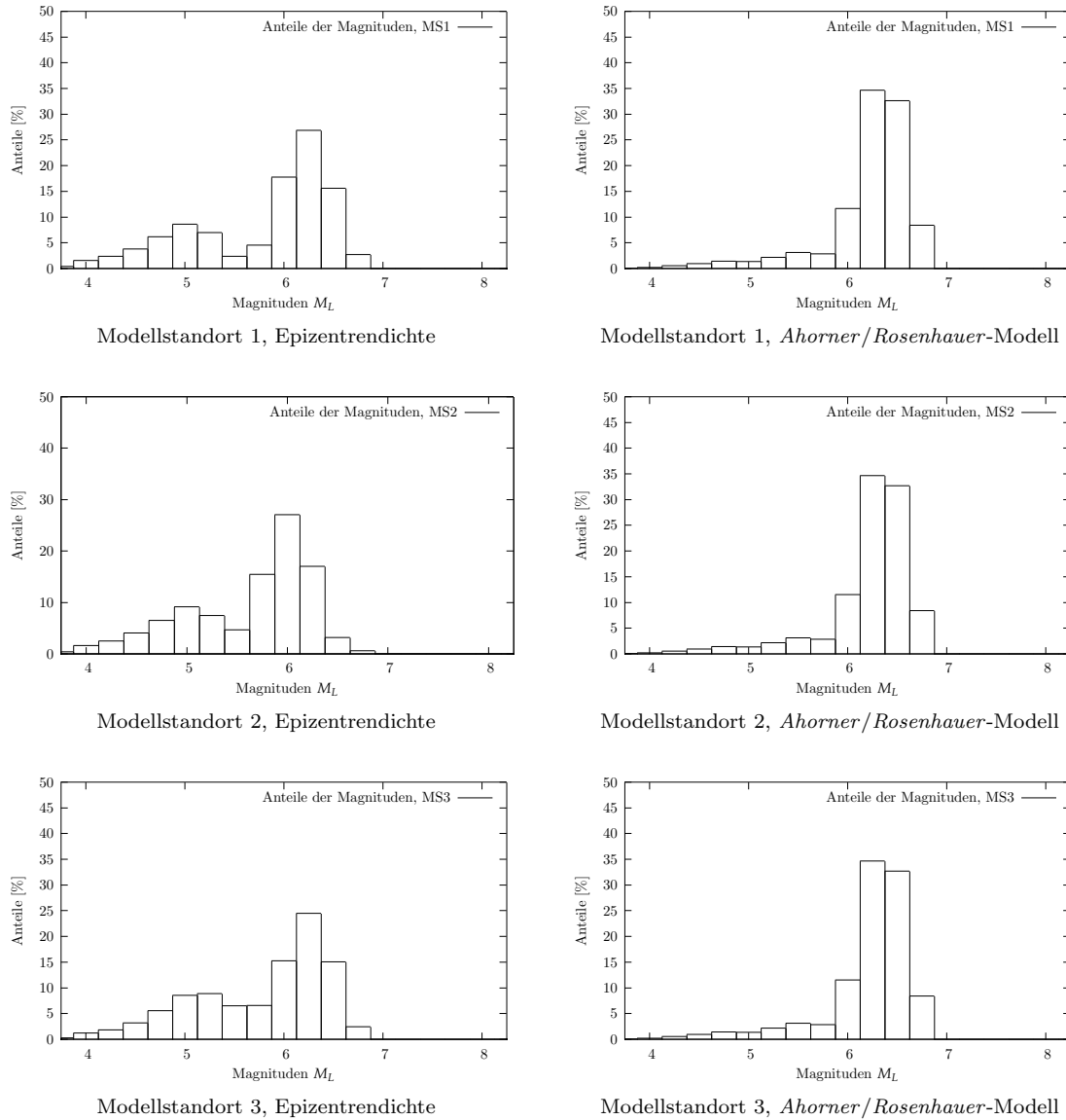
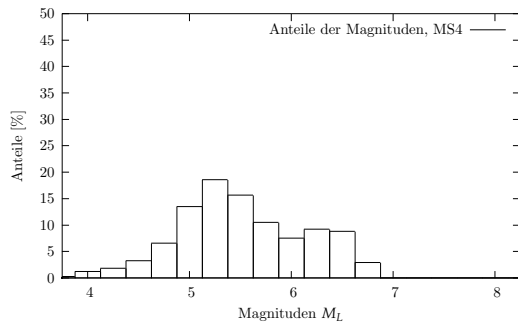
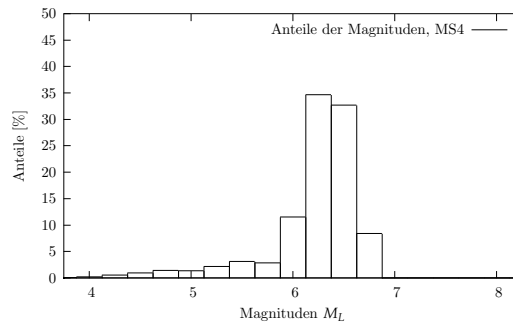


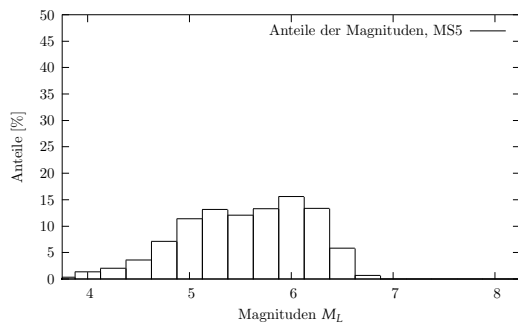
Abb. A.38: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrenrichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]



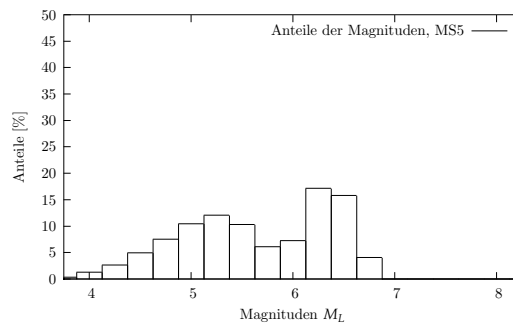
Modellstandort 4, Epizentrenrichte



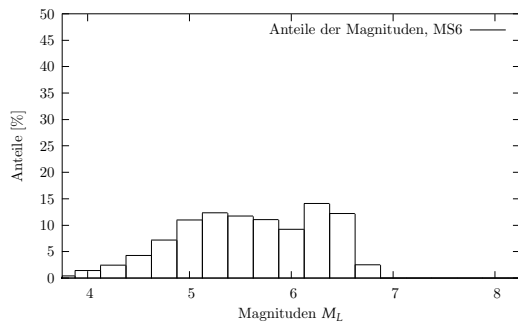
Modellstandort 4, Ahorner/Rosenhauer-Modell



