



Originally published as:

Grünthal, G., Wahlström, R., Stromeyer, D., Schelle, H., Bosse, Ch. (2004): Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen - In: Merz, B., Apel, H. (Eds.), Risiken durch Naturgefahren in Deutschland : Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK), (Scientific technical report , 04/01), GeoForschungsZentrum Potsdam, 135-148.

4.2 Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen

Gottfried Grünthal, Rutger Wahlström, Dietrich Stromeyer, Holger Schelle und Christian Bosse

*GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 5.3 Ingenieurseismologie
Email: ggrue@gfz-potsdam.de*

TP B1: Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen

4.2.1 Zusammenfassung

Im Rahmen von DFNK wird die gesamte Wirkungskette von der Eintreffenswahrscheinlichkeit von Erdbeben bis zum Erdbebeningenieurwesen behandelt. Das Teilprojekt B1 steht am Anfang dieser Wirkungskette, liefert wesentliche Eingangsgrößen für die Teilprojekte B2.1, B2.2, B3.1, B3.2, B4 und C4 sowie die ingenieurseismologischen Grundlagen jeglicher erdbebengerechter Auslegungen für die Praxis des Erdbebeningenieurwesens. Das Teilprojekt B1, in das zudem Zuarbeiten aus den Teilprojekten C1 und C4 einfließen, steht damit im Mittelpunkt der erdbebenrelevanten DFNK-Aktivitäten. Ein neuer Erdbeben-Katalog mit harmonisierten Moment-Magnituden M_w , die mittels Chi-Quadrat-Maximum-Likelihood-Verfahren aus vorhandenen Datenquellen geschätzt wurden, bildet die Grundlage der seismischen Gefährdungsberechnungen für die Niederrheinische Bucht. Der Einfluss von Unsicherheiten in den Eingangsgrößen wird mittels der Technik des „Logischen Baumes“ quantifiziert. Dies ermöglicht die Angabe von Vertrauensintervallen für die präsentierten Gefährdungskarten bzw. Gefährdungskurven der Spitzenbodenbeschleunigungen, der Pseudobeschleunigungen aus Antwortspektren bei 0,4s und 1,0s bzw. der makroseismischen Intensität. Die Gefährdungskarten wurden vereinbarungsgemäß für Festgesteins-Untergrund erstellt, damit hieran die Mikrozonierungsuntersuchungen anschließen können, sowie für die Gefährdungsniveaus von 10% in 50 Jahren (dem für übliche Hochbauten) und für 2% in 50 Jahren (dem Niveau für z.B. Talsperrenauslegungen und Risikobetrachtungen). Die Fehleraussagen – als Novum geophysikalischer Arbeiten – erfolgten in Form der Ergebnisdarstellungen für Medianwerte, Mittelwerte sowie Median plus Standardabweichung. Für die Teilprojekte des Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ erfolgten zudem Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für bestimmte Bebenszenarien für die Risikobewertungen für Köln sowie von Magnitudenszenarien für den Erft-Sprung nahe Köln.

Abstract

In the framework DFNK, the complete process chain from the probability of occurrence of earthquakes to aspects relevant in earthquakes engineering is treated. Subproject B1 marks the beginning of this chain and delivers important input data for the subprojects B2.1, B2.2, B3.1, B3.2, B4 and C4 as well as the engineering characteristics of every earthquake adjusted interpretation for the practice of earthquake engineering. The subproject B1, in which also products from the subprojects C1 and C4 are included, is therefore in the focus of the earthquake relevant DFNK activities. A new earthquake catalogue with harmonized moment magnitudes, M_w , estimated by chi-square maximum-likelihood methodology from available data sets, forms the basis for the seismic hazard calculation for the Lower Rhine embayment.

The influence of uncertainties in the input parameters is quantified with the “logic tree” technique. This allows the specification of confidence intervals for the visualized hazard maps and hazard curves of peak ground acceleration, pseudoacceleration of response spectra at 0.4s and 1.0s, and macroseismic intensity, respectively. According to agreement the hazard maps were constructed for rock fundament - from which the microseismic investigations could then continue - for hazard levels of 10% in 50 years (normal high rises) and 2% in 50 years (the level for e.g. dams). The error statements – a novelty in geophysical studies – were presented as results of the median values, mean values as well as median plus standard deviation. For the subprojects of the cluster “Risk Analysis Earthquakes”, probability estimations for specified earthquake scenarios for the risk calculation of Cologne were also included, as were magnitude scenarios for the Erft-Sprung dislocation near Cologne.

4.2.2 Veranlassung und Problem

Das Gebiet der Niederrheinischen Bucht gehört zu den bebengefährdetsten Gebieten in Europa nördlich der Alpen. Bedeutende Beben sind in dieser Bebenzone bisher beobachtet worden: Im Jahre 1756 nahe Düren mit einer Magnitude M von 6,1, im Jahre 1692 im nord-östlichsten Teil Belgiens mit $M=6,4$ (Grünthal und Wahlström, 2003) sowie in prähistorischer Zeit im gleichen Gebiet mit $M=6,7$ (Camelbeeck et al., 2000). Beben dieser Magnituden an der der Stadt am nächsten liegenden aktiven Bruchstörung in der Erdkruste würden im Großraum Köln nach Allmann und Smolka (2000) Schäden in der Höhe von 14,5 Mrd US \$, 55 Mrd US \$ bzw. 106 Mrd US \$ verursachen.

Mit neuesten und im Rahmen des Projektes weiterzuentwickelnden wissenschaftlichen Methoden sollten abgesicherte Aussagen zur Gefährdung durch Erdbeben erarbeitet werden. Diese Untersuchungen stehen am Anfang der Wirkungskette der komplexen Betrachtung der Erdbebenwirkungen im Rahmen des DFNK bis zum Erdbebeningenieurwesen. Wesentliche Eingangsgrößen für die Teilprojekte B2.1, B2.2, B 3.2, B4 und C4 werden im TP B1 erarbeitet und bereitgestellt. TP B1 nutzt wiederum Daten aus den Teilprojekten C1 und C2. Somit steht TP B1 im Mittelpunkt der erdbebenrelevanten DFNK-Arbeiten.

Erstmals sollten abseits von aktiven tektonischen Plattenrändern paläoseismologische,

geodätische und spezielle geologische Daten in die Gefährdungsabschätzungen einfließen. Alle Ausgangsgrößen sind mit beträchtlichen Fehlern verbunden. Diese Fehler sollten – als Novum geophysikalischer Arbeiten – in den Analysen berücksichtigt werden.

4.2.3 Ziel

Zielstellung des TP B1 ist die Erarbeitung abgesicherter Gefährdungsaussagen bzw. Gefährdungskarten für den Raum Köln/Aachen für Festgesteinsuntergrund, um hierauf die Mikrozonierungsuntersuchungen im Rahmen des Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ aufbauen zu können. Die Gefährdungsberechnungen in TP B1 erfolgen gemäß der Anforderungen der praktischen Erdbebeningenieure für Spitzenbeschleunigungen und für Pseudobeschleunigungen aus Antwortspektren bei 0,4s und 1,0s sowie als Basis für die Erdbeben-Risikobewertungen für die makroseismische Intensität. Als Gefährdungsniveaus wurden 10% in 50 Jahren (dem für übliche Hochbauten) und 2% in 50 Jahren (dem Niveau für z.B. Talsperrenauslegungen und Risikobetrachtungen) vereinbart. Zudem wurden als Zielstellungen von TP B1 Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für bestimmte Bebenszenarien für die Risikobewertung für Köln sowie von Magnitudenszenarien für den Erft-Sprung westlich Kölns fixiert. Die beiden letztgenannten Zielstellungen bilden die Basis der Arbeiten von anderen Teilprojekten im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“.

