

Risiken durch Naturgefahren in Deutschland

-

Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK)

Herausgeber:
Dr.-Ing. Bruno Merz, Dr. Heiko Apel
GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 5.4
Telegrafenberg
14473 Potsdam

21. Juni 2004

Vorwort

Während der letzten Jahre sind in Deutschland extreme Naturereignisse aufgetreten, die zu großen, teilweise gar verheerenden Schäden geführt haben. Die Aufarbeitung dieser Katastrophen hat gezeigt, dass Deutschland nicht genügend auf solche Extremsituationen vorbereitet ist. Notwendig ist ein intelligenter Umgang mit Naturgefahren, der sich auf wissenschaftlich fundierte Analysen und Methoden stützt. Dazu gehört, dass Risiken durch Naturgefahren in ihrer raum-zeitlichen Entwicklung und in ihrer Wechselwirkung mit anthropogenen Einflüssen identifiziert und quantifiziert werden, zuverlässige Vorhersage-, Frühwarn- und Informationssysteme zur Verfügung stehen und Vorsorgestrategien eingesetzt werden, die auf einer umfassenden, konsistenten und transparenten Risikobewertung basieren. Die Entwicklung und Bereitstellung solcher Methoden und Werkzeuge erfordern einerseits das Zusammenwirken der verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen und andererseits den engen Austausch zwischen Wissenschaft und operativem Katastrophenmanagement. Vor diesem Hintergrund beantragte das GeoForschungs-Zentrum Potsdam (GFZ) im Jahr 1999 gemeinsam mit weiteren 14 Partnern die Einrichtung des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierte dieses Vorhaben mit einer dreijährigen Laufzeit von Januar 2000 bis Dezember 2002 und einer kostenneutralen Verlängerung bis Dezember 2003. Im DFNK vernetzten sich Universitäten, Forschungseinrichtungen, Bundesanstalten, der Deutsche Wetterdienst und die Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft. Über diese 15 Partner hinaus ergaben sich assoziierte Partnerschaften mit zehn weiteren Einrichtungen.

Entsprechend der Grundidee des DFNK, dass umfassende Lösungen für die Katastrophenvorsorge und Katastrophenbewältigung umfassende Ansätze benötigen, wurden möglichst komplette Wirkungsketten analysiert. Dazu war eine enge Abstimmung über Fachgrenzen hinweg notwendig. Die Arbeit im Netzwerk zeigte, dass in unterschiedlichen Disziplinen teilweise sehr verschiedene Sichtweisen verbreitet sind. Es braucht Zeit und die Bereitschaft, sich auf andere Sichtweisen einzulassen, um ein gemeinsames Verständnis aufzubauen. Auch wenn solche integrativen Ansätze zeitaufwändig und mühsam sind, ermöglichen sie Ergebnisse, die von einzelnen Disziplinen nicht erzielt werden können. Der Hauptgewinn des DFNK liegt deshalb gerade in den Ergebnissen, die durch interdisziplinäre Zusammenarbeit über Fach- und Instituts Grenzen hinweg erzielt wurden.

Der Dank im Namen des gesamten Verbundprojekts geht an das BMBF für die Förderung des Vorhabens sowie an die Mitglieder des DFNK-Lenkungsausschusses für die kritische und stets konstruktive Begleitung. Ihre Anregungen haben wesentlich dazu beigetragen, die „große Linie“ bei der täglichen Arbeit nicht aus den Augen zu verlieren. Ein besonderer Dank richtet sich an Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. Rolf Emmermann, der das DFNK initiierte und stets unterstützte. Die Koordination eines solch großen Netzwerks ist keine einfache Aufgabe. Dr. Jana Friedrich und den Leitern der DFNK-Arbeitsgruppen, Prof. Dr.-Ing. Markus Disse, Prof. Dr. Johann G. Goldammer, Dr. Gottfried Grünthal, Dr. Jochen Schwarz, Prof. Dr. Gerd Tetzlaff und Dr. Jochen Wächter gilt der Dank aller Projektbeteiligten. Herrn Alfred Thorwarth danke ich für die Durchsicht dieses Abschlussberichts. Ich bedanke mich herzlich bei allen Kollegen und Mitwirkenden im Forschungsnetzwerk für die wertvollen Beiträge und die fruchtbare Zusammenarbeit. Ich hoffe, dass die Ergebnisse, das gewachsene gegenseitige Verständnis und die im Netzwerk aufgebaute Kompetenz die Bemühungen zu einem intelligenten Umgang mit Naturgefahren einen großen Schritt weiterbringen.

Potsdam, im Dezember 2003

Bruno Merz

Inhaltsverzeichnis

1	Erfahrungen aus drei Jahren interdisziplinärer Forschung	1
1.1	Ziele, Konzeption und Erfahrungen des DFNK	2
1.2	Kurzdarstellung der Ergebnisse des DFNK	14
2	Cluster Risikoanalyse Hochwasser	21
2.1	Konzeption und Bewertung der Arbeiten	22
2.2	Niederschlagsszenarien für das deutsche Rheingebiet ab Maxau unter Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen	28
2.3	Hydrologische Modellierung von Klima- und Landnutzungsszenarien im Rheingebiet	36
2.4	Wasserretentionspotential in forstlich und landwirtschaftlich genutzten Böden .	49
2.5	Satellitengestützte Verfahren zum Monitoring der Siedlungsentwicklung und zur Klassifizierung der Landnutzung	59
2.6	Quantifizierung der Hochwassergefährdung für die Rheinanlieger unter Berücksichtigung von Deichversagen	67
2.7	Simulation der raum-zeitlichen Ausbreitung von Hochwasserwellen auf Vorländern und (nach Deichbruch) in ungeschütztem Gelände	85
2.8	Präventiver Hochwasserselbstschutz von Privathaushalten und Unternehmen . .	93
2.9	Risiko- und Unsicherheitsanalyse für Hochwasser	107
3	Cluster Risikoanalyse Sturm	117
3.1	Einführung	118
3.2	Quantitative Ermittlung des Sturmrisikos für repräsentative Gebiete Deutschlands	119
4	Cluster Risikoanalyse Erdbeben	127
4.1	Struktur, Konzeption und Bewertung der Arbeiten	128
4.2	Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen	135
4.3	Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung	149

4.4	Erdbebensimulation von Bodenerschütterungen im Bereich kritischer Bauwerke	161
4.5	Standortspezifische Bebenwirkungen im Gefährdungsraum Köln / Aachen	171
4.6	Risiken durch Sekundäreffekte von Erdbeben	179
4.7	Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotenziale	188
4.8	Identifikation und Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential bzw. Sicherheitsanspruch (Fallstudien)	201
4.9	Satellitengestützte Erfassung von Gebäudeparametern als Beitrag zur Vulnerabilitätsabschätzung bei Erdbeben	212
4.10	Deutschlandweite GPS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von kontinuierlichen hochgenauen GPS-Beobachtungen	220
5	Cluster Simulationssystem Waldbrand	229
5.1	Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr	230
5.2	Klimaänderungen und Waldbrand: Eine Analyse für Brandenburg	246
6	Cluster Datenbanken und Informationssysteme	255
6.1	Struktur, Konzeption und Bewertung der Arbeiten	256
6.2	Informationssysteme für den Einsatz im Katastrophenmanagement	259
6.3	Aufbau eines Erdbeben-Informationssystems für Deutschland	266
6.4	Technologie der Schadensschätzung	280
7	Synopsis of Natural Hazards	285
7.1	Comparative risk assessments for the city of Cologne – storms, floods, and earthquakes	286
	Abbildungsverzeichnis	306
	Tabellenverzeichnis	319
A	Anhang	321
A.1	Beteiligte Organisationen	322
A.2	Liste der Teilprojekte	323
A.3	Assoziierte Partner	327
A.4	Mitglieder des Lenkungsausschusses	328
A.5	Publikationen im Rahmen des DFNK	329

Kapitel 1

Erfahrungen aus drei Jahren interdisziplinärer, nutzerorientierter Forschung

Projektüberblick

Bruno Merz

*GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 5.4 Ingenieurhydrologie
Email: bmerz@gfz-potsdam.de*

Der vorliegende Bericht präsentiert die Arbeiten des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK) in knapper Form. Ausführlichere Beschreibungen der entwickelten Methoden und Werkzeuge finden sich in den verschiedenen Veröffentlichungen und Berichten, die im Anhang A.5 aufgelistet sind. Neben einer Übersicht über das gesamte Forschungsnetz sowie über seine Ziele, Konzeption und Erfahrungen in Kap. 1.1 sind die Ergebnisse des DFNK in Tabellenform in Kap. 1.2 zusammengestellt.

1.1 Ziele, Konzeption und Erfahrungen des DFNK

Hintergrund

Im Jahr 1999 am Ende der Internationalen Dekade für die Reduzierung von Naturkatastrophen (IDNDR) zeigte sich, dass trotz vielfältiger Anstrengungen die Schäden durch extreme Naturereignisse weiterhin kontinuierlich und rapide wachsen. Gründe hierfür sind u.a. die zunehmenden Wechselwirkungen zwischen Naturereignissen und menschlichem Handeln, so dass Naturkatastrophen sich in einem komplexer werdenden Umfeld ereignen. Vor diesem Hintergrund empfahl der Wissenschaftliche Beirat des Deutschen IDNDR-Komitees für Katastrophenvorbeugung e.V., die in Deutschland vorhandene Expertise mit dem Ziel einer integrativen und interdisziplinären Katastrophenforschung zu bündeln (DKKV, 2000). Zukünftige Forschung sollte über Disziplingrenzen hinweg erfolgen, die Akteure des Katastrophenmanagements einbeziehen und sich am Bedarf der mit Katastrophenmanagement befassten Organisationen orientieren.

Wie die Erfahrungen mit extremen Naturereignissen in Deutschland in den letzten Jahren gezeigt haben, ist Deutschland nicht aus-

reichend auf solche Extremsituationen vorbereitet (Dombrowsky und Brauner, 1996, Grünwald et al., 1998, DKKV, 2003). Das Gefahrenbewusstsein und die Bereitschaft zur Vorsorge steigen unmittelbar nach einer Katastrophe und sinken mit zunehmender Dauer katastrophenfreier Perioden, d.h. die Vorsorge wird maßgeblich durch einzelne schwere Ereignisse beeinflusst. Ein solches anlassbezogenes Verhalten trägt nicht zu einer ausgewogenen Vorsorge gegen Naturgefahren bei. Notwendig sind die systematische und transparente Erfassung und Bewertung des Risikos durch Naturgefahren. Hierfür werden wissenschaftlich fundierte Daten und Instrumentarien benötigt, die geeignet sind, das komplexe Zusammenspiel zwischen natürlichen und anthropogenen Prozessen und Einflüssen zu erfassen.

Des Weiteren müssen effektive und effiziente Vorsorgestrategien und Schutzmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Es gibt viele unterschiedliche Möglichkeiten, mit Naturrisiken umzugehen. 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 Maßnah-

men 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. Diese Überlegungen weisen auf die Notwendigkeit hin, Kosten (Aufwand für Schutzmaßnahmen) und Nutzen (Risikominderung) abzugleichen: In Anbetracht begrenzter Mittel stellt sich die Frage nach der optimalen Reduktion des Risikos: "Wie sicher ist sicher genug?".

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 erfasst und bewertet werden (z. B. Renn 1998a, b). Risiko ist ein mehrdimensionaler Begriff, und Risiken werden in Abhängigkeit des Kontextes der Situation bewertet (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 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, in denen Schutzmaßnahmen nicht ausreichen bzw. versagen. Jetzt ist die zentrale Frage "Was passiert, wenn es passiert?". Hier liefern Simulationen von möglichen Schadensszenarien wichtige Hinweise für die Vorbereitung auf solche Situationen, und schnelle Informations-

und Frühwarnsysteme können die Auswirkungen von extremen Naturereignissen dramatisch mindern (Zschau et al., 2001).

In Deutschland waren zum Ende der 1990er für die Belange des Katastrophenmanagements von verschiedensten wissenschaftlichen Institutionen und Disziplinen singuläre Lösungen entwickelt worden. Es existierten jedoch keine allgemein zugänglichen Instrumentarien, um die Risiken für verschiedene Naturgefahren zu quantifizieren. Vor diesem Hintergrund griff das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) die Empfehlung des Wissenschaftlichen Beirats nach einer integrativen Forschung auf und beantragte gemeinsam mit weiteren 14 Partnern (12 deutsche und 2 österreichische Partner) die Finanzierung eines Forschungsnetzes im Rahmen des damals neu eingerichteten Vernetzungsfonds. Das DFNK wurde seit Januar 2000 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit einer Laufzeit von drei Jahren gefördert. Da aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen der Bewilligung durch das BMBF und dem offiziellen Projektbeginn (Januar 2000) nicht alle Projektstellen zum Januar 2000 besetzt werden konnten, nahmen die Teilprojekte zu unterschiedlichen Terminen ihre Arbeiten auf. Die Laufzeit des DFNK wurde kostenneutral bis Dezember 2003 verlängert, so dass alle Teilprojekte genügend Zeit hatten, ihre Arbeiten abzuschließen.

Abb. 1.1 zeigt die 15 Partner des Netzwerks. Darunter befinden sich Universitäten, Forschungseinrichtungen, Bundesanstalten, der Deutsche Wetterdienst und die Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft. Vier Partner (Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Wien, International Institute for Applied System Analysis) arbeiteten im DFNK mit, ohne finanzielle Mittel zu beantragen. Diesen Partnern wurden lediglich Reisekosten für die Teilnahme an den Workshops und Sitzungen finanziert. Im Laufe des Projekts beteiligten sich weitere Organisatio-

nen mit unterschiedlich intensiver Mitarbeit als assoziierte Partner am DFNK (Anhang A.3).

Ziele und Konzeption des DFNK

Das übergeordnete Ziel des DFNK war, die wissenschaftlichen Grundlagen für ein modernes Risikomanagement von Naturkatastrophen zu entwickeln und den potenziellen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Grundidee war, dass ein modernes Risikomanagement nur durch eine fachübergreifende Analyse und Bewertung der Risiken erreicht werden kann. Für Entscheidungen im Katastrophenmanagement sollten Methoden erarbeitet und Modellierungs- und Informationssysteme entwickelt werden. Dies umfasst:

- die Quantifizierung der Risiken durch Naturgefahren und ihrer zukünftigen Veränderungen,
- die Entwicklung von Informationssystemen zur Unterstützung des Katastrophenmanagements sowie zur Information von Politik und Öffentlichkeit,
- die Empfehlung angemessener Sicherheitskonzepte zur Risikominderung.

Als entscheidend für den Erfolg des DFNK wurden die optimale Nutzung und Verknüpfung vorhandener Fähigkeiten, Ressourcen und Institutionen gesehen. Dies sollte durch den Zusammenschluss in einem interdisziplinären, nutzerorientierten Forschungsnetz erreicht werden.

Die Partner und Teilprojekte im DFNK organisierten sich in fünf thematischen Arbeitsgruppen (DFNK-Cluster, siehe Abb. 1.2.) Diese Cluster zeichneten sich dadurch aus, dass mehrere Partner und Teilprojekte gemeinsame Ergebnisse erarbeiteten. Anhang A.2 listet die Teilprojekte des DFNK auf. Diese gemeinsamen Ergebnisse, aber auch der Anspruch auf nutzerorientierte Forschung und der fachübergreifende Ansatz des DFNK erforderten eine sehr enge Abstimmung.

Im DFNK wurden die vier Naturgefahren Erdbeben, Hochwasser, Sturm und Waldbrand in Deutschland untersucht. Ziel der Arbeiten der Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“, „Risikoanalyse Erdbeben“ und „Risikoanalyse Sturm“ war die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen zur quantitativen Beschreibung des Risikos. Der Begriff Risiko umfasst hierbei die Gefährdung, d.h. Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit von extremen Naturereignissen, und die Vulnerabilität, d.h. die Anfälligkeit der Gesellschaft bzw. ihrer Infrastruktur. Die Cluster verknüpften umfangreiche Daten, Methoden und Simulationsmodelle zu Werkzeugen, mit denen sich das Risiko berechnen und darstellen, mögliche zukünftige Risikoveränderungen durchdenken und Empfehlungen zu angemessenen Sicherheitskonzepten und zur Risikominderung ableiten lassen.

Die drei Risikoanalyse-Cluster bearbeiteten die gesamte Wirkungskette vom auslösenden Naturereignis bis hin zu den Schäden. Die Analysen entlang dieser Wirkungsketten wurden in verschiedenen räumlichen Skalen und Detaillierungsgraden durchgeführt, z.B. erarbeitete der Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“:

- für das Gebiet der Bundesrepublik eine neue Erdbebengefährdungskarte,
- auf der regionalen Skala (ca. 50-70 km Umkreis von Köln) eine geotechnische Risikokarte,
- auf der lokalen Skala (Teile der Stadt Köln) Schadensszenarien,
- punktuell eine Abschätzung des Risikopotenzials von Bauwerken mit besonderem Sicherheitsanspruch (z.B. Krankenhaus, chemischer Betrieb).

Die gemeinsame Konzeption dieser drei Cluster und die Fokussierung auf ein möglichst weit übereinstimmendes Untersuchungsgebiet für die Naturgefahren Erdbeben, Sturm und Hochwasser sollten den Vergleich der verschiedenen Risiken und Methoden erleichtern.

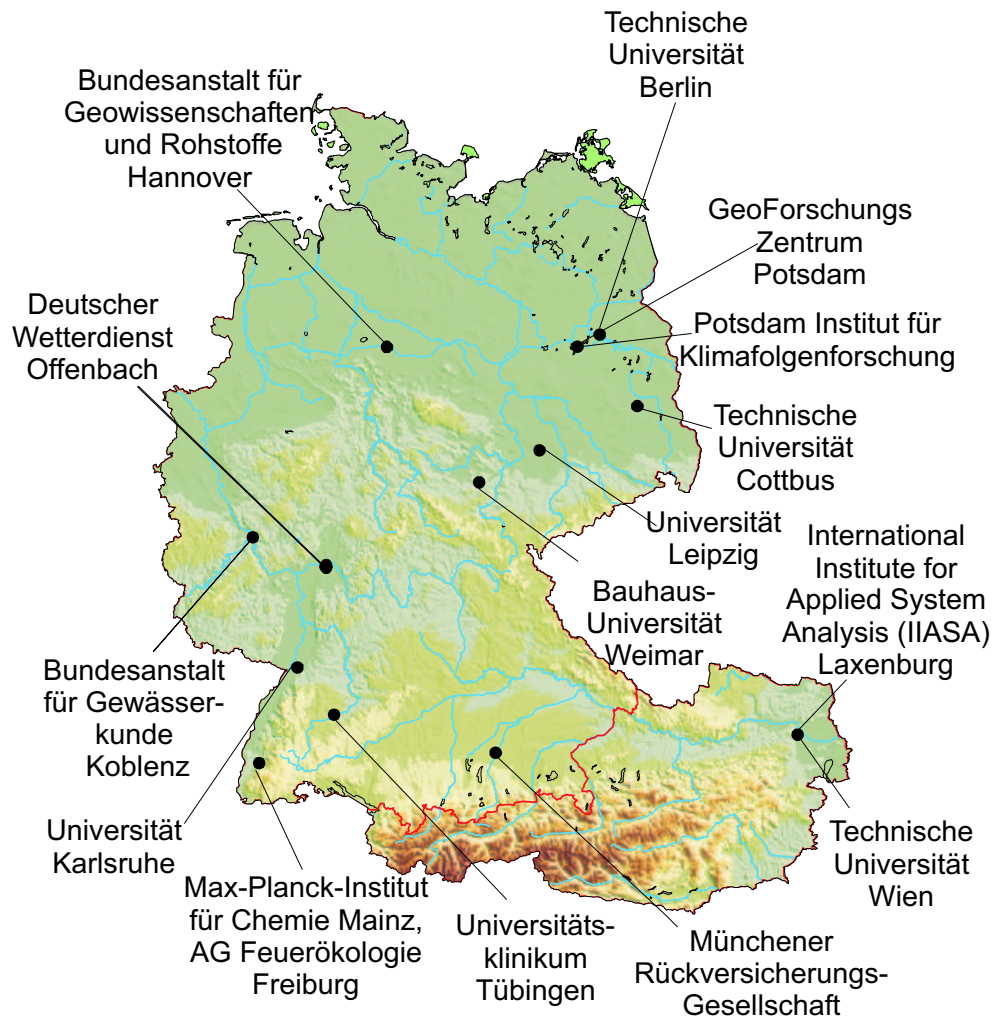


Abbildung 1.1: Die 15 Partner des DFNK

Als gemeinsame Region für diese drei Cluster wurde das Rheinland (Region Koblenz-Köln-Aachen) mit einer Konzentration auf den Raum Köln gewählt. Diese Region ist aufgrund ihrer vergleichsweise großen Gefährdung durch diese drei Naturrisiken und ihres hohen Schadenpotenzials von besonderem Interesse.

Der zweite regionale Schwerpunkt im DFNK war der Raum Berlin/Brandenburg. Der Cluster „Simulationssystem Waldbrand“ entwickelte ein Monitoring-, Simulations- und Früh-

warnsystem zur Waldbrandgefahr in Brandenburg. Neben der Vorhersage der Waldbrandgefahr wurden die Auswirkungen sowohl möglicher Klima- als auch Waldzustandsänderungen auf die Feuergefährdung in Brandenburg und deren Rückkopplungseffekte auf die Vegetationsdynamik und -struktur in der Zeitskala von Jahren bis Jahrzehnten analysiert.

Im Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ waren Teilprojekte verknüpft, deren Ziele die Bereitstellung von Daten (z.B. flächendeckende Basisdaten durch Satelliten-

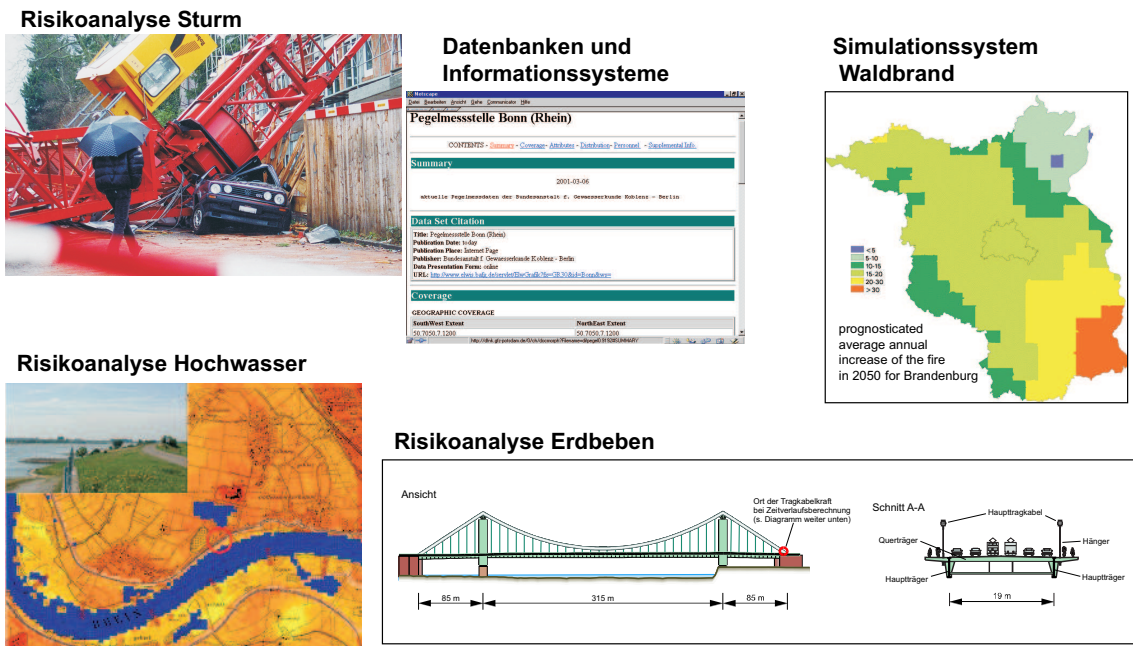


Abbildung 1.2: Die fünf thematischen Cluster des DFNK

technologie) und die Integration von Informationen und Tools in übergeordneten Informationssystemen (z.B. Clearinghouse, Data-Warehouse, schnelles Informationssystem für Erdbeben) für das Katastrophenmanagement waren.

Bei der Bewertung der Arbeiten ist zu beachten, dass die eingesetzten Ressourcen sehr unterschiedlich über die Cluster verteilt waren. Während die Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ und „Risikoanalyse Erdbeben“ aus mehreren Partnern und Teilprojekten bestanden, waren die Ressourcen der Cluster „Risikoanalyse Sturm“, „Simulationssystem Waldbrand“ und „Datenbanken und Informationssysteme“ deutlich geringer (siehe Liste der Teilprojekte, Anhang A.2).

Das DFNK wurde von einem Lenkungsausschuss begleitet, der sich aus Vertretern von Wissenschaft, Katastrophenschutz, Politik, Industrie und Medien zusammensetzte (Anhang A.4). Eine der wichtigsten Aufgaben des Lenkungsausschusses war es, die Arbeiten im DFNK auf ihre Nutzerorientierung zu prüfen und ggf. zu korrigieren. Des Weiteren unterstützte der Lenkungsausschuss die Wis-

senschaftler bei der Auswahl geeigneter Ansprechpartner des operativen Katastrophenmanagements und half, die Ergebnisse des Forschungsnetzwerks bei potentiellen Nutzern bekannt zu machen.

Vernetzung und Interdisziplinarität

Am DFNK beteiligten sich eine Vielzahl von Wissenschaftlern aus Natur-, Ingenieur- und Sozialwissenschaften, wobei der Schwerpunkt auf den Natur- und Ingenieurwissenschaften lag. Zu den Disziplinen, die im DFNK vertreten waren, gehörten Geowissenschaften, Bauingenieurwesen, Meteorologie, Hydrologie, Forstwirtschaft, Bodenkunde, Soziologie, Psychologie, Fernerkundung und Informatik. Im Folgenden wird beispielhaft gezeigt, welches ein breites Spektrum an Know-how im DFNK vernetzt wurde.

Beispiele für die interdisziplinäre Vernetzung im DFNK

Wie die Reaktionen auf das Hochwasser im August 2002 erneut gezeigt haben, werden Hochwasserkatastrophen häufig durch monokausale Ursachen erklärt, z.B. durch den

anthropogenen Einfluss auf das Klima oder die Versiegelung in den Einzugsgebieten. Diese beschränkte Betrachtung wird der Komplexität solcher Situationen nicht gerecht. Hochwasserkatastrophen entstehen aus einer zufallsbehafteten Überlagerung von mehreren Faktoren: der meteorologischen Situation als auslösendes Ereignis, der Abflussentstehung in den Einzugsgebieten, der Bildung und Fortpflanzung von Hochwasserwellen in den Bächen und Flüssen, der Exposition und Nutzung von bach- und flussnahen Gebieten, sowie des Krisenmanagements der betroffenen Menschen und der Gefahrenabwehr. Ob ein extremer Niederschlag zu einem Desaster führt, hängt von dem Zusammenwirken dieser vielfältigen Faktoren ab.

Zur quantitativen Beschreibung und Prognose von Hochwasserrisiken ist es notwendig, alle relevanten Faktoren zu berücksichtigen (Abb. 1.3). Im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ wurde diese Anforderung weitgehend durch das Zusammenwirken der verschiedenen Teilprojekte erfüllt, die die gesamte Wirkungskette Hochwasser abbildeten. Entsprechend dieser Wirkungskette wurden meteorologische, hydrologische, bodenkundliche, hydraulische, geotechnische, ökonomische und psychologische Analysen durchgeführt, die Daten und Ergebnisse an andere Teilprojekte übergeben und zu gemeinsamen Ergebnissen zusammengeführt. Kap. 2.1 beschreibt die Arbeiten der Teilprojekte und ihr Zusammenwirken.

Ein anderes Beispiel für eine gelungene Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Einrichtungen, Teilprojekten und Disziplinen zeigt Abb. 1.4. Im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ wurden Schadenprognosen für Rettungswege der Stadt Köln vom Teilprojekt (TP) B4 erstellt. In diese Schadenprognosen floss die Arbeit von vier weiteren Teilprojekten (B1, B2.1, B2.2, B3.1) ein und das Ergebnis wurde an drei Teilprojekte (B2.3, B3.1, B3.2) weitergegeben. Dies zeigt, welche enge Verknüpfungen im DFNK aufgebaut wurden.

Multi-Hazard-Betrachtung

Das DFNK ging noch einen Schritt weiter, indem neben dem breiten interdisziplinären Ansatz innerhalb einzelner Cluster im Sinne einer Multi-Hazard-Betrachtung Clusterübergreifende Sitzungen und Arbeiten durchgeführt wurden. In der Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ wurde eine Konzeption für den quantitativen Vergleich verschiedener Naturgefahren entwickelt und für Hochwasser, Erdbeben und Sturm auf die Stadt Köln angewendet (siehe Kap. 7).

Die Idee der Multi-Hazard-Betrachtung ist, dass es zur Optimierung von Maßnahmen der Katastrophenvorsorge und Katastrophengewältigung notwendig ist, alle relevanten Risiken einer Region zu kennen und mit einheitlichen Kriterien zu bewerten. Heute agieren Gesellschaft und Entscheidungsträger aufgrund von teilweise verzerrten Wahrnehmungen. Investitionen und die Bereitschaft zur Vorsorge hängen davon ab, welche Bedeutung verschiedene Naturgefahren im Bewusstsein von Gesellschaft und Entscheidungsträgern haben. Diese Bedeutung kann durch einzelne Schadenerfahrungen und ihre Darstellung in den Medien stark verändert werden. Es besteht die Tendenz, Ereignisse zu unterschätzen bzw. zu verdrängen, die extrem selten sind, dafür aber ein sehr hohes Schadenpotenzial im Falle des Eintretens haben. Solche Ereignisse sind häufig außerhalb des Erfahrungshorizontes und werden deshalb nicht gebührend berücksichtigt.

Für eine umfassende Vorsorge ist zu diskutieren, welchen Stellenwert unterschiedliche Naturgefahren haben und mit welchem Aufwand man sich schützen sollte. Diese Fragen erfordern eine Analyse unterschiedlich starker Ereignisse derselben Naturgefahr, aber auch die Gegenüberstellung des Risikos durch verschiedene Naturgefahren in einer Region. Ziel einer solchen Gegenüberstellung ist es, der Gesellschaft und den Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft, Raumplanung, Katastrophenmanagement und Versicherungen Kriterien für die einheitliche Bewertung an die Hand zu ge-

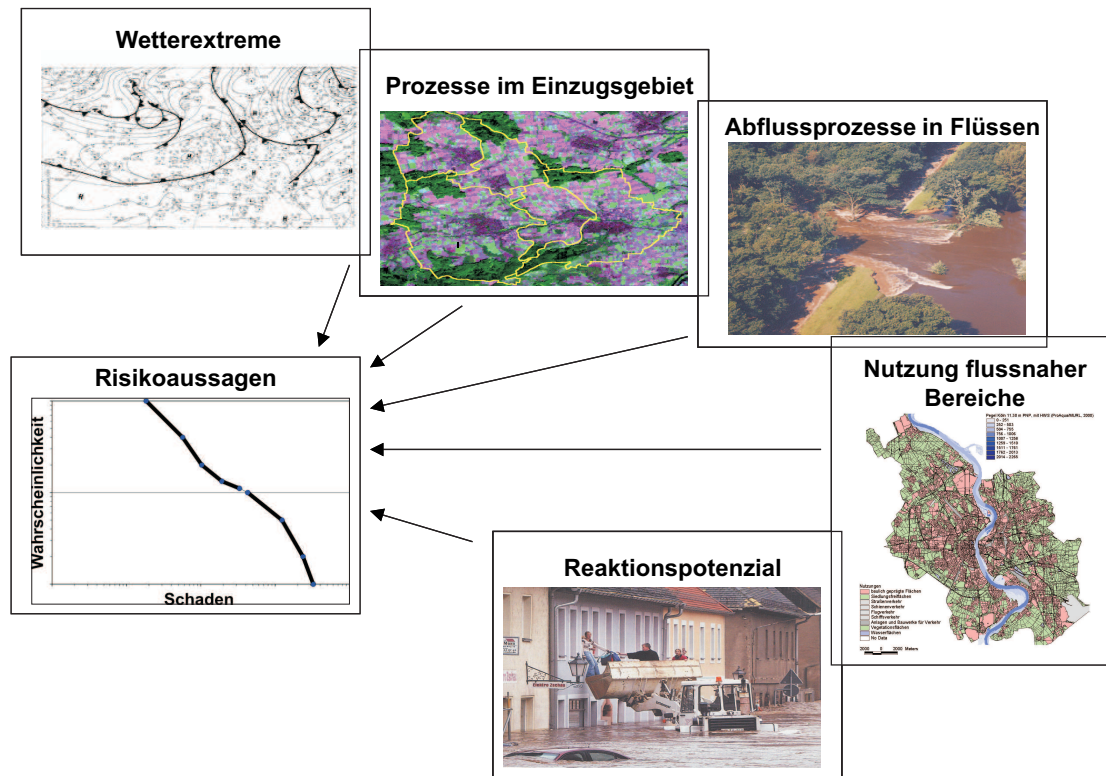


Abbildung 1.3: Die Elemente der Wirkungskette Hochwasserrisiko

ben und Bewusstsein für vernachlässigte Risiken zu schaffen. In der jüngeren Fachliteratur wird diese Problematik unter den Stichworten „regional risk assessment“ und „community-based risk assessment“ zunehmend diskutiert (Gheorghe et al., 2000, FEMA, 2001, Ferrier & Hague, 2003).

Weiterhin wird es durch die gemeinsame Betrachtung der verschiedenen Risiken in einer Region oder Stadt möglich,

- Daten, Methoden und Expertise gemeinsam zu nutzen, z.B. stellt sich die Frage nach den Auswirkungen von Infrastrukturausfällen (z.B. Strom- und Wasserversorgung, Kommunikation) bei allen Naturgefahren,
- gemeinsame Vorsorgestrategien zu entwickeln, z.B. Kommunikationssysteme, die dem Katastrophenschutz bei allen denkbaren Naturgefahren schnelle Infor-

mationen über eingetretene Schäden und vorhandene Ressourcen vermitteln.

Bewertung

Es wurde sehr schnell deutlich, dass teilweise große Unterschiede in den Sichtweisen, Ansätzen und Methoden bei unterschiedlichen Disziplinen bestehen. Es braucht Zeit und die Bereitschaft, sich auf andere Sichtweisen einzulassen, um ein gemeinsames Verständnis und gegenseitige Akzeptanz aufzubauen. Hierzu wurden gerade zu Beginn des Projekts viele disziplinenübergreifende Diskussionen geführt und gemeinsame Lösungen gesucht. Auch wenn solche Ansätze zeitaufwändig und mühsam sind, so ermöglichen sie Ergebnisse, die von einzelnen Disziplinen nicht erzielt werden können. Insgesamt wurde die interdisziplinäre Zusammenarbeit im DFNK von allen Beteiligten als ausgesprochen fruchtbar erlebt.

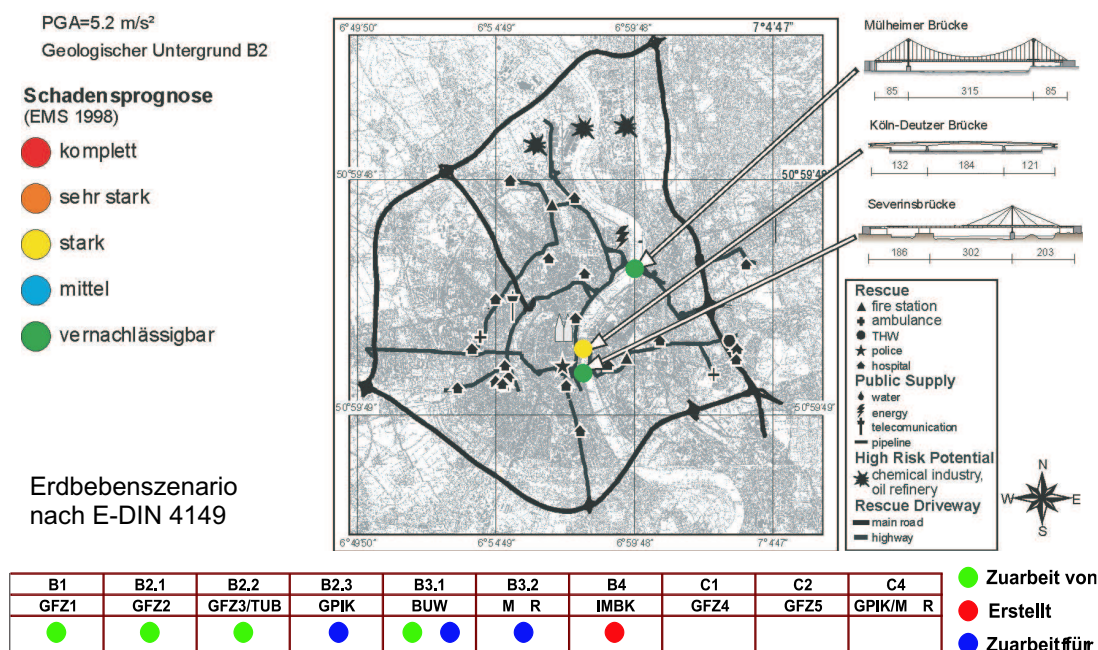


Abbildung 1.4: Zusammenwirken der Teilprojekte im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ am Beispiel von Schadensprognosen für Rettungswege in Köln (zur Verfügung gestellt von J. Schwarz)

Nutzerorientierung und Verwertung der Ergebnisse

Wichtige Aspekte des DFNK-Antrags waren, potenzielle Nutzer in die Arbeit einzubeziehen sowie Projektergebnisse so aufzubereiten, dass diese von den Nutzern angewendet werden können. Hierzu wurden im Rahmen des DFNK zahlreiche Anstrengungen unternommen. Dazu gehörte auch die Begleitung des Projekts durch den Lenkungsausschuss des DFNK, der das Projekt insbesondere hinsichtlich der Praxisrelevanz und -tauglichkeit beriet. Darüber hinaus gab der Lenkungsausschuss Empfehlungen für die Forschungsarbeiten und stellte Kontakte zu möglichen Nutzern her.

Auf der Ebene der Teilprojekte und Cluster gab es zahlreiche Versuche zur Einbeziehung von Nutzern und zur Bereitstellung praxistauglicher Werkzeuge. Tab. 1.1 zeigt als Beispiel die Liste der Nutzer, mit denen der Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ Gespräche geführt

hat. Des Weiteren wurde im November 2002 gemeinsam mit der Stadt Köln im Stadthaus Köln ein Hochwasser-Nutzerworkshop durchgeführt. Ein weiteres Beispiel für eine enge Zusammenarbeit mit potenziellen Nutzern sind die Kooperationen des Cluster „Simulationssystem Waldbrand“, z.B. mit der Bundesforstverwaltung. Teilweise ergab sich eine direkte Anwendung der im DFNK entwickelten Methoden; beispielsweise wird das im Cluster „Risikoanalyse Sturm“ entwickelte Verfahren in einem weiteren von einer Rückversicherungsgesellschaft finanzierten Projekt angewendet.

Im Jahr 2002 hat sich die Arbeitsgruppe „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“ gegründet. Die Arbeitsgruppe analysierte, wie der Transfer der Ergebnisse in die Praxis des Katastrophenmanagements im DFNK erfolgt, und bewertete die DFNK-Ergebnisse auf ihre Eignung für den Praxistransfer (siehe Kap. 6.1, Dransch, 2002).

Ministerium f. Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft, Verbraucherschutz NRW
Hochwasserschutzzentrale der Stadt Köln
Staatliches Umweltamt Krefeld
Staatliches Umweltamt Köln
Deutsche Kommission zum Schutz des Rheins
Hochwassernotgemeinschaft Rhein
Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft
Deutsche Rückversicherungsgesellschaft
Ministerium für Umwelt und Forsten Rheinland Pfalz
Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz
Struktur- und Genehmigungsdirektion Süd, Rheinland Pfalz
Umwelt- und Verkehrsministerium Baden Württemberg
Gewässerdirektion Karlsruhe
Regierungspräsidien Karlsruhe, Darmstadt, Köln
Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheins
Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum
Industrie- und Handelskammer zu Köln
Bürgervereinigung Hochwasser Rodenkirchen e.V.

Tabelle 1.1: Nutzergespräche des Cluster Risikoanalyse Hochwasser

Trotz dieser zahlreichen und teilweise sehr erfolgreichen Aktivitäten war es in der begrenzten Laufzeit von drei Jahren nur teilweise möglich, die Methoden und Ergebnisse in die Praxis zu überführen. Es sollte dringend geprüft werden, welche bzw. wie die im DFNK erarbeiteten Ergebnisse in Form von anwendungsorientierten, handlungsunterstützenden Instrumentarien für die Praxis zugänglich gemacht werden können. Hier sollte insbesondere über eine Integration der Ergebnisse in deNIS (Deutsches Notfallvorsorge-Informationssystem) nachgedacht werden.

Grundsätzlich stellt sich im föderalen System der Bundesrepublik das Problem, dass die Zuständigkeiten für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz auf vielfältige Akteure (Bund, Länder, Gemeinden und Städte, Hilfsorganisationen, Unterstützungseinheiten wie Technisches Hilfswerk, Bundeswehr, internationale Kommissionen wie Flusseinzugsgebietskommissionen, etc.) verteilt sind. Diese Vielfalt potenzieller Nutzer, ihrer Interessenslagen und Anforderungen erschwert die umfassende Analyse der an einem bestimm-

ten Ergebnis potenziell interessierten Nutzer und die entsprechende Kontaktaufnahme. Hinzu kommt, dass die Nutzer vielfach bereits über Methoden und Werkzeuge verfügen und erst dann bereit sind, neuere Ergebnisse und Werkzeuge einzuführen, wenn diese in einer für sie praktisch anwendbaren und aufbereiteten Form vorliegen. Die Werkzeuge müssen also auf den jeweiligen Nutzer zugeschnitten sein.

Es ist festzustellen, dass die Arbeiten im DFNK im Wesentlichen der Säule Anwendungsentwicklung und in etwas schwächerem Maße der Säule Grundlagenforschung in Abb. 1.5 zuzuordnen sind. Für die Umsetzung in die Anwendung (die dritte Säule) wurde im Rahmen der Arbeitsgruppe „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“ ein Konzept für einen verbesserten Praxistransfer vorgeschlagen (Dransch, 2002).

Eine wesentliche Voraussetzung für die Erarbeitung von praxistauglichen Instrumentarien ist die rechtzeitige Verfügbarkeit von qualitativ guten Daten. Dabei wurden im Laufe des

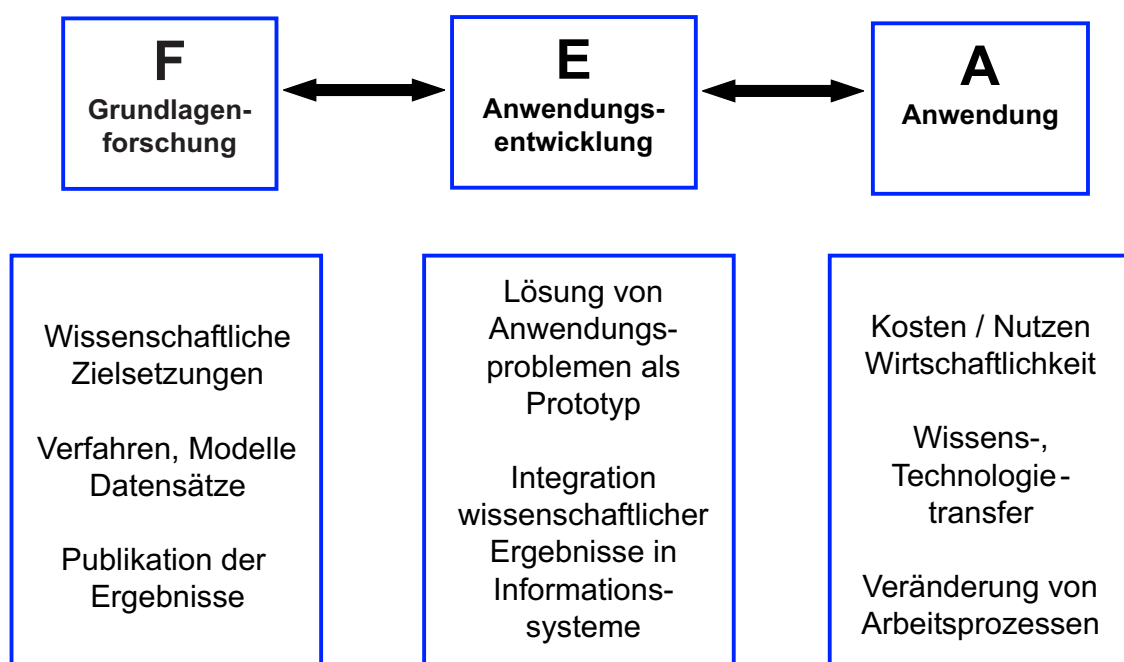


Abbildung 1.5: Innovationstransfer von wissenschaftlichen Ergebnissen in die Anwendung (zur Verfügung gestellt von J. Wächter)

Projekts sehr unterschiedliche Datensätze benötigt. Es musste ein großer Aufwand betrieben werden, um

- Klarheit zu bekommen, welche Daten bei welchen Stellen zu welchen Konditionen vorhanden sind,
- geeignete Datensätze zu beschaffen bzw. anzupassen.

Teilweise konnten die Methoden nur beispielhaft angewendet werden, da Daten nur exemplarisch zur Verfügung gestellt wurden. Dies ist einerseits verständlich, da Risikoanalysen und Schadensszenarien durchaus einen sensiblen Bereich, nämlich die Sicherheit von Menschen, Kommunen, Unternehmen usw., tangieren. Andererseits sind damit nur partielle Ergebnisse möglich. Es ist zu hoffen, dass entsprechend der großen Bedeutung von Daten Forschungsprojekte zukünftig einen einfacheren Zugang zu Daten bekommen.

Management des Forschungsnetzes

Die Erfahrungen des DFNK zeigen, dass in einem Netzwerk vielfältige Synergien genutzt und Fragestellungen bearbeitet werden können, die die Ressourcen und das Know-how einer Institution übersteigen. Für eine erfolgreiche Vernetzung ist ein koordiniertes Arbeiten die Grundvoraussetzung. Ein wesentliches Element der Koordination waren die Arbeitsgruppen (fünf Cluster sowie die Arbeitsgruppen „Synopsis der Naturgefahren“, „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“).

Obwohl aus Sicht des Projektmanagements die Zusammenarbeit in den Clustern und Arbeitsgruppen gut gelungen ist, haben die Erfahrungen doch auch gezeigt, dass die strenge Bindung der Partner an Teilprojekte, die vergleichsweise kurze Laufzeit von drei Jahren und die getrennte administrative und finanzielle Verwaltung der Arbeiten der verschiedenen Partner nicht geeignet sind, eine flexible und langfristige Vernetzung zu etablieren. Diese Randbedingungen schwächen die Einfluss-

möglichkeiten von Lenkungsausschuss, Projektmanagement und Arbeitsgruppenleiter.

Für die weitere Entwicklung der Forschung zum Thema Katastrophenvorsorge erscheint es hilfreich, ein flexibles und langfristig operierendes Netzwerk aufzubauen¹. In einem solchen Netzwerk könnten Universitäten, Helmholtz-Zentren und andere Wissenschaftseinrichtungen unter Einbeziehung der für Katastrophenvorsorge und Katastrophenmanagement zuständigen Akteure vernetzt werden. Dies betrifft Akteure aus Wirtschaft (Versicherung, Informations- und Kommunikationstechnologie, Datenprovider, Bauwirtschaft, Energieversorgung usw.), Politik (Bund, Länder, Kommunen) und Organisationen der Katastrophenvorsorge und des Katastrophenmanagements (Technische Notfallhilfe, Feuerwehr usw.). Neben Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollte eine wesentliche Komponente des Netzwerks der Know-how-Transfer (z.B. in Form von Trainingskursen und Programmen zur Studentenausbildung) sein, und zwar innerhalb des Netzwerks und über die Netzwerk-grenzen hinaus.

Die Partner des Netzwerks müssten sich verpflichten, gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsprogramme zu konzipieren und durchzuführen. Hierzu wären größere Verbundprojekte zu entwickeln, die alle oder mehrere Partner des Netzwerks umfassen. Die Forschungsförderung im Rahmen der Mitgliedschaft könnte über den Antrag eines möglichst breit vernetzten und zeitlich befristeten Forschungsvorhabens ermöglicht werden, wobei der Antrag einem Review-Prozess unterzogen würde.

Das Forschungsnetz sollte als offenes Netzwerk angelegt werden, das sich entsprechend dem Engagement und den sich verändernden Fragestellungen entwickelt. Dies schließt die

Möglichkeit ein, dass Partner ausscheiden oder neue Partner aufgenommen werden.

Und daraus folgt?

Das DFNK hat die Empfehlung des Wissenschaftlichen Beirats des Deutschen IDNDR-Komitees für Katastrophenvorbeugung e.V., die Expertise in Deutschland mit dem Ziel einer integrativen Forschung zu bündeln, Forschung über Disziplingrenzen hinweg zu betreiben und die Akteure des Katastrophenmanagements einbeziehen, ein Stück weit umgesetzt. Das DFNK hat damit für Deutschland Neuland betreten. Dies gilt z.B. für die „Synopse der Naturgefahren“ und die umfangreichen Ansätze zur Risikoabschätzung in den Clustern „Risikoanalyse Erdbeben“ und „Risikoanalyse Hochwasser“. Es hat gezeigt, dass solche integrativen Ansätze einen Mehrwert bringen. Dieser besteht darin, dass

- es erst durch eine umfangreiche Vernetzung möglich wird, umfassende Lösungen zu entwickeln,
- Ressourcen (Daten, Modelle, Geräte usw.) gemeinsam genutzt werden,
- die Komplementarität und gegenseitige Spezialisierung im Netzwerk gestärkt werden,
- verschiedene Ansätze zur Abschätzung, Bewertung und Minderung von Naturrisiken diskutiert und verglichen werden können, um fach- und sektorenübergreifende Lösungen zu finden,
- Gefahrentyp-übergreifende Ansätze entwickelt werden können, z.B. Vorsorgekonzepte, die alle Naturgefahren in einer Region gemeinsam berücksichtigen.

¹Auf europäischer Ebene wurden im neuen Forschungsprogramm (6. Rahmenprogramm) durch das neue Instrument „Network of Excellence“ die Möglichkeiten für flexiblere und längerfristige Forschungsnetze geschaffen.

In der dreijährigen Laufzeit des DFNK lag der Fokus auf der Vernetzung und der Methodenentwicklung. Die mittlerweile aufgebaute Kompetenz (hinsichtlich Methoden, in-

terdisziplinärer Zusammenarbeit, Nutzerkontakten) könnte jetzt für eine Operationalisierungsphase genutzt werden. Ein Modell hierfür könnte die Etablierung von flexiblen und längerfristigen Netzwerken sein, die bestehende oder im Aufbau befindliche Strukturen (z.B. Helmholtz-Arbeitsgruppe „Konzertiertes Handeln bei Naturkatastrophen“) berücksichtigen.

Nur durch kontinuierliche und koordinierte Forschungsanstrengungen wird es möglich sein, effektive und effiziente Strategien für die komplexen Probleme der Katastrophenvorsorge und Katastrophenbewältigung zu entwickeln und umzusetzen.

Literatur

DKKV (Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V.), 2000: Jahresbericht 1999, Schriftenreihe des DKKV, 20, Bonn

DKKV (Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V.), 2003: Hochwasservorsorge in Deutschland. Lernen aus der Katastrophe 2002 im Elbeinzugsgebiet, Schriftenreihe des DKKV, 29, Bonn

Dombrowsky, W.R. & Brauner, C., 1996: Defizite der Katastrophenvorsorge in Industriegesellschaften am Beispiel Deutschlands. Untersuchungen und Empfehlungen zu methodischen und inhaltlichen Grundsatzfragen. Deutsche IDNDR-Schriftenreihe, 3, Bonn

Dransch, D., 2002: Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis. GeoForschungsZentrum Potsdam (unveröffentlicht)

FEMA (Federal Emergency Management Agency), 2001: Understanding your risks: Identifying hazards and estimating losses. FEMA 386-2

Ferrier, N. & Hague, C.E. (2003): Hazards risk assessment methodology for emergency managers: A standardized framework for application. *Natural Hazards*, 28, 271-290

Gheorghe, A.V., Mock, R. & Kröger, W., 2000: Risk assessment of regional systems, *Reliability Engineering and System Safety*, 70, 141-156

Grünewald, U., Kaltofen, M., Rolland, W., Schümberg, S., Chmielewski, R., Ahlheim, M., Sauer, T., Wagner, R., Schluchter, W., Birkner, H., Petzold, R., Radczuk, L., Eliasiewicz, R., Paus, L. & Zahn, G., 1998: Ursachen, Verlauf und Folgen des Sommer-Hochwassers 1997 an der Oder sowie Aussagen zu bestehenden Risikopotentialen. Eine interdisziplinäre Studie. Deutsches IDNDR-Komitee für Katastrophenvorbeugung e.V., Deutsche IDNDR-Schriftenreihe, 10, Bonn

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

Zschau, J., Merz, B., Plate, E.J. & Goldammer, J.G., 2001: Frühwarnung und Katastrophenmanagement. In: Plate, E.J. & Merz, B., *Naturkatastrophen. Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 273-350

1.2 Kurzdarstellung der Ergebnisse des DFNK

Die folgenden Tabellen geben eine Übersicht über die praxisrelevanten Ergebnisse, die im DFNK erarbeitet wurden. Dabei wird unterschieden in Tools/Methoden und Resultate. Unter Tools/Methoden werden Methodenentwicklungen genannt, also alle im DFNK entwickelten Werkzeuge und Verfahren, die auf andere Gebiete bzw. Randbedingungen übertragbar sind. Die Rubrik Resultate weist Ergebnisse für bestimmte Regionen und Fragestellungen aus. Hierzu gehören Gefährdungs- und Risikoaussagen, Schadensszenarien oder Handlungsempfehlungen.

Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“	
Clusterleiter: Markus Disse, Universität der Bundeswehr, München	
Der Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ erarbeitete Methoden zur Quantifizierung des Hochwasserrisikos in Flusseinzugsgebieten. Damit ist es möglich, die aktuelle Situation zu erfassen, sowie mögliche Risikoveränderungen, z.B. durch Klimaänderungen, abzuschätzen. Die Methoden wurden beispielhaft im deutschen Rheineinzugsgebiet entwickelt. Sie sind auf andere Gebiete übertragbar.	
Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung und Test eines Verfahrens (Expanded Downscaling, EDS) zur Abschätzung der Folgen von globalen Klimaänderungen auf das regionale Niederschlagsverhalten mit besonderer Berücksichtigung von Starkniederschlägen	2.2
Implementierung eines hydrologischen Einzugsgebietsmodells (HBV-D) und seine Integration in ein GeoInformationssystem (GIS) als nutzerfreundliches und übertragbares Werkzeug zur Modellierung von hydrologischen Einzugsgebietskenngrößen und zur Abschätzung der Wirkung von Klimawandel und Nutzungsänderungen auf Abflüsse	2.3
Entwicklung eines Verfahrens zur hochauflösenden, automatischen Landnutzungsklassifizierung mittels Satellitendaten	2.5
Entwicklung eines Wellenablaufmodells mit integriertem Deichbruch- und Überschwemmungsmodul zur Abschätzung der Überflutungsflächen nach Deichbrüchen sowie des veränderten Wellenablaufs unterhalb der Deichbruchstelle	2.6
Entwicklung eines einfachen Modells zur Berechnung des Bruchzeitpunktes von Deichbrüchen durch Überströmen	2.6
Entwicklung einer vereinfachten Berechnungsformel für den Durchfluss durch Deichbreschen	2.6
Internet- und GIS-basierte Simulation von Überflutungsflächen und Schadstoffausbreitung zur Entscheidungsunterstützung in Planung und Katastrophenschutz und zur Information und Bewusstseinsbildung der Bevölkerung	2.7

Entwicklung eines stochastischen Modellsystems zur Abschätzung von Hochwasserrisiken und assoziierter Unsicherheit entlang von Flussstrecken	2.9
Test eines Verfahrens zur automatischen Häuserextraktion mittels Satellitendaten zum Siedlungsmonitoring	2.5
Resultate	Kapitel
Aussagen zu Starkniederschlägen und Niederschlagsszenarien unter Klimaänderungen für Teileinzugsgebiete des Rheins in Deutschland	2.2
Aussagen zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf Hochwasserabflüsse im Rheineinzugsgebiet in Deutschland	2.3
Berechnung des Hochwasserwellenablaufs im Rhein und seinen bedeutendsten Nebenflüssen	2.6
Handlungsempfehlungen zur Steigerung des Wasserretentionspotentials land- und forstwirtschaftlicher Böden	2.5
Größenangaben für die Breschenbreite von Deichbrüchen	2.6
Veränderung des Hochwasserwellenablaufs im Rhein unterhalb von Deichbrüchen	2.6
Überflutungsszenarien und Risikoabschätzungen für den Polder Mehrum am Niederrhein	2.7, 2.9
Handlungsempfehlungen für den Aufbau einer „Präventionskultur“ im Hinblick auf präventiven Hochwasserschutz von Privathaushalten und Unternehmen	2.8

Cluster „Risikoanalyse Sturm“

Clusterleiter: Gerd Tetzlaff, Universität Leipzig

Der Cluster „Risikoanalyse Sturm“ entwickelte ein Verfahren zur Generierung von Sturmereignissen auf der Basis von bekannten Sturmereignissen.

Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung einer Methode zur Generierung synthetischer Stürme aus dokumentierten Sturmereignissen	3.1
Resultate	Kapitel
Sturmszenarien einschließlich einer Schadenabschätzung für die Stadt Köln	3.1, 7

Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“	
Clusterleiter: Jochen Schwarz, Bauhaus-Universität Weimar	
Der Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ erarbeitete Methoden zur Quantifizierung des Erdbebenrisikos. Die Arbeiten umfassen die gesamte Wirkungskette, ausgehend von der Gefährdungseinschätzung und Wahrscheinlichkeit von Erdbebenszenarien, über die Ermittlung der standortabhängigen Verstärkungseffekte, Bewertung der Verletzbarkeit des Bauwerksbestandes und Analyse ausgewählter Bauwerke und Infrastrukturanlagen bis hin zur Ableitung der regional und lokal differenzierten Schadenserswartung.	
Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung eines Verfahrens zur verbesserten Abschätzung der Erdbebengefährdung unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Ausgangsdaten (z.B. Bebenkatalogdaten, geologische Modelle) sowie zur Abschätzung maximaler Magnituden	4.2
Entwicklung, Implementierung und Vergleich von Verfahren zur Erdbebenmikrozonierung	4.3, 4.5, 4.6
Entwicklung eines Simulationsmodells zur Berechnung der Bodenerschütterung	4.4
Entwicklung methodischer Grundlagen zur GIS-basierten Abschätzung des Erdbebenrisikos	4.7
Implementierung einer numerischen Simulationsmethode zur Abschätzung der Erdbeben vulnerabilität von Gebäuden	4.8
Verfahren zur semi-automatischen Gebäudetypklassifizierung mittels hochauflösender Satellitendaten als Hilfe für die Vulnerabilitätsabschätzung von Gebäuden bei Erdbeben	4.9
Resultate	Kapitel
Erdbebengefährdungskarten für verschiedene Gefährdungsniveaus, Erschütterungsparameter und Untergrundbedingungen für die Niederrheinische Bucht sowie Wahrscheinlichkeitsabschätzungen für Erdbebenszenarien für den Kölner Raum	4.2
Erdbebenmikrozonierung für den Raum Köln (Karten der Standortperiode und Bodenverstärkung); Angabe repräsentativer Tiefenprofile, Beschleunigungszeitreihen und Bemessungsspektren	4.3, 4.5, 4.6
Vergleich von drei praxisüblichen Berechnungsverfahren zur Mikrozonierung; Empfehlungen für den Einsatz zur Verbesserung der Abschätzung der lokalen Erdbebengefährdung	4.3, 4.5
2D-Hybrid-Untergrundmodelle zur Präzisierung der Eingangsparameter von Vulnerabilitätsanalysen	4.4

Bewertung des in Deutschland üblichen Nachweises der Grundbruchsicherheit von Flachfundamenten	4.5
Aufnahme der Bausubstanz und Bewertung der Erdbebentauglichkeit; Quantifizierung der Schadenspotentiale in Köln auf Basis deterministisch begründeter Erdbebenszenarien bzw. für verschiedene Gefährdungsniveaus; Identifikation besonders gefährdeter Einzelobjekte	4.7
Untersuchungen zum Verhalten und zur Verletzbarkeit relevanter Infrastrukturen (Rheinbrücken) und Bauwerke (z.B. Krankenhäuser); Rettungswegenetz	4.8

Cluster „Simulationssystem Waldbrand“

Clusterleiter: Johann G. Goldammer, Max-Planck-Institut für Chemie, Arbeitsgruppe Feuerökologie / Global Fire Monitoring Center (GFMC), c/o Universität Freiburg

Der Cluster „Simulationssystem Waldbrand“ entwickelte ein Konzept für ein Informationssystem für die im Feuer-Management involvierten Stellen. Das Konzept umfasst die automatische Detektion von Feuern, die Frühwarnung vor Waldbrandgefahr und die Simulation des Feuerverhaltens. Daneben wurden die langfristigen Auswirkungen von Änderungen des Klimas und der Bestandsstruktur auf die Waldbrandgefahr in Brandenburg analysiert.

Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung einer Methode zur Frühwarnung vor Waldbrandgefahr (Waldbrandgefahrenindex)	5.1
Entwicklung und Test eines Automatisierten Waldbrand-Früherkennungssystems in Brandenburg (AWFS)	5.1
Einführung von AWFS als System FIREWATCH auf dem Markt (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) und international im Vermarktungsprozess (Australien, Griechenland, Kanada, Russland, Südafrika, Türkei)	5.1
Test und Validierung des Sensorsystems bzw. Kleinsatelliten BIRD als weltweit innovatives weltraumgestütztes System des Monitoring von Vegetationsbränden und anderen Hochtemperaturereignissen (HTEs)	5.1
Transfer von nordamerikanischen Modellen zur Simulation des Feuerverhaltens auf die Verhältnisse in Deutschland als Entscheidungsunterstützung bei Waldbränden	5.1
Erweiterung des globalen Feuerinformationssystems „Global Fire Monitoring Center“ (GFMC) hinsichtlich internationaler Entscheidungsunterstützung und Kooperation bei Großbränden	5.1

Anwendung eines Simulationsmodells (dynamisches Waldbrand-Vegetationsmodell) zur Prognose der Waldbrandgefährdung unter Änderungen des Klimas und der Bestandsstruktur der Vegetation	5.2
Resultate	Kapitel
Waldbrandgefahrenindex für Deutschland, vom DWD während der Feuersaison über das Internet täglich aktualisiert	5.1
Empfehlung für die langfristige Planung von Waldumbaumaßnahmen in Hinblick auf die Waldbrandgefährdung in Brandenburg unter Klimaänderungen	5.2

Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“

Clusterleiter: Joachim Wächter, GeoForschungsZentrum Potsdam

Der Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ entwickelte ein Erdbeben-Informationssystem und stellte eine Informationsinfrastruktur für das DFNK bereit. Diese umfasst Grundlagen zum gemeinsamen Daten- und Informationsmanagement und eine Internetplattform für die Wissenschaftler sowie die Öffentlichkeit und ist auf andere Netzwerke übertragbar. Darüber hinaus wurde die „DFNK-Potentialanalyse“ erarbeitet, eine Bestandsaufnahme von DFNK-Produkten und die Bewertung hinsichtlich ihrer Eignung für eine Nutzung in der Praxis des Katastrophenmanagements.

Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung eines internetbasierten Datenkataloges (DFNK-Clearinghouse) zur Verwaltung von heterogenen und verteilten Datenbeständen	6.2
Aufbau eines Internetportals zur Außendarstellung und als Projektplattform	6.2
Entwicklung eines Editors zur Erzeugung von Metadaten als Grundlage für das DFNK-Clearinghouse	6.2
Entwicklung eines geographischen Namensverzeichnisses zur Unterstützung der Datenrecherche über das DFNK-Clearinghouse	6.2
Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung der Phasenindikation in der Auswertung von Erdbebenregistrierungen	6.3
Entwicklung eines Erdbeben-Informationssystems zur schnellen Bereitstellung von zuverlässigen Informationen bei starken Erdbeben in Deutschland und angrenzenden Gebieten	6.3
Resultate	Kapitel
Bestandsaufnahme von DFNK-Produkten und Bewertung hinsichtlich ihrer Eignung (Realisierungsgrad, Integrations- und Entwicklungsmöglichkeiten, Praxisrelevanz, etc.) für eine Nutzung in der Praxis	6.1, 6.2

Übertragbare Konzeption zum Aufbau von Informationsinfrastrukturen für vergleichbare Forschungsnetzwerke	6.2
Bewertung verschiedener Methoden/Softwaresysteme zur Schadensabschätzung für Erdbeben	6.4

Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“

Arbeitsgruppenleiter: Gottfried Grünthal, GeoForschungsZentrum Potsdam

Als Novum für Deutschland wurde für die Stadt Köln eine vergleichende Analyse des Risikos durch die drei Naturgefahren Hochwasser, Erdbeben und Sturm erstellt.

Tools/Methoden	Kapitel
Entwicklung einer Methode zur vergleichenden Risikoanalyse	7
Resultate	Kapitel
Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten extremer Windgeschwindigkeiten, Überflutungsflächen und Erdbebenintensitäten und assoziierter Schäden für die Stadt Köln	3.2, 7

Kapitel 2

Cluster Risikoanalyse Hochwasser

2.1 Konzeption und Bewertung der Arbeiten

Markus Disse

Universität der Bundeswehr München

Institut für Wasserwesen

Email: markus.disse@unibw-muenchen.de

2.1.1 Zielsetzung

Der Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ untersuchte die Hochwasserwirkungskette „Starkniederschlag - Abflussbildung - Abflusskonzentration in den Teileinzugsgebieten - Wellenablauf im Gewässersystem - Versagen von Schutzeinrichtungen - Überflutungen - Verluste“. Zusätzlich befasste sich ein Teilprojekt mit der privaten, vorsorgenden Selbsthilfe gegen Hochwassergefahren durch Privathaushalte und Unternehmen. Die Arbeitsgruppe analysierte im Einzugsgebiet des Rheins ab Maxau/Karlsruhe (Abb. 2.1) die gesamte Wirkungskette in verschiedenen räumlichen Skalen und Detaillierungsgraden. Dabei wurden drei Hauptziele verfolgt:

- Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Quantifizierung des Hochwasserrisikos in Flusseinzugsgebieten,
- Untersuchung der Auswirkungen von Klima- oder Landnutzungsänderungen sowie von Schutzmaßnahmen auf das Hochwasserrisiko,
- Ableiten von Handlungsempfehlungen zur Reduzierung des Hochwasserrisikos.

Die Quantifizierung des Hochwasserrisikos wurde beispielhaft für Rheinabschnitte in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Das Forschungsvorhaben war anwendungsorientiert ausgerichtet, so dass die Ergebnisse für die ansässigen Behörden und interessierten Bürger nutzbringend verwendet werden können. Darüber hinaus wurde angestrebt, dass die entwickelten Methoden und Modelle auf andere

Flusseinzugsgebiete übertragbar und erweiterbar sind. Sie sind somit auch für andere wissenschaftliche Einrichtungen, aber auch für die (Rück-)Versicherungswirtschaft und wasserwirtschaftliche Organisationen relevant.

2.1.2 Zusammenwirken der Teilprojekte

Während der Laufzeit des DFNK erfolgte eine enge und effektive Zusammenarbeit in den acht Teilprojekten des Clusters „Risikoanalyse Hochwasser“. Abbildung 2.2 gibt den Daten- und Informationsfluss zwischen den Arbeitseinheiten wieder, während Tabelle 2.1 die jeweiligen Verknüpfungen stichwortartig erläutert. Die Arbeiten der einzelnen Teilprojekte werden in den nachfolgenden Unterkapiteln vorgestellt. An dieser Stelle sollen die Schnittstellen im gesamten Arbeitsablauf näher erläutert sowie ein Ausblick auf weitergehende Arbeiten zur Umsetzung der Erkenntnisse in die Praxis gegeben werden.

Hydrologische Modelle benötigen zur Berechnung von Abflüssen meteorologische Informationen. TP A3 hatte die Aufgabe, die meteorologischen Eingangsgrößen Niederschlag und Temperatur für das deutsche Rheineinzugsgebiet unter Berücksichtigung von Klimaänderungen bereitzustellen. Dabei wurden mit Hilfe von Globalen Zirkulationsmodellen für verschiedene Szenarien (Istzustand, CO₂-Zunahme) die Niederschlags- und Temperaturfelder auf die regionale Ebene mit Hilfe eines statistischen Disaggregierungsverfahrens (EDS, expanded downscaling) herunterskaliert. Die Ergebnisse wurden von TP A4.1 als

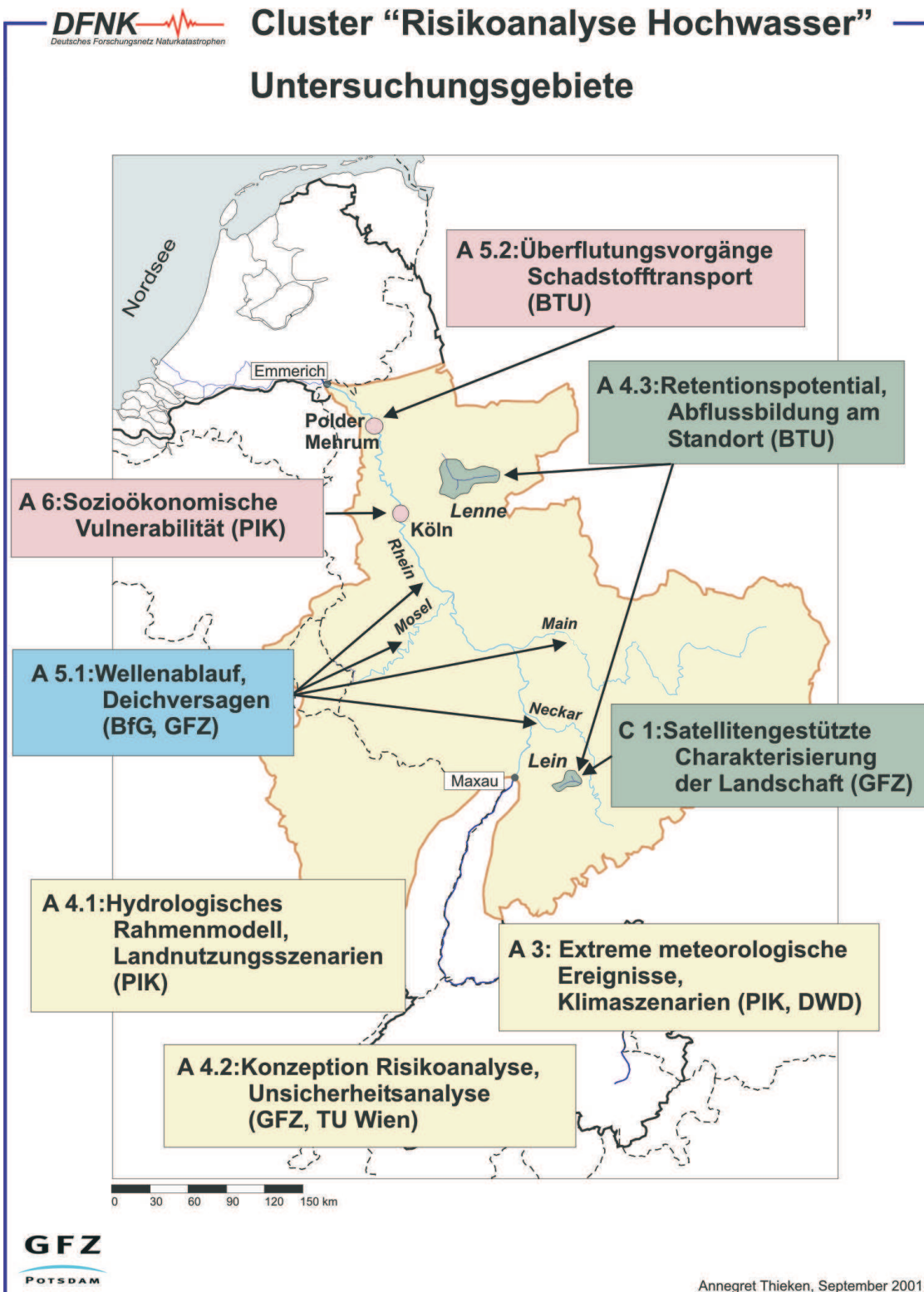


Abbildung 2.1: Die Teilprojekte des Clusters „Risikoanalyse Hochwasser“ und ihre räumliche Zuordnung im Rheineinzugsgebiet

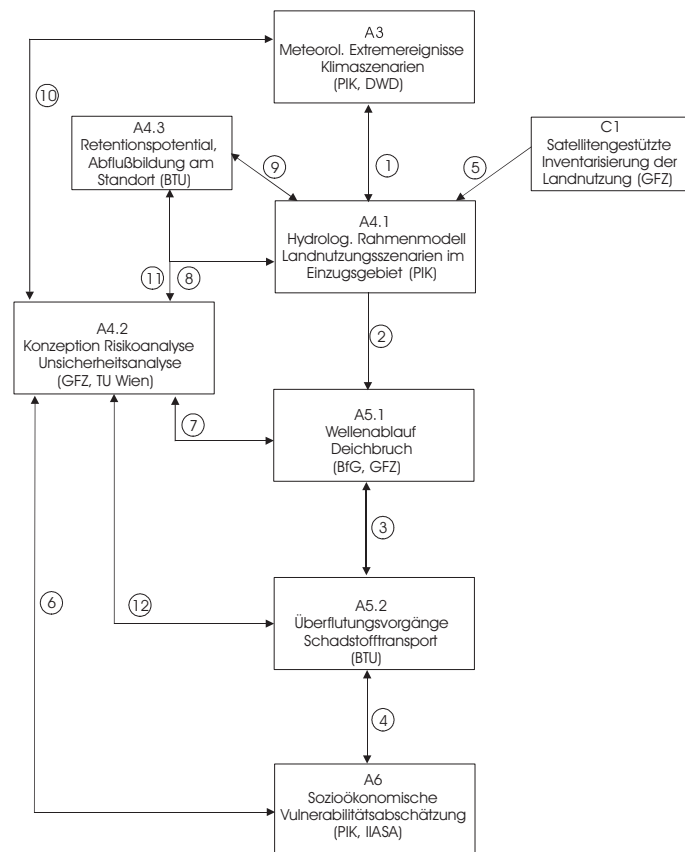


Abbildung 2.2: Das Zusammenwirken der Teilprojekte im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“

Eingangsgrößen für das hydrologische Rahmenmodell verwendet. Dadurch war es TP A4.1 möglich, die hydrologischen Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen im Rheingebiet zu quantifizieren. Es zeigte sich, dass die Prognose zukünftiger Niederschlagsänderungen aufgrund einer erhöhten CO₂-Konzentration je nach verwendetem Klimamodell sehr unterschiedlich ausfällt. Die jahreszeitliche Niederschlagsverteilung wird zum Beispiel von den zwei verwendeten Modellen gegensätzlich simuliert. Es lässt sich trotz der erwähnten Unsicherheiten insgesamt eine Tendenz zu höheren Jahresniederschlägen und zu Starkniederschlagsereignissen hoher Intensitäten feststellen.