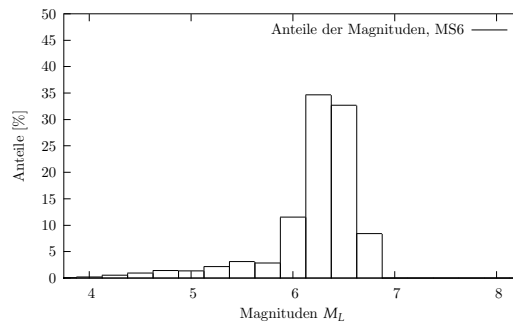
Modellstandort 5, Epizentrenrichte



Modellstandort 5, Ahorner/Rosenhauer-Modell



Modellstandort 6, Epizentrenrichte



Modellstandort 6, Ahorner/Rosenhauer-Modell

Abb. A.39: Vergleich der Anteile der simulierten Magnituden für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) an der seismischen Gefährdung zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrenrichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]

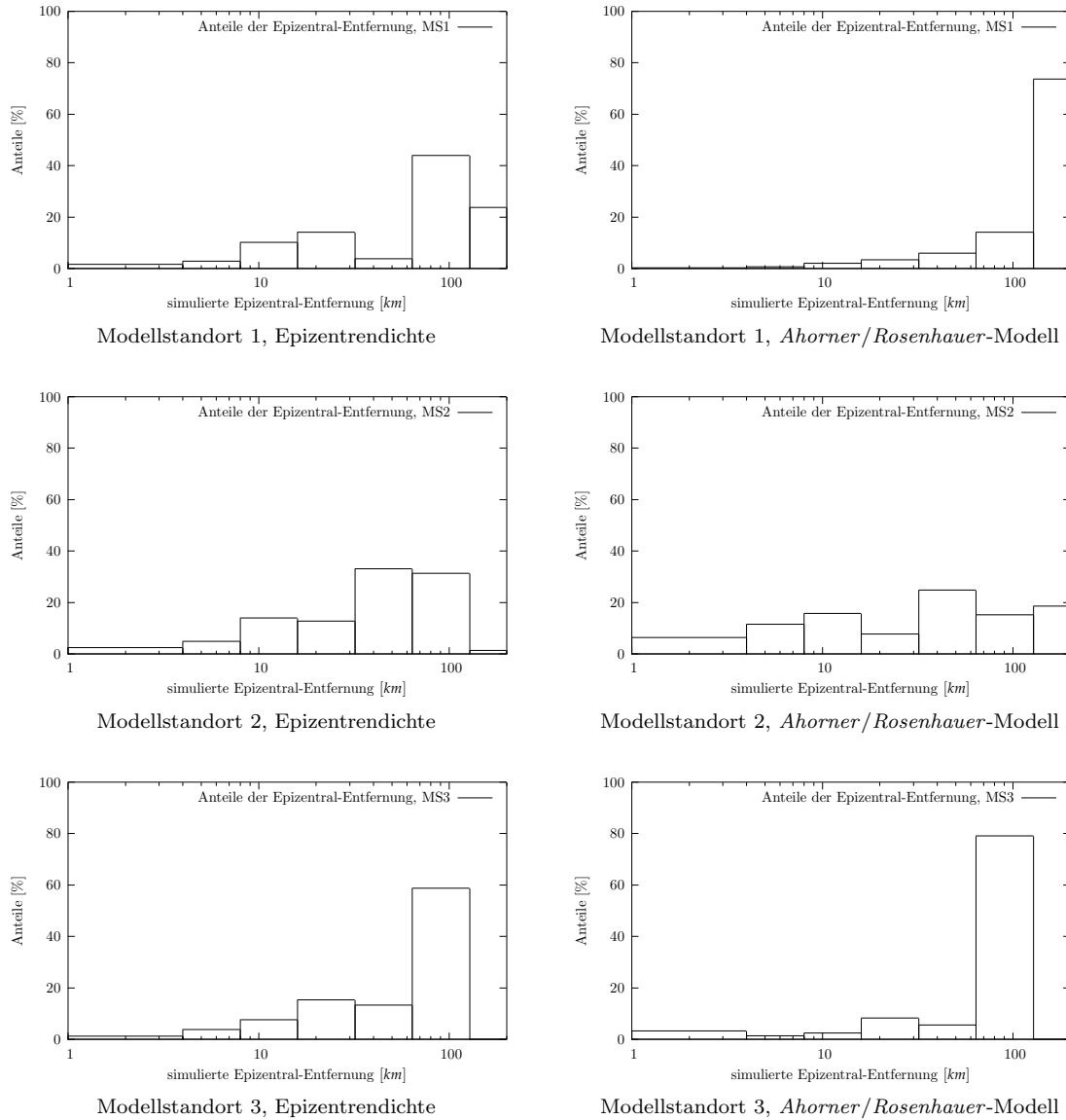
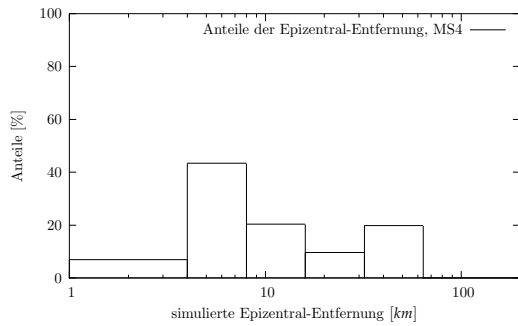
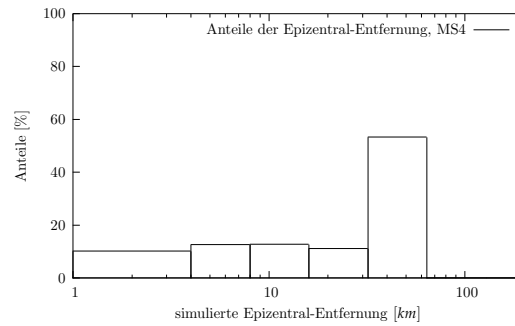


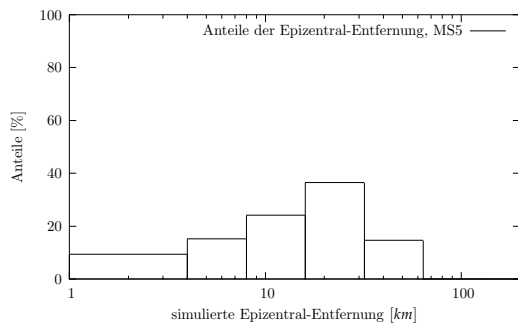
Abb. A.40: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a]



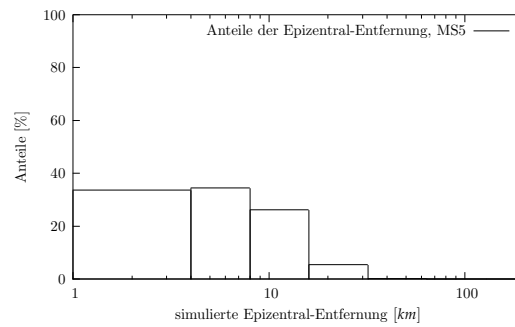
Modellstandort 4, Epizentrendichte



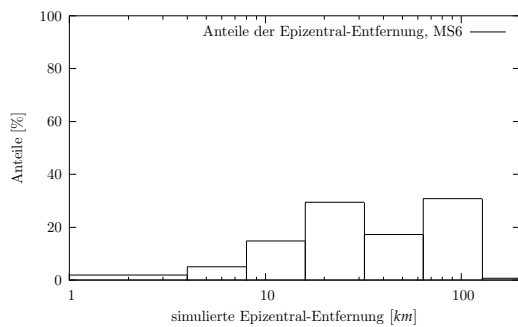
Modellstandort 4, Ahorner/Rosenhauer-Modell