4.2.4 Methode

Die Lösungswege und Lösungsmethoden lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Einführung eines völlig überarbeiteten, homogenen M_w -basierten Seismizitätsdatenfiles auf der Basis von Chi-Quadrat-Maximum-Likelihood-Schätzungen unter Berücksichtigung der Fehler in den Ausgangsdaten.
2. Weiterentwicklung von Methoden zur realistischen Einschätzung der Erdbebengefährdung unter Einbeziehung von Modellunsicherheiten und Variabilitäten in den Ausgangsgrößen mittels der Technik des „Logischen Baumes“.
3. Entwicklung von seismischen Quellregionenmodellen aus neuen fernerkundungsbasierten Neotektonikdaten unter Berücksichtigung der Bruchtektonik für den Raum von Niederrhein und Ardennen. Diese Regionen sind in unterschiedlichen Varianten und Wichtungen wesentliche Eingangsgrößen für die durchgeführten Gefährdungsberechnungen.
4. Entwicklung einer Methode zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen maximal erwarteter Bebenmagnituden in jeder seismischen Region, wobei erstmals in Europa ein fundiertes Konzept zur Quantifizierung dieses für Risikobewertungen essentiellen Parameters vorgelegt wurde.
5. Durchführung einer seismischen Gefährdungsanalyse für die Niederrheinische Bucht unter Verwendung der neuen, für das Untersuchungsgebiet erarbeiteten Eingangsgrößen und Bewertung der Unsicherheiten mit der Entscheidungsbaummethode.

4.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Seismologische Datenbank

Die Zusammenstellung der Erdbebendaten für Zentral-, Nord- und Nordwesteuropa nach einheitlichen Kriterien ist seit vielen Jahren ein zentrales Arbeitsthema der Sektion 5.3 des GeoForschungsZentrums Potsdam. Als Ergebnis liegt für dieses Gebiet nun eine harmonisierte Datenbank vor, in der 25 lokale Kataloge und 30 Spezialstudien zusammengefasst sind (Grünthal und Wahlström, 2003). Dazu mussten alle Daten nach dem Ereignistyp unterschieden werden, Scheinbeben und Doubletten waren zu eliminieren und die unterschiedlichen Magnituden und Intensitäten I_0 nach Momentmagnituden M_w zu konvertieren, wenn dieser Wert in der Originalquelle nicht vorlag. Diese Konversion erforderte z.T. die Erstellung lokaler Regressionsbeziehungen zwischen den unterschiedlichen Magnituden bzw. Intensitäten, die mit einer Chi-Quadrat-Maximum-Likelihood-Technik abgeleitet wurden, die auch die Fehler in den Ausgangsdaten berücksichtigt (Stromeyer et al., 2004). Konversionsgleichungen von Epizentralintensität I_0 nach M_L wurden für mehrere Einzelkataloge berechnet. Darüber hinaus waren eine Konversion von Lokalmagnituden M_L nach M_w für Zentraleuropa sowie eine Beziehung von Raumwellenmagnituden m_b nach Oberflächenwellenmagnituden M_S für den Nordatlantik erforderlich.

Der Katalog enthält die tektonischen Beben ab der Magnitude $M_w = 3,5$ im Gebiet 44°N - 72°N und 25°W - 32°E für den Zeitraum 1300-1993. Jeder der ca. 5.000 Einträge besteht aus Herdzeit, Herdort, Momentmagnitude M_w , einer Referenz und, falls im Original angegeben, I_0 . Das Untersuchungsgebiet wurde mit Bezug auf die unterschiedlichen Ausgangskataloge in einzelne Polygone unterteilt. Innerhalb eines Polygons wurden nur die Daten einer kleinen Anzahl lokaler Kataloge, ergänzt durch Daten aus Spezialstudien, in die neue Datenbank aufgenommen. Waren die Beben in

mehreren Katalogen oder Spezialuntersuchungen aufgeführt, wurden sie entsprechend einer Prioritätsliste selektiert. Die Berechnung der Magnitude M_w aus anderen Magnituden oder Intensitäten erfolgte nach einem weiteren Prioritätsschema. Dieser Katalog, in den ersten Versionen für Gefährdungsberechnungen im Rahmen von GSHAP konzipiert (Grünthal et al., 1999), bildet nun die Grundlage für vielfältige Seismizitäts- und Gefährdungsanalysen.

Modellunsicherheiten und Variabilitäten der Ausgangsdaten

Mit der Entscheidungsbaummethodik („Logischer Baum“) werden bei der Berechnung der seismischen Gefährdung die Unsicherheiten bzw. Wichtungen der verschiedenen Eingangparameter, Modelle und Funktionen so berücksichtigt, dass die Unsicherheiten im Ergebnis mit Hilfe von Fraktile quantifizierbar werden. Für seismische Gefährdungsanalysen haben Grünthal und Wahlström (2001) eine Reihe von Sensitivitätsstudien für unterschiedliche Eingangparameter durchgeführt. Im Rahmen von TP B1 lassen sich die Sensitivitätsbetrachtungen wie folgt zusammenfassen:

Die Einteilung eines Untersuchungsgebietes in seismische Quellregionen hat einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis von Gefährdungsberechnungen. Die Einbeziehung verschiedener, möglichst unabhängig voneinander abgeleiteter Quellregionenmodelle ermöglicht die Berücksichtigung der epistemischen Unsicherheiten in der Modellwahl.

Die Wahl unterschiedlicher Dämpfungsrelationen kann u.U. zu beträchtlichen Unterschieden in den Gefährdungsaussagen führen, denn die Gefährdungsrechnungen reagieren sehr sensitiv auf diesen Parameter. Wegen bisher in Mitteleuropa völlig unzureichend vorhandener Meßnetze zur Gewinnung von Daten zu Starkbodenbewegungen mit ingenieurseismologischer Relevanz ist man auf die Nutzung

von Daten aus Gebieten mit ähnlicher tektonischer Struktur angewiesen. Da im Untersuchungsgebiet die Abschiebungstektonik dominiert, waren solche Daten aus anderen Teilen der Welt schwerpunktmäßig einzusetzen. Zukünftig sollten verstärkt Anstrengungen unternommen werden, lokale Meßnetze einzurichten, um spezielle gebietstypische Dämpfungsbeziehungen ableiten zu können.

Die maximal zu erwartende Magnitude M_{max} hat für große Eintreffenswahrscheinlichkeiten nur einen geringeren Einfluss auf die Gefährdung, der jedoch mit kleiner werdender Eintreffenswahrscheinlichkeit ansteigt. Die im Rahmen des DFNK geforderte Eintreffenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren liegt bereits in dem Bereich einer erhöhten Relevanz des Parameters M_{max} . Während mit herkömmlichen Berechnungsanalysen stets eine beträchtliche Abhängigkeit der Gefährdung von M_{max} festgestellt wurde, erfasst die Entscheidungsbaummethode den stabilisierenden Effekt unterschiedlicher M_{max} -Werte (Mussion und Winter, 1997). Auf die Entwicklung neuer methodischer Ansätze zur Abschätzung der M_{max} -Verteilungen wurde in TP B1 besonderer Wert gelegt.

