

GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

GeoForschungsZentrum Potsdam

Zweijahresbericht

2000/2001

Zweijahresbericht

GeoForschungsZentrum
Potsdam

2000/2001

IMPRESSUM

Herausgeber:
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)
Stiftung des öffentlichen Rechts
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Redaktion:
Dr. Jörn Lauterjung
Franz Ossing

Layout:
Otto Grabe (GFZ) & Druckerei Arnold

Druck:
Druckerei Arnold
Am Wall 15
14979 Großbeeren

© GFZ Potsdam 2002

Das GFZ Potsdam ist Mitglied
der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren e.V.

Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen: Von der Gefährdung zum Risiko – Beispiel Erdbebenmikrozonierung

Bruno Merz, Jana Friedrich, Jochen Zschau, Peter Bormann, Stefano Parolai, Klaus Milkereit, Sandra Richwalski, Frank Roth, Rongjian Wang

The German Research Network for Natural Disasters (Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen, DFNK) links scientific experience and know-how in the field of natural disaster research. It aims at providing scientific fundamentals for an advanced risk management. The network integrates knowledge, methods and data of natural, engineering and social sciences, in order to develop interdisciplinary disaster management strategies. One of the foci of the network is risk analysis by investigating the complete risk chain from the causing natural event to the consequent damages. Common concepts are used and applied to selected areas of relatively high-risk in Germany for different types of hazards (earthquakes, floods and storms) with a view to facilitate the comparison of risks and of methods applied in different disciplines.

Das Deutsche Forschungsnetz Naturkatastrophen

Trotz vielfältiger Bemühungen während der im Jahre 1999 zu Ende gegangenen Internationalen Dekade für die Reduzierung von Naturkatastrophen (IDNDR) steigen die Schäden durch extreme Naturereignisse weiterhin stark an (Münchener Rück, 2000). Dafür gibt es vielfältige Gründe, z.B. zunehmende Bevölkerungsdichte und Akkumulation risikoträchtiger Industrie in gefährdeten Gebieten oder verstärkte Wechselwirkungen zwischen natürlichen und anthropogenen Katastrophenursachen (Mileti, 1999). Unterstützt durch das Deutsche IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e.V., wurden diese Gründe mehrfach erörtert (Lass et al., 1998; Plate et al., 1999; Linneweber, 2000; Plate und Merz, 2001). Daraus ergab sich die Forderung nach einer verstärkten Zusammenarbeit verschiedener Fachdisziplinen, um Erfahrungen, Daten und Methoden aus Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften zusammenzuführen. Ebenso wurde eine stärkere Integration von Wissenschaft und Praxis gefordert, da wissenschaftliche Erkenntnisse nur ungenügend in die Praxis des Katastrophenmanagements umgesetzt werden.

Das Deutsche Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK) ist eine Initiative des GeoForschungsZentrums Potsdam (GFZ) mit dem Ziel, einen Beitrag zur Überwindung dieser Defizite zu leisten. In Deutschland vorhandenes wissenschaftliches und technisches Potenzial im Bereich Naturkatastrophen soll zu der erforderlichen integrativen Katastrophenforschung gebündelt werden. Dafür werden im DFNK Erfahrungen und Daten aus Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften so zusammengeführt und aufbereitet, dass die jeweils besten Erfahrungen und Systeme in der Praxis des Katastrophenmanagements umgesetzt werden können.

Die Nutzer umfassen Katastrophenschutz, Politik (Bund, Länder, Gemeinden), Wirtschaft (Versicherer, Bauwirtschaft etc.), Wissenschaft und die Öffentlichkeit. Neben dem GFZ Potsdam beteiligen sich 14 Einrichtungen aus Deutschland und Österreich am DFNK (Abb. 1). Das Projekt wird seit Januar 2000 mit einer Laufzeit von drei Jahren aus dem Strategiefonds des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert.

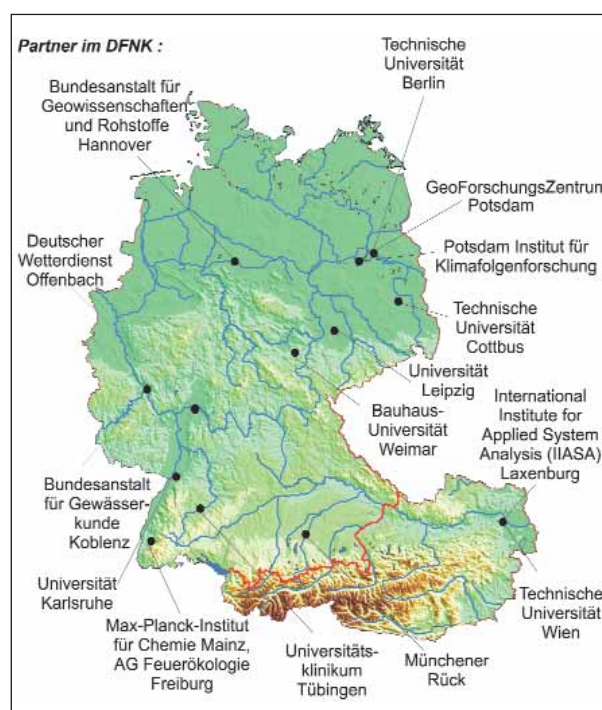


Abb. 1: Partner des DFNK
Partners of the DFNK

Das Ziel des DFNK besteht darin, die wissenschaftlichen Grundlagen für ein modernes Risikomanagement von Naturkatastrophen zu entwickeln und potenziellen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Dazu werden extreme Naturereignisse und ihre Auswirkungen auf den Menschen und seine Umwelt quantitativ beschrieben. Mit Hilfe von Szenariosimulationen, probabilistischen Methoden zur Gefährdungs- und Vulnerabilitätsabschätzung und Monitoringansätzen werden das heutige Risiko und zukünftige Risikoveränderungen aufgrund des globalen Wandels (Klimavariabilität, zunehmende Nutzungsdichte in gefährdeten Bereichen usw.) dargestellt. Diese Informationen werden aufbereitet und (teilweise) über Informationssysteme bereit gestellt, so dass sie zur Unterstützung von Entscheidungen im Katastrophenmanagement sowie zur Information von Politik und Öffentlichkeit genutzt werden können.

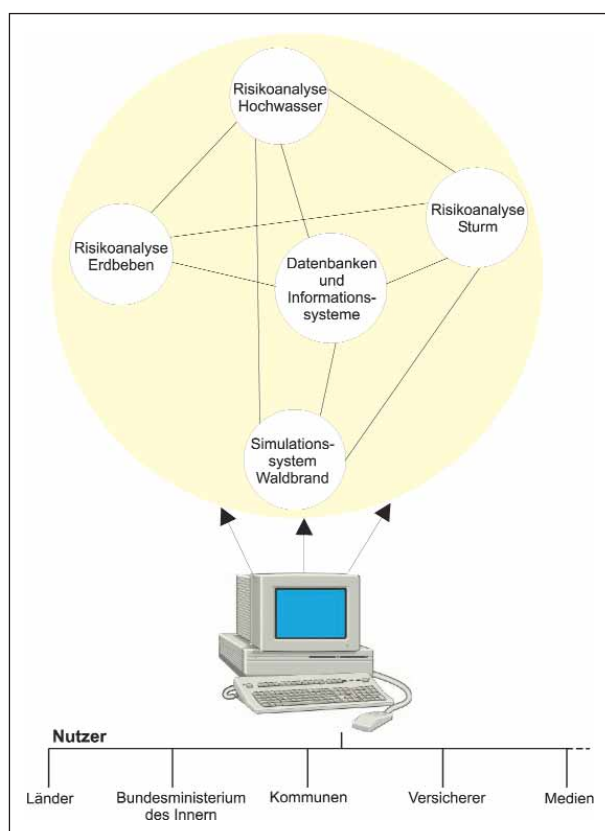


Abb. 2: Struktur des DFNK mit Nutzern und thematischen Clustern
Structure of the DFNK with stakeholders and thematically oriented clusters

Das DFNK untersucht die Naturgefahren Sturm, Waldbrand, Hochwasser und Erdbeben. Die Arbeiten werden in zwei regionalen Schwerpunkten durchgeführt. Für das Rheinland (mit Fokus auf Köln) werden die Naturgefahren Sturm, Hochwasser und Erdbeben und deren Auswirkungen analysiert. Diese Region ist besonders durch Hochwasser und Sturm, aber auch durch Erdbeben gefährdet. Aufgrund der vergleichsweise hohen Gefährdung, aber auch aufgrund des hohen

Schadenspotenzials und der dort geleisteten Vorarbeiten eignet sich diese Region in besonderer Weise für Risikountersuchungen, wie sie im DFNK durchgeführt werden. Der zweite regionale Schwerpunkt ist Brandenburg. Für diese Region wird die Waldbrandgefahr untersucht. Durch die geringen Niederschläge, sandige Böden und eine vergleichsweise einheitliche Waldzusammensetzung ist Brandenburg stark waldbrandgefährdet.