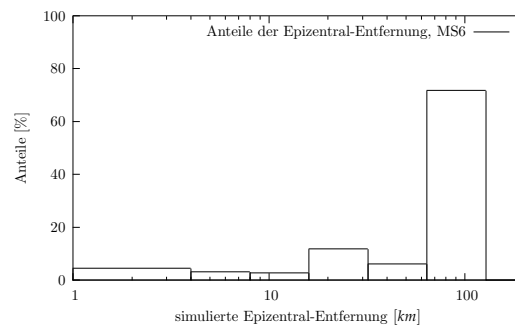
Modellstandort 5, Epizentrendichte



Modellstandort 5, Ahorner/Rosenhauer-Modell



Modellstandort 6, Epizentrendichte



Modellstandort 6, Ahorner/Rosenhauer-Modell

Abb. A.41: Vergleich simulierter Epizentral-Entfernungen für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1) zwischen der herkömmlichen Einteilung in seismische Quellzonen nach *Ahorner / Rosenhauer* und der Epizentrendichte-Methode für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} $[1/a]$

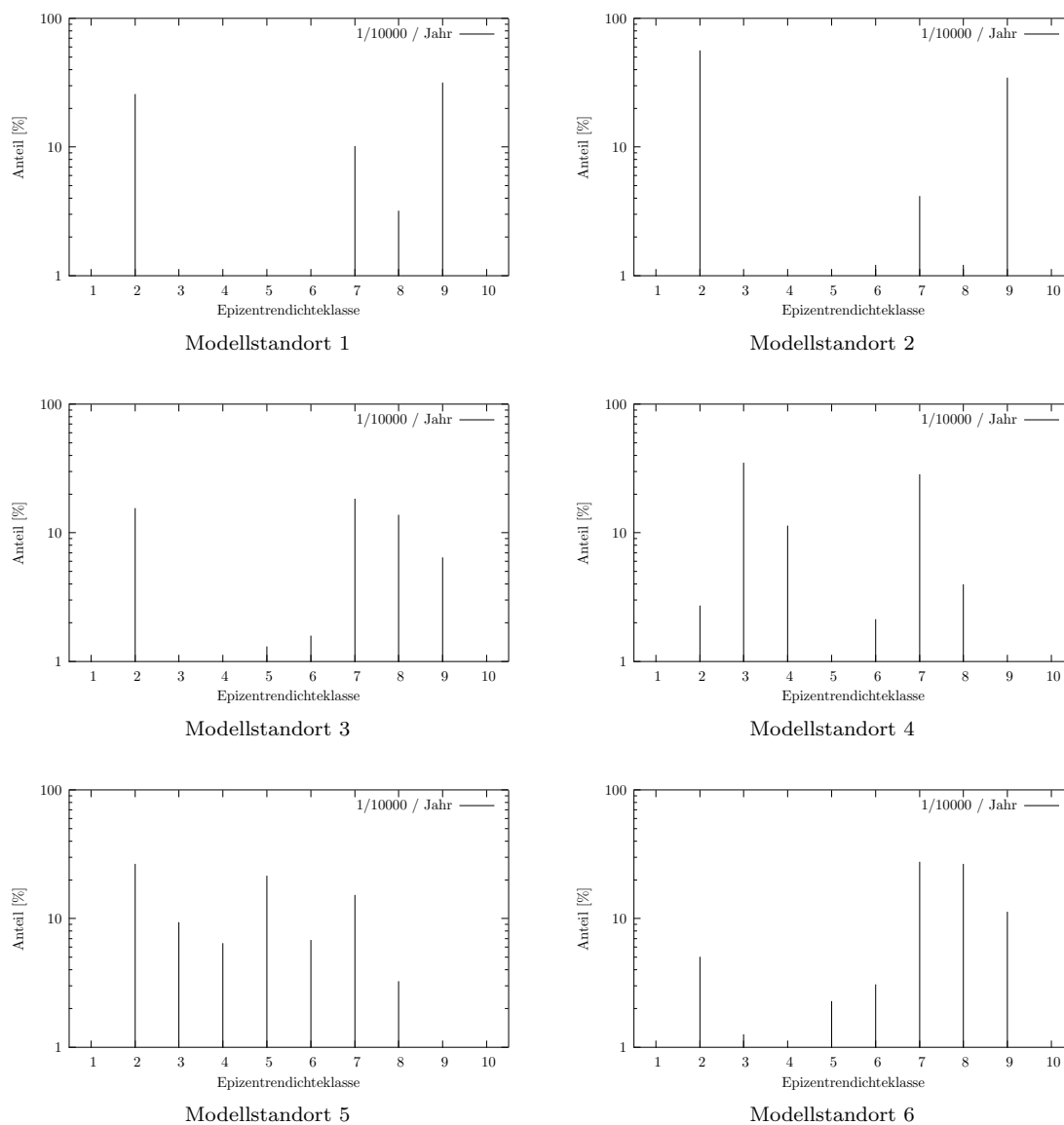


Abb. A.42: Anteile der Epizentrendichte-Klassen an der seismischen Gefährdung für das Gefährdungsniveau von 10^{-4} [1/a] in Abhängigkeit von der Epizentrendichte-Klasse am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1)