Im weiteren Verlauf der Hochwasserwirkungskette berechnete das hydrologische Rahmenmodell (TP A4.1) Abflussganglinien, die sich aus den Eingangsgrößen der Klimaszenarien in

Verbindung mit der Topographie, den Bodeneigenschaften und der aktuellen Landnutzung ergaben. Insgesamt ist eine Erhöhung der mittleren Abflussbedingungen aufgrund der angenommenen Klimaveränderung zu verzeichnen. Für die Abschätzung einer zu erwartenden Veränderung von extremen Hochwasserereignissen sind die Ergebnisse allerdings nicht aussagekräftig, da sie im Bereich der Modellunsicherheiten bzw. der natürlichen Variabilität liegen. Diese Aussagen wurden in Abstimmung mit TP A4.2 erarbeitet, welches eine Unsicherheitsanalyse sowohl für mittlere Abflussverhältnisse als auch für Hochwasserereignisse durchführte.

Um den Einfluss verbesserter Landnutzungsinformation in hoher räumlicher Auflösung auf die hydrologische Modellierung zu quantifizieren, übergab TP C1 an TP4.1 aus Satellitendaten abgeleitete Landnutzungskarten für

Nr.	Teilprojekte	Daten-/ Informationsfluss
1	A 3 → A 4.1 A 4.1 → A 3	Tageswerte von Niederschlag und Temperatur (räumlich aufgelöst) für vergangene und zukünftige Klimabedingungen Vorgabe der Klimastationen
2	A 4.1 → A 5.1	Übergabe von Abflussganglinien aus den Teileinzugsgebieten
3	A 5.2 → A 5.1 A 5.1 ↔ A 5.2	Übergabe von Zuflussganglinien nach Deichbruch in den Überflutungsbereich Vergleich der 2-dimensionalen bzw. 1-dimensionalen Berechnungen
4	A 5.2 → A 6	Überflutungsflächen im Hinterland nach Deichbruch (Höhen, Dauern usw.)
5	C 1 → A 4.1	digitale Landnutzungskarten des Rheingebiets
6	A 4.2 ↔ A 6	Absprachen zur Quantifizierung der Unsicherheiten bei der Schadensabschätzung sowie Absprachen bei der Typisierung von Schadensereignissen
7	A 4.2 ↔ A 5.1 A 5.1 → A 4.2	Absprachen zur Quantifizierung der Unsicherheiten bei der hydraulischen Modellierung Wellenlaufzeiten, Wasserstands-Abfluss-Beziehungen, Deichbruchszenarien
8	A 4.2 ↔ A 4.1 A 4.1 → A 4.2	Absprache bei der Quantifizierung der Unsicherheiten bei der hydrologischen Modellierung Konzentrationszeiten und Abflussbeiwerte in Abhängigkeit vom Niederschlag sowie Hochwasserstatistik der simulierten Abflüsse
9	A 4.3 → A 4.1 A 4.1 → A 4.3	Übergabe bodenhydrologischer Parameter Modellierungsergebnisse mit den vorgegebenen Parametern
10	A 4.2 ↔ A 3 A 3 → A 4.2	Absprachen zur Quantifizierung der Unsicherheiten bei den Klimaszenarien Gegenwärtige und zukünftige Klimabedingungen (Tageswerte von Niederschlag und Temperatur, räumlich aggregiert), Konfidenzintervalle für Niederschlag und Temperatur
11	A 4.2 ↔ A 4.3	Absprachen zur Quantifizierung der Unsicherheit des Retentionsvermögens der Landschaft
12	A 5.2 → A 4.2	Wasserstands-Deichbruch-Beziehungen und Modellergebnisse zur Scheitelreduktion und Wellenverformung

Tabelle 2.1: Definition der Schnittstellen zwischen den Teilprojekten im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“

das Neckargebiet. Unter den gegebenen Modellannahmen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen hochaufgelösten (30 m) und aggregierten (100 m) Landnutzungsdaten festgestellt werden. Einflüsse einer geänderten Landnutzung, die auf realistischen Szenarien beruhen, ergaben ebenfalls keine nennenswerten Unterschiede im Abflussverhalten mesoskaliger Einzugsgebiete ($> 1000 \text{ km}^2$). Für die Mikroskala können Landnutzungsänderungen und unterschiedliche Bewirtschaftungsmethoden dagegen einen wesentlich stärkeren Einfluss auf die Abflussbildung und -konzentration haben. Die Untersuchungen von TP A4.3 bestätigten diese Aussage anhand von Feldexperimenten. Aufgrund der beschränkten Laufzeit des DFNK war die modelltechnische Umsetzung der Beobachtungen von TP A4.3 zum Infiltrationsverhalten und zum Retentionspotential in Abhängigkeit des Bodens, der Landnutzung und der Bodenbearbeitung nicht mehr zu leisten.

Die Ergebnisse des hydrologischen Rahmenmodells, d.h. die Abflussganglinien an verschiedenen Flüssen im Rheineinzugsgebiet, gingen schließlich in das hydraulische Wellenablaufmodell des TP A5.1 ein. Neben der Simulation der Wellenverformung und der Fließzeiten entlang des Rheins und seiner wichtigsten Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel wurden Deichbruchszenarien erstellt. Ziel war es, die raum-zeitliche Ausbreitung des durch die Deichbresche in das Überflutungsgebiet einströmende Volumen, sowie die raum-zeitliche Ausbreitung des Breschendurchflusses und die Auswirkungen des Deichversagens auf den Wellenablauf im Hauptfluss (Rhein) zu simulieren. Dazu wurde das 1-dimensionale Wellenablaufmodell mit einem Deichbruchmodul und nachgeschaltetem Überschwemmungsmodell gekoppelt.

Eine Analyse von historischen Deichbrüchen lieferte Anhaltswerte für die Deichbruchmodellierung. Für den Versagensfall Überströmen wurde ein probabilistischer Ansatz zur Abschätzung der Bruchwahrscheinlichkeit entwickelt. Begünstigt durch die sehr kurzen

Rechenzeiten generierte TP A5.1 zahlreiche Deichbruchszenarien für unterschiedliche Topographien des überschwemmten Hinterlandes. Aus der Analyse dieser Daten kann man abschätzen, welche Flächen in welcher Zeit gefährdet sind und wie sich die Hochwasserwelle stromabwärts abflacht. Bei der aktuellen Hochwasserwarnung stellen diese Informationen eine wichtige Grundlage dar, um rechtzeitig Evakuierungen anzuordnen. Für die Kalibrierung und Validierung des gekoppelten Modells wurden die Ergebnisse von TP A5.2 herangezogen, das die Überflutungsdynamik infolge von Deichbruchszenarien mit einem komplexen 2-dimensionalen hydrodynamischen numerischen Modell berechnete.

Der Schwerpunkt des TP A5.2 lag neben der 2-dimensionalen Berechnung der Wellenausbreitung im Hinterland in der Entwicklung eines Informationssystems zur Warnung der betroffenen Bevölkerung. Auf der Basis eines GIS ist es möglich, dynamische Überschwemmungskarten und Ausbreitungsvorgänge von Schadstoffquellen (z.B. ausgelaufene Öltanks) internetbasiert an die zuständigen Behörden und Bürger zu übermitteln, so dass das Gefahrenpotenzial und die noch zur Verfügung stehenden Rettungswege online abrufbar sind. Dieses Vorgehen konnte exemplarisch für einen Polder am Niederrhein demonstriert werden.

Am Ende der vom Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ simulierten Hochwasserwirkungskette steht der Mensch mit seinen möglichen Reaktionen auf die akute oder latente Bedrohung. Diesem Aspekt widmete sich TP A6, das das Potenzial zur vorsorgenden Selbsthilfe gegen Hochwassergefahren durch Privathaushalte und Unternehmen untersuchte. Die Problematik Abschätzung ökonomischer Schäden durch Überschwemmung wurde nicht näher untersucht, da hierzu mehrere Studien für das Rheingebiet vorliegen. Da diese Schäden durch die Reaktionsfähigkeit der Betroffenen im aktuellen Ereignis maßgeblich modifiziert werden können, ist die durchgeführte Analyse eine sinnvolle Erweiterung bisheriger Arbeiten. Als Ergebnis lässt sich festhal-

ten, dass ein noch unausgeschöpftes Selbstheilungspotenzial besteht, welches durch eine verbesserte öffentliche Risikokommunikation aktiviert werden muss. Entscheidend dabei ist, den gefährdeten Unternehmen und Privathaushalten die bestehenden Handlungsmöglichkeiten zu verdeutlichen, damit der private vorsorgende Hochwasserschutz in konkrete Handlungen umgesetzt werden kann.

Neben der bereits erwähnte Unsicherheitsanalyse widmete sich TP A4.2 der Zusammenführung der unterschiedlichen Teilaspekte. Hierfür wurde ein stochastisches Modellsystem für die Risikoanalyse entwickelt, das sich aus vereinfachten Modulen für die Beschreibung der einzelnen Prozessglieder zusammensetzt. Die vereinfachten Modelle wurden anhand der komplexen Modelle der anderen Teilprojekte und realer Datensätze parametrisiert und nachfolgend für die Risiko- und Unsicherheitsanalyse in einem 2-stufigen Monte-Carlo-Verfahren verwendet. Die erste Stufe der MC-Simulationen dient der Quantifizierung des Risikos, d.h. der Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwässern definierter Größenordnungen und den dadurch verursachten Schäden, während in der zweiten Stufe die Unsicherheit, die der Risikoanalyse anhaftet, bestimmt wird. Mit diesem Modell können Risikokurven und begleitende Unsicherheitsbänder berechnet werden.

2.1.3 Bewertung

Es ist zusammenfassend festzustellen, dass der Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ eine sehr enge und erfolgreiche Zusammenarbeit gepflegt hat. Die Teilprojekte griffen nach anfänglichen Abstimmungsschwierigkeiten hervorragend ineinander, so dass die Hochwasserwirkungskette vollständig abgebildet werden konnte. Wenn die einzelnen komplexen Modelle auch nicht intern gekoppelt wurden, so ist die komplette Modellkette trotzdem operativ anwendbar und auf andere Einzugsgebiete übertragbar. Für einen Teil der Wirkungskette wurde mit dem probabilistischen Modellsys-

tem des TP A4.2 ein gekoppelter Ansatz entwickelt.

Aufgrund der begrenzten Laufzeit des DFNK konnten nicht alle Ziele erreicht werden. Dies betrifft die Einbindung der standortbezogenen Prozessstudien in mesoskalige Einzugsgebietsmodelle und die durchgängige Unsicherheitsanalyse bis hinunter zu den überschwemmungsgefährdeten Flächen unter Einbeziehung der Deichbruchgefährdung. Hierzu wären weitere komplexe physikalisch-basierte Modelle und eine große Anzahl von Simulationen erforderlich gewesen. Die Beantwortung dieser wichtigen Fragen bleibt weiteren Forschungsprojekten vorbehalten.

Um die Forschungsergebnisse praxisgerecht umsetzen zu können, wäre es wünschenswert, folgende Arbeiten durchzuführen:

- Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen der komplexen Teilmodelle (räumliche und zeitliche Auflösung, Parametersensitivität, Einfluss der Anfangs- und Randbedingungen)
- Übertragung des Instrumentariums auf andere Flussgebiete
- Weiterentwicklung der Modellbausteine in Kooperation mit den Bundesländern und anderen Verantwortlichen
- Anpassung der entwickelten Modelle für den operativen Katastrophenschutz
- Vernetzung der katastrophrelevanten Information mit Hilfe des Internets

Es bleibt zu hoffen, dass das Konzept einer integrierten Betrachtung der Hochwasserwirkungskette und des Hochwasserrisikos unter Einbeziehung der Modell- und Datenunsicherheit Anklang bei den Entscheidungsträgern findet und unverzichtbarer Bestandteil in den operationellen Arbeitsabläufen des Hochwassermanagements werden wird.

2.2 Niederschlagsszenarien für das deutsche Rheingebiet ab Maxau unter Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen

Gerd Bürger

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Globaler Wandel und natürliche Systeme

Email: Gerd.Buerger@pik-potsdam.de

TP A3: Bereitstellung von Szenarien für extreme meteorologische Ereignisse (Starkniederschläge) unter Berücksichtigung von projizierten Klimaänderungen

2.2.1 Zusammenfassung

TP A3 hatte zur Aufgabe, für das deutsche Rheingebiet Niederschlagsszenarien einschließlich Starkregen bereitzustellen, welche mit vorgegebenen globalen Klimaverläufen konsistent sind. Hierzu gehören sowohl beobachtete wie simulierte Verläufe, einschließlich der von Menschen verursachten Störungen. Die Frage nach der Statistik von Starkregen und deren möglicher zukünftiger Änderung verlangt eine rigorose Signifikanzanalyse. Eine behauptete Änderung im Verhalten seltener Ereignisse ist nur signifikant, wenn die Behauptung durch hinreichend viele Fälle belegt werden kann. Daher hatte die Berücksichtigung möglichst zahlreicher globaler Klimaverläufe höchste Priorität. Für jeden globalen Klimaverlauf wurde für die Gesamtheit von 620 Niederschlagsstationen des Rheingebiets ein konsistentes tägliches Niederschlagsszenario entwickelt. Hierzu wurde die Methodik des „expanded downscaling (EDS)“ eingesetzt, welches auch das Extremverhalten einer meteorologischen Größe, in unserem Falle des Starkregens, adäquat wiedergeben kann. Die Szenarien fördern zweierlei zutage: eine enorme Spannweite des natürlichen Spektrums von Starkregen, sowie eine dennoch sich davon abhebende Tendenz zur Umverteilung des Niederschlages, hin zu selteneren, aber stärkeren Ereignissen.

Abstract

The purpose of sub-project A3 was to provide scenarios of precipitation with a plausible representation of extreme events, which are consistent with a given set of global climate evolutions. Among the latter are observations as well as simulations, including those that are anthropogenically perturbed. The question of the statistics of heavy precipitation and its possible future change requires a rigorous significance analysis. An asserted change in the behavior of rare events is significant only if enough realizations have been investigated. Therefore the consideration of several possible global climate evolutions was of highest priority. For each climate evolution we developed consistent daily precipitation scenarios for as much as 620 rain stations of the Rhine catchment. We applied the method of *expanded downscaling* (EDS), which is known to adequately represent the evolution of the statistics of extreme events, and thus of heavy precipitation. The scenarios reveal two things: There is both, an enormous spread in the natural spectrum of heavy precipitation, as well as a distinct tendency towards a redistribution of precipitation, with less frequent but heavier events.

2.2.2 Veranlassung und Problem

Eine zentrale Rolle bei der Abschätzung des Hochwasserrisikos spielen mögliche Veränderungen des Niederschlagverhaltens. Es gilt beispielsweise als wahrscheinlich, dass Starkniederschlagsereignisse in den mittleren und hohen Breitengraden im 20. Jahrhundert zugenommen haben (IPCC, 2001). Innerhalb des Cluster Risikoanalyse Hochwasser hatte TP A3 die Aufgabe, durch die Bereitstellung extremer meteorologischer Ereignisse das erste Glied der Hochwasserwirkungskette zu liefern.

2.2.3 Ziel

Bei der Frage nach den möglichen Wirkungen eines Klimawandels ist man auf die Simulationen globaler Klimamodelle, sog. GCMs, angewiesen. Obschon diese nicht beliebig viel Information enthalten, gibt es gute Gründe anzunehmen, dass die wesentlichen atmosphärischen und hydrologischen Parameter darunter sind, welche für die Niederschlagsbildung und also auch für das Abflussverhalten von Flüssen verantwortlich sind. Solche Modelle sind, da sie global gerechnet werden, in ihrer räumlichen Auflösung beschränkt: die typische Größe einer Modellgitterzelle liegt derzeit bei einigen hundert Kilometern. Die direkte Interpretation der Gitterwerte als Modellniederschlag und deren Verwendung in hydrologischen Modellen ist daher nicht möglich. Darüber hinaus zeigen globale Klimamodelle bei hydrologisch relevanten Größen (spezifische Feuchte, vertikale Schichtung) erheblich größere Fehler als etwa bei der Temperatur. Dies verlangt die Zwischenschaltung eines Regionalisierungsverfahrens, welches die GCM-Informationen für die relevante Skala verarbeitet und damit die globalen Klimaszenarien anwendbar macht. Für die Arbeiten im DFNK war ein solches downscaling für Starkniederschläge zu entwickeln. Deren Auftreten beruht nicht selten auf räumlich wie zeitlich sehr klei-

nen Skalen und ist vergleichsweise selten, was die Anforderungen entsprechend erschwert.

2.2.4 Methode

Expanded downscaling

Unter mehreren empirischen downscaling-Verfahren bietet das *expanded downscaling* (EDS) die Möglichkeit, die Entwicklung des Extremwertverhaltens bestimmter meteorologischer Größen entlang gegebener globaler Klimaszenarien vorherzusagen. Dies geschieht durch die Regionalisierung der täglichen globalen Felder dieser Szenarien auf die Skala täglicher Beobachtungen von Niederschlagsstationen. Wie bei anderen empirischen downscaling-Verfahren, etwa jenen aus der Klasse der linearen Regression, werden auch beim EDS beobachtete globale (großskalige) Größen g , welche in Form sogenannter Analysen (Kalnay et al. 1996) vorhanden sind, und lokale Größen l statistisch durch eine lineare Funktion L verknüpft. In einer Erweiterung des Regressionsansatzes – hier wird die Funktion L durch absolute Fehlerminimierung gewonnen und weist notwendigerweise unrealistisch verminderte Variabilität auf – wird beim EDS eine relative Fehlerminimierung vorgenommen, und zwar bezüglich der Nebenbedingung, dass die lokal simulierte Variabilität erhalten bleibt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die simulierten lokalen Größen l sowohl möglichst konsistent mit der vorherrschenden großskaligen Zirkulation g als auch in ihrer (Ko-)Variabilität realistisch sind. Dies betrifft gegenwärtige Verhältnisse. Für zukünftige Verhältnisse, etwa in einem erwärmten Klima, kann sich die globale Variabilität C_g und damit auch die lokale C_l ändern; die Änderung von C_g wird durch die GCM-Felder vorgegeben.

Da die gesamte Ko-Variabilität realistisch simuliert wird, ermöglicht es EDS, ganze Gebietsniederschläge mitsamt ihrer gegenseitigen Korrelationen zu erfassen. Allerdings beschränkt die numerische Komplexität von EDS

(es handelt sich hierbei um ein nichtlineares Optimierungsproblem) die Anwendbarkeit auf kleinere Gebiete mit etwa 20 bis 30 Niederschlagsstationen.

Lokale EDS Gebiete

In Abstimmung mit TP A4.1 und A5.1 wurde das deutsche Rheineinzugsgebiet in 23 Teilgebiete zerlegt (Abb. 2.9), welche wiederum nach den dort vorhandenen Klimastationen unterteilt wurden. Jede der im Gebiet vorhandenen Niederschlagsstationen wurde genau einer Klimastation zugeordnet und mit deren täglicher Beobachtungen (Temperatur, Feuchte etc.) zusammen modelliert; eine solche Gruppe definiert ein einzelnes, einheitlich modelliertes EDS-Gebiet, und besteht in der Regel aus fünf Klima- und ca. zehn Niederschlagsbeobachtungen pro Tag. Auf diese Weise wurden sämtliche Stationen des Modellgebiets einheitlich modelliert, was den Einfluss der großräumigen Zirkulation betrifft, und der verbleibende Rest (Nachbarschaftsbeziehungen) wurde ebenso einheitlich in den jeweiligen EDS-Gebieten simuliert.

Globale Zirkulationsfelder

Für die globalen GCM-Klimasimulationen wurden das ECHAM4/OPYC3 aus Hamburg (Roeckner et al. 1996) und das HadCM3 des Hadley Centers in England (Gordon et al. 2000) herangezogen. Für das ECHAM4/OPYC3 in einer Auflösung von $2.8125^\circ \times 2.8125^\circ$ wurden die täglichen Datensätze 850 hPa Temperatur, 500 hPa geopotentielle Höhe und 700 hPa spezifische Feuchte genutzt. Die täglichen Datensätze für das HadCM3 in einer Auflösung von $3.75^\circ \times 2.5^\circ$ waren 700 hPa Temperatur, 500 hPa geopotentielle Höhe und 700 hPa spezifische Feuchte.

Wegen der unterschiedlichen Felder und Geometrie der GCMs wurde jeweils ein eigenes EDS-Modell mit entsprechend angepassten Analysefeldern verwendet. Einschließlich

der direkten Beobachtungen standen für jedes EDS-Gebiet die folgenden sechs Szenarien, benannt nach ihren globalen Antriebsfeldern, zur Verfügung: (1) **OBS**: direkte Beobachtungen, (2) **ANA**: beobachtete Felder 1961-90 (für ECHAM4/OPYC), (3) **CTL**: Kontrollsimulation 1801-2100 von ECHAM4/OPYC, (4) **SCA**: Klimaszenario 1860-2100 „business as usual“, (5) **ANH**: beobachtete Felder 1961-90 (für HadCM3), (6) **HDL**: Klimaszenario 1961-2100 „business as usual“ von HadCM3.

Signifikanzanalyse

Auf der Basis dieser großen Datenmenge war es möglich, statistisch belastbare Aussagen über die Signifikanz möglicher Klimaveränderungen zu gewinnen. Wir verfolgten dabei folgendes Konzept, hier am Fall der ECHAM4/OPYC3-Simulation erläutert: Unsere Kenntnis des gegenwärtigen Klimas beziehen wir aus den drei Szenarien **OBS**, **ANA** und **CTL**, und jene eines möglichen Klimawandels aus **SCA**. Statt nun alle einzelnen Szenarien gegeneinander abzuwägen und hieraus zahlreiche, möglicherweise divergierende Schlüsse zu ziehen, bilden wir die zwei neuen Ensembles **OBS+ANA+CTL** einerseits und **SCA** andererseits. Das erste Ensemble repräsentiert unser gesamtes Wissen über das Jetzt-Klima, inklusive der Unsicherheit aus natürlichen Fluktuationen, aus reinen downscaling-Fehlern als auch aus Fehlern des GCM. Das zweite Ensemble repräsentiert unser Wissen über das zukünftige Klima. Zur klareren Abgrenzung beider Ensembles beschränken wir hierbei das Szenario **SCA** auf den Zeitraum 2061-2090. Nur wenn sich das zweite Ensemble signifikant vom ersten unterscheidet (mittels klassischer statistischer Tests), ist ein hydrologischer Klimawandel für das jeweilige EDS-Gebiet als Folge von erhöhten Treibhausgasemissionen nachgewiesen. Zur Erfassung der Durchschnittswerte wählen wir als hydrologisches Maß die drei klassischen Statistiken von Summe (m), Intensität (i) und Häufigkeit (f) des täglichen Niederschlags.

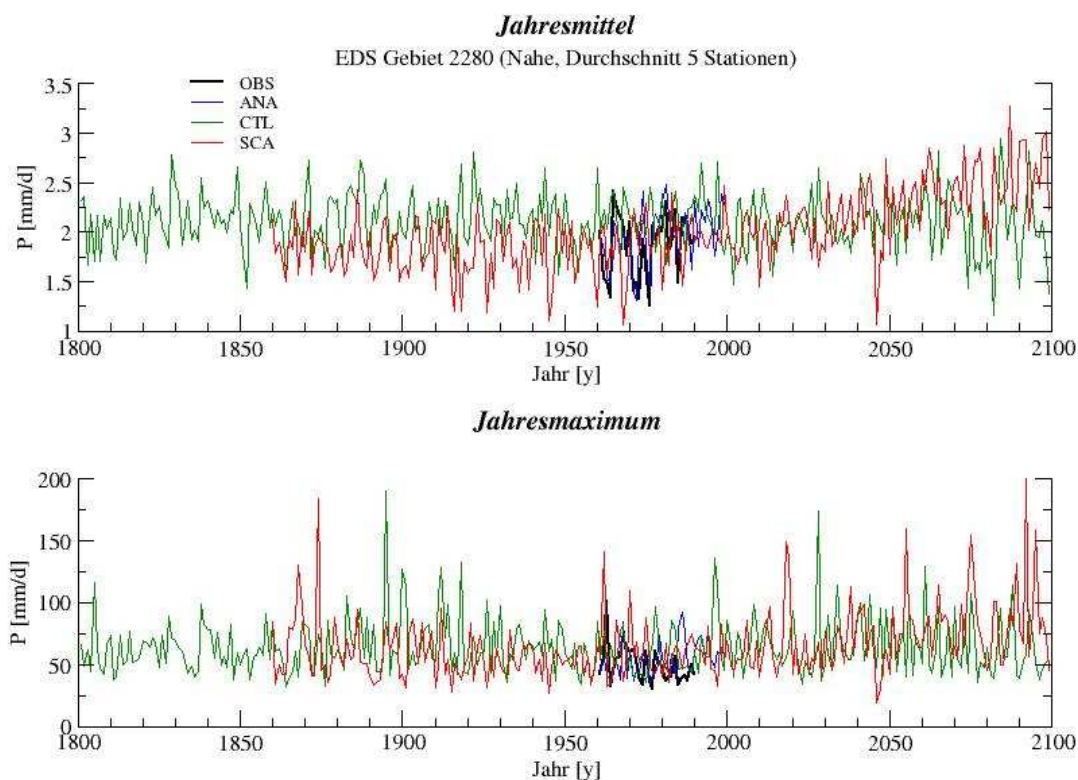


Abbildung 2.3: Jahresmittel und -maximum für das EDS-Gebiet 2280 für **OBS** (schwarz), **ANA** (blau), **CTL** (grün) und **SCA** (rot). Beachtenswert ist die Vergleichbarkeit der Variabilität in beiden Fenstern, aber auch die langsamen Fluktuationen bei den GCM-Szenarien. Deutlich zu erkennen ist die Zunahme von **SCA** im Jahresmittel ab 2000. Ein ähnlicher Trend, allerdings weniger klar, existiert für die Maxima.

Extremwertstatistik

Zur feineren Abschätzung der Intensität dienen Extremwertanalysen, worunter wir die Analyse der empirischen Verteilungsfunktion (*cdf*) verstehen, als Abhängigkeit der Wiederkehrzeit von der Größe eines Ereignisses. Diese spiegeln die Starkregencharakteristik einer Simulationen wider. Aufgrund des empirischen Modellansatzes, welcher auf der 30-jährigen Beobachtungsspanne 1961-90 basiert, sollten allerdings Aussagen über Wiederkehrzeiten jenseits dieser Spanne vermieden werden. Die große Menge an beobachteten und simulierten Daten erlaubt jedoch eine umso genauere Abschätzung der Wiederkehrzeiten innerhalb dieser Spanne. Dies geschieht durch Aufspaltung der vorhandenen Läufe in einzel-

ne 30-Jahres-Perioden. Für ein einzelnes EDS-Gebiet erhalten wir für das Jetzt-Klima also jeweils eine *cdf* für **OBS** und **ANA** sowie zehn weitere *cdf*'s für **CTL**; das gestörte Klima wird durch die *cdf* von **SCA** repräsentiert. Für das HadCM3 wird analog vorgegangen.

2.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Eine typische EDS-Simulation veranschaulicht Abbildung 2.3. Sie zeigt für ein EDS-Gebiet aus dem Einzugsbereich der Nahe Jahresmittel und -maxima des Niederschlags für die Szenarien **OBS**, **ANA**, **CTL** und **SCA** (vor allem deren Variabilität). Deutlich zu erkennen ist die unabhängige Entwicklung der GCM-Szenarien, die vom tatsächlichen Klimaverlauf bis auf den CO_2 -Antrieb völlig entkop-

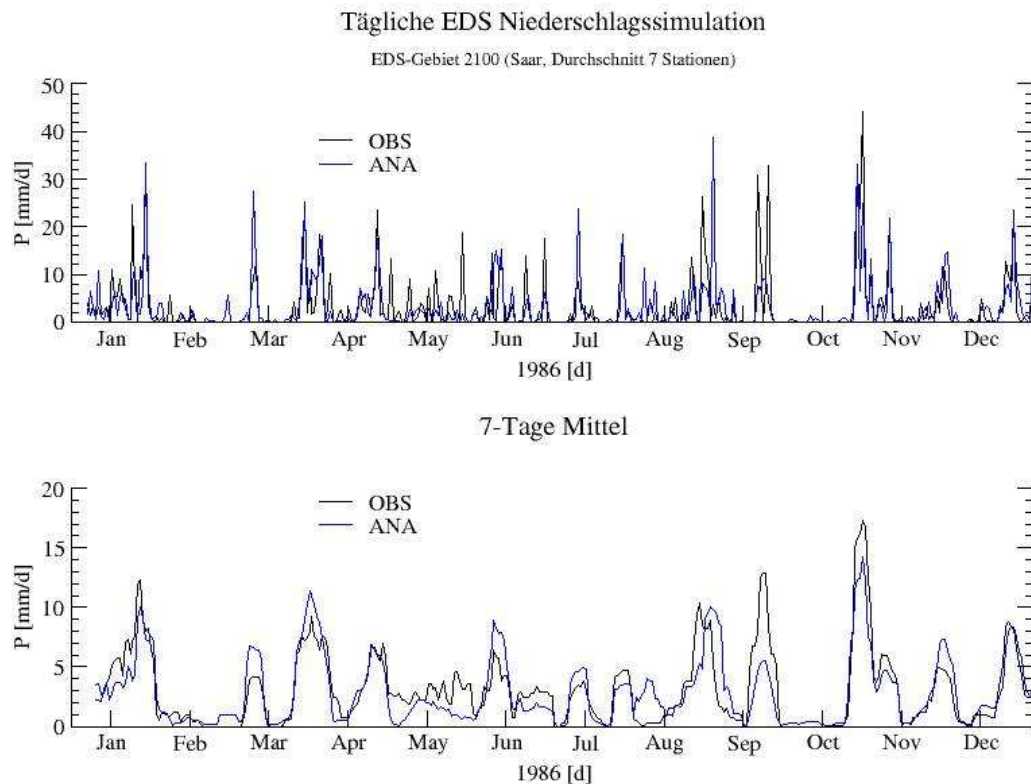


Abbildung 2.4: Oberes Fenster: Beobachtete (**OBS**, schwarz) und EDS-simulierte (**ANA**, blau) tägliche durchschnittliche Niederschläge für das EDS-Gebiet 2100 (Saar) im Jahr 1986. Deutlich erkennbar ist die realistische Variabilität. Ebenso werden Niederschlagscluster sowie Trockenperioden gut wiedergegeben. Dies verdeutlicht das 7-Tage Mittel (unteres Fenster). Man beachte die erstaunliche Ereignisfolge im September-Oktober: Ein starkes Doppelereignis wird gefolgt von einer Trockenperiode von etwa einem Monat und beendet durch das stärkste Ereignis der gesamten Beobachtungsperiode. Dies wird bis auf das Doppelereignis durch das EDS recht gut reproduziert.

pelt sind. Die dargestellten Variabilitäten sind allerdings ähnlich, was ja auch für den Zeitraum 1961-90 erwünscht ist. Gegenüber diesem "Rauschen" hebt sich deutlich ein positiver Trend in den Jahresmitteln des **SCA** ab, und ein analoger, allerdings nicht so klarer, bei den Maxima.

OBS und **ANA** sollten natürlich auch in ihrem tatsächlichen Verlauf möglichst übereinstimmen. Hierzu gibt Abbildung 2.4 Auskunft. Sie zeigt den täglichen beobachteten und **ANA**-simulierten Niederschlagsverlauf für ein EDS-Gebiet der Saar für das Jahr 1986. Man beachte die realistische tägliche Variabilität der Simulation, wie auch die gute Reproduktion

von Niederschlagsclustern und Trockenperioden. Das Oktober-Ereignis ist das stärkste der ganzen Epoche.

Der in Abbildung 2.3 dargestellte Klimaverlauf besitzt eine deutliche saisonale Komponente. Die für die Monate Oktober bis März mittlere Änderung der täglichen Niederschlagssumme des Szenario-Zeitraums 2061-90 ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Sie zeigt über das gesamte Gebiet positive Werte, welche je nach Region zwischen 0.3 und 0.9 mm/d schwanken; fast alle Änderungen sind signifikant bezüglich eines 5%-Levels. Wie Abbildung 2.6 zeigt, ist das entsprechende Signal für den Sommer nicht so klar. Dies rührt da-

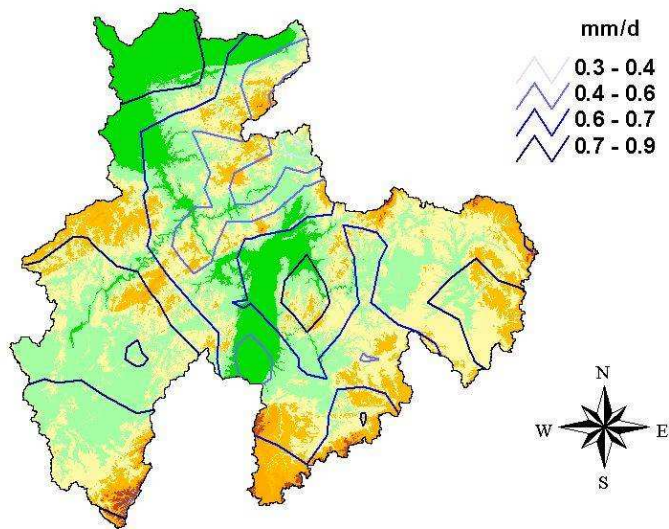


Abbildung 2.5: Räumliche Verteilung der erwarteten Änderung der winterlichen täglichen Niederschlagssumme, über alle Stationen interpoliert. Alle Werte sind positiv, mit lokalen Maxima im Raum Spessart und in der westfälischen Bucht. Für fast das gesamte Gebiet ist diese Zunahme signifikant bei einem Niveau von 5%.

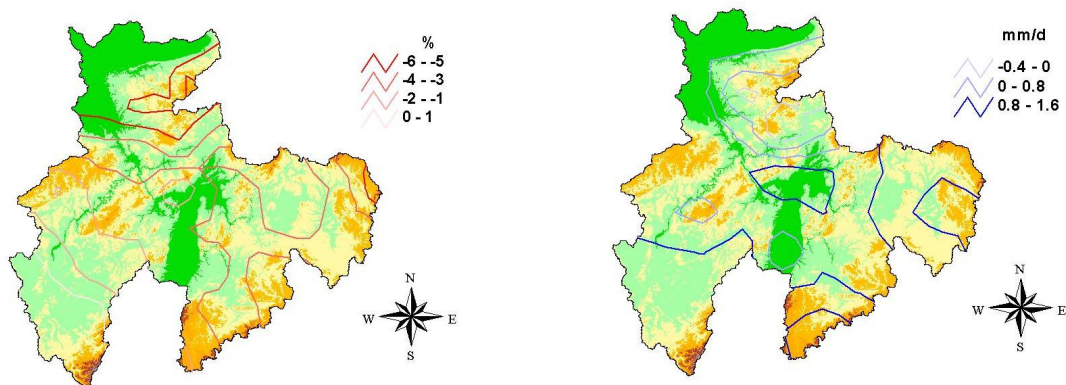


Abbildung 2.6: Räumliche Verteilung der erwarteten Änderung für die sommerliche Wahrscheinlichkeit (links) und Intensität (rechts) des täglichen Niederschlags, über alle Stationen interpoliert. Deutlich ist das unterschiedliche Vorzeichen der beiden Felder für fast die gesamte Region.

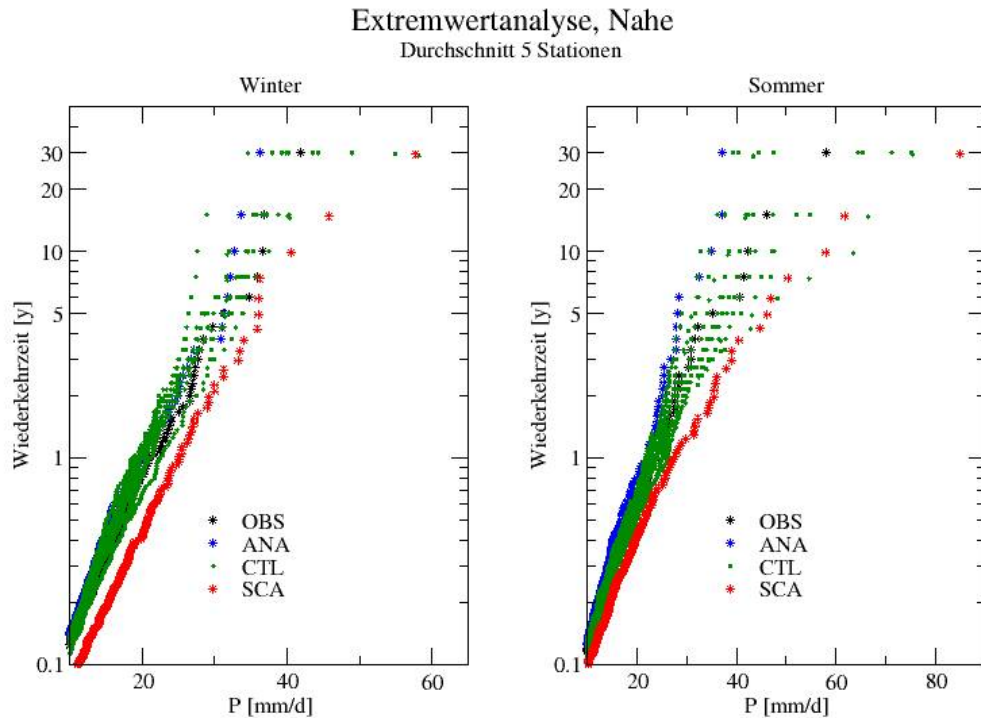


Abbildung 2.7: Kumulative Verteilungsfunktion jeweils 30-jähriger Niederschlagsdaten eines Nahe-Gebietes (dabei 10 Abschnitte von CTL, siehe Text) für Winter (links) und Sommer (rechts). Deutlich erkennbar ist die große Spanne bei sehr starken Ereignissen (>5 Jahre Wiederkehrzeit), was auf entsprechende natürliche Fluktuationen (CTL) bzw. auf mögliche Modellfehler zurückgeht (ANA/Sommer). Trotzdem ist ein klarer Trend zu einer Intensivierung der Ereignisse erkennbar, welche im Winter eher uniform und moderat, im Sommer dagegen auf 1- bis 3-jährige Ereignisse beschränkt, aber umso stärker ist.

her, dass es sich aus zwei Antagonisten aufbaut, und zwar aus einem für den Sommer deutlich negativen Trend in der Niederschlagshäufigkeit und einem genauso deutlich positiven Trend in der Intensität. Es ergibt sich demnach eine signifikante Umverteilung der Niederschläge, hin zu selteneren aber stärkeren Ereignissen.

Dies lässt sich durch entsprechende Extremwertanalysen belegen. Wie Abbildung 2.7 zeigt, ergeben sich für beide Jahreshälften deutliche Verschiebungen hin zu stärkeren Ereignissen. Diese betreffen für den Winter alle Skalen uniform, während für den Sommer vor allem 1- bis 3-jährige Ereignisse intensiviert erscheinen. Jenseits dieser Skala lassen

sich signifikante Aussagen kaum noch gewinnen; eine eventuelle Umkehrung der gezeigten Trends bei größeren Skalen (5 Jahre und mehr) ist jedoch wenig evident.

2.2.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Für die Kopplung EDS-basierter Szenarien an hydrologische Modelle gibt es mittlerweile zahlreiche Anwendungen und ein breites Spektrum von Erfahrungen inner- und außerhalb Deutschlands. So sind die ersten europäischen prototypischen Anwendungen (für EUROTAS) mittlerweile stark verbessert worden, dank der Erfahrungen im DFNK (Bürger

2002). Ein weiteres italienisches Projekt befindet sich gerade in der Startphase, worin EDS-Szenarien für die Abschätzung des Einflusses klimatischer Veränderungen auf Häufigkeit und Intensität von Sturzfluten in Norditalien angewendet werden. Die extremen klimatischen Bedingungen des mediterranen Raums stellen dabei eine besondere Herausforderung für die Methode dar. Wenn die Datenlage es erlaubt, d. h. bei hinreichender Abdeckung eines Gebietes mit langjährigen Beobachtungsreihen, ist EDS auf jede Region übertragbar.

Roeckner E, Oberhuber JM, Bacher A, Christoph M, Kirchner I (1996): ENSO variability and atmospheric response in a coupled atmosphere-ocean GCM. *Clim. Dyn.*, 12, 737-54.

2.2.7 Offene Fragen

Die numerische Komplexität des EDS verhindert bisher eine Erweiterung der Methode auf größere Gebiete (als die o.g. EDS-Gebiete). Im DFG Projekt „SHYDEX“ soll diese Schwierigkeit überwunden und das EDS beispielhaft für wesentlich größere Gebiete getestet werden.

2.2.8 Literatur

Bürger G. (2002): Selected precipitation scenarios across Europe. *J. Hydrol.*, 262, 99-110.

Gordon C, Cooper C, Senior AC, Banks H, Gregory JM, Johns TC, Mitchell JFB, Wood RA (2000): The simulation of SST, Sea Ice Extents and Ocean Heat Transports in a version of the Hadley Centre Coupled Model without Flux Adjustments. *Clim. Dyn.*, 16, 147-68.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): *Climate Change 2001: Synthesis report. Summary for policymakers.*

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S, White G, Wollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D. (1996): The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Met. Soc.*, 77, 437-71.

2.3 Hydrologische Modellierung von Klima- und Landnutzungs-szenarien im Rheingebiet

Lucas Menzel und Daniel Schwandt

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Globaler Wandel und natürliche Systeme

Email: menzel@pik-potsdam.de

TP A4.1: Erstellung eines hydrologischen Rahmenmodells zu Hochwasserabflüssen unter Aspekten von Landnutzungs- und Klimaänderungen

2.3.1 Zusammenfassung

Ein Ziel im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen besteht darin, die Auswirkungen von Umweltänderungen auf die regionale Hydrologie des Rheingebiets mit besonderer Betrachtung der künftigen Abfluss- und Hochwasserentwicklung zu untersuchen. Dazu werden regionalisierte Klimaszenarien sowie realistische Tendenzen der Landnutzungsentwicklung in die hydrologische Modellierung eingebunden. Die Kopplung von zwei Globalen Klimamodellen mit einem Verfahren des statistischen Downscalings ermöglicht regionale Projektionen des zukünftigen Klimas, die für die nächsten 100 Jahre eine deutliche Temperatur- und Niederschlagszunahme im Untersuchungsgebiet prognostizieren. Werden die simulierten Klimazeitreihen mit einem hydrologischen Modell verknüpft, zeigt sich eine ausgeprägte Erhöhung der mittleren Abflussbedingungen sowie der mittleren Hochwasserabflüsse in allen 23 untersuchten Teileinzugsgebieten des Rheins. Diese Anstiege liegen jedoch zum Teil in der Größenordnung der Modellfehler bzw. im Rahmen der angenommenen, natürlichen Variabilität. Daher können die Ergebnisse nur unter Berücksichtigung der je nach untersuchtem Abflussparameter variablen Unsicherheiten betrachtet werden. Für die Landnutzungsszenarien zeigt sich, dass als realistisch eingestufte Veränderungen der Flächennutzung nur geringen Einfluss auf die Entstehung und den Ablauf von Hochwasser in mesoskaligen Flussgebieten haben. Dieses Ergebnis unterliegt jedoch der Einschränkung, dass der konzeptionelle, semi-gegliederte Ansatz des im Rahmen dieser Studie eingesetzten, hydrologischen Modells nur bedingt für derartige Fragestellungen verwendbar ist.

Abstract

One of the purposes of the German Research Network Natural Disasters is the investigation of environmental change impacts on the regional hydrology of the German Rhine catchment, with special focus on the future runoff and flood characteristics. The procedure includes the integration of regional climate scenarios and realistic land use change trends with hydrological modelling. The coupled application of two different General Circulation Models with a statistical downscaling method enables a compilation of regional climate projections. For the area under investigation, they indicate a marked increase in both temperature and precipitation within the next 100 years. The linkage of the simulated climate data with a hydrological model results in a pronounced increase of mean discharge conditions and mean flood discharges for the 23 investigated subcatchments of the Rhine. However, these rises partly lie within the range of estimated model errors or of the assumed natural variability. Therefore, interpretation of the results must take the related uncertainties into account.

The study on land use changes indicates that their impact on runoff formation and flood discharge behaviour is relatively low within meso-scale catchments when a realistic range of possible land use developments is assumed. However, these findings need to be considered with care, since the suitability of the applied, conceptual and semi-distributed hydrological model is questionable for this type of research.

2.3.2 Veranlassung und Problem

Die in den letzten Jahren zu beobachtende Häufung von schweren Hochwasserereignissen, u.a. im Flußgebiet des Rheins, wirft immer wieder Fragen nach den Ursachen auf, insbesondere ob und inwieweit menschliche Einflüsse auf das Klima das Auftreten derartiger Extreme begünstigen. Auswertungen belegen, dass im Zeitraum der letzten 100 Jahre die Jahressummen des Niederschlags im Westen und Süden Deutschlands signifikant zugenommen haben. Diese Anstiege konzentrieren sich meist auf die Wintermonate und gehen häufig auf das Konto intensiverer Niederschläge (LfU, 1997). Verknüpft ist diese Niederschlagszunahme mit Änderungen im Auftreten und in der zeitlichen Andauer potenziell hochwasserauslösender Wetterlagen. So zeigt sich, dass in Mitteleuropa sowohl die Anzahl als auch die zeitliche Andauer relativ warmer Winterwitterungen mit verstärkten, atlantischen Westwetterlagen im Laufe der letzten Jahrzehnte deutlich zugenommen haben, mit deutlichen Auswirkungen im Westen Deutschlands (Werner et al. 2000). Für die Zukunft stellt sich die Frage, ob sich die beobachteten klimatischen Trends weiter fortsetzen und inwieweit sie sich auf das Abflussgeschehen, insbesondere bei Hochwasser im Einzugsgebiet des Rheins auswirken. Zu diesem Problemfeld lagen bislang noch keine systematischen und flächendeckenden Untersuchungen vor. Als mögliche Ursachen für die in jüngster Zeit aufgetretene Zunahme extremer Hochwassersituationen werden immer wieder bauliche Eingriffe in den Flusslauf und seine Vorländer (Begradigung, Verkürzung, Entzug von Retentionsflächen usw.) genannt oder der Einfluss von Landnutzungsänderungen in den Einzugsgebieten, insbesondere die zunehmende

Flächenversiegelung sowie die intensive und den natürlichen Bedingungen häufig nicht angepasste Landwirtschaft diskutiert. Auswertungen zeigen, dass diese Einflüsse prinzipiell zu einer Verschärfung der Hochwassersituation beitragen, sich die Auswirkungen jedoch meist auf die regionale Skala beschränken (KHR, 2003). Offen sind nach wie vor Fragen, z.B. zum Beitrag des Landnutzungswandels bei hochwasserrelevanten Prozessen in kleinen Einzugsgebieten im direkten Vergleich mit den regionalen Auswirkungen von Klimaänderungen. Zu klären sind ebenfalls die quantitativen Wirkungen dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, insbesondere im Hinblick auf eine mögliche, klimabedingte Hochwasserverschärfung.

2.3.3 Ziel

Die Studie dient der Erweiterung unserer Erkenntnisse über den Einfluss des fortschreitenden Klimawandels auf die hydrologischen Bedingungen des Rheingebiets. Im Vordergrund steht dabei die Simulation der künftigen Hochwasserentwicklung durch Klimaänderung und die Abschätzung der damit zusammenhängenden Unsicherheiten. Hierfür werden regionalisierte Klimaszenarien mit einem hydrologischen Modell verknüpft, um daraus Szenarien des Abflusses für den Rhein und seine Teilgebiete zu berechnen (Abb. 2.8). Ein weiteres Ziel des TP A4.1 besteht darin, ausgewählte Aspekte im Zusammenhang mit Landnutzungsänderungen und deren Einfluss auf Hochwasser zu untersuchen. Im Gegensatz zu den Arbeiten zu Auswirkungen von Klimaänderungen beschränken sich diese Analysen auf einzelne, regionale Schwerpunkte. Dabei stehen Fragen zur räumlichen und zeitlichen Auflösung von relevanten Umweltinformatio-

nen (z.B. aus der satellitengestützten Analyse) und deren Bedeutung für die hydrologische Modellierung von Hochwasserereignissen im Vordergrund. Schließlich sollen Möglichkeiten zur modellgestützten Berücksichtigung landbaulicher Maßnahmen zur Erhöhung des Wasserrückhalts in der Fläche erörtert werden.

2.3.4 Daten und Methoden

Das durch die Rheinpegel Maxau und Emmerich begrenzte, ca. 110.000 km² große Untersuchungsgebiet wurde in 23 Teilgebiete untergliedert (Abb. 2.9), die u.a. die Hauptzuflüsse des Rheins wie den Main, die Mosel und den Neckar beinhalten. Für jedes der Teilgebiete wird eine Modellkette, bestehend aus Globalem Klimamodell (General Circulation Model, GCM), Regionalisierungsverfahren (Expanded Downscaling, EDS) sowie hydrologischem Modell (HBV-D), angewandt.

In einem ersten Arbeitsschritt wurde das hydrologische Modell HBV-D zur Simulation der aktuellen Abflussverhältnisse des betrachteten Teilgebietes eingesetzt (Menzel et al., 2002). Das Modell stellt eine Weiterentwicklung des Niederschlag-Abfluss-Modells HBV (Bergström, 1995) dar. Der HBV-D zugrundeliegende, konzeptionelle Ansatz zeichnet sich u.a. durch eine übersichtliche Struktur und den vergleichsweise geringen Bedarf an Eingangsdaten aus. Für eine Abflusssimulation werden lediglich Stationswerte von Niederschlag und Temperatur in täglicher Auflösung sowie Gebietscharakteristika wie die Geländehöhen, die Böden und die Landnutzung benötigt. Für die Kalibrierung des Modells sind zudem Daten des Durchflusses am Ausflusspegel des bearbeiteten Gebietes erforderlich (Tabelle 2.2). Für jedes Teilgebiet wurde ein Zeitraum von mindestens 30 Jahren untersucht, angefangen mit dem Jahr 1961. Die Modellkalibrierung nutzte überwiegend die Daten der ersten 15 Jahre, also des Zeitraums 1961–1975. Der erste Arbeitsschritt war erfolgreich abgeschlossen, wenn die Übereinstimmung der Tageswerte gemessener und simulierter Durchflüs-

se im Rahmen der Modellkalibrierung und -validierung objektive Mindestkriterien in Form verschiedener Gütemaße erfüllt (Menzel et al., 2002, Menzel et al., 2003).

Um die Simulationsdaten globaler Klimamodelle für die teilgebietsbezogene, hydrologische Modellierung verwenden zu können, muß das globale Klimasignal in lokale Niederschlags- und Temperaturzeitreihen übersetzt werden, die dann HBV-D als Eingangsdaten dienen. Hierfür wurde der Regionalisierungsansatz EDS verwendet (Kapitel 2.2, Bürger, 1996, 2002). Nach Abschluss der Eich- und Validierungsphase von EDS (Menzel et al., 2002) wurden die großräumigen, von GCMs simulierten, atmosphärischen Zirkulationsfelder mittels EDS herunterskaliert und an HBV-D zur Abflusssimulation übergeben (Abb. 2.10).

In diesem Arbeitsschritt wurden die Zirkulationsmuster der beiden globalen Klimamodelle ECHAM4/OPYC3 (Max Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg) und HADCM3 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Bracknell, England) verwendet. Für die Simulation der künftigen Entwicklung werden die GCMs vom Emissionsszenarium IS95a (business as usual; IPCC, 1995, 2001) angetrieben. In dieses Szenarium gehen Messungen der relevanten Treibhausgase als CO₂-Äquivalentkonzentrationen bis zum Jahre 1990 ein, für den Zeitraum danach wird ein jährlicher Anstieg von 1 % angenommen. Der Einfluss von Aerosolen auf die zukünftige Klimaentwicklung wird nicht berücksichtigt. Neben den Szenarioläufen der beiden genannten Klimamodelle wird auch ein sogenannter Kontrolllauf des ECHAM4/OPYC3-Modells verwendet. Dieser wird mit der CO₂-Äquivalentkonzentration des Jahres 1990, d.h. unveränderlichen Randbedingungen, über einen Zeitraum von 300 Jahren angetrieben. Daher weist der Kontrolllauf keinen realen Zeitbezug auf, sondern wird dazu verwendet, um die angenommene, natürliche Klimavariabilität bei der Durchflusssimulation zu repräsentieren (Abb. 2.10).

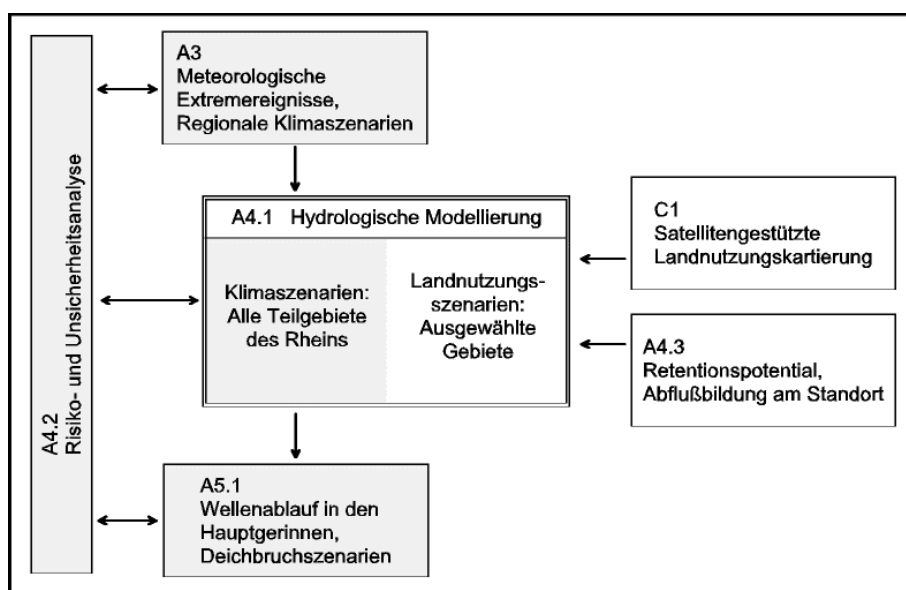


Abbildung 2.8: Wechselwirkungen zwischen TP A4.1 und weiteren Teilprojekten im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“.

Datenquelle	Beschreibung
Kommission für die Hydrologie des Rheins KHR	Digitales Geländemodell, Rasterweite 100 m
KHR	„European Soil Database“, 1:1.000.000 Vektordaten, in Rasterdatensatz (100 m) umgewandelt
Statistisches Bundesamt	CORINE-Landnutzung, Rasterweite 100 m, 44 Landnutzungsklassen
Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	Gewässernetz, Vektordaten 1:1.000.000
Deutscher Wetterdienst, KHR	Daten von 510 Niederschlagsstationen (tägliche Auflösung über mindestens 30 Jahre)
Deutscher Wetterdienst, KHR	Temperaturdaten von 90 Klimastationen (Tageswerte über mindestens 30 Jahre)
Bundesanstalt für Gewässerkunde, Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz, Ruhrverband, StUA Köln, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft	Tageswerte des Durchflusses an 22 Pegeln (unterschiedliche Zeiträume)

Tabelle 2.2: Übersicht zu den verwendeten Datengrundlagen

Für jedes Teilgebiet liegen somit neben den Pegelmessungen mehrere mit HBV-D simulierte Zeitreihen des Durchflusses vor. Diese sind zusammen mit den jeweils erforderlichen Eingangsdaten in Tabelle 2.3 zusammengestellt.

2.3.5 Ergebnisse und Diskussion

Auswirkung der Klimaänderung auf die Abflussverhältnisse des Rheingebiets

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse sind eine repräsentative Auswahl der Untersuchungen in den Teilgebieten Neckar, Pegel Plochingen (3.995 km²), Main, Pegel

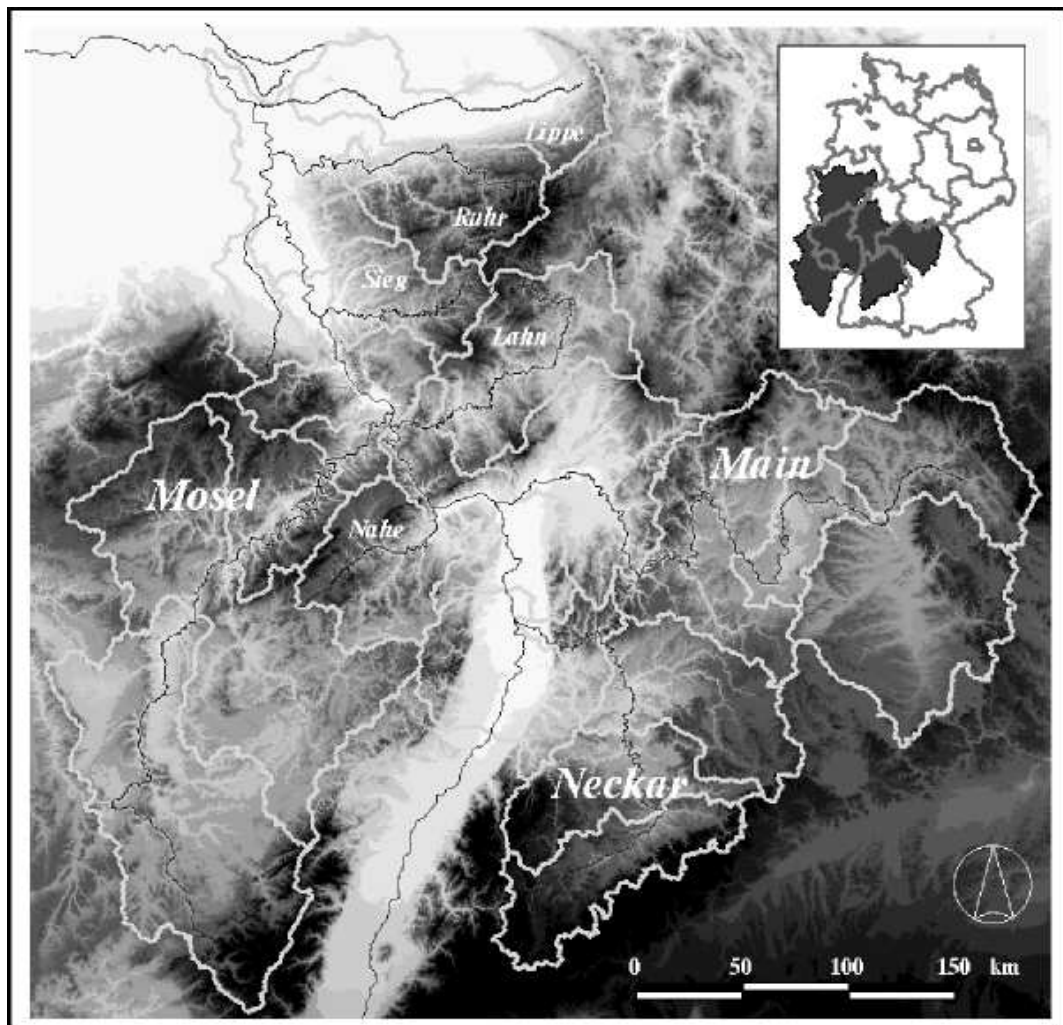


Abbildung 2.9: Lage des Untersuchungsgebiets und dessen Untergliederung in 23 Teilgebiete. Die Hauptzuflüsse des Rheins (Main, Mosel, Neckar) setzen sich aus jeweils vier bzw. fünf Teilgebieten zusammen.

Kemmern (4.224 km²), Mosel, Pegel Cochem (27.088 km²) sowie des Rheins zwischen den Pegeln Maxau und Köln. Das letztgenannte Gebiet umfaßt mit 94.036 km² nahezu den gesamten Untersuchungsraum.

In Abbildung 2.11 ist zunächst die zeitliche Entwicklung mittlerer Gebietsniederschläge bzw. Gebietstemperaturen für die drei genannten Teilgebiete sowie den Rhein zwischen Maxau und Köln dargestellt. Die Änderungen gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 sind als prozentuale bzw. relative Abweichungen angegeben. Eingetragen sind auch die Variabilitäten, die sich aus dem 300-jährigen

Kontrolllauf ergeben. Folgende Feststellungen sind hervorzuheben:

Die aus der Modellkette GCM–EDS abgeleiteten Gebietstemperaturen stimmen im Referenzzeitraum mit den aus Stationsmessungen berechneten Daten überein oder weichen nur in geringem Maße von diesen ab. Die Variationsbreite möglicher Gebietstemperaturen, wie sie sich aus dem Kontrolllauf ergibt, ist nur gering. Je nach gewähltem GCM sowie betrachtetem Gebiet liegt die für 2061–2090 simulierte Temperaturzunahme im Bereich zwischen ca. 1,5 und 2,5°C. Im Gegensatz zur Temperatur zeigt der Niederschlag ei-

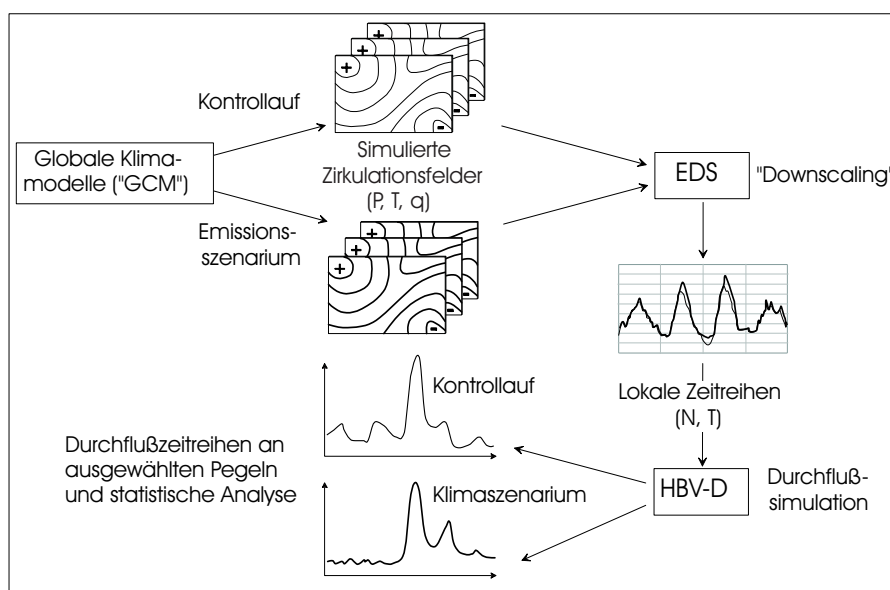


Abbildung 2.10: Vereinfachte Übersicht zur Methode der Durchflusssimulation auf der Basis von Klimaszenarien. P=Luftdruck, T=Temperatur, q=spezifische Feuchte, N=Niederschlag (aus Menzel et al., 2002; verändert).

Herkunft der Klimadaten (N, T)	Zeitraum	Klima-modell	Emissions-szenarium	Durchfluß-zeitreihe
–	Mindestens ab 1961	–	–	Aus Pegelmessungen
Stationsmessungen	1961–1995 / 1999	–	–	Simuliert, aus gemessenen Klimadaten
Mit EDS abgeleitet aus simulierter Zirkulation, ECHAM4/OPYC3	300 Jahre, kein realer Zeitbezug	ECHAM4/OPYC3	CO ₂ -Äquivalente von 1990 (konstant)	Simuliert, aus Kontrolllauf ECHAM4/OPYC3
Mit EDS abgeleitet aus simulierter Zirkulation, ECHAM4/OPYC3	1860–2100	ECHAM4/OPYC3	IS95a	Simuliert, aus Szenarienlauf ECHAM4/OPYC3
Mit EDS abgeleitet aus simulierter Zirkulation, HADCM3	1961–2100	HADCM3	IS95a	Simuliert, aus Szenarienlauf HADCM3

Tabelle 2.3: Aufstellung der pro Teilgebiet verfügbaren Durchflusszeitreihen sowie der zu ihrer Simulation mit HBV-D verwendeten Klimadaten. Die aus Pegelmessungen abgeleiteten Durchflüsse dienen der Kalibrierung des hydrologischen Modells HBV-D. Nicht aufgeführt sind die Daten aus der Reanalyse für die Eich- und Validierungsphase von EDS.

ne wesentlich höhere natürliche Variabilität. Dies spiegelt sich auch im Wertebereich des Kontrolllaufs wider. Die regionalisierten Daten beider GCMs zeigen durchweg eine Zunahme künftiger Niederschläge. In den allermeisten Gebieten liegen die für 2021–2050 simulierten Gebietsniederschläge jedoch noch

im Bereich der angenommenen, natürlichen Variabilität. Erst im Intervall 2061–2090 heben sich die simulierten Niederschläge deutlich von der durch den Kontrolllauf wiedergegebenen Variabilität ab (eine Ausnahme ist der Wert für das HADCM3-Szenarium im Maingebiet). Die simulierten Niederschlagszunah-

men liegen dann im Bereich von knapp 20 bis ca. 45 % gegenüber dem Referenzzeitraum. Es muß jedoch beachtet werden, dass (im Gegensatz zur Temperatur) die aus den Klimaszenarien bzw. dem Kontrolllauf berechneten Gebietsniederschläge bereits im Referenzzeitraum 1961-1990 etwa 10 bis 20 % über den aus Beobachtungen berechneten Daten liegen (Abb. 2.11). Deutlich werden auch die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der beiden GCMs, die im Gebiet des Mains besonders augenfällig sind. Allgemein lässt sich feststellen, dass die auf ECHAM4/OPYC3 basierenden Simulationen für die Projektionszeiträume ausgeprägtere Niederschlags- und Temperaturzunahmen ergeben. Es bleibt also festzuhalten, dass bei der GCM-basierten Simulation von Niederschlägen eine nicht unerhebliche Unsicherheit eingeführt wird, die sich auf die nachfolgenden Auswertungen überträgt.

Werden die Untersuchungen zur künftigen Veränderung von Niederschlag und Temperatur zusätzlich in Sommer- und Winterhalbjahre unterteilt, so zeigt sich, dass mit den Szenarien eine überproportionale Temperaturerhöhung im Sommer resultiert. Dies ist in Abbildung 2.12 exemplarisch für das Gebiet des Neckars dargestellt. Beim Niederschlag lässt sich feststellen, dass die beiden GCMs unterschiedliche Resultate liefern: Während mit ECHAM4/OPYC3 im Projektionszeitraum 2061–2090 die Winterniederschläge stärker als die Sommerniederschläge ansteigen, ist es mit HADCM3 genau umgekehrt: Hier ist von einem stärkeren Anstieg der Sommerniederschläge auszugehen.

Mit der Anwendung des hydrologischen Modells HBV-D können aus den verschiedenen Klimaszenarien Durchflüsse erzeugt werden (siehe auch Tabelle 2.3). Voraussetzung ist die vorangegangene, erfolgreiche Anwendung von HBV-D im jeweiligen Teilgebiet, d.h. die optimale Wiedergabe gemessener Durchflüsse unter Berücksichtigung der Gebietscharakteristika sowie der gemessenen Stationswerte von Niederschlag und Temperatur (Tabelle 2.2).

In Abbildung 2.13 sind die Abweichungen zwischen langjährigen Mittelwerten der aus Messungen bestimmten Durchflüsse MQ und den entsprechenden, mit HBV-D simulierten Werten dargestellt. Hierbei beruhen die simulierten MQ-Werte auf Zeitreihen mit modellierten Tageswerten des Durchflusses. Zunächst ist festzustellen, dass die auf Grundlage von HBV-D und gemessenen Klimagrößen erzeugten MQ-Werte bei Abweichungen von maximal 10 % gut mit den „gemessenen“ MQ-Werten übereinstimmen. Mit Differenzen von nur 2,0 bzw. 2,4 % liegen die Werte für die Gebiete der Mosel bzw. des Rheins sogar deutlich unter dem maximalen Fehlerbereich. In beiden Gebieten sind auch die Abweichungen der mittels Klimaszenarien für den Referenzzeitraum 1961–1995 erzeugten MQ-Werte als relativ gering zu bezeichnen. Dagegen unterscheiden sich in allen untersuchten Teilgebieten die aus dem Kontrolllauf berechneten Werte schon deutlich von den jeweiligen, aus Messungen abgeleiteten MQ-Werten. Hier kommen sowohl die Unsicherheiten aus der Regionalisierung des Niederschlags als auch die als natürliche Variabilität interpretierten Niederschlagsschwankungen über den 300-jährigen Simulationszeitraum (vgl. Abb. 2.11) deutlich zum Vorschein.

Schließlich wird für den Projektionszeitraum 2061–2095 von einer teilweise beträchtlichen Erhöhung der mittleren MQ-Werte ausgegangen. Mit Ausnahme des Klimaszenariums HADCM3 für das Maingebiet liegen dabei die simulierten Abweichungen über den Variabilitäten des Kontrolllaufs, insbesondere bei den Regionalszenarien auf der Basis von ECHAM4/OPYC3 (Abb. 2.13). Wird neben Szenarien der mittleren jährlichen Durchflüsse auch die Entwicklung mittlerer monatlicher Durchflüsse betrachtet, so zeigt sich ähnlich wie bei den saisonalen Unterschieden des Niederschlags (Abb. 2.3.5) eine unterschiedliche innerjährliche Betonung der simulierten Durchflusserhöhungen zwischen den auf ECHAM4/OPYC3- bzw. HADCM3-basierten Szenarien (Schwandt, 2004).