Die Partner und Teilprojekte im DFNK organisieren sich in fünf thematischen Clustern (Abb. 2), in denen mehrere Partner gemeinsame Produkte erarbeiten. Die Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“, „Risikoanalyse Erdbeben“ und „Risikoanalyse Sturm“ verknüpfen umfangreiche Daten, Methoden und Simulationsmodelle zu Tools, mit deren Hilfe sich die aktuellen Risiken bedingt durch die verschiedenen Naturgefahren darstellen, zukünftige Risikoveränderungen erkennen und Empfehlungen zu angemessenen Sicherheitskonzepten und zur Risikominderung ableiten lassen. Der Cluster „Simulationssystem Waldbrand“ arbeitet an der Entwicklung eines Monitoring-, Simulations- und Frühwarnsystems zur Waldbrandgefahr in Brandenburg. Mit dem Simulationssystem sollen die Auswirkungen möglicher Klima- und Waldzustandsänderungen auf die Feuergefährdung in Brandenburg und deren Einfluss auf die Vegetationsdynamik analysiert werden. Der Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ vereinigt Teilprojekte, die Daten bereitstellen (z.B. flächendeckende Basisdaten durch Satellitentechnologie) und Informationen und Tools in übergeordneten Informationssystemen (z.B. Clearinghouse, Data-Warehouse, schnelles Informationssystem für Erdbeben) integrieren, die für die Katastrophenvorsorge und den Notfall hilfreich sind.

Welchen Schutz können/wollen wir uns leisten?

Das Katastrophenmanagement von Naturgefahren zielt auf die Verminderung bzw. Vermeidung des Risikos aufgrund extremer Naturereignisse. Ein rationales Katastrophenmanagement erfordert die Erfassung des bestehenden Risikos und seiner möglichen Änderungen (z.B. Auswirkungen von Schutzmaßnahmen). In den letzten 30 Jahren wurde die Risikoanalyse methodisch in verschiedenen Feldern vorangetrieben. Dazu zählen insbesondere die Sicherheit von technischen Anlagen (Kernkraftwerke, Raumfahrt, chemische Betriebe etc.), der konstruktive Ingenieurbau, Auswirkungen von Schadstoffen auf die menschliche Gesundheit und der Versicherungssektor (Molak, 1997). Dabei beinhaltet der Begriff Risiko die beiden Aspekte Gefährdung und Vulnerabilität (Abb. 3). Unter Gefährdung wird ein potenziell gefährlicher Prozess verstanden, der durch seine Stärke, seine räumliche Ausdehnung etc. und durch seine Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben wird. Vulnerabilität bezieht sich auf die potenziell gefährdeten Objekte, deren „Wert“ und Anfälligkeit gegenüber der Gefährdung. Damit umfasst das Risiko explizit die Wahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses und die dabei zu erwartenden Verluste und Schäden. Die

Methoden der Risikoanalyse haben die Abschätzung dieser zu erwartenden Verluste einschließlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zum Ziel.

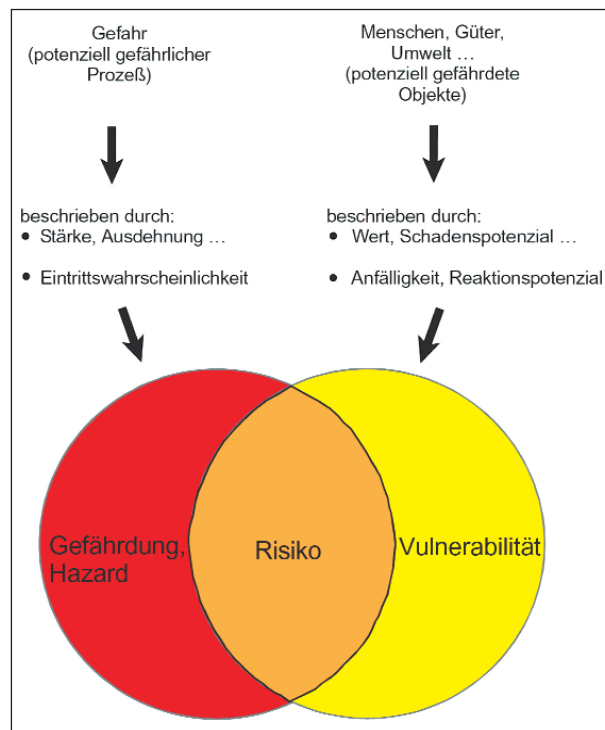


Abb. 3: Risikodefinition in der Sicherheitswissenschaft
Definition of risk in safety sciences

Bei Naturgefahren gibt es sehr unterschiedliche Möglichkeiten, Risiken zu vermindern. Diese reichen von der Vorbeugung (z.B. bauliche Schutzmaßnahmen, Nutzungseinschränkungen in gefährdeten Gebieten) über die Erhöhung der Bereitschaft (z.B. Einführung von Notfallplänen, Betrieb von Frühwarnsystemen) bis zur Bewältigung im Schadensfall (z.B. Nothilfe, Versicherungsleistungen). Allerdings verursachen Maßnahmen zur Risikominderung oft hohe – und im allgemeinen öffentliche – Kosten. Dabei gilt das Prinzip des kleiner werdenden Ertrags. Bei einem großen Ausgangsrisiko erreicht man häufig schon mit vergleichsweise kleinen Investitionen einen großen Nutzen, also eine deutliche Verminderung des Risikos. Weitere Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos werden immer uneffektiver. Optimale Maßnahmen sind solche, die das Ausgangsrisiko mit einem günstigen Kosten-Nutzen-Verhältnis ausreichend reduzieren. Abb. 4 zeigt schematisch den Vergleich von Schutzmaßnahmen in einem Kosten-Risiko-Diagramm. Werden die Kosten für Schutzmaßnahmen und das Risiko in der gleichen Dimension (z.B. monetäre Einheiten) ausgedrückt, dann ergibt sich aus der Tangente an die Risikoreduktionskurve mit der Steigung -1 die Grenzbedingung: Ab diesem Punkt wird der Aufwand für Schutzmaßnahmen größer als die dadurch erzielte Risikoreduktion. Diese Überlegungen weisen auf die Notwendigkeit hin, Kosten (Aufwand für Schutzmaßnahmen) und Nutzen (Risiko-

minderung) abzugleichen: In Anbetracht begrenzter Mittel stellt sich die Frage nach der optimalen Reduktion des Risikos: „Wie sicher ist sicher genug?“. In einer sehr pointierten Form wird dieser Ansatz von Lind et al. (1991) vertreten, die dafür plädieren, Kosten und Nutzen aller möglichen Schutzmaßnahmen zu erfassen, und jene Maßnahme auszuwählen, die den Netto-Nutzen für die Gesellschaft maximiert.