A.4 Gefährdungskurven für Epizentrendichte-Raster

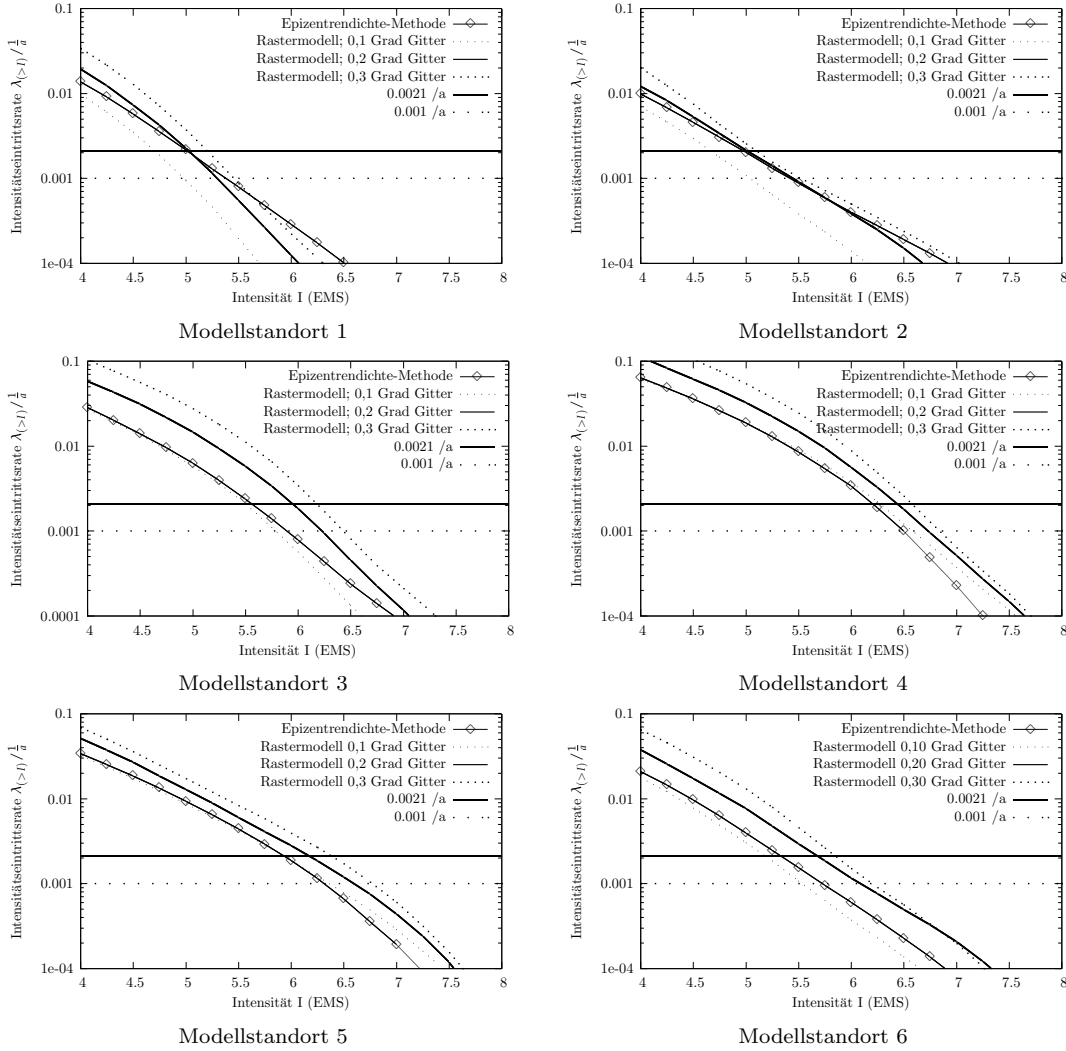
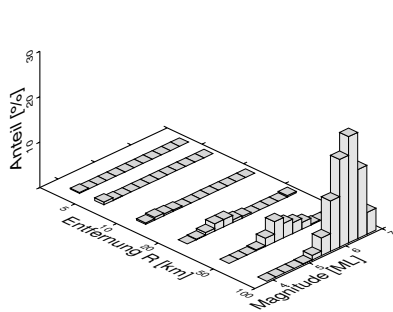
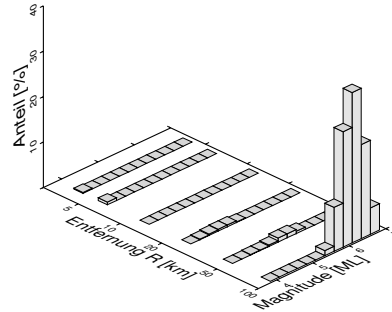


Abb. A.43: Gefährdungskurven der Raster-Modelle mit 0,1; 0,2 und 0,3 Grad Rasterweite im Vergleich mit den Ergebnissen der Epizentrendichte-Methode am Beispiel der 6 Modellpunkte aus Südwestdeutschland (vgl. Abschnitt 5.1)

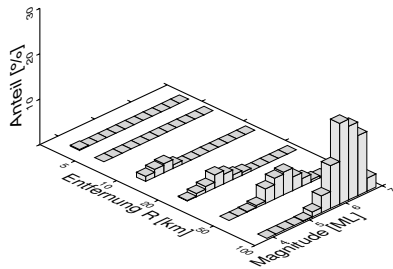
A.5 Deaggregation der Gefährdung, Beispiele



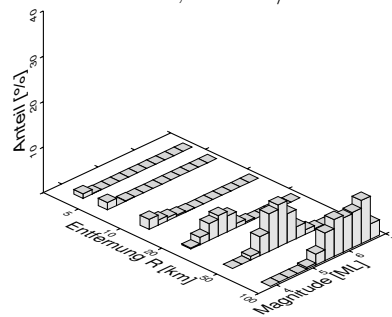
Modellstandort 1, Epizentrendichte-Methode



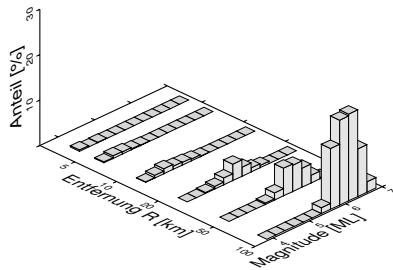
Modellstandort 1, Ahorner/Rosenhauer



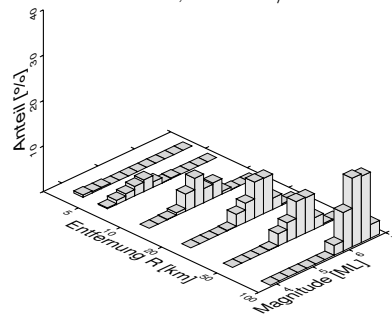
Modellstandort 2, Epizentrendichte-Methode



Modellstandort 2, Ahorner/Rosenhauer

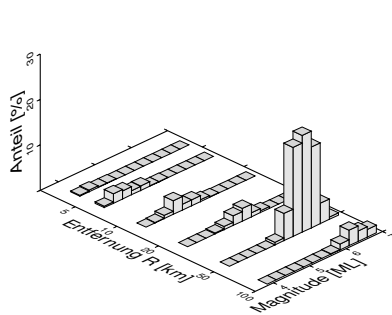


Modellstandort 3, Epizentrendichte-Methode

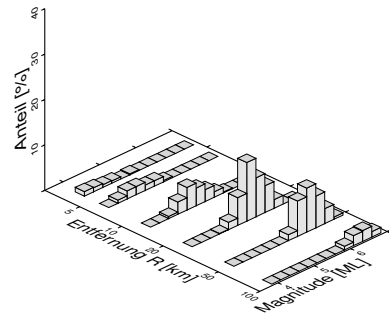


Modellstandort 3, Ahorner/Rosenhauer

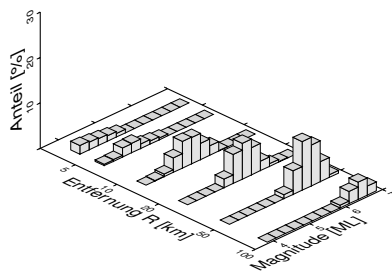
Abb. A.44: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [$1/a$], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach Ahorner und Rosenhauer, auf Basis des Kataloges nach Ahorner



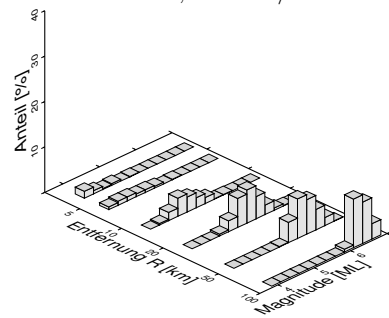
Modellstandort 4, Epizentrenrichte-Methode