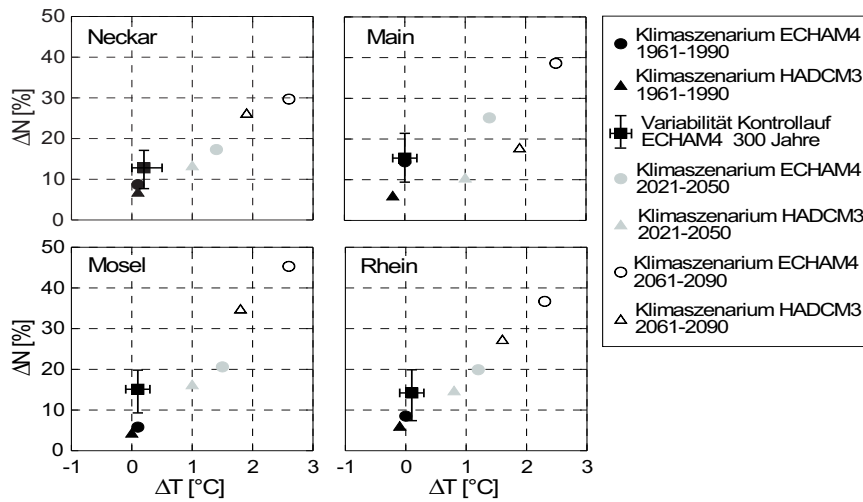


Abbildung 2.11: Abweichungen von den aus Stationsmessungen 1961-1990 bestimmten Gebietsmitteln des Niederschlags N und der Temperatur T , dargestellt für drei Teilgebiete sowie das gesamte Rhein-Einzugsgebiet zwischen den Pegeln Maxau und Köln. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufes geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger Mittelwerte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.

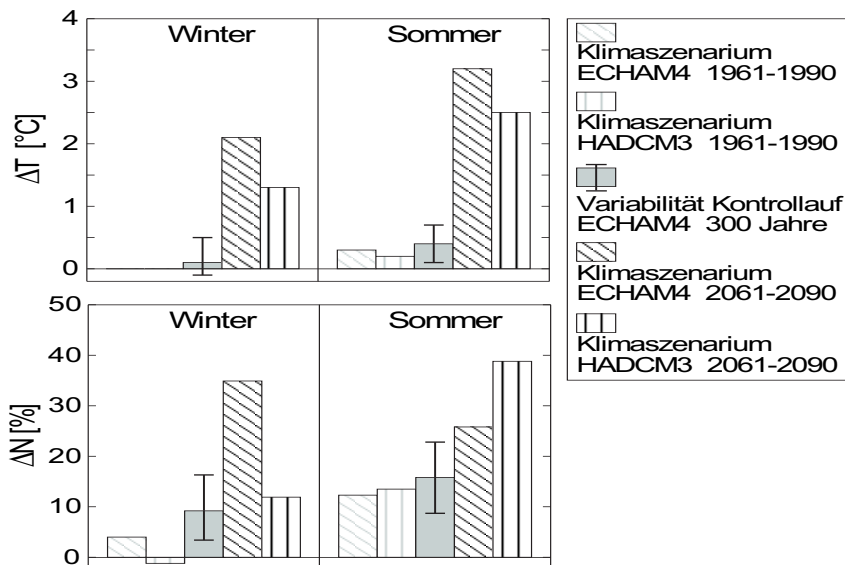


Abbildung 2.12: Abweichungen von den aus Stationsmessungen 1961-1990 bestimmten Gebietsmitteln der Temperatur T (oben) und des Niederschlags N (unten) für das Gebiet des Neckars bis Pegel Plochingen. Der Winterzeitraum umfasst die Monate November bis April, das Sommerhalbjahr schließt die Monate Mai bis Oktober ein.

Werden schließlich die gemittelten Jahreshöchstabflüsse MHQ untersucht, so ergibt sich das in Abbildung 2.14 dargestellte Bild. Es zeigt sich, dass die aus Messungen bestimmten MHQ -Werte durch das hydrologische Modell HBV-D meist unterschätzt werden, wenn-

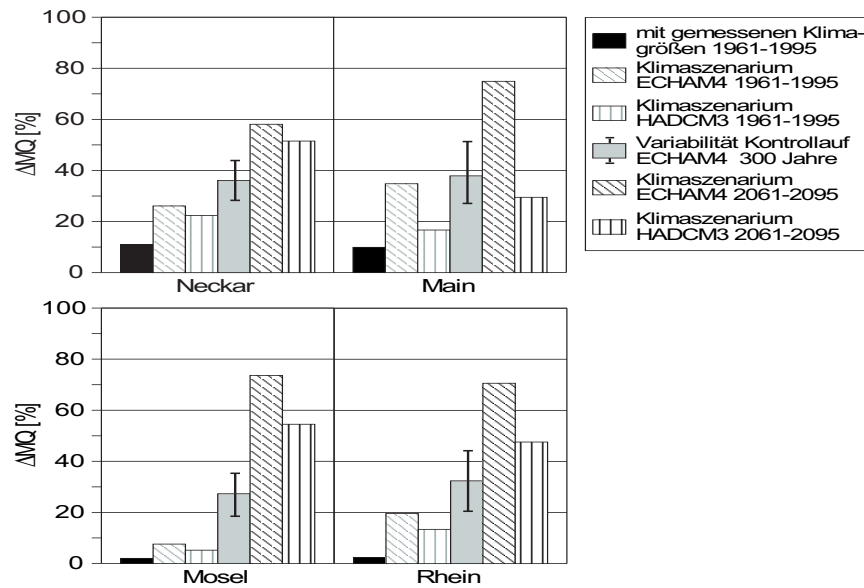


Abbildung 2.13: Prozentuale Abweichungen von den aus Pegelmessungen 1961-1995 abgeleiteten, mittleren jährlichen Durchflüssen MQ. Die schwarzen Säulen (jeweils ganz links) geben den mittleren Fehler des hydrologischen Modells HBV-D unter Nutzung von Messwerten des Niederschlags und der Temperatur an. Alle weiteren Auswertungen beruhen auf der Anwendung der Modellkette GCM - EDS - HBV-D. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufs geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger MQ-Werte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.

gleich die Abweichungen mit maximal bis 11 % in einem akzeptablen Rahmen liegen. Auffällig sind die äußerst geringen Abweichungen der Szenarien im Neckargebiet über den Referenzzeitraum 1961–1995, so dass die hier für den Projektionszeitraum 2061–2095 angegebenen MHQ-Erhöhungen trotz hoher natürlicher Variabilitäten mit weniger Unsicherheiten behaftet sind. Große Unsicherheiten vermitteln dagegen die Untersuchungen im Maingebiet (Abb. 2.14), bei denen einerseits die natürliche Variabilität mit einer hohen Spannweite simuliert wurde, andererseits das auf HADCM3 basierende Szenarium einen vergleichsweise geringen zukünftigen MHQ-Anstieg erzeugt. Das gilt in ähnlicher Weise auch für die Auswertungen im Mosel- und Rheingebiet, wohingegen die auf der Basis von ECHAM4/OPYC3 generierten Szenarien sehr ausgeprägte MHQ-Anstiege ergeben. Insgesamt wird im Vergleich mit der Abbildung 2.13 deutlich, dass die Unsicherheiten

bei der Simulation von extremeren Bedingungen (MHQ gegenüber MQ) angewachsen sind. Diese werden noch größer, wenn Hochwasserabflüsse mit großen Wiederholungszeitspannen (z.B. HQ100) untersucht werden (Thieken et al., 2004).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die hydrologische Modellierung der Abflussbedingungen des Untersuchungsgebietes als Voraussetzung für die Einbindung regionalisierter Klimaszenarien erfolgreich verlaufen ist. Die Kopplung GCM – EDS liefert verlässliche Kennwerte des Regionalklimas. Problematisch ist jedoch, dass der mit ECHAM4/OPYC3 realisierte Kontrolllauf fast durchweg zu hohe Stations- und Gebietsniederschläge ergibt und sich damit die als natürliche Variabilität bezeichneten Niederschlags- und Abflussschwankungen innerhalb weit gefasster Intervalle bewegen. Dies führt zu teilweise großen Unsicherheiten bei der Interpre-

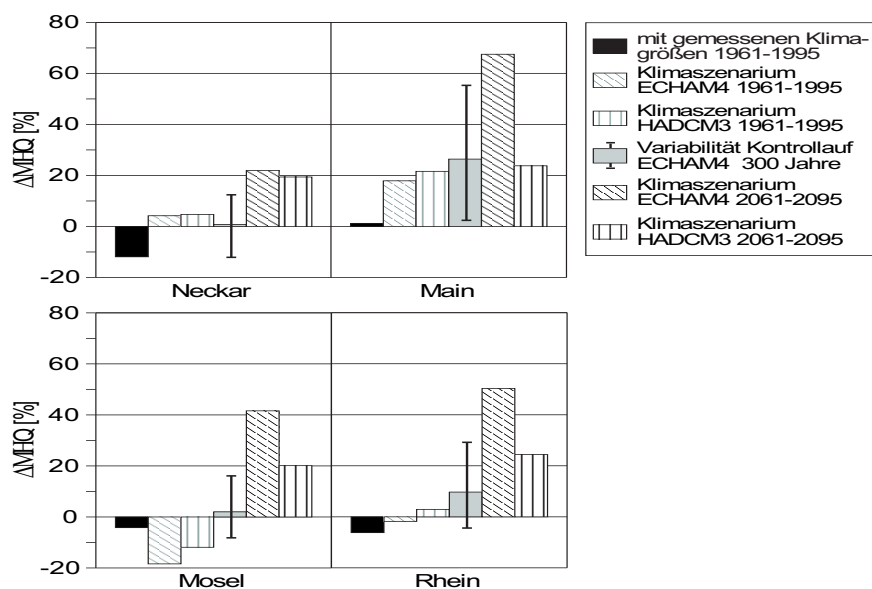


Abbildung 2.14: Prozentuale Abweichungen von den gemittelten Jahreshöchstabflüssen MHQ der Messperiode 1961-1995. Die schwarzen Säulen (jeweils ganz links) geben den mittleren Fehler des hydrologischen Modells HBV-D unter Nutzung von Messwerten des Niederschlags und der Temperatur an. Alle weiteren Auswertungen beruhen auf der Anwendung der Modellkette GCM - EDS - HBV-D. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufes geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger MHQ-Werte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.

tation der Klimaszenarien und deren Auswirkungen.

Die regionalisierten Daten beider Klimamodelle geben eine deutliche Erhöhung der Temperaturen im Untersuchungsgebiet bei gleichzeitig steigenden Niederschlägen an. Die Unsicherheiten der Aussagen zur Niederschlagszunahme sind dabei abhängig vom betrachteten Teilgebiet und der Wahl des entsprechenden GCMs. Allgemein fallen die auf der Basis von HADCM3 erzeugten Regionalszenarien im Vergleich zu ECHAM4/OPYC3 weniger extrem aus. Die mittleren Abflussbedingungen MQ und das mittlere Hochwasser MHQ steigen im Projektionszeitraum ebenfalls in allen untersuchten Gebieten deutlich an, wobei hier neben den Unsicherheiten wieder die Unterschiede bei der Wahl des GCMs zu nennen sind. So zeigt sich, dass die Simulationen zum Teil im Bereich der Unsicherheit der Modellkette liegen, insbesondere bei der Betrachtung

der MHQ's. Wie Thielen et al. (2004) demonstrierten, lässt die hier beschriebene Methodik daher noch keine gesicherten Aussagen zur künftigen Verschärfung extremer Hochwasserabflüsse (HQ100) zu. Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 2.4 noch einmal zusammengefasst.

Die Untersuchungen zum Einfluss der räumlichen Auflösung und Qualität von Landnutzungsinformationen als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung haben sich auf das Einzugsgebiet des Neckars konzentriert. Ziel war festzustellen, inwieweit eine räumlich hoch aufgelöste, aus Satellitendaten abgeleitete Karte der Landnutzung die Simulation der Abflußbedingungen mit Hilfe von HBV-D verbessert. Anstelle der CORINE-Landnutzungsdatei mit einer Rasterweite von 100 m (Tabelle 2.2) wurde eine digitale Karte mit 30 m Raster als Grundlage für die hydrologische Modellierung verwendet. Neben

	Unsicherheit der Modellkette 1961–1990 / –1995	Anstieg ECHAM4/OPYC3, 2061–2090 / –2095	Anstieg HADCM3, 2061–2090 / –2095
Gebiets- temperatur	-0,2 bis +0,5 °C	+2,3 bis +2,6 °C	+1,6 bis +1,9 °C
Gebiets- niederschlag	+4 bis +20 %	+30 bis +45 %	+18 bis +35 %
MQ	+2 bis +51 %	+58 bis +75 %	+30 bis +55 %
MHQ	-12 bis +55 %	+22 bis +68 %	+19 bis +24 %
HQ100 *	-10 bis +50 %	+20 bis +40 %	+5 bis +30 %

Tabelle 2.4: Quantifizierung der Modellunsicherheiten GCM-EDS (-HBV-D) des Referenzzeitraums sowie simulierte Veränderungen der Klima- und Abflussparameter im Projektionszeitraum auf Basis der beiden Klimamodelle. Die Unsicherheiten setzen sich aus Modellfehlern und der angenommenen, natürlichen Variabilität zusammen.

der verbesserten räumlichen Auflösung liefert die neue Landnutzungskarte ein verfeinertes Abbild der land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächeneinheiten. So lassen sich im Gegensatz zu CORINE auf Basis eines neu entwickelten Klassifizierungsansatzes verschiedene landwirtschaftliche Fruchtarten unterscheiden. Diese Fruchtarten wurden in HBV-D entsprechend parametrisiert. Dennoch zeigt sich, dass sowohl mit der verbesserten räumlichen und zeitlichen (multitemporal) Auflösung als auch der Erhöhung der im hydrologischen Modell berücksichtigten Landnutzungsklassen keine wesentliche Qualitätserhöhung bei der Durchflusssimulation erzielt werden kann. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die neu parametrisierten Landnutzungsklassen hinsichtlich ihrer Eigenschaften im Rahmen der simulierten Abflussbildung untereinander nur geringe Unterschiede aufweisen. Hinzu kommt, dass sich die über das gesamte Untersuchungsgebiet aufsummierten Flächenanteile der dominierenden Landnutzungsklassen bei beiden Datengrundlagen nur geringfügig voneinander unterscheiden. Da HBV-D die räumliche Verteilung der Landnutzung nicht explizit berücksichtigt, sind somit auch keine wesentlichen Unterschiede zwischen den simulierten Abflüssen zu erwarten.

Für die Einzugsgebiete des Glan (1050 km²) sowie der Kyll (816 km²) in Rheinland-Pfalz wurden ferner mit Hilfe des Modells LADEMO (Menzel und Blongewicz, 2000) mehrere Landnutzungsszenarien erstellt (Schwandt und Menzel, 2001; Reichert, 2001) und in die hydrologische Modellierung eingebunden. Die Festlegung der Szenarien orientierte sich an einer Zusammenstellung realistischer Entwicklungstendenzen der Landnutzung im deutschen Rheingebiet, wie sie im Rahmen dieser Studie angefertigt wurde. Die Untersuchungen zielten darauf ab, den Einfluss als realistisch einzustufender Landnutzungsänderungen auf die simulierten Abflussbedingungen, insbesondere das Hochwasserverhalten der Untersuchungsgebiete, zu quantifizieren. Dabei zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen modellierten und gemessenen Hochwasserabflüssen, also die Modellunsicherheiten, häufig deutlich größer sind als die Differenzen, die sich zwischen modellierten Abflüssen unter Nutzung der aktuellen Landnutzungsinformation bzw. realistischer Landnutzungsszenarien ergeben. Es ist hierbei erneut an den semi-gliederten Ansatz in HBV-D zu erinnern, der keine Aussage zur expliziten räumlichen Lage der unterschiedlichen Landnutzungen im Einzugsgebiet zulässt. Dies ist als eindeutiger Nachteil bei der Verwendung von HBV-D in derartigen Studien zu sehen. Vergleichbare Arbeiten mit flächendifferenzierten Modellen

(Niehoff, 2002) weisen jedoch in eine ähnliche Richtung. Es ist daher denkbar (durch die vorliegende Studie jedoch nicht mit Eindeutigkeit zu belegen), dass sich Landnutzungsänderungen mit einer Ab- bzw. Zunahme im Flächenanteil einer Landnutzung von wenigen Prozent tatsächlich nur relativ gering (im Vergleich zu den Klimaszenarien) auf die Abflussbedingungen in mesoskaligen Einzugsgebieten bemerkbar machen. In dieser Richtung besteht jedoch noch weiterer Forschungsbedarf.

2.3.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Im Rahmen dieser Studie wurde ein Modellsystem entwickelt, das die Kopplung des hydrologischen Modells HBV-D mit verschiedenen Hilfsprogrammen zur Datenaufbereitung sowie mit Datensätzen aus Klima- und Landnutzungsszenarien ermöglicht. Dieses Modellsystem ist in die nutzerfreundliche Umgebung eines GIS eingebettet und steht Projekten mit ähnlichen Fragestellungen zur Verfügung.

Die Ergebnisse aus der Anwendung der Klimaszenarien zeigen eine Fortsetzung sich bereits in der Vergangenheit abzeichnender Trends, vor allem eine fortdauernde Temperatur- und Niederschlagserhöhung im Rheingebiet, verknüpft mit einer Zunahme der mittleren Abflüsse bzw. der MHQ-Werte. Trotz oder gerade aufgrund der aufgezeigten Unsicherheiten sollten die Ergebnisse im Rahmen der Katastrophenvorsorge und bei wasserwirtschaftlichen Maßnahmen auf allen räumlichen Ebenen in die Planungen einbezogen werden.

2.3.7 Offene Fragen

Im Rahmen dieser Studie konnte nicht geklärt werden, ob die mit den Klimaszenarien simulierten Zunahmen der Niederschlagssummen auf das Konto intensiverer Niederschläge gehen, die wiederum für die Hochwasserentstehung relevant sein dürften. Die weitere Aus-

wertung der vorliegenden Daten soll sich dieser Aufgabe widmen.

Im Rahmen des Projektes war es nicht mehr möglich, den Einfluss der land- und forstwirtschaftlichen Bodenbearbeitung auf die Abflussbildung (Kap. 2.4, TP A4.3 untersucht; siehe Abb. 2.8) in die Modellstudien zu integrieren, um damit die Relevanz für die Hochwasserentstehung in kleinen bis mesoskaligen Einzugsgebieten zu quantifizieren. Diese Untersuchungen bleiben daher einem Folgeprojekt vorbehalten.

2.3.8 Dank

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) hat wesentliche Daten zur Verfügung gestellt, ohne die das Projekt in der vorliegenden Form nicht durchführbar gewesen wäre. Der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), dem Deutschen Wetterdienst (DWD) sowie den in Tabelle 2.2 aufgeführten Landesämtern wird ebenfalls für die Überlassung wertvollen Datenmaterials gedankt.

2.3.9 Literatur

Bergström, S. (1995): The HBV model. In: V. P. Singh (Hrsg.), *Computer models of watershed hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, S. 443–476

Bürger, G. (1996): Expanded downscaling for generating local weather scenarios. *Climate Research*, 7, S. 111–128

Bürger, G. (2002): Selected precipitation scenarios across Europe. *Journal of Hydrology*, 262, S. 99–110

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) (2003): LAHoR – Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. Bericht Nr. II-18 der KHR, Lelystad

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995). In: J. T. Houghton et al. (Hrsg.), *Climate Change 1995: The science of climate change*. Cambridge University Press, Cambridge
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2001). In: J. T. Houghton et al. (Hrsg.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. IPCC Third Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1997): *Statistische Untersuchung langfristiger Veränderungen des Niederschlages in Baden-Württemberg*. Handbuch Wasser 2, Karlsruhe
- Menzel, L. und M. Blongewicz (2000): LA-DEMO – a user supported model for the development of land use scenarios. In: A. Bronstert, C. Bismuth und L. Menzel (Hrsg.): *European Conference on Advances in Flood Research*. PIK-report 65, S. 43–51, Potsdam
- Menzel, L., G. Bürger und D. Schwandt (2002): *Klimaänderungen und Hochwasser: Ergebnisse aus einer DFNK-Studie im Rheingebiet*. In: G. Tetzlaff, T. Trautmann und K. S. Radtke (Hrsg.), *Zweites Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse – Folgen, Vorsorge, Werkzeuge“*, DKKV-Schriftenreihe, Leipzig/Bonn, S. 278–285
- Menzel, L., A. Thielen, D. Schwandt und G. Bürger (2003): *Impact of climate change scenarios on the regional hydrology – modelling studies in the German Rhine catchment*. Zur Publikation eingereicht bei *Natural Hazards*
- Niehoff, D. (2002): *Modellierung des Einflusses der Landnutzung auf die Hochwasserentstehung in der Mesoskala*. Brandenburgische Umweltberichte 11, Potsdam
- Reichert, D. (2001): *Der Einfluss der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung – Modellierungen und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan*. PIK-report 73, Potsdam
- Schwandt, D. (2004): *Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins – Meßwerte, Simulationen und Szenarien*. In: *Drittes Forum Katastrophenvorsorge „Katastrophenvorsorge und Industriegesellschaft“*, DKKV-Schriftenreihe (im Druck)
- Schwandt, D. und L. Menzel (2001): *Niederschlag-Abfluß-Modellierung des Rheineinzugsgebietes zwischen den Pegeln Maxau und Emmerich*. In: *Abflußverhältnisse im Rheingebiet – Ansätze, Instrumentarien und Ergebnisse aus ausgewählten Projekten*. Schriftenreihe BfG-Veranstaltungen 1/2001, Koblenz.
- Thielen, A., B. Merz, L. Menzel, G. Bürger und D. Schwandt (2004): *Klimaänderungen und Hochwasser im Rheingebiet: Unsicherheiten der Modellierung*. In: *Drittes Forum Katastrophenvorsorge „Katastrophenvorsorge und Industriegesellschaft“*, DKKV-Schriftenreihe (im Druck)
- Werner, P. C., F. W. Gerstengarbe, K. Fraedrich und H. Oesterle (2000): *Climate change in the North Atlantic / European sector*. *International Journal of Climatology*, 20, S. 463–471

2.4 Wasserretentionspotential in forstlich und landwirtschaftlich genutzten Böden

Oliver Bens, Uwe Buczko, Niels Arne Wahl, Britta Wöllecke und Reinhard F. Hüttl

*Brandenburgische Technische Universität Cottbus
Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung
Email: bens@tu-cottbus.de*

TP A4.3: Untersuchungen zur Steigerung des Wasserretentionspotenzials forstlich und landwirtschaftlich genutzter Wassereinzugsgebiete

2.4.1 Zusammenfassung

Die Untersuchungen in Teilprojekt A 4.3 zur Infiltration und Wasserretention wurden auf landwirtschaftlich genutzten Böden (konservierende und konventionelle Bewirtschaftung) auf Löss und Sand sowie auf forstlich genutzten Böden auf Sand durchgeführt. Es zeigt sich, dass landwirtschaftlich konservierend genutzte Böden auf Löss sowohl eine höhere Infiltrationsfähigkeit, als auch ein höheres Wasserspeichervermögen und ein besser entwickeltes Makroporennetzwerk aufweisen als konventionell bewirtschaftete Böden auf Löss bzw. Sand. Generell zeigen reduziert bearbeitete Böden höhere Werte für die o. g. bodenhydraulischen Parameter als konventionell bearbeitete Standorte. Die Waldböden zeigen in diesem Zusammenhang jeweils die niedrigsten Werte für Infiltrationsfähigkeit und Makroporosität, ungeachtet der vorherrschenden Baumart. Aufgrund der Streuauflage und der hohen Humusgehalte im Oberboden weisen die Waldstandorte deutlich höhere Werte hinsichtlich der Wasserspeicherkapazität auf. Besonders auffällig sind für die Waldstandorte die hohen Werte für den Benetzungswiderstand, der eine jahreszeitliche und bodentiefenabhängige Variabilität aufweist und die Infiltrationsfähigkeit von Niederschlagswasser verzögert. Auf landwirtschaftlich genutzten Böden ist der Benetzungswiderstand dagegen lediglich sehr gering ausgeprägt. Die vorliegenden Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage zur Entwicklung von Bodenmodulen im Rahmen der einzugsgebietsbezogenen hydrologischen Modellierung. Damit können Folgen von Landnutzungsänderungen im Kontext einer verbesserten Hochwasservorsorge zutreffender abgeschätzt werden.

Abstract

The investigations carried out in subproject A 4.3 were performed on sandy and silty farmland soils (conventional and reduced tillage) as well as under forest management on sandy soils. It was found that infiltration capacity, macroporosity and water retention showed the highest values on silty soils under reduced tillage as compared to conventional tillage, as well as sandy farmland soils irrespective of the tillage system. Generally, reduced tillage has a higher positive effect on the aforementioned soil hydraulic parameters as compared to conventional tillage. Forest soils exhibited the lowest values for infiltration capacity and macroporosity, irrespective of the stand age or dominating tree species. Due to the presence of forest floor layers and high soil organic matter contents in the mineral topsoil, water retention capacity is highest on forest soils.

Hydrophobicity is strongly developed at the different experimental forest stands, retarding the infiltration of surface water. Additionally, hydrophobicity exhibits a marked seasonal variability and additionally depends on soil depth. On arable soils, hydrophobicity is much less strongly developed. The results make up an essential part in the development of soil modules for catchment based hydrological modelling purposes. In the context of an improved flood risk management, the results of changes in land use management thus can be predicted more precise.

2.4.2 Veranlassung und Problem

Im vergangenen Jahrzehnt konnte eine Zunahme von Hochwasserkatastrophen (z.B. Rhein 1993, 1995, Oder 1997, Elbe 2002) registriert werden. Zu den natürlichen Ursachen der Entstehung von Hochwässern kommt die verstärkende Wirkung durch anthropogene Einflüsse, die sich u.a. aus den Variablen Ausbauzustand der Gewässer, Landnutzung und Bodenbearbeitung in Flusseinzugsgebieten sowie einer möglichen Klimaänderung ergeben. Spezieller Forschungsbedarf besteht zu den kausalen Zusammenhängen zwischen anthropogenen Einflüssen der Landnutzung und Bodenbewirtschaftung im Kontext der Hochwasserentstehung und darüber hinaus zu den Möglichkeiten, durch eine Veränderung der Landnutzung und Bodenbewirtschaftung die Wasserretention in Einzugsgebieten zu steigern und Folgeschäden von Hochwässern zu vermindern.

Innerhalb der Teilprojektgruppe A4 quantifiziert TP A4.3 den Einfluss des Durchfluss- und Speichermediums „Boden“ auf die Hochwasserentstehung und Hochwasserprävention. Die Identifikation und Quantifizierung der hydrologisch relevanten Bodenparameter (Benetzbarkeit, Infiltration, Wasseraufnahme, Wasserspeicherfähigkeit) ist von großer Bedeutung für die hydrologische Einzugsgebietsmodellierung im Rahmen von TP A4.1 (siehe Kap. 2.3) und die Unsicherheitsanalyse im TP A4.2 (siehe Kap. 2.9).

2.4.3 Ziel

Im TP A 4.3 werden auf der Basis bodenhydrologischer und bodenphysikalischer Gelände- und Laboruntersuchungen Möglich-

keiten zur Steigerung des Wasserretentionspotenzials land- und forstwirtschaftlich genutzter Böden analysiert. Auf diesen wissenschaftlichen Grundlagen aufbauend werden Strategien für eine zukünftige, die Hochwasserprävention stärker berücksichtigende Landnutzung in Flusseinzugsgebieten entwickelt, z.B. durch die Schaffung weiterer Retentionsräume und durch angepasste Landnutzung. Schließlich sollen die Ergebnisse in konkrete Handlungsempfehlungen an Entscheidungsträger und Akteure der Raumplanung (z.B. Raumordnungs- und Planungsbehörden) und Landnutzung (z.B. Landwirte) in Flusseinzugsgebieten zur Umsetzung weitergegeben werden.

2.4.4 Methode

Der methodische Ansatz basiert auf der experimentellen Untersuchung und Beschreibung von für die Wasserretention von Böden relevanten Einflussgrößen auf der lokalen Skala. Die ermittelten Parameter finden Eingang in Bodenmodule in hydrologischen Einzugsgebietsmodellen. Die Entwicklung eines Bodenmoduls und dessen Implementation in ein einzugsgebietsbezogen arbeitendes hydrologisches Modell wird im Rahmen der Arbeiten von TP A4.1 realisiert. Das für die hydrologische Modellierung im TP A4.1 ausgewählte, überwiegend agrarisch geprägte Teileinzugsgebiet des Rheins, das Gebiet der Lein, weist schluffige Parabraunerden auf Löss auf. Demzufolge wurden die Untersuchungen an Versuchsflächen mit vergleichbarer naturräumlicher Ausstattung und Landnutzung (hier: Versuchsstandorte in Niedersachsen und Brandenburg) durchgeführt. Dabei war die Überprüfung der prinzipiellen Übertragbarkeit von Be-

funden und Modellen stetiger Bestandteil der Arbeiten.

Die Standortuntersuchungen wurden an typischen land- und forstwirtschaftlich genutzten Standorten auf Sand und Löss durchgeführt. Es wurden jeweils differenzierte Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsmaßnahmen berücksichtigt. Auf Agrarstandorten zieht die konventionelle Bodenbearbeitung (Pflug und Sekundärbearbeitung) vor allem auf schluffreichen Böden zahlreiche negative Auswirkungen auf bodenphysikalische und -hydraulische Eigenschaften nach sich (van der Ploeg, 2001). Einen wichtigen Faktor der Abflussbildung bildet die hydraulische Wirksamkeit des Makroporensystems, welches bei reduzierten (konservierenden) Bodenbearbeitungsverfahren oftmals eine höhere Kontinuität und Konnektivität aufweist. Bei mehrjähriger Dauer einer derartigen Bearbeitungsweise wird i.d.R. die Aktivität der Bodenfauna deutlich gefördert, was in einer höheren Anzahl von in vertikaler Richtung kontinuierlichen Makroporen und damit höheren Infiltrationsraten resultiert. Eine Ausdehnung der Flächen mit reduzierter Bodenbearbeitung in Flusseinzugsgebieten führt vor diesem Hintergrund vermutlich zu einer Erhöhung des flächenhaften Wasserrückhaltevermögens. Diese Wirkungskette ist zumindest bei geringen bis mittleren Gebietsfeuchten (vor dem Ereignis) und bei mittleren Starkniederschlägen relevant (Sieker et al., 2002).

An Forststandorten bewirkt der aktuell großflächig durchgeführte Waldumbau (z.B. Transformation von Kiefernforstökosystemen in Buchen-Kiefern-Mischbestände in Nordostdeutschland) eine gezielte Veränderung der Baumartenwahl und Altersklassenverteilung. In überwiegend arten- und strukturarmen Kiefernreinbeständen findet zur Zeit großflächig ein Voranbau mit Buche statt. Diese beiden Baumarten sind daher die flächenrelevantesten und stehen im Rahmen der Arbeiten im TP A4.3 im Vordergrund der Betrachtung. Speziell auf sorptionsarmen, silikatreichen Sandböden kommt der organischen Substanz als Spei-

cher für Wasser eine besondere Bedeutung zu (Bungart & Hüttl, 1998, Wüstrich, 2000). Primär wird die organische Bodensubstanz (OBS) in den Humusaufgaben und dem humosen Mineralboden gespeichert. Die Wasserkapazität (WK) korreliert mit dem Gehalt an OBS aufgrund des Vermögens der OBS, ein Mehrfaches ihres Eigengewichts an Wasser zu speichern (Hudson, 1994, Emerson, 1995). Da die Baumarten und Bestandesformen unmittelbar den Humushaushalt beeinflussen, haben sie signifikante Auswirkungen auf die WK. Dieses gilt auch und insbesondere für die Sandböden im Nordostdeutschen Tiefland.

Konkret wurden im Rahmen dieses Vorhabens die bodenhydrologischen Effekte der Baumartenwahl (Schäfer et al., 2002) untersucht:

- Einfluss der organischen Streu auf Oberflächenabfluss und Wasserspeicherung
- Einfluss der organischen Bodensubstanz auf die Wasserspeicherung und Infiltration
- Einfluss des Benetzungswiderstands (Hydrophobie) auf die Infiltration und Speichereigenschaften
- Veränderung des Humusgehalts und der Humusformen im Boden als Folge von Waldumbaumaßnahmen
- Entwicklung von Makroporensystemen unter verschiedenen alten Waldumbaubeständen

Es wurden bodenphysikalische und bodenhydraulische Messungen im Labor sowie im Gelände durchgeführt. Dazu wurden etablierte Versuchsstandorte auf Sanden im Osten (Standort Lietzen) und im Nordosten Brandenburgs (Revier Kahlenberg bei Eberswalde) (siehe Abb. 2.15) und auf Löss (Adenstedt in Niedersachsen) genutzt. Es wurden Bodenprofile bis in ca. 1,5 m Tiefe aufgenommen, um die Bodenstruktur und Parameter des Makroporensystems zu erfassen. Des Weiteren wurden Färbeversuche zur Beurteilung der Makroporosität sowie Messungen mit Hauben- und

Ringinfiltrometern zur in-situ Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit im nahe gesättigten und gesättigten Bereich durchgeführt.



Abbildung 2.15: Versuchsstandorte Lietzen (oben) und Kahlenberg (unten)

Es wurden folgende etablierte Methoden eingesetzt: Für die Bestimmung der Wasserretention, der Lagerungsdichte und dem Gehalt an organischer Bodensubstanz erfolgte an den Bodenprofilen eine Entnahme von Mischproben und 100 cm³ Stechzylindern entsprechend der KA 4 (AG Boden, 1996). Zur genaueren Bestimmung der maximalen Wasserkapazität an der Bodenoberfläche wurden entsprechend der Bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BML, 1994) im Umkreis von 10 m um das Leitprofil je acht Bodensäulen (d = 10 cm, h = 9 cm) entnommen. Bei den Waldstandorten wurden die Auflagehorizonte bei der Beprobung mit berücksichtigt. Die Bestimmung der

Lagerungsdichte erfolgte entsprechend DIN ISO 11272 nach Trocknung bei 105 °C. Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde mittels Elementaranalysator nach DIN ISO 10694 ermittelt. Die Bestimmung der Entwässerungscharakteristik (pF_{wg}-Messung) erfolgte nach Kretschmar (1996) mittels Unter- und Überdruckverfahren.

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde mit einem Ring- und einem Tensionsinfiltrometer nach den Methoden von Gardener (1958), Wooding (1968) sowie Reynolds & Elrick (1990) bestimmt. Untersuchungen zum Benetzungswiderstand folgten den Angaben in Van't Woudt (1959), Watson & Letey (1970), King (1981) sowie Dekker & Jungerius (1990).

2.4.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der bodenhydrologischen Untersuchungen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen sind in erster Linie geprägt durch den Einfluss der Bodenart. Es zeigt sich, dass schluffige Böden für die meisten bodenhydrologisch bedeutenden Parameter höhere Werte zeigen als die Sandböden. Dies äußert sich nicht nur in der höheren hydraulischen Leitfähigkeit, sondern spiegelt sich insbesondere auch in den höheren Werten des gesättigten Wassergehalts sowie den höheren Werten der Makroporosität wider. Ein wichtiger Einflussfaktor ist hierbei die Art der Bodennutzung: Konservierende Bodenbearbeitung wirkt sich i.d.R. positiv auf die hydraulischen Parameter aus (Seyfahrt et al., 1999; Sieker et al., 2002 und Abbildung 2.16 & 2.17). Das dazu abweichende Bild des Standorts Lietzen ergibt sich aus der kürzeren Dauer der Parallelbewirtschaftung sowie allgemein durch den Einfluss der Bodenart Sand (Tab. 2.5). Insgesamt weisen schluffige Böden aus bodenhydrologischer Sicht allgemein positivere Eigenschaften auf als Sandböden. Diese Eigenschaften werden durch eine konservierende Bewirtschaftungsweise noch verstärkt (Bens et al., 2000; Hangen et al., 2002). Im Sinne des vorbeugenden Hochwasserschutzes sollten landwirtschaftlich

genutzte Flächen daher soweit möglich konservierend bearbeitet werden. Dadurch würde bei kleinen und mittleren Hochwasserereignissen der Boden als Retentionsraum bestmöglich genutzt (Schmidt et al., 2001; Schnug & Haneklaus, 2002; Schmidt et al. 2002).

Die maximale Wasserkapazität im Auflagehumus sowie dem humosen mineralischen Oberboden erreicht erhebliche Größenordnungen, wie aus Tab. 2.6 hervorgeht. Der absolute Rückgang der flächenbezogenen Wasserkapazität (WK) nach Beginn des Waldumbaus begründet sich primär in der Veränderung der Humusform vom Kiefernreinbestand zu den Kiefern-Buchen-Mischbeständen (Fischer et al., 2002). Die Infiltrationskapazität steigt dagegen vom Kiefern- zum Buchenreinbestand (Tab. 2.6). Im allgemeinen sind die Unterschiede zwischen den Messterminen größer als diejenigen zwischen den einzelnen Versuchsstandorten. Die geringe Intervariabilität der Werte der verschiedenen Versuchspartikeln ist auf nur mäßig ausgeprägte textuelle Unterschiede (Ausprägung als feinsandiger Mittelsand) zurückzuführen. Die mit dem Haubeninfiltrimeter gemessenen Leitfähigkeiten sind im Mittel um ca. eine Zehnerpotenz niedriger als diejenigen, die mit dem Ringinfiltrimeter ermittelt wurden. Dieser Befund lässt sich mit methodischen Unterschieden, wie den durch die Messungen erfassten Bodenvolumina, den Randbedingungen, der Geometrie des Fließfeldes sowie dem Einfluss der Hydrophobie erklären. Insgesamt sind die Leitfähigkeitswerte (Haubeninfiltrimeter) im Vergleich mit denen der Agrarflächen in Adenstedt durchschnittlich zwölfmal geringer und allenfalls mit den Werten des Agrarstandorts Lietzen vergleichbar (vgl. Tab. 2.5), was den Einfluss der Bodenart und Bodenbewirtschaftung auf die Infiltrationsleistung verdeutlicht.

Untersuchungen zum Benetzungswiderstand des Bodens (Hydrophobie) zeigen für alle vier Waldumbaustadien im oberen Mineralboden einen unterschiedlich stark ausgeprägten Benetzungswiderstand (Tab. 2.7). Dies wurde anhand der Eindringzeit von Wassertropfen in

Bodenproben der betreffenden Waldumbaustadien belegt. Erste Untersuchungen im Winter 2000 ergaben insbesondere für die Mischbestände die höchsten Werte bzgl. der Persistenz und Stärke der Hydrophobie. Weitere Untersuchungen führten zu einer Differenzierung dieses Befundes, da sich herausstellte, dass alle untersuchten Umbaubestände hydrophobe Bodeneigenschaften aufweisen, deren Persistenz/Stärke eine bodentiefenabhängige und jahreszeitliche Variabilität aufweist. Generell ist der Benetzungswiderstand in den obersten 10 cm und im Sommerhalbjahr am stärksten ausgeprägt und spielt unterhalb 40 cm Tiefe keine Rolle mehr (Buczko et al., 2002). Aufgrund der starken Ausprägung des Benetzungswiderstands muss jedoch mit einer teilweise erheblichen Beeinflussung der Infiltration gerechnet werden, was sich parallel dazu in einer Erhöhung des Oberflächenabflusses äußert und ggf. Auswirkungen auf die Abflussspende an den Vorfluter hat.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass landwirtschaftlich genutzte Flächen auf Lössböden unter konservierender Bodenbearbeitung günstigere hydraulische Eigenschaften im Hinblick auf Infiltration und Wasserspeicherung aufweisen als konventionell bewirtschaftete Flächen. Die Bestimmung der Makroporen ergibt für konventionell bearbeitete Lössböden eine höhere Makroporenzahl im Oberboden. Reduziert bearbeitete Flächen zeigen in Tiefen >20 cm eine höhere Makroporenzahl wie auch einen höheren Flächenanteil von Makroporen. Die vertikale Verlagerung des Tracers weist auf eine höhere Konnektivität und Kontinuität der Makroporen auf den reduziert bearbeiteten Flächen (bis ca. 120 cm) im Vergleich mit den konventionell bearbeiteten Flächen hin (bis ca. 60 cm) (vgl. Tab. 2.5). Durch die kürzere Dauer der Parallelbewirtschaftung der Sandböden des Standorts Lietzen (seit 1996) konnten sich hier noch nicht die positiven Effekte konservierender Bodenbearbeitung einstellen. Neben der kürzeren zeitlichen Dauer ist dies jedoch auch auf die sandigen Bodenverhältnisse zurückzuführen, da die

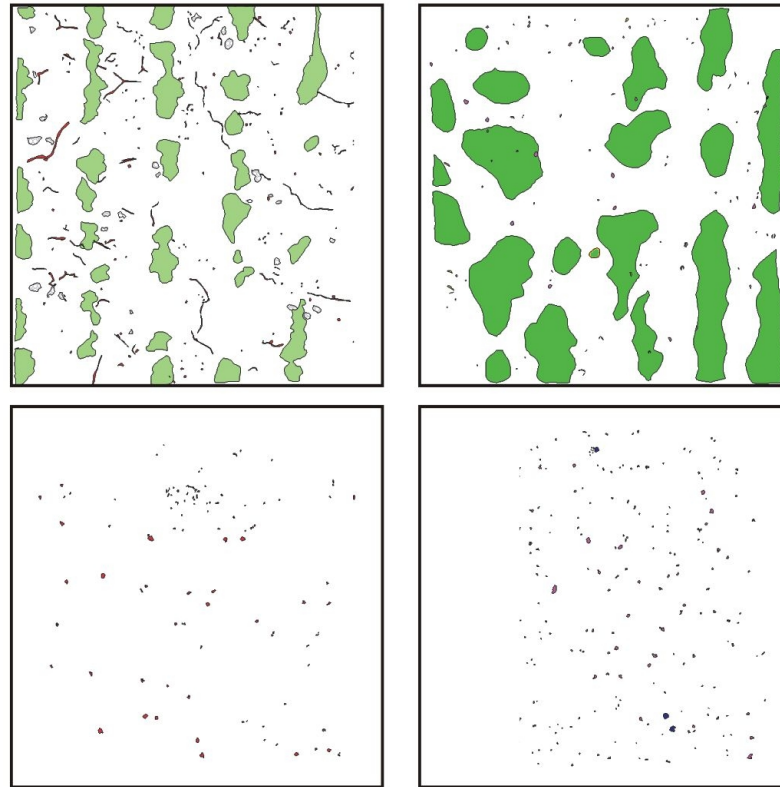


Abbildung 2.16: 2D-horizontale Verteilung der gefärbten (grün) und ungefärbten (rot) Makroporen sowie der Getreide-Pflanzreihen am Löss-Standort Adenstedt (links konventionelle Bodenbearbeitung, rechts reduzierte Bodenbearbeitung; oben Bodenoberfläche, unten 30 cm Bodentiefe).

Parameter	Lössboden (Adenstedt)		Sandboden (Lietzen)	
	Bearbeitung konventionell	Bearbeitung konservierend	Bearbeitung Konventionell	Bearbeitung konservierend
Hydraulische Leitfähigkeit (Ringinfiltrometer; m/s)	$7,8 * 10^{-5}$	$8,9 * 10^{-5}$	$2,2 * 10^{-5}$	$1,9 * 10^{-5}$
Nutzbare Feldkapazität (%)	33,7 (± 3)	49,3 (± 2)	35,6 (± 4)	31,6 (± 8)
Gesättigter Wassergehalt (%)	60,9 (± 3)	74,1 (± 5)	49,5 (± 7)	46,3 (± 8)
Wassergehalt am Welkepunkt (%)	11,3 (± 3)	10,4 (± 2)	3,3 (± 2)	3,3 (± 2)
Makroporosität (%)	0,2	0,4	keine Makroporen	keine Makroporen
Max. Makroporentiefe (cm)	60	120	keine Makroporen	keine Makroporen

Tabelle 2.5: Übersicht ausgewählter bodenhydrologischer Kenngrößen der untersuchten Ackerstandorte.

Konnektivität des Makroporensystems in diesen Böden stark erniedrigt ist. Bodenschonende Ackerbewirtschaftung kann insgesamt zu einer Erhöhung der Infiltration von Niederschlägen und einer Verringerung der Abfluss-

bildung in agrarisch genutzten Einzugsgebieten auf Lössböden beitragen.

Die Forststandorte zeigen im Rahmen des Waldumbaus als einem bedeutenden und flä-

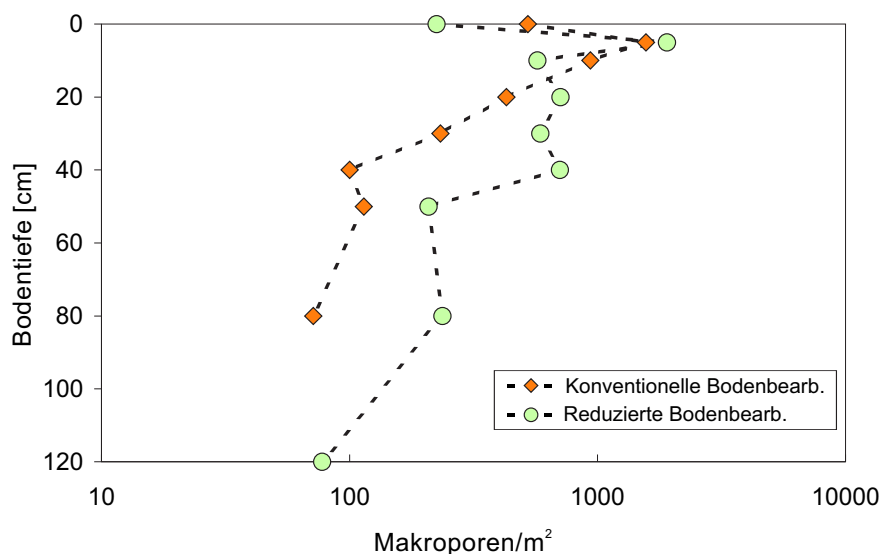


Abbildung 2.17: Makroporosität von landwirtschaftlich genutzten Ackerstandorten: Vergleich der konventionellen zur konservierenden Bodenbearbeitung am Sand-Standort Lietzen.

Parameter	Waldstandort Kahlenberg			
	Kiefern-Reinbestand Kiefer 84 J.	Kiefern-/Buchen-Mischbestand Kiefer 76 J. Buche 34 J.	Kiefern-/Buchen-Mischbestand Kiefer 114 J. Buche 57 J.	Buchen-Reinbestand Buche 91 J.
Hydraulische Leitfähigkeit (Haubeninfiltrometer; m/s)	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$6,8 \cdot 10^{-6}$
Hydraulische Leitfähigkeit (Ringinfiltrometer; m/s)	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-5}$	$8,7 \cdot 10^{-5}$
Nutzbare Feldkapazität (%)	16,6 (± 10)	21,6 (± 10)	16,8 (± 10)	20,8 (± 10)
Gesättigter Wassergehalt (%)	46,4 (± 9)	48,7 (± 10)	48,2 (± 8)	44,4 (± 10)
Wassergehalt am Welkepunkt (%)	12 (± 10) ¹	5,2 (± 5)	5,2 (± 4)	6,5 (± 3)
Flächenbezogene Wasserkapazität (l/ha)	$1,28 \cdot 10^9$	$0,75 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^9$	$1,34 \cdot 10^9$

¹Bedingt durch den hohen Humusgehalt des Ah-Horizonts

Tabelle 2.6: Übersicht ausgewählter bodenhydrologischer Kenngrößen der untersuchten Waldstandorte.

chenrelevanten Bewirtschaftungseingriff deutliche Veränderungen in Morphe (Humusform) und Quantität (Humusvorrat) der organischen Bodensubstanz, was sich zumindest teilweise auch in stark voneinander abweichenden Infiltrationsraten äußert. Daraus wird gefolgert, dass die niedrigen Werte der hydraulischen Leitfähigkeit durch hydrophobe Eigenschaften des Oberbodens beeinflusst sind. Darüber hinaus wird die Infiltrationskapazität je-

doch maßgeblich durch textuelle Unterschiede des Mineralbodens bestimmt. Das Wasser-rückhaltevermögen, ausgedrückt als flächenbezogene Wasserspeicherkapazität, verringert sich zu Beginn (ca. 30 Jahre) des Waldumbaus um ca. 26 %. Dieser hohe Wert ist jedoch erheblich durch das Vorhandensein eines Graswurzelfilz-Moders bedingt. Die mit der Einbringung der Buche hervorgerufenen höheren Beleuchtungsintensitäten am Waldbo-

Waldumbau-Stadium	Proben (n) 0-5/5-10 cm ¹	Potentielle Hydrophobie (% der Proben)				
		Benetzbar < 5 s	Schwach hydrophob 5-60 s	Stark hydrophob 60-600 s	Sehr stark hydrophob 600-3.600 s	Extrem hydrophob > 3.600 s
Kiefern-Reinbestand 84 J.	69/45	0 (47)	43 (53)	43 (0)	13 (0)	0 (0)
Kiefern-/Buchen-Mischbestand 76 J./34 J.	50/25	2 (48)	24 (52)	62 (0)	8 (0)	4 (0)
Kiefern-/Buchen-Mischbestand 114 J./57 J.	75/81	3 (53)	19 (40)	25 (6)	33 (1)	20 (0)
Buchen-Reinbestand 91 J.	26/20	0 (0)	42 (100)	50 (0)	8 (0)	0 (0)

¹ Für den Buchenreinbestand abweichend Werte von 5-30 cm

Tabelle 2.7: Potentielle Hydrophobie in 0-5 und 5-10 cm Bodentiefe der vier untersuchten Waldumbau-Stadien.

den manifestieren sich in einem Humusformenwandel (Fischer et al., 2002) von Moder- zu Mull-Formen. Gleichwohl kann festgehalten werden, dass die Anfangswerte für die WK des Kiefernreinbestands im angestrebten Endstadium des Buchenreinbestands leicht übertroffen werden. Hinsichtlich der Entwicklung der flächenhaften WK weist der Waldumbau daher vor allem zu Beginn des Umbaus negative Effekte auf. Unter Berücksichtigung der potentiellen Hydrophobizität der Waldböden (Tab. 2.7) führt dies zu einem entsprechend erhöhten Oberflächenabfluss an diesen Standorten. Insgesamt erhöhen sich langfristig Infiltrationskapazität (ca. +100 %) und Wasserretentionsvermögen (ca. +5 %) im Rahmen des Waldumbaus. In diesem Zusammenhang sind jedoch die Mischbestände, die über eine Dauer von ca. 90 Jahren anstehen, als kritische Phase des Umbaus anzusprechen. Die aktuell durchgeführten Waldumbaumaßnahmen sind daher für eine kurz- bis mittelfristige Reduzierung der Abflussspende bewaldeter Einzugsgebiete insgesamt als nicht vorteilhaft zu charakterisieren.

2.4.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die im TP A4.3 erarbeiteten Ergebnisse sind ohne weiteres auf ähnlich ausgestattete Naturräume übertragbar. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit TP A4.1 sollen sie auf rheinland-pfälzische Einzugsgebiete angewendet werden. Durch die gemeinsame Bearbeitung von Folgeprojekten, z. B. mit dem GeoForschungsZentrum Potsdam und dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem DFNK gegeben. Dazu zählt auch ein intensiver Austausch und die gemeinsame Nutzung von Versuchsstandorten mit der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL, Braunschweig) sowie dem Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungs-forschung (ZALF, Müncheberg).

Darüber hinaus fließen die Befunde in die landwirtschaftliche Beratung (z. B. Beratungsgremium „Nachhaltige Bodennutzung“ beim Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Raumordnung des Landes Brandenburg) ein. Neben Fachpublikationen in wissenschaftlichen Zeitschriften werden die Ergebnisse auch konsequent in nutzerorientierten Publikationen

veröffentlicht sowie auf Tagungen der Öffentlichkeit vorgestellt.

2.4.7 Offene Fragen

Insgesamt erfordert eine stringenter Beurteilung des Wasserrückhaltepotenzials von differenziert bewirtschafteten Böden eine zeitliche Fortführung der begonnenen Untersuchungen. Da sich im Verlauf der bisherigen Untersuchungen herausgestellt hat, dass der Benetzungswiderstand (Hydrophobie) von Waldböden eine größere Bedeutung auf die Infiltrationsleistung hat als ursprünglich angenommen, ist eine adäquate Untersuchung dieses Phänomens in einem Anschlussvorhaben dringend notwendig. Da die bisher bearbeiteten Standorte unmöglich die Gesamtheit der in Flusseinzugsgebieten vertretenen Bodentypen und Landnutzungsformen widerspiegeln können, müssten weiter Untersuchungen folgen, um das Standortspektrum auszuweiten auf unterschiedliche Böden, verschiedene Klimabedingungen und unterschiedliche Landnutzungsformen/Fruchtfolgen/Bestockungen.

In diesem Kontext ist auch die Bedeutung von temporärer Trockenheit auf die Veränderung bodenhydraulischer Eigenschaften in Einzugsgebieten von hohem Interesse und sollte daher in einem Anschlussvorhaben dringend untersucht werden. Eine sehr geeignete Beispielregion stellt dafür das Nordostdeutsche Tiefland dar.

Ein weiterer Punkt betrifft die Umsetzbarkeit und Validierung der einzugsgebietsbezogenen Modellierung unter Berücksichtigung von unbeantworteten Fragen z.B. bzgl. der Interzeptionsverluste an der Bodenoberfläche sowie dem Einfluss der Hydrophobie auf diese Vorgänge. Diese zentralen bodenhydraulischen Kenngrößen werden bislang nicht in derartigen Modellen berücksichtigt. Aufgrund des Auslaufens des TP A4.3 zum 31.12.2002 konnten die vorgenannten Untersuchungen jedoch nicht im Rahmen des DFNK realisiert werden und bleiben daher Nachfolgeprojekten vorbehalten.

2.4.8 Literatur

AG Boden (1996): *Bodenkundliche Kartieranleitung*. E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover, 4. Aufl., 392 S.

Bens, O., Buczko, U. and Hüttl, R. F. (2000): Hochwasserprävention durch Steigerung des Wasserretentionspotentials in Böden forst- und landwirtschaftlich genutzter Flusseinzugsgebiete - Ein Beitrag im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK). *Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges.* 12, 201 pp.

BML (1994): *Bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE)*. Bonn, 156 S.

Buczko, U., Bens, O., Fischer, H. and Hüttl, R. F. (2002): Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in northeast Germany. *Geoderma* 109, 1-18.

Bungart R., Hüttl, R.F. (Hrsg.) (1998): *Landnutzung auf Kippenflächen - Erkenntnisse aus einem anwendungsorientierten Forschungsvorhaben im Lausitzer Braunkohlerevier - Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Reaktivierung*, Bd. 2, 225 S.

Dekker, L.W., Jungerius, P.D. (1990): Water repellency in the dunes with special reference to The Netherlands. *Catena* 18 (suppl.), 173-183.

DIN ISO 10694: *Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von organischem Kohlenstoff und Gesamtkohlenstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse)*.

DIN ISO 11272: *Bodenbeschaffenheit - Bestimmung der Trockenrohdichte*.

Emerson W.W. (1995): Water retention, organic C and soil texture. *Australian Journal of Soil Research*, 33: 241-251.

Fischer, H., Bens, O. and Hüttl, R. F. (2002): Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121(6), 322-334.

- Gardener, W.R. (1958) Some steady state solutions for unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from a water table. *Soil Sci.* 85, 228-232.
- Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J. and Hüttl, R. F. (2002): Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. *Soil Tillage Research* 63, 181-186.
- Hudson B.D. (1994): Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 49: 189-194.
- King, P.M. (1981:) Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurements. *Aust. J. Soil Res.* 19, 275-285.
- Kretschmar, R. (1996): Kulturtechnisches Praktikum - Ausgewählte Labor- und Feldmethoden; Band 1: Physikalische Verfahren der Standortuntersuchung. Christian-Albrechts-Universität Kiel, 550 S.
- Reynolds, W.D., Elrick, D.E. (1990): Pondered infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 1233-1241.
- Schäfer, B., Bens, O., Fischer, H. and Hüttl, R. F. (2002): Einfluss des Baumartenwechsels auf die Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden Nordost-Brandenburgs. *Forst und Holz* 57(19), 571-575.
- Schmidt, W., Zimmerling, B., Nitzsche, O., Krück, S., Zimmermann, M., Richter, W. (2001): Conservation tillage - A new strategy in flood control. In: Marsalek, J., Watt, E., Zeman, E., Sieker, H. (Hrsg.) *Advances in urban stormwater and agricultural runoff source controls*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 287-293.
- Schmidt, W., Nitzsche, O. und Wilcke, D. (2002): Wasserspeicher Boden. Konservierende Bodenbearbeitung als Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz, *Neue Landwirtschaft* 10, 40pp.
- Schnug, E., Haneklaus S. (2002) Zusammenhang zwischen Überflutung und Landwirtschaft. 20. Osnabrücker Umweltgespräche, 24. & 25.10.2002, Tagungsband, 70-78.
- Seyfarth, W., Joschko, M., Augustin, J., Höhn, W., Schroetter, S. (1999): Bodenökologische und pflanzenbauliche Effekte konservierender Bodenbearbeitung auf sandigen Böden. *ZALF-Berichte Müncheberg*, 136 S.
- Sieker, F., van der Ploeg, R.R., Panebianco, S., Bandermann, S., Zimmerling, B. (2002): Innovativer Ansatz eines vorbeugenden Hochwasserschutzes durch dezentrale Maßnahmen im Bereich der Siedlungs-Wasserwirtschaft sowie der Landwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße - Endbericht -. DBU Projekt 15877, Hannover.
- van der Ploeg, R.R., Schweigert, P. (2001): Reduzierte Bodenbearbeitung im Ackerbau - eine Chance für Wasser-Wirtschaft, Umwelt und Landwirtschaft: *Wasserwirtschaft* 91, 2-7.
- Van't Woudt, B.D. (1959) Particle coatings affecting the wettability of soils. *J. Geophys. Res.* 64, 263-267.
- Wahl, N. A., Bens, O., Schäfer, B. and Hüttl, R. F. (2003): Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: Hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 1377-1387.
- Watson, C.L., Letey, J. (1970): Indices for characterising soil water repellency based upon contact angle-surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 841-844.
- Wooding, R.A. (1968): Steady infiltration from a circular pond. *Water Resources Res.* 4, 1259-1273.
- Wüstrich, D. (2000): Einfluss humoser Substrate auf sandige Kippenböden am Beispiel der Bergbaufolgelandschaft Reichwalde. *Cottbuser Schriften zu Bodenschutz und Rekultivierung*, Bd. 13, 138 S.

2.5 Satellitengestützte Verfahren zum Monitoring der Siedlungsentwicklung und zur Klassifizierung der Landnutzung

Marina Müller, Michael Winkler und Hermann Kaufmann

GeoForschungsZentrum Potsdam

Sektion 1.4 Fernerkundung

Email: charly@gfz-potsdam.de

TP C1: Charakterisierung und Inventarisierung von katastrophenrelevanten Elementen der natürlichen und anthropogenen Landschaftsausstattung

2.5.1 Zusammenfassung

Ziel des Teilprojekts war die Analyse, inwieweit fernerkundliche Daten und Methoden zur Unterstützung katastrophenrelevanter Fragestellungen beitragen können. Im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“ wurden zwei Schwerpunkte bearbeitet. Für den Projektausschuss Hochwasser der Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins wurde das Potenzial eines automatischen Verfahrens zur Häuserextraktion für ein kontinuierliches Siedlungsmonitoring in hochwassergefährdeten Gebieten untersucht. In Zusammenarbeit mit TP A4.1 wurden Verfahren zur Erstellung aktueller Landnutzungskarten entwickelt, die den Ansprüchen hydrologischer Modellierung genügen.

Abstract

Aim of this sub-project was to analyse in how far remote sensing data and methods contribute to solutions of problems in the context of natural hazards. Within the framework of the cluster “flood risk assessment”, two topics were studied. For the project committee “flood” of the German Commission for the Protection of the Rhine, the potential of an automatic house extraction algorithm for a continuous monitoring of urban development was analysed. Furthermore, in cooperation with sub-project A4.1, methods for the generation of up-to-date land cover maps for the special requirements of hydrological modelling were developed.

2.5.2 Veranlassung und Problem

Fernerkundliche Daten, speziell von satellitengestützten Systemen, erlauben die regelmäßige Erfassung großflächiger Gebiete auf der Erdoberfläche und damit ein langfristiges Monitoring von Veränderungen. Zur Abschätzung des Hochwasserrisikos ist man auf aktuelle Daten angewiesen. Beispielsweise interessiert sich der Projektausschuss Hochwasser der Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins (DKSR) für die Frage, inwie-

weit ein Monitoring der Siedlungsentwicklung in hochwassergefährdeten Gebieten mit weitestgehend automatischen Verfahren durchgeführt werden kann. Des Weiteren sind z.B. Landnutzungsinformationen ein wesentlicher Parameter zur Erstellung eines hydrologischen Modells. Die notwendigen Geodaten sind in Deutschland bei verschiedensten Ämtern oftmals vorhanden, aber nicht unbedingt in digitaler Form oder in der räumlichen und zeitlichen Auflösung für hochwasserrelevante An-

wendungen, wie es beispielsweise TP A4.1 für sein hydrologisches Modell benötigt.

2.5.3 Ziel

Generelles Ziel des TP C1 war die Analyse der Anwendbarkeit fernerkundlicher Systeme als Werkzeug zur Inventarisierung von natürlichen und anthropogenen Objekten vor bzw. nach einer Naturkatastrophe. Im Rahmen des Clusters „Risikoanalyse Hochwasser“ wurden dazu zwei Schwerpunkte bearbeitet. Für den Projektausschuss Hochwasser der Deutschen Kommission zur Reinhaltung des Rheins wurde eine Methode zur Häusererkennung, die im TP C1 im Cluster Risikoanalyse Erdbeben entwickelt wurde (siehe Kap. 4.9), auf ihre Anwendbarkeit auf multitemporale Schwarz-Weiss-Luftbilder analysiert. Im zweiten Schwerpunkt wurden Verfahren getestet und entwickelt, mit denen aktuelle Landnutzungskarten für hydrologische Anwendungen weitestgehend automatisch erstellt werden können, die dem TP A4.1 als zuverlässigere Datengrundlage dienen (siehe Kap. 2.3).

2.5.4 Monitoring der Siedlungsentwicklung

Methode

Die Technik, die auf die Anwendbarkeit für das Siedlungsmonitoring getestet werden sollte, wurde speziell zur Extraktion von Häusern in multispektralen Satellitendaten entwickelt. Multispektrale Bilddaten besitzen mehrere Kanäle, die jeweils in einem anderen Bereich des Lichtspektrums ihre Signale aufzeichnen, z.B. im blauen oder roten Wellenlängenbereich. Der entwickelte Algorithmus zur Detektion von Häusern ist unterteilt in zwei größere Teile. Im ersten Teil werden die spektralen Informationen genutzt, um mittels dieser Eigenschaften auf das Oberflächenmaterial und damit die Klassenzugehörigkeit jedes einzelnen Bildpunktes (Pixels) zu schließen. Spektral ähnliche Klassen, die

auf diese Weise nicht trennbar sind, z.B. bestimmte Hausdachmaterialien und Straßenbeläge (Bitumendächer, Asphaltstraßen), werden mit Hilfe von Kontext- und einfacher Forminformation (Schatten, Größe) weiter differenziert. Im zweiten Teil des Verfahrens wird der bei Satellitensensoren räumlich höher auflösende panchromatische Kanal, der über nahezu das gesamte visuelle Spektrum aufzeichnet, zur Verfeinerung des Klassifizierungsergebnisses aus dem ersten Teil genutzt. Dabei wird zunächst das panchromatische Bild in sehr kleine Segmente ähnlicher Grauwerte unterteilt. Danach werden mittels des vorherigen Klassifizierungsergebnisses die Haussegmente identifiziert, die mit hoher Wahrscheinlichkeit der Hausklasse angehören. Abschließend wird die Form der extrahierten Häuser mittels geometrischer Bedingungen optimiert. Eine detailliertere Beschreibung des Verfahrens ist in Müller und Segl (2001) zu finden.

Die Daten, die für die Untersuchung vom rheinland-pfälzischen Ministerium für Umwelt und Forsten zur Verfügung gestellt wurden, waren vier Schwarz-Weiß-Luftbilder des Koblenzer Hafengebiets. Die Bilder wurden in den Jahren 1964, 1974, 1984 und 1996 aufgenommen, jedoch zu unterschiedlichen Jahres- und Tageszeiten. Trotz der nicht zur Verfügung stehenden Höheninformation des Gebiets war zumindest in einem relativ ebenen Bildbereich eine gute geometrische Korrektur der gescannten Luftbilder aufeinander möglich.

Das vom Projektausschuss gewünschte Ziel – die Erkennung neuer Häuser – entspricht einer Änderungsdetektion. Da jedoch das zu testende Verfahren prinzipiell darauf ausgelegt ist, alle Häuser in einem Bild zu extrahieren, boten sich somit bei der Analyse zwei unterschiedliche Ansätze an, die eingehender untersucht wurden: (1) Erkennung aller Häuser in jedem einzelnen Luftbild und Berechnung der Gebäudedifferenzen zwischen den einzelnen Zeitpunkten, (2) Ermittlung der neuen Gebäude direkt aus dem Differenzbild der jeweiligen Bildpaare.

Ergebnisse und Diskussion

Im ersten Teil des Algorithmus wird multispektrale Information zur Differenzierung der Oberflächenmaterialien verlangt. Jedoch standen in dieser Untersuchung nur multitemporale Grauwertinformationen zur Verfügung. Abbildung 2.18 zeigt ein Beispiel für die Veränderungen, die allein zwischen den Luftbildern von 1984 und 1996 zu beobachten sind. Die Albedo-Information eines einzelnen Bilds, die im ersten Ansatz herangezogen wurde, ist unzureichend zur Unterscheidung unterschiedlicher Materialien, da sich die verschiedenen Klassen wie Häuser, Versiegelung, Vegetation, Fluss und Schatten meist stark in ihren Grauwerten überlappen. Nur Schatten ist als Klasse mit sehr dunklen Grauwerten recht gut erfasst, auch wenn es einige Mehrdeutigkeiten mit sehr dunklen Hausdächern gibt. Beim zweiten Ansatz geht man generell davon aus, dass sich neue Objekte, also auch neue Häuser, im Differenzbild durch deutliche Grauwertkontraste hervorheben. Abbildung 2.18c zeigt das Differenzbild der Ausschnitte 2.18a und 2.18b.

Tendenziell ist nun eine differenziertere Einteilung in unterschiedliche Klassen möglich, wobei die Klassen einen temporalen Charakter bekommen, wie z.B. Änderung zum Hellen oder starke Änderung zum Dunklen. Neue Häuser zeichnen sich dabei weitestgehend durch einen deutlichen Kontrast aus, allerdings treten auch bei alten Häusern stärkere Kontraste auf. Diese sind meist auf natürliche Veränderungen (Verschmutzung, Vegetationsbewuchs, anderer Sonnenstand) zurückzuführen. Andererseits werden Dächer innerhalb einer Dekade auch z.T. komplett mit neuen Materialien gedeckt, die eine extrem abweichende Albedo zum vorherigen Material aufweisen (Abbildung 2.19a und 2.19b). Somit werden auf diese Weise nicht nur die neuen Häuser erfasst. Wird die Suche aber erweitert auf alle Häuser, gibt es auch Gebäude, die – wie zu erwarten war – keinen Grauwertkontrast aufweisen (Abbildung 2.19c). Da Gebäude im Differenzbild sowohl mit nahezu keinem Kontrast

bis sehr starken Kontrast auftreten, ist somit auch die temporale Information nicht aussagekräftig genug für die eindeutige Zuordnung zur Hausklasse.

Im Gegensatz dazu sind die Schwarz-Weiss-Luftbilder und deren Differenzbilder ideale Ausgangsdaten für den zweiten Teil des Algorithmus (Abbildung 2.20a und 2.20b). Jedoch ist die panchromatische bzw. multitemporale Information nicht ausreichend, um eine Zuordnung der ermittelten Regionen zu Häusern zu erlauben. Schatteninformation kann relativ zuverlässig gewonnen werden (Abb. 2.20c), bietet aber auch nur einen Hinweis, wo hohe Objekte im Bild vorhanden sein müssten. Um die kompletten Dachregionen zu ermitteln, sind Verfahren notwendig, die komplexere geometrische Überlegungen (Position der Kanten zueinander, Hypothesen über eine mögliche Hausform) anstellen oder z.B. aus Stereodaten Höheninformationen gewinnen (McKeown, 1991, Baltsavias et al., 2001).

Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die Analyse der Anwendbarkeit des multispektralen Verfahrens zur Hauserkennung zeigt, dass bei einem automatischen Ansatz multitemporale Informationen keinen Ersatz für multispektrale Daten darstellen. Zumindest ist diese Aussage gültig, wenn die zeitliche Differenz zwischen den Aufnahmen so groß wie in dem Beispiel ist.

Auch wenn das Verfahren bei der gegebenen Datenlage eine automatische Hauserkennung nicht ermöglichte, stehen zukünftig immer mehr Fernerkundungsdaten mit höherer zeitlicher und spektraler Auflösung zur Verfügung und unterstützen damit erheblich das Monitoring von weiteren Siedlungsentwicklungen (siehe auch Kap. 4.9).



Abbildung 2.18: Ausschnitt aus den Luftbildern von (a) 1984 und (b) 1996, (c) Differenzbild, wobei sehr negative Differenzwerte sehr dunklen Grauwerten entsprechen, sehr positive Differenzwerte entsprechend durch sehr helle Grauwerte dargestellt werden.

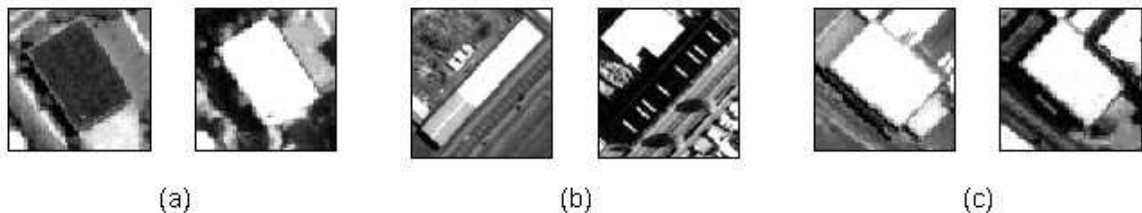


Abbildung 2.19: Änderungen in der Albedo von Dächern: (a) Änderung von dunkel nach hell, (b) Änderung von hell nach dunkel, (c) gleichbleibende Albedo.



Abbildung 2.20: Mögliche Prozessierungsschritte im zweiten Teil des Ansatzes: (a) Extraktion gerader Kanten, (b) Segmentierung des Bildes in homogene Regionen, (c) Extraktion von Schatteninformation.