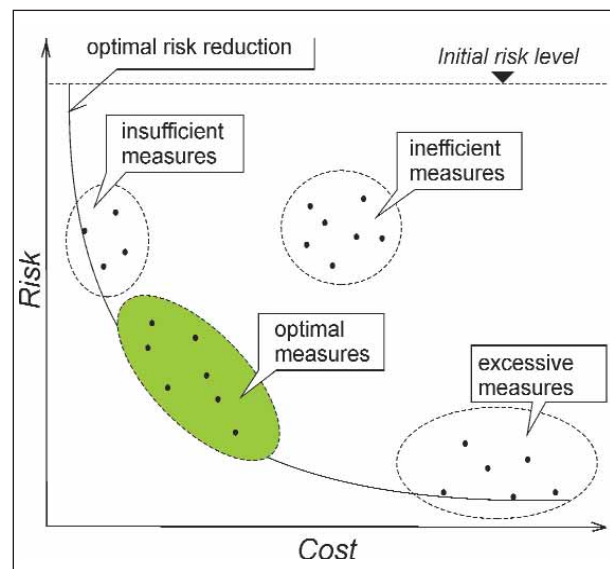


Abb. 4: Kosten-Risiko-Diagramm zur vergleichenden Bewertung von Schutzmaßnahmen (verändert nach Lind et al., 1991, und Einstein, 1997)

Cost-risk-diagram for comparative assessment of safety measures (modified after Lind et al., 1991, and Einstein, 1997)

Es ist klar, dass Entscheidungen im Umgang mit Risiken nicht allein an Kosten-Nutzen-Überlegungen ausgerichtet werden können, insbesondere, wenn Menschenleben auf dem Spiel stehen. Die Arbeiten zur Wahrnehmung von Risiken haben gezeigt, dass Risiken unterschiedlich wahrgenommen und bewertet werden (z. B. Renn 1998a, b). Risiko ist ein mehrdimensionaler Begriff, und Risiken werden in Abhängigkeit des Kontextes der Situation bewertet (Renn, 1993, Slovic, 1998). Aus diesen Gründen können Risikoanalysen bzw. darauf aufbauende Kosten-Nutzen-Untersuchungen nicht als alleinige Richtschnur für Entscheidungen im Katastrophenmanagement dienen. Sie liefern jedoch einen methodischen Ansatz zur systematischen und transparenten Erfassung des Risikos.

Weiterhin ist zu bedenken, dass Risiken durch Naturgefahren nicht vollständig auf Null reduziert werden können. Trotz teurer Sicherheitsmaßnahmen kann die Möglichkeit, dass ein extremes Naturereignis Schäden und Verluste verursacht, nicht ausgeschlossen werden. Deshalb ist es notwendig, neben vorbeugenden Maßnahmen auch die Bereitschaft und das

Bewältigungspotenzial für jene Fälle zu stärken, wenn Schutzmaßnahmen nicht ausreichen oder versagen. Jetzt ist die zentrale Frage „Was passiert, wenn es passiert?“ Die Methoden der Risikoanalyse liefern auch hierfür einen Beitrag und sind deshalb ein wesentliches Element des Managements von Naturgefahren (Abb. 5).



Abb. 5: Vorbeugung und Bereitschaftserhöhung als Säulen der Sicherheit bei Naturkatastrophen
Prevention and preparedness as a base for natural disaster reduction

Risikoanalysen für die Naturgefahren Erdbeben, Hochwasser und Sturm im Raum Köln

Lind et al. (1991) diskutieren das Management von technologischen Risiken und kommen zu dem Schluss, dass Risikomanagementstrategien erratisch und unsicher sind, mit der Konsequenz, dass große Ausgaben auf Maßnahmen verwendet werden, die das Risiko nicht entsprechend verringern. Diese Aussage scheint auch für das Management von Naturgefahren gültig zu sein. So wachsen das Katastrophenbewusstsein und die Bereitschaft zur Vorsorge unmittelbar nach einer Katastrophe und sinken mit zunehmender Dauer katastrophenfrier Perioden (Solecki and Michaels, 1994), d.h. Aktivitäten des Katastrophenmanagements werden gewöhnlich durch spezielle Katastrophenerfahrungen gesteuert. Dies trägt nicht zu einer ausgewogenen Vorsorge gegen Naturgefahren bei.

Diese Situationsbeschreibung ist auch für Deutschland gültig. Obwohl Deutschland sehr viel weniger als viele andere Länder durch Naturgefahren betroffen ist, können extreme Naturereignisse beträchtliche Schäden (in der Größenordnung von Milliarden EURO) verursachen. Trotzdem mangelt es in Deutschland an einer systematischen Erfassung und Bewertung des Risikos durch Naturkatastrophen. Bislang existieren keine allgemein zugänglichen Daten und Instrumentarien, um die Wirkung verschiedener Desastertypen auf die Gesellschaft abzuschätzen. Ein Teil der Aktivitäten im DFNK zielt auf eine Verbesserung dieser Situation.

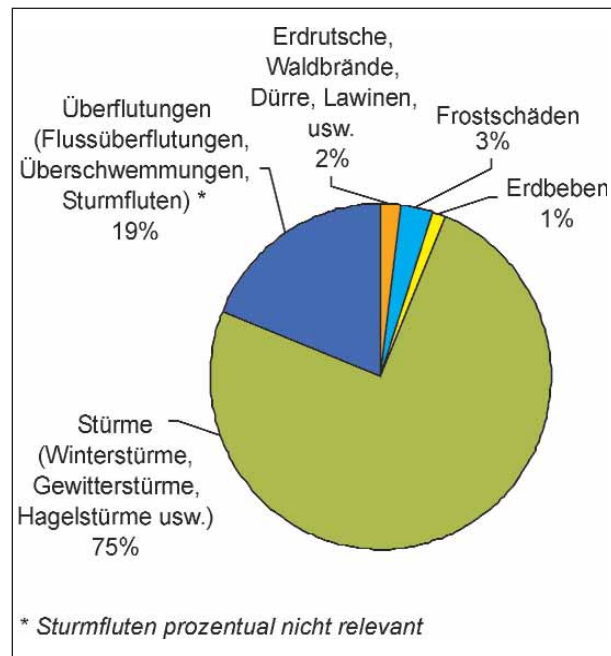


Abb. 6: Bedeutung verschiedener Naturgefahren für Deutschland (Daten aus Münchener Rück, 1999); **a)** Relative Verteilung der verschiedenen Naturgefahren der Jahre 1970-1998 in Deutschland nach volkswirtschaftlichen Schäden; **b)** Schadenspotenziale von großen Naturereignissen in Deutschland.
Significance of different natural hazards for Germany (Data from Münchener Rück, 1999); **a)** Relative distribution of the economic damage due to different natural hazards in Germany (1970-1998); **b)** Damage potential of large natural hazards in Germany.

Abb. 6a zeigt die relative Verteilung der volkswirtschaftlichen Schäden der Jahre 1970 bis 1998 durch die verschiedenen Naturgefahren in Deutschland: 75 % der Schäden wurden durch Stürme verursacht, 19 % durch Überschwemmungen und 1 % durch Erdbeben. Legt man diese Statistik für die Bewertung der verschiedenen Naturgefahren zugrunde, so könnte gefolgert werden, dass der größte Teil der Aufwendungen zum Schutz gegen Naturgefahren in Maßnahmen zur Reduzierung von Sturmschäden investiert werden sollte. Eine andere Folgerung könnte sich ergeben, wenn man mögliche Großschadensereignisse betrachtet (Abb. 6b). Beispielsweise haben Allmann et al. (1998) die Schäden an Privatbesitz für hypothetische Erdbeben im Raum Köln abgeschätzt und gefolgert, dass Erdbeben nicht ausgeschlossen werden können, die Schäden in der Größenordnung von 100 Mrd. US-\$ verursachen.