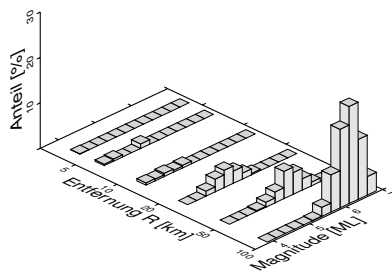
Modellstandort 4, Ahorner/Rosenhauer



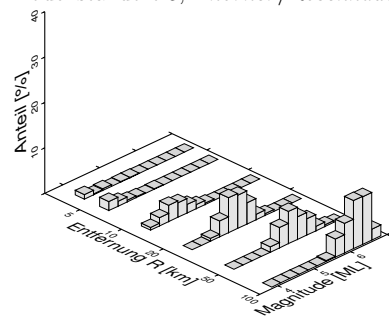
Modellstandort 5, Epizentrenrichte-Methode



Modellstandort 5, Ahorner/Rosenhauer

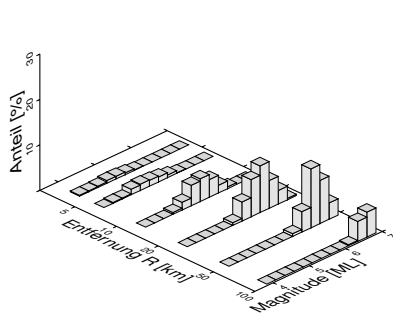


Modellstandort 6, Epizentrenrichte-Methode

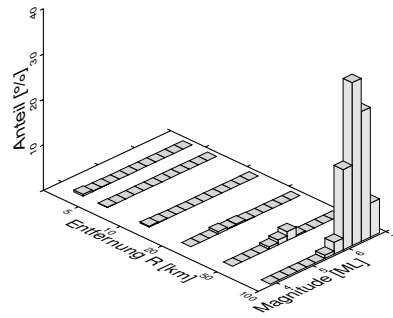


Modellstandort 6, Ahorner/Rosenhauer

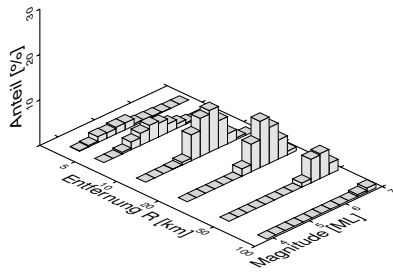
Abb. A.45: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [1/a], berechnet mit der Epizentrenrichte-Methode und der Methode nach Ahorner und Rosenhauer, auf Basis des Kataloges nach Ahorner



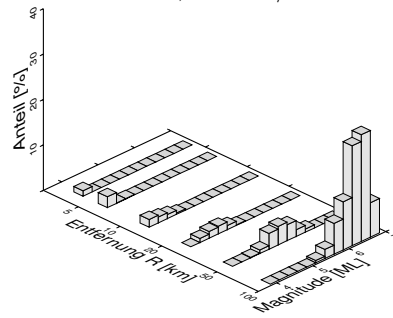
Modellstandort 1, Epizentrendichte-Methode



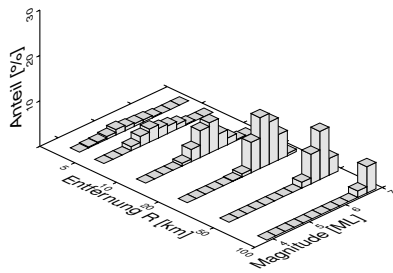
Modellstandort 1, Ahorner/Rosenhauer



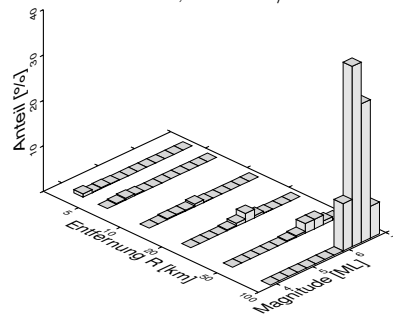
Modellstandort 2, Epizentrendichte-Methode



Modellstandort 2, Ahorner/Rosenhauer

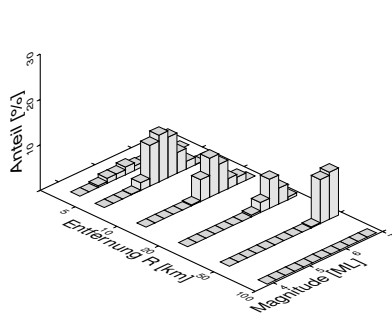


Modellstandort 3, Epizentrendichte-Methode

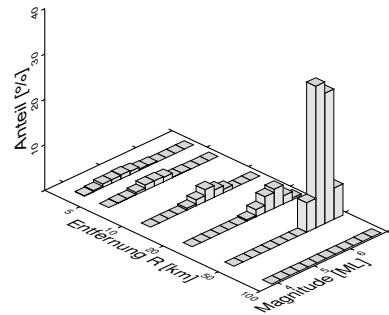


Modellstandort 3, Ahorner/Rosenhauer

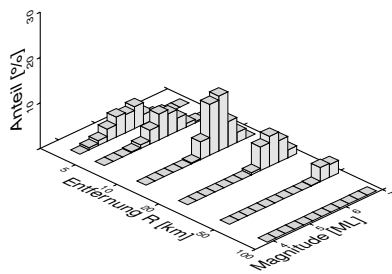
Abb. A.46: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-4} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach Ahorner und Rosenhauer, auf Basis des Kataloges nach Ahorner