2.5.5 Landnutzungsklassifikation

Lösungsweg und Lösungsmethoden

Zunächst wurde in Absprache mit unseren Projektpartnern (TP A4.1, siehe Kap. 2.3) festgelegt, welche räumliche Auflösung der Landnutzungskarten erforderlich ist und welche

Landnutzungsklassen im Rahmen einer hydrologischen Modellierung sinnvoll sind. Eine Rasterauflösung von 30 m, wie sie die Bilddaten des Landsat 7 ETM+ Sensor aufweisen, war ausreichend im Vergleich zu den anderen vorhandenen Geodaten (z.B. Höhenmodelle). Bei der Definition der Landnutzungsklassen ist gerade für Untersuchungen des Abflussver-

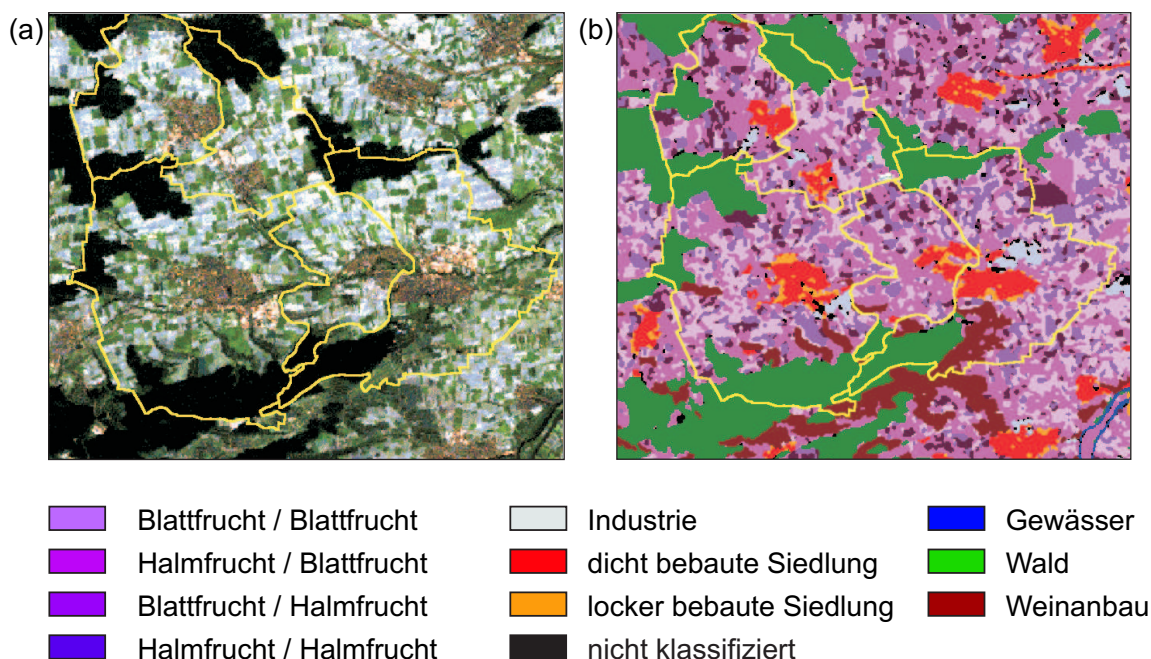


Abbildung 2.21: Ergebnis der Landnutzungsklassifizierung im Leintestgebiet: (a) Landsat-Szene (Echtfarbendarstellung) vom 11.9.1999 mit Überlagerung der Gemarkungsgrenzen, (b) Ergebnis der Klassifikation unter Einbeziehung zusätzlicher Geofaktoren.

haltens die Erfassung multitemporaler Klassen von Interesse, d.h. von Klassen, die z.B. den Fruchtwechsel auf landwirtschaftlichen Flächen wiedergeben. Der Landsat-Sensor mit seinen drei Kanälen im visuellen Spektrum (blau, grün, rot) und den zusätzlichen Kanälen im nahen Infrarot-, mittleren Infrarot- und thermalen Bereich ermöglicht eine differenzierte Analyse der Materialien auf der Erdoberfläche anhand der spektralen Eigenschaften. Trotzdem ist allein anhand einer einzelnen Satellitenszene nicht unbedingt die Trennung aller gewünschten Klassen mittels der spektralen Merkmale gegeben. Ackerbaulich genutzte Gebiete zeichnen sich z.B. durch ein Mischsignal des Bodens mit dem der Vegetation und deren Schatten aus. Dieses spektrale Mischungsverhältnis ändert sich im Laufe des Jahres in Abhängigkeit von der Fruchtart. Für ein hydrologisches Modell ist eine detaillierte Aufschlüsselung einzelner Feldfrüchte nicht

unbedingt erforderlich. Trotz einer allgemeineren Einteilung in übergeordnete Klassen mit ähnlichem Einfluss auf das Abflussverhalten (Beispiel: Blattfrüchte und Halmfrüchte) sind neben den multitemporalen Daten aus mehreren Jahren für die Erfassung der Fruchtwechsel auch Aufnahmen von mehreren Zeitpunkten eines Jahres notwendig, um anhand der phänologischen Eigenschaften und den sich daraus ergebenden spektralen Merkmalen auf die jeweilige Klasse schließen zu können. Grundsätzlich lassen sich für die vorliegende Analyse somit drei Klassentypen unterscheiden:

- statische Klassen: Landnutzungsklassen, die sich sowohl inhaltlich als auch spektral im Laufe von einem oder mehreren Jahren nicht verändern, wie z.B. Wasser- oder Industrieflächen.
- intra-annual dynamische Klassen: Klassen, die sich inhaltlich nicht verändern,

aber durch jahreszeitliche Variationen ihr Spektralverhalten ändern, z.B. Wälder, aber auch Siedlungsbereiche aufgrund ihres Vegetationsanteils.

- inter-annual dynamische Klassen: Klassen, die inhaltlich von Jahr zu Jahr variieren und damit auch ihr spektrales Verhalten ändern, z.B. landwirtschaftliche Flächen mit ihren unterschiedlichen Fruchtfolgen.

Durch die Einbeziehung von Zusatzinformationen, beispielsweise in Form von Boden- und Niederschlagsdaten, kann die Klassifizierungsgenauigkeit gesteigert werden. Deshalb ist die Verwendung von zusätzlichem Wissen auch in einer multitemporalen Landnutzungs-klassifikation zu empfehlen.

Um nun eine weitestgehend automatische Landnutzungs-klassifikation zu ermöglichen, die den Ansprüchen für hydrologische Modellierungen genügt, wurde ein dreigeteiltes Verfahren entwickelt (Müller et al., 2001, Winkler et al., 2001, Winkler, 2002):

- Vorklassifizierung und Maskierung statischer und intra-annual dynamischer Klassen mittels einer hierarchischen Klassifikation. Der verwendete Entscheidungsbaum ist ein hybrider Ansatz, bei dem verschiedene grundlegende Bildverarbeitungsoperationen zur Separierung der einzelnen Klassen eingesetzt werden.
- Maximum-Likelihood Klassifikation mit zusätzlicher Bayes-Entscheidungsregel der inter-annual dynamischen Klassen. Die Verwendung des Bayes-Ansatzes ermöglicht die Berücksichtigung multitemporaler Information als a priori Wissen.
- Optimierung des Maximum-Likelihood-Ergebnisses durch Einbeziehung einer Fuzzy-Wissensbasis mit zusätzlichen Geofaktoren wie Bodenkarten und

Höheninformation. Durch Einbindung weiterer Information in diesem Post-Klassifizierungsschritt wird die Zuverlässigkeit des Ergebnisses bei gleichzeitiger Erhaltung der Transparenz der Entscheidungsfindung erhöht.

Ergebnisse und Diskussion

In Absprache mit TP A4.1 wurden Landnutzungskarten für die großräumigen Rheineinzugsgebiete Worms und Lauffen erstellt und die entwickelte Methode an dem Einzugsgebiet der Lein, die bei Heilbronn in den Neckar mündet, analysiert. Es standen 5 Landsat 7 ETM+ Szenen im Zeitraum September 1999 bis Mai 2001 zur Verfügung. Des Weiteren lagen für das Leineinzugsgebiet als zusätzliche Geoinformationen ein digitales Geländemodell mit einer Gitterweite von 50 m, Niederschlagsmessungen von 16 Messstationen sowie eine Bodenkarte 1:25.000 vor. Die Validierung der Ergebnisse wurde mittels eines Vergleichs zu bestehenden Landnutzungs-klassifikationen von CORINE, anhand von Daten des statistischen Landesamtes und des Landwirtschaftsamtes Heilbronn sowie anhand von Kontrollgebieten durchgeführt.

Generell ist eine gute Übereinstimmung von CORINE und den neuerstellten Landnutzungskarten festzustellen. Abweichungen sind auf die zeitliche Differenz zu den Aufnahmezeitpunkten der CORINE-Daten (1989-1992) und die geringere räumliche Auflösung der CORINE-Daten (100 m gegenüber 30 m) zurückzuführen. Tabellen 2.8 und 2.9 zeigen außerdem eine gute Übereinstimmung mit der Flächenstatistik (siehe auch Abbildung 2.21) bis hin zur detaillierten Aufschlüsselung der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Die größten Abweichungen sind bei der Beurteilung von Laub- und Mischwald zu beobachten. Die Ursache dafür liegt in der Definition der Klassen und der Rastergröße der Bilder: während das Statistische Landesamt Laubwälder nur in wirklich reinem Zustand als solche in die Statistik aufnimmt, werden bei der Klassifikation

Gemarkung	Anteil in % von der Gesamtfläche															
	Obst		Grünland		Industrie		Laubwald		Mischwald		Wein		Siedlung		Wasser	
	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA
Grossgartach	11,9	18,0	3,2	1,3	6,3	7,6	33,9	0,4	7,6	43,3	19,8	12,7	17,3	15,9	0,0	0,8
Massenbach	12,6	10,5	2,4	1,2	3,5	3,6	38,2	4,0	25,1	63,6	0,0	0,0	17,1	15,8	0,0	1,2
Massenbach- hausen	24,0	12,1	1,2	1,3	3,5	5,4	39,7	0,0	10,5	54,7	2,6	4,0	18,5	21,8	0,0	0,7
Schluchtern	29,8	28,6	4,4	3,3	0,0	2,2	19,8	0,0	0,0	18,1	6,7	13,7	39,4	33,0	0,0	1,1
Schwaigern	16,5	14,0	1,3	1,4	2,4	3,7	42,4	0,9	11,8	58,5	10,6	9,4	14,8	11,0	0,0	1,0
Mittelwert	18,8	16,6	2,5	1,7	3,1	4,5	34,8	1,1	11,0	45,6	11,9	8,0	20,6	19,5	0,0	1,0

Tabelle 2.8: Vergleich der prozentualen Flächenanteile der Klassifikation (KLA) mit der Gemarkungsstatistik des statistischen Landesamtes (STA).

Gemarkung	Anteil in % an der landwirtschaftlichen Nutzfläche							
	Wintergetreide		Spätblühende Blattfrucht		Sommergetreide		Frühblühende Blattfrucht	
	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA	KLA	STA
Grossgartach	36,8	36,7	35,7	37,9	25,5	23,5	2,0	2,0
Massenbach	36,7	25,4	45,6	49,1	13,5	21,3	4,2	4,2
Massenbach- hausen	34,5	38,8	46,3	36,9	15,0	15,4	4,2	8,9
Schluchtern	31,4	33,1	40,2	36,7	26,8	24,4	1,6	5,8
Schwaigern	34,4	34,5	43,7	43,9	18,4	17,8	3,5	3,8
Mittelwert	34,8	33,7	42,3	40,9	19,8	20,5	3,1	4,9

Tabelle 2.9: Vergleich der Ergebnisse der Klassifikation von interannual dynamischen Klassen (KLA) mit der Flächenstatistik des Landwirtschaftsamts Heilbronn für das Jahr 2000 (STA).

mit Satellitendaten kleinere Mischbestandteile von Nadelwäldern vernachlässigt. Für diese Vermutung spricht auch die gute Übereinstimmung der Werte der Klassifikation mit denen von CORINE für die Waldklasse, die ebenfalls auf den 30 m Daten des Landsat-Sensors beruhen. Zu beachten ist allerdings, dass die differenzierte Unterteilung der landwirtschaftlichen Nutzfläche nur mit einer so hohen Zuverlässigkeit möglich wird, wenn Aufnahmen von mehreren Zeitpunkten eines Jahres, idealerweise vom Frühjahr und Spätsommer, vorliegen und somit wichtige phänologische Stadien des Pflanzenwachstums erfasst werden können. Generell zeigte die Untersuchung, dass bei Einbeziehung der zusätzlichen Geofaktoren die Zuverlässigkeit der Ergebnisse verbessert werden konnte. Eine detaillierte Diskussion der Ergebnisse ist in Winkler (2002) zu finden.

Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die Methode zur Landnutzungsklassifikation wurde speziell hinsichtlich der Anforderungen hydrologischer Modelle entwickelt, bei der die multitemporalen Klassen mit der erforderlichen räumlichen Auflösung und Zuverlässigkeit ermittelt werden. Das Verfahren wurde bereits innerhalb des Projekts auf die großräumigeren Einzugsgebiete Worms und Lauffen angewendet. Eine Übertragbarkeit des Verfahrens ist sehr gut gegeben, da alle Entscheidungen des Prozesses transparent sind und viele der Regeln Allgemeingültigkeit besitzen bzw. leicht an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden können. Einzig die Fuzzy-Zusatzinformationen konnten für die großräumigen Gebiete nicht einbezogen werden, da die Daten entweder nur analog zur Verfügung standen bzw. für solche großräumigen Gebiete zu teuer in der Beschaffung gewesen wä-

ren. Bei fortschreitender Verfügbarkeit digitaler Daten sollte damit die Optimierung der Ergebnisse durch Zusatzwissen auch auf großräumigen Flächen gegeben sein.

2.5.6 Literatur

Baltsavias, E.P., Gruen, A. und Van Gool, L. Eds. (2001): Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Ashgate Pub Co.

McKeown, D.M. Jr. (1991). Information fusion in cartographic feature extraction from aerial imagery. In Ebner et al. Eds., Digital Photogrammetric Systems, Wichmann, Karlsruhe, pp. 103-110.

Müller, M. und Segl, K. (2001). House detection in IKONOS data using region and edge based segmentation. In Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Science and Technology – Application of Digital Image Processing XXIV, volume 4472, pp. 500-507.

Müller, M., Winkler, M. und Segl, K. (2001). Bayes Ansatz zur Fusion multitemporaler Landsat 7 Daten innerhalb einer Landnutzungsklassifizierung. In Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Vol. 10, pp. 433-440.

Winkler, M. (2002). Die Verwendung des Bayes Ansatzes und der Fuzzy Logic Theorie zur wissensbasierten Landnutzungsklassifikation. Diplomarbeit, Universität Potsdam.

Winkler, M., Müller, M. und Segl, K. (2001). Ein semi-automatischer Ansatz zur satellitengestützten Landnutzungsklassifikation als aktuelle Basisinformation für hydrologische Modelle. Forum der Geoökologie, 12(3): 44.

2.6 Quantifizierung der Hochwassergefährdung für die Rheinanlieger unter Berücksichtigung von Deichversagen

TP A5.1, Teil 1: Ermittlung der Wellenverformung infolge von Deichbruchszenarien mit Hilfe eines gekoppelten Modellsystems für das Rheingebiet

Markus Disse¹ und Matthias Hammer²

¹Universität der Bundeswehr, München

Institut für Wasserwesen

E-Mail: markus.disse@unibw-muenchen.de

²Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz

2.6.1 Zusammenfassung

Im Teilprojekt A5.1 (Teil 1) wurden Deichbruchszenarien mit dem Ziel erstellt, die raumzeitliche Ausbreitung des Breschendurchflusses und den durch Deichversagen veränderten Wellenablauf zu simulieren. Für beide Zielrichtungen ist ein Wellenablaufmodell mit integriertem Deichbruchmodul und nachgeschaltetem Überschwemmungsmodell implementiert worden. Durch die Verwendung einer einfachen Berechnungsformel („Transferfunktion“) für den Breschendurchfluss, die aus zahlreichen zweidimensionalen Simulationen abgeleitet wurde, ist eine schnelle Berechnung der Wellenverformung sowie der Überflutungsflächen und –tiefen des überströmten Hinterlandes möglich. Der gekoppelte Ansatz von hydrodynamischem Wellenablauf- und Überflutungsmodell ermöglicht die näherungsweise Bestimmung der Überschwemmungsflächen für das aktuelle Hochwasser- und Deichbruchereignis. Bislang ist allerdings nur eine externe Kopplung der Modelle möglich. Damit die Auswirkungen von Rückstauwirkungen unmittelbar von der Transferfunktion berücksichtigt werden können, müsste zukünftig eine effiziente programmtechnische Verknüpfung mit der ArcView-Erweiterung *Floodarea* (Überflutungsmodell) realisiert werden.

Abstract

Project TP A5.1 (part 1) developed river levee breach scenarios in order to simulate both the outflow through levee breaches and the changes in the flood hydrograph caused by the breaches. For both aims a flood routing model with an integrated levee breach module coupled with an inundation model (ArcView-Tool *Floodarea*) was implemented. The levee breach module is based on a simple formula (“transfer function”) for the calculation of the outflow through the levee breach. The transfer function was derived from numerous two-dimensional hydraulic simulations of the levee outflow calibrated for reaches of the lower Rhine and enables fast calculations of the changes of the flood hydrograph as well as the inundation areas and depths in the hinterland of the levee. The coupled approach of hydrodynamic flood routing and inundation model facilitates a fast approximation of the actual inundation areas for the given flood and levee breach event. Hitherto, only an external coupling of the models is realized. Future implementation should therefore aim at internal coupling of the flood routing and the inundation model in order to consider backwater effects caused by the inundation area on the outflow through the levee breach.

2.6.2 Veranlassung und Problem

Die Hochwasserereignisse am Rhein in den 90er Jahren des 20. Jahrhunderts sowie an der Elbe während des Augusthochwassers 2002 haben deutlich gemacht, dass es einen absoluten technischen Hochwasserschutz nicht gibt. Bei Hochwassern an größeren Fließgewässern besteht die besondere Gefährdung darin, dass Deiche überströmt werden oder brechen können. In diesem Fall sollten Evakuierungspläne für das Überflutungsgebiet schnell verfügbar sein. Zudem ist es für die Vorhersage des Wellenablaufes unterstrom der Deichbresche entscheidend, inwieweit der Breschendurchfluss die ablaufende Hochwasserwelle beeinflusst. Für beide Zielrichtungen ist ein Wellenablaufmodell mit integriertem Deichbruchmodul und nachgeschaltetem Überschwemmungsmodell erarbeitet worden.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen der Hochwassergefährdung infolge von Deichbrüchen wurden Rheinabschnitte in Nordrhein-Westfalen betrachtet. Hierbei wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass die entwickelten Methoden und Modelle auch auf andere Flusseinzugsgebiete übertragbar und erweiterbar sind.

2.6.3 Ziel

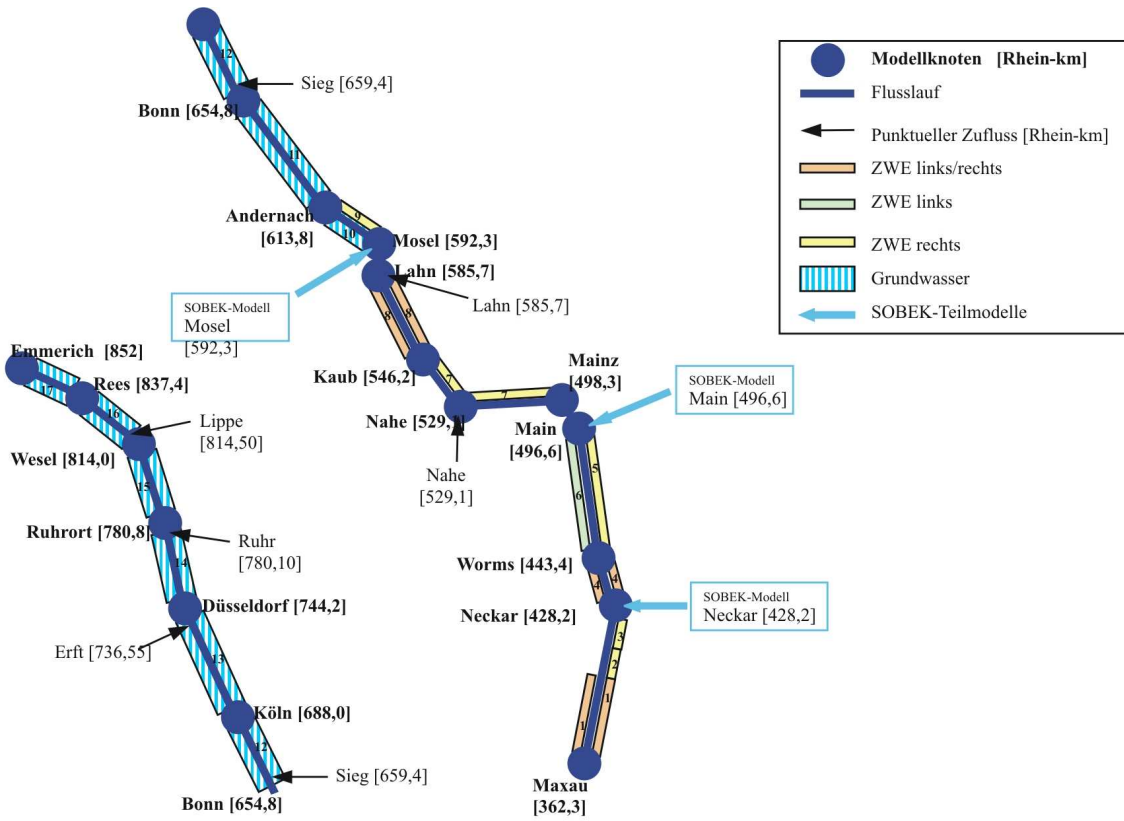
Das Ziel des Teilprojektes A5.1 (Teil 1) war es, die hydraulischen Auswirkungen bei Versagen von Hochwasserschutzdeichen zu quantifizieren. Mit Hilfe eines Wellenablaufmodells, einer Funktion zur Beschreibung des Deichbreschendurchflusses und eines einfachen Überflutungsmodells wurden schnelle und robuste Werkzeuge zur Verfügung gestellt, die dem Anwender erlauben, für den Schadensfall rechtzeitige Evakuierungsmaßnahmen abzuleiten und die Veränderung der Hochwasserwelle für die Unterlieger zu ermitteln.

2.6.4 Methode

Im Teilprojekt A5.1 (Teil 1) wurden die Ergebnisse der Niederschlag-Abfluss-Modellierung (TP A4.1) als Eingangsgrößen für das hydrodynamische 1-D-Wellenablaufmodell SOBEK (WL|delft hydraulics) verwendet. Dazu wurden insgesamt 19 Teileinzugs- und 4 Zwischeneinzugsgebiete von TP A4.1 modelliert. Die berechneten Ganglinien (Tagesmittelwerte) wurden entweder direkt in die Zuflussknoten von SOBEK eingespeist oder mussten zu den Eingangspegeln Rockenau (Neckar), Würzburg (Main) und Cochem (Mosel) mit Hilfe eines einfachen hydrologischen Verfahrens (Muskingum) geroutet werden. Bei direkter Eingabe der Zuflüsse war es erforderlich, die berechneten Ganglinien etwas zu vergrößern und sie mit einer zeitlichen Verzögerung dem SOBEK-Modell zuzuführen, falls die Kontrollpegel der Niederschlag-Abfluss-Modellierung nicht direkt an der Mündung lagen. Die Vergrößerung des Abflusses wurde hierbei proportional des Einzugsgebietszuwachses angenommen und die zeitliche Verzögerung unter der Annahme einer Fließgeschwindigkeit von 1.5 m/s berechnet.

Der Wellenablauf wurde von Maxau (Rhein-km 362.3) bis Emmerich (Rhein-km 852.0, dt.-nl. Grenze) zuzüglich der Teilstrecken wichtiger Nebenflüsse (60.7 km Neckar, 251 km Main, 52 km Mosel) simuliert¹. Das Modell berechnete somit den Wellenablauf über eine Gesamtstrecke von 853.4 km und berücksichtigte ca. 650 km Deichstrecke auf beiden Seiten des Rheins. Sowohl für die notwendige zeitliche Auflösung der resultierenden Abflüsse bei den Deichbruchszenarien als auch für die Anpassung der Schnittstelle zu Teilprojekt A5.2 wurden die Eingangsdaten des Teilprojektes A4.1 (Tagesmittelwerte) zu Stundenwerten disaggregiert. Dadurch war es möglich, die Ganglinien des Abflusses bzw. Was-

¹Im Gegensatz zu den Pegeln Rockenau, Würzburg und Cochem wurden am Pegel Maxau gemessene oder statistisch generierte Ganglinien eingegeben; die N-A-Modellierung beginnt somit erst ab dem Pegel Maxau (nördlicher Oberrhein).



Einzugsgebiete mit Simulationsstrecken und verwendeten Pegeln

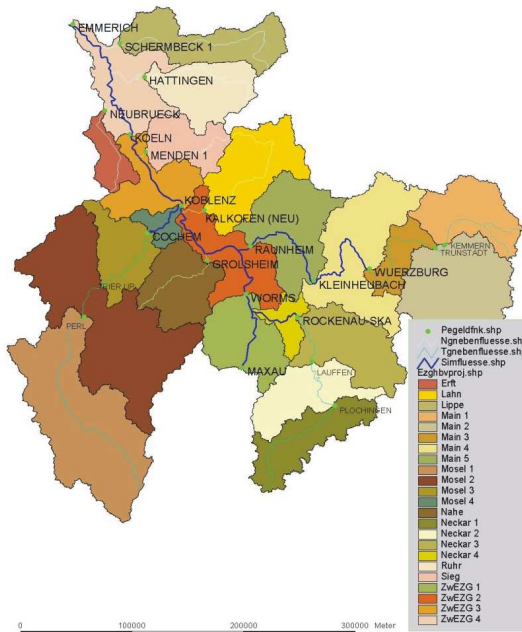


Abbildung 2.22: Mit SOBEK modellierte Flussstrecken (oben) und Teileinzugsgebiete der Niederschlags-Abfluss-Modellierung (unten)

serstandes an den Pegeln Ruhrort und Wesel in der gewünschten zeitlichen Auflösung an TP A5.2 zu übergeben, wodurch die Randbedingungen für dieses Teilprojekt ausreichend definiert waren. Das SOBEK-Modell musste schließlich bei Verwendung von Deichbruchszenarien um ein Deichbruchmodul erweitert werden (so genannte Transferfunktion, s. folgenden Abschnitt).

Die zeitliche und räumliche Ausbreitung des in das Hinterland einströmenden Wassers wurde anschließend mit einem einfachen Ansatz simuliert. Dazu dient das GIS-Werkzeug *Floodarea*, welches auf Grundlage der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung unter Berücksichtigung der Volumentreue den Abfluss auf Rasterflächenbasis berechnet (*Floodarea*, www.geomer.de).

Abbildung 2.22 zeigt die Teileinzugsgebiete, die simulierten Flussstrecken, die verwendeten Pegel sowie die modellierten Rheinzuflüsse.

2.6.5 Entwicklung einer Transferfunktion für den Breschendurchfluss

Die Strömungsverhältnisse durch eine Bresche im Falle eines Deichbruchs können mit einem eindimensionalen Modell nicht realistisch abgebildet werden. Daher wurden am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen (RWTH) zahlreiche zweidimensionale hydrodynamisch-numerische (2D HN-) Berechnungen im Nahfeld einer Bresche infolge synthetischer Deichbruchszenarien durchgeführt. Aus den Simulationsläufen ließ sich eine Transferfunktion ableiten, die den Breschendurchfluss in Abhängigkeit von geometrischen und hydraulischen Parametern analytisch berechnet (Disse et al., 2003).

Mittels Hypothesentests konnte statistisch abgesichert ausgeschlossen werden, dass die ermittelten Korrelationen zufällig sein könnten und bewiesen, dass die Anzahl von 30 verschiedenen numerischen Simulationen ausrei-

chend für die Erstellung eines empirischen Modells ist (vgl. Abbildung 2.23 links).

Die notwendige Validierung der erstellten Deichbruchformel erfolgte mittels ausgewählter Deichbruchszenarien am Niederrhein. Dazu wurde ein Vergleich der berechneten Ausflussganglinien des zweidimensionalen Modells aus dem Teilprojekt A5.2 der BTU Cottbus und der eindimensionalen Berechnung mittels SOBEK bei gleichen Randbedingungen (Zuflüsse, Wasserstände, Breschenbreite, Breschenentwicklung) durchgeführt. Die Berücksichtigung der Transferfunktion im eindimensionalen Modell ergab eine realistische Simulation des Breschendurchflusses. Abbildung 2.23 (rechts) zeigt die Breschendurchflussganglinien der 2-D-Simulation und der Transferfunktion anhand des Hochwasserereignisses von 1993 im Polder Mehrum. Der vollständige Algorithmus zur Berechnung des Breschenausflusses mittels der Transferfunktion mit allen Abminderungs- und Einflussfaktoren wird von Abbildung 2.24 zusammengefasst.

Um die Funktionsfähigkeit des Systems Wellenablaufmodell-Überflutungsmodell beispielhaft zu demonstrieren, wurde die Auswirkung von Deichbrüchen auf das Überflutungsgebiet an folgenden zwei Stellen des Niederrheins untersucht: (1) Krefeld (Rhein km 768.5 zwischen Düsseldorf und Ruhrort) und (2) Mehrum (Rhein km 802.0 zwischen Ruhrort und Wesel).

Die Bruchstellen unterscheiden sich wesentlich aufgrund der Topographie des Hinterlandes. Das Überschwemmungsgebiet der Bruchstelle Krefeld ist so ausgedehnt, dass für die meisten Hochwasserfälle nicht mit Rückstauinflüssen zu rechnen ist. Der Polder Mehrum dagegen stellt nur ein begrenztes Retentionsvolumen von maximal 65.9 Mio m³ bei einer Überschwemmungsfläche von 14.4 km² zur Verfügung, wodurch im Gegensatz zur Bruchstelle Krefeld Rückstaueffekte erwartet werden können (s. Abb. 2.25). Die Simulationen für Krefeld und Mehrum wurden anhand zwei-

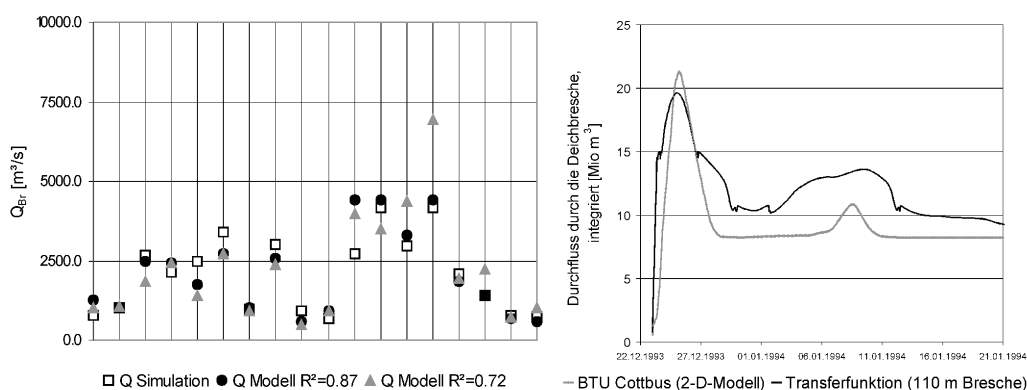


Abbildung 2.23: Anpassung von 2D-Simulation und Transferfunktion (links) und Vergleich der berechneten Abflussganglinien für den Polder Mehrum (rechts)

er historisch abgelaufener Hochwasserereignisse (Hochwasser 1993 und 1995) sowie eines künstlich generierten Hochwassers 1995+ durchgeführt. Dabei entspricht die Ganglinie des HW1995+ den um 50% erhöhten Wasserständen des Hochwassers 1995.

Für den Polder Mehrum wurden anhand dieser Hochwasserereignisse die Überflutungsflächen und -tiefen für eine angenommene Breschenbreite von 110 m in stündlichen Intervallen berechnet (s. Abb. 2.26). Hierbei wurde angenommen, dass der Bruchvorgang infolge Suffosion, Erosionsgrundbruch oder hydraulischem Grundbruch innerhalb von 30 Minuten bis zum Deichfuß erfolgt. Der Bruchzeitpunkt wurde bei 80% des Wasserstandes zwischen Wellenscheitel und Mittelwasserstand bei steigendem Wasserspiegel definiert. Die räumliche und zeitliche Ausbreitung der Überflutungsflächen wurde ebenfalls mit den Ergebnissen des TP A5.2 unter Verwendung der selben Rand- und Anfangsbedingungen verglichen und eine befriedigende Übereinstimmung festgestellt (Disse & Assmann, 2003).

Zusätzliche systematische Untersuchungen für die Bruchstelle Krefeld hatten zum Ziel, allgemeine Aussagen über die Wellenverformung im Hauptgerinne zu erhalten. Hierbei wurden die o.a. Hochwasserereignisse verwendet und mit jeweils fünf unterschiedlichen Bruchbrei-

ten (50 m, 75 m, 100 m, 125 m, 150 m) und Bruchzeitpunkten (jeweils zwei vor und nach Erreichen des Wellenscheitels sowie zum Zeitpunkt des Scheitels) variiert. Die zeitliche Breschenentwicklung lag ebenfalls bei 30 Minuten.

Neben der Breschenbreite definiert der Bruchzeitpunkt bei vorgegebener Hochwasserganglinie, wie viel Wasser in das Hinterland strömt und wie groß die dementsprechende Wasserspiegelreduzierung im Hauptgerinne wird. Abbildung 2.27 illustriert diesen Effekt für die Hochwasserwelle im Rhein anhand der genannten fünf unterschiedlichen Bruchzeitpunkte.

Die Abbildung 2.28 schließlich zeigt Wasserstandsabminderungen oberhalb und unterhalb der Bruchstelle. Man erkennt, dass die Welle auch noch 100 km stromab des Deichbruches deutlich abgeflacht wird. Bei den angenommenen Breschenparametern erreicht die Abminderung für diesen Fall ca. 50 % des Wertes an der Bruchstelle.

2.6.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die im TP A5.1 erarbeiteten Methoden und Instrumentarien sind auf andere Flussgebiete übertragbar. Im Rahmen der Zusammenar-

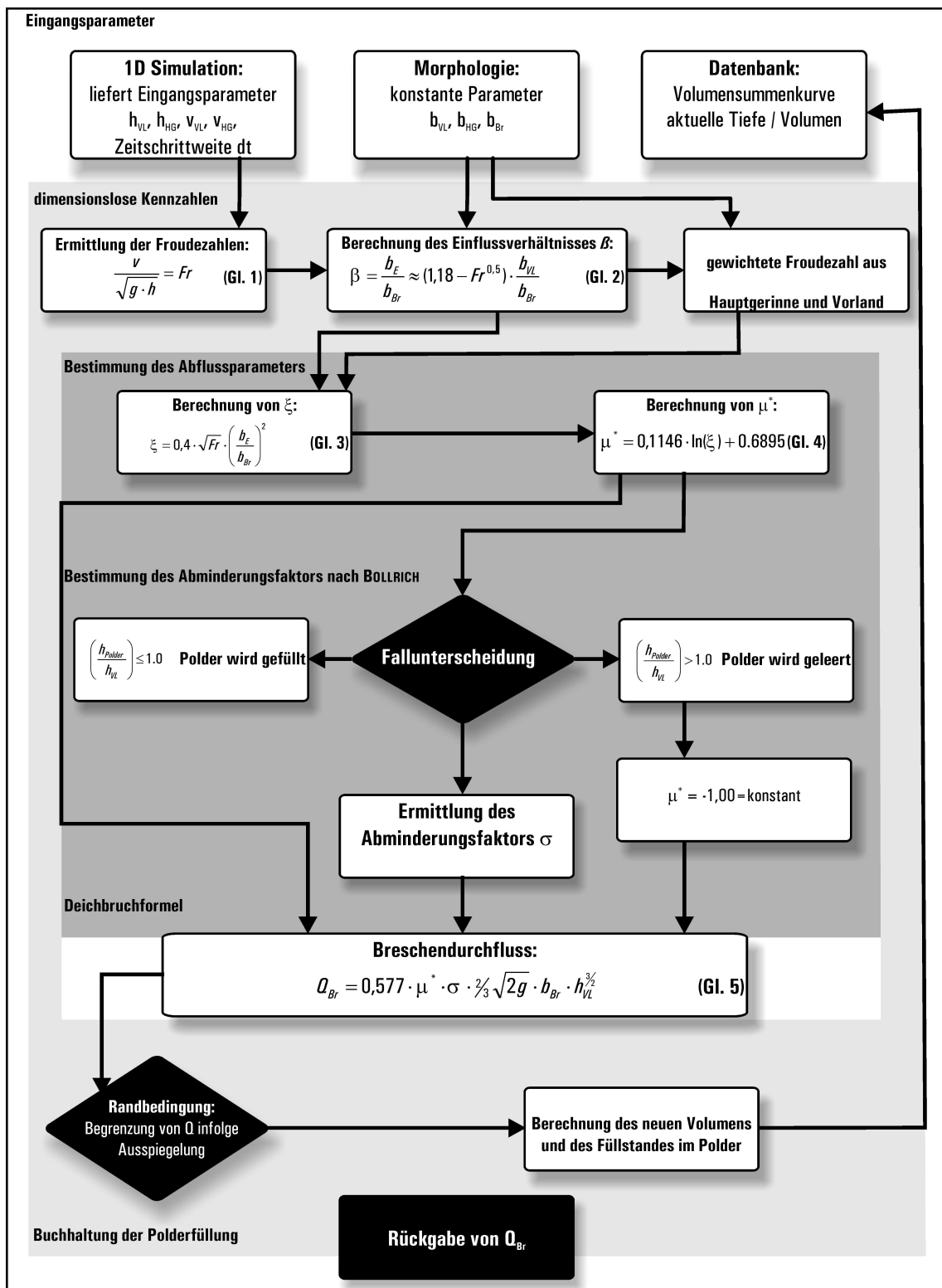


Abbildung 2.24: Vollständiger Algorithmus zur analytischen Berechnung des Abflusses durch eine Bruchstelle

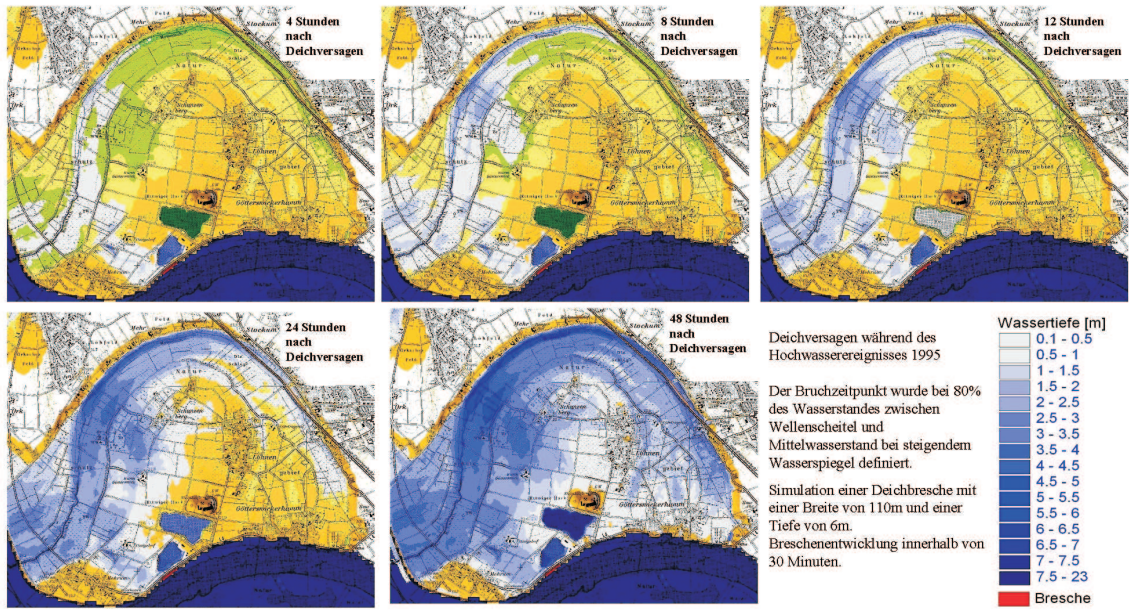


Abbildung 2.26: Berechnete Überflutungsflächen und -tiefen im Polder Mehrum der Hochwasserereignisse 1993, 1995 und 1995+.

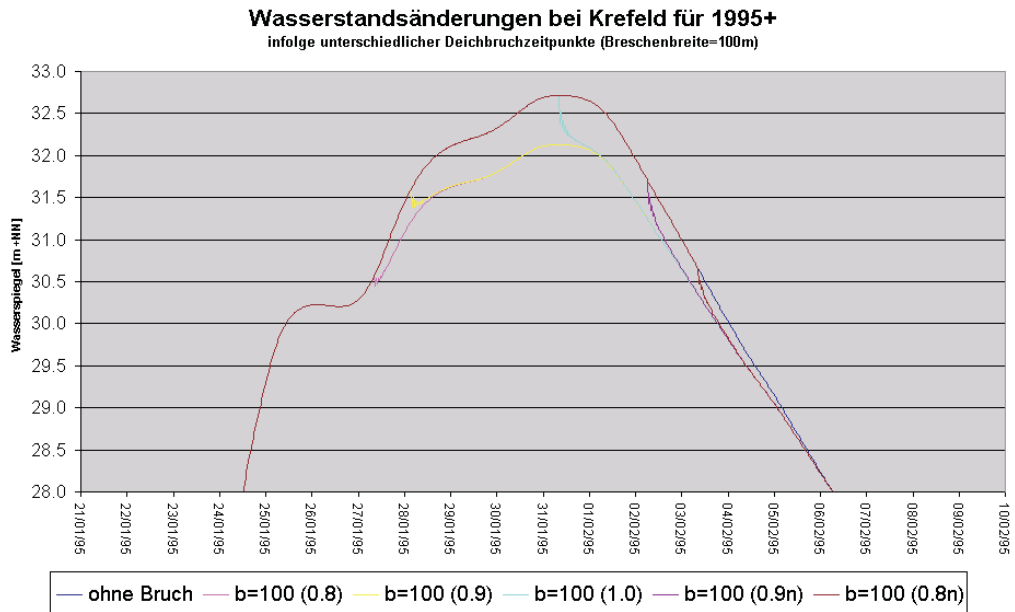


Abbildung 2.27: Wasserstandsänderungen bei variierenden Bruchzeitpunkten am Polder Krefeld beim Hochwasser 1995+

on vorausgesetzt, könnte mit Hilfe dieses Instrumentariums die Bevölkerung im Ereignisfall effektiv über die akute Hochwassergefahr gewarnt werden.

Auch für die Berechnung von Überflutungsflächen stellt diese mögliche Kombination von Modellen eine erhebliche Erweiterung im Vergleich zu Schnatz et al. (2001) dar, der als

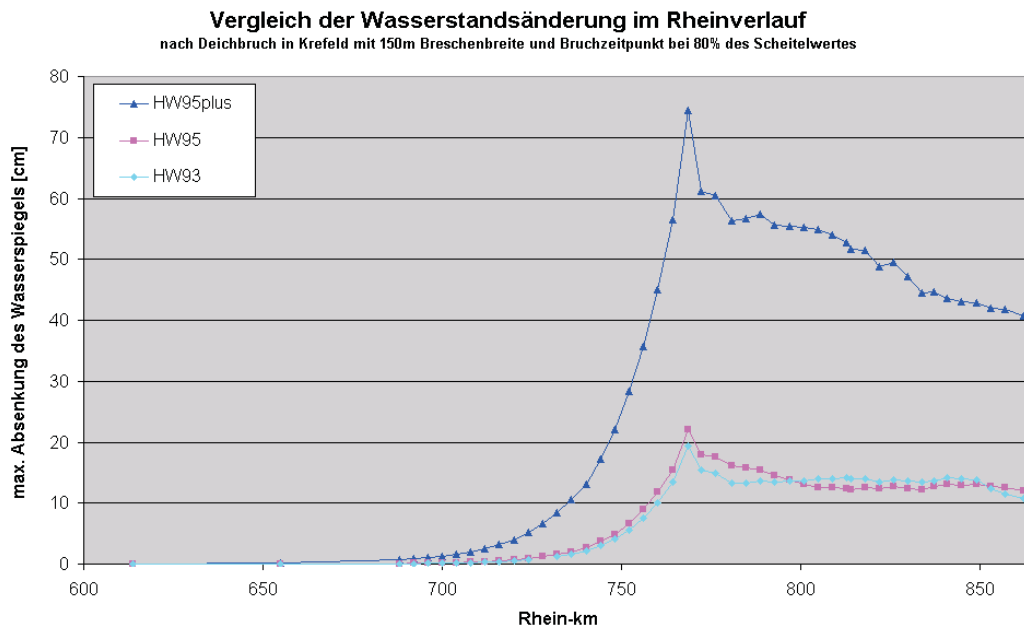


Abbildung 2.28: Maximal mögliche Wellenscheitelreduzierungen im Rheinverlauf bei Deichbruch am Polder Krefeld (b = Breschenbreite)

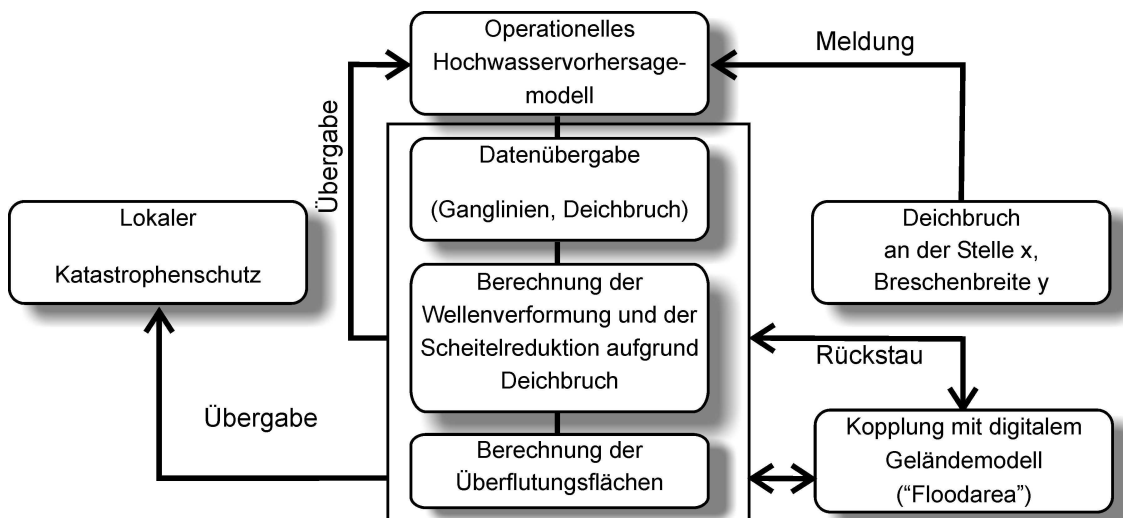


Abbildung 2.29: Verknüpfung von Hochwasservorhersagemodell und Simulationsmodell für Deichbruchszenarien zur Verbesserung der Hochwasservorhersage

„worst case scenario“ mit stationären Wasserständen rechnet. Dabei wird das tatsächlich zur Verfügung stehende Abflussvolumen nicht berücksichtigt. Die hier diskutierte Methodik ermittelt dagegen näherungsweise die Überschwemmungsflächen für das aktuelle Hochwasser- und Deichbruchereignis.

2.6.7 Offene Fragen

Bislang ist nur eine externe Kopplung der Modelle realisiert. Damit die Auswirkungen von Rückstauereffekten unmittelbar von der Transferfunktion berücksichtigt werden können, müsste zukünftig eine effiziente pro-

grammtechnische Verknüpfung mit *Floodarea* realisiert werden. Außerdem wäre es wünschenswert, zusätzliche systematische Vergleiche mit mehrdimensionalen Modellen durchzuführen, um die Modellgüte der rasterbasierten ArcView-Anwendung *Floodarea* weiter steigern zu können.

2.6.8 Literatur

Bollrich, G. (1996): Technische Hydromechanik I, Grundlagen; Verlag für Bauwesen; 4. Auflage; Deutschland

Disse, M.; Assmann, A. (2003): Bestimmung der Überflutungsflächen infolge von Deichbrüchen, Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (im Druck)

Disse, M.; Kamrath, P.; Wilhelmi, J.; Köngeter, J. (2003) Simulation des Hochwasserwellenablaufes und der Ausbreitung von Überflutungsflächen unter Berücksichtigung von Deichbrüchen, Wasserwirtschaft, Heft 5/2003, Seite 24-29.

Floodarea: ArcView GIS-Erweiterung; Geomer; Informationen im Internet über www.geomer.de

Schnatz, I., Busskamp R., Loy, F.: Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein (2001); Koblenz; 2001; ISBN 3-935324-43-X

Sobek: WL | Delft Hydraulics; Informationen im Internet über www.sobek.nl

Spurk, J.H. (1992): Dimensionsanalyse in der Strömungslehre; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New-York; ISBN 3-540-54959-5

TP A5.1, Teil 2: Entwicklung eines probabilistischen Ansatzes zur Bestimmung des Deichversagen durch Überströmen

Bruno Merz, Heiko Apel und Martin Gocht

*GeoForschungszentrum Potsdam
Sektion 5.4: Ingenieurhydrologie
Email: bmerz@gfz-potsdam.de*

2.6.9 Zusammenfassung

Flussdeiche sind ein wesentliches Element des Hochwasserschutzes in Deutschland. Sie bieten allerdings, wie insbesondere das Hochwasser im Jahr 2002 gezeigt hat, nur einen eingeschränkten Schutz vor Überschwemmung. Trotz der Bedeutung der Sicherheit von Flussdeichen wird Deichversagen in Risikoabschätzungen sehr stark vereinfacht oder pauschal behandelt. Ein Ziel des TP A5.1 war es daher, Anhaltswerte für den Zeitpunkt eines Deichbruchs und für die Breschengeometrie zu liefern. Eine Analyse von 31 historischen Deichbrüchen in Deutschland ergab, dass fast die Hälfte dieser Deiche aufgrund von Überströmen versagte. Dabei stellten sich Breschenbreiten von 30 bis 200 m mit einem Mittelwert von ca. 100 m ein. Für diesen Versagensmechanismus wurde ein einfacher probabilistischer Ansatz zur Abschätzung der Bruchwahrscheinlichkeit entwickelt. Es wurden Funktionen abgeleitet, die abhängig von der Überströmdauer und -höhe die Wahrscheinlichkeit für einen Bruch angeben. Dabei ist der einzige empirische Parameter in der Berechnung des Bruchzeitpunktes, die Qualität der Rasenaufgabe, von entscheidender Bedeutung. Aufgrund fehlender Dokumentation über eingetretene Deichbrüche steht eine Validierung des Ansatzes noch aus. Hierfür werden momentan ca. 20 Deichbrüche an der Elbe und Mulde des Sommerhochwassers 2002 analysiert. Es ist dringend notwendig, dass zukünftig stärkere Anstrengungen zur Dokumentation von Deichbrüchen unternommen werden.

Abstract

River levees are an essential element of flood defence in Germany. The catastrophic floods of 2002 have shown that levees provide only a certain, limited safety. Although the safety of levees is a crucial aspect levee failure is treated very simplified, if at all, in flood risk assessments. Consequently the aim of this part of TP A5.1 was to provide plausible parameters for the conditions of levee breach and the breach width. The analysis of 31 historic levee breaches in Germany showed that almost one half of these failures were caused by overtopping. The breach width varied from 30 to 200 m with a mean value of approximately 100 m. Further a simplified approach for the assessment of the probability of levee breach due to overtopping was developed. This approach provides functions which quantify the probability of levee breach depending on overtopping height and overtopping duration. This approach has one empirical parameter, 'turf quality', which is crucial for the calculation of the time of the breach and of the breach probability. Hitherto the approach could not be validated due to missing data. To validate the approach approximately 20 levee failures of the Elbe flood 2002 are analysed. In the future much more effort has to be made to document levee failures in order to compare failure models with real data.

2.6.10 Veranlassung und Problem

Flussdeiche spielen eine zentrale Rolle beim Hochwasserschutz in Deutschland. Bei den Hochwasserereignissen an der Oder im Juli 1997 und an der Elbe im August 2002 zeigte sich eindrücklich, dass Deiche nur einen eingeschränkten Schutz vor Überschwemmung bieten. In Sachsen sind beim Hochwasser im August 2002 an Mulde und Elbe über 100 Deichbrüche aufgetreten. Deichbrüche haben einen entscheidenden Einfluss auf die Schäden im Hinterland. Außerdem können sie die Hochwasserwelle unterstrom von Bruchorten signifikant verändern, wie beim Oderhochwasser 1997 deutlich wurde. Heutige Risikoabschätzungen vernachlässigen entweder das Problem des Deichversagens oder verwenden sehr einfache bzw. pauschale Ansätze zur Erfassung von Deichbrüchen. Dabei geht man häufig von Deichbruchszenarien aus, wobei a priori festgelegt wird, an welcher Stelle zu welcher Zeit und mit welcher Bresche ein Bruch eintritt.

2.6.11 Ziel

Ziel des Teils Deichversagen des TP A5.1 war die Bereitstellung eines einfachen Ansatzes zur Abschätzung von Deichbrüchen. Die Arbeiten sollten bestehende Ansätze sichten und plausible Randbedingungen für die hydraulische Modellierung ableiten. Es sollten Anhaltswerte für den Zeitpunkt eines Deichbruchs und für die Breschengenometrie geliefert werden.

2.6.12 Methode

Die größte Schwierigkeit bei der Behandlung von Deichbrüchen liegt darin, dass kaum belastbare quantitative Angaben zu Versagensfällen in Deutschland vorliegen. Deichbrüche sind seltene Ereignisse, die außerdem in Krisensituationen auftreten, so dass die Beteiligten keine Zeit und Ressourcen haben, den Deichbruch zu dokumentieren. Auch in der internationalen Fachliteratur wird Deichversa-

gen selten untersucht. Dies steht im Gegensatz zu den zahlreichen Studien zur Sicherheit von Talsperrendämmen. Zu begründen ist dies mit den wesentlich dramatischeren Folgen eines Talsperrenbruchs. Angesichts der Hochwasserereignisse der letzten Jahre und der großen Werte, die sich hinter flussbegleitenden Deichen angesammelt haben, erscheint diese Vernachlässigung jedoch problematisch.

In einem ersten Arbeitsschritt wurden historische Deichbrüche in Deutschland mit dem Ziel der Identifikation der Versagensmechanismen analysiert. Weiterhin wurde untersucht, inwieweit sich aus den historischen Aufzeichnungen quantitative Angaben, z.B. zur Breschengenometrie, ableiten lassen. In einem zweiten Arbeitsschritt wurde der wichtigste Versagensfall – Deichbruch durch Überströmen – ausgewählt und detaillierter untersucht. Für diesen Mechanismus wurde ein probabilistischer Ansatz entwickelt und für zwei Deichabschnitte am Niederrhein angepasst.

Deichversagensmechanismen und ihre Bedeutung

Deichbrüche werden durch verschiedene Versagensmechanismen verursacht. In Anlehnung an Armbruster-Veneti (1999) wurden die unterschiedlichen Versagensmechanismen in drei Klassen zusammengefasst: Überströmen, geohydraulisches Versagen und geotechnisches Versagen. Des Weiteren sind sonstige Versagensursachen wie Sabotage und Schiffskollisionen denkbar.

Die Zuordnung eines Deichbruchs zu einem Versagensmechanismus ist zumeist schwierig, da mehrere Ursachen gemeinsam auftreten können. Beispielsweise kann eine stark durchströmte Kiesschicht im Untergrund aufgrund von Materialaustrag Setzungen der Auenlehmschicht und damit des Deichkörpers zur Folge haben. Die lokale Senkung der Krone kann als Initialbresche einen Deichbruch durch Überströmen auslösen. Obwohl die Versagensursa-

che im Untergrund liegt, ist ein Deichbruch durch Überströmen zu beobachten.

Zur Abschätzung der Bedeutung der verschiedenen Versagensmechanismen wurden insgesamt 31 Deichbrüche an Rhein (1882, 1883), Main (1882), Donau (1988, 1999), Oder (1997) und Elbe (2002) analysiert (siehe Tab. 2.10). Die Informationen über historische Deichbrüche der Jahre 1882 und 1883 wurden einem Bericht des Großherzoglichen Ministeriums der Finanzen (Schleiermacher, 1883) entnommen, mit dem ein um 600.000 Mark erhöhter Investitionsbedarf für die Deichsanierung in Folge der Rheinhochwasser 1882/83 begründet wurde. Die Informationen über die jüngeren Deichbrüche wurden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen. War die Versagensursache nicht in der Quelle genannt, so wurde versucht, diese anhand von Hinweisen, z.B. zur Kolkbildung, abzuleiten (Gocht, 2003). Die häufigste Versagensursache war Überströmen (14 Fälle, 45%), gefolgt von Grundbruch (8 Fälle, 26%) und Durchströmen/Durchweichen (5 Fälle, 16%). In vier Fällen war keine Zuordnung zu einem Versagensmechanismus möglich.

Die weiteren Arbeiten konzentrierten sich auf den Versagensfall Deichbruch durch Überströmen, da die Analyse historischer Deichbrüche die große Bedeutung dieses Mechanismus zeigte. Darüber hinaus weisen Aussagen von Experten daraufhin, dass viele der Deichbrüche an der Mulde im Jahr 2002 aufgrund von Überströmen verursacht wurden. Des Weiteren sind moderne Drei-Zonen-Deiche anfällig gegen Überströmen, andere Bruchmechanismen können durch einen sorgfältigen Deichbau und durch eine regelmäßige Deichwartung weitgehend ausgeschlossen werden.

Versagensmechanismus Bruch durch Überströmen

Für den Versagensfall Bruch durch Überströmen sollte ein einfacher Ansatz für die Frage, ob und wann ein überströmter Deich bricht, be-

reitgestellt werden. Daneben waren plausible Größen für die Breschengeometrie zu liefern.

Zur Bestimmung des Bruchzeitpunkts wurde die aktuelle Belastung (aktueller Abfluss über die Deichkrone q_a) der kritischen Belastung (kritischer Abfluss q_{crit}) gegenübergestellt. Überschreitet die aktuelle Belastung die kritische, so kommt es zur Erosion durch das überströmende Wasser und der Deich bricht. Zur Berechnung des kritischen Abflusses wurde der Ansatz von Vrijling (2000) gewählt, wobei die Deichgeometrie und der Erosionswiderstand der Deichoberfläche eine entscheidende Rolle spielen. Der kritische Abfluss ist zeitlich variabel: Je länger der Deich überströmt wird, desto niedriger ist der kritische Abfluss. Der aktuelle Abfluss über die Deichkrone wurde nach Kortenhaus und Oumeraci (2002) berechnet. Abgeleitet aus einer Formel für ein Überfallwehr ergibt sich der aktuelle Abfluss aus Parametern der Deichgeometrie und der Überstromhöhe.

Mit dem dargestellten Verfahren wurden Sensitivitätsanalysen zum Bruchzeitpunkt an einem typischen Deich am Niederrhein bei Krefeld durchgeführt. Für diesen Deich waren alle zur Modellierung erforderlichen Parameter bekannt, da er als zu sanierender Deich geführt wurde.

Ausgehend von diesem deterministischen Ansatz wurde ein probabilistischer Ansatz zur Bestimmung der Wahrscheinlichkeit eines Deichbruchs entwickelt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Parameter des Deichbruchmodells variabel sind, da Deicheigenschaften entlang einer untersuchten Deichstrecke variieren. Typische Werte für die Variabilität konnten (mit Ausnahme des Rasenqualitätsparameters fg) Vrijling (2000) entnommen werden. Für die ausgewählten Deichstrecken wurden Versagenswahrscheinlichkeitsoberflächen erstellt, die die Bruchwahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Überströmdauer und Überströmhöhe angeben.

Die Bruchwahrscheinlichkeit wurde in folgenden Schritten abgeleitet:

Zeitpunkt	Fluss	Ort	Versagensmechanismus	Deichhöhe [m]	Bresche [m]
27.11.1882	Rhein	Mombacher Landdamm	Durchströmung	2.8	40
27.11.1882	Rhein	Mombacher Landdamm	Durchströmung	2.8	60
29.11.1882	Rhein	Gemarkung Bodenheim	Überströmen	2.8	100
28.11.1882	Main	Gustavsburg	Überströmen	2.75	34
	Rhein	Küblinger Damm am Wachhaus	Überströmen	2.8	45
	Rhein	Richtung nach Lampertheim	Überströmen	2.8	87
	Rhein	abwärts nach Rosenarten	Überströmen	2.8	120
02.01.1883	Rhein	Neudeich, Nordheim	Grundbruch	2.8	
01.01.1883	Main	Gustavsburg neben Novemberbruch	Kombination	2.75	34
01.01.1883	Rhein	Erfelder Landdamm	Grundbruch	3.5	115
02.01.1883	Rhein	Ginsheimer Rheindamm	Grundbruch	2.5	68
29.12.1882	Rhein	Gemarkung Oppenheim	Grundbruch	2.8	70
03.01.1883	Rhein	Gemarkung Heidesheim	Durchweichung	2.8	64
01.01.1883	Rhein	Schwarzbachdamm linksseitig	Grundbruch	3	112
01.01.1883	Rhein	Schwarzbachdamm linksseitig	Durchweichung	3	35
1988	Donau	Niederachdorf	Durchweichung	2	120
1999	Donau	Neustadt an der Donau	Überströmen	2	100
23/07/1997	Oder	Wiesenau (Brieskow-Finkenherd)	Grundbruch	2	217.62
24/07/1997	Oder	Aurith	Grundbruch	2.7	180
07.1997	Oder	Polder A, Schwedt, Deich-km 92.8	Überströmen	1.5	200
07.1997	Oder	Polder A, Schwedt, Deich-km 95.5	Überströmen	1.5	66
07.1997	Oder	Polder 10, Schwedt, Deich-km 0.5	Überströmen	1.5	184
07.1997	Oder	Schwedter Querfahrt, Deich-km 1.1	Überströmen	1.5	184
07.1997	Oder	Schwedter Querfahrt, Deich-km 1.6	Überströmen	1.5	53
07.1997	Oder	Ziltendorfer Niederung, Deich-km 19.5	Überströmen	1.5	30
07.1997	Oder	Ziltendorfer Niederung, Deich-km 20.65	Überströmen	1.5	170
07.1997	Oder	Ziltendorfer Niederung, Deich-km 20.80	Überströmen	1.5	80
17/08/2002	Elbe	Seegrehna, Elbe-km 222.5	Kombination	3	100
08.2002	Elbe	Sachau, Elbe-km	Grundbruch	3	50
08.2002	Elbe	Dessau-Waldersee	Kombination	3	70
08.2002	Elbe	Dautzschen	Kombination	3	350

Tabelle 2.10: Übersicht zu historischen Deichbrüchen in Deutschland.

- Beschreibung der Variabilität der Parameter (land- und flussseitige Böschungsneigung, Deichhöhe, Oberflächenrauigkeit landseitige Böschung, Rasenqualität fg), d.h. Schätzungen der Mittelwerte, Varianzen und Verteilungsfunktionen.
- Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen für ein definiertes Werte-

paar Überströmdauer t_e /Überströmhöhe dh zur Berechnung des Bruchkriteriums $q_a - q_{crit}$. Pro Wertepaar wurden 10^4 Simulationen durchgeführt.

- Berechnung der Momente und Bestimmung einer geeigneten Verteilungsfunktion für das Ergebnis jeder MCSimulation
- Berechnung der relativen Häufigkeit des Bruchkriteriums $q_a - q_{crit} = 0$ aus den kumulativen Verteilungen. Dies ist die Bruchwahrscheinlichkeit für das gegebene Wertepaar t_e/dh .
- Wiederholung der Prozedur für weitere Wertepaare
- Erstellen der Versagenswahrscheinlichkeitsoberfläche aus den Versagenswahrscheinlichkeiten der Wertepaare t_e/dh .

Die so ermittelten Versagensoberflächen wurden in den probabilistischen Risikoanalysen des TP 4.2 angewendet.

Unter den 31 ausgewerteten historischen Deichbrüchen befanden sich 14 Fälle, bei denen der Deich wegen Überströmen versagte. Die Breschenbreiten dieser 14 Brüche variierten zwischen 30 und 200 m, mit einem Mittelwert von ca. 100 m. Die Form der Endbresche bei einem Versagen durch Überströmen weist typischerweise eine kastenförmige Geometrie mit scharfen seitlichen Abbruchkanten zum restlichen Deichkörper auf, wie auch bei den Deichbrüchen an der Elbe im Sommerhochwasser 2002 beobachtet werden konnte.

Die Anwendung des gewählten Ansatzes zur Berechnung des Bruchzeitpunkts zeigte, dass die Deiche bei Überströmung der Deichkrone schon innerhalb weniger Stunden brechen. Der Bruchzeitpunkt wird entscheidend von der Rasenqualität beeinflusst (Abb. 2.30). So bricht bei einer Überstauhöhe von 25 cm der Deich innerhalb einer Stunde bei einer sehr schlechten Rasenqualität ($fg = 0.7$, Vrijling, 2000). Nimmt man hingegen einen sehr guten Rasen

an ($fg = 1.4$), bricht der Deich erst nach 16 Stunden.

Die Einbettung des deterministischen Ansatzes in ein probabilistisches Modell wurde im ersten Schritt für verschiedene konstante fg -Werte durchgeführt. Hierbei war ein treppenförmiger Übergang von Bruchwahrscheinlichkeit $P = 0$ zu $P = 1$ zu beobachten. Nimmt man hingegen an, dass fg räumlich variabel ist und erfasst man dieses Verhalten durch eine Normalverteilung, wobei 99% aller Werte im angegebenen Bereich $0.7 - 1.4$ liegen, so ergibt sich ein deutlich gestreckter Bereich von Bruchwahrscheinlichkeiten zwischen 0 und 1 (Abbildung 2.31).

Der Vergleich der treppenförmigen Bruchwahrscheinlichkeitsoberflächen bei konstantem fg mit der Bruchwahrscheinlichkeitsoberfläche, die aus der angenommenen Variabilität von fg resultiert (Abb. 2.31), zeigt, dass fg maßgeblichen Einfluss auf die Bestimmung der Bruchwahrscheinlichkeit im Vergleich zu den übrigen Parametern im Berechnungsansatz von Vrijling hat. Durch die Analyse von Deichbrüchen an Elbe und Mulde des Sommerhochwassers 2002 wird momentan geprüft, inwieweit die Aussagen zu Bruchzeitpunkt und Breschenbreiten unterstützt werden.

Insgesamt kann gefolgert werden, dass die vorhandenen Methoden zur Beschreibung oder Prognose von Deichbrüchen nicht ausreichend sind. Aussagen zu Deichversagen stützen sich zumeist auf Expertenwissen. Von Vrijling (1987, 2001) wurden zwar methodisch vollständige Gefährdungsanalysen mit einer Quantifizierung aller relevanten Versagensmechanismen und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten durchgeführt. Es bleibt jedoch offen, wie gut diese Analysen sind, wie die Eintrittswahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können, und wie diese Ansätze auf andere Situationen übertragen werden können. Bisher weitgehend ungelöste Probleme sind die quantitative Beschreibung verschiedener Versagensmechanismen (z.B. Stabilitätsverlust durch Piping im Deich, also Abtransport und Umla-

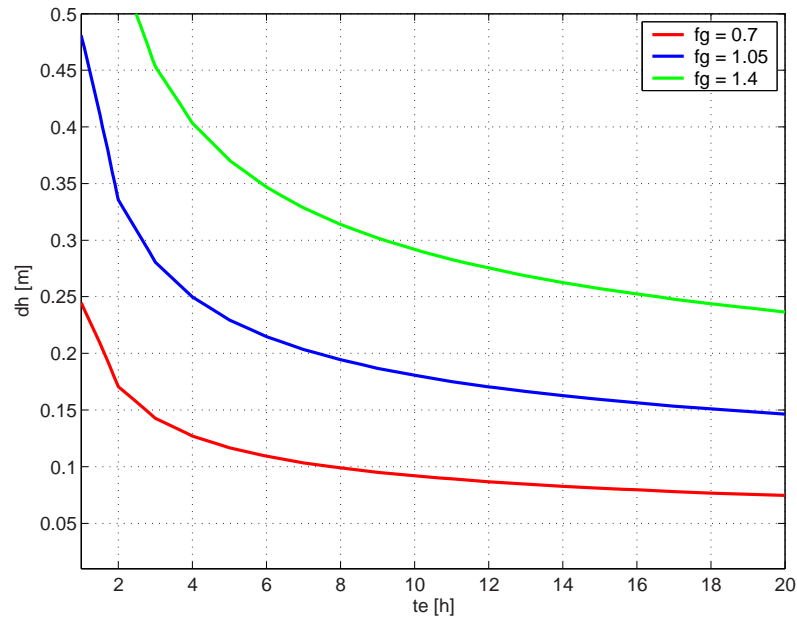


Abbildung 2.30: Einfluss der Rasenqualität fg auf Deichbruch durch Überströmen für den Deich bei Krefeld. Der Deich bricht, wenn die abgebildeten Grenzzustandlinien „aktueller Überfluss - kritischer Überfluss = 0“ überschritten werden.

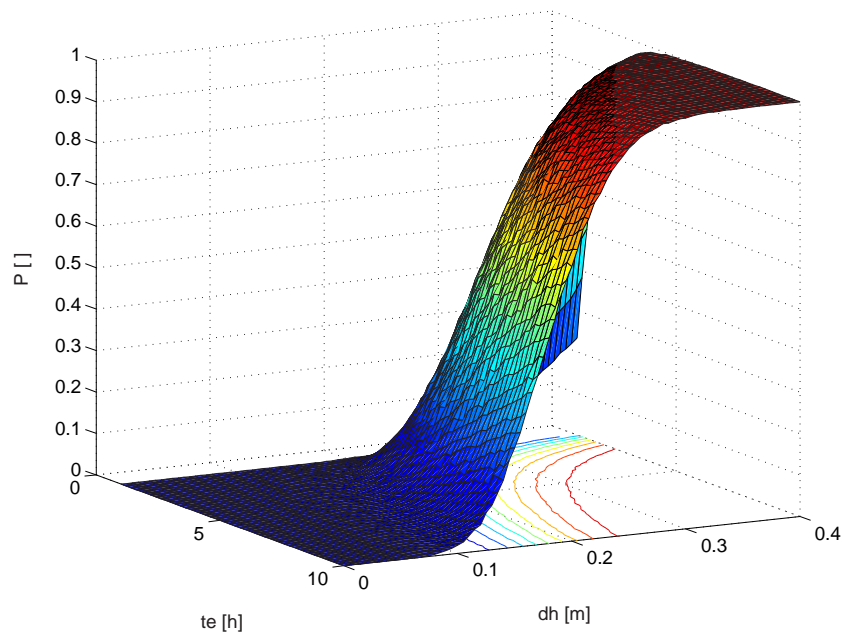


Abbildung 2.31: Deichbruchwahrscheinlichkeit durch Überströmen in Abhängigkeit von Überströmdauer t_e und Überströmhöhe dh unter Annahme einer Normalverteilung für fg mit Mittelwert 1.05 und Standardabweichung 0.1504 (99% der Werte im Intervall 0.7 - 1.4)

gerung von Material durch röhrenartige Erosion) sowie Korrelationen zwischen den Versagensmechanismen und zwischen den einzelnen Elementen des Schutzsystems. Insbesondere fehlen Modelle, die zeitliche Änderungen von Versagensmechanismen und -wahrscheinlichkeiten berücksichtigen (Pohl, 2000).

Es lässt sich zusammenfassen, dass der heutige Kenntnisstand für solche Gefährdungsanalysen sehr lückenhaft ist. Dies dürfte ein Grund sein, warum die probabilistische Betrachtung heute überwiegend auf die hydrologische Belastung beschränkt ist und das stochastische Verhalten der Deiche selbst vernachlässigt wird (Jorissen, 2000).

Es erscheint dringend notwendig, einen größeren Aufwand als bisher zur Beobachtung und Auswertung von Deichbrüchen zu betreiben. Nur wenn verlässliche Daten zur Verfügung stehen, können die entwickelten Ansätze validiert und modifiziert werden.

2.6.13 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Vor dem Hintergrund der dürftigen Datenlage und der Komplexität von Deichbrüchen konnte dieser Teil des Teilprojekts A5.1 plausible Größen für den Bruchzeitpunkt und die Breschenbreite (durch die Analyse historischer Deichbrüche) für den Fall Deichbruch durch Überströmen liefern. Solche Größen werden dringend gebraucht, da zunehmend Deichbruchszenarien simuliert werden (z.B. Decker et al., 2002). Die Ergebnisse sind übertragbar, allerdings steht eine Kalibrierung bzw. Validierung mittels beobachteter Deichbrüche noch aus. Die Gültigkeit des entwickelten Ansatzes soll durch die Analyse von Deichbrüchen an Elbe und Mulde bewertet werden.

2.6.14 Offene Fragen

Die Arbeiten zeigten, dass von einer vollständigen quantitativen Gefährdungsanalyse für

Deiche nicht gesprochen werden kann. Dies dürfte auch daran liegen, dass die Problematik der Sicherheit von Flussdeichen bisher nicht ausreichend bearbeitet worden ist. Es ist dringend notwendig, dass zukünftig stärkere Anstrengungen zur Dokumentation von Deichbrüchen unternommen werden.

2.6.15 Literatur

Armbruster-Veneti, H., 1999: über das Verhalten von Erddämmen. Wasserwirtschaft, 89(10), 504-511.

Decker, J., Ludwig, K. & Meuser, A., 2002: Überlegungen zur Überflutung größerer Gebiete durch Deichbrüche. Wasserwirtschaft, 11-12, 15-20.