Es stellt sich nun die Frage, ob nicht doch ein größerer Teil der Aufwendungen in die Vorsorge von Ereignissen (wie Erdbeben) investiert werden sollte, die eine sehr geringe Eintrittswahrscheinlichkeit besitzen, dafür aber außerordentlich hohe Schäden verursachen können. Im allgemeinen besteht eine Beziehung zwischen der Eintrittswahrscheinlichkeit von Schadensereignissen und der Höhe der Schäden: Die Eintrittswahrscheinlichkeit nimmt mit zunehmendem Schadensausmaß ab,

d.h. „kleine Desaster“ sind häufiger als „große Desaster“. Weil „große Desaster“ oft außerhalb des Erfahrungsbereichs liegen, konzentriert sich die Katastrophenvorsorge auf relativ häufige Ereignisse, die vergleichsweise kleine Schäden hervorrufen (Alexander, 1995). Die Gesellschaft ist jedoch eher durch „große Desaster“ gefährdet. Diese Überlegungen verdeutlichen, dass eine transparente und konsistente Analyse verschiedener Risiken, die eine Region gefährden, notwendig ist. Risikoanalysen erlauben - unter bestimmten Annahmen - den Vergleich verschiedener Risiken und tragen damit zu ausgewogenen Schutzmaßnahmen bei (Bohnenblust und Slovic, 1998). Im DFNK wird an einer Bewertung der verschiedenen Risiken durch die Naturgefahren Sturm, Erdbeben und Hochwasser gearbeitet. Als gemeinsame Region wurde die Region Köln gewählt. Diese Region ist für einen Vergleich verschiedener Risiken besonders geeignet, da sich dort ein besonders großes Schadenspotential in relativ gefährdeten Bereichen angesammelt hat. Da Köln in den vergangenen Jahren wiederholt von Hochwassern betroffen war, ist das Bewusstsein für die Hochwassergefahr vergleichsweise hoch, im Gegensatz zu dem Bewusstsein für die Erdbebengefahr.

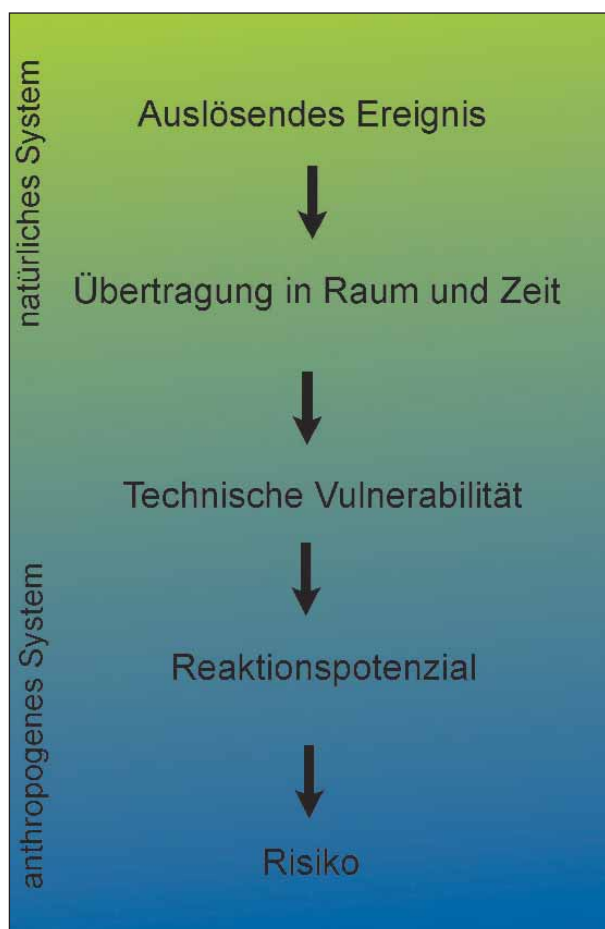


Abb. 7: Wirkungskette zur Abschätzung von Risiken durch Naturgefahren im DFNK
Risk chain for risk assessment due to extreme natural events

An der Abschätzung des Risikos für die drei Naturgefahren Erdbeben, Sturm und Hochwasser sind eine Reihe von Teilprojekten und Partnern beteiligt. Als gemeinsame Ordnungsstruktur wurde die Wirkungskette zugrunde gelegt, die in Abb. 7 dargestellt ist. Zur Abschätzung des Risikos ist es notwendig, die gesamte Wirkungskette vom auslösenden natürlichen Ereignis bis zur Abschätzung der Schäden zu bearbeiten.

Abb. 8 zeigt die Umsetzung dieser Wirkungskette am Beispiel des Clusters „Risikoanalyse Erdbeben“, der von Dr. Schwarz, Bauhaus-Universität Weimar, geleitet wird. Ein Ziel des Clusters ist die Abschätzung des Erdbebenrisikos für die Stadt Köln. Der Cluster besteht aus acht Teilprojekten, die die verschiedenen Prozesse entlang der Wirkungskette in unterschiedlichen räumlichen Skalen und Detaillierungsgraden analysieren. Die gesamte Kette „Gefährdung – Standorteffekte/ Mikrozonierung – Bauwerksbewertung – Schäden – Risiko“ wird quantitativ erfasst.

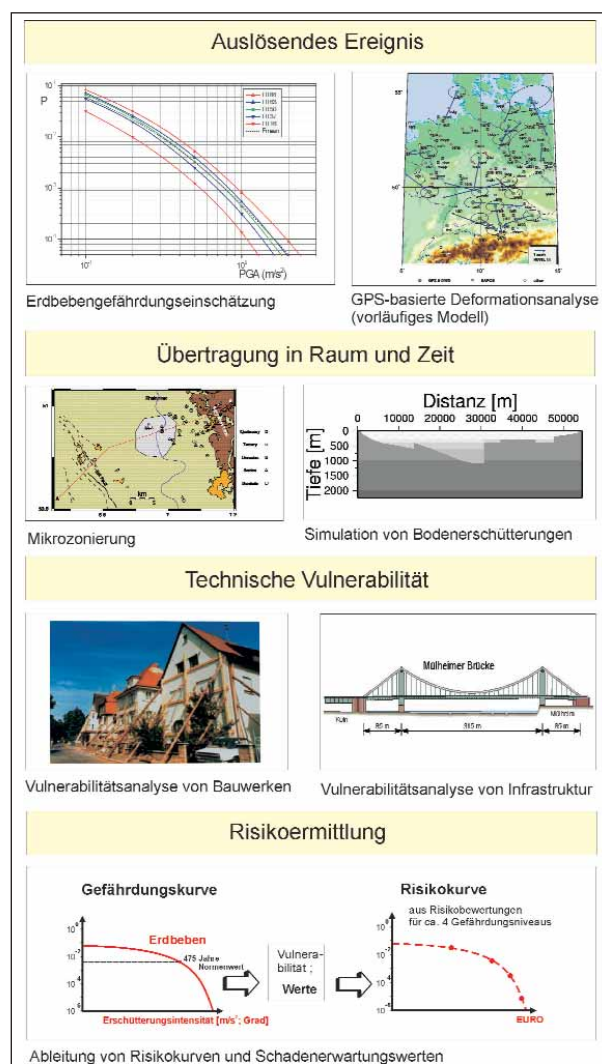


Abb. 8: Wirkungskette zur Abschätzung des Erdbebenrisikos in Köln
Risk chain for the assessment of the earthquake risk in Cologne

Die Wirkungskette beginnt mit der Analyse der Erdbebengefährdung, wobei erstmals Aussagen zu der Unsicherheit der Gefährdungsabschätzung enthalten sind (linkes Bild der ersten Reihe von Abb. 8). Aus der Gefährdungskurve lässt sich für den Raum Köln die Wahrscheinlichkeit ablesen, dass sich ein Beben mit einer bestimmten maximalen Bodenbeschleunigung PGA (peak ground acceleration, in m/s^2) ereignet. Die Unsicherheit dieser Aussagen ist durch die Darstellung verschiedener Fraktile ($1/2$ bzw. 1 Standardabweichung) verdeutlicht. Die Gefährdungsuntersuchungen werden dann durch Daten zur Neotektonik, Paläoseismologie und zum Strainfeld aus einer flächendeckenden Deformationsanalyse mit GPS untersetzt. Das wird durch das rechte Bild der ersten Reihe von Abb. 8 veranschaulicht, das ein vorläufiges Model der GPS-basierten Deformationsanalyse für den Raum Deutschland zeigt.