Die Wahl eines unteren Magnitudenniveaus M_{min} , ab dem Beben Schäden verursachen können, beeinflusst die Gefährdung für kurze Wiederholungsraten merklich und wächst mit fallendem M_{min} . Die Bedeutung von M_{min} für Gefährdungsanalysen haben Bender und Campbell (1989) umfassend diskutiert.

Herdtiefe und Gefährdung korrelieren klar miteinander (steigende Gefährdung bei geringer werdenden Tiefen), insbesondere für größere mittlere Wiederholungsraten. Die generell große Fehlerbreite bei der Tiefenangabe von Beben sowie die teilweise spärlichen Tiefenwerte in einigen Quellregionen tragen zur Unsicherheit in den Gefährdungsabschätzungen bei. Daher wurden Tiefenverteilungen der signifikanten zu erwartenden Beben in den einzelnen Quellregionen jeweils aus den Beobachtungen größerer Gebiete abgeleitet.

Die obigen Schlussfolgerungen haben allgemeine Gültigkeit, auch wenn viele Einflussgrößen von den Spezifika der zu analysierenden Lokationen abhängen. Die statistischen Aspekte der Bedeutung unterschiedlicher Modellparameter einer Gefährdungsstudie haben Bender und Perkins (1993) analysiert. Rabinowitz und Steinberg (1991) sowie Rabinowitz et al. (1993) untersuchten den kombinierten Einfluss von Parametervariationen auf die Gefährdung und folgerten, dass dieser stärker als bei individueller Betrachtung sein kann.

Seismisches Quellregionenmodell für die Niederrheinische Bucht

Für die Niederrheinische Bucht wurden seismische Quellregionenmodelle aus neuen fernerkundungsbasierten Neotektonikdaten sowie unter Einbeziehung der Bruchtektonik für den Raum von Niederrhein und Ardennen anhand neuester Arbeiten in Belgien, der Niederlande und des Geologischen Dienstes von NRW entwickelt (Legrand (1968), Colbeaux et al. (1980), Ahorner (1994), Geluk et al. (1994) und R. Pelzing, pers. Mitteilung). Verschiedene Varianten solcher Quellregionenmodelldefinitionen finden mit unterschiedlicher seismotektonisch begründeter Wichtung Eingang in die Gefährdungsberechnungen. Diese Modelle erweitern bzw. ersetzen frühere Modelle für Deutschland, Österreich und die Schweiz (D-A-CH; Grünthal et al., 1998). Die Modelle in Abb. 4.2 zeigen verschiedene Kombinationen dieser neuen Zonen zusammen mit den D-A-CH- Zonen, die eine Relevanz für die Gefährdungsberechnungen für die Region Köln/Aachen besitzen (vgl. Abschnitt 5). Eine vertiefte seismotektonische Diskussion würde den hier vorgegebenen Rahmen sprengen.

Maximal erwartete Bebenmagnitude/intensität

Eine Kombination der folgenden zwei Verfahren wurde zur Berechnung der maximal erwarteten Bebenmagnitude genutzt:

(1) Mittels der Methode von Cornell (1994) werden „a priori“ gegebene globale Verteilungsfunktionen von M_w für extensive bzw. nicht-extensive Kontinentalregionen mit regionalen Verteilungsfunktionen der beobachteten M_w -Magnituden, dem b -Wert der Magnitudenhäufigkeitsrelation und der Anzahl „starker“ Beben in der Quellregion multipliziert. Das Resultat ist eine „a posteriori“ Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der maximal erwarteten M_w -Magnitude für jede Zone.

(2) Mittels der Relation $M_w = 4,07 + 0,98 \cdot \log(A)$ zwischen M_w -Magnitude und maximal möglicher Herdfläche A pro Quelle nach Wells und Coppersmith (1994): Hierbei wird angenommen, dass das Herdgebiet entlang seiner ganzen Länge versagt, die Herdfläche damit das Produkt von Herdlänge und Mächtigkeit des seismogenen Teils der Erdkruste ist. Im Niederrheingebiet wurde der seismogene Tiefenbereich auf 30 km bestimmt.

Die so gewonnenen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen, kombiniert mit den Ergebnissen nach (2) wurden diskretisiert, so dass sich fünf repräsentative Inputwerte für M_{max} ergeben. Entsprechende Beispiele zeigt Abb. 4.3.

Ein analoges Verfahren zur Ableitung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für I_0 wurde entwickelt. Die Multiplikation dieser Funktionen mit regionalen, auf maximalen Intensitäten basierten Verteilungen ergibt in Analogie zu den Magnituden eine „a posteriori“ Verteilung der maximal erwarteten Intensität für jede Zone. Jede Verteilung wird aus seismotektonischer Sicht durch den maximal möglichen Intensitätswert analog zu Wells und Coppersmith (1994) beschränkt.

Lokale seismische Gefährdungsanalyse für die Niederrheinische Bucht

Die Inputparameter der Gefährdungsberechnungen für den Raum Köln sind:

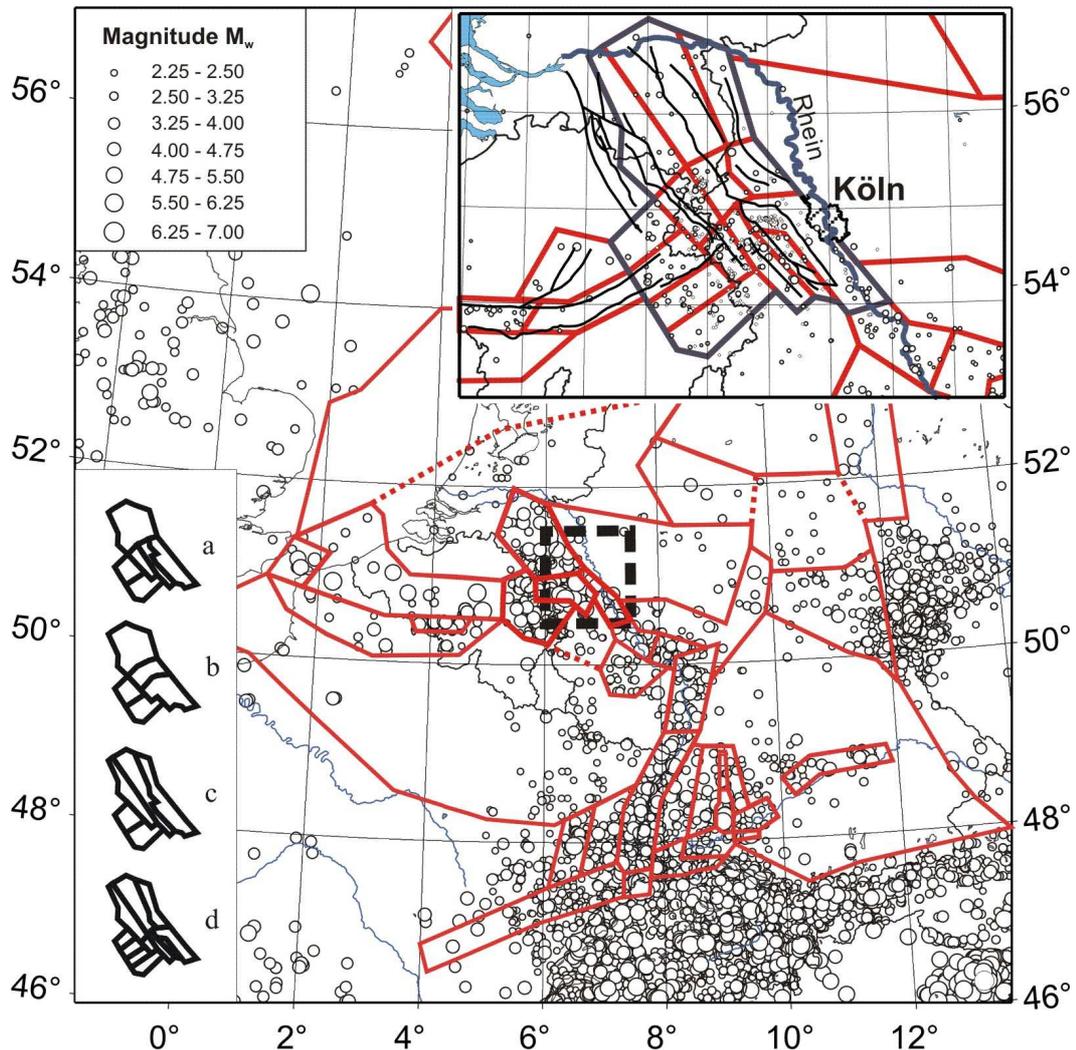


Abbildung 4.2: Verwendete Quellregionenmodelle der Gefährdungsberechnung. Modell Gr ist eine Untermenge des D-A-CH Modells (Grünthal et al., 1998). Die Modelle Ga, Gb, Gc und Gd sind unterschiedliche Kombinationen der neuen, detaillierten Zonierung der Niederrheinischen Bucht mit dem D-A-CH Modell. Nicht dargestellte Zonen des D-A-CH Modells sind irrelevant für die Gefährdungseinschätzung des Untersuchungsgebiets.

- M_w - und I_0 -Werte der neu zusammengestellten Datenbank (Grünthal und Wahlström, 2003);
- Makroseismische EMS-98 Intensitäten (Grünthal, 1998), die eine direkte Umsetzung in Schadensgrade und damit Verlustgrößen gestatten, womit ein unmittelbarer Zugang zur Risikobewertung gegeben ist;
- Neue Regionalisierungsmodelle der seismischen Quellzonen für die Niederrheinische Bucht (vgl. Abb. 4.2);
- Spitzenbodenbeschleunigungen und Pseudobeschleunigungen von Antwortspektren bei Perioden von $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$ für Festgesteinsoberflächen und Spitzenbodenbeschleunigungen für Sande;

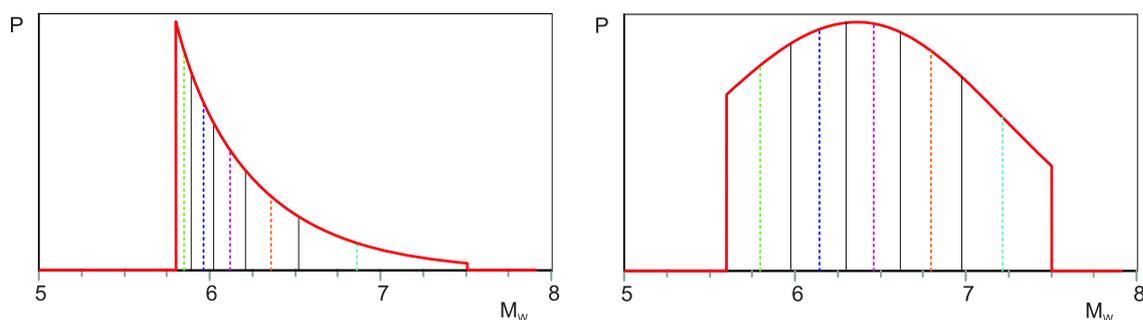


Abbildung 4.3: Beispiele zweier a posteriori Verteilungsfunktion, die jeweils einen Satz maximal erwarteter Magnituden beschreiben. Der untere Grenzwert ist die größte in dieser Zone beobachtete Magnitude/Intensität, der obere Grenzwert errechnet sich nach der Relation von Wells und Coppersmith (1994).

- Kombination von drei Dämpfungsrelationen: (1) Spudich et al., 1999 für Abschiebungstektonik, (2) Boore et al., 1997 für ebenfalls zu erwartende Beben vom Seitenverschiebungstyp sowie (3) unspezifiziert hinsichtlich des tektonischen Regimes;
- Intensitätsdämpfung nach Sponheuer (1960);
- a - und b -Werte der Magnitudenhäufigkeitsrelation für jede Quellregion, sowie ihre entsprechenden Streuung;
- Maximal erwartete Magnituden- und Intensitätsverteilungen;
- Herdtiefenverteilungen von Beben im Rheingebiet und seiner Umgebung.

Die seismischen Gefährdungsberechnungen wurden sowohl für die Bodenbeschleunigungen (Spitzenbeschleunigung und Pseudobeschleunigung von Antwortspektren bei Perioden von $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$) als auch für die Intensitäten durchgeführt. Abb. 4.4 zeigt den „Logischen Baum“ für die Bodenbeschleunigungsberechnungen mit allen Eingangsparametern, ihren Unsicherheiten und Gewichten. Zu jeder Kombination der „Zweige“ des Entscheidungsbaumes gehört ein Satz von Gefährdungslösungen mit unterschiedlicher Eintreffenswahrscheinlichkeit. Die große

Anzahl der Kombinationen gestattet die Berechnung von Fraktile, die die Streuung der Lösungen beschreiben. Abb. 4.5 zeigt die Gefährdungseinschätzung für Köln in Form des Mittelwertes, Medians sowie des Medians ± 1 Standardabweichungs-Fraktile (84% und 16%) der Spitzenbeschleunigung, der Pseudobeschleunigungen nach Antwortspektren und der Intensitäten für jährliche Auftretenswahrscheinlichkeiten bis zu 10^{-4} .

Eine wesentliche Entscheidung im Hinblick auf praktische Anwendungen der Gefährdungskarten betrifft das Gefährdungsniveau der zu berechnenden bzw. darzustellenden seismischen Gefährdung. Wegen der Zielstellung, die Gefährdungsdaten in Risikoaussagen zu überführen, wurde für die hier angefügten Karten das Gefährdungsniveau für die Eintreffens- oder Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren gewählt, welches international zunehmend die Basis für Risikoabschätzungen bildet. Karten für den Median der Gefährdung der Niederrheinischen Bucht für dieses Wahrscheinlichkeitsniveau (Wiederholungsperiode von 2475 Jahren) werden in den Abb. 4.6(a-c) für die Spitzenbeschleunigung bzw. die Pseudobeschleunigung bei $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$ gezeigt. Abb. 4.6(d-f) stellt die 84% Fraktile der Spitzenbeschleunigung bzw. die Pseudobeschleunigung bei $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$ für die gleiche Wiederholungsperiode dar. Die Median-