Gocht, M., 2003: Analyse historischer Deichbrüche. Water & Finance, Berlin (unveröffentlicht)

Jorissen, R.E., 2000: Coastal flood-risk management in the Netherlands. In: Risikomanagement im Küstenraum, Internationaler Workshop 30./31.3.2000, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Mitteilungen 85, Universität Hannover, 78-89.

Pohl, R., 2000: Aspekte der Standsicherheit von Deichen mit inhomogenem Aufbau. Wasser und Abfall, 11, 52-57.

Schleiermacher, 1883: Beilage Nr. 241 zum 46. Protokoll vom 15. Juni 1883 an die zweite Kammer der Stände des Großherzogtums Hessen, Großherzogliches Ministerium der Finanzen, Darmstadt (unveröffentlicht)

Vrijling, J.K., 1987: Probabilistic design of water-retaining structures, in: Duckstein, L. & E. Plate, Engineering reliability and risk in water resources, NATO ASI Series E, No. 124, Nijhoff, 115-134.

Vrijling, J.K., 2000: Probabilistic Design – Lecture Notes. IHE Delft, 145 p.

Vrijling, J.K., 2001: Probabilistic design of water defense systems in The Netherlands. Re-

liability Engineering and System Safety, 74,
337-344.

2.7 Simulation der raum-zeitlichen Ausbreitung von Hochwasserwellen auf Vorländern und (nach Deichbruch) in ungeschütztem Gelände

Klaus-Peter Holz, Lloyd H. C. Chua und Frank Merting

Brandenburgische Technische Universität Cottbus

Institut für Bauinformatik

Email: lfb@bauinf.tu-cottbus.de

TP A5.2: Simulation der raum-zeitlichen Ausbreitung von Hochwasserwellen auf Vorländern und (nach Deichbruch) in ungeschütztem Gelände

2.7.1 Zusammenfassung

Flutkatastrophen an Flüssen werden durch erhöhte Abflussereignisse ausgelöst, bei denen sich die Wassermassen auf Vorländern in den Flußauen und nach Deichbruch in Poldern ausbreiten. Hier können sie erheblichen Schaden an Mensch, Natur und gebauter Infrastruktur hervorrufen. Ziel des TP A5.2 war es, die räumlich-zeitlich variablen Überflutungsvorgänge von Vorländern und in Poldergebieten mit mathematisch-numerischen Modellen zu simulieren. Mit der Simulation sollen verbesserte Planungsunterlagen für das Krisenmanagement bei Hochwasserkatastrophen zur Verfügung gestellt werden. Die Untersuchungen wurden beispielhaft für den Polder bei Mehrum zwischen Duisburg und Wesel am Rhein durchgeführt. Die mathematisch-numerischen Simulationen erfolgten auf Basis der zweidimensionalen Flachwassergleichungen mit der Methode der Finiten Elemente. Die Berechnungsergebnisse wie beispielsweise Eintrittszeiten und Verweildauer des Wassers wurden in einem webbasierten Informationssystem mit GIS-Funktionalität für verschiedene Szenarien zur Verfügung gestellt. Krisenstäbe, Behörden, aber auch die Bevölkerung haben somit einfachen Internet-Zugang zu verschiedenen Überflutungsszenarien. Aus diesen Informationen können von den Behörden Schutzmaßnahmen, verfügbare Verkehrswege, Not- und Evakuierungspläne abgeleitet werden.

Abstract

Catastrophic floods at rivers originate after extrem run-off situations. In case of levee-breaches the water spreads over low-land areas causing tremendous damage to men, nature and built infrastructure. Objective of the project was the simulation of the water spreading in polder areas after levee-breaches by use of 2-dimensional hydrodynamic mathematical models. Topography, land use, buildings and infrastructure should be considered within the model. Information over flooding for different scenarios of dam breaking should be presented within an Internet-based information system. Thus they become available for the management of critical situations to support decisions about available access lines to people for evacuation or sites for repair and improvement of leakages. Investigations are performed for the polder area at Mehrum, a site between Duisburg and Wesel on the Rhine river. The computer simulations are based on the shallow-water equations which were solved by the finite element method. Results have been provided within an Web-based information system providing GIS functionality. Thus crisis managers as well as citizens are having Internet-access to different scenarios of flooding and may use this information for emergency planning.

2.7.2 Veranlassung und Problem

In den vergangenen Jahren wurde eine ungewöhnliche Häufung von großen Hochwassern beobachtet. In Deutschland traten große Überflutungen an Donau, Mosel, Rhein, Oder und im August 2002 an der Elbe auf, die zu erheblichen materiellen Verlusten führten. Die Verluste an Menschenleben waren glücklicherweise begrenzt.

Die Höhe von Hochwassern wird verstärkt durch Einengung von Flussquerschnitten durch Deiche. Diese sind historisch gewachsen zum Schutz von Städten, Gemeinden, Industrieflächen und landwirtschaftlich genutzten Gebieten. Sie schützen somit stets hohe volkswirtschaftliche Werte und ihr Bruch mit anschließend rascher Überflutung, die keine Zeit zur Sicherung von Hab und Gut lässt, führt zu hohen Verlusten.

Diese Situation hat den Ruf nach geeigneten Vorhersagemodellen, nach Risikoabschätzungen und verbesserten Planungsunterlagen für das Krisenmanagement laut werden lassen. Voraussetzung hierfür ist ein gutes Verständnis der gesamten Wirkungskette bei Hochwasserereignissen vom auslösenden Naturereignis bis zur Schadenswirkung im lokalen Fall. Weiterhin hat sich die Erkenntnis durchgesetzt, dass sich der Hochwasserschutz durch verstärkte Einbeziehung der potentiell Betroffenen verbessern lässt. Hierzu ist die allgemeine Informationslage vor und während der Flut zu verbessern und öffentlich zu machen. Nachgegangen werden sollte der Problematik am Beispiel des Rheineinzugsgebietes.

2.7.3 Ziel

Die Gesamtproblematik wurde in verschiedenen Teilprojekten getrennt bearbeitet. Das Teilprojekt 5.2 hatte zum Ziel, mit Hilfe numerischer Modelle Überflutungsvorgänge und mit diesen verbundene Schadstoffausbreitungen in Poldern bei Deichbrüchen zu simulieren. Mit den Arbeiten sollte die Leistungsfähigkeit der

Modelle bezüglich Naturähnlichkeit sowie ihre Tauglichkeit für Maßnahmen des Krisenmanagements vor und während Hochwassersituationen aufgezeigt werden. Von Interesse sind Kenntnisse, wie sich das Wasser in einem Polder ausbreitet, wie tief es wo und wann und wie lange stehen wird, sowie wie sich Schadstoffe z.B. aus überfluteten Kläranlagen, Industriebetrieben, Tankstellen etc. ausbreiten und wo diese Schadstoffe bei ablaufendem Hochwasser verbleiben. Mit diesen Informationen können vorbeugende sowie Einsatzmaßnahmen getroffen werden. Kenntnisse, welche Straßen noch und wie lange für Transporte bei Abwehrmaßnahmen oder Evakuierungen zur Verfügung stehen, sind lebensrettend.

Eine verbesserte Informationslage ist nur dann hilfreich, wenn sie auch rasch, einfach, und verständlich verbreitet werden kann. Das Teilprojekt 5.2 zielte folglich auch auf diesen Aspekt, um Planungen zu erleichtern, das Krisenmanagement zu unterstützen und dem Bürger Anschauungsmaterial zur Verfügung zu stellen. Während gegenwärtig Radio, Fernsehen und Presse die wesentlichen Medien der Informationsverbreitung waren, so sollte hier das Internet genutzt werden. Als Anwendungsgebiet wurde der Polder Mehrum am Niederrhein gewählt (Abbildung 2.32). Der Rhein wurde auf einer Länge von 33 km durch ein mathematisches Modell abgebildet. Der gesamte modellierte Bereich einschließlich des Polders beträgt ungefähr 50 km².

2.7.4 Methode

Die numerischen Simulationen basieren auf den vertikal integrierten Flachwasser-Differentialgleichungen. Die Gleichungen werden numerisch mit der Methode der Finiten Elemente gelöst. Es werden Dreieckselemente und ein implizites Gleichungssplitting Schema verwendet. Das Verfahren ist implementiert in der Software SWEVOLVER, die von PAIC, Riga entwickelt wurde. Der Transport von Schadstoffen wird durch die skalare Transportgleichung beschrieben.

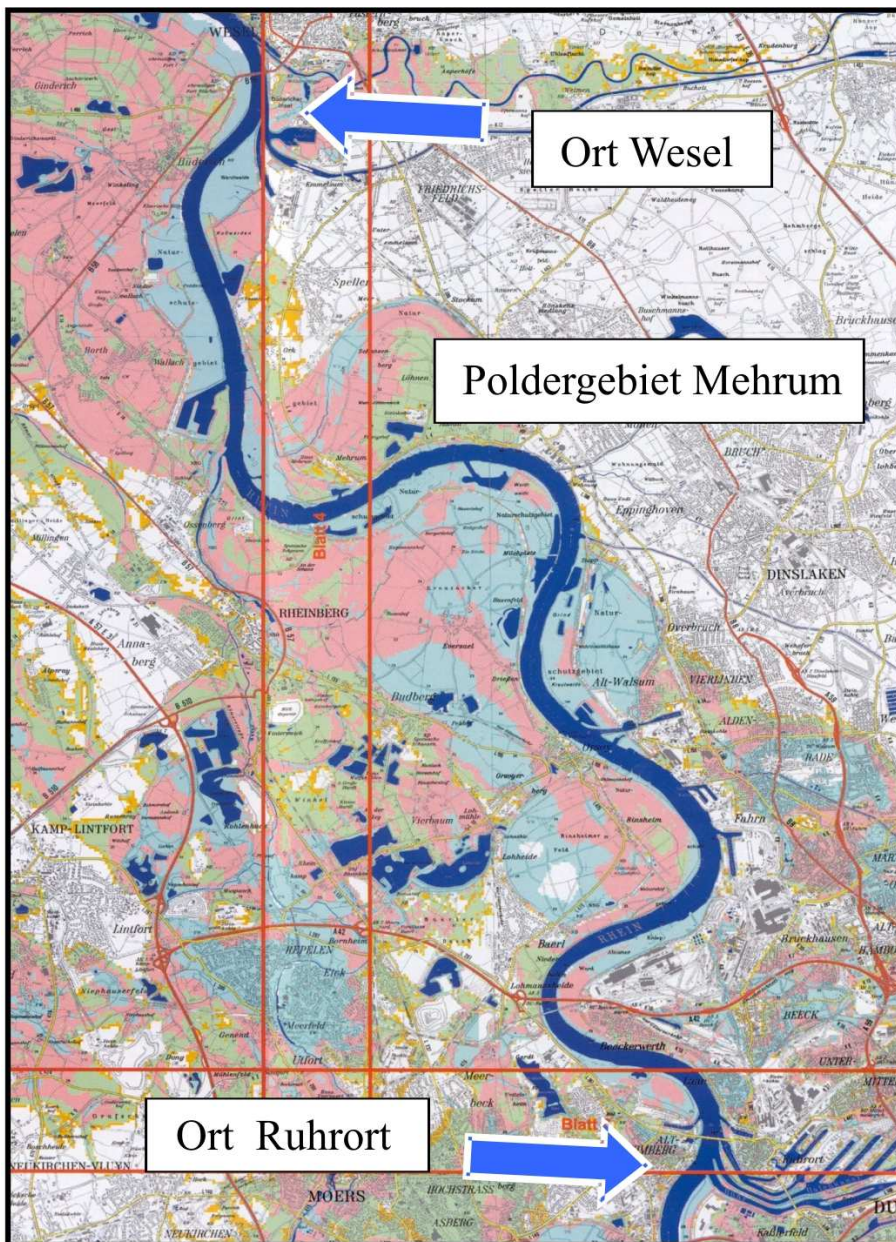


Abbildung 2.32: Lage des Untersuchungsgebietes

Für deren Lösung wird ein diffusionsarmes Verfahren nach Taylor-Galerkin eingesetzt. Für die Ausbreitung von oberflächennah treibenden Schadstoffen (z.B. Öl) wird ein Lagrange Modell verwendet.

Das Modell der Wassertiefenverteilung im Fluss und das Modell der Geländehöhen im Polder des Untersuchungsgebietes wurde aus zwei Datenquellen zusammengeführt. Innerhalb des Flusses lagen die Querschnittswerte

als Profildaten in 100 m Abständen und im Poldergebiet als Geländemodell im 10x10 m Rasterformat vor. Die Erzeugung des diskreten Modells aus diesen Daten erfolgte automatisch mit einem Gittergenerator. Im Ergebnis entstand ein Rechengitter mit ca. 9000 Knoten und 17000 Elementen. Zur Anpassung des Modells an die lokalen Gegebenheiten wurden die gemessenen Wasserstände und Durchflüsse an den Messstellen Ruhrort und Wesel

der Jahre Februar 1999, Dezember 1993 und Oktober 1998 herangezogen. Abbildung 2.33 zeigt den Verlauf einer typischen Hochwasserwelle und deren Reproduktion im Modell. Für die Bestimmung der Randbedingungen bei der Deichbruchsimulation wurde die Schlüsselkurve der flussabwärts gelegenen Messstation bei Wesel genutzt.

Die Datenlage für das Untersuchungsgebiet Mehrum war günstig. Allgemein ist davon auszugehen, dass Gewässerdaten leicht verfügbar sind. Schwieriger ist die Lage bezüglich der Geländedaten in den potentiellen Überflutungsbereichen. Eine wünschenswerte Genauigkeit von ca. 10 cm ist selten verfügbar. Angaben über Details von Gräben, Dükern, Bewuchs, Infrastruktur etc. müssen häufig nachgetragen werden. Die Aufbereitung der Daten für die numerische Simulation ist sehr aufwendig sofern diese in unterschiedlichen Bezügen und Formaten vorliegen. Im Teilprojekt wurden alle Daten in einem Geographischen Informationssystem (GIS) zusammengeführt und homogenisiert. Auf dieser Datenbasis wurde mit Hilfe eines speziellen Netzgenerators das Berechnungsgitter für die numerische Simulation erstellt.

Das numerische Verfahren liefert Ergebnisse auf der Basis seines Berechnungsgitters. Durch eine geeignete Transformation werden diese wiederum dem GIS zur Verfügung gestellt. Dieses kann nun für die Darstellung von Gelände, Infrastruktur und Simulationsergebnissen sowie deren Analyse durchgängig genutzt werden. Durch die umfassende Technologieunterstützung des GIS, vom PC bis zum mobilen „hand-held“ Gerät, ist ein breiter Informationszugang für Krisenmanager und Bürger möglich.

2.7.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Berechnungsergebnisse werden in einem Internet-basierten Informationssystem zur Verfügung gestellt. Dieses System zeichnet sich dadurch aus, dass ein Benutzer ledig-

lich einen Internet-Browser als Installationsvoraussetzung auf seinem PC, WAP oder Handy benötigt. Das System ist eine Eigenentwicklung. Es verwaltet Dokumente (Dateien) verschiedenen Formats, in die die Bilder der Berechnung eingestellt werden können. Die Dokumente müssen nicht auf einem zentralen System vorgehalten werden, sondern können (weltweit) verteilt liegen. Dies gelingt durch eine einfache Referenzierung der Dokumente. Eine einfache Suchfunktionalität auf semantischer Basis unterstützt das Auffinden. Dokumente, die im HTML-Format abgelegt sind, dürfen auch eigene Darstellungs- und Auswertemethoden (Java-Applets) enthalten. Sie werden durch Start der Methoden zu interaktiven dynamischen Dokumenten.

Die Berechnungsergebnisse werden im Folgenden in der Form dargestellt, wie sie das Informationssystem anbietet. Abbildung 2.34 zeigt die Startseite des Systems mit numerischen Daten von Querprofilen des Flusses, der Lage der Querprofile sowie die graphische Darstellung der Querprofile. Das eingebettete Menü dient der Steuerung der Darstellung.

Mit dem mathematisch-numerischen Modell wurden drei verschiedene Deichbruchszenarien (unterschiedliche Bruchstellen) untersucht und die Überflutungsvorgänge räumlich-zeitliche abgebildet. In Abbildung 2.35 ist eine typische Situation wiedergegeben. Blau dargestellt sind die Überflutungsflächen 18 bzw. 36 Stunden nach Deichbruch.

Die Simulation der Ausbreitung von Schadstoffen im Überflutungsfall wurde für gelöste Substanzen (z.B. Chemikalie, Wasser aus Kläranlagen) und für Öl, das auf der Oberfläche treibt, untersucht. Die Lage der Schadstoffquellen und die Schadstoffmenge wurden mangels verfügbarer Daten frei gewählt. Abbildung 2.36 zeigt die Ausbreitung des Hochwassers und die Verteilung von Schadstoffkonzentrationen infolge kurzzeitig ausgetretener löslicher Substanzen im Polder. Man erkennt deutlich die zunehmende Ausbreitung

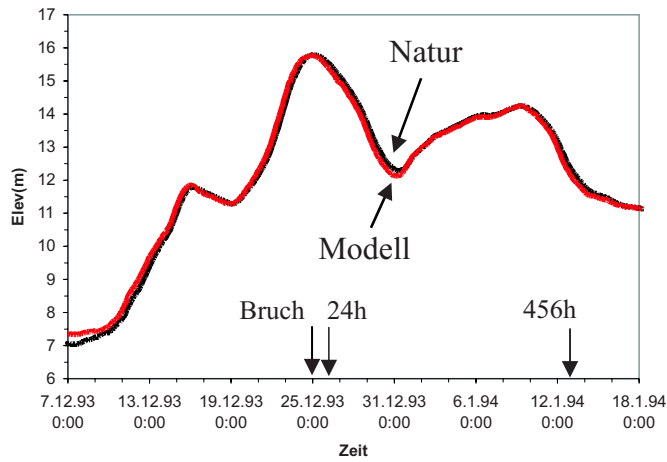


Abbildung 2.33: Hochwasserwelle im Jahr 1993 in der Natur und im Modell

Abbildung 2.34: Startseite des Informationssystems mit Fluss-Profildaten.

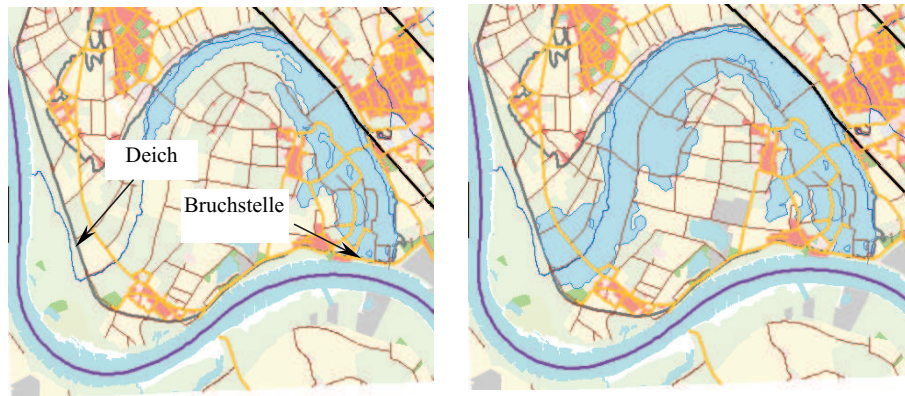


Abbildung 2.35: Szenario II – Ausbreitung der Überflutung nach 18 bzw. 36 Stunden.

der Schadstoffkonzentration anhand der Linien gleicher Konzentration.

In Abbildung 2.37 sind unter Nutzung der Funktionalität des GIS weitere Informationen über Flutankunft (Wasserstand über die Zeit an einem Ort auftragen) sowie Linien gleicher Wassertiefen zu einem gewählten Zeitpunkt beispielhaft dargestellt. Durch Überlagerung der Linien gleicher Wassertiefen mit Karten der Infrastruktur (hier Straßen) und Satellitenaufnahmen (Landnutzung) wird ein realistisches Bild der aktuellen Situation gewonnen. Straßen und ihr Überflutungszustand können eindeutig identifiziert werden und somit das Krisenmanagement bei Abwehr- und Evakuierungsmaßnahmen unterstützen.

Die konsequente Nutzung des Internet in Verbindung mit der Software Geographischer Informationssysteme (ArcIMS) erschließt die Möglichkeit, die gesamte Funktionalität dieser Software zu nutzen. Damit können Darstellungen einfach Problemen des Katastrophenschutzes und den Bedürfnissen der Bürger angepasst werden. Überflutungssituationen können mit beliebigen anderen Informationsdarstellungen (Infrastruktur, Risikopotential, Satellitenbilder, Fotos etc.) überlagert werden. Die mobilen Übertragungstechnologien erlauben die Informationsversorgung bis auf die Ebene mobiler Geräte vom PC bis zum WAP-fähigen Handy. Abbildung 2.38 zeigt beispielhaft einen Überflutungszustand wie er (links)

auf dem PC und (rechts) auf einem mobilen Gerät (ArcPad) abgebildet wird. Da die mobilen Geräte wiederum ortbar sind, kann deren Standort natürlich auch gleich in die Darstellungen eingeblendet werden. Somit entsteht mit einfachen Mitteln ein dynamisches Krisenmanagementsystem. Weitere Beispiele sind zu finden als Ergebnis des Projektes OSIRIS (<http://www.ist-osiris.org>).

Ein wesentliches Element für Krisenmanagementsysteme wäre ein mathematisches Modell, das zur Echtzeit Deichbrüche „mit- und vorausrechnet“. Hierzu wurde eine Studie durchgeführt, bei der Flussstrecken mit unverändertem Fließverhalten durch neuronale Netze ersetzt wurden (hybride Modelle). Die Rechenzeiten lassen sich soweit reduzieren, dass auch in einer PC Umgebung eine Simulation in Echtzeit möglich ist.

2.7.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die Modelle und Internet-basierten Informationsmethoden in Verbindung mit Geographischen Informationssystemen lassen sich durch geringe Anpassungen sofort in der Praxis einsetzen. Numerische Simulationen unterstützen die Bereitstellung von Überflutungsszenarien und damit die Ermittlung von Risikopotentialen und Einsatzplanungen der Katastrophenstäbe. Kartenorientierte Darstellungen

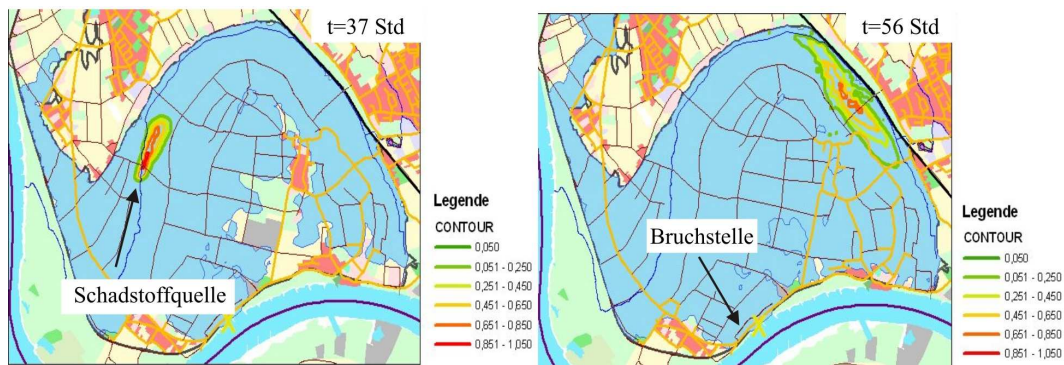


Abbildung 2.36: Szenario III - Überflutung und Schadstoffausbreitung 37 bzw. 56 Stunden nach Bruch, Schadstoffeintrag 36 Stunden nach dem Dammbrech (Angaben als relative Konzentrationen C/C_0).

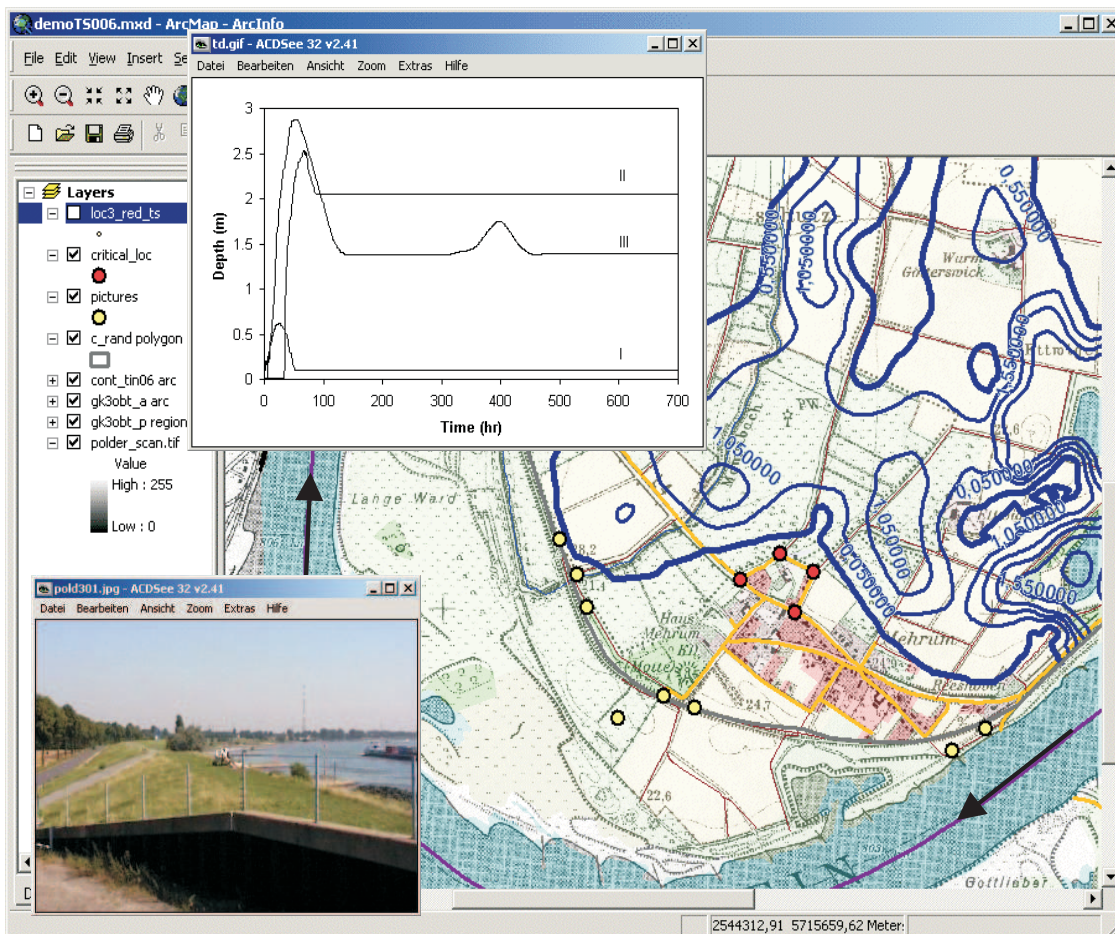


Abbildung 2.37: Szenario II – Darstellung von Linien gleicher Wassertiefen über Infrastrukturdaten 6 Stunden nach Deichbruch. Kleines Bild (oben) Wasserstände über der Zeit an roten Punkten, kleines Bild (unten) Foto für gelb markierten Bereich.

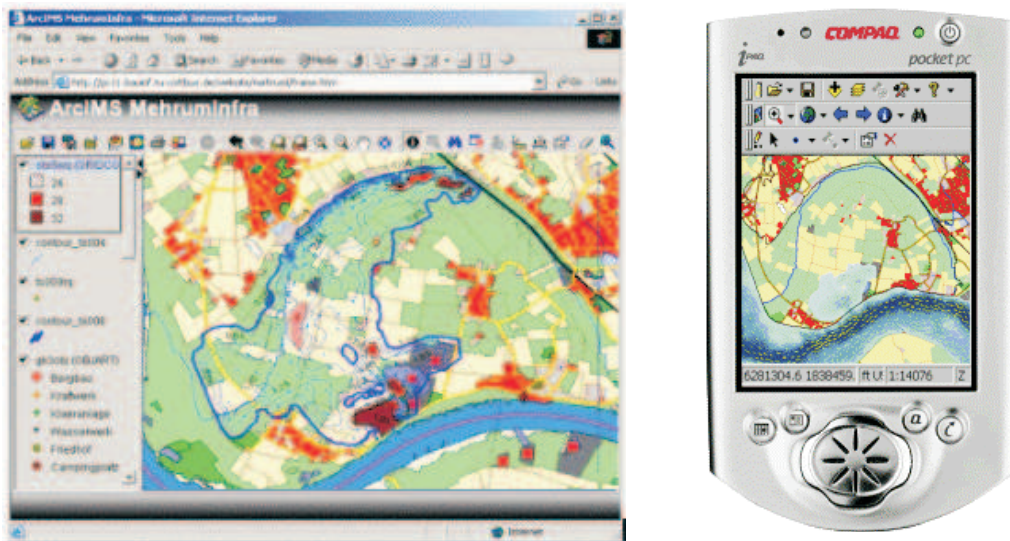


Abbildung 2.38: HTML Browser mit Java (links) und ArcPad auf einem PDA handheld PC (rechts).

unterstützen technische Planungs- und Verwaltungsprozesse. Nutzerorientierte bildhafte Darstellungen und Animationen von Szenarien unterstützen die Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung, ihre Eigenschutzmaßnahmen und Nachbarschaftshilfe. Insgesamt sind durch Einsatz von Systemen, wie vom TP 5.2 hier vorgestellt, erhebliche Verbesserungen im Hochwasserschutz zu erwarten.

2.7.7 Literatur

Ambrosi, D., S. Corti, V. Penneti and F. Sale-ri (1996): Numerical Simulation of Unsteady Flow at Po River Delta, *J. Hyd Engr, ASCE*, v122, no 12, pp 735–743.

Centre for Processes Analysis and Research, Ltd. (2000): User Manual SWEVOLVER, Ri-ga.

Chua, L.H.C., F. Merting and K.-P. Holz (2001): River Inundation Modelling for Risk Analysis, *1st Int. Conf. River Basin Management*, ed. R. A. Falconer and W. R. Blain, pp. 373–382.

Chua Lloyd H. C., Merting F., Holz K.-P. (2002): Numerical Simulation and Web-based GIS System for Flooding Processes, *5th Int. Conf. on Hydraulic-Science and Engineering*, Warzaw 2002

Donea, J., (1984): A Taylor-Galerkin Method for Convective Transport Problems, *Int. J. for Num. Meth. in Engr*, v20, pp 101-119.

Merting, F., Lloyd H.C. Chua, K.-P. Holz (2002): Numerical Simulation and Web-based GIS System for Flooding Process, *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften*, Workshop Cottbus, pp. 74 – 86

2.8 Präventiver Hochwasserselbstschutz von Privathaushalten und Unternehmen

Fritz Reusswig und Torsten Grothmann

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Globaler Wandel & Soziale Systeme

Email: torsten.grothmann@pik-potsdam.de

TP A6: Sozioökonomische Vulnerabilitätsabschätzung für Hochwasserrisiken

2.8.1 Zusammenfassung

Der Schwerpunkt des Projekts lag auf der privaten, vorsorgenden Selbsthilfe gegen Hochwassergefahren durch Privathaushalte und Unternehmen. Angesichts der verbleibenden Risiken auch bei optimalem öffentlichen Hochwasserschutz, vor allem aber angesichts der begrenzten (finanziellen) Handlungsspielräume staatlicher Akteure, die einen erhöhten öffentlichen Schutz unmöglich machen, kommt dieser Option immer größere Bedeutung zu. Auf der Grundlage einer Theorie selbstschützenden Verhaltens, wie sie im Bereich der Gesundheitsvorsorge entwickelt wurde (*Protection Motivation Theory*), hat das vorliegende Teilprojekt 157 Haushalte und 35 Unternehmen in den hochwassergefährdeten Stadtgebieten Kölns (HQ 100) zu aufgetretenen Schäden, Risikowahrnehmung, Bewertung verschiedener Selbstschutzmaßnahmen und tatsächlichem Präventionsverhalten befragt. Dabei stellte sich heraus, dass für zusätzlichen privaten Selbstschutz ein noch unausgeschöpftes Potenzial besteht, das durch verbesserte öffentliche Risikokommunikation ausgeschöpft werden kann und sollte. Wie unsere Ergebnisse zeigen, wird es dabei nicht genügen, allein – beispielsweise durch Risikokarten – auf die mögliche Betroffenheit abzustellen, um Selbstschutzverhalten zu motivieren. Darüber hinaus wird es entscheidend darauf ankommen, gegenüber den gefährdeten Haushalten und Firmen ihr Handlungspotenzial zu verdeutlichen und machbare Optionen aufzuzeigen.

Abstract

The focus of our study was the private precautionary self-protection against flood damage by private households and business companies. Due to residual risks also in case of optimal administrative flood protection, but mainly because of tight public budgets, which impede higher security, private damage prevention is gaining in importance. Based on a theory of self-protective behavior developed in the health care sector (*Protection Motivation Theory*) 157 households and 35 business companies in flood-prone areas (HQ 100) of Cologne (Germany), a city that has traditionally been subject to minor and major flood events homes, were interviewed. The respondents were asked about past flood damage, risk perception, evaluations of different self-protective measures and their actual precautionary behavior. Results of the study show the high potential for additional private self-protection. By improved public risk communication this potential can and should be exploited. Also shown by our results, the communication of the potential risk only – e.g. by risk maps – is insufficient to motivate self-protective behavior. Furthermore, it is essential to communicate feasible options for households' and business companies' self-protection.

2.8.2 Veranlassung, Problem und Ziel

Im Jahr 2002 beliefen sich die finanziellen Schäden durch Naturkatastrophen weltweit auf 55 Milliarden US-Dollar. Diese immensen Verluste waren nicht zuletzt durch das Augusthochwasser 2002 in Europa bedingt (13,5 Mrd. US \$). Und das Problem verschärft sich: Seit 1950 lässt sich ein nahezu kontinuierlicher Anstieg der Schäden durch Naturkatastrophen feststellen (Munich Re, 2002). Dieser ist zum einen durch ein gewachsenes Schadenspotenzial (Bevölkerung, Infrastruktur, Werte), zum anderen aber auch durch eine Zunahme der Häufigkeit und der Schadenswirkung von Wetterextremen im Zuge des anthropogenen Klimawandels bedingt. Beide Trends werden sich aller Voraussicht nach auch in Zukunft fortsetzen (IPCC, 2001).

Eine entscheidende Option zur Reduktion der Schadenshöhe besteht in der Verminderung der Anfälligkeit (Vulnerabilität) für Naturkatastrophen durch Anpassung (Adaption) der gefährdeten sozialen Akteure und Systeme. Dabei kann grob zwischen zwei Akteursgruppen unterschieden werden: erstens öffentliche Stellen und Organisationen, zweitens private Haushalte und Organisationen (z.B. Unternehmen). Ferner können Anpassungsmaßnahmen präventiv (im Vorfeld des Ereignisses) oder reaktiv (während des Ereignisses) verfasst sein (vgl. Abb. 2.39). Die vorliegende Studie konzentriert sich auf die präventive Adaption privater Haushalte und Unternehmen und die Frage nach ihren Ursachen und ihrer Beeinflussbarkeit durch Maßnahmen der Risikokommunikation.

Dass die private Hochwasservorsorge betroffener Haushalte und Unternehmen die monetären Schäden drastisch reduzieren kann, wird bei dem Vergleich der zwei Hochwasser in Köln, der Fokusregion unserer Studie, 1993 und 1995 eindrucksvoll deutlich. Bei fast gleichem Wasserstand (1993: 10,63 m, 1995: 10,69 m Kölner Pegel) und sehr ähnlicher Werteakkumulation in den überschwemmungsgefährdeten Gebieten waren die finan-

ziellen Schäden im Jahr 1995 (30 Mill. €) nur rund halb so hoch wie im Jahr 1993 (65 Mill. €) – eine Schadensreduktion, die hauptsächlich der verbesserten Schadensvorsorge durch die betroffenen Haushalte und Firmen zugeschrieben wird (Fink et al., 1996). Entsprechend den Schätzungen der Internationalen Kommission zum Schutze des Rheins (IKSR) können durch langfristige private Schadensvorsorge – z.B. durch das Anbringen von Schotten an Kellerfenstern – monetäre Hochwasserschäden um bis zu 80 Prozent reduziert werden (IKSR, 2002).

2.8.3 Methode

Theoretischer Hintergrund

Forschung zur Frage, was Haushalte und Firmen dazu veranlasst, gegen Naturrisiken vorzusorgen, ist kaum vorhanden. Vor diesem Hintergrund galt es, über den "Tellerrand" der Naturgefahrenforschung hinaus zu blicken. Die Theorie, die uns zur Erklärung der Schadensvorsorge gefährdeter Privathaushalte und Unternehmen sinnvoll erschien, ist die sogenannte Schutzmotivationstheorie (Protection Motivation Theory) von Rogers (1983), die bisher vor allem bei der Erforschung individueller Gesundheitsvorsorge (z.B. zum Schutz vor HIV oder Lungenkrebs) erfolgreich angewandt wurde (Milne et al., 2000).

Dieser Theorie zufolge wird die Motivation zu selbstschützendem Handeln nicht allein durch die Abschätzung eines persönlichen Schadensrisikos bestimmt (Risikobewertung), sondern wesentlich auch durch die Beurteilung von problemzugewandten Maßnahmen zum Selbstschutz vor dem Schaden (Bewältigungsbewertung) und zwar hinsichtlich a) der eigenen Möglichkeiten, diese Selbstschutzmöglichkeiten auszuführen, b) ihrer Wirksamkeit mit Blick auf die Schadensvermeidung und c) ihres Aufwands (Zeit, Geld, Aufmerksamkeit, etc.). Darüber hinaus berücksichtigt die Schutzmotivationstheorie auch die Rolle sogenannter problemabge-

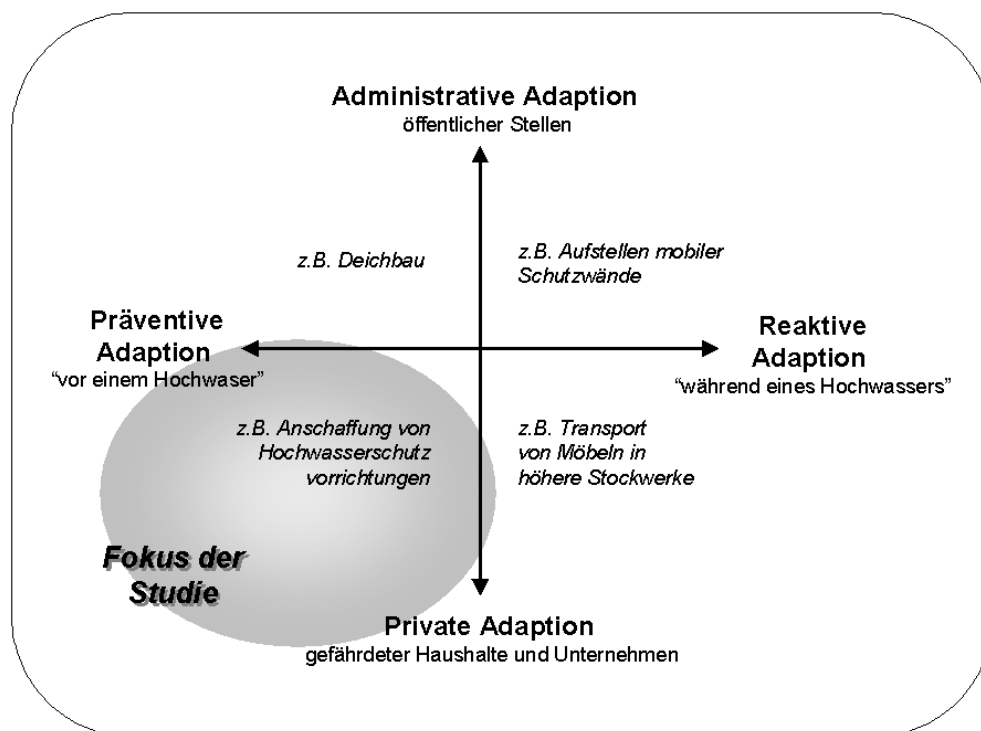


Abbildung 2.39: Dimensionen der Hochwasseradaptation und Fokus des TP A6

wandter Reaktionen auf ein Risiko, wie z.B. Wunschdenken („Ich werde schon nicht von Hochwasser betroffen sein.“) oder Fatalismus („Gegen Hochwasserschäden kann man sich einfach nicht schützen.“). Zusätzlich wurden von uns das Maß früherer Betroffenheit durch Hochwasser, die Besitzverhältnisse hinsichtlich der bewohnten oder genutzten Räume (Mieter oder Eigentümer) und Überzeugungen zur Verantwortungsteilung zwischen öffentlichen und privaten Akteuren in der Schadensvorsorge berücksichtigt.

Haushalts- und Unternehmensbefragungen

Zur Überprüfung des entwickelten Modells der Schadensvorsorge wurden telefonische Interviews mit 157 zufällig ausgewählten hochwassergefährdeten Privathaushalten und 35 ebenfalls hochwassergefährdeten Unternehmen in der Stadt Köln durchgeführt. Als hochwasser-

gefährdet wurden solche Privathaushalte und Unternehmen definiert, die zum einen Räume in Erdgeschoss oder Keller nutzen, zum anderen im Kölner Überflutungsgebiet eines hundertjährigen Hochwasserereignisses (11,30 m Kölner Pegel) liegen – ein Pegelstand, der innerhalb der letzten 100 Jahre in Köln nicht erreicht wurde. Der höchste Pegelstand innerhalb der letzten Jahre war 10,69 m im Jahr 1995.

Von den befragten Haushalten waren rund 40 % schon einmal direkt von einem Hochwasser betroffen, rund 50 % von den Unternehmen. 61 % der befragten Haushalte wohnen zur Miete, 39 % sind Wohnungseigentümer. In der Unternehmensstichprobe ist das Verhältnis umgekehrt: 63 % sind Eigentümer ihrer Räume und Gebäude, 37 % haben sie gemietet. Da uns insbesondere auch Unternehmen mit Gefahrstoffen (v.a. chemische Industrie) interessierten, realisierten wir eine ungefähr hälftige Besetzung unserer Unternehmensstichpro-

be in diesen Unternehmen. Eine Gleichverteilung der Interviews über Klein-, Mittel- und Großbetriebe war aufgrund der mangelnden Bereitschaft zur Interviewteilnahme in Kleinunternehmen nicht möglich: 14 befragte Unternehmen sind Großbetriebe (Jahresumsatz > 50 Mio. €), 18 mittelständische Betriebe (Umsatz > 1 Mio. € und < 50 Mio. €) und 3 Kleinunternehmen (Umsatz < 1 Mio. €). Die Interviews wurden in den Haushalten mit einer der haushaltsführenden Personen geführt, in den Unternehmen mit einer für den Hochwasserschutz zuständigen Person, die in der Unternehmenshierarchie möglichst hoch angesiedelt ist (Geschäftsführer, Betriebsleiter, Inhaber, technische Leiter, Umwelt- und Sicherheitsbeauftragter).

Die Haushaltsinterviews dauerten durchschnittlich eine halbe Stunde und beschränkten sich im wesentlichen auf die Erfragung der bereits beschriebenen Faktoren Risiko- und Bewältigungsbewertung, problemabgewandte Reaktionen und vergangene Hochwassererfahrung. Als Maß der Schadensvorsorge in den Privathaushalten wurden vor allem vier Handlungsoptionen erhoben: 1) bauliche Maßnahmen, wie das Verlegen elektrischer Vorrichtungen in obere Stockwerke; 2) Anschaffung von Hochwasserschutzvorrichtungen, wie z.B. Schotten für Fenster oder Türen; 3) Vermeidung wertvoller Inneneinrichtung in Keller und Erdgeschoss und 4) Informationsbeschaffung über Möglichkeiten zum Selbstschutz vor Hochwasserschäden. Darüber hinaus wurden Fragen zum Klimawandel, zu Emotionen, Vertrauen auf öffentlichen Hochwasserschutz, empfundener Verpflichtung zum Selbstschutz und zur Soziodemografie der Befragten gestellt.

Die Unternehmensinterviews waren als 1^{1/2}-stündige Intensivinterviews angelegt und umfassten eine Vielzahl von hochwasserbezogenen Einschätzungen und Wahrnehmungen. Als Maße der Hochwasserschadensvorsorge wurden vor allem vier Handlungsoptionen erhoben: 1) bauliche Maßnahmen, wie z.B. das Verlegen der Heizung in ein oberes Stockwerk

oder Anschaffung von Schotten für Fenster oder Türen; 2) Erstellung eines Notfallplans, der festlegt, wer was wann bei Eintreten eines Hochwassers zu tun hat; 3) Abschluss einer Versicherung, die für Hochwasserschäden aufkommt und 4) Informationsbeschaffung über Möglichkeiten zum Selbstschutz vor Hochwasserschäden.

2.8.4 Ergebnisse und Diskussion

Privathaushalte

Risikobewertung und Meinungen zum Klimawandel in Privathaushalten

Auf die Frage, wie wahrscheinlich es ihrer Meinung nach ist, dass es im kommenden Winter und Frühling zu einem Hochwasser kommt, das ihr Haus direkt betrifft, antworteten 22 % der Befragten mit „sehr unwahrscheinlich“, 40 % mit „eher unwahrscheinlich“, 20 % mit „eher wahrscheinlich“ und 13 % mit „sehr wahrscheinlich“. 5 % konnten sich nicht für eine Einschätzung entscheiden. Vergleicht man diese subjektive Wahrscheinlichkeitseinschätzung der befragten Haushalte mit ihrer objektiven Risikolage entsprechend einer auf einem Höhenmodell der Stadt Köln basierenden Überflutungskarte, so zeigt sich fast kein Zusammenhang ($r = 0.11$)². Stattdessen ergibt sich ein statistisch hoch signifikanter Zusammenhang mit der Entfernung vom Fluss ($r = -0.42$): Je weiter die Befragten vom Rhein entfernt wohnen, für desto unwahrscheinlicher halten sie es, von einem Hochwasser direkt betroffen zu sein. Für die subjektive Risikowahrnehmung der befragten Haushalte ist somit die horizontale Entfernung vom Fluss weit wichtiger als die vertikale Entfernung vom Wasserspiegel – auch wenn sich das

²Bivariate Korrelation nach Spearman („r“): Mit Korrelationen werden die Beziehungen zwischen Variablen gemessen. Korrelationen können Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Je höher eine Beziehung ausgeprägt ist, desto mehr bewegt sich die Korrelation auf -1 (negativer Zusammenhang) oder +1 (positiver Zusammenhang) zu.

objektive Risiko viel mehr durch letztere bestimmt (vergl. Abb. 2.40)

Der Klimawandel ist für die überwiegende Mehrheit der Befragten ein Faktum: 94 % glauben, dass es einen Klimawandel gibt und von diesen halten ihn 97 % für anthropogen bedingt. 77 % aller Befragten sehen das Augusthochwasser 2002 als Ausdruck des Klimawandels und 86 % befürchten aufgrund des Klimawandels auch am Rhein mehr Hochwasser. Gerade letztere Einschätzung zeigte einen signifikanten Zusammenhang mit der Wahrscheinlichkeitseinschätzung der Befragten, dass ein Hochwasser, wie es im August 2002 Ostdeutschland traf, auch die Rheinregion treffen könnte: Befragte, die aufgrund des Klimawandels mehr Hochwasser am Rhein erwarten, halten ein extremes Hochwasser am Rhein für wahrscheinlicher als Befragte, die keine Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwassersituation am Rhein erwarten ($p < 0.05$)³.

Präventiver Selbstschutz: Bewertung von Handlungsmöglichkeiten und tatsächliches Verhalten in Privathaushalten

Hinsichtlich der vier angesprochenen Selbstschutzmöglichkeiten haben die Haushalte folgende Einschätzungen geäußert (vgl. Abb. 2.41). Bezogen auf ihre Wirksamkeit werden die Maßnahmen „Informationsbeschaffung“ und „Vermeidung wertvoller Inneneinrichtung“ als die effektivsten (Median = 4; auf einer Skala von 0 = „überhaupt nicht wirksam“ bis 4 = „sehr wirksam“) betrachtet, während „bauliche Maßnahmen“ und die „Anschaffung von Hochwasserschutzvorrichtungen“ dahinter etwas zurückstehen (Median = 3). Der hohe Wert für die Option „Information“ könnte überraschen, muss diese doch, um faktisch schadensmindernd zu wirken, erst in konkrete (weitere) Handlungen umgesetzt werden. Aber gerade weil auch die weiteren Maßnahmen als

quasi außeralltägliche Handlungen angesehen werden können, sind sie in der Regel allesamt mit einem vorgängigen Prozess der Informationsbeschaffung und -auswertung verbunden.

Mit Blick auf die wahrgenommenen Kosten einer Handlung fällt auf, dass „bauliche Maßnahmen“ sowie „Schutzvorrichtungen“ als besonders kostenintensiv wahrgenommen werden (Median = 4; auf einer Skala von 0 = „überhaupt nicht aufwändig“ bis 4 = „sehr aufwändig“), während die „Vermeidung wertvoller Inneneinrichtung“ als relativ kostengünstige Lösung gilt (Median = 2). Überraschenderweise wird die „Informationsbeschaffung“ als recht aufwändig betrachtet (Median = 3). Daraus kann man schließen, dass diese – zudem als sehr effektiv bewertete – Option derzeit für die gefährdete Bevölkerung suboptimal geregelt scheint: entweder das vorhandene Informationsmaterial zum Thema Selbstschutz bei Hochwasser ist zu schwer zu finden, oder es ist zu schwer zu verstehen. Dies ist um so alarmierender, als es sich bei der Informationsbeschaffung um eine aus der Sicht der Betroffenen sehr wirkungsvolle Maßnahme handelt.

Hinsichtlich der wahrgenommenen Möglichkeit, eine Handlung auszuführen, rangieren „Informationsbeschaffung“ und „Vermeidung wertvoller Einrichtung“ an erster Stelle (Median = 3; auf einer Skala von 0 = „überhaupt nicht möglich“ bis 4 = „sehr gut möglich“). Die „Anschaffung von Schutzvorrichtungen“ (Median = 2) wird als weniger persönlich durchführbar angesehen und die „Durchführung baulicher Maßnahmen“ (Median = 0) von einem überwiegenden Teil der Befragten als überhaupt nicht möglich. Trotz der hohen wahrgenommenen Kosten der „Anschaffung von Schutzvorrichtungen“ wird diese Option doch von den meisten als eine im Prinzip auch von ihnen persönlich durchführbare angesehen – im Unterschied zu baulichen Maßnahmen, die ebenfalls die höchsten Kostenwerte erzielen. Hinsichtlich der wahrgenommenen Möglichkeit von „baulichen Maßnahmen“ und „Anschaffung von Schutzvorrichtungen“ zeigen sich klare Unterschiede zwischen Mietern

³Signifikanzniveau eines statistischen Tests („p“). Im allgemeinen spricht man von einem signifikanten Ergebnis, wenn das Signifikanzniveau höchstens 5% ($p \leq 0.05$), von einem sehr signifikanten Ergebnis, wenn sie höchstens 1% ($p \leq 0.01$) beträgt.

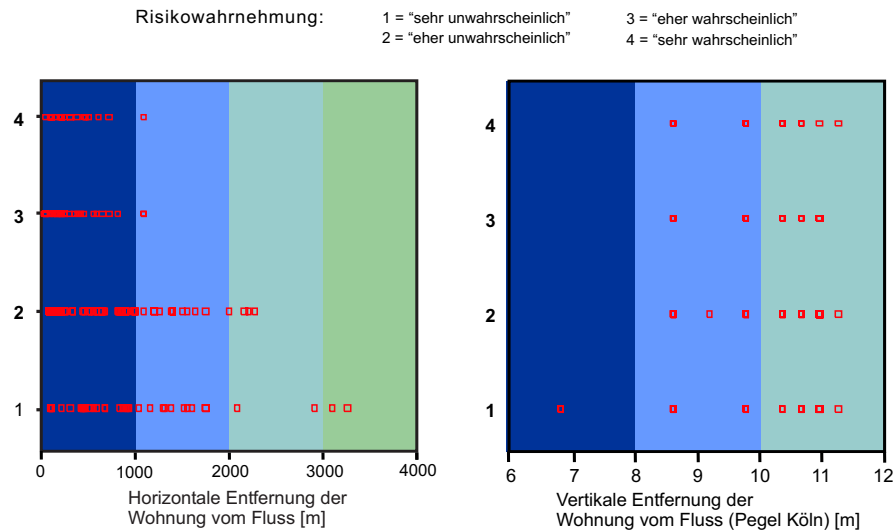


Abbildung 2.40: Privathaushalte: Risikowahrnehmung in Abhängigkeit von der horizontalen und vertikalen Entfernung zum Fluss

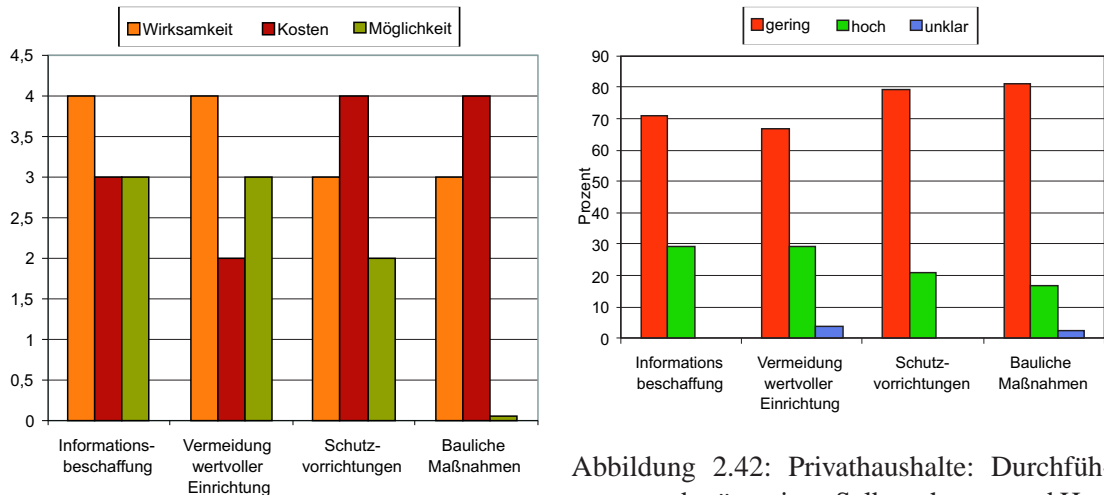


Abbildung 2.41: Privathaushalte: Wahrgenommene Wirksamkeit, Kosten und Möglichkeit präventiven Selbstschutzes

Abbildung 2.42: Privathaushalte: Durchführungsgrad präventiven Selbstschutzes und Herausforderungen der Risikokommunikation

und Eigentümern: Mieter sehen diese Maßnahmen als für sich weit weniger möglich an als Eigentümer ($p < 0.001$).

Fragt man nach dem Maße des tatsächlichen selbstschützenden Verhaltens (auf einer Skala von 0 = „überhaupt nicht“ bis 4 = „in sehr hohem Maße“), dann offenbart sich ein großes Potenzial für die Zukunft und damit eine Aufgabe für die Risikokommunikation. Et-

was anders formuliert: In allen vier Bereichen des präventiven privaten Hochwasserschutzes hat eine deutliche Mehrheit der Befragten bislang noch wenig getan (vgl. Abb. 2.42: als „gering“ klassifizieren wir die Angaben 0 bis 2, die Werte 3 und 4 betrachten wir als „hohen“ Umsetzungsgrad der Maßnahmen; „unklar“ ist der Umsetzungsgrad bei solchen Befragten, die zu der jeweiligen Maßnahme keine Angaben machen wollten oder konnten). Erwartungsgemäß führen „bauliche Maßnah-

men“ sowie die „Anschaffung von Schutzvorrichtungen“ die Liste der am wenigsten umgesetzten Handlungsfelder an. Interessanterweise wird die Option der „Vermeidung wertvoller Inneneinrichtung“ öfter als realisiert berichtet als die Option der „Informationsbeschaffung“. Dies belegt erneut den dringenden Handlungsbedarf bei der Bereitstellung von Informationsmöglichkeiten für den persönlichen Selbstschutz. Auch im tatsächlichen selbstschützenden Verhalten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen Mietern und Eigentümer: Eigentümer berichten von mehr baulichen Maßnahmen, Schutzvorrichtungen und Informationsbeschaffung als Mieter ($p < 0.001$).

Ursachen der Schadensvorsorge in Privathaushalten

Mittels statistischer Kausalanalysen haben wir herauszufinden versucht, welche Faktoren ursächlich zum Ergreifen einer Selbstschutzmaßnahme führen. Folgende Faktoren haben sich dabei bei allen vier Selbstschutzmaßen als signifikant erwiesen (Unterschiede in der Stärke ihrer jeweiligen Einflüsse bestanden kaum):

- **Vergangene Hochwasserbetroffenheit:** Waren die Haushalte in der Vergangenheit schon einmal direkt von Hochwasser betroffen, zeigen sie mehr Schadensvorsorge als solche Haushalte, die noch nie betroffen waren.
- **Risikobewertung:** Je wahrscheinlicher und schlimmer die Befragten eine Betroffenheit durch Hochwasser einschätzen, desto mehr Schadensvorsorge zeigen sie.
- **Bewältigungsbewertung:** Je höher die Haushalte a) die eigene Möglichkeit zur Ausführung der verschiedenen Selbstschutzmöglichkeiten, b) deren Wirksamkeit hinsichtlich der Schadensverringerung und c) je geringer sie den Aufwand der Maßnahmen einschätzen, desto mehr Schadensvorsorge zeigen sie.

- **Problemabgewandte Reaktionen:** Je mehr problemabgewandte Reaktionen wie Wunschenken oder Fatalismus die Befragten zeigen, desto weniger Selbstschutzhandlungen zeigen sie.
- **Eigentümer:** Sind die Befragten Eigentümer ihrer Wohnungen, zeigen sie mehr Schadensvorsorge als solche Befragte, die zur Miete wohnen.

Die genannten Faktoren erklären 26 bis 39 % der Unterschiede im präventiven Selbstschutzverhalten der Haushalte – Maße erklärter Varianz, welche in der sozialwissenschaftlichen Forschung zum Verhalten sozialer Systeme als „gut“ angesehen werden.

Ziel unserer Studie war jedoch nicht nur, diejenigen Faktoren in den Privathaushalten und Unternehmen zu identifizieren, die zum präventiven Selbstschutz vor Hochwasserschäden führen, sondern auch Vorschläge zu ihrer Beeinflussbarkeit durch eine entsprechende Risikokommunikation zu machen. Diese werden im Abschnitt Übertragbarkeit und Praxisrelevanz diskutiert.

Aufgabenteilung im präventiven Hochwasserschutz

Auf die Frage, wer nach Meinung der Befragten für die Schadensvermeidung in den Privathaushalten hauptsächlich verantwortlich sein sollte, äußerten 18 % der Befragten, dies sei Aufgabe öffentlicher Stellen, 6 % sahen die Bürger selbst in der Verantwortung, und 75 % sahen beide gleichermaßen in der Pflicht. 1 % konnten sich nicht für eine Antwort entscheiden. Die Bewohner hochwassergefährdeter Gebiete Kölns erwarten demnach in hohem Maße auch ein Engagement seitens städtischer oder staatlicher Institutionen. Anders formuliert: Sofern öffentliche Stellen und Organisationen ihr eigenes pro-aktives Engagement für den Schutz der Bevölkerung deutlich machen, ist diese auch bereit, ihr eigenes Selbstschutzz Potenzial zu mobilisieren.

Ob dieses hohe Interesse an städtischer und staatlicher Schadensvorsorge auch mit einem Wissen um deren Engagement einherging, erfassten wir durch eine Frage nach der Bekanntheit des Hochwasserschutzkonzeptes der Stadt Köln: 71 % gaben an, dieses zu kennen, 29 % kennen es nicht. Damit besitzt das deutschlandweit vorbildliche Konzept der Stadt Köln zwar einen vergleichsweise hohen Bekanntheitsgrad. Angesichts der Tatsache, dass wir ausschließlich an potenziell gefährdeten Standorten gefragt haben, bleibt hier aber noch Raum für Verbesserungen. Zudem: Nicht alle, die ein ausschließliches oder teilweises Engagement öffentlicher Stellen fordern, sind auch über deren tatsächliche Aktivitäten im Falle Kölns informiert.

Unternehmen

Risikobewertung und Meinungen zum Klimawandel in Unternehmen

Auf die Frage, wie wahrscheinlich es ihrer Meinung nach ist, dass es in den nächsten 5 Jahren zu einem Hochwasser kommt, das bis zu ihrem Standort reicht, antworteten 17 % der Befragten in den Unternehmen mit „sehr unwahrscheinlich“, 40 % mit „eher unwahrscheinlich“, 20 % mit „eher wahrscheinlich“ und 23 % mit „sehr wahrscheinlich“. Dieses Ergebnis ist konsistent mit der Schadenserwartung der Unternehmen: 60 % befürchten keine hochwasserbedingten Schäden in den kommenden fünf Jahren, 40 % befürchten Schäden. Auf die Frage, welche Schäden oder Beeinträchtigungen erwartet werden, wurden Beschädigung von Fundamenten, Maschinen und elektrischen Geräten, Produktions- oder Beschäftigungsausfall, Kosten für Reinigungs- und Aufräumarbeiten sowie Vorbeugemaßnahmen genannt.

Vergleicht man diese subjektive Wahrscheinlichkeitseinschätzung mit der objektiven Risikolage, so zeigt sich kein Zusammenhang ($r = -0.02$). Stattdessen ergab sich ein wiederum statistisch hoch signifikanter Abfall der Wahr-

scheinlichkeitseinschätzung mit zunehmender Entfernung vom Fluss ($r = -0.50$).

83 % der Unternehmensvertreter glauben, dass es einen Klimawandel gibt, und von diesen halten ihn 93 % für anthropogen bedingt. 69 % aller Befragten sehen das Augusthochwasser 2002 als Ausdruck des Klimawandels und ebenso viele befürchten aufgrund des Klimawandels auch am Rhein mehr Hochwasser. Ein Zusammenhang zwischen letzterer Einschätzung und der wahrgenommenen Wahrscheinlichkeit eines Extremhochwassers in der Rheinregion zeigte sich – anders als bei den Privathaushalten – für die Unternehmen nicht.

Präventiver Selbstschutz: Bewertung von Handlungsmöglichkeiten und tatsächliches Verhalten in Unternehmen

Betrachtet man die Ergebnisse der Fragen nach der Einschätzung der eigenen Selbstschutzmöglichkeiten (vgl. Abb. 2.43), dann fällt zunächst auf, dass „bauliche Maßnahmen“ und „Notfallpläne“ als die wirksamsten Maßnahmen des vorbeugenden Hochwasserschutzes aus Unternehmenssicht bewertet werden (Median = 4, „sehr wirksam“). Die „Beschaffung von Informationen“ folgt mit einem Wert von 3 („wirksam“), der „Abschluss einer Versicherung“ wird als am wenigsten wirksam (1 = „wenig wirksam“) eingeschätzt. Auffällig ist daran insbesondere, dass „Informationsbeschaffung“ für effektiver gehalten wird als der „Abschluss einer Versicherung“, deren Zweck ja explizit die Schadensregulierung ist, während der direkte Effekt reiner Informationsbeschaffung über Gefahren und Handlungsmöglichkeiten – ohne zusätzliche Handlungen – zunächst als gering bewertet werden kann. Womöglich spielt bei dieser Einschätzung der Unternehmen eine Rolle, wie gefahrenabdeckend sie die Versicherungsleistung bewerten. Bekanntlich ist es schwierig bis unmöglich, in hochwassergefährdeten Gebieten – und ein solches haben wir ja ausdrücklich untersucht – überhaupt eine Versicherung gegen Hochwasserschäden abzuschließen. Insbesondere Großunternehmen, die im Hochwasser-

fall ihrerseits auch ein Risiko darstellen, schätzen die schadensmindernde Wirkung von Versicherungen als besonders gering ein.

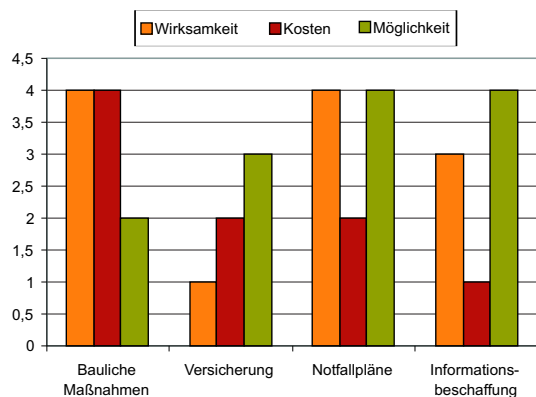


Abbildung 2.43: Unternehmen: Wahrgenommene Wirksamkeit, Kosten und Möglichkeit präventiven Selbstschutzes

Mit Blick auf die wahrgenommenen Kosten fällt auf, dass „bauliche Maßnahmen“ (erwartungsgemäß) als am aufwändigsten bzw. teuersten bewertet werden, während „Informationsbeschaffung“ als vergleichsweise kostengünstige Maßnahme gilt. Der „Abschluss von Versicherungen“ und die „Erstellung von Notfallplänen“ werden als weniger kostenintensiv (Median = 2) eingeschätzt. Bei der Versicherungsoption fällt weiterhin auf, dass mittelständische Unternehmen, die ihrerseits ein Risiko im Hochwasserfall darstellen (z.B. chemische Industrie), den Abschluss einer Versicherung für weniger aufwändig halten als andere Unternehmen.

Was die wahrgenommene Möglichkeit anbetrifft, gelten „Notfallpläne“ und „Informationsbeschaffung“ als die am besten durchführbaren Maßnahmen: beide werden mit 4 („sehr gut möglich“) bewertet. Auch Versicherungen gelten mit 3 („gut möglich“) noch als unternehmensseitig machbare Option, während die Durchführung baulicher Maßnahmen mit einem Median von 2 („möglich“) den letzten Platz einnimmt. Im Gegensatz zu den Haushalten spielt für die wahrgenommene Möglichkeit der verschiedenen Selbstschutzmaßnahmen bei den Unternehmen keine Rolle, ob sie

Eigentümer oder Mieter der von ihnen genutzten Räume sind.

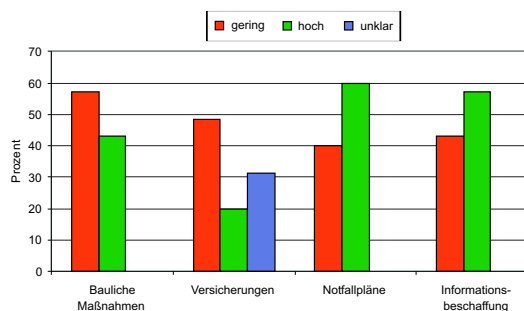


Abbildung 2.44: Unternehmen: Durchführungsgrad präventiven Selbstschutzes

Aus einer handlungsorientierten Sicht kann man festhalten, dass die Optionen „Informationsbeschaffung“ und „Erstellung von Notfallplänen“ insgesamt als die sinnvollsten Maßnahmen für die Unternehmen anzusehen sind: sie werden als (sehr) wirksam, vergleichsweise wenig kostenintensiv und als sehr gut machbar eingeschätzt. Hier sollte die Risiko- und Handlungskommunikation für den Bereich Hochwasser durch öffentliche Stellen ansetzen. Dabei sollte beachtet werden, dass für kleinere und mittlere Unternehmen unseren Ergebnissen zufolge eher relativ einfache, aber klare Aktionspläne in Frage kommen, während für größere Unternehmen ein ausführlicherer Notfallplan einschließlich eines mit Zuständigkeiten versehenen Sicherheitsmanagements sinnvoll ist. „Bauliche Maßnahmen“ gelten zwar als sehr wirkungsvoller Hochwasserschutz, aber zugleich als teuer und häufig nicht leicht durchführbar. Um sie zu fördern, wären zweifellos wirtschaftliche Anreize (z.B. steuerlicher Art) hilfreich, die auf lokaler Ebene seitens der öffentlich Zuständigen aber nicht leicht einzuführen sein dürften. Der Bereich der „Versicherungen“ schließlich wird vom Unternehmenssektor durchgehend als wenig effektiv eingeschätzt. Dies könnte sich dann ändern, wenn es Angebote gäbe, die den Hochwasserschadensfall besser abdecken würden.

Wichtig für die Konzeption von Maßnahmen der Hochwasserrisikokommunikation ist dabei

noch die Frage, in welchem Maße die Unternehmen die einzelnen Optionen bereits realisiert haben, bzw. wo noch ein Potenzial für zukünftige Realisierung besteht. Zu diesem Zweck haben wir auch hier die (selbstberichteten) Maßnahmen mit geringem, hohem und unklarem Umsetzungsgrad (vgl. Abb. 2.44).

Es fällt auf, dass das Potenzial für die als sinnvoll gekennzeichneten Optionen „Notfallpläne“ und „Information“ mit 40 bzw. 43 % durchaus noch als hoch einzuschätzen ist. Bei den baulichen Maßnahmen und den Versicherungen ist es zwar höher – zusätzlich wurde bei unseren Befragten eine Unsicherheit erkennbar hinsichtlich der Frage, ob eine Versicherung abgeschlossen wurde oder nicht –, aber beide Optionen rechnen zu den eher schwieriger umzusetzenden bzw. kommunikativ zu verstärkenden.

Ursachen der Schadensvorsorge in Unternehmen

Auch im Falle der Unternehmen konnten wir statistisch hoch signifikante Ursachenfaktoren für tatsächlich durchgeführten präventiven Selbstschutz finden – sie decken sich weitgehend mit den Faktoren bei den Haushalten:

- **Vergangene Hochwasserbetroffenheit:** Waren die Unternehmen in der Vergangenheit schon einmal direkt von Hochwasser betroffen, zeigen sie mehr Schadensvorsorge hinsichtlich der „Informationsbeschaffung“, „Erstellung von Notfallplänen“ und „baulicher Maßnahmen“ als solche Unternehmen, die noch nie betroffen waren. Ein solcher Zusammenhang zeigte sich nicht für den „Abschluss einer Versicherung“. Dies ist dadurch zu erklären, dass Versicherer bei vergangener Betroffenheit oder hoher Schadenswahrscheinlichkeit keine entsprechende Versicherung anbieten. Im Vergleich zu den Privathaushalten war der generelle Einfluss vergangener Hochwasserbetroffenheit aber geringer. Dies zeigte sich auch in den Antworten auf die Frage nach den Auslösern der

Beschäftigung mit dem Hochwasserthema: Zwar wurde oft die Betroffenheit oder „Beinahe-Betroffenheit“ von Hochwasser (in 14 Fällen) genannt, aber fast ebenso oft (in 9 Fällen) war Hochwasser ein Thema seit der Unternehmensgründung bzw. seit dem Umzug an den jetzigen Standort. Zwei Unternehmen der chemischen Industrie nannten explizit das Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) als Auslöser für die Auseinandersetzung mit der Hochwassergefahr.

- **Risikobewertung:** Je wahrscheinlicher die befragten Entscheidungsträger und Experten aus den Unternehmen eine Betroffenheit durch Hochwasser einschätzen, desto mehr Schadensvorsorge zeigen auch die Unternehmen, denen sie angehören. Dies gilt wiederum nicht für das Vorhandensein einer Hochwasserschadensversicherung aus den oben genannten Gründen.
- **Bewältigungsbewertung:** Je höher die Befragten a) die Möglichkeit zur Ausführung der verschiedenen Selbstschutzmaßnahmen, b) deren Wirksamkeit hinsichtlich der Schadensverringerung und c) je geringer sie den Aufwand dieser Maßnahmen einschätzen, desto mehr Schadensvorsorge zeigen ihre Unternehmen.
- **Problemabgewandte Reaktionen:** Je mehr problemabgewandte Reaktionen wie Wunschenken oder Fatalismus die Befragten zeigen, desto weniger problemzugewandte Selbstschutzhandlungen zeigen ihre Unternehmen – ein deutlicher Beleg dafür, dass auch in angeblich so vernunftgeleiteten sozialen Systemen wie Unternehmen „irrationale“ Reaktionen der Entscheidungsträger und Zuständigen vorkommen und das Verhalten des gesamten Unternehmens beeinflussen.

- **Wahrgenommene Selbstschutzverantwortung:** Je höher die Befragten eine Eigenverantwortung ihrer Unternehmen zur Schadensvorsorge wahrnahmen, desto mehr schützten sich ihre Unternehmen auch tatsächlich.
- **Eigentümer:** Waren die Unternehmen auch Eigentümer der von ihnen genutzten Gebäude, findet in etwas höherem Maße Schadensvorsorge statt als in solchen Unternehmen, die ihre Gebäude angemietet haben.
- **Unternehmensgröße:** Je größer die Unternehmen sind, in desto höherem Maße sind Notfallpläne vorhanden und findet Informationsbeschaffung statt.