Die so gewonnenen Gefährdungsabschätzungen werden dann, über mehrere Zwischenschritte und in Verbindung mit abzuschätzenden Schadenspotenzialen, in Risikoausagen überführt. Dafür eignen sich die relativ großräumigen Gefährdungsaussagen nur bedingt. Die großräumige Gefährdung wird durch die lokale Untergrundbeschaffenheit und Topographie modifiziert. Gegenüber Erschütterungen auf festem Felsuntergrund können z.B. die Bodenamplituden auf lockeren Sedimenten bis um das etwa 10fache verstärkt werden und die makroseismischen Erschütterungsintensitäten um ein bis zwei Einheiten höher ausfallen als nach der generalisierten Gefährdungseinschätzung erwartet. Da auch die Art der Bebauung und Nutzung und damit die Verwundbarkeit von Menschen und Objekten oft stark im Raum variieren, setzen realistische Risikoausagen in Ballungsgebieten detailliertere Gefährdungsaussagen voraus. Das leistet die seismische Mikrozonierung, die auf der Grundlage experimenteller Messungen (linkes Bild der zweiten Reihe von Abb. 8) wie auch theoretischer Modellierungen zur Schwingungsausbreitung in Raum und Zeit in Abhängigkeit vom Untergrundmodell (rechtes Bild der zweiten Reihe von Abb. 8) versucht, die zu erwartenden lokalen Effekte einzuschätzen und durch Modifizierung der lokalen Gefährdung in Rechnung zu stellen. Detailliertere Ausführungen zu entsprechenden Arbeiten im Testgebiet Köln werden im abschließenden Unterkapitel gemacht.

Eine hohe seismische Gefährdung eines Gebietes ist nur dann mit einem hohen Risiko für die Gesellschaft verbunden, wenn es in dem Gebiet auch Menschen und vom Menschen geschaffene Objekte und materielle Werte gibt, die durch die zu erwartenden Erdbebenerschütterungen zu Schaden kommen können (Exposition), und wenn deren Erschütterungsanfälligkeit (Vulnerabilität) hoch ist. Für die Risikoanalyse ist deshalb eine Abschätzung der Anfälligkeit der exponierten Objekte durchzuführen. Dies erfordert die Erfassung des Bauwerksbestandes und die Bewertung der Bauwerksobjekte, wobei stets zu berücksichtigen bleibt, dass die Bauwerke durch verschiedene Naturereignisse in verschiedenartiger Weise und auch in sehr unterschiedlichen Bauwerksbereichen beansprucht werden. Entsprechende Arbeiten im Rahmen des DFNK werden von der Bauhaus-Universität Weimar wahrgenommen (linkes Bild der dritten Reihe von Abb. 8). Eine wichtige Grundlage dafür bildet die Europäische Makroseismische Skala (Grünthal, 1998). Für die Anforderungen des Katastrophenmanagements wird darüber hinaus von der Universität Karlsruhe die Vulnerabilität einiger ausgewählter Bauwerke mit hohem Risikopotenzial im Detail analysiert. Dies sind insbesondere Bauwerke und Infrastrukturanlagen (wie Rheinbrücken, Krankenhäuser usw.), deren Erhaltung und Funktionstüchtigkeit im Katastrophenfall essentiell sind (rechtes Bild der dritten Reihe von Abb. 8).

Die Vulnerabilitätsanalyse liefert den Schädigungsgrad der betroffenen Gebäude. Im letzten Schritt werden diese Vulnerabilitätsausagen mit den Sachwerten der Gebäude verknüpft, um einen monetären Indikator für die Sachschäden zu erhalten. Entsprechende Daten für Privatgebäude stellt im Rahmen des DFNK in einer ersten Näherung die Münchener Rückversicherungsgesellschaft zur Verfügung. Für Risikonachweise öffentlicher Gebäude oder industrieller Anlagen fehlen derzeit sowohl der Zugang zu entsprechenden Daten als auch Bearbeitungskapazität im laufenden Projekt. Aus der Verknüpfung von Gefährdung, Exposition, Anfälligkeit und Gebäudewerten ergibt sich das Erdbebenrisiko. Bei Beschränkung auf quantifizierbare Sachwerte kann das Risiko monetarisiert und als Risikokurve dargestellt werden. Diese gibt dann z.B. die Wahrscheinlichkeit wieder, dass ein Erdbeben auftritt,

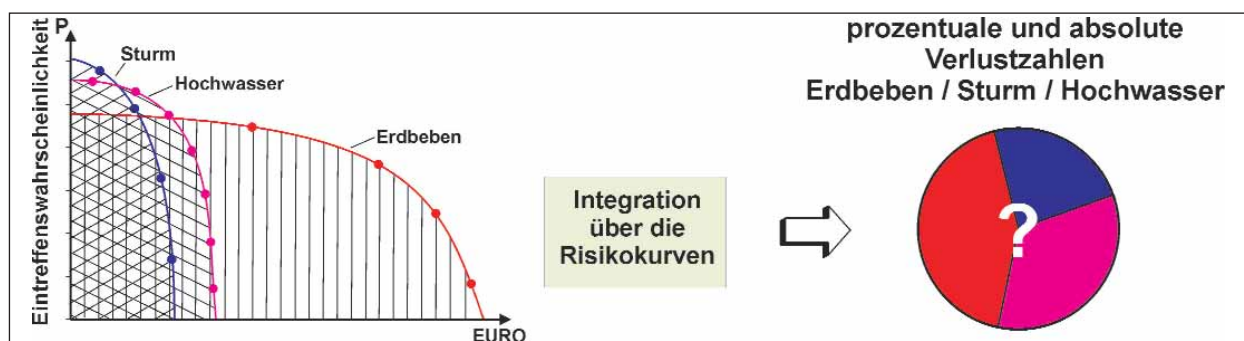


Abb. 9: Konzept für den Vergleich der Risiken durch Sturm, Hochwasser und Erdbeben
 Concept for the comparison of the risks due to storms, floods and earthquakes

das einen bestimmten Schaden (in EURO) übersteigt (letzten Reihe von Abb. 8).

Durch die Monetarisierung des Risikos mit dem Schadensindikator Sachschäden können diese Risikoabschätzungen mit den Abschätzungen des Hochwasser- und Sturmrisikos in Köln verglichen werden. Abb. 9 zeigt diese Konzeption anhand des Vergleichs der Risikokurven von Sturm, Hochwasser und Erdbeben. Schließlich kann durch die Integration der Risikokurven der Beitrag der verschiedenen Naturgefahren an den erwarteten Sachschäden in Köln abgeleitet werden. Dieser Risikovergleich wird von der DFNK-Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ unter Leitung von Dr. Grünthal, GFZ Potsdam, verfolgt.

Erdbebenmikrozonierung als Beitrag zur Risikoanalyse Erdbeben

Nachdem die Wirkungskette „Risikoanalyse Erdbeben“ im DFNK erläutert wurde, soll detaillierter auf bisherige Ergebnisse des Teilproblems Erdbebenmikrozonierung und Simulation von Bodenerschütterungen eingegangen werden. Die Mikrozonierung untersucht den Einfluss der lokalen Geologie und Topographie auf die Vorzugsfrequenz und relative Verstärkungen der Bodenerschütterungen. Durch lockere Sedimentbedeckung können die Amplituden der Bodenerschütterungen gegenüber Standorten auf festem Untergrund (ausstreichendem Grundgebirge) um mehr als das zehnfache verstärkt und ihr Frequenzspektrum durch Filter- und Resonanzeffekte stark verzerrt werden. Das Ausmaß von Erdbebenschäden hängt maßgeblich von der Amplitude und der Frequenz der Erdbebenerschütterungen ab. Sie sind (bei gegebener Qualität der Gebäude und Gründungen) am größten, wenn die Eigenfrequenz des Untergrundes mit der des Gebäudes übereinstimmt.