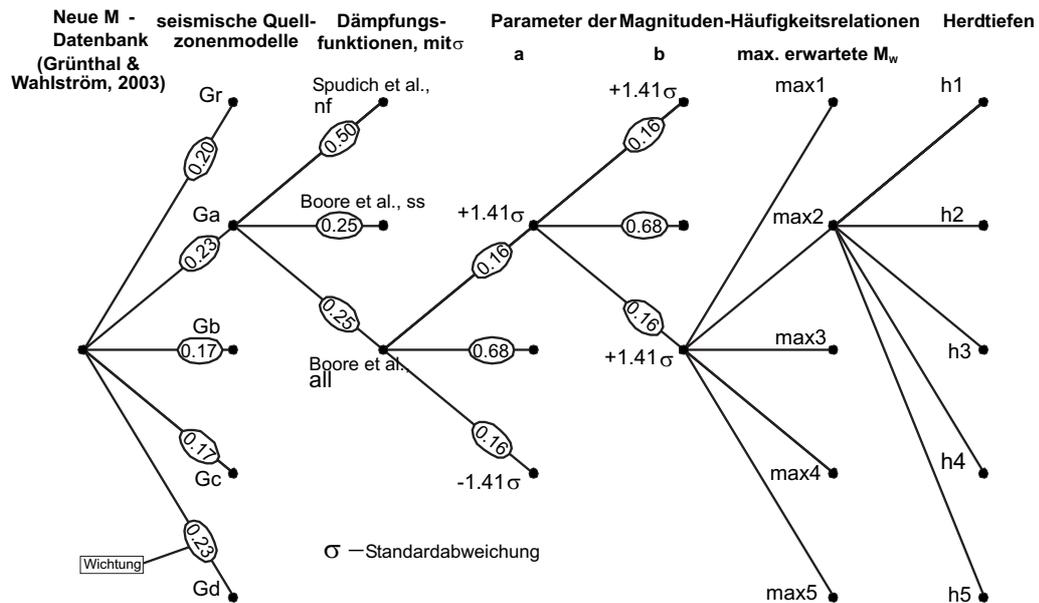


Abbildung 4.4: Entscheidungsbaumstruktur der Eingangsdaten für die Gefährdungsanalyse auf der Grundlage von Beschleunigungen (Spitzenbeschleunigung, $0,4s$ und $1,0s$ Pseudobeschleunigung). Die Herd-zonenmodelle werden in Abb. 4.2 gezeigt. Die Dämpfungs-funktionen wurden in Abschnitt 3 vorgestellt. Die Beziehung von Spudich et al. (1999) gilt für Abschiebungstektonik („nf“), für diejenige von Boore et al. (1997) bezeichnet „ss“ einen angenommenen „Strike-Slip“-Mechanismus und „all“ einen nicht spezifizierten Herdvorgang. Die Herdtiefenzuordnung wird im Text diskutiert. Für intensitätsbasierte Gefährdungsrechnungen findet ein analoger Entscheidungsbaum mit den entsprechenden Intensitätsrelationen Anwendung.

werte sind zu verstehen als die „besten“ Schätzungen unter den gegebenen Voraussetzungen. Die 84% Fraktile repräsentieren eine konservative Schätzung. Die Ergebnisse in den Abb. 4.5 und 4.6 (a-f) beruhen auf Bodenparametern für Festgestein. Im Vergleich dazu zeigt Abb. 4.6g die entsprechende Gefährdungskarte der Spitzenbeschleunigung für weichen Untergrund. Diese berechneten Gefährdungskarten finden direkte Anwendung in der Praxis des Erdbebeningenieurwesens.

Der Erft-Sprung westlich von Köln ist die Hauptverwerfung, die die Stadt seismotektonisch beeinflusst. Für Szenarienbetrachtungen der anderen Teilprojekte im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ wurden die erwarteten maximalen Magnituden und Intensitäten möglicher Beben an dieser Störung, die für Köln relevant sind, ermittelt (Tabelle 4.2). Für die un-

terschiedlichen Gefährdungsniveaus (Wiederholungsraten) werden die Mittelwerte und die 84% Fraktile angegeben.

Probabilistische Gefährdungsabschätzungen erfolgten durch TP B1 bisher vereinbarungsgemäß für die Festgesteinsoberfläche. Hiermit wird den Teilprojekten zur Mikrozonierung die Möglichkeit eingeräumt, den erschütterungsverstärkenden oder -dämpfenden Einfluss in die resultierenden Gefährdungskarten einfließen zu lassen. Für ein kleines Testgebiet südwestlich von Köln wurden von D. Hollnack (pers. Mitteilung) detaillierte S-Wellengeschwindigkeiten (Mittelwerte der obersten $30m$) zur Verfügung gestellt und über die Dämpfungsrelation von Boore et al. (1997) in die Gefährdungsrechnungen integriert. Abb. 4.7. zeigt die Ergebnisse. Es sei darauf hingewiesen, dass diese Testresultate noch