Die stärksten Einflussfaktoren sind solche Faktoren, die sich auf die Beurteilung der unternehmerischen Handlungsmöglichkeiten beziehen: Bewältigungsbewertung und Fatalismus. Die Risikobewertung ist im Vergleich dazu weniger einflussreich. Insgesamt erklären die aufgelisteten Faktoren 33 bis 41 Prozent der Unterschiede in den vier Selbstschutzmaßnahmen der Unternehmen, was nach Maßstäben sozialwissenschaftlicher Forschung als "gute" Maße erklärter Varianz angesehen werden kann.

Ein weiterer Einflussfaktor, der sich erst während der Durchführung der Interviews herausstellte und daher nicht systematisch erfasst wurde, war die Vorbildfunktion von Großunternehmen für kleinere Betriebe. Befragte aus Unternehmen, die in der Nachbarschaft von Großunternehmen angesiedelt sind (speziell mittelständische Firmen neben den Ford-Werken in Köln) lassen sich von ihren „großen Brüdern“ beeinflussen. Großunternehmen dienen als Vorbild – in negativer wie in positiver Richtung!

Aufgabenteilung im präventiven Hochwasserschutz

Hinsichtlich der Frage, wer für die Schadensvermeidung in den Unternehmen hauptsäch-

lich verantwortlich sein sollte, halten die meisten Befragten (48 %) öffentliche Stellen und die Unternehmen selbst für gleich verantwortlich. 17 % sehen eine höhere Verantwortung bei den öffentlichen Stellen, 32 % sehen eine höhere Verantwortung bei den Unternehmen. Doch es scheint in der Schadensvermeidung im Wirtschaftssektor nicht nur um die Teilung von Verantwortung zu gehen. Öffentliche Stellen können die Schadensvorsorge der Unternehmen auch behindern: Kleinere Unternehmen in Köln gaben an, seit längerem in Auseinandersetzungen mit dem Bauamt der Stadt zu sein. Diese in Wohngebieten liegenden Unternehmen wollten beim Um- oder Neubau das ganze Haus etwas erhöht bauen, um sich vor Hochwasser zu schützen. Das Bauamt habe dies jedoch nicht genehmigt mit der Begründung, dass diese Bauhöhe nicht üblich sei. Das Argument des Hochwasserschutzes wurde nicht akzeptiert – eine Reaktion, die die Betroffenen sehr verärgerte.

Das Hochwasserschutzkonzept der Stadt Köln, welches über 90 % der Befragten kennen (meist über Informationsveranstaltungen der Hochwasserschutzzentrale Köln), wird von fast 70 % dieser Personen als positiv bewertet. Kritischer wird jedoch der Umsetzungsgrad beurteilt: 41 % der Unternehmensstichprobe halten diesen für gut, 31 % beurteilen ihn als schlecht und 28 % haben hierzu keine eindeutige Meinung. Hinsichtlich der bereits realisierten Umsetzung wird von den Befragten insbesondere ein Süd-Nord-Gefälle bemängelt: Der „reichere“ Süden würde von den Kölner Politikern bevorzugt.

57 % der befragten Unternehmen würden sich an einem Public-Private-Partnership im Hochwasserschutz beteiligen, 54 % notfalls aus Vorsorgegründen sogar eine Einschränkung der Flächenutzung für das eigene Unternehmen akzeptieren (eine allerdings als nicht sehr realistisch eingeschätzte Option). 66 % bevorzugten es als primäre Strategie der Schadensvorsorge, wenn dem Fluss mehr natürliche Überflutungsflächen (zurück)gegeben würden.

2.8.5 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Mögliche „Stellschrauben“ zur Beeinflussung des Selbstschutzverhaltens der Haushalte und Unternehmen sind zum einen die Risikobewertung, zum anderen die Bewältigungsbewertung. Die anderen Faktoren, die sich in unseren Kausalanalysen als einflussreich erwiesen haben – vergangene Hochwasserbetroffenheit, problemabgewandte Reaktionen, wahrgenommene Selbstschutzverantwortung (nur bei Unternehmen signifikant), Eigentümer und Unternehmensgröße (nur bei Unternehmen signifikant) sind nur schwer zu beeinflussen.

Risikokommunikation ist üblicherweise auf die Bewusstmachung von Schadenshöhen und Eintrittswahrscheinlichkeiten fokussiert. Sie will warnen, mögliche Gefahren bewusst machen und die Sensibilität dafür erhöhen. Oft wird mit drastischen Beispielen gearbeitet – im Falle von Wetterextremen liegt es z.B. nahe, den Klimawandel als dramatische Zukunftsgefahr auszumalen („Katastrophismus“). Unsere Befunde legen eine andere Strategie nahe.

Der Klimawandel ist für die Mehrheit der Befragten sowohl in der Bevölkerung als auch in der Wirtschaft eine Realität, und sein Beitrag zu mehr Hochwasser in der Zukunft wird mit ziemlicher Sicherheit als hoch und auch persönlich spürbar eingeschätzt. Eine weitere Verbesserung des privaten Selbstschutzes – sie ist notwendig und scheint uns auch möglich – über die Schiene der Verstärkung eines „Klima-Katastrophismus“ halten wir für den falschen Weg. Vielmehr kommt es darauf an, die tatsächlich drohenden Gefahren durch den Klimawandel realistisch und sachlich, aber auch glaubhaft zu vermitteln. „Horror szenarien“ bringen kaum etwas, sie können sogar Abwehrreaktionen hervorrufen, wie die wenig erfolgreichen Anti-Raucher-Kampagnen früherer Jahrzehnte gezeigt haben, in denen mit drastischen Bildern von Raucherbeinen und -lungen hantiert wurde. Auch in unserer Studie hat sich gezeigt, dass der dem Katastrophismus oft auf dem Fuß folgende Fatalismus

das tatsächliche Handeln im Sinne des Selbstschutzes eher lähmt. Hier ist es die Aufgabe der Klima- und Klimafolgenforschung, den Stand der Erkenntnisse getreu und beharrlich zu verbessern und zu verbreiten, um auf das in der Tat steigende Risiko der Hochwassergefahr aufmerksam zu machen. Dafür ist der Aufbau eines nachhaltigen und vertrauensvollen Stakeholder-Dialogs wichtig, wie ihn etwa das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung anstrebt.

Noch wichtiger aber scheint uns, auf einen Punkt einzugehen, der von der herkömmlichen Risikokommunikation weitgehend vernachlässigt wurde: Die Handlungsfähigkeit der Betroffenen, deren eigene Einschätzung sowie der praktische Handlungskontext, in dem sie sich alltäglich bewegen und in den das „außeralltägliche“ Thema Hochwasser (bzw. Hochwasserschutz) eingebettet werden muss. Hier liegen entscheidende Potenziale, aber auch Hemmnisse, die überwunden werden müssen, um zu mehr privatem Selbstschutz zu kommen. Mit Blick auf unsere Kölner Stichprobe an Haushalten und Unternehmen ist es etwa wichtig, die Informationspolitik zu überdenken und zu verbessern – und zwar aus der Sicht der Informationsbeschaffung der Betroffenen. Diese bewerten Information als effektiv, aber als schwierig zu beschaffen und zu verstehen. Darüber hinaus ist die Option der Vermeidung wertvoller Inneneinrichtung im Gefahrenbereich noch zu verbessern: sie wird als ohne großen Aufwand machbar und als sehr wirksam bewertet. Aber zwei Drittel der befragten Kölner Haushalte hatten diese Option noch nicht realisiert. Speziell für Mieter muss hier über Lösungen nachgedacht werden, die ihren im Vergleich zu Eigentümern objektiv, aber auch subjektiv begrenzten Handlungsspielraum besser nutzen lassen.

Im Unternehmenssektor kommt den Notfallplänen eine ähnliche Funktion zu: ihre Kosten gelten als relativ gering, ihre Wirksamkeit und ihre Machbarkeit als sehr hoch. Dennoch hatten 40 % der befragten Unternehmen solche Pläne noch nicht eingeführt. Auch die

Informationsoption ist noch nicht hinreichend ausgeschöpft. Bauliche Maßnahmen und Versicherungen sind wirkungsvoll, aber schwierig umzusetzen bzw. nicht zu erreichen. Hier sind weitere öffentliche Stellen (Hochwasserschutz als Querschnittsaufgabe) sowie die Versicherungswirtschaft gefragt.

Wichtig ist, dass die Risikokommunikation bei allen gewählten Optionen auf die Möglichkeiten abstellt, die die Akteure selbst haben – und auf Barrieren (wahrgenommene wie tatsächliche) gezielt eingeht. Die Verbreitung von positiven Beispielen (best practice) ist hier sicher hilfreich.

Wenn es zum Aufbau einer „Präventionskultur“ kommen soll – und dazu haben wir angesichts der zukünftigen Klimarisiken allen Anlass – dann ist es auch wichtig, die Aufgabenteilung zwischen öffentlichem und privatem Hochwasserschutz deutlich zu machen. Wenn staatliche Stellen ihre Leistungen deutlich kommunizieren (und dies nicht moralisch überfrachten), dann sind die Privaten – sowohl im Haushalts- wie im Unternehmensbereich – auch bereit, ihren Anteil am Selbstschutz zu übernehmen.

2.8.6 Offene Fragen

In unserer Studie haben wir die Haushalte und Unternehmen nur querschnittlich, also nur zu einem Zeitpunkt, befragt. Derartige Studien sind typisch. Da Adaption eines sozialen Systems aber immer als Prozess verläuft, mit Anreizen und Hindernissen auf dem Weg zum adaptiven oder auch nicht adaptiven Verhalten, sollte die Adaption auch prozesshaft erforscht werden. Das passiert durch eine vom Potsdam-Institut nach dem Augusthochwasser 2002 initiierte und von uns durchgeführte Studie. Wir befragen vom Hochwasser direkt betroffene Haushalte in Ostdeutschland mehrfach, um sie sozusagen auf ihrem Adaptionsweg zu begleiten.

Im Rahmen dieser Studie versuchen wir auch einem anderen Manko in der Adaptionfor-

schung zu begegnen: dem Mangel an Vergleichsstudien. Wir führen daher nicht nur in Ostdeutschland Befragungen durch, sondern vergleichend dazu auch entlang des Rheins, um zu prüfen, ob dieselben Faktoren hier wie dort wirksam sind – wodurch wir die Generalisierbarkeit unserer Ergebnisse und Modelle auf andere Regionen nicht nur behaupten, sondern auch belegen können.

Die Übersetzung von Naturkatastrophenforschung in praktische Konzepte ist ein weiteres Manko, das mit der Arbeit des DFNK nur ansatzweise behoben werden konnte. In Zukunft wird es darauf ankommen, einen stetigen Fluss zwischen Forschung und Katastrophenmanagement zu etablieren, der auch für den Selbstschutz der Bürger und Unternehmen transparent und nutzbar werden sollte.

Unsere Forschungsergebnisse könnten schließlich auch als Grundlage der Computermodellierung sozialer Systeme dienen und würden so ein realistischeres Bild menschlicher Systeme liefern als das die meisten ökonomischen Modelle tun, die in der Computermodellierung sozialer Systeme dominieren. Bislang fehlt nämlich der Brückenschlag zwischen empirischen Studien und Modellansätzen weitgehend.

Obwohl im TP 6 die Frage der (privaten, präventiven) Anpassung an Hochwasserereignisse im Mittelpunkt stand, muss angesichts des als ursächlich immer stärker hervortretenden Klimawandels der Zusammenhang zwischen Anpassung (Adaption) und Ursachenbekämpfung im Sinne der Reduktion von CO₂-Emissionen (Mitigation) hervorgehoben werden. Wenden wir den Blick auf die größeren Zusammenhänge und Maßstäbe, dann bekommt die Mitigationsoption im Handlungs-Portfolio entscheidendes Gewicht. Konsequenter Klimaschutz kann dabei auch auf lokaler Ebene anfangen, wie das Beispiel der Lokalen Agenda 21-Prozesse deutlich macht. Aus wissenschaftlicher Sicht wird es in Zukunft verstärkt darauf ankommen, die beiden Strategie-Richtungen Adaption und Mitigation stärker aufeinander

zu beziehen und gerade auch in praktischer Hinsicht zu einer klugen und machbaren – eventuell sogar ertragreichen – Aufgaben- und Ressourcenteilung zwischen beiden zu kommen.

2.8.7 Literatur

Fink, A., Ulbrich, U. and Engel, H. (1996): Aspects of the January 1995 flood in Germany, *Weather* 51, 34-39.

IKSR, Internationale Kommission zum Schutze des Rheins (2002): *Hochwasservorsorge – Maßnahmen und ihre Wirksamkeit*. http://www.iksr.org/hw/RZ_iksr_dt.pdf

IPCC (2001): *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, Cambridge University Press.

Milne, S., Sheeran, P. and Orbell, S. (2000): Prediction and Intervention in Health-Related Behavior: A Meta-Analytic Review of Protection Motivation Theory, *Journal of Applied Social Psychology* 30, 106-143.

Munich Re (2002): Annual Review: Natural Catastrophes 2002. Topics. www.munichre.com/pdf/topics_2002_e.pdf.

Rogers, R.W. (1983): Cognitive and physiological processes in fear appeals and attitude change: A revised theory of protection motivation, In: B.L. Cacioppo and L.L. Petty (Eds.): *Social psychophysiology: A sourcebook*, Guilford, London, UK, pp. 153-176.

2.9 Risiko- und Unsicherheitsanalyse für Hochwasser

Heiko Apel¹, Annegret Thieken¹, Bruno Merz¹ und Günter Blöschl²

¹*GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 5.4 Ingenieurhydrologie
Email: hapel@gfz-potsdam.de*

²*Technische Universität Wien
Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft*

TP A4.2: Methoden zur Abschätzung von Hochwasserrisiken unter Aspekten von Unsicherheit

2.9.1 Zusammenfassung

Grundlage für einen angepassten Hochwasserschutz ist die umfassende Analyse des Hochwasserrisikos kombiniert mit einer Abschätzung der Unsicherheiten bei der Risikoanalyse. Zu diesem Zweck analysierte der Cluster Risikoanalyse Hochwasser die vollständige Hochwasserwirkungskette, indem die verschiedenen Prozesse Niederschlag - Abflussbildung - Wellenablauf - Deichversagen - Überflutung - wirtschaftlicher Schaden miteinander verknüpft wurden. Diese meteorologischen, hydrologischen, hydraulischen, geotechnischen und sozio-ökonomischen Prozesse wurden von den verschiedenen Teilprojekten im Cluster mit deterministischen, räumlich expliziten Modellen beschrieben. Diese Modelle ermöglichen eine umfassende Beschreibung der schadenverursachenden Prozesse, sie sind aber aufgrund ihres hohen Rechenaufwandes nicht für eine probabilistische Risikoanalyse geeignet. Aus diesem Grund wurde ein stochastisches Modellsystem für die Risikoanalyse entwickelt, das sich aus vereinfachten Modulen für die Beschreibung der einzelnen Prozessglieder zusammensetzt. Die vereinfachten Modelle wurden anhand der Simulationsergebnisse der komplexen Modelle und realer Datensätze parametrisiert und nachfolgend für die Risiko- und Unsicherheitsanalyse in einem zweistufigen Monte-Carlo-Verfahren (MC) verwendet. Die erste Stufe der MC-Simulationen dient der Quantifizierung des Risikos, d.h. der Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwässern definierter Größenordnungen und den dadurch verursachten Schäden, während in der zweiten Stufe die Unsicherheit, die der Risikoanalyse anhaftet, bestimmt wird. Durch dieses Verfahren können eine Risikokurve für ein vulnerables Gebiet und begleitende Unsicherheitsbänder berechnet werden, wobei der Anteil einzelner Unsicherheitsquellen an der Gesamtunsicherheit ebenfalls quantifizierbar ist. Das Modell ist auf einen Flussabschnitt des Rheins zwischen Köln und Rees angewandt worden.

Abstract

Flood disaster mitigation strategies should be based on a comprehensive assessment of the flood risk combined with an investigation of the uncertainties associated with the risk assessment procedure. Within the 'German Research Network of Natural Disasters' (DFNK) the cluster 'Flood Risk Analysis' investigated the complete flood process chain, linking the different processes leading to flood disasters: 'precipitation - runoff generation and concentration in the catchment - flood routing in the river network - possible failure of flood protection measures - inundation - economic damage'.

The working group investigated and described these meteorological, hydrological, hydraulic, geotechnical and socio-economic processes at different scales using deterministic, spatially distributed models. While these models provide the necessary understanding of the flood process chain, they are not appropriate for risk and uncertainty analyses due to their complex nature and high demand of CPU-time. For this reason we developed a stochastic model for the derivation of flood risks comprised of simplified model components associated with the elements of the process chain. These model components were parameterised based on the results of the complex deterministic models and subsequently used for the risk and uncertainty analysis in a Monte-Carlo framework (MC). The Monte-Carlo framework is hierarchically structured in two layers. This system allows us to calculate probabilities of occurrence for events of different magnitudes along with the expected economic damage in a target area, i.e. to assess the economic risks (first MC layer), and to derive uncertainty bounds associated with these risks (second MC layer). It is also possible to identify the contributions of individual sources of uncertainty to the overall uncertainty. The model has been applied to a reach of the river Rhine downstream of Cologne.

2.9.2 Veranlassung und Problem

Hochwasserschutz orientiert sich üblicherweise an Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwässern bestimmter Größe, d.h. Schutzmaßnahmen werden so konzipiert, dass sie Ereignissen bis zu einem bestimmten, vorher festgelegten Wiederkehrintervall standhalten. Dieses Konzept wird zunehmend durch risikobasierte Ansätze ersetzt (Plate 1992; Berga 1995; Bowles 1996; Vrijling 2001). Hierbei werden Schutzmaßnahmen so gestaltet, dass ein optimaler Ausgleich von Kosten und Nutzen erzielt wird (Stewart und Melchers 1998). Diese Betrachtung erfordert die Analyse der Schäden, die durch den Hochwasserschutz verhindert werden, oder die entstehen, falls der Schutz nicht ausreicht. Hierfür sind Risikoanalysen durchzuführen, die einerseits die Hochwassergefährdung und andererseits die Vulnerabilität des untersuchten Gebietes quantifizieren.

2.9.3 Ziel

Ausgehend von dem risikobasierten Ansatz analysierte der DFNK-Cluster Risikoanalyse Hochwasser die gesamte Wirkungskette Hochwasser mit komplexen Modellen. Um die Arbeiten der acht Teilprojekte zusammenzuführen und um die Unsicherheit der Analysen abzuschätzen, wurde im Teilprojekt A 4.2 zu-

sätzlich ein "übergeordnetes" probabilistisches Modellkonzept erarbeitet. Darin wurden für die einzelnen Elemente der Wirkungskette Hochwasser die komplexen Modelle sukzessive durch einfache funktionale Zusammenhänge abgebildet, deren Parameter Schnittstellen zu anderen Teilprojekten im DFNK bilden. Für das "übergeordnete" Modell wurde eine einfache Modellstruktur gewählt, um einerseits das Zusammenwirken verschiedener Einflussfaktoren transparent zu halten und um andererseits eine große Anzahl von Simulationsläufen bewältigen zu können. Letzteres war notwendig, um mit numerischen probabilistischen Ansätzen das Hochwasserrisiko und dessen Unsicherheit abschätzen zu können.

Angewendet wurde dieses Modellsystem auf zwei verschiedene Zielgebiete, die Stadt Köln und den Polder Mehrum (s. Abb. 2.45). Ziel war es, zum einen Risikokurven für die Zielgebiete zu erstellen und zum anderen Unsicherheitsanalysen für die Risikoabschätzungen durchzuführen. Für Köln wurde nur die kürzeste Wirkungskette „hydrologische Last – hydraulische Transformation – Schäden im vulnerablen Gebiet“ betrachtet. Die Ergebnisse der Risiko- und Unsicherheitsanalyse sind im Kapitel „Synopsis der Naturgefahren für die Stadt Köln“ zusammengefasst.

Für den Polder Mehrum wurde hingegen die vollständige Wirkungskette im probabilisti-

schen Modell abgebildet, wobei das Untersuchungsgebiet in Abstimmung mit TP A5.1 auf den Rheinabschnitt zwischen Köln und Rees festgelegt wurde. Der Polder Mehrum befindet sich im unteren Teil dieses Abschnittes, einige km vor dem Zufluss der Lippe. Als potentielle Deichbruchstellen wurden der Deich, der den Polder Mehrum schützt, sowie ein Deichabschnitt in der Nähe von Krefeld ausgewählt. Die beiden Deichbruchstellen unterscheiden sich wesentlich in der Beschaffenheit des Hinterlandes. Während der Polder Mehrum eine schüsselförmige Topographie mit einem sehr begrenzten Volumen aufweist, bietet das Hinterland bei Krefeld eine quasi unbegrenzte Retentionskapazität. Diesen Tatsachen wird bei der Berechnung der Risikokurven, insbesondere der Szenariendefinition, Rechnung getragen.

2.9.4 Methode

Das probabilistische Modellsystem beschreibt die Glieder der Wirkungskette Hochwasser „Niederschlag – Abflussbildung – Wellenablauf – Deichversagen – Überflutung – wirtschaftlicher Schaden“ mit vereinfachten Modellansätzen („Modulen“), die anhand der Ergebnisse der komplexen Modelle mehrerer Projektpartner kalibriert wurden. Abbildung 2.46 verdeutlicht dieses Konzept anhand der einzelnen Glieder der Wirkungskette.

Ein Durchlauf des probabilistischen Modells beinhaltet demnach folgende Module:

- die „Hydrologische Belastung“, d.h. die Generierung des Inputs in das Modell,
- den „Wellenablauf“, d.h. die Veränderung der Wellenform während des Abflusses im Gerinne und den Zufluss durch Nebenflüsse,
- den „Deichbruch und Breschenausfluss“,
- die „Hydraulische Transformation“, d.h. die Umrechnung der Abflussmengen in

Pegelstände an den Deichbruchstellen und schließlich

- die „Schadensabschätzung“, d.h. die Umrechnung des Füllvolumens im Polder in Schadenswerte anhand der Nutzungsklassifikation (s. Abb. 2.45).

Zur Quantifizierung des Hochwasserrisikos im Untersuchungsgebiet Polder Mehrum wurden die Module in ein System von Monte-Carlo-Simulationen eingebettet. Dieses System wurde in zwei Stufen unterteilt, wobei die erste Stufe der Modellläufe der probabilistischen Risikoanalyse diente, während in der zweiten Stufe die Unsicherheit abgeschätzt wurde.

In der ersten Stufe wurde die natürliche Variabilität durch die Randomisierung der Spitzenabflüsse und der Ganglinientypen, der Korrelation von Haupt- und Nebenflüssen und der Deichgeometrie beschrieben. Hier wurden 10^5 randomisierte Modellläufe zur Konstruktion der Risikokurven durchgeführt. Zusätzlich wurden in der zweiten Stufe der Monte-Carlo-Simulationen Querverteilungen zu den Risikokurven für ausgewählte Wiederkehrintervalle berechnet. Hierbei wurden als Unsicherheitsquellen der Verteilungsfunktionsstyp für den jährlichen Spitzenabfluss und die Parameterschätzungen für die H-Q-Beziehung (Wasserstand-Abfluss-Beziehung) zur Randomisierung herangezogen. Zwei weitere Unsicherheitsquellen, die Qualität der Rasenauflage der Deiche und die laterale Deichbreschenentwicklung, wurden mittels Szenarienrechnungen berücksichtigt, da hier keine Grundlage zur Quantifizierung der Unsicherheit in Form von Mittelwerten, Varianzen, Verteilungsfunktionen, etc. vorhanden war. Für die Szenarien wurden Breschenbreiten für die obere Deichbruchstelle Krefeld von 100 m – 400 m (K100, K200, K300, K400) angenommen. Für die Bruchstelle bei Mehrum wurde eine Breschenbreite von 100 m festgesetzt. Szenarienrechnungen waren hier nicht notwendig, da aufgrund des geringen Füllvolumens des Polders in Kombination mit den hohen Deichanlagen die Breschenbreite kei-

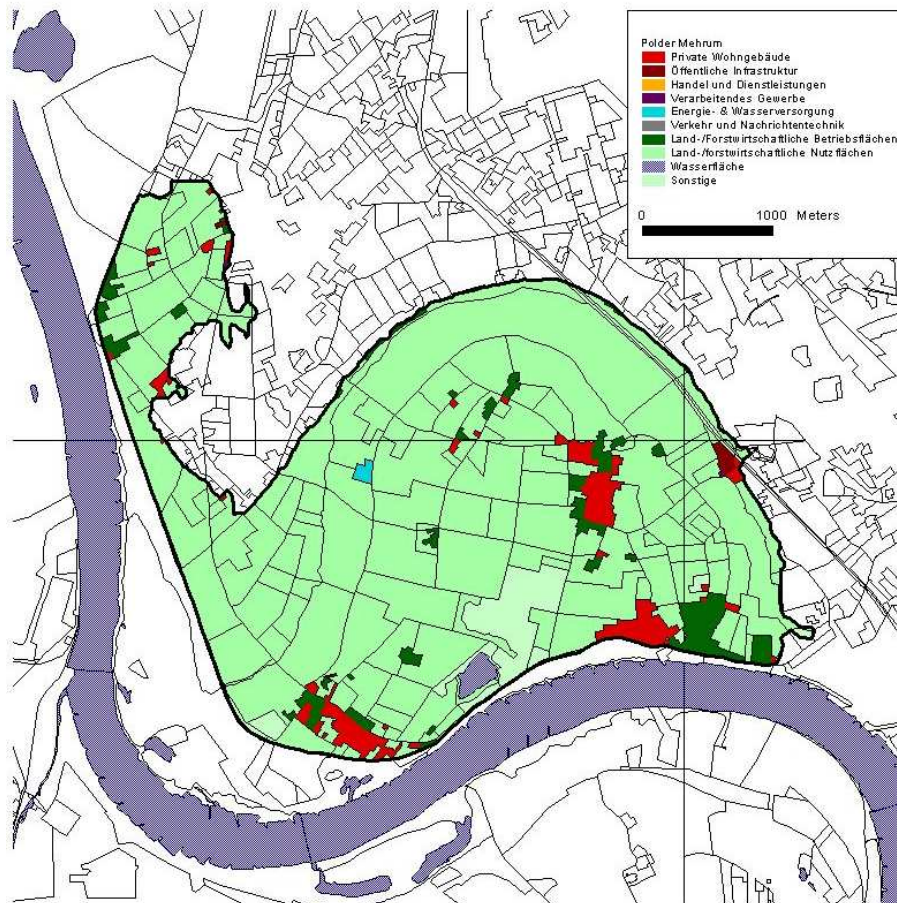


Abbildung 2.45: Das Zielgebiet der Risikoanalyse, der Polder Mehrum und seine Nutzungsklassifikation

nen Einfluss auf den Gesamtschaden hat. Bei einem Deichbruch durch Überströmen wird der Polder in jedem Fall innerhalb kürzester Zeit vollständig geflutet. Für den Rasenqualitätsparameter fg im Berechnungsansatz für den Deichbruch wurden 3 Szenarien, $fg = 0,7, 1,05$ und $1,4$, definiert, womit der in Vrijling (2000) angegebene Wertebereich vollständig beschrieben wird (siehe Kap 2.6). Die Unsicherheit der Schadenabschätzung wurde gänzlich vernachlässigt, da keine Grundlage zur Quantifizierung der Unsicherheit vorhanden war.

Als Maß für die Unsicherheit wurde das 95%-Vertrauensintervall aus den Querverteilungen gewählt, das wiederum aus den 2,5% und 97,5% Perzentilwerten berechnet wurde. Die

Vertrauensintervalle der Querverteilungen für die gewählten Wiederkehrintervalle wurden schließlich zu 95%-Vertrauensbändern für die Risikokurven linear interpoliert.

Abbildung 2.47 verdeutlicht das Vorgehen durch die schematische Darstellung des Modellsystems. Eine detaillierte Beschreibung ist in Apel et al. (2004a und 2004b) zu finden.

2.9.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Anwendung des oben skizzierten Verfahrens führte zu den in den Abbildungen 2.48 und 2.49 dargestellten Wiederkehrintervallen und Vertrauensbändern für Spitzenabflüsse am Ende des Untersuchungsgebietes (Pegel Rees). Es wird deutlich, dass die Breschenbreite bei

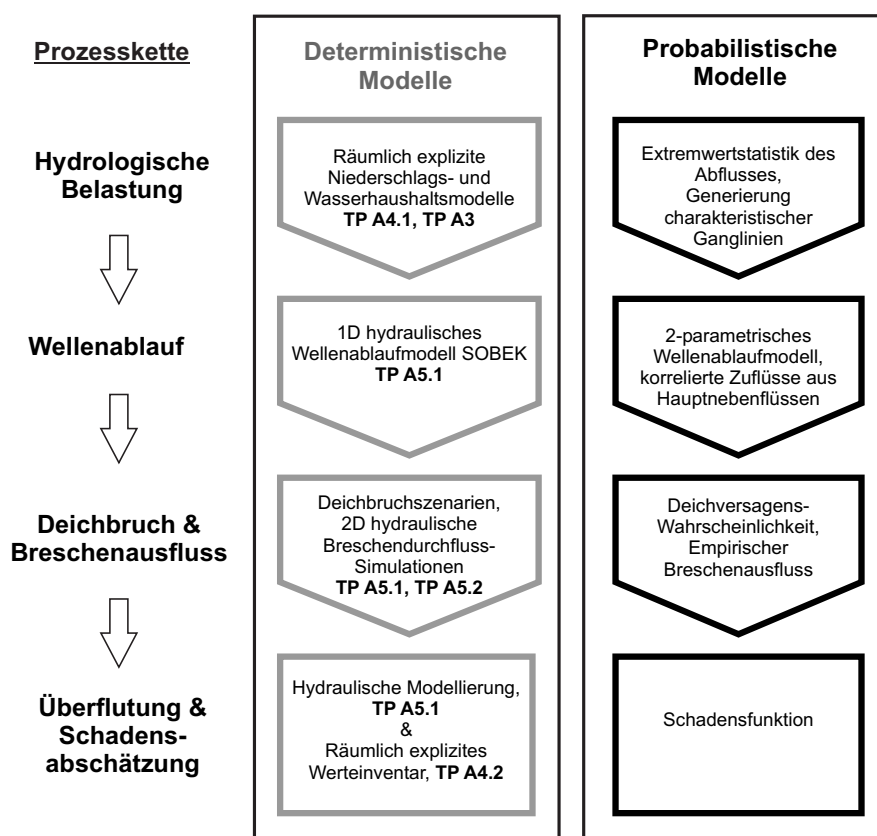


Abbildung 2.46: Glieder der Wirkungskette Hochwasser, deren Beschreibung mit deterministischen Modellen der einzelnen Projektpartner und die entsprechenden vereinfachten Ansätze im probabilistischen Modellsystem des TP A4.2

Krefeld einen maßgeblichen Einfluss auf das Auftreten von Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von > 600 Jahren hat. Das Auftreten von extremen Hochwässern im Unterlauf von Krefeld wird im Falle einer großen Breschenbreite deutlich reduziert und damit entsprechend auch die Hochwassergefährdung (Abbildung 2.48). Ein weiterer Effekt ist die Reduzierung der Unsicherheit bei angenommenen großen Breschenbreiten. Auch hier werden die Abflüsse durch den Deichbruch so stark reduziert, dass die 97.5% Perzentile der Querverteilungen nahe an der berechneten Risikokurve liegen (Abbildung 2.49D).

Die Rasenqualität beeinflusst das Ergebnis hingegen weniger deutlich. Hier ist eine geringe Verschiebung des Bruchzeitpunktes hin zu größeren Abflüssen zu beobachten, d.h. der

Sprung in den Häufigkeitskurven wird bei besserer Rasenqualität in Richtung größerer Abflüsse bzw. Wiederkehrintervalle verschoben.

Die Risikokurven, die aus den Gefährdungskurven und der Schadensabschätzung für den Polder Mehrum abgeleitet wurden, zeigen einen sprunghaften Anstieg des Risikos, sobald Deichbrüche auftreten. Die Wiederkehrperiode von Hochwasserabflüssen, die zu Deichbrüchen führen, ist wiederum abhängig von der Breschenbreite oberstrom. Sie ist für angenommene Breschenbreiten von > 300 m größer als 10000 Jahre (s. Abb. 2.50). Allerdings zeigt die Unsicherheitsanalyse, dass auch für solche Breschenbreiten Schäden im Polder auch bei kleineren Wiederkehrperioden möglich sind (s. Abb. 2.51).

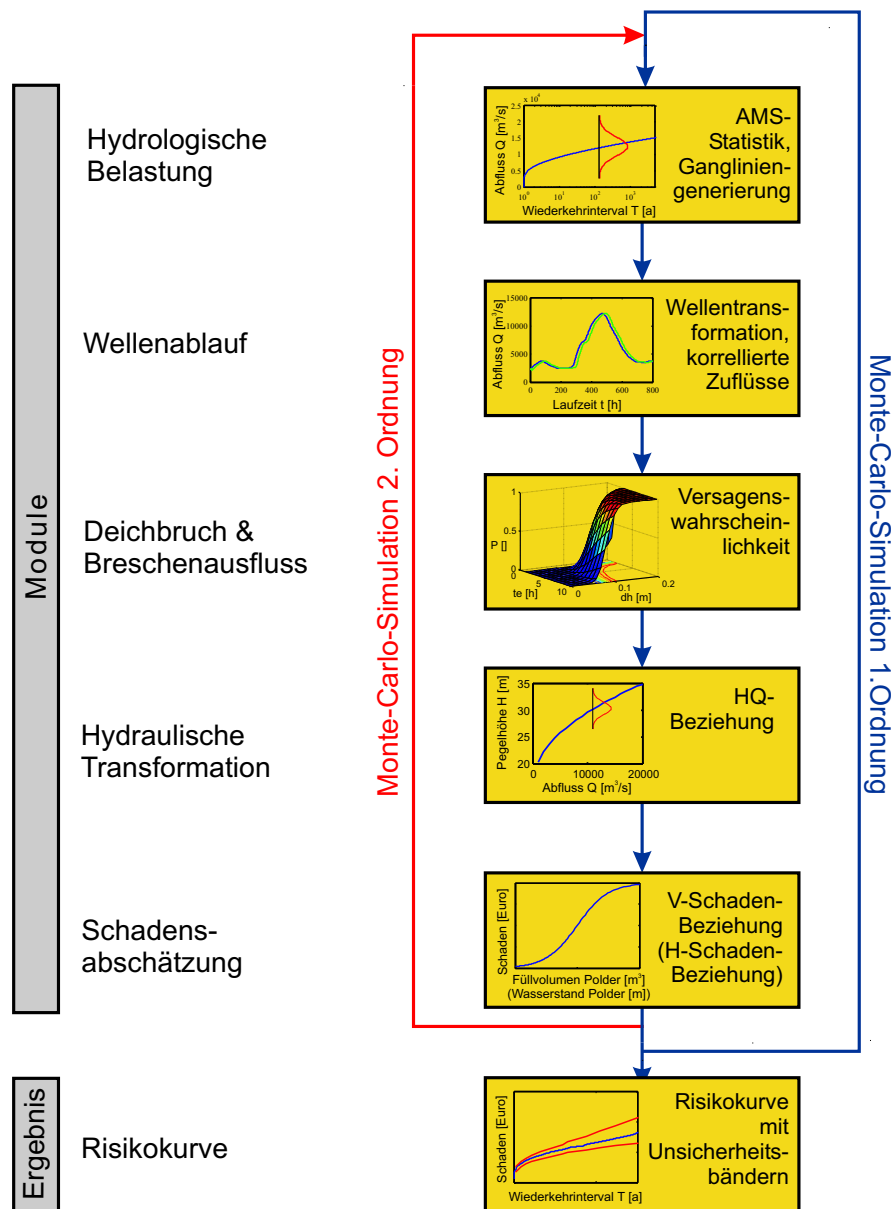


Abbildung 2.47: Schematische Darstellung des Modellsystems zur Ableitung der Risikokurven und assoziierter Unsicherheitsbänder im TP A4.2 (AMS: annual maximum series bzw. Serie der jährlichen Maximalabflüsse, Q: Durchfluss, H: Wasserstand, V = Volumen)

Es konnte gezeigt werden, dass das Modellsystem eine Quantifizierung des Hochwasserrisikos und der assoziierten Unsicherheiten ermöglicht. Aufgrund der vereinfachten Modellsätze kann das System mittels Monte-Carlo-Simulationen eine Vielzahl möglicher Hochwässer simulieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass Deichbrüche im Oberlauf die Bruchwahrscheinlichkeit im Zielgebiet und somit auch das Flutrisiko signifikant reduzieren. Durch das unbegrenzte Retentionsvermögen des Polders bei Krefeld wird nicht nur die Deichbruchwahrscheinlichkeit bei Mehrum reduziert, sondern auch die Hochwassergefährdung unterhalb der Bruch-

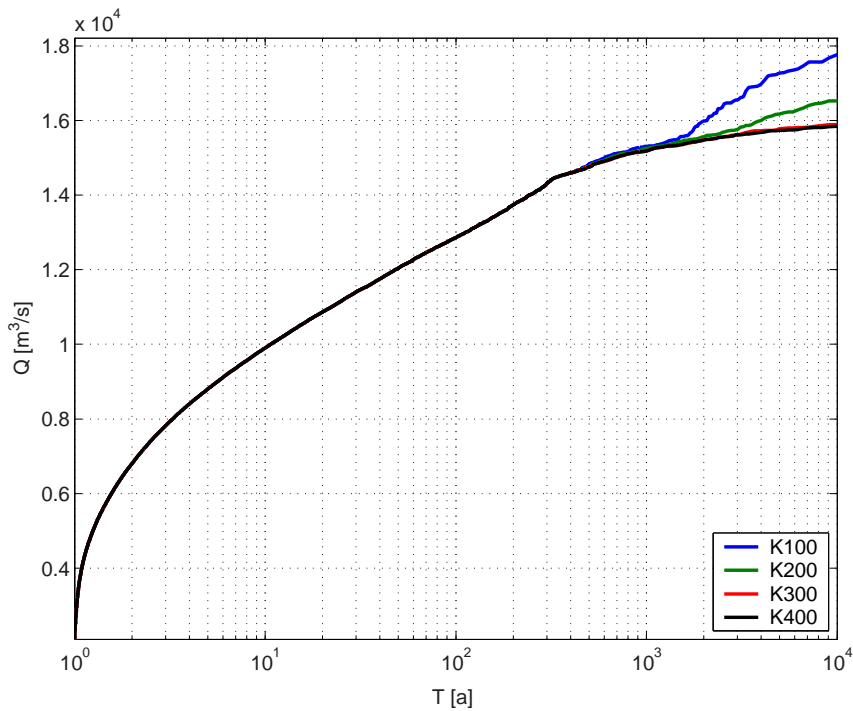


Abbildung 2.48: Wiederkehrintervalle T und jährlicher Maximalabfluss in Rees für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 in Krefeld, Rasenqualität $fg = 1.05$

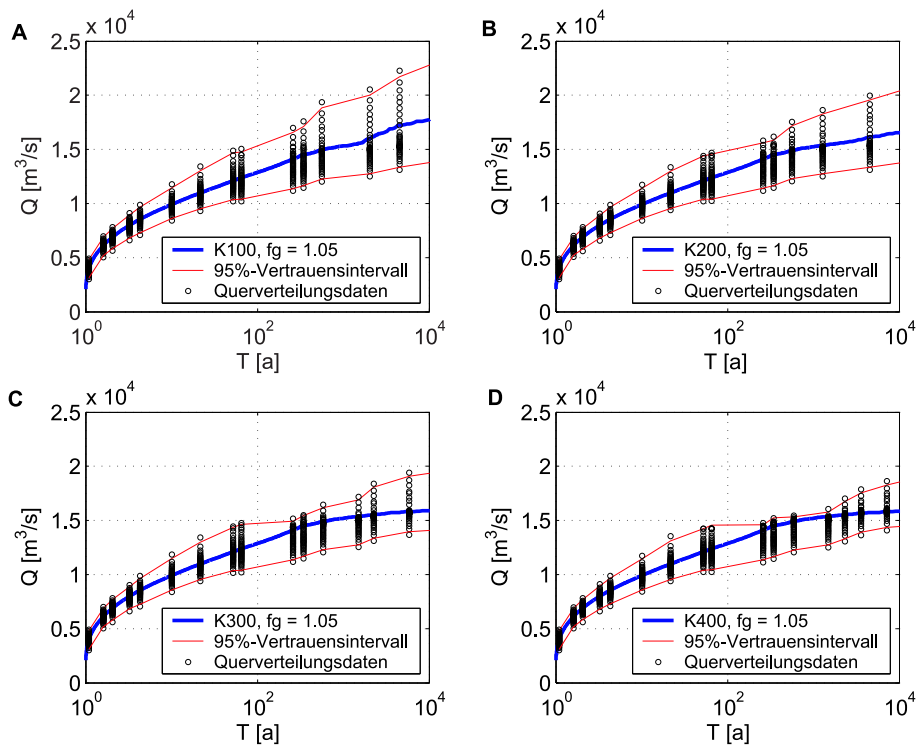


Abbildung 2.49: Unsicherheitsbänder für den Maximalabfluss bei Rees für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 (A - D), $fg = 1.05$

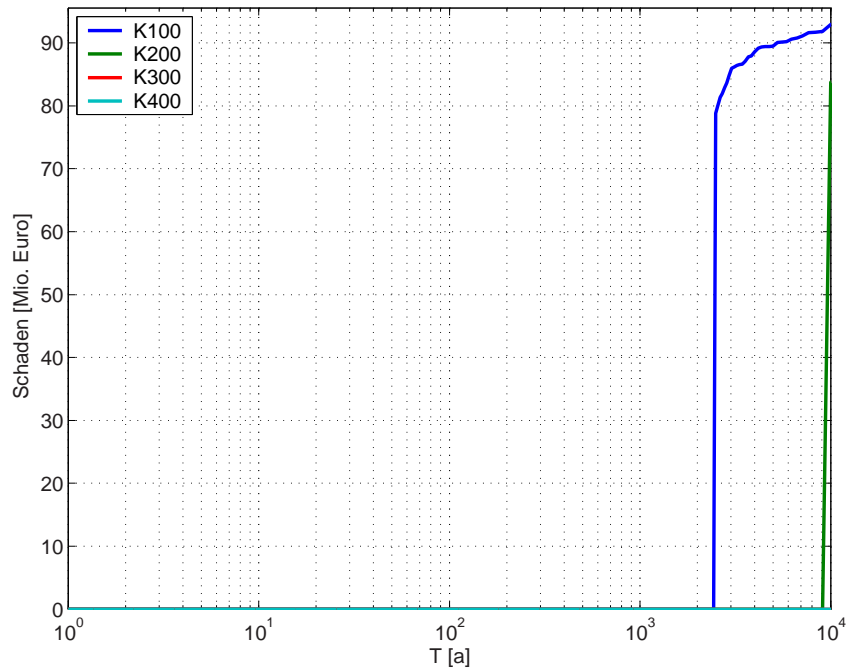


Abbildung 2.50: Wiederkehrintervalle T und zu erwartender Schaden im Polder Mehrum für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 in Krefeld, Rasenqualität $fg = 1.05$

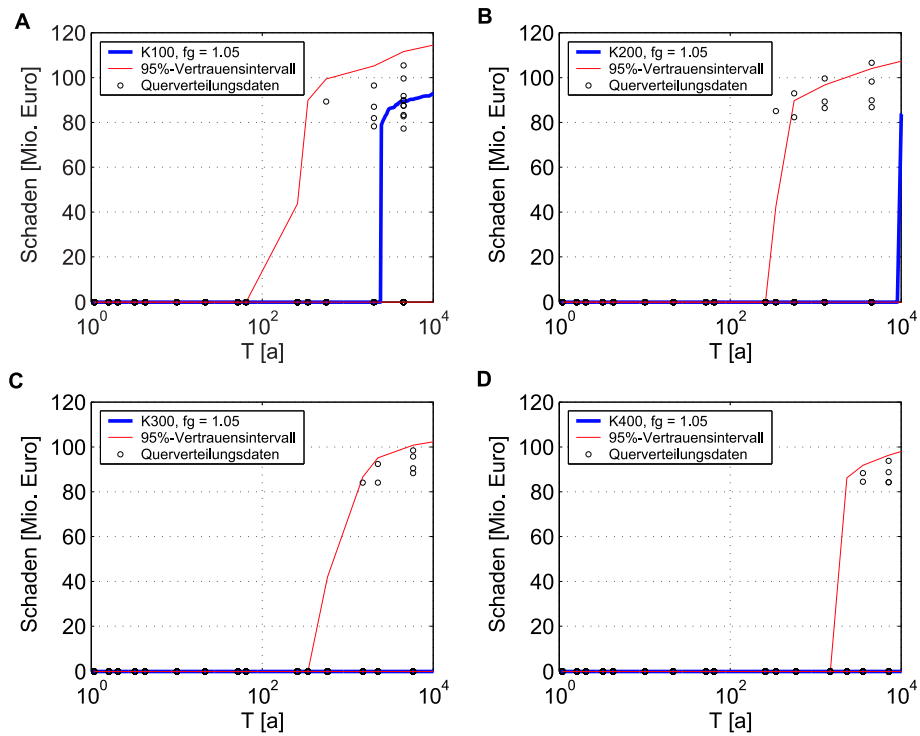


Abbildung 2.51: Unsicherheitsbänder für die Risikokurven für den Polder Mehrum für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 (A - D), $fg = 1.05$

stelle gedämpft. Bedingt durch die Deichbrüche bei Krefeld kristallisiert sich unterhalb eine Art „obere Grenze“ der Abflüsse heraus (s. Abb. 2.48).

Die Risikokurven für den Polder Mehrum weisen einen deutlichen Sprung von Null auf einen Schaden von über 90 Millionen Euro auf, sobald es zum Deichbruch kommt (s. Abb. 2.50). Dies ist bedingt durch die Mächtigkeit der Hochwasserschutzmaßnahmen und die extremen Flutereignisse, die erforderlich sind, um ein Deichversagen herbeiführen zu können.

Durch die hier vorgestellte Methodik zur Unsicherheitsanalyse konnten für die Hochwasserhäufigkeits- und Risikokurven Unsicherheitsbänder berechnet werden, die nachvollziehbar auf einer transparenten Daten- und Informationsbasis beruhen. Auffallend ist hierbei das breite Unsicherheitsband der Risikokurven (s. Abb. 2.51), das für Schäden mit einer Jährlichkeit von > 200 Jahren schon Deichversagen und folglich Schäden umfasst. Für Schäden mit einer Jährlichkeit > 2000 Jahren liegt die obere Grenze des Vertrauensbereiches schon in der Nähe des maximal möglichen Schadens, die untere Grenze hingegen bei Null. Dieses Verhalten wird durch die hohe Unsicherheit bei der Beschreibung der jährlichem Maximalabflüsse mit einer Jährlichkeit > 200 Jahren verursacht.

Für den Fall von unvollständigen Informationen bezüglich der Unsicherheitsquellen wurden Szenarienrechnungen durchgeführt. Dieses Vorgehen ermöglichte einen Überblick über die Spannweite der Modellergebnisse. Da die Unsicherheitsanalyse ausschließlich Unsicherheitsquellen umfasste, die auf unzureichendes oder gänzlich fehlendes Wissen zurückzuführen sind, kann man zur Reduzierung der Unsicherheit und Festigung der Modellaussagen folgende Empfehlungen für weitere Untersuchungen formulieren: (1) Untersuchungen zur Breschenbreitenentwicklung im Versagensfall, (2) bessere, quantifizierbare Beschreibung der Rasenqualität, d.h. der

Oberflächenrauigkeit oder des Erosionswiderstandes der Deichoberfläche bzw. Entwicklung eines physikalisch begründeten Ansatzes zur Berechnung des kritischen Deichüberflusses, (3) verbesserte Abschätzung von extremen Hochwasserabflüssen als einflussreiche Unsicherheitsquelle und (4) Entwicklung einer Methodik zur Abschätzung der Unsicherheit der Schadensfunktion.

2.9.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Aufgrund des modularen Aufbaus des Systems ist eine Übertragung auf andere Flussabschnitte möglich. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein der erforderlichen Datenbasis. Zusätzlich können einzelne Teile des Modellsystems für spezielle Fragestellungen herangezogen werden, so z.B. zur Untersuchung der Bruchwahrscheinlichkeit eines Deiches. Weiterhin können Teile des Modellsystems als Entscheidungshilfe im praktischen Katastrophenschutz dienen, indem durch Szenarienrechnungen der Einfluss von gezielten Deichbrüchen und Polderflutungen auf den Hochwasserverlauf unterstrom simuliert wird. Die Wirksamkeit solcher Notentlastungen wurde während des Sommerhochwassers im August 2002 durch die Flutung der Havelpolder unter Beweis gestellt.

2.9.7 Offene Fragen

Weiteren Forschungsbedarf gibt es besonders in drei Punkten: (1) bei der Beschreibung des Deichbruchmechanismus, insbesondere der Breschenbreiten, (2) bei der Ableitung der Wahrscheinlichkeit von extremen Ereignissen und (3) bei der Abschätzung von Hochwasserschäden. Der erste Punkt kann durch gezielte Forschung und Auswertung historischer Deichbrüche verbessert werden. Zur zuverlässigeren Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten sind die herkömmlichen statistischen Ansätze durch neuere Methoden zu ergänzen (Singh & Strupczewski 2002, Hall & Ander-

son 2002). Auch hinsichtlich der Ableitung von Schadensfunktionen und ihren Unsicherheiten sind tatsächlich eingetretene Hochwasserschäden systematisch zu sammeln und auszuwerten.

2.9.8 Literatur

Apel, H., Thielen, A., Merz, B. and Blöschl, G. (2004): Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty. *Natural Hazards and Earth Science Systems* 4, 295-308p.

Apel, H., Thielen, A., Merz, B., Blöschl, G. (2004b): A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Natural Hazards, Special Issue "German Research Network Natural Disasters"*, in print

Berga, L. (1995): Dams in river flood hazard reduction. *Proceedings of the ICOLD symposium; Reservoirs in river basin development*. Rotterdam, Netherlands, Balkema.

Bowles, D. S. (1996): Risk assessment approach to dam safety criteria. *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice*, ASCE: 451-473.

Hall, J., Anderson, M. (2002): Handling uncertainty in extreme or unrepeatable hydrological processes – the need for an alternative paradigm, *Hydrological Processes*, 16: 1867-1870

Plate, E. J. (1992): Stochastic design in hydraulics: concepts for a broader application. *Sixth IAHR International Symposium on Stochastic Hydraulics*, Taipei.

Singh, V.P., Strupczewski, W.G. (2002): On the status of flood frequency analysis, *Hydrological Processes*, 16: 3737-3740.

Stewart, M. G., R. E. Melchers (1998): *Probabilistic risk assessment of engineering systems*. London, Chapman-Hall.

Vrijling, J. K. (2001): Probabilistic design of water defense systems in the Netherlands. *Reliability Engineering and System Safety*, 74: 337-344.

Kapitel 3

Cluster Risikoanalyse Sturm

3.1 Einführung

Sturm ist wohl die am großräumigsten verbreitete Naturgefahr überhaupt. Wegen der gewöhnlich sehr großen räumlichen Ausdehnung der Sturmfelder summieren sich die Schäden nicht selten zu Milliardenbeträgen, auch wenn die mittlere Schadenhöhe in der Regel wesentlich niedriger liegt als z.B. bei einem großen Erdbebenereignis. Andererseits können die Zerstörungen im Zentrum eines Tornados ein Ausmaß annehmen, wie es selbst bei stärksten Erdbeben kaum beobachtet wird. Vor allem die Versicherungswirtschaft wird, weil die Deckung gegen Sturmschäden weltweit viel verbreiteter ist als die gegen jede andere Naturgefahr, von Sturmereignissen wesentlich häufiger und stärker in Anspruch genommen als von anderen Naturkatastrophen.

Die Abdeckung Europas mit hochaufgelösten Informationen über Sturmfelder historischer Zyklonen ist recht gering. Im TP A1 "Quantitative Ermittlung des Sturmrisikos für repräsentative Gebiete Deutschlands" wurde eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe die meteorologischen Bedingungen bekannter Sturmereignisse leicht modifiziert werden. Auf diese Weise werden abgewandelte synthetische Ereignisse erzeugt. Damit ist es möglich, die Abdeckung mit hoch aufgelösten Sturmfeldern zu erhöhen. Dies verbessert die Grundlagen für die regionale Untersuchung des Sturmrisikos.

3.2 Quantitative Ermittlung des Sturmrisikos für repräsentative Gebiete Deutschlands

Kai S. Radtke und Gerd Tetzlaff

*Universität Leipzig
Institut für Meteorologie
Email: radtke@uni-leipzig.de*

TP A1: Quantitative Ermittlung des Sturmrisikos für repräsentative Regionen Deutschlands in hoher räumlicher Auflösung

3.2.1 Zusammenfassung

Es wird eine Methode zur Generierung von Sturmszenarien vorgestellt. Mit Hilfe eines numerischen Modells werden Szenariogruppen zu historischen Zyklonen abgeleitet. Dabei werden die Antriebsdaten für das Modell so verändert, dass stärkere Sturmfelder erzeugt werden können. Damit ist es möglich, die Abdeckung mit Sturmfeldern zur Untersuchung des Sturmrisikos zu erhöhen. Weiterhin wird auf Basis einer Schadensfunktion der Münchner Rückversicherung beispielhaft für Köln das Schadensrisiko durch Sturm abgeschätzt.

Abstract

Using a numerical model, a method is described, which generates scenarios, based on historical storms. By changing the forcing data of the model the evolution of storms can be influenced. In this way amplified storm fields can be generated. The coverage by storm fields can be increased in order to analyse the storm risk. On the basis of a damage function of Munich Re an assessment of the storm risk in terms of economic damage is performed exemplary for the city of Cologne.

3.2.2 Veranlassung und Problem

Ereignisse, wie die Sturmserie vom Dezember 1999 oder die Orkane Anfang 1990 haben das Schadenspotenzial von Stürmen in Deutschland demonstriert. Beobachtungen zeigen, dass außertropische Zyklonen in Deutschland sowohl bei der Anzahl der Schadensereignisse als auch bei den volkswirtschaftlichen und versicherten Schäden den Spitzenplatz bei der Gefährdung durch alle Naturkatastrophen einnehmen (MüRü, 1999). Ihr Anteil beträgt ca. 53 % der gesamten volkswirtschaftlichen Schäden. Glücklicherweise sind Zyklonen mit verheerenden Wirkungen relativ selten. Das hat zur Folge, dass die Abdeckung mit Ereignissen nur

gering ist. Weiterhin stehen von länger zurückliegenden Stürmen keine räumlich hochaufgelösten Informationen zur Verfügung. Dies erschwert eine räumliche Abschätzung des Risikos bezüglich Sturmschäden.

3.2.3 Ziel

Ziel von TP A1 war die Entwicklung einer Methode zur Erzeugung eines Ensembles von Sturmszenarien. Die Methode basiert auf historischen Stürmen, die durch Variation der meteorologischen Bedingungen modifiziert werden. Das Hauptaugenmerk lag auf der Intensivierung vorhandener Ereignisse, d.h. es wurden Zyklonen mit verstärktem Sturmfeld

und damit erhöhtem Schadenspotential erzeugt. Hierzu wurden mit Hilfe des Lokalen Modells (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD, Doms und Schättler, 1999) Simulationen durchgeführt. Das LM ist ein numerisches Modell zur Simulation der Prozesse der Atmosphäre, das in der operationellen Wettervorhersage verwendet wird. Mit diesen künstlichen Ereignissen kann die Abdeckung Europas mit verheerenden Sturmereignissen, und die Vielfalt der auswertbaren Zugbahnen und räumlichen Erstreckungen von Sturmtiefs erhöht werden. Damit wird es möglich, Risikoabschätzungen zu verbessern.

3.2.4 Methode

Der DWD arbeitet bei seiner numerischen Wettervorhersage mit einer Modellkette von zwei Modellen. Das globale Modell GME simuliert die Atmosphäre der gesamten Erde. Mit diesem Modell werden Antriebsdaten für das eingebettete Modell LM erzeugt. Solche Antriebsdaten aus GME-Vorhersagen der Vergangenheit wurden im TP A1 genutzt.

Die eingesetzte Methode basiert auf der Modifizierung der Entwicklung von Tiefdruckgebieten. Hierzu wurden in den Antriebsdaten für das LM Faktoren variiert, die für die Zyklone (d.h. für die Entstehung und Intensivierung von Zyklonen) bedeutsam sind. Als Parameter bieten sich der horizontale Temperaturgradient und die Feuchteverteilung an. Zyklonen dienen dem Abbau der sich ständig erneuernden Temperaturgegensätze zwischen Äquator und Pol. Sie entstehen an Grenzzonen zwischen verschiedenen Luftmassen. Temperaturgegensätze auf einer Druckfläche sind ein entscheidender Antrieb für ihre Entwicklung. So wird hier die Temperatur in der Troposphäre (die unterste Schicht der Atmosphäre mit einer Mächtigkeit von ca. 10 km) verändert. Im Kaltluftbereich wird die Luft abgekühlt und im Warmluftbereich wird die Temperatur erhöht. Im Übergangsbereich wird dadurch der horizontale Temperaturgradient verstärkt. Der Wasserdampfgehalt wurde so angepasst, dass

die relative Feuchte konstant bleibt. Der Einfluss des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes wird durch Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit im Warmluftbereich variiert.

Modelle, deren Simulationsgebiet nur einen Ausschnitt der Atmosphäre umfasst, haben das Problem der künstlichen Seitenränder. Deshalb müssen je nach Anwendungszweck passende Randbedingungen formuliert werden. Beim LM wurde eine Relaxationsrandbedingung gewählt. Das Modell erhält dabei Informationen über den Wert der prognostischen Variablen zum Startzeitpunkt und über ihre zeitliche Entwicklung in Form dreidimensionaler Felder vom GME. Im LM werden dann am äußeren Rand des Modellgebiets, in den prognostischen Gleichungen zusätzliche Terme addiert, um die Simulation an die vorgegebene Entwicklung zu binden. Bei Modifikation der Temperaturverteilung würden sich die atmosphärischen Variablen (vor allem der Druck) im inneren Modellgebiet an die neue Situation anpassen, am Rand würde dies durch die Relaxation verhindert, was zu unrealistischen Randeffekten führen würde. Diese Vorgehensweise wurde angepasst, so dass die Randbehandlung im Modell beibehalten werden kann (Radtke, 2002).

Beim Eingreifen in die Temperaturverteilung zeigen sich Grenzen. Da Temperatur und Druck zusammenhängen, ist es unmöglich nur die Temperatur zu verändern und den Rest der Atmosphäre gleich zu belassen. Der Druck passt sich in der Anfangsphase der Simulation an die neue Temperatur an. Bei kleineren Eingriffen wird dadurch die meteorologische Gesamtsituation kaum geändert. Bei einer Erhöhung der Temperaturdifferenz von einigen Kelvin kann es während einer Anpassungsphase von 6 bis 8 Stunden zu unrealistischen Strukturen im Druckfeld kommen, welche dann auch unrealistische Windgeschwindigkeiten verursachen. Deshalb ist es angebracht, bei der Analyse der simulierten Windfelder die Anpassungsphase nicht mit einzubeziehen. Bei einer Erhöhung der Temperaturdifferenz von mehr als ca. 10 K kann die meteo-

rologische Situation sehr stark verändert werden. Es ist nicht sinnvoll, solch starke Eingriffe durchzuführen.

3.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Erzeugung von Sturmszenarien

Mit dem beschriebenen Vorgehen wurden für einige Tiefdruckgebiete Szenariogruppen erzeugt. Beispielhaft wird nun die Zyklone Ginger vom 27./28. Mai 2000 betrachtet. Zu Ginger wurde eine Gruppe von 13 Szenarien simuliert. Der Referenzlauf wurde mit den originalen Antriebsdaten durchgeführt. Für zwei Modellläufe wurde die relative Feuchtigkeit um 10% bzw. 20% bis zu einem Maximum von 99% erhöht. Für 8 Simulationen mit verstärktem Temperaturgegensatz wurde dieser um jeweils 1 K von 1-8 K verstärkt. Weiterhin wurden zwei Läufe mit verringerten Parametern, welche zur Zyklognese führen, durchgeführt. Einerseits wurde die relative Feuchtigkeit auf Null gesetzt, andererseits die Temperaturdifferenz um 2 K verringert.

Abb. 3.1a zeigt für alle Modellläufe die maximale Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund für die Dauer der Simulation. Zur Zeit des Höhepunktes des Sturms (ca. Stunde 9 bis 15) steigt der beobachtete Maximalwind im Windfeld der Ereignisse mit der Erhöhung der Temperaturdifferenz an. Die Werte für die Läufe mit erhöhter Feuchte sind denen des Referenzlaufes sehr ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die relative Feuchtigkeit im Referenzdatensatz bereits sehr hoch ist und großflächig nahe bei 100 % liegt. Eine weitere Verstärkung ist also nicht zu erwarten gewesen. Ein Blick auf den Verlauf des Kerndruckes in Abbildung 3.1b zeigt eine deutliche zusätzliche Vertiefung bei den Läufen mit verstärktem Temperaturgradienten. In den Abbildungen 3.1c und 3.1d sind die Maximalwindfelder des Referenzlaufs bzw. des Laufs mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz dargestellt. D.h. für jeden Punkt wurde der höchste Wert des 10 m Windes während des Ereignis-

ses (ohne Beachtung der ersten 6 h) abgebildet. Das Sturmfeld konnte deutlich verstärkt werden. Auch die anderen nicht dargestellten Simulationen zeigen eine Intensivierung des Windfelds mit der Verstärkung des Temperaturgegensatzes. Die Maximalwindfelder der Läufe mit erhöhter Luftfeuchtigkeit zeigen nur geringfügige Abweichungen vom Referenzlauf. Bei den Simulationen ohne Feuchte und mit verkleinerter Temperaturdifferenz ist die Entwicklung des Sturmfeldes deutlich abgeschwächt.

Der Bereich des Zentrums des Bodentiefs liegt im nördlichen also leicht abgekühlten Teil der Frontalzone, was einen Druckanstieg bei der Anpassung bedeuten müsste, welcher hier aber offensichtlich durch entgegenwirkende zyklogenetische Effekte übertroffen wird. Außerhalb des Kerngebiets im nordwestlichen Teil des Modellgebiets ist dieser Druckanstieg aufgrund der schwerer gemachten Luft zu beobachten. Die Mechanismen der Zyklognese (siehe z.B. Kurz, 1990) sollen im Folgenden im Referenzlauf und in den Läufen mit erhöhtem Temperaturgegensatz betrachtet werden. Werfen wir einen Blick auf die Temperaturadvektion. Den Modellvorstellungen der Zyklognese entsprechend herrscht vor und über dem Bodentief nach oben hin abnehmende Warmluftadvektion, was mit aufsteigenden Luftbewegungen verbunden ist, und hinter dem Tief nach oben zunehmende Kaltluftadvektion und Absinken. Diese Prozesse sind im Referenzlauf zu finden. Über und in Zugrichtung (ca. Nord) des Tiefs kann man eine Verstärkung der Warmluftadvektion in 850 hPa Höhe für die intensivierten Simulationen erkennen. In 500 hPa ist südlich des Tiefs eine deutliche Verstärkung der Kaltluftadvektion zu finden. Weiterhin ist eine Verstärkung des Aufwinds über dem Kerngebiet der Zyklone gegenüber des Referenzlaufs zu verzeichnen. Zusammen mit dieser aufsteigenden Luft muss in der Höhe aus Kontinuitätsgründen eine divergente Strömung auftreten, was eine Verringerung der Masse der Luftsäule und damit des Bodendruckes bedingt. Der Vergleich der Simu-

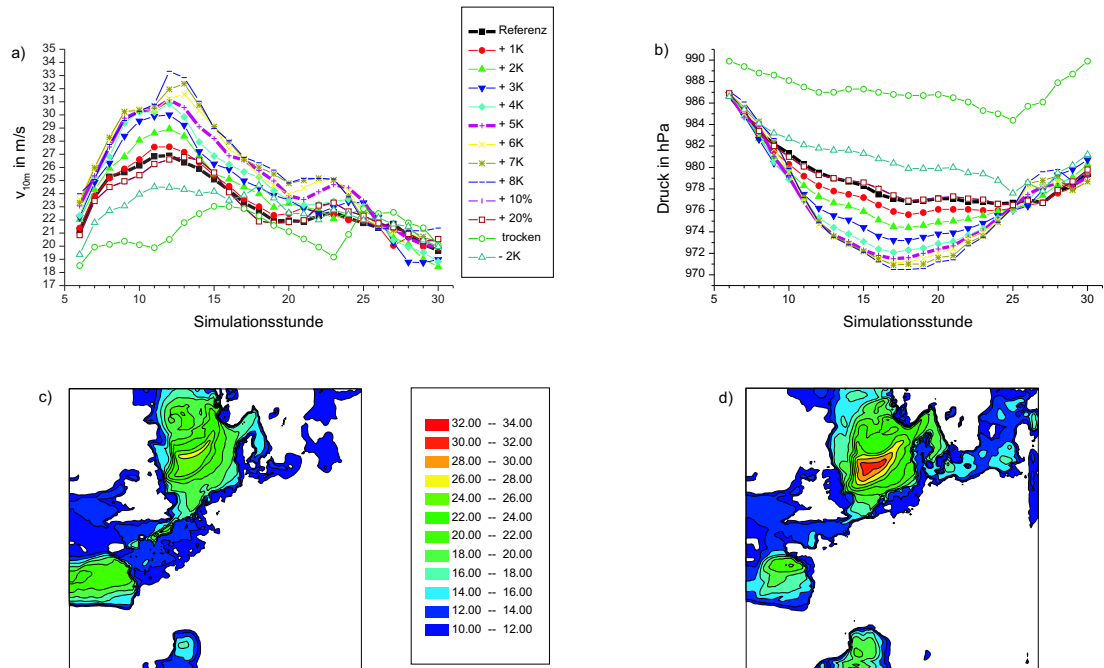


Abbildung 3.1: Die Szenariogruppe Ginger; a) Zeitliche Entwicklung der maximalen Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund. Hervorgehoben ist der Referenzlauf und der Lauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz; b) Zeitliche Entwicklung des Kerndruckes; c) Maximalwindfeld für den Referenzlauf in m/s; d) Maximalwindfeld für den Modelllauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz in m/s

lationen zeigt, dass die Verstärkung der Windfelder in Verbindung steht mit einer Intensivierung der zyklogenetischen Prozesse.

Weitere Experimente mit vier anderen Zyklonen (Anatol, Dezember 1999; Jeanett, Oktober 2002; Anna, Februar 2002; Helena, Oktober 2002) bringen ähnliche Ergebnisse. Mit Ausnahme der relativ schwachen Zyklone Helena handelt es sich bei allen um stark ausgeprägte Zyklonen mit hohen Windgeschwindigkeiten, Opfern und Schäden. Abb. 3.2a zeigt den Verlauf des Maximalwinds für die Szenariogruppe Anna. In der Verringerung der Windgeschwindigkeit ungefähr zwischen der 24. und der 32. Simulationsstunde ist der Durchzug des Sturmfeldes durch Dänemark aufgrund der bremsenden Wirkung des Landes zu sehen. Ein Blick in die Maximalwindfelder zeigt, dass die Sturmfelder über dem norddeutschen Raum bei den intensivierten Szenarien weiter nach

Süden vordringen. Abb. 3.2b zeigt die Zugbahn, d.h. den Verlauf des Punkts mit dem geringsten Druck für den Referenzlauf und den mit 5 K Temperaturdifferenz verstärkten Lauf.

Abschätzung des Schadens für die Sturmszenarien

Die Betrachtung der Sturmzyklonen soll hier auch unter dem Gesichtspunkt ihrer Schadenswirkung erfolgen. Um den erzeugten Sturmfeldern einen Schaden zuzuordnen, wurde eine Schadensfunktion der Münchner Rückversicherung verwendet, welche empirisch für Wohngebäudeschäden in Deutschland ermittelt wurde (MüRü, 1993, MüRü, 2001):

$$SS(v_B) = SS(80 \text{ km/h}) \cdot \left(\frac{v_B}{80 \text{ km/h}} \right)^\gamma \quad (3.1)$$

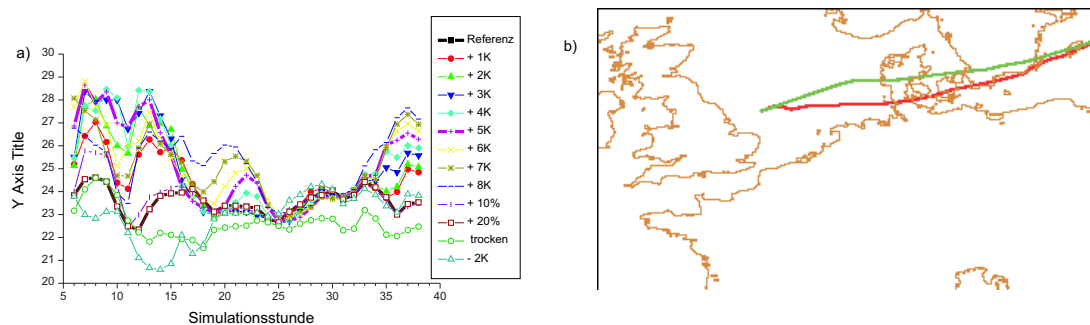


Abbildung 3.2: Die Szenariogruppe Anna; a) Zeitliche Entwicklung der maximalen Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund. Hervorgehoben ist der Referenzlauf und der Lauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz; b) Zugbahnen, d.h. Bewegung des Punkts mit dem tiefsten Druck im auf NN reduzierten Druckfeld.

wobei SS den mittleren Schadensgrad, also den Schaden geteilt durch den Neuwert, bezeichnet. Diese Gleichung (3.1) gilt für Windgeschwindigkeiten ab 80 km/h, unterhalb dieses Wertes treten in Deutschland keine flächenhaften Schäden auf. Die Windgeschwindigkeit v_B der Böen ist ein über eine größere Fläche (ca. 5 x 5 km) gemittelter Wert. Der Exponent γ bezeichnet die Zunahme des Schadensgrads abhängig von der Windgeschwindigkeit. Für ihn wurde ein Wert von 4,5 verwendet. Eine Differenzierung nach Küstengebieten und Binnenland, wie bei Klawa (2001), ist in diesem Schadensmodell nicht enthalten, da die Erfahrungen der Münchner Rückversicherung nicht bestätigen, dass bei gleichen Windgeschwindigkeiten in Küstenregionen geringere Schäden auftreten. Als Verteilung der Werte dient eine Abschätzung der versicherten Werte von Wohngebäuden und kommerziell genutzten Gebäuden. Der öffentliche Sektor, z.B. die Infrastruktur, ist nicht enthalten. Dem Modell von Wieringa (1973) folgend wurde aus den LM-Windgeschwindigkeiten eine Böengeschwindigkeit als Eingabegröße für die Schadensfunktion abgeschätzt.

Für den Orkan Anatol wird somit z.B. ein Schaden von ca. 240 Mio. € an versicherten Werten bestimmt (beobachtet wurden ca. 100 Mio. €). Dem Szenario Anatol mit $\Delta T = 8$ K wird ein Schaden von ca. 630 Mio. € zugeord-

net. Insgesamt wurden mit den Szenariogruppen maximale Windgeschwindigkeiten von ca. 30 – 40 m/s erreicht, dies entspricht Böen von ca. 50 – 65 m/s. Die abgeschätzten Schäden betragen bis zu 1000 Mio. €. Dazu muss gesagt werden, dass die betrachteten Zyklonen alle die Nordseeküste von West nach Ost entlang zogen. Eine Zugbahn ähnlich Lothar (Dezember 1999) quer durch Deutschland ist hier nicht enthalten. Jeanett allein verursachte in der Realität ca. 1000 Mio. € Schaden, der simulierte Orkan Jeanett brachte es auf ca. 770 Mio. €. Dem Szenario Jeanett mit $\Delta T = 8$ K konnte ein Schaden von ca. 1000 Mio. € zugeordnet werden.