Die zuverlässige experimentelle Erfassung dieser Größen würde die Messung realer Erdbebenstarkbewegungen mit einem dichten Netz von Strong-Motion-Geräten erfordern. Das ist sehr kostspielig und in Deutschland auch deshalb nicht realisierbar, da häufige Starkbeben fehlen. Man müsste Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte warten, um die erforderlichen Daten zu gewinnen. Der zweite Weg führt über die realistische Modellierung der spektralen Übertragungsfunktion des Untergrundes. Das erfordert sehr detaillierte und genaue geophysikalisch-ingenieurgeologische und hydrogeologische Struktur- und Parameter-Modelle des Untergrundes. Die Genauigkeit und Anzahl vorhandener Modelle reicht in der Regel bei weitem nicht aus für eine realistische und flächendeckende Modellierung der Übertragungsfunktionen des oberflächennahen Untergrundes. Die Gewinnung der benötigten Parameterdaten durch gezielte ingenieurgeologische, hydrogeologische, geophysikalische und komplexe Bohrlochmessungen ist sehr zeitaufwendig und kostspielig.

Im Rahmen des DFNK wird daher im Teilprojekt „Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung“ flächendeckend für den Großraum Köln eine andere, schnelle und kosteneffektive Methode nach Nakamura (1989) erprobt. Sie gestattet punktuelle Schätzungen der Grundresonanzfrequenz und der Amplitudenverstärkung des Untergrundes. Grundlage dafür sind Registrierungen der mikroseismischen Bodenunruhe mit Frequenzen $f > 0,1$ Hz und die Berechnung der Spektralverhältnisse aus horizontalen (H) und vertikalen (V) Komponenten. Mit der H/V-Methode kann die Grundresonanzfrequenz f_0 auf etwa 10 bis 20 % genau ermittelt werden, während die Amplitudenverstärkung durch die Sedimente in der Regel unterschätzt wird. Erste Ergebnisse von zwei Messkampagnen im Juni/Juli 2000 und von April bis Juni 2001 liegen vor. Eine Veröffentlichung dazu wurde bereits von einer internationalen Fachzeitschrift akzeptiert (Parolai et al., 2001a) und ein weiteres Manuskript wurde eingereicht (Parolai et al. 2001b). Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Deutliche Resonanzpeaks mit Amplitudenverstärkung werden nur beobachtet, wenn die Sedimentbedeckung über dem Grundgebirge $> ca. 10\%$ der Wellenlänge ist (> 5 bis 10 m). f_0 nimmt mit wachsender Sedimentmächtigkeit ab;
- Für fast 500 Punkte wurden im Raum Köln H/V-Spektren bestimmt. Das ermöglichte eine flächenhafte Interpolation der Daten. Werte $f_0 > 1$ Hz bis etwa 10 Hz werden ostrheinisch bei abnehmenden Sedimentmächtigkeiten zum Bergischen Land hin beobachtet. Auf Grund lateral stark wechselnder Mächtigkeiten (Erosionsrinnen etc.) ist das Frequenzmuster dort sehr unruhig (3-D-Effekte, die mit der H/V-Methode nicht sicher erfasst und quantifiziert werden können). Im eigentlichen Stadtgebiet von Köln und nach Westen zu bis zum tektonischen Staffelbruch des Erft-Sprungs liegen die Werte zwischen $0,4$ und 1 Hz und westlich des Erft-Sprungs zwischen $0,1$ und $0,4$ Hz (Abb. 10 unten).
- Die Grundresonanzfrequenz von einfach strukturierten, gleichförmigen und in steifem Untergrund gegründeten Gebäuden ist etwa $\sim 10/G$ ($G \triangleq$ Geschossanzahl). Folglich ist im Zentrum und im westlichen Teil von Köln nebst Vororten für Normalgebäude mit Geschosszahlen zwischen etwa 10 bis 25 mit verstärkter Erdbebenanregung und Verwundbarkeit zu rechnen, falls den Untergrundbedingungen nicht durch entsprechend verstärkte bebensichere Auslegung der Gebäude Rechnung getragen wird. Andererseits können Bauwerke mit komplizierterer Formgebung und von den Normalverhältnissen abweichender Masse-Höhe-Schwerpunkts-StEIFIGKEITSverteilung bzw. Elastizitäts- und Dämpfungseigenschaften andere Grundschwingungsfrequenzen als nach dieser Faustformel

aufweisen (siehe Beispiel der Türme des Kölner Domes in Abb. 10 oben). Deshalb erfordert die Beurteilung der konkreten Standortgefährdung von Spezialbauten in jedem Falle gesonderte Messungen und/oder Modellierungen der Gebäude-Schwingungsfrequenzen.

- Im Untersuchungsgebiet Köln werden Schwingungen im Bereich der Boden-Grundresonanzfrequenz in der Regel mindestens um das 3- bis 10-fache verstärkt. Für höhere Resonanzfrequenzen ist die Bodenverstärkung (bei einfacher, 1-D-Untergrundstruktur!) wie auch die Primäranregung durch potenzielle Schadenbeben mit Magnituden $> 5,5$ in jedem Falle geringer, sie kann aber für Gebäude mit einer Grundfrequenz $f_G > f_0$ noch bedeutsam sein. Zur Bodenverstärkung und Lage der Spektralpeaks höherer Resonanzfrequenzen liefert die H/V-Methode keine Aussagen.
- Aus einigen Bohrungen bis zu 400 m Tiefe sind im Untersuchungsgebiet Sedimentmächtigkeiten über dem Grundgebirge punktuell genau bekannt. Das ermöglichte die Ableitung einer kalibrierten Korrelationsbeziehung zwischen Sedimentmächtigkeiten und der (Grundresonanz-) Frequenz f_0 . Damit können alle gemessenen f_0 -Werte in Sedimentmächtigkeiten h_{sed} über dem Grundgebirge umgerechnet und eine entsprechende Isolinienkarte für das gesamte Untersuchungsgebiet abgeleitet werden. Abbildung 11 vergleicht entlang des in Abb. 10 unten gezeigten Profils die in der geologischen Karte 1:100.000 angegebene Tiefenlage des Grundgebirges mit den Tiefen, die mit der kalibrierten Korrelationsbeziehung f_0-h_{sed} für die in Profilnähe gelegenen Messpunkte berechnet wurden. Die Übereinstimmung ist gut, auch noch für Tiefen bis etwa 1000 m, und besser als bei Verwendung einer analogen Korrelationsbeziehung zwischen f_0 und h_{sed} , die von Ibs von Seht & Wohlenberg (1999) bei früheren Untersuchungen für den Raum Aachen abgeleitet wurde.
- Aus dem Vergleich der Messergebnisse mit Bohrlochdaten wurde des weiteren eine präzisierte Scherwellengeschwindigkeits-Tiefenverteilung $v_S(z)$ im Untersuchungsgebiet sowie eine Beziehung zwischen der mittleren Scherwellengeschwindigkeit \bar{v}_S und der Sedimentmächtigkeit mit Bezug auf die ingenieurseismologisch relevanten Bodenklassen „sehr weich“, „weich“, „steif“ und „Fels“ abgeleitet.