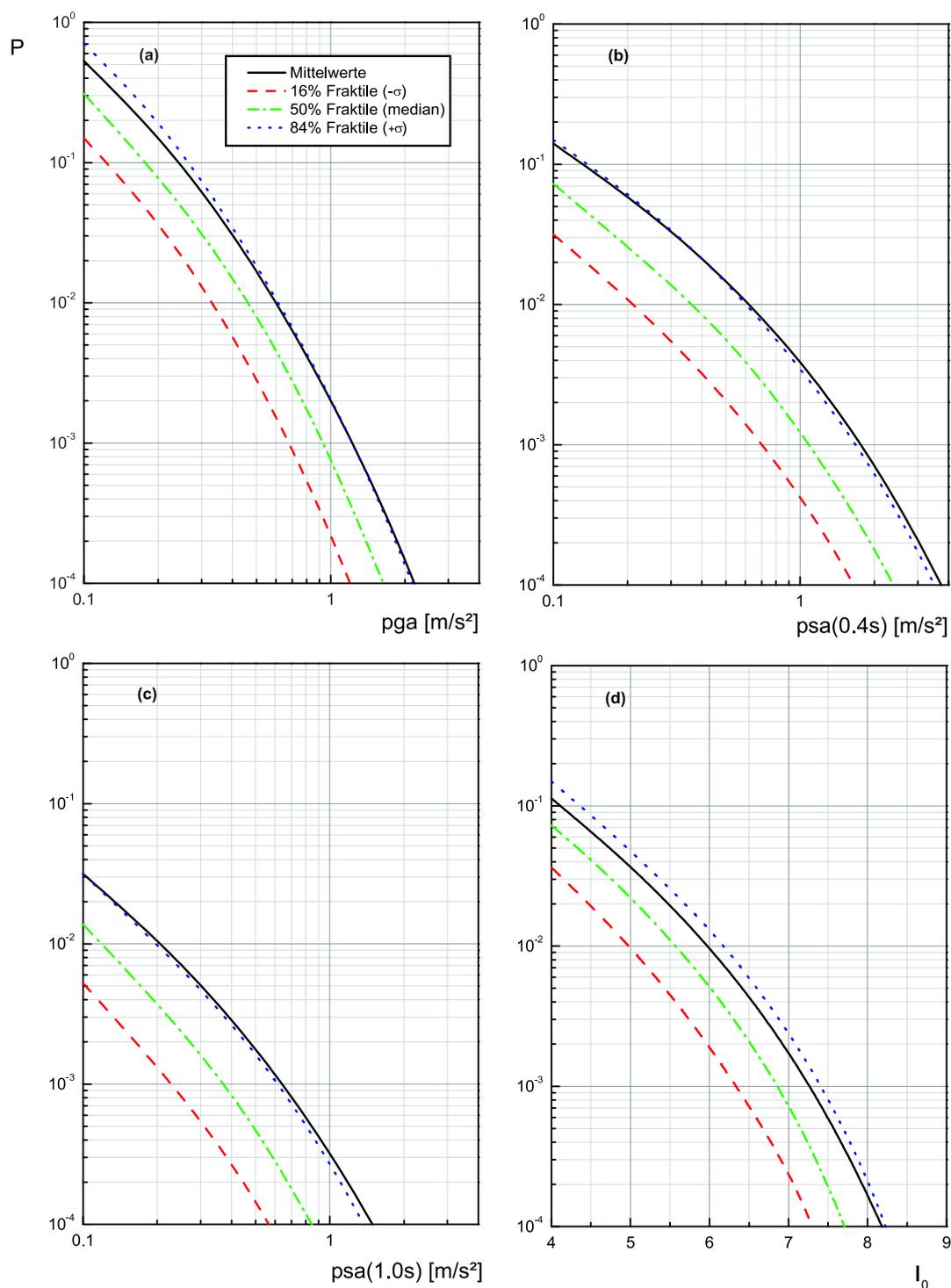


Abbildung 4.5: Mittel, Median und Median ± 1 Standardabweichungs-Fraktile (84% und 16%) der Gefährdungskurven für Köln (6.95°E, 50.93°N) basierend auf: (a) Spitzenbeschleunigung (pga); (b) 0,4s Pseudobeschleunigung (psa); (c) 1,0s Pseudobeschleunigung und (d) Intensität (I_0) unter Annahme einer Festgesteinsoberfläche.

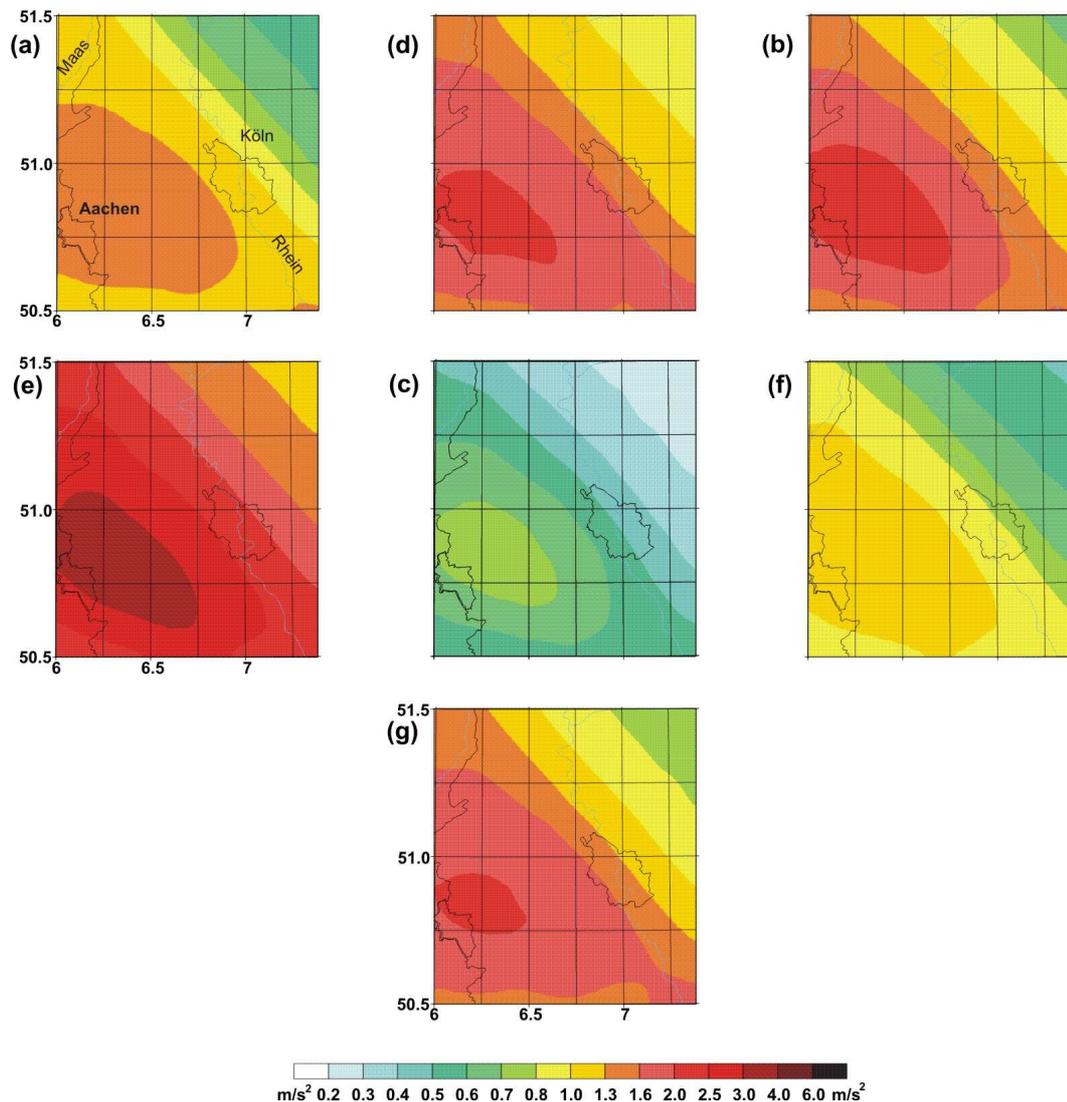


Abbildung 4.6: Erdbebengefährdungskarten der Region Köln/Aachen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren: (a) Spitzenbeschleunigung, Median, Festgestein; (b) 0,4s Pseudobeschleunigung, Median, Festgestein; (c) 1,0s Pseudobeschleunigung, Median, Festgestein; (d) Spitzenbeschleunigung, 84% Fraktile, Festgestein; (e) 0,4s Pseudobeschleunigung, 84% Fraktile, Festgestein; (f) 1,0s Pseudobeschleunigung, 84% Fraktile, Festgestein; (g) Spitzenbeschleunigung, Median, Sand.

keinen endgültigen Charakter haben, da die Geschwindigkeiten zu einem Großteil aus anderen Daten abgeleitet wurden und keine Fehlerbetrachtungen vorliegen. Sie demonstrieren jedoch die technischen Möglichkeiten, Teilaspekte einer Gefährdungsrechnung zu verbessern.