Schadensrisiko am Beispiel von Köln

Als Beispielregion für die Abschätzung des Sturmrisikos wurde Köln ausgewählt, da sich hier die Möglichkeit ergibt, im DFNK das Gefahrenpotenzial des Sturmes mit den beiden anderen bedeutenden Naturgefahren Überschwemmung und Erdbeben zu vergleichen (siehe Kap. 7). Zur Abschätzung der Eintretenswahrscheinlichkeit extremer Windgeschwindigkeiten wurde eine 30-jährige Messreihe stündlicher 10-min Mittelwerte von 1971 bis einschließlich 2000 der synoptischen Station Köln/Wahn verwendet. Windgeschwindigkeiten mit hohen Eintretenswahrscheinlich-

ten werden oft mit der Weibullverteilung abgeschätzt. Sie ist zur Extrapolation von Werten für seltene Ereignisse nicht geeignet (Troen und Petersen, 1989). Die Extrapolation der Werte für große Wiederkehrperioden wurde sowohl mit Hilfe der in der Extremwertabschätzung beliebten Gumbelverteilung als auch mit dem speziell für Windgeschwindigkeiten entwickelten Verfahren nach Schmidt (1980) durchgeführt. Ein Vergleich der beobachteten Häufigkeiten für die 30-jährige Periode mit den nach Schmidt berechneten Werten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Mit der Gumbelverteilung wurde bei den seltenen Werten ebenfalls eine gute Übereinstimmung erzielt.

Abb. 3.3a zeigt die Extrapolation der Windgeschwindigkeiten bis zu einer Wiederkehrperiode von 500 Jahren bzw. bis 100 Jahren für das Verfahren nach Schmidt. Schmidt selbst gibt dies als Obergrenze an. Auf den ersten Blick scheinen die Schwellwerte für die angegebenen Eintretenswahrscheinlichkeiten zu gering zu sein, wurden doch z.B. während des Orkans Lothar (Dezember 1999) in Karlsruhe mittlere Windgeschwindigkeiten von bis zu 26,1 m/s gemessen. Die geringen Werte sind auf die windgeschützte Lage in der Kölner Bucht (Dütemeyer, 2000) zurückzuführen. So betrug z.B. die stärkste gemessene mittlere Geschwindigkeit innerhalb der untersuchten 30 Jahre 18,9 m/s (Orkan Wiebke im Jahr 1990).

Die Abschätzung der Böen und Schäden erfolgte analog dem oben beschriebenen Vorgehen mit dem Böenfaktor nach Wieringa und der Schadensfunktion der Münchner Rückversicherung. Die Abb. 3.3b zeigt die so abgeschätzten Schäden.

Unter den fünf mit dem LM simulierten Zyklonen befindet sich auch das Tief Jeanett. Jeanett wurde im Gegensatz zu anderen Sturmergebnissen von der Modellkette des DWD recht gut vorhergesagt. Da hier die Antriebsdaten des DWD verwendet werden, ist die Genauigkeit der Simulation von der Güte der GME-Vorhersage abhängig. Die maximale Windge-

schwindigkeit im Jeanett-Referenzlauf, repräsentativ für Köln, beträgt 14 m/s. Das liegt noch etwas unter dem gemessenen Wert von 16,4 m/s. Dem beobachteten Wert lässt sich eine Wiederkehrperiode von 13 Jahren (nach Schmidt) zuordnen (14 m/s entsprechen ca. einem Jahr). Das Szenario mit verschärftem Temperaturgegensatz um 5 K liefert für Köln Windgeschwindigkeiten von 16,2 m/s. Obwohl dies noch knapp unterhalb des beobachteten Wertes liegt, ist doch eine klare Verstärkung gegenüber dem Referenzlauf erreicht. Diesem entspricht eine Wiederkehrperiode von 11 a. Eine Schätzung des Schadens für das 11-jährliche Ereignis liefert versicherte Schäden von ca. 44 Mio. € für Köln.

3.2.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Mit der hier entwickelten Methode ist es möglich, die Anzahl der zur Verfügung stehenden Sturmereignisse für eine Untersuchung des regionalen Sturmrisikos zu erhöhen. Weiterhin kann das vorhandene Potenzial zur weiteren Verstärkung von aufgetretenen intensiven Zyklonen untersucht werden. Das ermöglicht Aussagen zum Auftreten maximaler Windgeschwindigkeiten an Zyklonen. Die Abschätzung des Schadenrisikos durch Stürme ging in die vergleichende Analyse der Naturgefahren Erdbeben, Hochwasser und Sturm für die Stadt Köln ein (siehe Kap. 7).

3.2.7 Offene Fragen

Die Anzahl von fünf Ereignissen ist noch klein. Vor allem fehlen südliche Zugbahnen, ähnlich der von Lothar. Weiterhin besteht das Problem der Abhängigkeit von der Qualität der Antriebsdaten. Ein Ereignis, welches vom GME unterschätzt wurde, ist in der Simulation eines getesteten Modells auch zu schwach. Die Zuordnung von Eintretenswahrscheinlichkeiten sehr seltener Ereignisse mit Wiederkehrperioden von 1000 und mehr Jahren ist unklar, dennoch kann ein solches Ereignis jeder-

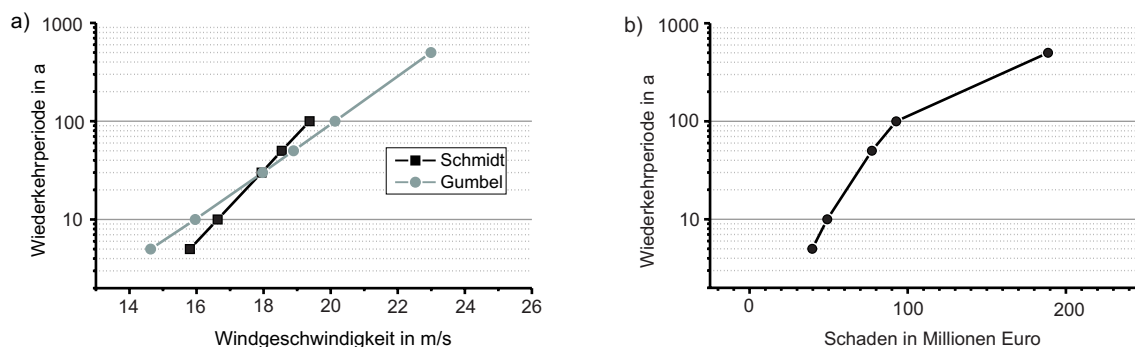


Abbildung 3.3: a) Extrapolierte Windgeschwindigkeiten für eine Wiederkehrperiode bis 500 a nach Schmidt und Gumbel; b) Abgeschätzte Sturmschäden. Bis zu einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren liegen die nach Schmidt extrapolierten Windgeschwindigkeiten zugrunde, für den 500 Jahreswert wurde die Gumbelverteilung verwendet.

zeit eintreten. Die Verwendung herkömmlicher Verfahren wie Gumbel ist bei der Kürze der vorhandenen Beobachtungsreihen nicht mehr sinnvoll. Ob ein Versuch der Simulation einer künstlichen Windreihe wie bei Dukes und Palutikof (1995) hier Abhilfe schaffen kann, ist nicht sicher.

3.2.8 Literatur

Doms, G. und U. Schättler, 1999: The Non-hydrostatic Limited-Area Model LM (Lokal-Modell) of DWD, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 172 S.

Dukes, M.D.G. und J.P. Palutikof, 1995: Estimation of extreme wind speeds with very long return periods, *J. Appl. Meteorol.* 34, S. 1950-1961.

Dütemeyer, 2000: Urban-Orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns, *Essener ökologische Schriften* 12, 171 S.

Kurz, M., 1990: Synoptische Meteorologie, Leitfäden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst 8, Offenbach, 197 S.

MüRü, 1993: Winterstürme in Europa – Schadensanalyse 1990 – Schadenspotentiale, *Münchner Rückversicherung*, München, 55 S.

MüRü, 2001: Winterstürme in Europa II - Schadensanalyse 1999 – Schadenspotentiale, *Münchner Rückversicherung*, München, 72 S.

Radtke, K.S., G. Tetzlaff, 2002: Untersuchung des Orkans Ginger mit dem Lokal Modell. *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig*, S. 56-66.

Schmidt, H., 1980: Zur Extrapolation empirischer Verteilungen der Windgeschwindigkeit für Standorte im Flachland und auf freier See, *Meteorolo. Rdsch.* 33, S. 129-137.

Troen, I. und E.L. Petersen, 1989: *European Windatlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, Dänemark, 656 S.

Wieringa, J., 1973: Gust Factors over open Water and built-up Country, *Boundary-Layer Meteorol.* 3, S. 424-441.

Kapitel 4

Cluster Risikoanalyse Erdbeben

4.1 Struktur, Konzeption und Bewertung der Arbeiten

Jochen Schwarz

*Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Email: schwarz@bauing.uni-weimar.de*

4.1.1 Situation

Die Arbeiten im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ gehen von folgender Bewertung der Situation aus (DGEB, 1999; siehe auch DFNK-Jahresbericht 2001):

- Die Erdbebengefährdung in der Bundesrepublik Deutschland ist im internationalen Vergleich als moderat bzw. gemäßigt einzuschätzen, sie ist vergleichbar mit der Gefährdung in den Nachbarländern Frankreich, Österreich und Schweiz. Im Unterschied zur Schweiz und Österreich ist jedoch nicht das gesamte Territorium durch Erdbebenzonen überzogen, in denen Baunormen erhöhte Anforderungen an die konstruktive Durchbildung der Bauwerke stellen und rechnerische Nachweise abverlangen können.
- Das Schadenspotential aus Erdbeben ist in der Bundesrepublik Deutschland erheblich und wurde bislang unterschätzt. Es genügen deshalb (verhältnismäßig) geringe Bebenstärken, um absolut gesehen erhebliche Schadenssummen zu erzeugen.
- Der Kenntnisstand zur Quantifizierung des Erdbebenrisikos ist unterentwickelt. Die Erdbebentauglichkeit des Gebäudebestandes oder dessen Verletzbarkeit sind nicht bekannt. Es fehlt eine diesbezügliche Aufnahme und Bewertung des Bauwerksinventars insbesondere in

den Haupterdbebengebieten und in den Großstadträumen Deutschlands.

- Die im Katastrophenfall „überlebenswichtigen“ Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen mit Bedeutung für die Katastrophenbewältigung (Krankenhäuser, Feuerwehrgebäude usw.) sind bisher nicht identifiziert oder hinsichtlich der Verletzbarkeit überprüft worden.

4.1.2 Zielstellungen und Teilaufgaben der seismischen Risikokartierung

Die flächendeckende Darstellung der möglichen Bebenwirkungen auf den vorhandenen Bauwerksbestand mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (GIS) wird hier als seismische Risikokartierung bezeichnet. Sie schließt die Realisierung unterschiedlicher Teilaufgaben ein, die im Schema der erforderlichen Bearbeitungsschritte, des Informationsflusses und der erforderlichen Verknüpfungen durch Abb. 7.1 veranschaulicht wird. (Dabei wird Bezug auf Abb. 38 des Jahresberichts 2000, S. 77 genommen.) Hervorzuheben sind:

- die Überführung der mit unterschiedlichen Eintretenswahrscheinlichkeiten zu erwartenden Bebenszenarien in ingenieurseismologische Kenngrößen;
- die Umsetzung der Untergrunddaten in ein mehrdimensionales Standortmodell;
- die Ermittlung der lokalen Verstärkungseffekte;

- die Bewertung der Bausubstanz sowie Einordnung der vorherrschenden Bauweisen in Verletzbarkeitsklassen;
- die Anpassung der Bauwerks-Verletzbarkeitsfunktionen an die Qualität der Bebauung;
- die Entwicklung geeigneter Methoden zur Verknüpfung der standortspezifischen Erdbebeneinwirkung und Bauwerksverletzbarkeit mit dem Ergebnis einer regional und lokal differenzierten Schadenserwartung;
- die Entwicklung einer Methode zur Abschätzung des monetären Verlustpotentials (*loss estimation*).
- Abschätzung der Schadenspotentiale im großräumigen Maßstab;
- Ableitung von Aussagen zu den Gebieten mit erhöhter Schadenwahrscheinlichkeit;
- Ermittlung des Ertüchtigungsbedarfs von Einzelobjekten;
- Bereitstellung von Planungs- und Entscheidungsgrundlagen.

Die Anzahl der an den einzelnen Teilaufgaben beteiligten Teilprojekte bzw. DFNK-Partner in Abb. 4.1 verdeutlicht nicht zuletzt die in Aufgabenbereichen bestehenden Kooperationsnotwendigkeiten. Die skizzierten Teilaufgaben decken sich mit den Zielstellungen der im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ involvierten Teilprojekte:

- Quantifizierung des Gefährdungspotentials von Erdbeben in Deutschland sowie des Risikopotentials in spezifischen Zielregionen;
- Entwicklung von Szenarien, algorithmische Verknüpfung der gesamten Wirkungskette von der Quelle bis zu den Bauwerks- und Infrastrukturschäden;
- Mikrozonierung des Testgebiets;
- Identifikation der im Katastrophenfall wichtigen Objekte (Feuerwehren usw.);
- Identifikation und Überprüfung sicherheitsrelevanter oder „versorgungsrelevanter“ Bauwerke der Lebenslinien (*life-lines*);
- Kartierung des Bauwerksbestandes und seiner Verletzbarkeit;

Im Rahmen des Bearbeitungszeitraums wurden mit gewissen Einschränkungen (u.a. bei der geotechnischen Risikokartierung und der monetären Quantifizierung des Schadenspotentials) alle relevanten Teilaspekte realisiert. Für das Untersuchungsgebiet Köln konnte durch die Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ ein Wertekataster erstellt und auf dieser Grundlage eine Verlustabschätzung für unterschiedliche Szenarien vorgenommen werden (siehe Kapitel 7).

4.1.3 Ergebnisse und praktische Verwertung

Durch die seismische Risikoanalyse und -kartierung werden auf unterschiedlichen Ebenen der Bearbeitung Ergebnisse bereitgestellt, die nicht nur wissenschaftlichen Ansprüchen gerecht werden, sondern auch auf Anforderungen aus den Bereichen des Planungswesens und der Katastrophenvorsorge reagieren. Diese Bearbeitungsstufen und ihre Inhalte sind Tabelle 4.1 zu entnehmen. Die Ergebnisse unterscheiden sich in der Qualität der Produkte und dem Aufwand ihrer Erstellung. Sie lassen sich im wesentlichen den Verantwortungsbereichen Seismologie/Geophysik (SEIS), Baugrund (UG), Ingenieurwesen (BAU) und Planungswesen-Wirtschaft-Soziales-Politik (WISP) zuordnen.

Die Struktur dieser Stufen beginnt mit der Aufbereitung und einfachen Reproduktion von verfügbaren Daten und mündet - wenn notwendig - in konkrete Maßnahmen (z.B. Er-

Stufe	Gegenstand	Ergebnis	
		Gebiet	Beschreibung
1	Aufbereitung und Reproduktion von verfügbaren Daten	SEIS	Historische Erdbeben; Kennzeichnung der Seismizität
		UG	GIS-Ebenen von Topographie, Untergrund; Bohrlochdaten, geologische Karten
		BAU	Aktualisierung des Bestandsunterlagen (Katasteramt); Kartierung des Gebäudebestandes (Zusammensetzung der Bauweisen)
2	Erfassung, Analyse und Interpretation von aufbereiteten Daten	SEIS	Festlegung von deterministisch begründeten Bebenszenarien
		UG	Ableitung eines räumlichen Tiefenprofils
		BAU	Bewertung und Kartierung der Verletzbarkeit der Bauwerke
3	Berechnung innerhalb einer Datenebene des GIS-Modells	SEIS	Festlegung von probabilistisch begründeten Bebenszenarien
		UG	Ermittlung und Kartierung der Standortperioden
		BAU	Ermittlung und Kartierung der Bauwerksperioden (empirisch, messtechnisch bestimmt); Ableitung bauweisenspezifischer Verletzbarkeitsfunktionen
4	Verknüpfung von mehreren Datenebenen des GIS-Modells (Diagnose)	SEIS	Definition von Modellbeben und ihrer ingenieur-seismologischen Kenngrößen
		UG	Standortanalysen: Berechnung und Kartierung der spektralen Antwortbeschleunigungen in charakteristischen Bereichen der Bauwerksperioden
		BAU	Berechnung von Bauwerksreaktionen (z.B. maximale Geschossverschiebungen für einzelne Bauwerkstypen)
5	VERKNÜPFUNG von mehreren Datenebenen des GIS-Modells (Prognose)	BAU	Schadenserwartung (Schadensgrad d für das Einzelobjekt; mittlerer Schadensgrad d_m für ausgewählte Gebiete z.B. des Flächennutzungsplanes)
		WISP	Verluste (<i>loss estimation</i>)
6	Maßnahmen	BAU	Ertüchtigungsbedarf (Synopsis der Naturgefahren)
		WISP	Kapazitäten-, Routen-, Einsatzkräfteplanung; zeitlich gestaffeltes Aktionsprogramm; Klärung von Zuständigkeiten sowie der Möglichkeiten des Zusammenwirkens

Tabelle 4.1: Bearbeitungsstufen im Rahmen der seismischen Risikoanalyse (Schwarz et al. 2002).

men von DFNK jedoch nicht erstellt werden. Strainfelddaten erwiesen sich als zu grob bzw. zu ungenau für deren Einbeziehung.

Regionaler (kleinräumiger) Maßstab Insofern ist hervorzuheben, dass es TP B1 durch Auswertung neuester Daten vornehmlich aus Belgien und den Niederlanden (und zum geringen Teil vom damaligen Geologischen Landesamt NRW) gelungen ist, entsprechende Gefährdungskarten für das gemeinsame DFNK-Testgebiet (Region Köln erweitert bis Aachen)

vorzulegen. Für die Stadt Köln und Umgebung wurde eine Karte der Mikrozonierung auf der Basis einer Vielzahl der für die Region vorhandenen geologischen, tektonischen, hydrologischen und bodenphysikalischen Daten erstellt (TP B2.3) und durch seismologische Messungen verdichtet bzw. auch abgesichert. Auf Grundlage dieser Ergebnisse konnte der Abbildungsmaßstab der Gefährdungskarten (TP B1) verbessert und eine höhere (lokale) Aussagequalität erreicht werden.

Die Karten zu den Bodenresonanzfrequenzen und Schichtmächtigkeiten im Raum Köln verdeutlichen, wie auf der Grundlage verfügbarer Informationen und unter Nutzung der Ergebnisse anderer Forschergruppen eine Verifikation des Tiefenprofils vorgenommen werden kann (TP B2.1). Auf diesen Untersuchungen basierend wird im mesoskaligen Maßstab eine Differenzierung der Untergrundprofile angeboten (TP B2.2).

Instrumentelle Auswertungen und Simulationen im Rahmen der Teilprojekte B2 bilden eine wesentliche Voraussetzung zur Präzisierung der seismischen Kenngrößen für die ingenieurorientierten Projekte des Clusters. Simulationen zur Wellenausbreitung (auf Basis von Beben der jüngeren Vergangenheit und unter Zugrundelegung von vier das Testgebiet kreuzenden Tiefenprofilen) werden soweit qualifiziert, dass im Raster über das Untersuchungsgebiet verteilt Bodenbewegungs-Zeitfunktionen zur Verfügung stehen (TP B 2.2), die auch als Einwirkungsmodell für die Analyse von Ingenieurbauwerken mit erhöhtem Risikopotential, wie z.B. Brücken (TP B4), geeignet sind.

Lokaler Maßstab Die Schadensszenarien für die Stadt Köln werden unter Berücksichtigung der historischen Beben­tätigkeit und der geologischen Bedingungen (Störungen) zunächst für unterschiedliche Epizentren aufbereitet. Bebenszenarien werden in der Form kombiniert, dass die für die Koordinaten des Stadt­zentrums von Köln probabilistisch berechneten Intensitäten (TP B1) mit den Intensitäten infolge deterministischer Szenarien übereinstimmen. Die Verletzbarkeit des Bauwerkbestandes wird vornehmlich auf empirischem Wege auf Grundlage der Europäischen Makroseismischen Skale EMS-98 bewertet, wobei hier Erfahrungen aus anderen Erdbebengebieten bezüglich des Verhaltens der Bausubstanz übertragen werden (TP B3.1).

Die Bauwerksaufnahme und Abschätzung der Bauwerksverletzbarkeit bilden die entscheidende Voraussetzung, um die Schadenspoten-

tiale quantifizieren und in einem weiteren Bearbeitungsschritt durch Risikoaussagen bzw. Verlustgrößen präzisieren zu können (TP B3.1, B3.2). Diese Arbeiten können durch die satellitengestützte Charakterisierung und Inventarisierung der Objekte (TP C1) eine wesentliche Unterstützung erfahren. Ergebnisse werden u.a. für ein überschaubares kleinräumiges Testgebiet in Ostthüringen vorgelegt.

Punktuelle Maßstab (Einzelobjekte)

Numerische Simulationen von Erdbeben-Szenarien ermöglichen auf der Basis probabilistisch begründeter Gefährdungskenngrößen eine realistische Erfassung der seismischen Bodenbewegungen im Bereich sicherheitsrelevanter Einzelobjekte. Die Identifikation kritischer oder im Ereignisfall „lebenswichtiger“ Bauwerke mit erhöhtem Erdbebenrisiko sowie die Analyse ihrer Vulnerabilität wird auf die Infrastruktur ausgerichtet, deren Erhaltung und Funktionstüchtigkeit im Katastrophenfall für die schnelle Einleitung von Hilfsmaßnahmen essentiell ist. Untersuchungen zur Bewertung des Risikopotentials von Bauwerken mit besonderem Sicherheitsanspruch konzentrieren sich auf die Brücken- und Verbindungswege (TP B4). Weitere Objekte der „Lebenslinien“ (u.a. Behälter), chemische Anlagen u.ä. wurden aus Kapazitätsgründen von vornherein ausgeblendet. Zum Zwecke des Katastrophenmanagements wird für das Testgebiet Köln ausgehend von den Analysen zur Erdbebentauglichkeit der Rheinbrücken ein Rettungswegenetz (Verbindungswege zu Krankenhäuser, Feuerwehren) entwickelt.

Clusterbildung

Es gehört zu den wesentlichen Leistungen der im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ beteiligten Projekte, den Datenfluss zwischen den verschiedenen Ebenen gemäß Abb. 4.1 organisiert und zwischen Partnern im Sinne eines Netzwerkes hergestellt zu haben. Die im Jahresendbericht 2001 bereits konstatierte Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen den Teil-

projekten hat sich kontinuierlich entwickelt und die beginnende Vernetzung zwischen den Projektpartnern erkennen lassen. Dabei war es in Vorbereitung des DFNK-Workshops Juni 2002 und durch entsprechende Präsentationsvorlagen gelungen, die Ziele der Teilprojekte zu präzisieren und Bewertungskriterien für die Qualität der Ergebnisse (auch im Sinne ihrer Eignung als Eingangsdaten für andere Teilprojekte) zu formulieren.

Als maßgebliche Meilensteine der Clusterbildung und Abstimmung zwischen den Projektpartnern sind, da sie auch mit einem erheblichen zeitlichen Aufwand verbunden waren, zu nennen:

- die Arbeitsberatungen des Clusters „Risikoanalyse Erdbeben“;
- die Vorbereitung und redaktionelle Begleitung der jeweils Clusterübergreifenden Zusammenschau der Ergebnisse und Produkte sowie des erreichten Grades des Zusammenwirkens bzw. der Vernetzung (DFNK-Workshops Juni und Oktober 2003);
- die Mitwirkung in der Arbeitsgruppe „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“ und die Qualifizierung der Bewertung aller Teilprodukte bzw. Produkte aus dem Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“;
- die Arbeitsberatungen der AG „Synopsis der Naturgefahren“;
- die zusammenfassenden Kurzberichte für den Lenkungsausschuss.

Zur Mitwirkung in der Arbeitsgruppe „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“ Die vom Projektmanagement initiierte „Potenzialanalyse“ trug dazu bei, sich stärker mit den (auch zeitlich) verschiedenen Wirkungsebenen der Teilprojekte auseinander zu

setzen und die Ergebnisse bezüglich der Nutzerrelevanz, aber auch nach anderen Kriterien zu bewerten (z.B. Beitrag und Bedeutung innerhalb der Wirkungskette Erdbeben). Durch die Mitwirkung in der Arbeitsgruppe „Transfer der DFNK-Ergebnisse in die Praxis“ wurde eine qualifizierte Bewertung aller Teilprodukte bzw. Produkte aus dem Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ erreicht.

Zur Mitwirkung in der Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ Von Bedeutung für den Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ war die mehr als zwei Jahre auf freiwilliger Basis und über den Förderzeitraum hinaus tätige Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“, in der die Risiken der verschiedenen Naturgefahren miteinander verglichen wurden. Die Diskussionen zeigten bei Beschränkung auf den Ingenieurbereich, dass insbesondere bei der Bewertung der Bauwerksverletzbarkeit und der Ableitung der Konsequenzen für die Bauwerkstüchtigung Projektpartner aus den Bereichen Wind und Hochwasser fehlten, um einen Synergieeffekt für die einzelnen Naturgefahren zu erreichen. Durch die Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ konnte ein solcher Beitrag nur ansatzweise geleistet werden.

4.1.4 Offene Fragen und weiterführende Arbeiten

Das Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ hat im Laufe des Projekts die notwendige Zusammenarbeit zwischen den Teilprojekten und ein (durchaus nicht reibungsfrei gewachsenes) Verständnis für die Arbeitsweisen und -inhalte anderer Fachgebiete erreicht. Da diese auch an die Bearbeiter der Teilprojekte gebunden sind, bedeutet das Ende des Vorhabens einen Kompetenzverlust im Forschungsnetz. Ungeachtet dessen darf nicht übersehen werden, dass eine Weiterführung von Teilaktivitäten interessante Ergebnisse geliefert hätte oder entsprechende Ergebnisse innerhalb der Laufzeit der Vorha-

ben nicht erreicht wurden. Als Beispiel sind zu nennen:

- die konsequente Umsetzung der Szenarien unterschiedlicher Wiederholungsperioden;
- die Begründung von Rettungswegen, exponierter Infrastruktur und *life-lines* als Ergebnis der durchgespielten Szenarien;
- die Kartierung geotechnischer Risiken;
- der Vergleich der seismischen Einwirkungen für das Testgebiet nach unterschiedlichen methodischen Ansätzen in TP B2 und die Abgrenzung der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Hilfsmittel in Situationen mit heterogener Untergrundsituation und begrenzter Detailkenntnis;
- die Entwicklung spezifischer, auf die einzelnen Naturgefahren und ihre extremen Einwirkungen ausgerichteter Maßnahmen und mittelfristiger Strategien für die herausgearbeiteten Hauptgefährdungszonen;
- die Ableitung von Empfehlungen für die Hauptgefährdungszonen der Stadt Köln.

Dass diese Auflistung vornehmlich aus dem Ingenieurbereich abgeleitet ist, und womöglich nicht die Prioritäten anderer Bereiche repräsentiert, sei entschuldigend eingestanden, darf aber auch als Aufmunterung zu weiterführenden Diskussionen verstanden werden.

4.1.5 Literatur

Schwarz, J., Raschke, M., Maiwald, H. (2002): Seismische Risikokartierung auf der Grundlage der EMS-98 – Fallstudie Ostthüringen. Tagungsband zum 2. Forum Naturkatastrophen 25. bis 27.09.2001, Leipzig, S. 325-336.

DFNK-Jahresbericht (2001): Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“. Ziele, Aufbau und Organisation im Cluster, Kooperationen und Ideen

für weiterführende Projekt. Bericht J. Schwarz (Hrsg. B. Merz, J. Friedrich), 69-76, Potsdam, März 2002.

DGEB (1999): Erdbebensituation Deutschland: Gefährdung, Risiko, Forschungs- und Handlungsbedarf. Positionspapier des Vorstandes der Deutschen Gesellschaft für Erdbebeningenieurwesen und Baudynamik (DGEB). D-A-CH-Mitteilungsblatt Band 18, Nr. 1, S. 6 – 10.

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 (Musson 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:

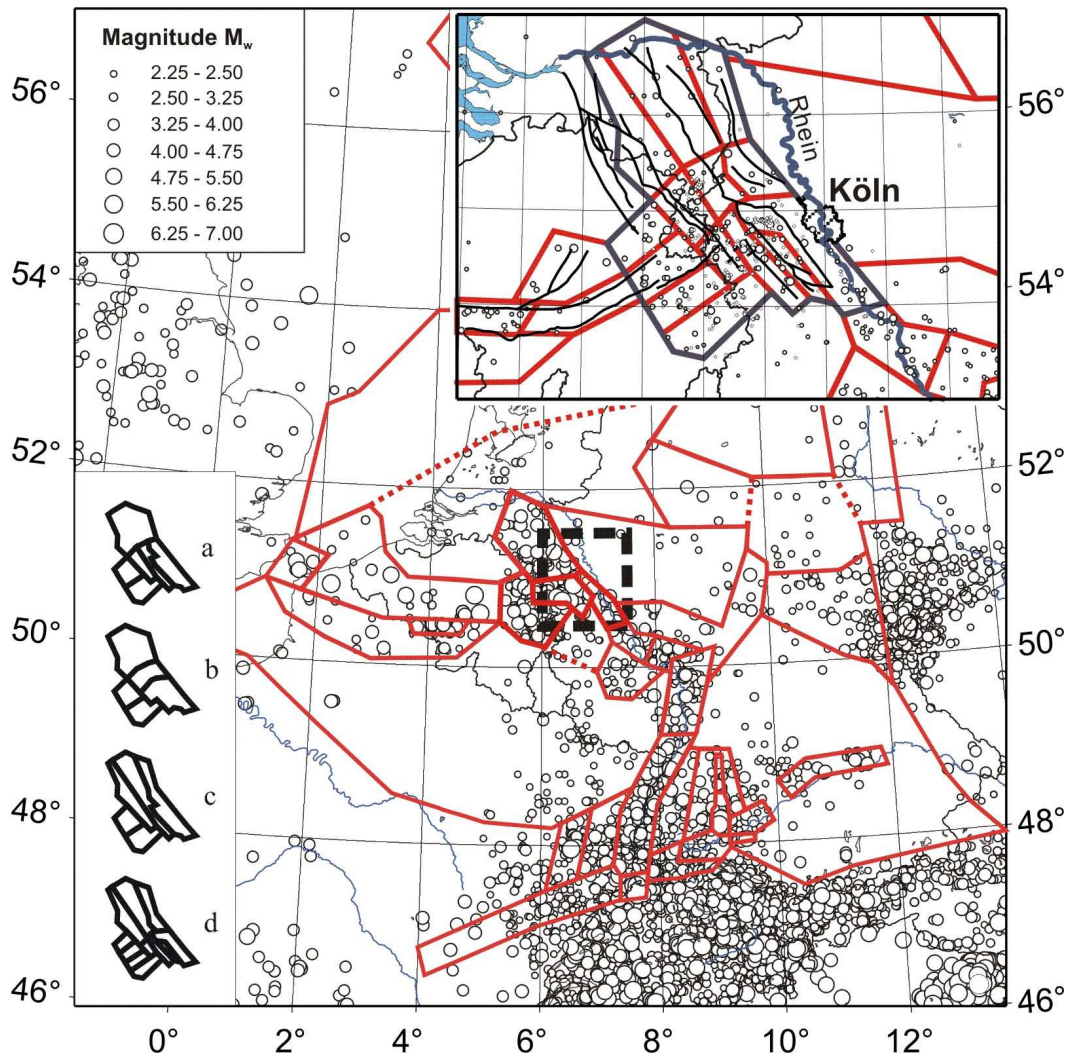


Abbildung 4.2: Verwendete Quellregionenmodelle der Gefährdungsberechnung. Modell Gr ist eine Untermenge des D-A-CH Modells (Grünthal et al., 1998). Die Modelle Ga, Gb, Gc und Gd sind unterschiedliche Kombinationen der neuen, detaillierten Zonierung der Niederrheinischen Bucht mit dem D-A-CH Modell. Nicht 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);
- Neue Regionalisierungsmodelle der seismischen Quellzonen für die Niederrheinische Bucht (vgl. Abb. 4.2);
- Makroseismische EMS-98 Intensitäten (Grünthal, 1998), die eine direkte Umsetzung in Schadensgrade und damit Verlustgrößen gestatten, womit ein unmittelbarer Zugang zur Risikobewertung gegeben ist;
- Spitzenbodenbeschleunigungen und Pseudobeschleunigungen von Antwortspektren bei Perioden von $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$ für Festgesteinsoberflächen und Spitzenbodenbeschleunigungen für Sande;

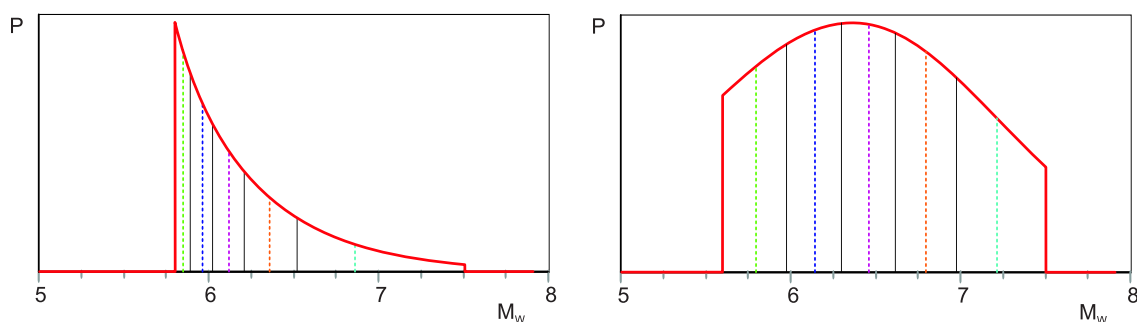


Abbildung 4.3: Beispiele zweier a posteriori Verteilungsfunktion, die jeweils einen Satz maximal erwarteter Magnituden beschreiben. Der untere Grenzwert ist die größte in dieser Zone beobachtete Magnitude/Intensität, der obere Grenzwert errechnet sich nach der Relation von Wells und Coppersmith (1994).

- 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 Fraktilen, die die Streuung der Lösungen beschreiben. Abb. 4.5 zeigt die Gefährdungseinschätzung für Köln in Form des Mittelwertes, Medians sowie des Medians ± 1 Standardabweichungs-Fraktilen (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% Fraktilen der Spitzenbeschleunigung bzw. die Pseudobeschleunigung bei $T = 0,4s$ und $T = 1,0s$ für die gleiche Wiederholungsperiode dar. Die Median-

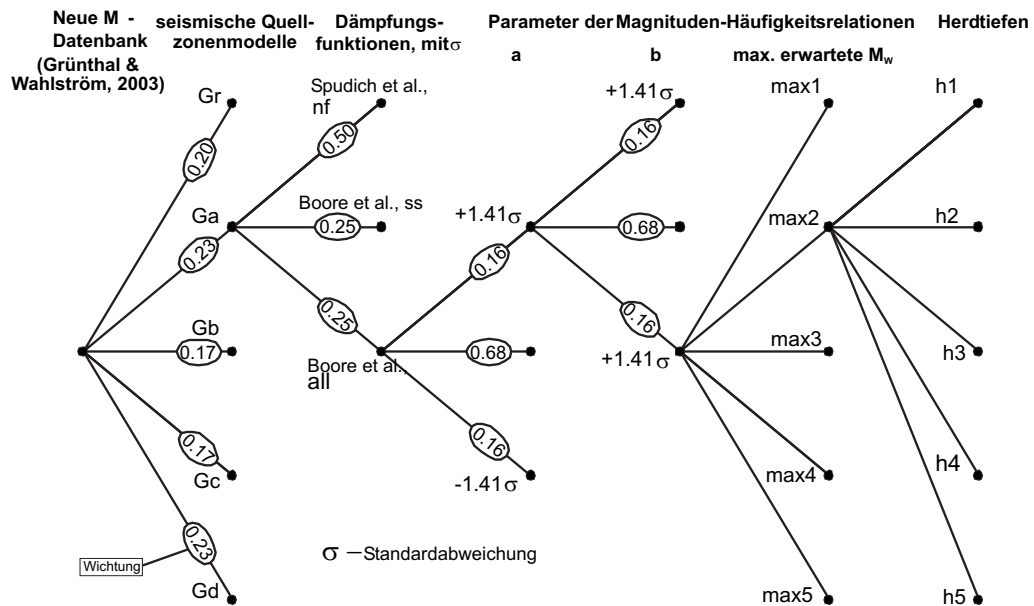


Abbildung 4.4: Entscheidungsbaumstruktur der Eingangsdaten für die Gefährdungsanalyse auf der Grundlage von Beschleunigungen (Spitzenbeschleunigung, $0,4s$ und $1,0s$ Pseudobeschleunigung). Die Herdzone Modelle werden in Abb. 4.2 gezeigt. Die Dämpfungsfunktionen wurden in Abschnitt 3 vorgestellt. Die 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

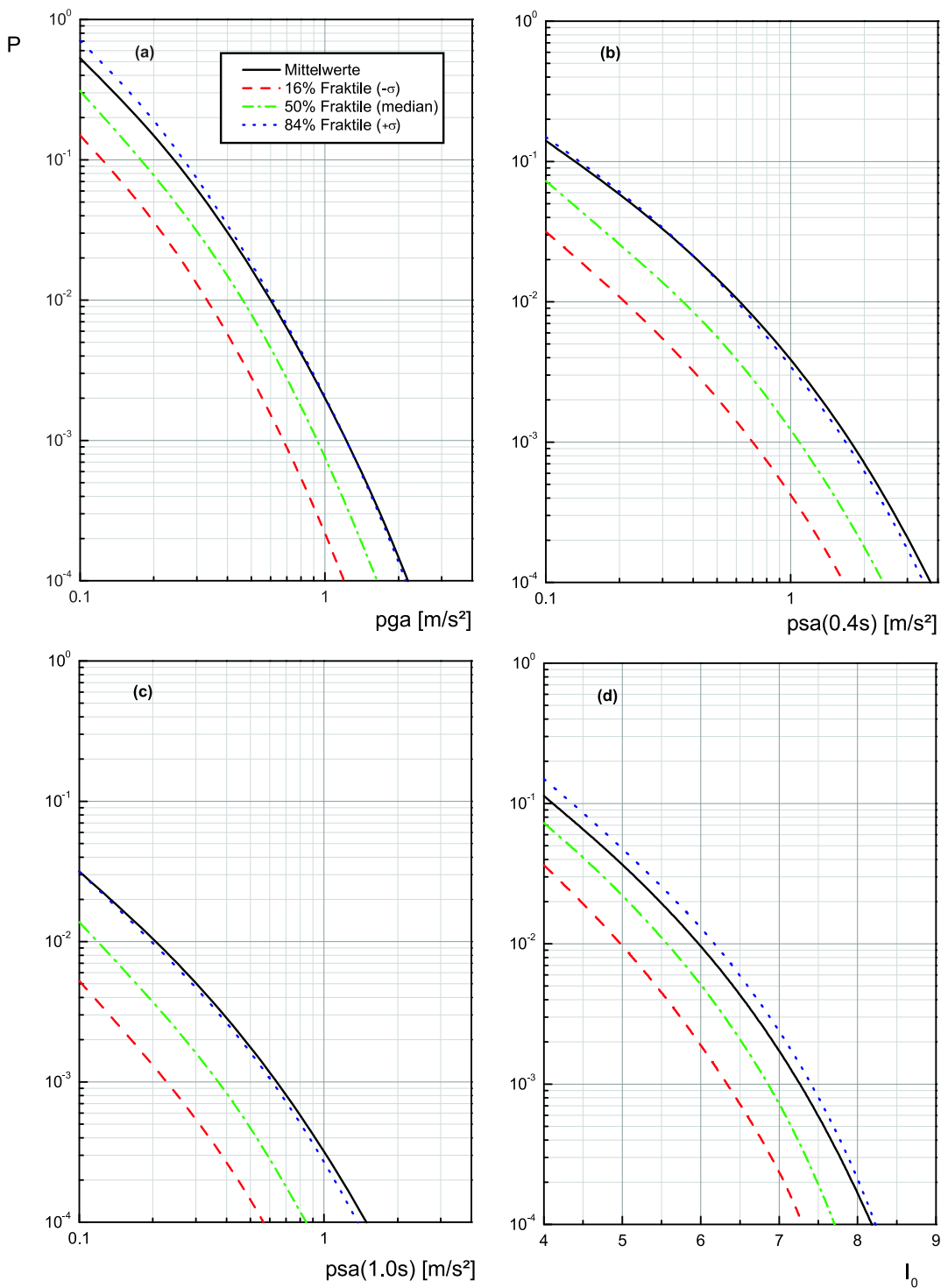


Abbildung 4.5: Mittel, Median und Median \pm 1 Standardabweichungs-Fraktile (84% und 16%) der Gefährdungskurven für Köln (6.95°E, 50.93°N) basierend auf: (a) Spitzenbeschleunigung (pga); (b) 0,4s Pseudobeschleunigung (psa); (c) 1,0s Pseudobeschleunigung und (d) Intensität (I_0) unter Annahme einer Festgesteinsoberfläche.

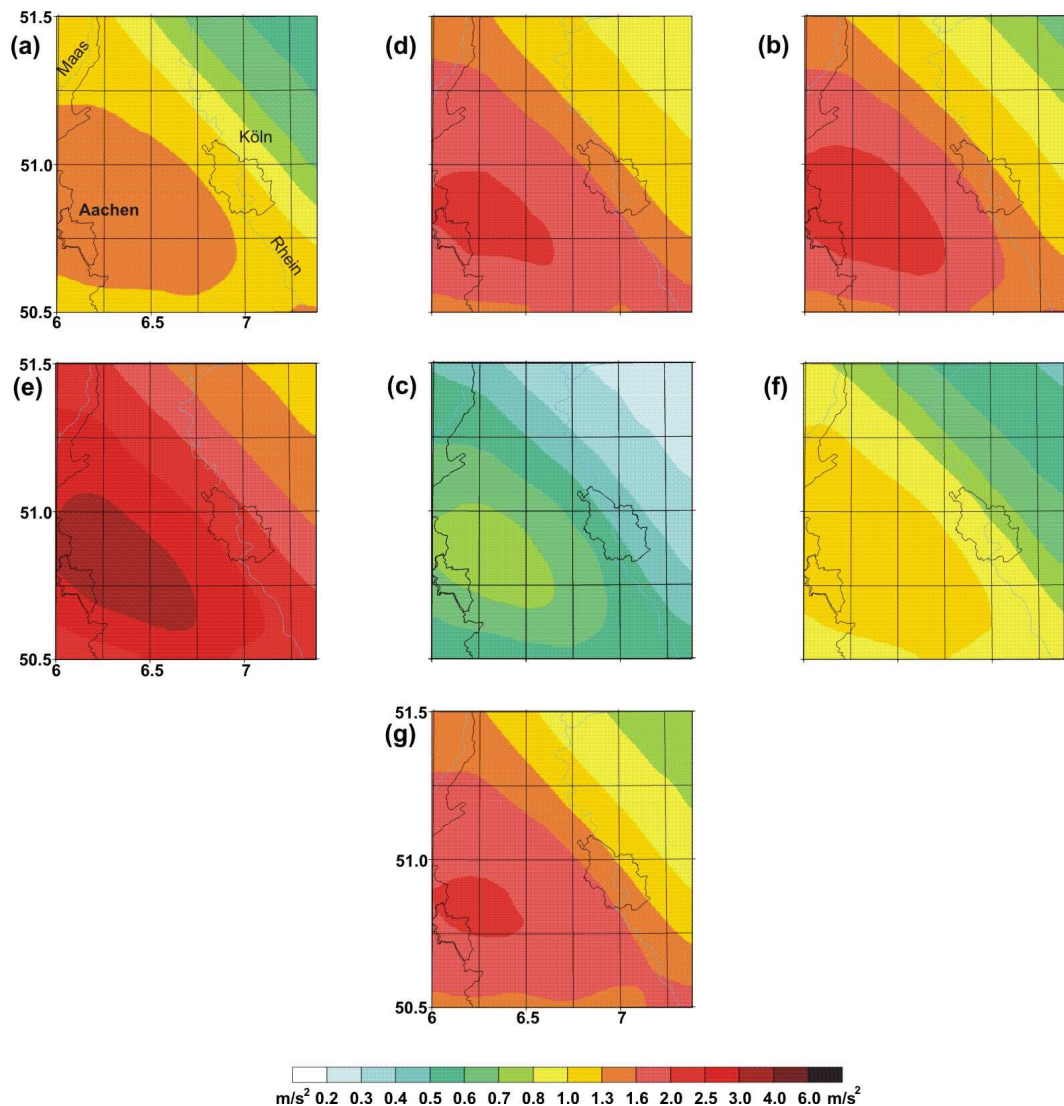


Abbildung 4.6: Erdbebengefährdungskarten der Region Köln/Aachen für eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren: (a) Spitzenbeschleunigung, Median, Festgestein; (b) 0,4s Pseudobeschleunigung, Median, Festgestein; (c) 1,0s Pseudobeschleunigung, Median, Festgestein; (d) Spitzenbeschleunigung,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

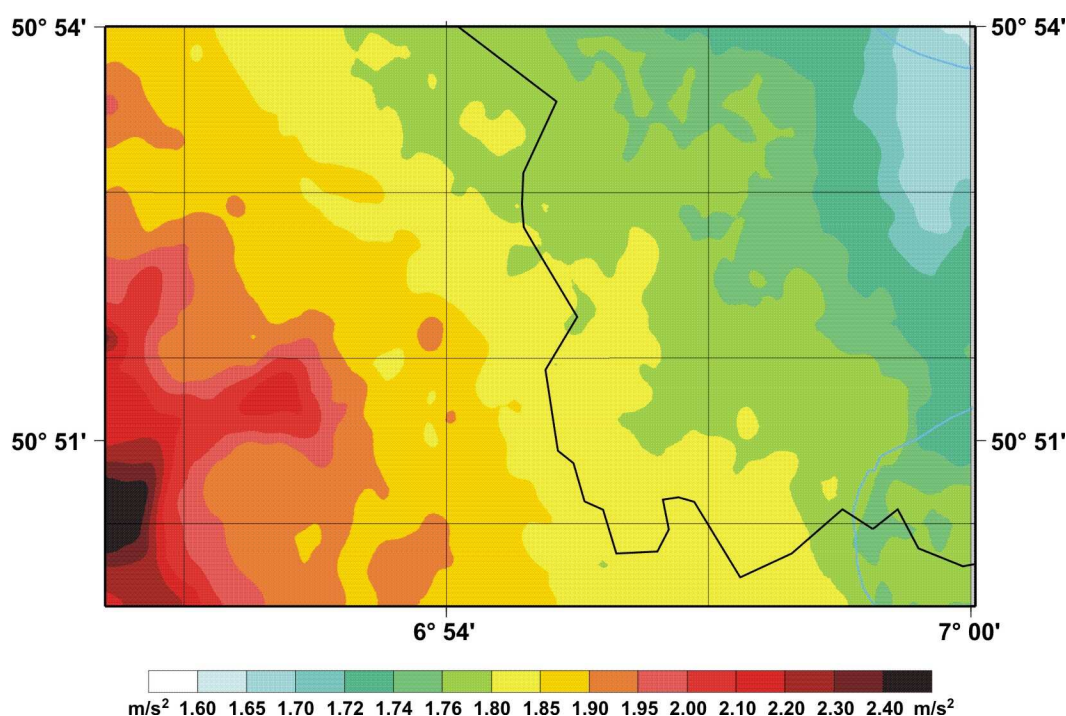


Abbildung 4.7: Erdbebengefährdungskarten eines Testgebiets südwestlich von Köln für eine überschreitenswahrscheinlichkeit von 2% in 50 Jahren für Spitzenbeschleunigung unter Verwendung von S-Wellengeschwindigkeiten (Daten von D. Hollnack, pers. Mitteilung) für die Dämpfungsrelation.

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

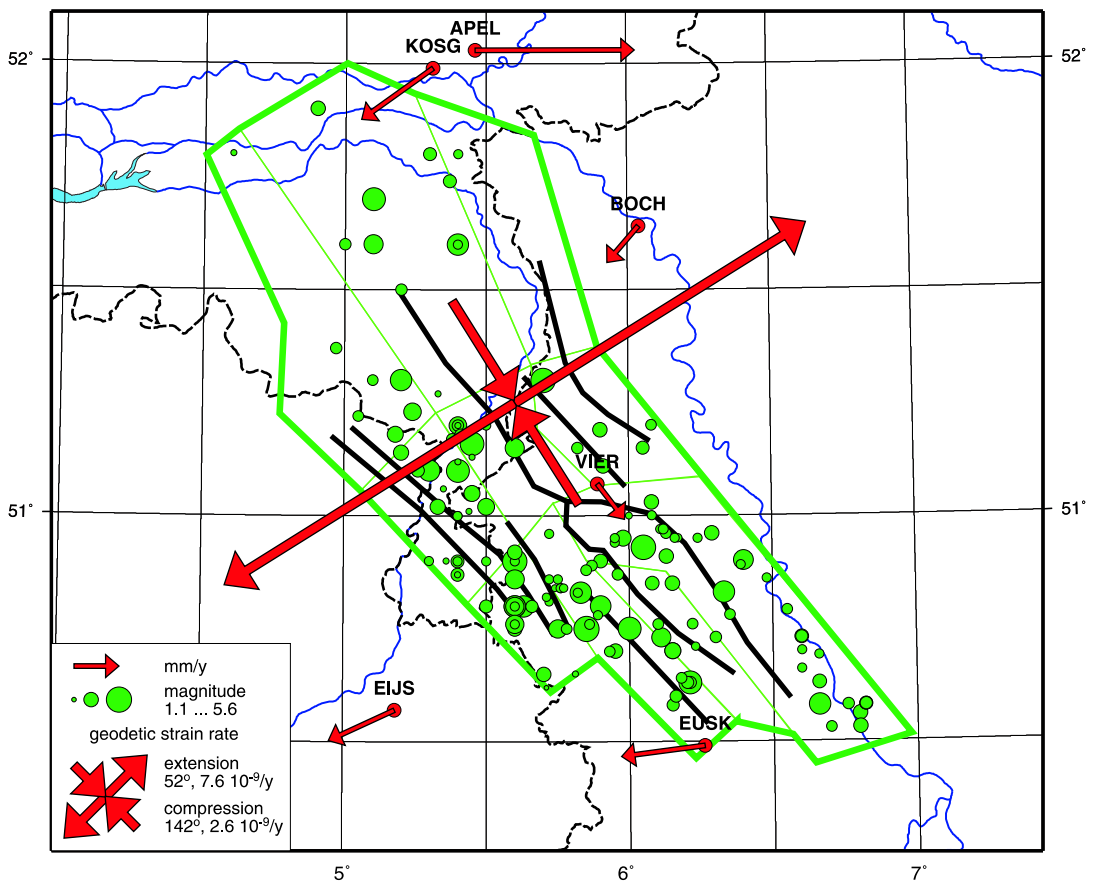


Abbildung 4.8: Bebenverteilung, GPS-Stationsgeschwindigkeiten und geodätische Deformationsrate in der Niederrheinischen Bucht.

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 Macro-seismic 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.

4.3 Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung

Peter Bormann, Stefano Parolai und Claus Milkereit

*GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 2.1 Naturkatastrophen
Email: course@gfz-potsdam.de*

TP B2.1: Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung

4.3.1 Zusammenfassung

Aus Registrierungen der mikroseismischen Bodenunruhe an insgesamt über 400 Messpunkten im Gebiet von Köln wurde die flächenhafte Verteilung der Grundresonanzfrequenz f_o der Sedimentbedeckung im Raum Köln und die an diesen Standorten in etwa zu erwartende Verstärkung der Bodenerschütterungen bei Erdbebenanregung ermittelt. Im Untersuchungsgebiet variiert f_o von etwa 0.1-0.3 Hz im Bereich der über 1 km mächtigen Sedimente westlich der Erft-Störung bis zu 5-10 Hz auf den geringmächtigen Sedimenten über dem ostrheinisch ausstreichenden devonischen Grundgebirge des Bergischen Landes. Die Bodenverstärkung variiert von etwa 1 (keine Verstärkung über festem Untergrund) bis zu mehr als 10fach über Lockersedimenten im Stadtgebiet von Köln. Die Abschätzung der Grundresonanzfrequenz und Bodenverstärkung aus Rauschmessungen nach der Nakamura-Methode konnte an einigen Standorten durch die direkte Bestimmung der spektralen Bodenverstärkung aus Aufzeichnungen schwacher lokaler Erdbeben bestätigt werden. Durch Kalibrierung der nach der Nakamura-Methode geschätzten Grundresonanzfrequenz f_o mit aus Bohrungen gemessenen Mächtigkeiten h der Sedimentbedeckung wurde eine Korrelationsbeziehung zwischen f_o und h ermittelt. Sie ermöglicht für das Untersuchungsgebiet die Ableitung einer Karte der Sedimentmächtigkeit über dem Grundgebirge mit einer geschätzten Genauigkeit von etwa 10-20%. Aus der Kombination der verschiedenen Ergebnisse konnte für den Raum Köln auch ein verbessertes Modell der Scherwellengeschwindigkeit V_s innerhalb der Sedimentbedeckung als Funktion der Tiefe abgeleitet werden, das für die Modellierung der Wellenausbreitung und Bodenverstärkung von grundlegender Bedeutung ist. Das V_s -Modell gestattet auch eine objektivere Abschätzung der ingenieurseismologisch üblichen Untergrundklassen für die obersten 30 m in Abhängigkeit von der Gesamtmächtigkeit der Sedimente am jeweiligen Standort. Zur Verbesserung der lokalen V_s -Modelle durch Rauschregistrierungen an kleinräumigen Seismometer-Arrays wurden Messungen und methodische Tests durchgeführt und erste Ergebnisse gewonnen.

Abstract

From recordings of seismic background noise at more than 400 measuring points in the area of Cologne the distribution of the fundamental resonance frequency of the sedimentary cover was derived. Additionally, a lower boundary of the amplification of the ground motion in case of an earthquake and linear behaviour of soil could be estimated at these points. In the investigation area the fundamental resonance frequency varies from about 0.1-0.3 Hz near the Erft Fault in the West, where the sedimentary cover reaches more than 1 km thickness, to 5-10 Hz in the 'Bergisches Land' east of the Rhine river, where sedimentary cover over the Devonian rocks is thin.

The soil amplification factor at the fundamental frequency varies from 1 (no amplification over hard rock) to more than 10 for soil stations in the city of Cologne. The estimation of the fundamental resonance frequency and amplification through application of the Nakamura method could be confirmed at some stations through the determination of the spectral amplification of local seismic event ground motion recorded at these sites. A calibration of the estimated fundamental resonance frequency f_o was possible using information about the depth of the Devonian rocks under the sedimentary cover obtained by drilled at boreholes. The relation between resonance frequency f_o and sedimentary thickness h allows for a map of sedimentary thickness with an estimated precision of about 10-20 per cent. A combination of these results lead to an improved model of the shear wave velocities V_s within the sedimentary cover as a function of depth. This model is of basic interest for modelling wave propagation and site dependent effects in the sedimentary basin. Additionally, the shear wave velocity model also allows for an improved engineering classification of the upper 30 m of soil. Seismic array measurements were performed in order improve local velocity models.

4.3.2 Veranlassung und Problem

Die Erdbebengefährdung wird in erster Näherung aus dem räumlich-zeitlichen Auftreten von Erdbeben unter Zugrundelegung regionaler Abminderungsgesetze für die Erschütterungsintensität und Annahme festen Untergrunds am Standort bestimmt. Lokale geologische Gegebenheiten können die so ermittelten Intensitäten um mehr als ein Grad erhöhen. Das hat erhebliche Konsequenzen für den Umfang und die Kosten der zu treffenden vorbeugenden Maßnahmen zur Risikominderung.

In Gebieten mit hoher Seismizität ist es in vertretbaren Zeiträumen möglich, lokale Standorteffekte durch Installation temporärer seismologischer Stationen über verschiedenen geologischen Strukturen direkt zu messen. In Gebieten mit geringer Erdbebenhäufigkeit und/oder sehr hohem seismischem Störpegel kann es jedoch Jahre oder gar Jahrzehnte dauern, bis man über eine ausreichende Anzahl geeigneter Erdbebenregistrierungen für die Untersuchung lokaler Standorteffekte verfügt. Die Installation dichter, hoch auflösender Beobachtungsnetze und die kontinuierliche Registrierung über so lange Zeiträume an allen relevanten Standorten ist technisch schwierig und ökonomisch nicht vertretbar.

Alternative Techniken beruhen auf der Analyse der ständig vorhandenen, durch Verkehr, In-

dustrie, Wind und andere Umweltfaktoren angeregten mikroseismischen Bodenunruhe. Ihre Anwendung empfiehlt sich für das Gebiet Köln, das trotz geringer Häufigkeit stärkerer Erdbeben in der Niederrheinischen Bucht auf Grund dichter Besiedlung und Industrialisierung ein hohes Risikopotential aufweist. Die Sedimentbedeckung des Gebiets und der hohe seismische Störpegel erschweren die Aufzeichnung der häufiger auftretenden schwachen Erdbeben.

4.3.3 Ziel

Die wichtigsten ursprünglichen Zielstellungen im Rahmen des TP B2.1 waren die Gewinnung von Daten zur Grundresonanzfrequenz des Untergrunds und zur lokalen Verstärkung von Erdbebenererschütterungen an möglichst vielen Standorten in und um Köln und deren kartenmäßige Darstellung. Entsprechende Daten ermöglichen Entscheidungsträgern, Planern und Bauingenieuren verantwortungsbewusste realistischere Normenfestlegungen, Landnutzungs- und Entwicklungsplanungen. Sie sollten gewonnen werden durch Feldmessungen mikroseismischer Bodenunruhe, ergänzt durch Registrierungen definierter lokaler seismischer Quellen in verschiedenen Azimuten, z.B. starker Sprengungen aus Bohrlöchern und, sofern möglich, auch lokaler/regionaler Erdbeben. Die geplanten Bohr-

lochsprengungen mussten aufgegeben werden, da sie langwierige Genehmigungsverfahren erfordern und die hohen Kosten im Rahmen der schließlich bewilligten Projektmittel nicht abgedeckt werden konnten. Zudem ergaben internationale Erfahrungen ein ungünstiges Nutzen-Kosten-Verhältnis bei der Verwendung schwacher Sprengungen für die seismische Mikrozonierung, da die für Erdbebenschäden relevanten Frequenzen zwischen etwa 0.3 Hz und 10 Hz bei den geringen in Deutschland genehmigten Ladungsmengen nur unzureichend angeregt werden. Statt dessen wurden folgende zusätzliche Zielstellungen bearbeitet:

- Flächendeckende Abschätzungen der Mächtigkeit der Sedimentbedeckung im Raum Köln und die Ableitung eines verbesserten mittleren Modells der Scherwellengeschwindigkeit als Funktion der Tiefe. Diese Angaben werden für verbesserte Szenarien-Modellierungen im TP B2.2 (Kap. 4.4) benötigt.
- Abschätzung der mittleren Scherwellengeschwindigkeit in den obersten 30 m des Bodenprofils in Abhängigkeit von der Gesamtmächtigkeit der Sedimentbedeckung. Solche Angaben sind nutzbar für ingenieurseismologische Gutachten in Übereinstimmung mit den Untergrundklassen nach der neuen Erdbebennorm EURO-Code 8 und für die neue Generation von Erdbebengefährdungskarten unter Berücksichtigung grober Untergrundklassen (TP B1, Kap. 4.2).
- Untersuchungen zur Effektivität, Genauigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verschiedener Methoden zur Abschätzung der Grundresonanzfrequenz, Bodenverstärkung, Sedimentmächtigkeit und V_s -Wellengeschwindigkeit aus Aufzeichnungen der Bodenunruhe an Einzelstationen und seismischen Kleinarrays sowie, wenn möglich, auch von Erdbeben.

- Tests zur Nutzbarkeit von Messungen der Bodenunruhe zur Abschätzung der Resonanzfrequenz und Amplitudenverstärkung von Bauwerken und Bauwerksteilen an kritischen Strukturen mit hohem Risikopotential.
- Ableitung von Empfehlungen und methodischen Standards für die routinemäßige Nutzung von Bodenunruhemessungen für die Erdbebenmikrozonierung durch industrielle Anwender/Ingenieurbüros.

4.3.4 Methoden

Zur Erreichung der o.g. Zielstellungen wurden im Jahr 2000 an fast 400 Standorten im Raum Köln sowie an 6 Standorten in Bonn kurzfristige Messungen (Dauer ca. 15-30 Minuten) der mikroseismischen Bodenunruhe durchgeführt. Sie wurden im Jahr 2001 ergänzt durch längerfristige Messungen (Dauerregistrierungen über 2 1/2 Monate) an 40 ausgewählten Standorten über verschiedenem Untergrund im und außerhalb des Stadtgebiets von Köln sowie durch kurzfristige Messungen an kritischen Bauwerken und zwei seismischen Kleinarrays. Die Messungen dienten folgenden Zielen:

- Test verschiedener seismischer Sensoren und Auswerteverfahren zur Ermittlung der schnellsten, zuverlässigsten und kosteneffektivsten Methode zur Bestimmung wichtiger Parameter der seismischen Mikrozonierung (Grundresonanzfrequenz und Schwingungsverstärkung des Untergrundes).
- Überprüfung der zeitlich-räumlichen Stabilität und Reproduzierbarkeit der aus kurzfristigen Rauschuntersuchungen abgeleiteten Parameter.
- Registrierung von Erdbeben zur Überprüfung der Vergleichbarkeit der aus Rausch- und Erdbebenaufzeichnungen abgeleiteten Parameter.

- Ableitung einer Korrelationsbeziehung zwischen der aus Rauschmessungen geschätzten Frequenz f_o des Untergrunds und der Mächtigkeit h der Sedimente über dem Grundgebirge durch Kalibrierung mit allen verfügbaren Daten über die in der Nähe von Messpunkten durchteuften Sedimentmächtigkeiten.
- Nutzung dieser Daten und Beziehungen zur Ableitung einer Karte der Sedimentmächtigkeiten sowie eines verbesserten mittleren Geschwindigkeits-Tiefenmodells für seismische Scherwellen im Untersuchungsgebiet.
- Bestimmung der Eigenfrequenz und Schwingungsverstärkung von kritischen Bauwerken mittels Rauschmessungen nach verschiedenen Methoden und deren Vergleich mit Ergebnissen theoretischer FE-Modellierungen (TP B4).
- Rauschmessungen an seismischen Kleinarrays und Inversion von „Nakamura-Peaks“ zur Ableitung lokaler Modelle der Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit als Funktion der Tiefe.

4.3.5 Ergebnisse und Diskussion

Gerätetechnische und methodische Vergleiche

Unsere gerätetechnischen und methodischen Vergleiche ergaben, dass Messungen der seismischen Bodenunruhe nach der Nakamura-Methode mit kurzperiodischen Dreikomponentensensoren im ingenieurseismologisch interessanten Frequenzbereich von $0.2 \text{ Hz} < f < 10 \text{ Hz}$ zuverlässige Schätzwerte der lokalen Grundresonanzfrequenz des Untergrunds und – mit Einschränkungen – auch der Bodenverstärkung liefern. Die Methode eignet sich besonders gut für schnelle und kosteneffektive Messungen im Gelände an vielen Einzelpunkten. Bestimmt

wird der frequenzabhängige Quotient H/V aus den Spektralamplituden der horizontalen (H) und vertikalen (V) Registrierkomponente. Die Frequenz, bei der das maximale Amplitudenverhältnis H/V beobachtet wird, entspricht mit einer Genauigkeit von meist besser als 20% der Grundresonanzfrequenz f_o des Untergrunds. Abbildung 4.9 zeigt zwei Nakamura-Spektren, die bei Testmessungen im Raum Bonn gewonnen wurden. Die Messpunkte liegen außerhalb des Messgebietes Köln (Abbildungen 4.10, 4.12 und 4.13).

H/V-Messungen mittels Bodenunruhe

Im Raum Köln wurden nach dieser Methode H/V-Spektren an über 400 Messpunkten zwischen dem Bergischen Land im Osten und dem Gebiet des Erft-Sprungs im Westen bestimmt. Daraus konnte eine Karte der Grundresonanzfrequenz f_o für das gesamte Untersuchungsgebiet abgeleitet werden (Abbildung 4.10). Aus Abbildung 4.10 ist ersichtlich, dass f_o über geringmächtigen Sedimenten östlich des Rheins deutlich höher ist als westrheinisch in Richtung der tektonischen Erft-Störungszone, an der die Sedimentmächtigkeit h in der Niederrheinischen Bucht auf über 1400 m anwächst.

Abbildung 4.11 vergleicht die an drei Messpunkten ermittelten H/V-Spektren mit den in nahegelegenen Bohrungen in situ ermittelten Sedimentdicken über dem Grundgebirge. Das bestätigt einen Zusammenhang zwischen f_o und h .

Durch Korrelation der an 32 Messpunkten ermittelten Frequenzen der H/V-Maxima mit der Mächtigkeit der in nahe gelegenen Bohrungen durchteuften Sedimente ergab sich eine für das Untersuchungsgebiet repräsentative Beziehung f_o - h . Das ermöglichte die Umrechnung von Abbildung 4.10 in eine Karte der Sedimentmächtigkeit (Abbildung 4.12).

In ingenieurseismologischen Gefährdungsabschätzungen ist eine Klassifikation des Untergrundes nach der durchschnittlichen Scherwellengeschwindigkeit \bar{V}_s innerhalb der ers-

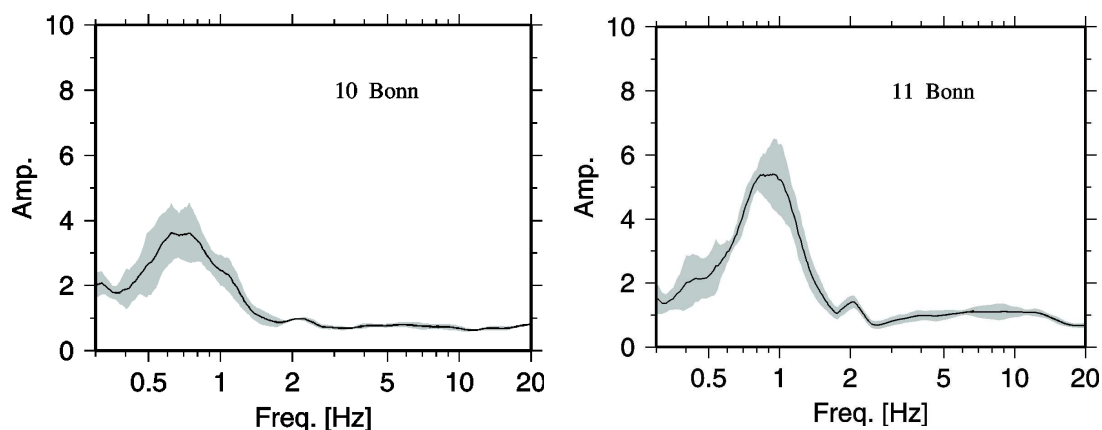


Abbildung 4.9: H/V-Spektren wie sie an zwei Messpunkten im ostrheinischen Gebiet von Bonn aus Messungen des seismischen Rauschens bestimmt wurden. Links: Messpunkt am Flugplatz Bonn Hangelor; rechts: Messpunkt an der Burg Lede bei Vilich (Bonn). Die ausgezogene Kurve entspricht dem mittleren H/V-Verhältnis, der graue Bereich \pm einer Standardabweichung.

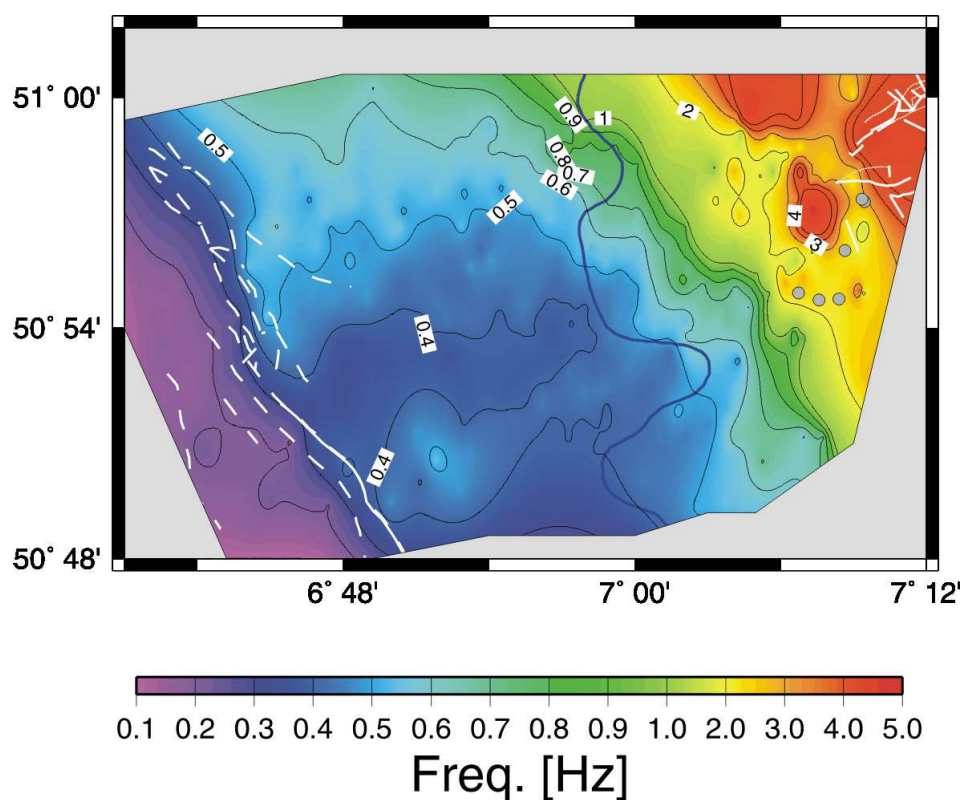


Abbildung 4.10: Karte der aus H/V-Messungen nach der Nakamura-Methode geschätzten Grundresonanzfrequenz der Sedimentbedeckung im Untersuchungsgebiet Köln. Weiße Linien markieren die Position bekannter tektonischer Störungen, graue Punkte Orte mit einem H/V-Verhältnis von etwa 1 im gesamten untersuchten Frequenzbereich. Letzteres ist typisch für Standorte auf ausstreichendem Grundgebirge (d.h. keine spektrale Bodenverstärkung auf Felsuntergrund).

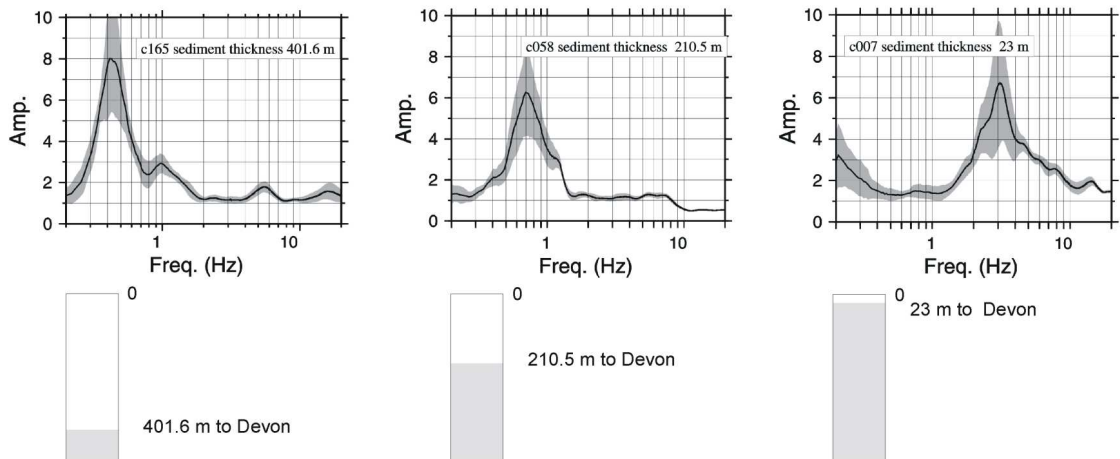


Abbildung 4.11: Vergleich der Nakamura-Spektren an drei Standorten mit den dort erbohrten Mächtigkeiten der Sedimente über dem devonischen Grundgebirge. Die Messpunkte lagen nahe der Erft-Störung (links), im Rheinpark am rechten Rheinufer (Mitte) und im Ort Refrath im Bergischen Vorland (rechts).