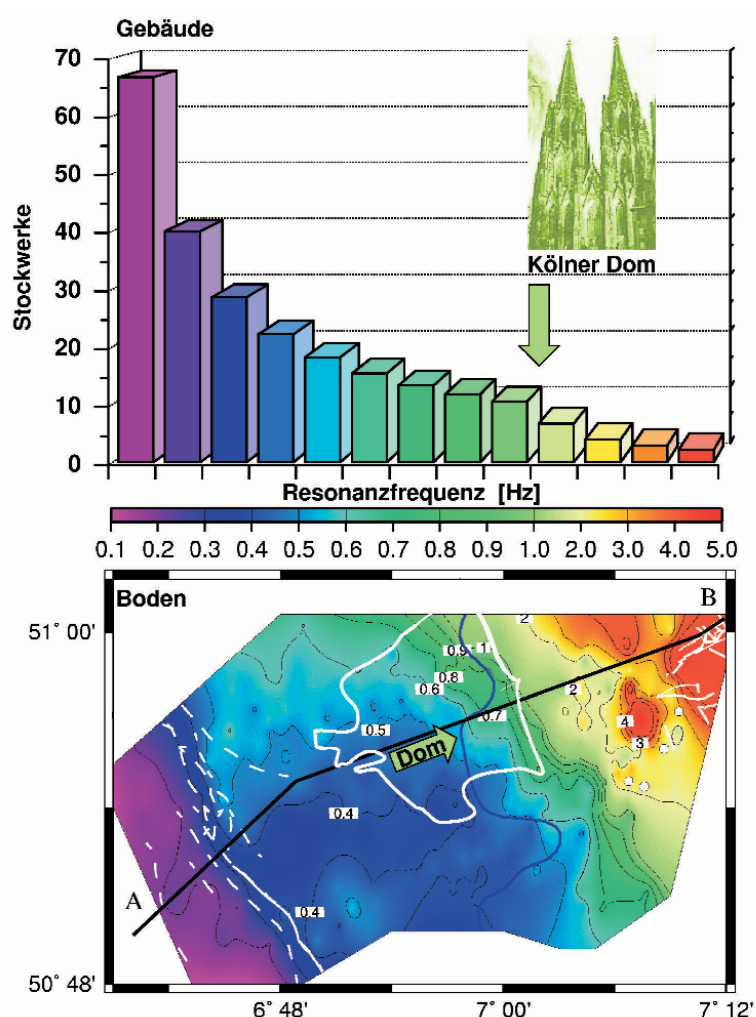


Abb. 10: Unten: Flächenhafte Verteilung der Grundresonanzfrequenz f_0 der Sedimentbedeckung im Raum Köln, abgeleitet aus Messungen der mikroseismischen Bodenunruhe. Die weißen Linien markieren tektonische Störungen (unten links und oben rechts) bzw. die ungefähren Stadtgrenzen von Köln (mitte oben). Die schwarze Linie von A bis B zeigt die Position des in Abb. 11 gezeigten geologischen Profilschnitts. Oben: Beziehung zwischen der Grundeigenfrequenz f_G einfacher Geschossbauten und deren Geschossanzahl. Bei Verwendung spezieller Konstruktionen und Baumaterialien bzw. bei komplizierten und schweren Baukörpern (wie am Beispiel des Kölner Domes gezeigt) kann die Grundeigenfrequenz des Bauwerks erheblich von dieser Faustregel abweichen

Bottom: Distribution of the fundamental resonance frequency f_0 of the sedimentary cover in the area of Cologne, derived from measurements of microseismic noise. The white lines mark tectonic faults (bottom left and upper right) and the approximate city limits of Cologne, respectively (upper middle). The black line from A to B shows the position of the geological profile shown in Fig. 11. **Top:** Relationship between the fundamental frequency f_G of simple multi-story buildings as a function of stories. In case of very special constructions and building materials and complicated, heavy structures (as in case of the cathedral of Cologne) f_G may deviate significantly from this rule of thumb.

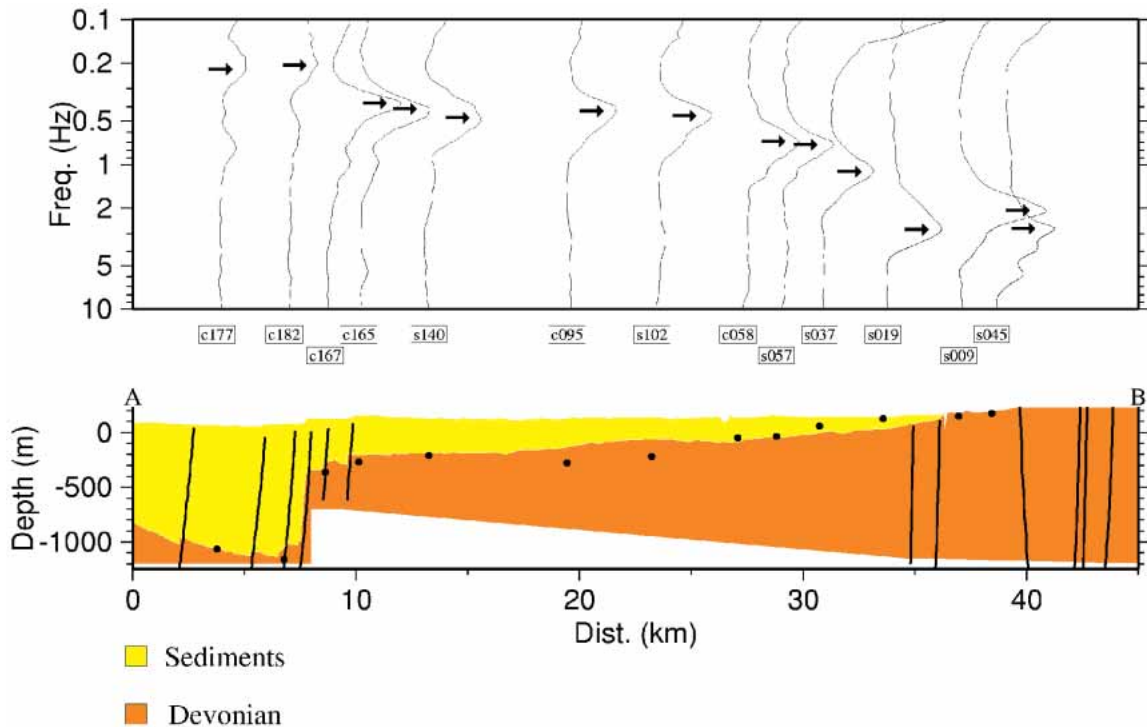


Abb. 11: Nakamura-Spektren (oben) entlang eines Profils im Untersuchungsgebiet (unten). Die aus den Frequenzen f_0 der H/V-Spektralpeaks unter Verwendung einer neuen, mit Bohrlochdaten geeichten, Korrelationsbeziehung abgeleiteten Tiefenlagen des Grundgebirges (schwarze Punkte) unterhalb der Messpunkte. Diese stimmen gut mit der Tiefenlage der Devon-Oberkante im geologischen Profilschnitt überein.

Nakamura spectra (top) along a profile in the area under investigation (bottom). The sedimentary thickness and related depth of the basement calculated from the frequencies f_0 of the H/V spectral peaks by using a new, with borehole data calibrated correlation relationship, agrees well with the upper boundary of the Devon according to the geological profile.

Noch in Auswertung befinden sich Daten ergänzender Arraymessungen der Bodenunruhe zur direkten Ableitung lokaler Geschwindigkeits-Tiefen-Beziehungen.

Damit wurden Voraussetzungen geschaffen, dass sowohl Bauingenieure, die in ihren Berechnungen ingenurgeologische Bodenklassen bevorzugen, als auch die am DFNK-Teilprojekt „Erdbebensimulation von Bodenerschütterungen im Bereich kritischer Bauwerke“ arbeitenden Kollegen diese Ergebnisse nutzen können. Letztere haben ein 2D-Hybridprogramm fertiggestellt, das es ermöglicht, die Bodenerschütterung infolge konkreter Szenarioebenen für die Niederrheinische Bucht zu simulieren. Als Beispiel für ein Szenario wurde, ausgehend vom Liège-Beben vom 08. 11. 1983 ($M_L=5,0$, Herdtiefe 6 km, Abb. 12), entlang eines vereinfachten Profils (Abb. 13) durch die Niederrheinische Bucht das Wellenfeld berechnet (Abb. 14). Die Modellannahmen für den östlichen Teil des Profils ab Erft-Sprung werden durch die o.g. Ergebnisse aus den Mikrozonierungsmessungen zur Grundresonanzfrequenz und Sedimentmächtigkeit gestützt und lassen sich weiter verfeinern, so auch durch die noch in Arbeit befindliche Inversion der gemessenen Array-Daten (gemeinsam mit der Projektgruppe „Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung“) zur Ableitung lokaler

Geschwindigkeit-Tiefen-Beziehungen. Wichtigstes Ergebnis der bisherigen Simulationen der Bodenbewegung entlang des Profils (Abb. 13) ist, dass durch die ausgeprägte 2D-Struktur des angenommenen Modells die Signaldauer gegenüber einer 1D-Modellierung signifikant verlängert wird. Diese Aussage ist für die Auswahl realistischer Belastungsfunktionen für Simulationsrechnungen der Bauingenieure im Erdbebencluster von Belang.