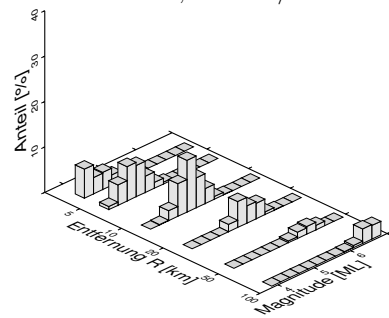
Modellstandort 4, Epizentrenmethode



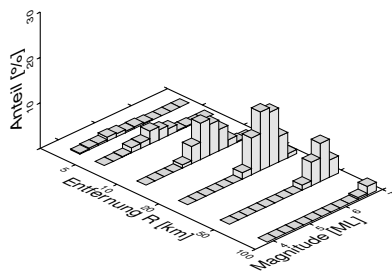
Modellstandort 4, Ahorne/Rosenhauer



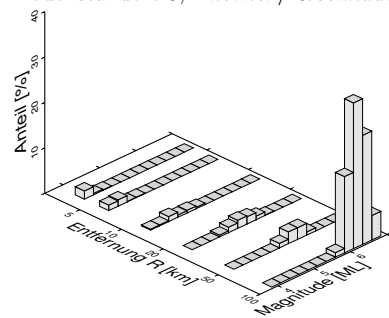
Modellstandort 5, Epizentrenmethode



Modellstandort 5, Ahorne/Rosenhauer

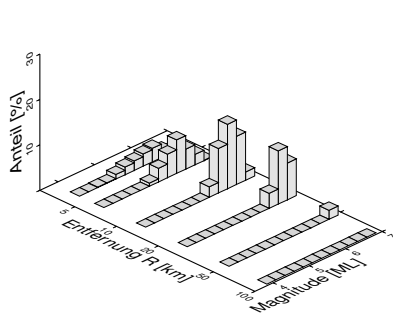


Modellstandort 6, Epizentrenmethode

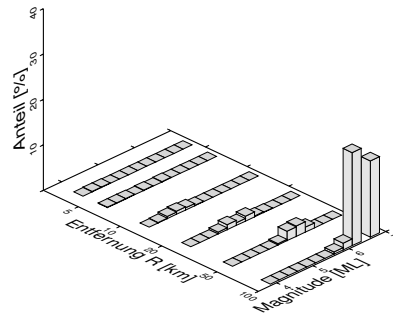


Modellstandort 6, Ahorne/Rosenhauer

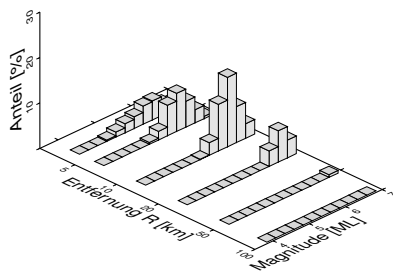
Abb. A.47: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-4} [1/a], berechnet mit der Epizentrenmethode und der Methode nach *Ahorner* und *Rosenhauer*, auf Basis des Kataloges nach *Ahorner*



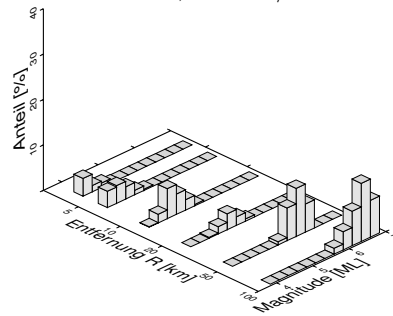
Modellstandort 1, Epizentrendichte-Methode



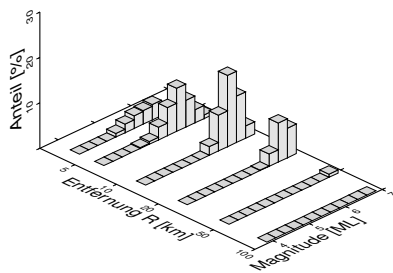
Modellstandort 1, Ahorner/Rosenhauer



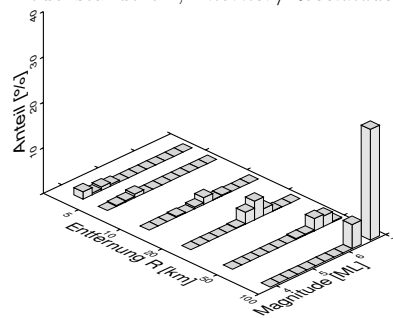
Modellstandort 2, Epizentrendichte-Methode



Modellstandort 2, Ahorner/Rosenhauer



Modellstandort 3, Epizentrendichte-Methode



Modellstandort 3, Ahorner/Rosenhauer

Abb. A.48: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 1–3 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-5} [1/a], berechnet mit der Epizentrendichte-Methode und der Methode nach Ahorner und Rosenhauer, auf Basis des Kataloges nach Ahorner

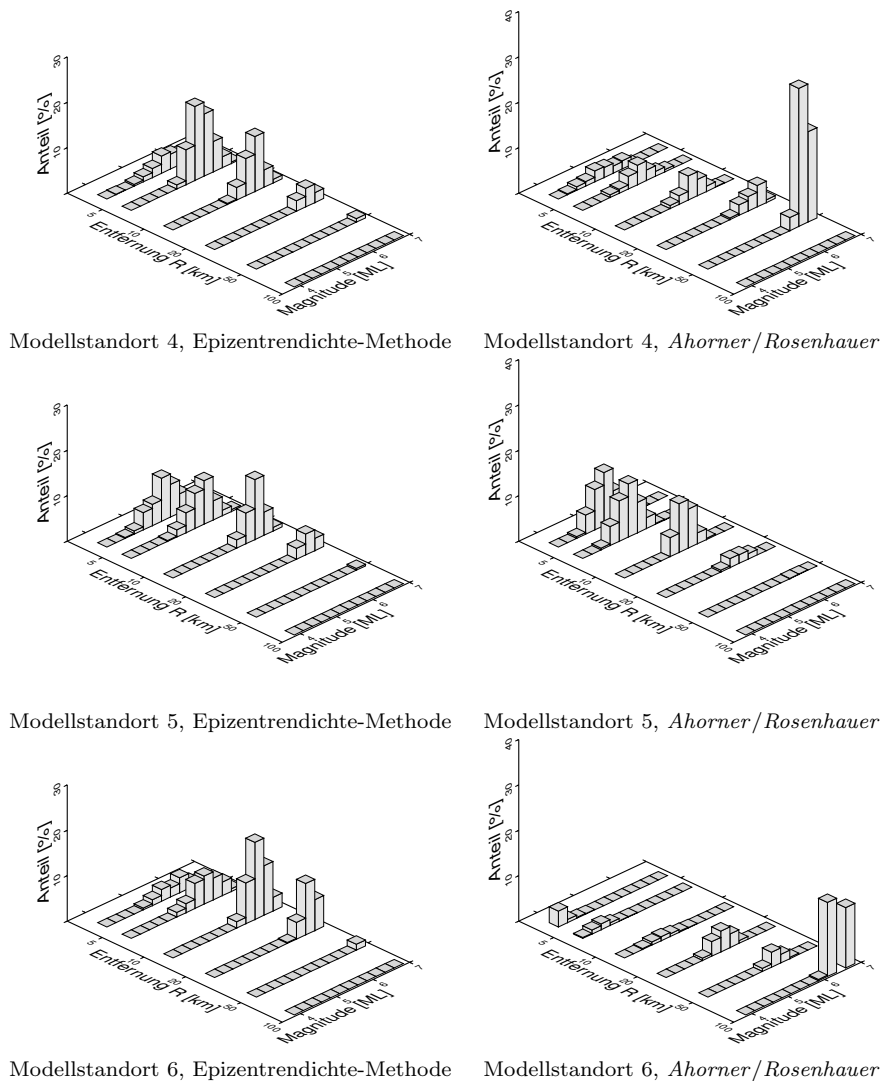


Abb. A.49: Vergleich der Deaggregation der seismischen Gefährdung für die Modellstandorte 4–6 in Südwestdeutschland für Intensitätseintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-5} [1/a], berechnet mit der Epizentrenrichte-Methode und der Methode nach Ahorner und Rosenhauer, auf Basis des Kataloges nach Ahorner