4.2.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die erzielten detaillierten Gefährdungswerte für Köln in Form von Mittel- und Medianwerten sowie entsprechender Fraktile ihrer Standardabweichung sind von entscheidender Bedeutung für eine realistische Erdbebenrisikoeinschätzung dieser Region. In Kombination

T [Jahre]	Beben-Magnitude M_w , am Erft-Sprung mit direkter Relevanz für Köln	Erwartete berechnete Intensitäten für Köln (W)			
		Mittel		84% Fraktile	
475	4,5	VII	(7,1)	VII-VIII	(7,3)
2.475	5,4	VII-VIII	(7,7)	VIII	(7,9)
10.000	6,2	VIII	(8,1)	VIII-IX	(8,4)

Tabelle 4.2: Bebenszenarien für Köln

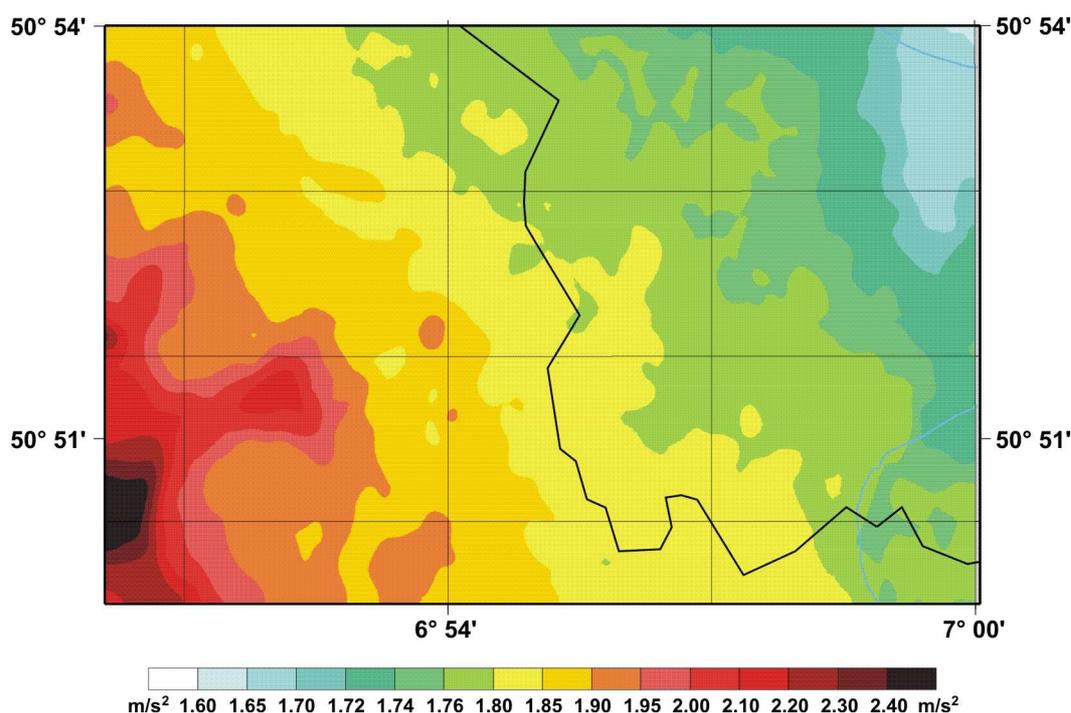


Abbildung 4.7: Erdbebengefährdungskarten eines Testgebiets südwestlich von Köln für eine überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren für Spitzenbeschleunigung unter Verwendung von S-Wellengeschwindigkeiten (Daten von D. Hollnack, pers. Mitteilung) für die Dämpfungsrelation.

mit der EMS-98 Intensitätsskala, welche die Verletzbarkeit und Schädigung unterschiedlichster Gebäudetypen durch Erdbeben beschreibt, bilden sie die Grundlage für vorbeugende ingenieurtechnische Bebenschutzmaßnahmen.

4.2.7 Offene Fragen

Primäres Anliegen dieses Teilprojekts war die Durchführung einer Gefährdungsanalyse für Festgesteinsoberflächen. In künftigen Arbeiten sollte die Verknüpfung mit Mikrozonierungsarbeiten erfolgen.

Mit numerischen Modellierungen konnte im Projektzeitraum kein Beitrag zur Erdbebengefährdungseinschätzung erbracht werden. Ein

	Deformationsrate	Azimut
Kompression (seismologisch)	$3,7 \cdot 10^{-10}$	133.6°N
Extension (seismologisch)	$3,4 \cdot 10^{-11}$	43.6°N
Kompression (geodätisch)	$2,6 \cdot 10^{-9}$	142.6°N
Extension (geodätisch)	$7,6 \cdot 10^{-9}$	52.0°N

Tabelle 4.3: Seismologisch und geodätisch ermittelte horizontale Deformationsraten

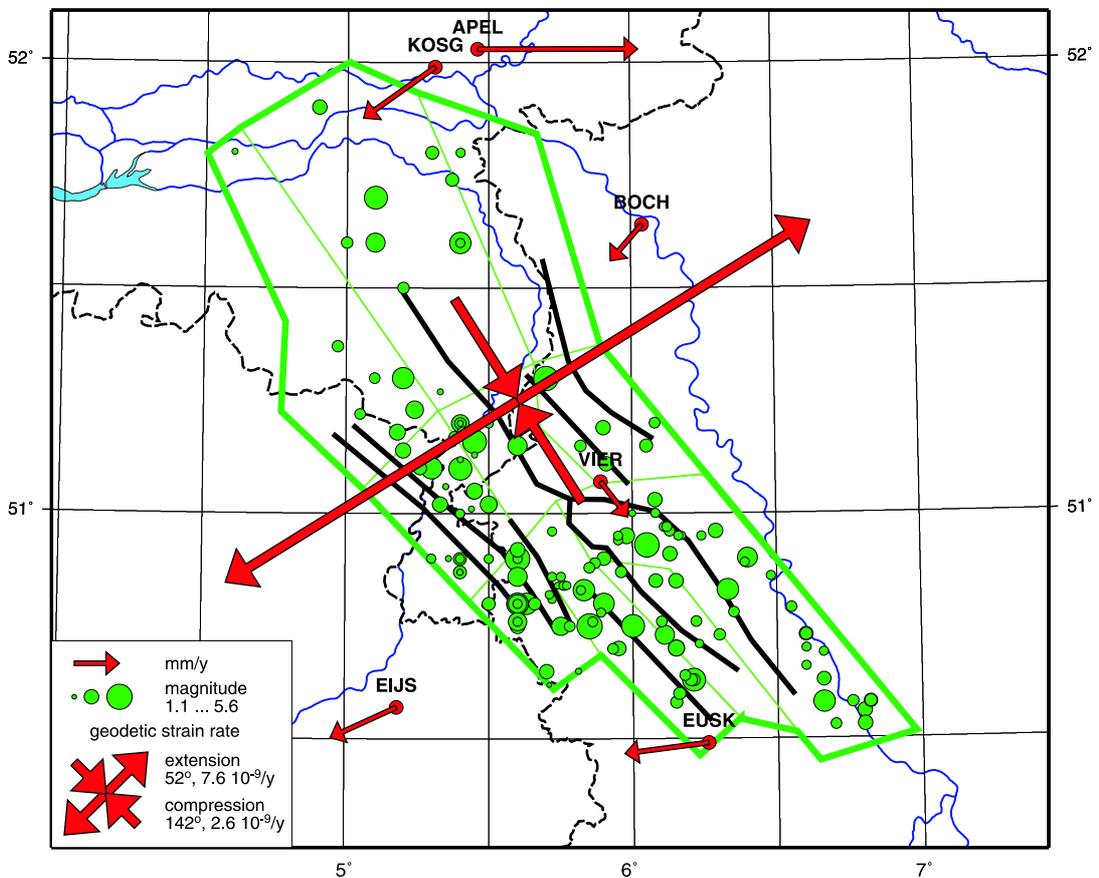


Abbildung 4.8: Bebenverteilung, GPS-Stationsgeschwindigkeiten und geodätische Deformationsrate in der Niederrheinischen Bucht.

quantitativer Vergleich von modellierten und gemessenen rezenten Deformationsfeldern ist mit den aus GPS-Analysen ableitbaren Daten nicht sinnvoll, da die geringen, durch Beben hervorgerufenen Deformationen nicht mit der derzeitigen GPS-Stationsverteilung erfass-

bar sind. Geodätische Daten müssen diesen Bereich tangieren, wenn sie als Randbedingungen für Modellrechnungen genutzt werden sollen.