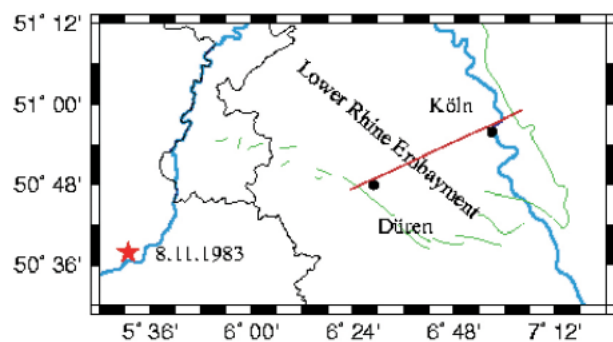


Abb. 12: Profillage (Strich) und Epizentrum des Liège-Bebens (Stern)
Position of profile (solid line) and epicentre of the Liège earthquake (star)

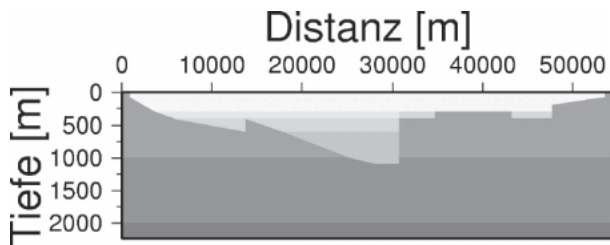


Abb. 13: Profilquerschnitt. Geschwindigkeiten nehmen mit der Tiefe zu. Hell: sedimentäre Gesteine im Becken; dunkel: Krustenmodell nach Ahorner & Pelzing (1985). Profile. Velocities increase with depth. Light colours: sediments inside the basin; dark: crustal model after Ahorner & Pelzing (1985).

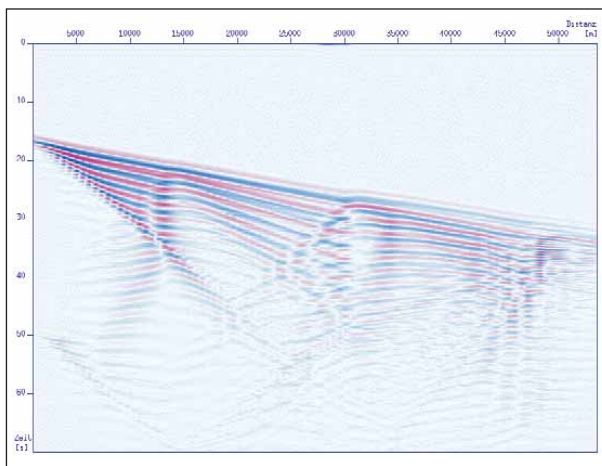


Abb.14: Transversale Komponente der Boden-Schwingungsgeschwindigkeit des Wellenfeldes
Transversal component of ground-velocity of the wave field

Zusammenfassung

Mehrere große Naturkatastrophen während der letzten Jahre haben eindringlich ins Bewusstsein gerufen, dass wir uns nicht vollständig gegen alle Naturereignisse schützen können. Die Vorstellung einer absoluten Sicherheit muss durch eine Risikokultur ersetzt werden, die realistisch mit Risiken umgeht, mögliche Bedrohungen identifiziert und bewertet und geeignete Schutzstrategien ableitet. Diese Aufgabe erfordert - in enger Abstimmung mit den Akteuren des Katastrophenmanagements - eine interdisziplinäre Naturkatastrophen- und Risikoforschung. Ein wesentliches Element dieser interdisziplinären Risikoforschung sind „multi-hazard“-Risikoanalysen, wie sie im DFNK beispielhaft für die Region Köln entwickelt werden. Dabei werden vollständige Wirkungsketten analysiert, von dem auslösenden extremen Ereignis bis hin zu den Auswirkungen auf den Menschen und seine Umwelt, die vor allem durch lokale Effekte beeinflusst werden.

Literatur

Ahorner, L. and R. Pelzing: *The source characteristics of the Liège earthquake on November 8, 1983, from digital recordings in West Germany*. In: Melchior, P. (ed.): *Seismic Activity in Western Europe*. D. Reidel Publishing Company, 263-289

Alexander, D. 1995: *A survey of the Field of Natural Hazards and Disaster Studies*. In: Carrara, A. and F. Guzzetti (eds.): *Geographical Information systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publishers: 1-19

Allmann, A., E. Rauch and A. Smolka, 1998: *New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe: Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany*. 11th European Conf. On Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam

Bohnenblust, H. and P. Slovic, 1998: *Integrating Technical Analysis and Public Values in Risk-based Decision Making*. *Reliability Engineering and System Safety*, 59:151-159

Einstein, H.H., 1997: *Landslide Risk – Systematic Approaches to Assessment and Management*. Proc. Int. Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu: 25-50

Gheorghe, A.V., 1999: *Risk Engineering: Bridging Risk Analysis with Stakeholders Values*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Grünthal, G. (ed.), 1998: *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Vol. 15, 99 pp, Luxembourg.

Ibs von Seht, M. and J. Wohlenberg, 1999: *Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments*. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89: 250-259.

Lass, W., F. Reusswig und Klaus-Dieter Kühn, 1998: *Katastrophenanfälligkeit und "Nachhaltige Entwicklung"*. Deutsche IDNDR-Reihe 14

Lind, N.C., J.S. Nathwani and E. Siddall, 1991: *Managing Risks in the Public Interest*. Institute for Risk Research, University of Waterloo, Ontario, Canada

Linneweber, V. (Hrsg.), 2000: *Zukünftige Bedrohungen durch (anthropogene) Naturkatastrophen*, Deutsche IDNDR-Reihe 22, Bonn

Mileti, D.E., 1999: *Disasters by Design. A Reassessment of Natural Hazards in the United States*. Joseph Henry Press, Washington D.C.

Molak, V. (ed.), 1997: *Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management*. CRC Press Inc., Lewis Publishers, Boca Raton

Münchener Rück, 1999: *Naturkatastrophen in Deutschland. Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale*. Münchener Rück, München

Münchener Rück, 2000: *topics. Jahresrückblick Naturkatastrophen 1999*. Münchener Rück, München

Nakamura, Y., 1989: *A method for dynamic characteristics estimations of subsurface using microtremors on the ground surface*. *Quarterly Rept. RTRI, Japan*, 30: 25-33.

Parolai, S., P. Bormann, and C. Milkereit, 2001a: *Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements*. *J. Earthquake Engineering*, in print.

Parolai, S., P. Bormann, and C. Milkereit, 2001b: *New relationships between V_s , thickness of the sediments and resonance frequency calculated by means of H/V ratio of seismic noise for the Cologne area (Germany)*. Submitted to *Bull. Seism. Soc. Am.*

Plate, E.J., B. Merz und Ch. Eikenberg, 1999: *Naturkatastrophen – Strategien zur Vorsorge und Bewältigung*. Deutsche IDNDR-Reihe 16, Bonn

Plate, E.J. und B. Merz (Hrsg.), 2001: *Naturkatastrophen – Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge*, Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart

Rayner, S., 1987: *Learning from the Blind Man and the Elephant or Seeing Things Whole in Risk Management*. In: Covello, V.T., L.B. Lave, A. Moghissi and V.R.R. Uppuluri (eds.): *Uncertainty in Risk Assessment, Risk Management, and Decision Making*, Plenum Press, New York, London: 207-212

Renn, O., 1993: *Die Grenzen überschreiten. Die Psychologie des Risikos*. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, 8. Ausgabe, 53-60

Renn, O., 1998a: *The role of risk perception for risk management*. *Reliability Engineering and System Safety*, 59:49-62

Renn, O., 1998b: *Three decades of risk research: accomplishments and new challenges*. *Journal of Risk Research*, 1:49-71

Slovic, P., 1998: *The Risk Game*. *Reliability Engineering and System Safety*. 59:73-77

Solecki, W.D. and S. Michaels, 1994: *Looking Through the Post-Disaster Policy Window*. *Environmental Management*, 18/4:587-595