A.6 Spektren

A.6.1 Gefährdungsbezogene Spektren

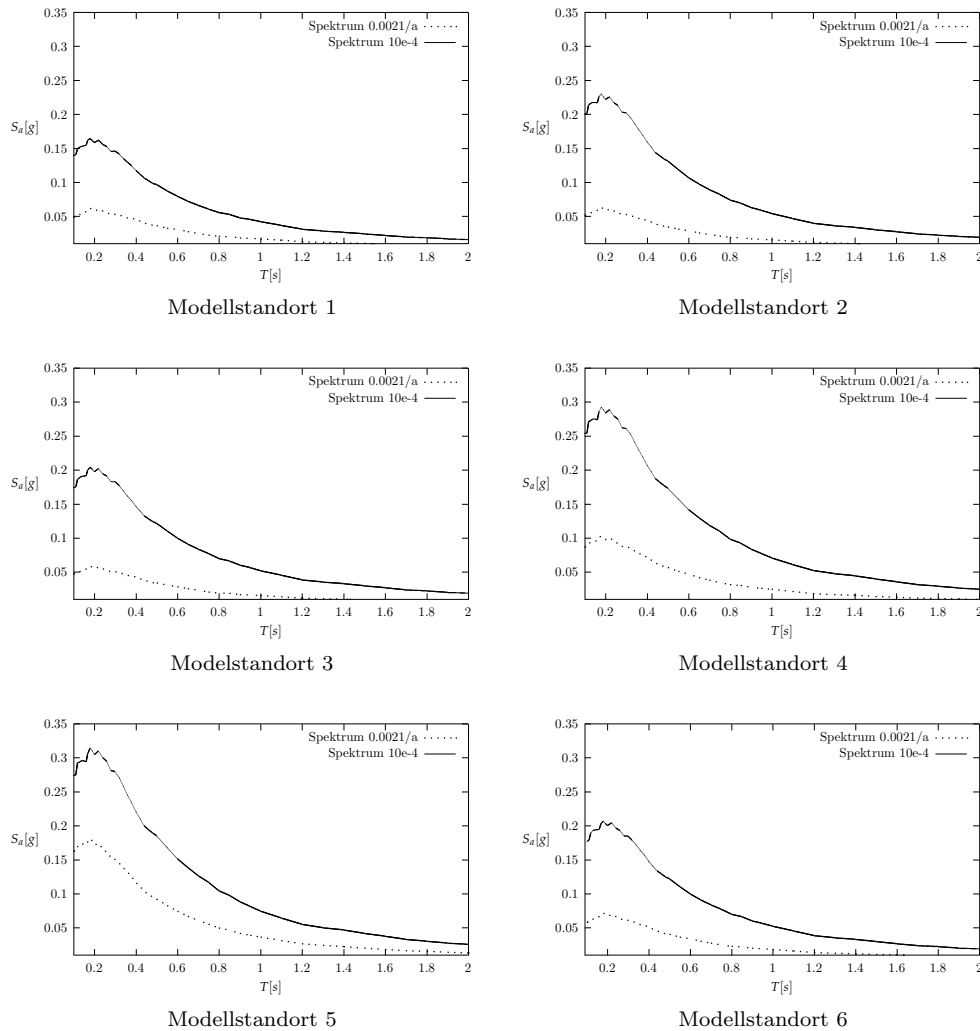


Abb. A.50: Spektren der Bodenbewegungen der 6 Modellstandorte in Südwestdeutschland für felsigen Untergrund und Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [1/a] und 10^{-4} [1/a], berechnet mit Abnahmebeziehung nach *Ambraseys et al.* [12] auf Basis der Epizentrenichte-Methode mit dem Erdbeben-Katalog nach *Ahorner et al.* [9]

A.6.2 Spektren nach DIN 4149 (2005)

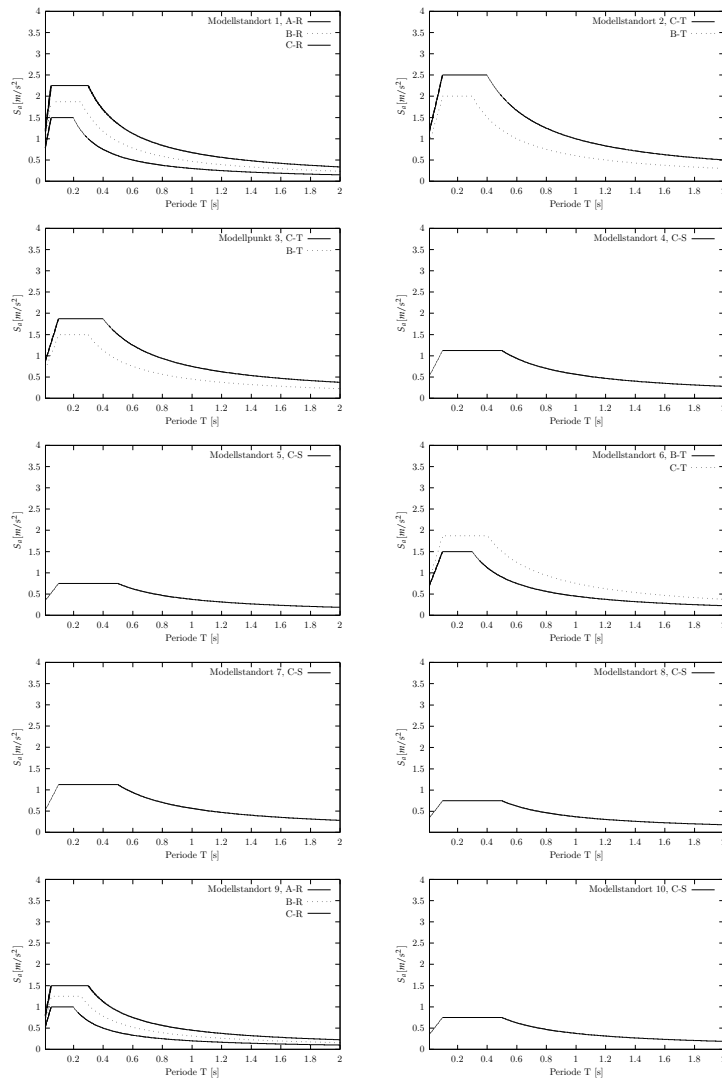
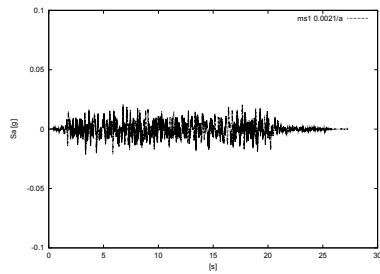
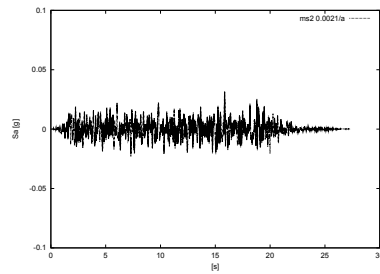


Abb. A.51: Spektren nach DIN 4149 (2005) an den Modellstandorten der Niederrheinischen Bucht (vgl. Abschnitt 7.2)