Die numerischen Modellierungen liefern für ein geologisches Störungsmodell Deforma-

tionsraten in Größenbereichen wie sie von seismologischen Abschätzungen bekannt sind. Für die Kölner Bucht ergibt sich aus dem aktuellen Bebenkatalog und den Gutenberg-Richter-Parametern $a = 1,613$, $b = 0,689$ und $M_{max} = 6,1$ eine skalare Momentrate von $M_0 = 0,77 * 10^{16} Nm/y$ (Abb. 4.8). Ahorner (2001) kommt auf Grund von geologisch-tektonischen Abschätzungen der letzten 700.000 Jahre auf den vergleichbaren Wert $M_0 = 0,7 * 10^{16} Nm/y$. Nimmt man als typischen Herdmechanismus für das Untersuchungsgebiet das letzte große Roermondbeben vom 13. April 1992 an, führt dies zu den in Tab. 4.3 aufgeführten horizontalen seismologischen Deformationsraten. Die Berechnung der geodätischen Deformationsrate beruht auf den vom TP C2 bereitgestellten GPS-Stationsgeschwindigkeiten für das Untersuchungsgebiet (Abb. 4.8).

Unter der Voraussetzung, dass das Gebiet gleichmäßig deformiert wird (konstanter Strain) und sich diese Deformation vollständig in den Messlokalen niederschlägt, ergeben sich unter Berücksichtigung der Messfehler die in Tabelle 4.3 bzw. Abb. 4.8 dargestellten Deformationsraten. Während die allgemeinen geologischen Vorstellungen zur Niederrheinischen Bucht durch die geodätischen Deformationsrichtungen erstaunlich gut abgebildet werden, liegt der Absolutwert der geodätischen Deformationsrate etwa um den Faktor 20 über der seismologischen Rate. Mit den erzielbaren GPS-Messgenauigkeiten von $1-2 mm/y$ sind die erwarteten Raten im Bereich der seismologischen Werte nur erreichbar, wenn das Untersuchungsgebiet wesentlich kleiner (mindestens Faktor 10) gewählt werden kann oder die Stationsanzahl entsprechend größer ist. Erst wenn geodätische Deformationsbefunde in dieser Qualität vorliegen, können mittels numerischer Modellierungen in der für das Teilprojekt konzipierten Art Erdbebengefährdungsanalysen unterstützt werden.

4.2.8 Literatur

Ahorner, L. (1994): Fault-plane solutions and source parameters of the 1992 Roermond, the Netherlands, mainshock and its stronger aftershocks from regional seismic data. *Geologie en Mijnbouw* 73, 199-214.

Ahorner, L. (2001): Abschätzung der statistischen Wiederkehrperiode von starken Erdbeben im Gebiet von Köln auf Grund von geologisch-tektonischen Beobachtungen an aktiven Störungen. *Mitt. Deutsche Geophysikal. Ges.* 2, 2-10.

Allmann, A. und Smolka, A. (2000): Increasing loss potential in earthquake risk – a reinsurance perspective. Germany. European Center for Geodynamics and Seismology Workshop “Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe”, Han-sur-Lesse, Belgium, 13-17 March 2000, 1-4.

Bender, B. und Campbell, K.W. (1989): A note on the selection of minimum magnitude for use in seismic hazard analysis. *Bull. Seism. Soc. Am.* 79, 199-204.

Bender, K. B. und Perkins, D. M. (1993): Treatment of parameter uncertainty and variability for a single seismic hazard map. *Earthq. Spectra* 9, 165-195.

Boore, D.M., Joyner, W.B. und Fumal, T.E. (1997): Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. *Seism. Res. Lett.* 68, 128-153.

Camelbeeck, T., Vanneste, K., Verbeeck, K., Meghraoui, M., Pelzing, R., Hinzen, K., Dost, B. und van der Berg, M. (2000): Long-term seismic activity in the Lower Rhine Embayment. European Center for Geodynamics and Seismology Workshop “Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe”, Han-sur-Lesse, Belgium, 13-17 March 2000, 35-38.

- Colbeaux, J. P., Dupuis, C., Robaszynski, F., Auffret, J. P., Haesaerts, P. und Somme, J. (1980): Le détroit du Pas-de-Calais: un élément dans la tectonique de blocs de l'Europe Nord-Occidentale. *Bulletin d'information des Géologues du Bassin de Paris* 17(4), 41-45.
- Cornell, C. A. (1994): Statistical analysis of maximum magnitudes. In: *The Earthquakes of Stable Continental Regions, Vol. 1: Assessment of Large Earthquake Potential*. Electric Power Research Institute (EPRI) TR-102261-V1, 5-1-5-27.
- Geluk, M. C., Duin, E. J. Th., Duser, M., Rijkers, R. H. B., van den Berg, M. W. und van Rooijen, P. (1994): Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijnbouw* 73, 129-141.
- Grünthal, G. (ed.) (1998): European Macroseismic Scale (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie (Luxembourg)* 15, 99 pp.
- Grünthal, G. und Wahlström, R. (2001): Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. *J. Earthq. Engrg.* 5, 309-328.
- Grünthal, G. und Wahlström, R. (2003): A M_w based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions. *J. Seismol.*, 7, 507-531.
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. und Lenhardt, W. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz, *Bautechnik* 10, 19-33.
- Grünthal, G. and the GSHAP Region 3 Working Group (1999): Seismic hazard assessment for Central, Northern and Northwestern Europe: GSHAP Region 3. *Ann. Geofis.* 42, 999-1011.
- Legrand, R. (1968): Le Massif de Brabant. *Mémoires pour servir à l'explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique* 9, 148 pp.
- Musson, R. M. W. und Winter, P. W. (1997): Seismic hazard maps for the UK. *Natural Hazards* 14, 141-154.
- Rabinowitz, N. und Steinberg, D. M. (1991): Seismic hazard sensitivity analysis: A multi-parameter approach. *Bull. Seism. Soc. Am.* 81, 796-817.
- Rabinowitz, N., Steinberg, D. M. und Leonard, G. (1993): Technical note: When does seismic hazard jump? *Earthq. Spectra* 9, 877-883.
- Sponheuer, W. (1960): Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik. *Freib. Forschungsh. C* 88, 117 pp.
- Spudich, P., Joyner, W.B., Lindh, A.G., Boore, D.M., Margaris, B.M. und Fletcher, J.B. (1999): SEA99: A revised ground motion prediction relation for use in extensional tectonic regimes. *Bull. Seism. Soc. Am.* 89, 1156-1170.
- Stromeyer, D., Grünthal, G. und Wahlström, R. (2003): Chi-square maximum likelihood regression for seismic strength parameter relations, and their uncertainties, with applications to an M_w based earthquake catalogue for Central, Northern and Northwestern Europe. *J. Seismol.*, 8, 143-153.
- Wells, D.L. und Coppersmith, K.J. (1994): New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 974-1002.