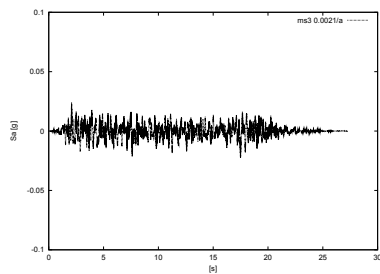
A.7 Synthetische Zeitverläufe



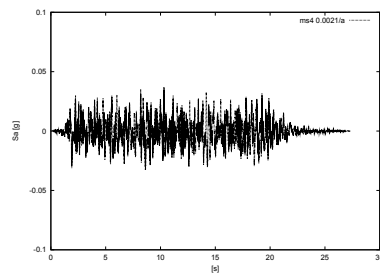
Modellstandort 1



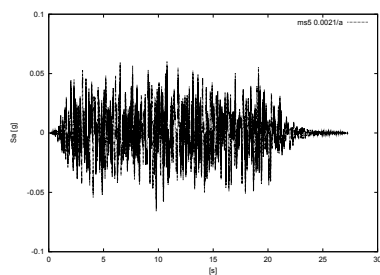
Modellstandort 2



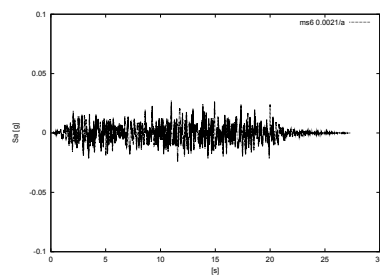
Modellstandort 3



Modellstandort 4



Modellstandort 5



Modellstandort 6

Abb. A.52: Synthetische - Beschleunigungszeitverläufe an den 6 Modellstandorten in Südwestdeutschland für Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von $1/475$ [$1/a$]

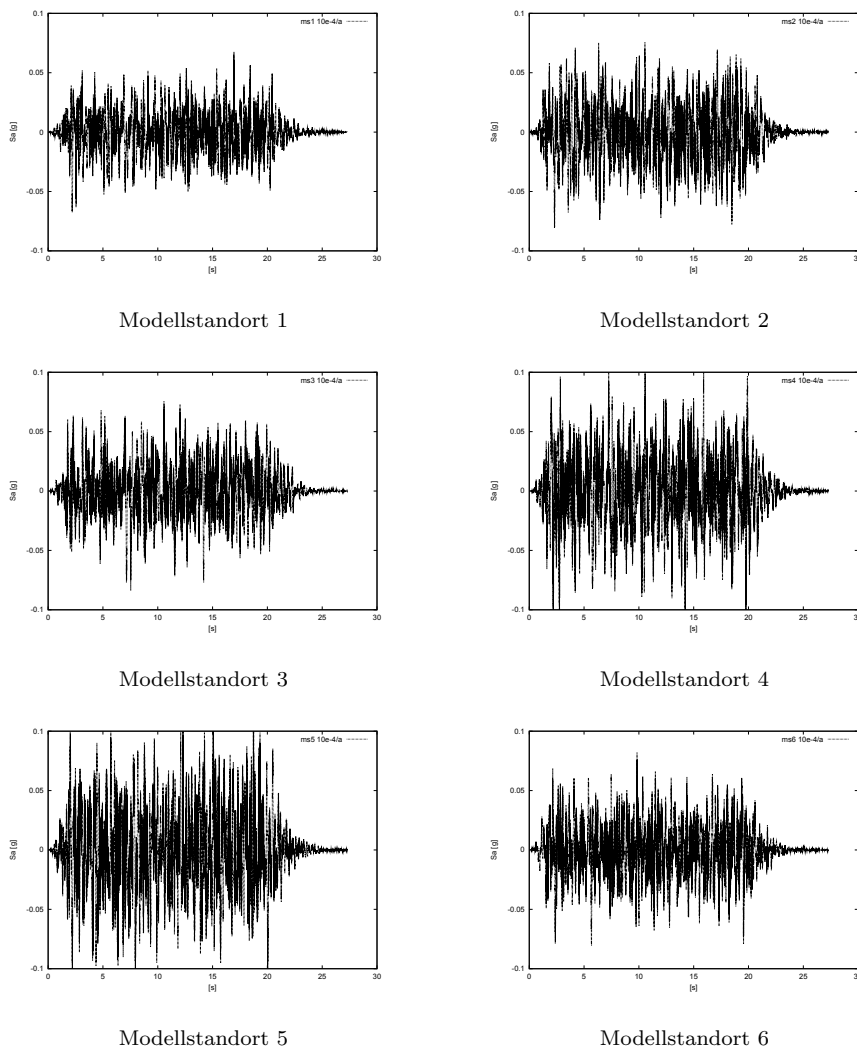


Abb. A.53: Synthetische - Beschleunigungszeitverläufe an den 6 Modellstandorten in Südwestdeutschland für Erdbeben-Eintrittsraten $\lambda(> I)$ von 10^{-4} [1/a]

A.8 Verwendete Software

Bei der Bearbeitung der Aufgaben kam eine Reihe Open Source Software zum Einsatz. Es mir an dieser Stelle nicht möglich, alle an der Entstehung dieser Software beteiligten Personen aufzuzählen. Ich möchte mich an dieser Stelle deshalb bei der Open Source Gemeinschaft für die Vielzahl der zur Verfügung stehenden Tools herzlich bedanken und mit der Tabelle A.2 einen Überblick über häufig eingesetzte Software im Rahmen dieser Arbeit geben.

Tab. A.2: Verwendete Software

System, Dateimanagement, Distributionen	
Linux Kernel	< http://www.kernel.org/ >
XFree86	< http://www.xfree.org/ >
KDE	< http://www.kde.org/ >
cvs	< http://cvshome.org/ >
Debian	< http://www.debian.org/ >
SuSE	< http://www.suse.de/ >
Datenbank und deren Administration	
MySQL	< http://www.mysql.org/ >
phpMyAdmin	< http://www.mysqladmin.de/ >
Compiler, Scriptsprachen, Shell	
gcc GNU C, C++ Compiler	< http://gcc.gnu.org/ >
g77 GNU Fortran	< http://g77.gnu.org/ >
make	< http://www.gnu.org/software/make/make.html >
PHP	< http://www.php.net/ >
bash	< http://www.gnu.org/software/bash/bash.html >
Karten, Koordinatentransformation, Grafiken und Diagramme	
GMT	< http://www.soest.hawaii.edu/gmt/ >
xfig	< http://xfig.org/ >
gnuplot	< http://www.cs.dartmouth.edu/gnuplot_info.html >
gv	< http://gnuwww.epfl.ch/software/ghostview/ghostview.html >
Ghostscript	< http://www.gnu.org/software/ghostscript/ghostscript.html >
Editoren	
xemacs	< http://www.xemacs.org/ >
Quanta Plus	< http://quanta.sourceforge.net/ >
Kile	< http://kile.sourceforge.net/ >
vim	< http://www.vim.org/ >
Textsatz	
TEX, L ^A T _E X	< http://www.tug.org/ >
Tools, Office & Browser	
gawk	< http://www.gnu.org/software/gawk/gawk.html >
gnumeric	< http://www.gnome.org/projects/gnumeric/ >
scilab	< http://scilabsoft.inria.fr/ >
textutils	< http://www.gnu.org/software/textutils/textutils.html >
mc	< ftp://ftp.ibiblio.org/pub/Linux/utils/file/managers/mc >
Mozilla	< http://www.mozilla.org/ >