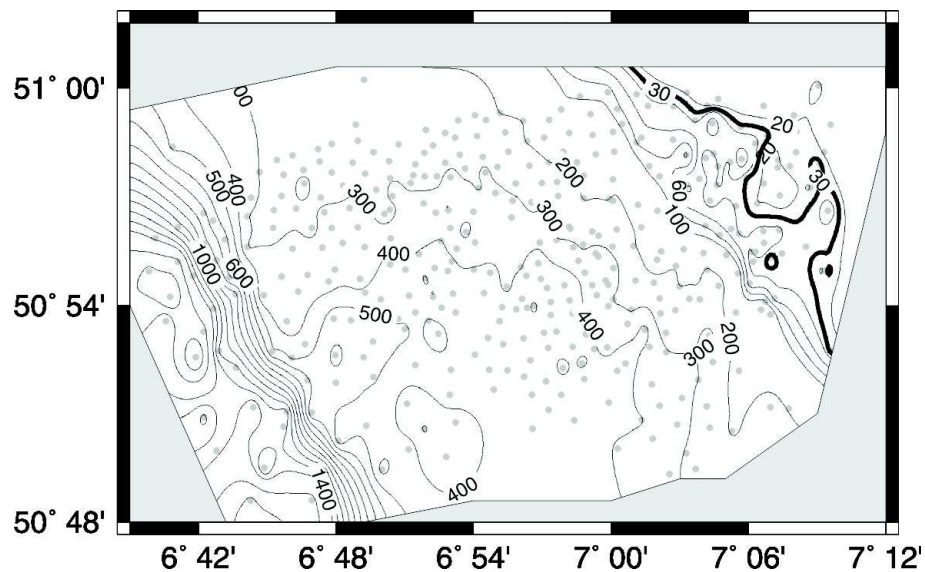


Abbildung 4.12: Karte der Sedimentmächtigkeit h im Untersuchungsgebiet Köln, abgeleitet aus H/V-Messungen an 376 Meßstellen (graue Punkte). Die Isolinienabstände betragen 20 m, 100 m und 200 m für $h < 100$ m, $100 < h < 1400$ m bzw. $h > 1400$ m. Die 30 m Konturlinie ist hervorgehoben.

ten 30 m üblich. Für eine realistische Gefährdungseinschätzung ist allerdings auch die Gesamtmächtigkeit h der Sedimente über dem Grundgebirge und das Geschwindigkeits-Tiefen-Profil innerhalb der Sedimente rele-

vant. Deshalb wurden alle im Untersuchungsgebiet verfügbaren Bohrlochdaten zu Sedimentdicken genutzt, um über die Beziehung $f_o = \bar{V}_s/4h$ eine verbesserte Beziehung für die Scherwellengeschwindigkeit als Funktion

der Tiefe sowie für die Beziehung zwischen \bar{V}_s und der lokalen Gesamtmächtigkeit h der Sedimente abzuleiten. Die \bar{V}_s - h -Beziehung ermöglicht die Objektivierung der ingenieurseismologischen Standardklassifikation des Untergrunds auf der Grundlage von \bar{V}_s für die obersten 30 m und gestattet darüber hinaus die Berücksichtigung der Gesamtsedimentmächtigkeit (Parolai et al., 2002).

Langfristige Rauschmessungen am gleichen Ort ergaben, dass die aus den H/V-Peaks geschätzten Werte für f_0 sehr stabil sind und nicht oder nur geringfügig vom tageszeitlich variablen Rauschpegel abhängen. Weniger genau und stabil ist die aus der Amplitude des H/V-Maximums geschätzte Verstärkung der Bodenbewegung bei f_0 . Die Unsicherheit kann etwa den Faktor 2 erreichen. Abbildung 4.13 zeigt die im Untersuchungsgebiet ermittelten Werte für alle Messpunkte. Demnach ist mit erheblicher Verstärkung der Bodenbewegungen bei Erdbeben zu rechnen.

Vergleich von H/V-Messungen der Bodenunruhe und lokaler Erdbeben

Weltweite Beobachtungen und auch Modellierungen zur Bodenverstärkung ergeben, dass die aus der Amplitude des H/V-Maximums bei Verwendung schwacher stationärer Bodenunruhe geschätzten Werte im Mittel die Verstärkung von Erdbebenschwingungen unterschätzen. Eine bessere Übereinstimmung ergibt sich bei Verwendung von transienten Störsignalen mit großen Amplituden. Das bestätigen sowohl jüngste Untersuchungen in Italien (Mucciareli, 2003) als auch unsere wenigen eigenen Vergleichsmessungen von seismischem Rauschen und schwachen lokalen Erdbeben an drei ostrheinisch gelegenen Standorten mit geringer Sedimentmächtigkeit (Abbildung 4.14). Deshalb sollten Planer und Bauingenieure die aus H/V-Messungen ermittelten Werte der Bodenverstärkung (Abbildung 4.13) als nicht konservative Schätzungen werten und unbedingt beachten.

Die nach Nakamura und mittels Erdbebenregistrierungen bestimmten „site responses“ wurden mit den Ergebnissen von 1-D-Modellierungen im Rahmen des TP B2.3 (Kap. 4.6) verglichen. Diese Gruppe leitete seismische Geschwindigkeitsprofile aus der Integration verfügbarer geologischer und geophysikalischer Informationen ab. Für den größten Teil des Untersuchungsgebiets war die Übereinstimmung der unabhängig ermittelten Werte gut. Größere Abweichungen traten nur am Ostrand der Niederrheinischen Bucht zum Bergischen Land hin auf, wo die Sedimentmächtigkeit bereits über kurze Entfernungen stark variieren kann. Dort sind die im Rahmen von TP B2.3 zwischen den verfügbaren hydrogeologischen Profilen durch Interpolation geschätzten Werte weniger zuverlässig als unsere lokalen Messungen.

H/V-Messungen in Gebäuden und Vergleich mit Modellierungen

In Kooperation mit TP B4 (Kap. 4.8) wurde auch untersucht, inwieweit H/V- und SSR-Messungen des seismischen Rauschens an bzw. in großen exponierten Bauwerken sehr unterschiedlicher Struktur aber mit hohem Risikopotential (Deutzer Brücke, Krankenhaus Holweide, Kölner Dom) geeignet sind, um brauchbare empirische Schätzwerte für deren Schwingungsverhalten zu gewinnen. Dabei zeigte sich, dass H/V-Messungen auf Brücken wegen der bevorzugten Anregungen starker vertikaler Schwingungen durch den Verkehr ungeeignet sind. Für das Krankenhaus Holweide ergab sich dagegen eine gute Übereinstimmung zwischen den experimentell nach der Referenzmethode gemessenen und den von Bauingenieuren nach der Finite-Element-Methode berechneten Frequenz der Gebäudeschwingungen. Sie beträgt 1.7 Hz und liegt damit sehr nahe an der nach der H/V-Methode im Gelände ermittelten Grundresonanzfrequenz des umgebenden Untergrunds (1.5 Hz). Daraus folgt ein erhöhtes Risiko des Gebäudes im Falle starker Erdbebenanregung mit die-

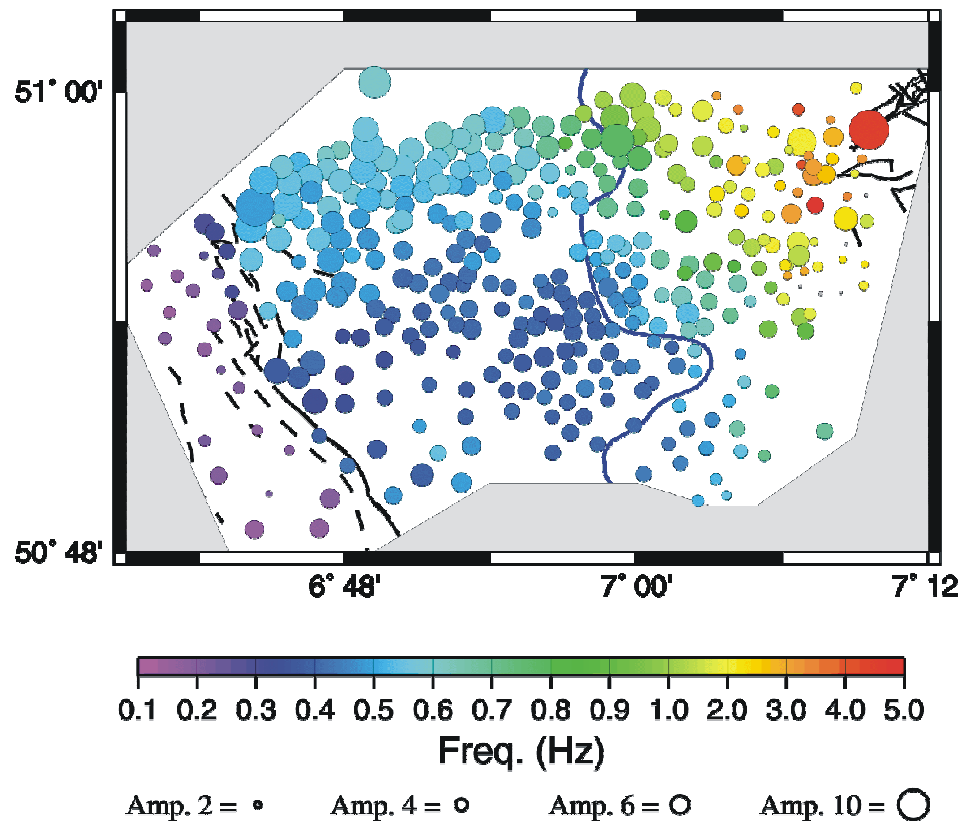


Abbildung 4.13: Aus der Amplitude des H/V-Maximums geschätzte Werte der Schwingungsverstärkung bei der Grundresonanzfrequenz f_0 für die Messpunkte im Untersuchungsgebiet Köln.

ser Frequenz. FE-Modellierungen sind jedoch viel aufwendiger und kostspieliger als kurzzeitige seismographische Messungen am Objekt. Zudem liefern sie auch nur für relativ einfach strukturierte und detaillierte Baupläne dokumentierte Bauwerke wie das Krankenhaus Holweide zuverlässige Ergebnisse. Für ältere Gebäude existieren solche Pläne oft nicht oder sie werden von den Eigentümern nicht zur Verfügung gestellt. Deshalb bieten sich kurzzeitige und wenig störende seismographische Messungen nach der Referenzmethode zur Bestimmung der für die Vulnerabilitätsbewertung von Gebäuden wichtigen Eigenschwingungsfrequenzen an.

Bei so komplizierten Bauwerken wie dem Kölner Dom sind FE-Modellierungen nur mit riesigem Aufwand oder stark vereinfachten Modellen möglich. Deshalb nutzten Bearbeiter des TP B4 die aus Rauschmessungen nach der

Referenzmethode im Rahmen des TP B2.1 für verschiedene Gebäudeteile des Kölner Doms ermittelten Resonanzfrequenzen für eine grobe qualitative Vulnerabilitätsbewertung.

Publikation der Ergebnisse und Empfehlungen für weiterführende Arbeiten

Die o.g. Methoden und gewonnenen Ergebnisse wurden bereits in mehreren nationalen (Bormann et al., 2002a und 2002b; Parolai et al., 2002b) und internationalen Veröffentlichungen (Parolai et al., 2001 and 2002b) ausführlich diskutiert und dokumentiert. Sechs weitere Beiträge für internationale Zeitschriften sind im Druck bzw. in Begutachtung. Die Ergebnisse wurden auch in 18 Vorträgen bzw. Postern auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt.

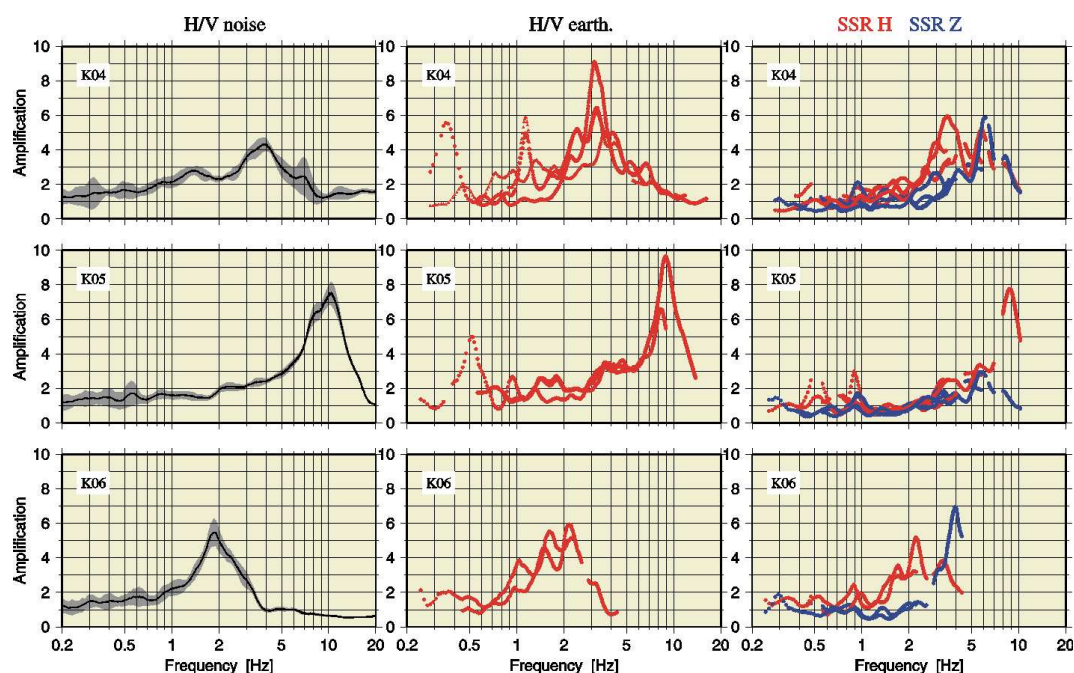


Abbildung 4.14: Spektren der Bodenverstärkung für drei ostrheinische Messpunkte mit geringer Sedimentmächtigkeit (< 100 m). Die Verhältnisspektren wurden berechnet nach der H/V-Methode aus seismischen Rauschmessungen (links) bzw. Registrierungen schwacher lokaler Erdbeben (Mitte) sowie für die Erdbebenregistrierungen auch nach der Standard Spectral Reference Site Method (SSR; rechts). Die SSR bestimmt für gleiche Registrierkomponenten das Verhältnis der Spektren an den Sedimentstandorten zu den an nahen Referenz-Messpunkten auf Felsgestein ermittelten Spektren.

Realistischere theoretische Modellierungen der „site response“ erfordern genauere Kenntnis der lokalen Variabilität und vertikalen Verteilung von V_s . An zwei seismischen Kleinarrays wurden diesbezügliche Tests durchgeführt. Arraymessungen lassen sich jedoch nicht flächendeckend realisieren. Deshalb wird jetzt auch eine von Dr. Faeh, ETH Zürich, entwickelte Inversionstechnik genutzt, um durch Inversion von Nakamura-Spektren lokale V_s -Tiefen-Beziehungen abzuleiten. Diese über den DFNK-Plan für das TP B2.1 hinausgehenden Arbeiten sind noch nicht abgeschlossen.

Im Verlauf des DFNK-Projekts hatten Bearbeiter von TP B3.1 angeregt zu prüfen, ob sich die aus Nakamura-Messungen abgeschätzten Resonanzfrequenzen und Bodenverstärkungen in Antwortspektren umrechnen lassen, wie sie von Erdbebeningenieurern verwendet werden. Es zeigte sich, dass dafür zwecks

Kalibrierung der H/V-Rauschmessungen wenigstens an einigen repräsentativen Vergleichsmesspunkten im Untersuchungsgebiet hinreichend starke Erdbebenregistrierungen mit hohem Signal-Rausch-Verhältnis vorliegen müssen. Solche Erdbebenaufzeichnungen konnten aber im Rahmen der DFNK-Feldmessungen nicht gewonnen werden. Das Problem wurde aber als ein aktueller Forschungsschwerpunkt erkannt und soll in Zukunft in Kooperation mit Bearbeitern der TP B1 und B3.1 verstärkt untersucht werden.

4.3.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Ergebnisse des TP B2.1 wurden im Rahmen der Teilprojekte B1, B2.2, B2.3, B3.1 und B4 genutzt. Andererseits haben auch die Bearbeiter von B2.1 von den kritischen Diskussio-

nen, Anregungen und Ergebnissen aller dieser Teilprojekte sowie einigen direkten Kooperationsangeboten (insbesondere von B4 und B1; auch über die Laufzeit von DFNK hinaus) profitiert. Die erarbeiteten instrumentellen, auswertetechnischen und methodischen Kriterien für die kosteneffektive und fachgerechte Nutzung der Nakamura-Methode zur seismischen Mikrozonierung sind auf andere Gebiete übertragbar und werden bereits in anderen Projekten im In- und Ausland genutzt. Das gilt auch für Gebiete, in denen keine oder nur sehr unzureichende Kenntnisse über die Untergrundprofile aus Bohrungen oder geophysikalischen Messungen vorliegen (z.B. Fallstudie New Delhi, Mukhopadyay and Bormann, 2003). Denn in jedem Falle liefert die Methode brauchbare Schätzwerte für die Grundresonanzfrequenz des Untergrunds und die mindestens zu erwartenden Bodenverstärkungen. Beides sind wichtige Grundaussagen für verbesserte Einschätzungen der lokalen Erdbebengefährdung. Erst die Umrechnung dieser Werte in Sedimentmächtigkeiten und geophysikalische Parametermodelle der Sedimentbedeckung zwecks verbesserter theoretischer Modellierung der spektralen Bodenverstärkung erfordert mindestens einige gut vermessene Bohrungen oder flachseismische Profile, die bis zur Grundgebirgsoberkante reichen.

Die Praxisrelevanz und Übertragbarkeit der mittels Nakamura-Methode gewinnbaren Daten für seismische Mikrozonierung und Ingenieur Anwendungen kann somit wie folgt zusammengefasst werden:

- An Standorten, an denen keine signifikanten H/V-Maxima beobachtet werden, ist generell nicht mit signifikanten Bodenverstärkungen bei Erdbebenanregung zu rechnen.
- Falls signifikante H/V-Peaks beobachtet werden, entspricht deren Amplitude im Mittel der *mindestens* zu erwartenden Bodenverstärkung bei eindimensionaler Untergrundstruktur (d.h., vernachlässigbaren lateralen Struktur- und Geschwindigkeitsvariationen).
- Komplizierte (2D, 3D) Untergrundstrukturen können Ursache für größere Bodenverstärkungen als die aus der 1D-Nakamura-Methode abgeschätzten sein. Exemplarische 2D-Modellierungen im Rahmen des Teilthemas B2.2 haben gezeigt, dass bei komplizierten Strukturen auch höhere Moden verstärkt angeregt werden können.
- Deshalb wird empfohlen, an allen zukünftigen Bau- und Entwicklungsstandorten derartige Testmessungen durchzuführen und die nach der Nakamura-Methode gewonnenen Ergebnisse als nicht-konservative Schätzungen der Amplitudenverstärkung bei der Grundresonanzfrequenz des Bodens zu werten. Diese Ergebnisse sind bei der Begutachtung der lokalen Gefährdung unbedingt zu berücksichtigen.
- Die Umrechnung von Nakamura-Spektren in Antwortspektren, wie sie von Erdbebeningenieuren zur Abschätzung der spektralen Einwirkung von Erdbebenerstschütterungen auf Bauwerke verwendet werden, ist näherungsweise möglich. Sie erfordert jedoch die Kalibrierung von Nakamura-Spektren an repräsentativen Messpunkten durch Vergleichsmessungen von hinreichend starken Erdbeben. Dann sind Umrechnungen von Nakamura-Spektren in Antwortspektren auch für andere Messpunkte im gleichen Untersuchungsgebiet möglich.

Die im Rahmen des TP B2.1 erarbeiteten Karten der Grundresonanzfrequenz des Untergrunds, der Sedimentmächtigkeiten und der zu erwartenden Schwingungsverstärkungen im Raum Köln sind folglich, in Verbindung mit den verbesserten Modellen der Scherwellengeschwindigkeit, im höchsten Maße praxisrelevant. Sie sollten im Untersuchungsgebiet in

Verbindung mit Gefährdungs-, Vulnerabilitäts- und Risikobewertungen bei Genehmigungsverfahren durch Entscheidungsträger sowie durch Entwicklungsplaner und Bauingenieure obligatorisch konsultiert und genutzt werden. Zur Erleichterung der Nutzung wurde ein File mit allen Messpunktkoordinaten, den an den Messpunkten ermittelten Parametern und einer Bewertung ihrer Zuverlässigkeit erstellt. Das GFZ stellt diese Datenliste Nutzern auf Anfrage bzw. in Verbindung mit einer ggf. erstellten Daten-CD zum DFNK-Bericht zur Verfügung.

4.3.7 Offene Fragen

Offene Probleme betreffen sowohl das konkrete Untersuchungsgebiet als auch generelle methodisch-technische Fragen. Fehlende Bohrungen, die auch in Gebieten mit großer Sedimentmächtigkeit bis ins Grundgebirge reichen und in der Niederrheinischen Bucht kaum vorhandene hochauflösende seismische und bohrlochgeophysikalische Daten erschweren die ausreichende Kalibrierung unserer Messergebnisse und die Untersuchung des möglichen verfälschenden Einflusses realer 2D- und 3D-Effekte. Deren Feststellung und Quantifizierung erfordert dringend die Registrierung ausreichend starker Erdbeben aus verschiedenen Azimutrichtungen an mehreren repräsentativen Standorten. Das gilt auch für die Kalibrierung von Nakamura-Spektren zwecks Umrechnung in spektrale Einwirkungsspektren (Antwortspektren), wie sie Erdbebeningenieure benötigen. Solche Daten lassen sich in einem Land mit geringer seismischer Aktivität wie Deutschland nicht im Rahmen kurzfristiger Messkampagnen sondern nur durch ggf. mehrjährige Dauerregistrierungen an ausgewählten Standorten gewinnen. Unzureichend bekannt ist auch die Übertragbarkeit der aus schwachen Bodenbewegungen abgeleiteten Ergebnisse auf wirkliche Erdbeben-Starkbewegung, die bei Bodenbeschleunigungen von mehr als 0.1 g auf Lockerböden auch nicht-lineare Effekte auslösen können.

4.3.8 Literatur

Bormann, P., Grünthal, G., Milkereit, C., Parolai, S., Richwalski, S.M., Roth, F., Stromeyer, D., Wahlström, R., Wang, R. und Zschau, J. (2002a): Bedeutung geowissenschaftlicher Arbeiten für die Erdbebenrisikoabschätzung. Notfallvorsorge, 2, 15-21.

Bormann, P., Grünthal, G., Milkereit, C., Parolai, S., Richwalski, S.M., Roth, F., Stromeyer, D., Wahlström, R., Wang, R. und Zschau, J. (2002b): Bedeutung geowissenschaftlicher Arbeiten für die Erdbebenrisikoabschätzung. In: Die Gefahrentage des DKKV, Leipzig 2001/Potsdam 2002, Dokumentation von Vorträgen, Schriftenreihe des DKKV, Heft 27, 21-32.

Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C. (2001): Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements. *Journal of Earthquake Engineering* 5, 4, 541-564.

Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C. (2002a): 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). *Bulletin Seismological Society of America*, 92,6, 2521-2527.

Parolai, S., Bormann, P., Milkereit, C. (2002b): Measurements of the fundamental resonance frequency of the sedimentary cover in the Cologne area: contribution to the seismic microzonation. In: Tetzlaff, G., Trautmann T., and Radtcke, K.S. Eds (2002). *Zweites Forum Katastrophenvorsorge DKKV (Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge)*, 301-305.

Parolai, S., Richwalski, S., Milkereit, C. and Bormann, P.: Assessment of the stability of H/V spectral ratios and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany). *Tectonophysics special issue "Strong Ground Motion, Earthquake Hazard and Risk in Alpine-Himalayan and Pacific Regions"* (in press).

Fäcke, A., Stempniewski, L., Richwalski, S. M., Parolai, S., Milkereit, C., Wang, R., Bormann P., and Roth, F.: A combined geophysical/engineering approach for the seismic safety of long-span bridges. "Challenges for Earth Sciences in the 21st Century "(Springer Verlag), (in press).

Mukhopadhyay, S. and Bormann, P.: A low-cost seismic microzonation using microtremor data: An example from Delhi, India. *Journal of Asian Earth Sciences* (accepted after review).

Parolai, S., Fäcke, A., Richwalski, S. M., Stempniewski, L.: Assessing the vibrational frequencies of the Holweide Hospital in the city of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis and fe-modelling. *Natural Hazards*, (submitted).

Fäcke, A., Parolai, S., Richwalski, S. M., Stempniewski, L.: Assessing the vibrational frequencies of the Cathedral of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis. *Natural Hazards*, (submitted)

Richwalski, S. M., Fäcke, A., Parolai, S., Stempniewski, L.: Influence of site and source dependent ground motion scenarios on the seismic safety of long-span bridges in Cologne, Germany. *Natural Hazards*, (submitted).

Parolai, S., Richwalski, S.M.: The importance of converted waves in comparing H/V and RSM site response. *Bulletin of the Seismological Society of America*, (in revision).

Mucciareli, M.: The Molise, 2002 earthquake damage survey and site amplification studies. Vortrag am 05.06.2003 im GFZ Potsdam.

4.4 Erdbebensimulation von Bodenerschütterungen im Bereich kritischer Bauwerke

Sandra M. Richwalski, Frank Roth und Rongjiang Wang

GeoForschungsZentrum Potsdam

Sektion 2.1 Naturkatastrophen

Email: richw@gfz-potsdam.de

TP B2.2: Erdbebensimulation von Bodenerschütterungen im Bereich kritischer Bauwerke

4.4.1 Zusammenfassung

Für verschiedene Profile durch die Niederrheinische Bucht und eine Reihe von sowohl historischen als auch in Zukunft möglicherweise eintretenden Erdbeben wurden Szenarien der Bodenerschütterung berechnet. Es konnte gezeigt werden, dass die Struktur des Untergrundes im Testgebiet Köln/Aachen die Wellenausbreitung stark beeinflusst, so dass mit einem einfachen, nur von der Entfernung abhängigen Abklingen der Amplituden nicht gerechnet werden darf. Es kommt nämlich zur frequenzabhängigen Amplitudenverstärkung durch Fokussierung, wenn Wellen, die an schrägeinfallenden Schichtgrenzen zwischen dem Grundgebirge und den auflagernden Sedimentschichten (Verwerfungen, Übergang vom Sediment zum an der Oberfläche anstehenden Grundgebirge) reflektiert werden, positiv mit dem einfallenden Wellenfeld interferieren. Die zusätzlich zur 1D-Resonanz auftretenden 2D-Resonanzfrequenzen sind in der Regel niedriger als diese. Diese Tatsache sollte für ausgedehnte Bauwerke wie Brücken berücksichtigt werden, da deren Eigenresonanzen bei niedrigen Frequenzen liegen. Außerdem ist die Erschütterungsdauer und damit Belastungsdauer im Vergleich zu 1D-Modellierungen wesentlich länger.

Abstract

Ground shaking scenarios for various profiles crossing the Lower Rhine Embayment were computed for a number of historical as well as probable future earthquakes. It was possible to show that the structure of the underground in the test area of Cologne/Aachen has a strong influence on wave propagation, such that simple, distance-dependent amplitude decay is not realistic. Amplification of amplitudes by focussing occurs, if waves are reflected at dipping bedrock/sediment boundaries (faults, pinching out of sediments towards outcropping bedrock) and interfere positively with the incoming wavefield. The 2D-resonance frequencies, which occur in addition to 1D-resonance, appear at lower frequencies than these. This fact should be taken into consideration when analysing extended man-made structures like bridges, because their eigenfrequencies are low. Furthermore, the shaking duration and therefore the loading duration is considerably prolonged compared to 1D-modelling.

4.4.2 Veranlassung und Problem

Standortspezifische Verstärkungen von Bodenerschütterungen (die sogenannten „site effects“), bedingt durch komplexe Einflüsse oberflächennaher Schichten, Grundwasser-Effekten und geometrisch-topographischer Fokussierung von Wellenfeldern, beeinflussen das Schadensbild von Starkbeben oftmals entscheidend. Die messtechnische Erfassung der relevanten Parameter aus Registrierungen von Erdbeben und dem Hintergrundrauschen ist ein Hauptbestandteil der Mikrozonierung (TP B2.1). In Gebieten mit moderater Seismizität ist die Datengrundlage aber oft spärlich. Insbesondere treten die Beben in vertretbaren Messzeiträumen nicht unbedingt an den Störungszonen auf, die potentiell gefährdend sind (z.B. allein wegen ihrer Nähe zu einem Ballungszentrum). Numerische Simulationen von Szenariobeben können helfen, Messdaten zu interpretieren und zu interpolieren. Die Modelle können zudem systematisch variiert werden, um die Bedeutung von Effekten wie frequenzabhängigen Amplitudenverstärkungen oder die Verlängerung der Erschütterungsdauer besser abschätzen zu können.

Auch sind die zu erwartende Bodenbeschleunigung in der unmittelbaren Umgebung kritischer Bauwerke und daraus abgeleitete Größen wie Antwortspektren, die maximale Bodenbeschleunigung (PGA) und Bodenschwinggeschwindigkeit (PGV) wichtige Eingangsgrößen in der Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken (TP B4) und finden in der Risikoanalyse Verwendung (TP B3). Diese Größen werden meist über eine probabilistische Gefährdungsanalyse (PSHA, TP B1) gewonnen, die auch Einfluss auf die Festlegung von DIN-Spektren nimmt. Allerdings werden diese Größen nur für typische Untergrundsituationen entwickelt, entbehren also der im speziellen Falle wichtigen, unter Umständen kritischen standortspezifischen Verstärkungen. Durch numerische Simulation von Szenariobeben mit typischen Wiederkehrperioden können diese Größen für den Standort präzisiert werden.

Als Fernziel wäre eine Szenariodatenbank, in der die Bodenerschütterung und daraus abgeleitete schadensrelevante Parameter (z.B. PGV und PGA) für zu erwartende Schadensbeben flächenhaft gespeichert sind, von großer Wichtigkeit. Denn eine solche Datenbank könnte im Falle der Katastrophe im Zusammenhang mit Gebäudeinformationen einen schnellen Überblick darüber geben, wo die größten Schäden zu erwarten sind, um Rettungskräfte in ihrem Einsatz zu unterstützen.

4.4.3 Ziel

Das berechnete Wellenfeld soll möglichst realitätsnah sein, was bedeutet, dass das numerische Verfahren sowohl Quell- als auch Laufwegeeffekte berücksichtigen können muss. Der Quelleffekt drückt sich darin aus, dass die Orientierung der Verwerfung und der Mechanismus des Erdbebens (z.B. Abschiebungsbeben) einen Einfluss auf das Wellenfeld haben. Die Variation der physikalischen Parameter im Untergrund soll nicht nur in vertikaler Richtung berücksichtigt werden (Schichtung), was durch die Verwendung eines 1D-Verfahrens realisiert werden kann, sondern auch in horizontaler Richtung. Dazu benötigt man mindestens ein 2D-Verfahren. Für das Testgebiet Köln/Aachen sollen mit dem gewählten numerischen Verfahren Szenarien der Bodenerschütterung berechnet und daraus schadensrelevante Parameter abgeleitet werden. Wünschenswert ist eine flächendeckende Berechnung dieser Parameter, so dass Karten zur Verfügung gestellt werden können. Die auslösenden Beben müssen physikalisch möglich sein und sollen Wiederkehrperioden haben, die für Ingenieure und ihre Untersuchungen der Vulnerabilität von Bauwerken relevant sind.

4.4.4 Methode

Um die angestrebten Ziele zu erreichen, wurde zuerst nach einem geeigneten numerischen Verfahren gesucht. Wang (1999) hatte ein schnelles und hochgenaues Verfahren zur Be-

rechnung des Wellenfeldes in einem geschichteten Medium entwickelt. Dieses Verfahren wurde nach dem Vorbild von Zahradník and Moczo (1996) an deren zweidimensionalen Finite-Differenzen (FD) Programm gekoppelt. Mit diesem Hybrid-Verfahren kann die rechenzeitintensive FD-Berechnung auf den Teil des Modells beschränkt werden, in dem die physikalischen Parameter lateral variieren. Um numerische Störeffekte zu vermeiden, muss das Hypozentrum in einer Ebene mit dem Profilschnitt liegen. Für den Einsatz einer ausgedehnten Quelle, bei der ein Bruchvorgang auf einer Fläche simuliert und nicht eine vom seismischen Moment her äquivalente Punktquelle verwendet wird, muss diese Voraussetzung ebenfalls erfüllt sein. Im Testgebiet konnte die ausgedehnte Quelle wegen der Lage der Störungszonen deshalb nicht eingesetzt werden. Das Verfahren verwendet eine Näherung für die Absorption. Der Einfluss von Topographie an der Oberfläche - für das Testgebiet vernachlässigbar - ist im verwendeten FD-Verfahren nicht berücksichtigt.

- *Eingangsdaten für die Untergrundmodelle:* Die Datengrundlage erwies sich zunächst als spärlich, da nur wenige Bohrungen, in denen auch geophysikalische Parameter gemessen worden waren, zur Verfügung stehen, und diese oft nicht das Grundgebirge erreichen. Die vorhandenen geologischen Profile konnten wegen ihrer Lage nur in einem Fall für das Testgebiet genutzt werden. Ergebnisse aus TP 2.1 (Geschwindigkeits-Tiefen-Beziehung, Sedimentmächtigkeit) trugen jedoch zur Verbesserung der Datengrundlage bei.
- *Vergleichsdaten:* Zur Kalibrierung der Bodenbewegungsszenarien wäre die Registrierung von Beben auf einer der Verwerfungszonen westlich von Köln mit Stationen im Bereich der Sedimente innerhalb der 6-wöchigen Messkampagne von TP B2.1 nützlich gewesen. Da kei-

ne geeigneten Erdbeben in diesem Zeitraum auftraten, sind absolute Aussagen aus den 2D-Hybrid-Modellierungen mit Vorsicht zu treffen. Aus dem Vergleich verschiedener Modelle (Variation der Quellparameter und des Untergrundmodells) oder aus den Vergleichsrechnungen mit 1D-Methoden konnten jedoch Erkenntnisse über Fokussierungseffekte, das Auftreten von 2D-Resonanzen oder Signalverlängerungen gezogen werden. Die berechneten Wellenfelder wurden außerdem hinsichtlich einiger abgeleiteter Größen wie z.B. der fundamentalen Resonanzfrequenz mit gemessenen H/V Spektren (TP B2.1) verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung.

- *Eingangsdaten für die Schadensbeben:* Die Lage der Verwerfungszonen, besonders die des Köln am nächsten liegenden Erftsprung-Systems, ist weitgehend bekannt. Das für TP B4 aus der DIN relevante Gefährdungsniveau von 475 Jahren musste aber mit einem seismischen Moment (erwartete Bebenstärke), einem seismotektonisch sinnvollen Herdmechanismus und einer Tiefenlage untersetzt werden. Aus TP B1 standen für ein solches Ereignis zwei spektrale Werte (0.4 und 1 s) für die erwartete Bodenbeschleunigung auf Festgestein zur Verfügung. Diese wurden zur Kalibrierung eines Modells mit anstehendem Festgestein verwendet. Die mittels Trial-and-Error gefundene passende Kombination der Bebenparameter (Mechanismus: Schrägabschiebung, Beben-tiefe: 6 km, Momenten-magnitude: $M_w=5.3$, Frequenzinhalt der Herdzeitfunktion) wurde dann in alle 2D-Hybrid-Modelle übernommen.
- *Flächendeckende Berechnung:* Um exemplarisch mit der 2D Hybrid-Methode einen Eindruck von der Variabilität der Bodenbewegung zu bekommen, wurde, da der von TP B2.1 zur Verfügung gestellte Datensatz nur einen Teil

des Testgebietes abdeckt, ein 3D-Modell der Tiefenlage des Festgesteins (Geologisches Landesamt NRW) in ein 3D-Modell der Sedimentmächtigkeit umgewandelt. Innerhalb der Sedimente wurde ein stetiger Anstieg der Geschwindigkeit angenommen (gemäß TP B2.1), eine mögliche Geschwindigkeitsinversion durch Kohleflöze musste auf Grund der schlechten Datengrundlage vernachlässigt werden. Es wurden vier Profile ausgewählt, die sich alle im Stadtbereich von Köln und zwar am Standort der Köln-Deutzer Brücke schneiden.

4.4.5 Ergebnisse und Diskussion

In den 2D-Hybrid-Modellierungsergebnissen für die verschiedenen Profile, Hypozentren und Bebenmechanismen springen, obwohl vereinfachte Modelle für das Testgebiet Köln/Aachen verwendet wurden, drei Effekte deutlich ins Auge:

- Fokussierung, d.h. Verstärkung der Amplituden durch positive Interferenz des Wellenfeldes mit an schrägstehenden Schichtgrenzen reflektierten Wellen. Die Lage dieser Bereiche mit verstärkten Amplituden wird von der Struktur des Untergrundes bestimmt. Damit verbunden ist
- das Auftreten von 2D-Resonanz, die meist bei kleineren Frequenzen auftritt als die 1D-Resonanz, welche lediglich durch Sedimentmächtigkeit und Scherwellengeschwindigkeit bestimmt wird und mit einfachen 1D-Verfahren reproduziert werden kann;
- langsames Abklingen der Amplituden mit der Zeit.

Diese Effekte werden bei einer 1D-Modellierung nicht erfasst. Darüber hinaus ist zu beachten, dass im Falle einer 3D-Modellierung zusätzliche Effekte auftreten

(z.B. weitere Fokussierungen und Resonanzfrequenzen) und die oben genannten Effekte modifiziert werden können.

Abbildung 4.15 zeigt exemplarisch den Unterschied zwischen Pseudo-2D-Modellierung (links) und 2D-Hybrid-Modellierung (rechts). Erstere verwendet den Algorithmus von Wang (1999) für 1D-Medien, wobei jede Epizentralentfernung separat berechnet wird und das Medium für jeden Programmdurchlauf entsprechend dem 2D-Untergrundmodell angepasst wird. Das Pseudo-2D-Wellenfeld ist weniger komplex und die Amplituden klingen schneller mit der Zeit ab. Nur die Ersteinsätze der beiden Wellenfelder stimmen überein. Die Amplituden des 2D-Wellenfeldes nehmen keineswegs kontinuierlich mit der Entfernung ab, sondern es kann lokal, bedingt durch die Struktur des Untergrundes, zu einer Amplitudenverstärkung kommen. In Abbildung 4.18 ist diese Fokussierung für ein weiteres Untergrundmodell besser zu erkennen (Pfeil).

Abbildung 4.16 zeigt die Lage von vier Profilen durch die Niederrheinische Bucht, die berechnet wurden, um einen Eindruck von der räumlichen Variabilität des Wellenfeldes zu bekommen, aber besonders, um Anregungsfunktionen für die dynamische Vulnerabilitätsanalyse der Brücken an TP B4 weiterleiten zu können. Die Untergrundstrukturen entlang der vier Profile sind in Abbildung 4.17 dargestellt.

Die Zeitverläufe für die beiden horizontalen Komponenten für alle Profile (Abbildungen 4.18 und 4.19) geben einen Eindruck von der Variabilität des Wellenfeldes. Es zeigen sich deutlich die Auswirkungen der Abstrahlcharakteristik eines Erdbebens und der Variabilität der Struktur des Untergrundes. Man beachte das langsame Abklingen der Amplituden mit der Zeit.

Fazit: So wie man im Zeitbereich nicht ein einfaches, nur von der Entfernung abhängiges Abklingen der Amplituden erwarten darf, kann man nicht mit einem glatten Spektrum im Frequenzbereich rechnen, das eine abgeschwächte Form des ursprünglichen Quellspektrums dar-

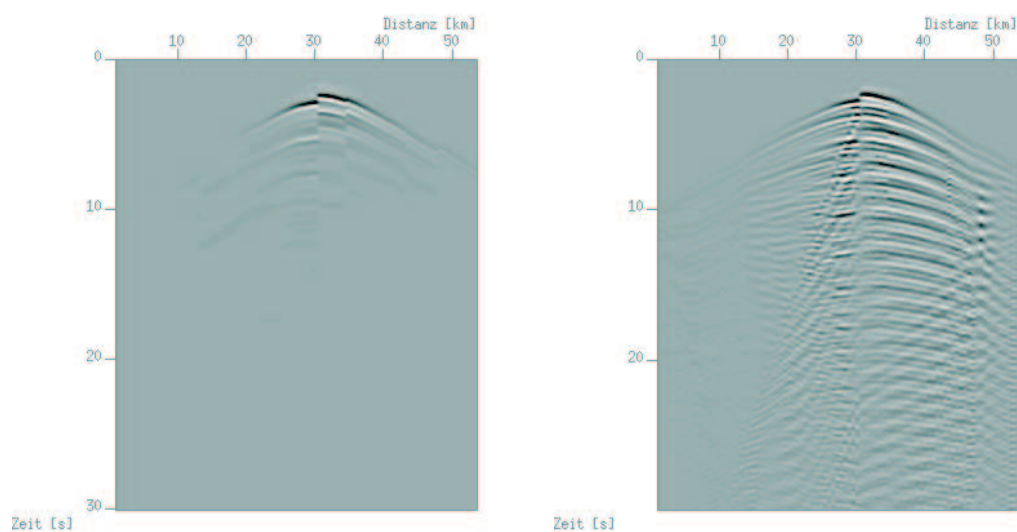


Abbildung 4.15: Vergleich der Bodenschwingungsgeschwindigkeit zwischen Pseudo-2D- (links) und 2D-Hybrid-Modellierung (rechts) für ein identisches Untergrundmodell und identische Bebenparameter. Es wurde eine globale Skalierung gewählt, damit die Amplituden vergleichbar sind.

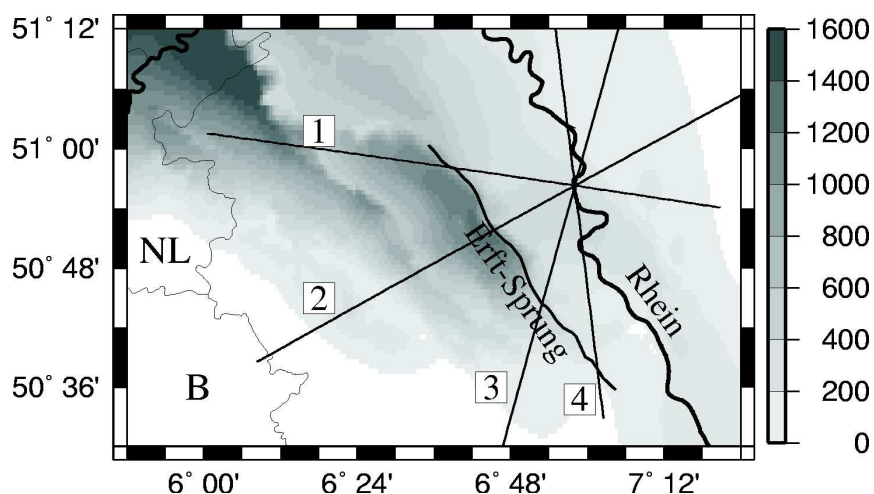


Abbildung 4.16: Lage der vier Profile für die 2D-Hybrid-Modellierung. Die Profile treffen in Köln am Standort der Köln-Deutzer Brücke zusammen. Die Mächtigkeit der Sedimentschichten (in m) ist als Grauschattierung wiedergegeben.

stellt. Die Struktur des Untergrundes wirkt wie ein Filter, der die Amplitude des einfallenden Wellenfeldes bei bestimmten Frequenzen verstärkt oder abschwächt. Für die Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken ist von Bedeutung, bei welchen Frequenzen es zur Amplitudenverstärkung kommt (Standorteffekt). Kritisch sind die Frequenzen in der Umgebung

der jeweiligen Eigenresonanzen der Bauwerke. Die Berechnung von Spektralverhältnissen ermöglicht die Identifikation dieser Frequenzen (Einzelheiten zur Methode finden sich bei TP B2.1). Neben der Grundresonanzfrequenz der Sedimentbedeckung können in Abbildung 4.20 weitere Frequenzen identifiziert werden. Vor allem dort, wo die Sedimentmächtigkeit

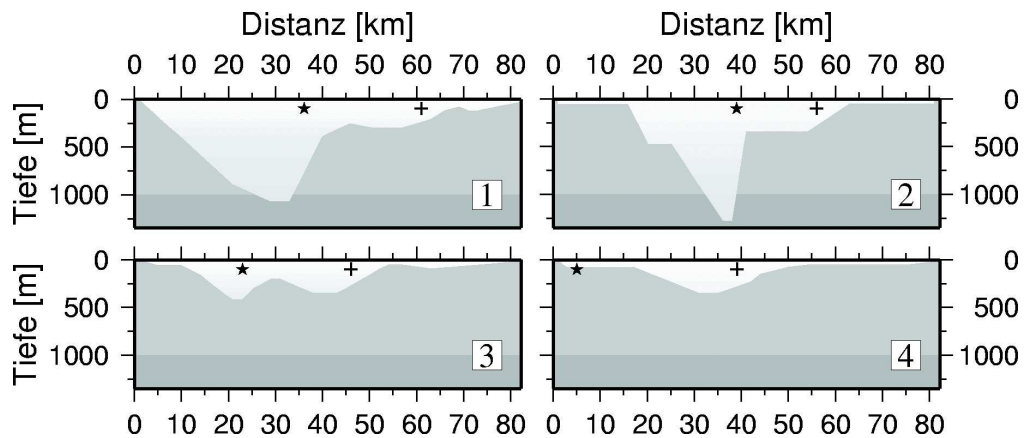


Abbildung 4.17: Variation der Mächtigkeit der Sedimentschichten entlang der vier Profile aus Abb. 4.17 (60-fach überhöht). Die Sedimentmächtigkeit im westlichen Abschnitt von Modell 1 musste an die Vorgaben der 2D-Hybrid-Modellierung angepasst werden, die besagen, dass die lokale Untergrundstruktur ein in horizontaler Richtung deutlich abgegrenzter Bereich sein muss. Diese Anpassung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse aus dem östlichen Abschnitt des Modells, da sowohl Bebenherd als auch Testgebiet weit genug entfernt liegen. Die Projektion des Bebenherdes (Erftsprung- System) auf das Profil (Stern) und der Schnittpunkt aller Profile (Kreuz) sind eingezeichnet.

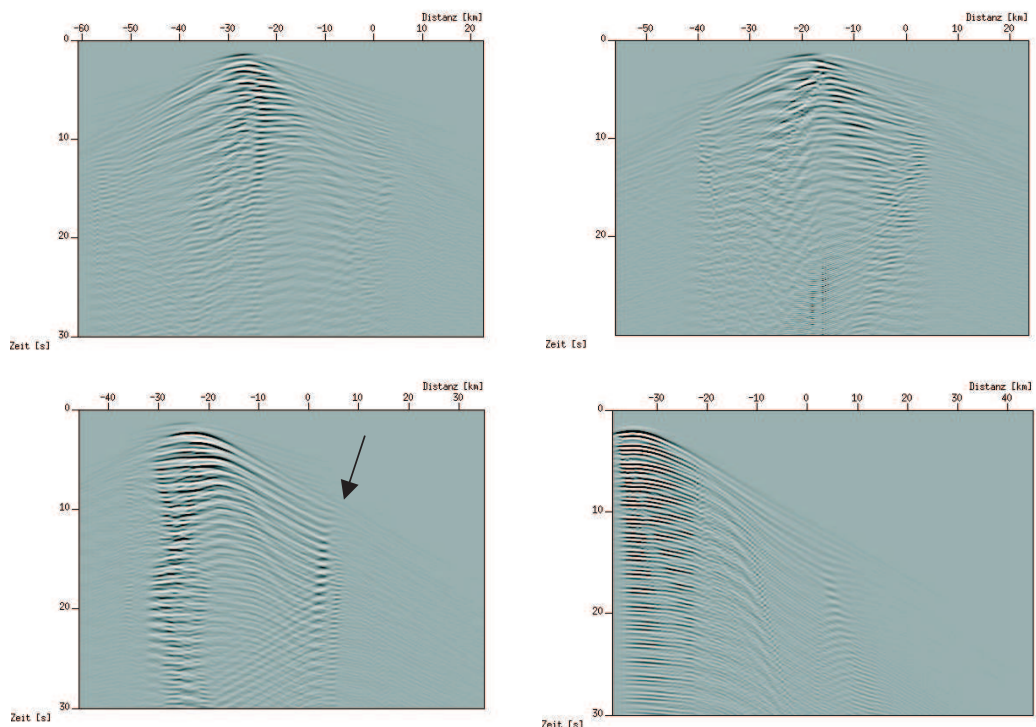


Abbildung 4.18: EW-Komponenten der Bodenschwinggeschwindigkeit (in einheitlicher Skalierung) für die 4 Profile aus Abbildung 4.17 (in derselben Anordnung). Der Referenzpunkt für die Distanzskalierung befindet sich am Kreuzungspunkt der Profile (+ in Abbildung 4.17).

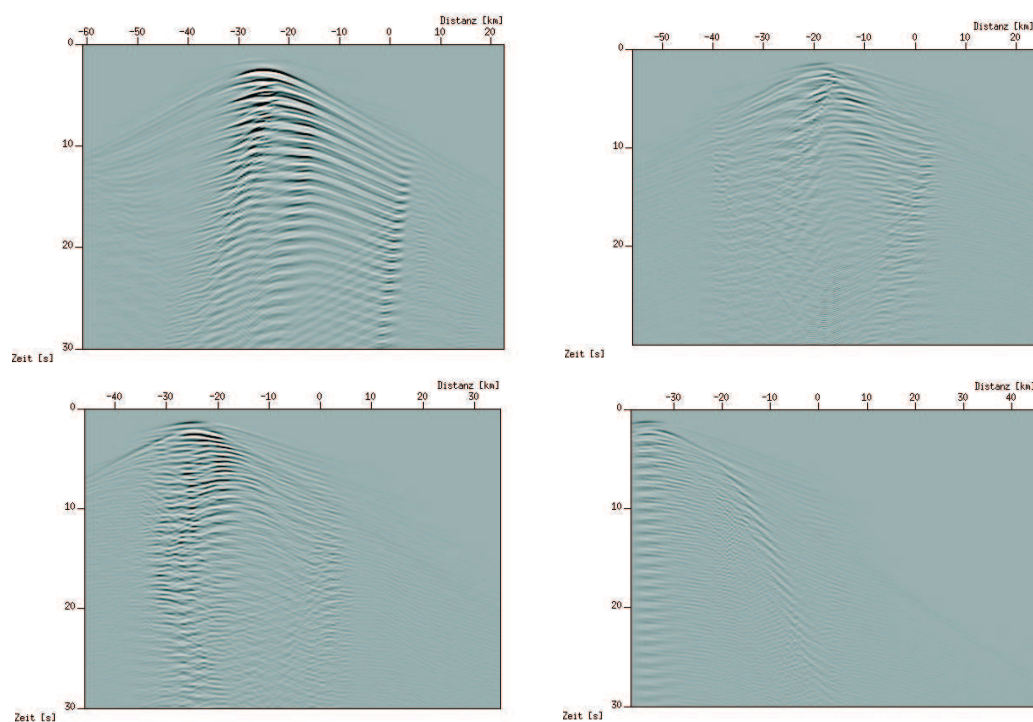


Abbildung 4.19: NS-Komponenten der Bodenschwinggeschwindigkeit (in einheitlicher Skalierung) für die 4 Profile aus Abbildung 4.17 (in derselben Anordnung). Der Referenzpunkt für die Distanzskalierung befindet sich am Kreuzungspunkt der Profile (+ in Abbildung 4.17).

abnimmt (Beckenrand) treten Amplitudenverstärkungen über größere Entfernungsbereiche bei relativ konstanten Frequenzen auf, die geringer sind als die Grundresonanzfrequenz der Sedimentbedeckung. Hervorgerufen werden diese Verstärkungen durch Wellen, die an schrägeinfallenden Schichtgrenzen hin- und herreflektiert werden und positiv miteinander interferieren. Dabei können höhere Beschleunigungen gerade in den für ausgedehnte Bauwerke wichtigen niedrigen Frequenzbereichen auftreten als gemäß der Antwortspektren nach E-DIN 4149 zu erwarten ist (TP B4).

Ergebnisse aus den 2D-Hybrid-Modellierungen wurden auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt. Die (interdisziplinäre) Zusammenarbeit mit den Teilprojekten B2.3, B4 und vor allem B2.1 resultierte in einer Reihe von Veröffentlichungen, die im Abschnitt Literatur aufgelistet sind. Neben der Berechnung von Szenarien wurden Modellierungen durchge-

führt, die theoretische Überlegungen zu der in TP B2.1 verwendeten Nakamura-Methode bestätigten. Weitere Untersuchungen zielen auf die Simulation von Hintergrundrauschen und seine Analyse durch seismische Netzwerke ab, ebenfalls in Zusammenarbeit mit TP B2.1.

4.4.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die Wahl des anzuwendenden Modellierungsverfahrens richtet sich nach den Kenntnissen über den Untergrund. Falls nur Informationen über eine vertikale Schichtung der Sedimente vorliegen, sollte man eine 1D-Modellierung in Erwägung ziehen. Allerdings sollte dabei nicht nur der senkrechte Einfall von Scherwellen berücksichtigt werden, sondern es sollte die Ausbreitung des gesamten Wellenfeldes korrekt berechnet und Quelleffekte berücksichtigt werden (z.B. mit dem Algorithmus von Wang, 1999). Eine 2D-Modellierung wie die vorlie-

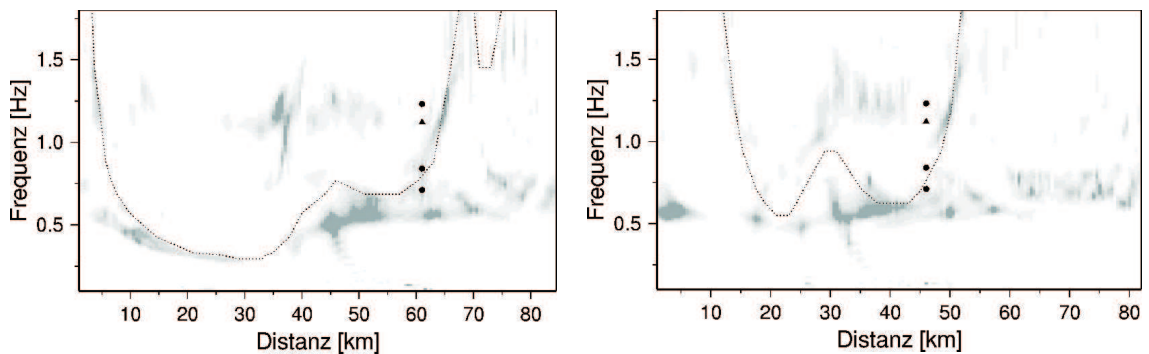


Abbildung 4.20: Einen Überblick über im Wellenfeld vorhandene Resonanzfrequenzen bietet die Berechnung von spektralen Verhältnissen (hier: gemittelte horizontale zu vertikalen Spektren) für Modell 1(links) und Modell 3(rechts). Je dunkler die Grauschattierung ist, desto größer ist die Amplitudenverstärkung. Die gestrichelten Linien geben den theoretischen Verlauf der Grundresonanzfrequenz an (1D). Einige Eigenfrequenzen von Severinbrücke (Punkte) und Köln-Deutzer Brücke (Dreieck) sind eingezeichnet.

gende Hybrid-Modellierung sollte eingesetzt werden, wenn diese Schichtung laterale Variationen (hauptsächlich in einer Richtung) aufweist. Eine 3D-Modellierung muss schließlich eingesetzt werden, wenn die Untergrundparameter in alle Raumrichtungen variieren. Weitere Voraussetzungen für ein realistisches Szenario der Bodenbewegung sind Kenntnisse über S- und P-Wellengeschwindigkeit, Dichte und Dämpfungseigenschaften des Mediums, Herdtiefe und -lage, Herdzeitfunktion, Herdmechanismus und seismisches Moment der Quelle. Bebenregistrierungen auf den Sedimenten sind für die Kalibrierung der Modelle wünschenswert.

In der Praxis sollten Modellierungen (2D oder sogar 3D) Teil einer Mikrozonierung sein. Es ist von großer Wichtigkeit, auch den Einfluss von Strukturen abschätzen zu können, die tiefer liegen als die normalerweise berücksichtigten obersten 30 m, denn diese Strukturen können zu einer zusätzlichen Verstärkung von Amplituden führen und die Signaldauer erheblich verlängern. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit TP B4 hat gezeigt, dass die Modellierungen einen wichtigen Beitrag zur dynamischen Analyse der Vulnerabilität von Bauwerken mit besonderem Sicherheitsanspruch leisten können.

4.4.7 Offene Fragen

Die Modelle stellen trotz der Einarbeitung von Ergebnissen aus den anderen Teilprojekten noch eine Vereinfachung des Untergrundes dar. Bohrungen, auch in den mächtigeren Sedimentschichten, Aufzeitmessungen in diesen Bohrungen oder die Messung reflexions- und refraktionsseismischer Profile würden weitere Daten liefern. Es wäre auch sinnvoll zu überprüfen, welchen Einfluss die Kohleflöze, die eine Verminderung der seismischen Geschwindigkeit verursachen, auf die Bodenerschütterung haben. Durch die Nähe der Stadt Köln zum Erftsprung sollte die Modellierung des Erdbebens durch eine Punktquelle durch die Simulation eines Bruchvorgangs auf einer Fläche ersetzt werden, wozu das 2D-FD durch ein 3D-Verfahren ersetzt werden müsste.

Die Ergebnisse aus der 2D Hybrid-Modellierung konnten erfolgreich für die Vulnerabilitätsanalyse von niedrigfrequenten Bauwerken (TP B4) verwendet werden. Wenn die Scherwellengeschwindigkeit an der Oberfläche kleiner und die gewünschte maximale Frequenz in den Daten größer sein sollen (rund 10 Hz für eingeschossige Bebauung), wäre der Wechsel zu einem FD-Algorithmus zu erwägen, der seine Berechnung automatisch an die

Komplexität des Untergrundmodells anpassen und damit die Rechenzeit verringern kann. Um dem hochfrequenten Anteil des Wellenfeldes jedoch eine physikalische Basis zu geben, müssten detailliertere Eingangsdaten über den Untergrund (Struktur, Dämpfung) vorhanden sein. Zudem müsste eine Herd-Zeit-Funktion für das Szenariobeben aus Messungen vorliegen oder ein stochastischer Ansatz für das Herdspektrum verwendet werden.

Wenn man Szenarien für die Vulnerabilitätsanalyse von extrem langlebigen Bauwerken zur Verfügung stellen möchte, müsste man prüfen, inwieweit für die dann zu betrachtenden größeren Magnituden eine Skalierung der bisherigen Ergebnisse möglich wäre, oder ob eine Neuberechnung der Szenarien erfolgen müsste.

Der Aufbau einer Szenariendatenbank kann erfolgen, nachdem eine Kalibrierung der Modelle vorgenommen wurde. Die Aussagekraft der Bodenbewegungsszenarien hängt nämlich entscheidend von der Qualität der Absolutwerte ab. Allerdings wäre es auch wichtig, dass der verwendete Algorithmus schnell genug ist, um im Katastrophenfall in kurzer Zeit ein verbessertes Szenario mit den tatsächlichen Bebenparametern (Magnitude, Abstrahlcharakteristik, Lage des Hypozentrums) berechnen zu können.

4.4.8 Literatur

Bormann, P., Grünthal, G., Milkereit, C., Parolai, S., Richwalski, S.M., Roth, F., Stromeyer, D., Wahlström, R., Wang, R., Zschau, J. (2002a): Bedeutung geowissenschaftlicher Arbeiten für die Erdbebenrisikoabschätzung. Notfallvorsorge, 2, 15-21.

Bormann, P., Grünthal, G., Milkereit, C., Parolai, S., Richwalski, S.M., Roth, F., Stromeyer, D., Wahlström, R., Wang, R., Zschau, J. (2002b): Bedeutung geowissenschaftlicher Arbeiten für die Erdbebenrisikoabschätzung. Schriftenreihe des DKKV, 27, 21-32.

Fäcke, A., Parolai, S., Richwalski, S.M., Stempniewski, L. (2004): Assessing the vibrational frequencies of the Cathedral of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis. Natural Hazards, Special Issue on DFNK, in print.

Fäcke, A., Stempniewski, L., Richwalski, S.M., Parolai, S., Milkereit, C., Wang, R., Bormann, P., Roth, F. (2002): A combined geophysical/engineering approach for the seismic safety of long-span bridges. In "Challenges for Earth Sciences in the 21st Century", Springer Verlag, in print.

Parolai, S., Richwalski, S.M. (2004): The importance of converted waves in comparing H/V and RSM site responses. Bull. Seism. Soc. Am., 94(1), 304-313.

Parolai, S., Richwalski, S.M., Milkereit, C., Bormann, P. (2004): Assessment of the stability of H/V spectral ratios and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany). *Tectonophysics*, special issue "Strong Ground Motion, Earthquake Hazard and Risk in Alpine-Himalayan and Pacific Regions", in print.

Richwalski, S.M., Fäcke, A., Parolai, S., Stempniewski, L. (2004): Influence of site and source dependent ground motion scenarios on the seismic safety of long-span bridges in Cologne, Germany. Natural Hazards, Special Issue on DFNK, in print.

Richwalski, S.M., Parolai, S., Fäcke, A., Hollnack, D. (2002): An interdisciplinary approach for the microzonation of the Cologne area (Germany). 3rd Forum Katastrophenvorsorge DKKV, submitted.

Richwalski, S.M., Wang, R., Roth, F. (2002): A new hybrid method for modelling ground motion. In: 2nd Forum Katastrophenvorsorge. Tetzlaff, G., Trautmann T., and Radtke, K.S., Eds., im Auftrag des DKKV, 306-310.

Wang R. (1999): A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions. Bull. Seis. Soc. Am., 89, 733-741

Zahradník J., Moczo P. (1996): Hybrid seismic modeling based on discrete-wave number and finite-difference methods. PAGEOPH, 148, 21-38

4.5 Standortspezifische Bebenwirkungen im Gefährdungsraum Köln / Aachen

Stavros A. Savidis und Jens Röhner

*Technische Universität Berlin
Fachbereich für Grundbau und Bodenmechanik
Email: savidis@tu-berlin.de*

TP B2: Standortspezifische Bebenwirkungen im Gefährdungsraum Köln / Aachen

4.5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des TP des DFNK wurde durch die TU Berlin ein Vorschlag zur Mikrozonierung des Großraumes Köln aus der Sicht des praktischen Erdbebeningenieurs erarbeitet. Dafür wurde anhand der Mächtigkeit der lokalen Sedimente eine Unterteilung des Untersuchungsgebietes in acht Teilregionen vorgenommen, welche, ausgestattet mit geophysikalischen Bodenmodellen, die Grundlage für eindimensionale Analysen der Übertragungseigenschaften der lokalen Sedimentüberdeckung bildete. Mit Hilfe dreier in der Praxis üblicher Berechnungsverfahren wurden auf der Grundlage der Standardereignisse der E-DIN 4149 Convolutionberechnungen für alle acht Teilregionen durchgeführt und Transferfunktionen sowie Bodenbeschleunigungsantwortspektren erzeugt. Anhand der Ergebnisse wurden zum einen die verwendeten Verfahren untereinander verglichen und zum anderen wurde ein Vergleich zu den elastischen Bodenbeschleunigungsantwortspektren der E-DIN 4149 geführt. Im zweiten Teil des Forschungsprojektes wurden die Ergebnisse der seismischen Analysen genutzt, um die Auswirkungen der angesetzten Erdbeben auf Gebäude zu untersuchen. Dazu wurden zum einen für zwei ausgewählte Bauwerke der Stadt Köln, dem Krankenhaus von Köln-Mehrheim und dem Architekturgebäude der Fachhochschule Köln, dynamische Strukturanalysen durchgeführt, um das Bauwerksverhalten bei Erregung durch einfallende Erdbebenwellen zu untersuchen. Unabhängig davon wurde der in Deutschland übliche, statische geotechnische Nachweis der Grundbruchsicherheit von Flachfundamenten einem quasi-statischen Nachweisverfahren aus der Fachliteratur gegenübergestellt, das es ermöglicht, Beschleunigungseffekte aus Erdbebenerregungen auf die Standsicherheit von Flachgründungen zu erfassen. Anhand der ermittelten maximalen Bodenbeschleunigungen für den Großraum Köln wurde die Signifikanz mitteleuropäischer Erdbeben für die Grundbruchsicherheit untersucht.

Abstract

In the course of sub-project B2 the Geotechnical Institute of the TU Berlin developed a proposal for a microzonation of the area of Cologne from an earthquake engineering perspective. Based on the thickness of the local sedimentary cover a division of the area of investigation into eight sub-regions has been performed which, equipped with appropriate geophysical soil models, was subsequently used for a one-dimensional response analysis of the local sedimentary cover. Using three well-known procedures, response analyses on the basis of the standard earthquake events of the E-DIN 4149 were performed, resulting in transfer functions and acceleration response spectra for each sub-region.

The results were used to compare the three analysis procedures among themselves and a comparison with the acceleration response spectra of E-DIN 4149 was performed. In the second part of the research project the results of the seismic analyses were used to investigate the effects of incident earthquake waves on buildings. Therefore we performed dynamic structural analyses for two existing buildings in the city of Cologne: the hospital in Cologne-Mehrheim and the building of the department of architecture of the Fachhochschule Cologne. Independent of this, the static bearing capacity test that is commonly used in Germany was evaluated against a recently published procedure that accounts in a quasi-static manner for the acceleration effects of earthquakes on the bearing capacity of shallow foundations. Using the calculated peak ground accelerations of the seismic analyses for the area of Cologne the significance of middle European earthquakes for possible bearing capacity failures was investigated.

4.5.2 Veranlassung und Problem

Auf Grund seiner geografischen Lage befindet sich Köln in einer der seismisch aktivsten Regionen Deutschlands, der Niederrheinischen Bucht. Sie liegt gemäß dem Entwurf der neuen DIN 4149 auf der Grenze zwischen den Erdbebenzonen 1 und 2, was zur Folge hat, dass alle Gebäude auf den Lastfall Erdbeben bemessen werden müssen. Die seismischen Lastannahmen für derartige Bemessungen sind entweder anhand der Bemessungsspektren der E-DIN 4149 anzunehmen oder können durch spezielle standortspezifische Untersuchungen bestimmt werden (siehe E-DIN 4149: 2001-06, Kapitel 5.3.2, Abschnitt 3). Für derartige standortspezifische Untersuchungen stehen dem praktischen Erdbebeningenieur eine Reihe von analytischen Lösungen zur Verfügung, die in bekannten Softwarepaketen wie SHAKE 91 oder SIMUL implementiert sind. Alle Lösungen erfordern ein geophysikalisches Modell des tieferen Untergrundes des zu untersuchenden Standortes, das die Basis für die anschließenden Convolutionsberechnungen bildet.

Im Rahmen des DFNK war das Fachgebiet für Grundbau und Bodenmechanik der TU Berlin Partner im TP B2 „Standortspezifische Bebenwirkungen im Gefährdungsraum Köln“. Innerhalb dieses Teilprojektes haben wir einen Vorschlag für eine Mikrozonierung des Untersuchungsgebietes erarbeitet, der für alle abgegrenzten Teilregionen ein geophysikalisches

Bodenmodell bereitstellt und als Grundlage für standortspezifische Untersuchungen dienen kann. Bei der Erstellung der geophysikalischen Modelle berücksichtigten wir die Ergebnisse der in-situ Messungen des TP B2.1 (GFZ), welche zur Überprüfung der Grundresonanzfrequenzen verwendet wurden.

4.5.3 Ziele

Die von uns vorgeschlagene Unterteilung des Großraumes Köln in acht Teilregionen wurde in Form einer Karte ausgearbeitet und jeder Teilregion wurde ein eindimensionales geophysikalisches Bodenmodell zugewiesen. Damit soll dem praktisch tätigen Ingenieur ein Hilfsmittel für die tägliche Arbeit zur Verfügung gestellt werden, das den hohen Aufwand der Modellbildung für die einzelnen Bereiche der Stadt Köln vereinfacht. Die nachfolgenden, von uns durchgeführten ingenieurseismologischen Untersuchungen zu den Übertragungseigenschaften der anstehenden Sedimente mit drei in der Praxis üblichen Berechnungsverfahren sollten einen Überblick über die Unterschiede und Grenzen der verschiedenen Verfahren geben. Des Weiteren sollte durch einen Vergleich mit den elastischen Beschleunigungsantwortspektren der E-DIN 4149 der Einfluss der lokalen Geologie auf derartige Spektren verdeutlicht werden. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ermittelten Spektren ermöglichen eine Abschätzung der Konservativität der Last-

annahmen bei der Bemessung von Bauwerken. Die struktur-dynamischen Untersuchungen von zwei bestehenden Gebäuden in der Stadt Köln, dem Krankenhaus Köln-Mehrheim und dem Architekturgebäude der Fachhochschule Köln, sollen den Eignern direkt zur Verfügung gestellt werden und ihnen Aufschluss über die Standsicherheit der Gebäude im Hinblick auf die neue Erdbebennorm in Deutschland geben. Da der Grundbruchnachweis in Deutschland bisher i.A. nur nach statischen Verfahren, ohne Berücksichtigung von Massenträgheitskräften im Baugrund erfolgte, war es das Ziel des Vergleichs mit neuen in der Fachliteratur veröffentlichten Nachweisverfahren, die dieses Manko nicht haben, mögliche Sicherheitsrisiken im Falle eines Erdbebens offenzulegen.

4.5.4 Methode

Die ingenieurseismologischen Untersuchungen zu den Übertragungseigenschaften der lokal anstehenden Sedimentschichten umfassten folgende Arbeitsschritte:

- Auf der Grundlage geologischer und hydrologischer Karten sowie Veröffentlichungen aus der Fachliteratur wurde ein geologisches Modell für den Großraum Köln erstellt. Insbesondere die Modellierung der Oberfläche der devonischen Gesteine stand hier im Mittelpunkt, da sie die Mächtigkeit der überlagernden weichen Sedimente bestimmt.
- Abgrenzung von acht Teilregionen mit etwa einheitlicher Sedimentmächtigkeit und Erstellung einer Zonierungskarte (Abb. 4.21)
- Zuweisung geophysikalischer Bodenmodelle zu jeder Teilregion. Die geophysikalischen Bodenparameter wurden auf der Grundlage der Arbeiten von Budny (1984) und Schön (1983) bestimmt.

- Generierung synthetischer Erdbebenzeitverläufe auf der Grundlage der Herdparameter der drei Standardereignisse der E-DIN 4149 (Tab. 4.4) und des Brune'schen Herdmodells
- Analyse der Übertragungseigenschaften der Sedimentschichten mit drei unterschiedlichen Verfahren:
 - (1) zweidimensionale Haskell'sche Schichtenmatrizen (Haskell, 1953, 1960), implementiert im Programm SIMUL,
 - (2) eindimensionales Mehrschichtmodell (Schnabel et al., 1972), implementiert im Programm SHAKE 91,
 - (3) zweidimensionales 2-Schichtmodell (Murphy et al., 1971)
- Ergebnisse: Transferfunktionen und Bodenbeschleunigungsantwortspektren für alle acht Teilregionen (Abb. 4.22)
- Die Freifeldseismogramme der Beschleunigung bzw. die ermittelten Maximalwerte der Beschleunigung wurden im Anschluss zum einen für die dynamische Strukturanalyse der o.g. Gebäude bzw. für die Untersuchungen zur Grundbruchsicherheit von Flachgründungen genutzt.

Zur Beurteilung der Grundbruchsicherheit von existierenden Flachgründungen wurde von uns das Verfahren von Richards et al. (1993) dem statischen Verfahren der DIN 4017 gegenübergestellt.

Bei dem üblichen statischen Nachweisverfahren der Grundbruchsicherheit werden i.A. die zulässigen Sohlspannungen für eine gegebene Fundamentgeometrie und Baugrundbeschaffenheit nach folgender Formel ermittelt:

$$p_L = c \cdot N_c + q \cdot N_q + 0.5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \quad (4.1)$$

Die Tragfähigkeitsbeiwerte für die Kohäsion (N_c), die Einbindetiefe (N_q) und die Funda-

Erdbebenzone 1	Erdbebenzone 2
Schwäbische Alb, 26. Feb. 1969 Herdtiefe: $h_0 = 8 \text{ km}$ Herdmoment: $M_0 = 4.2 \cdot 10^{15} \text{ Nm}$ Stress drop: $\Delta\tau = 1.3 - 2.5 \text{ MPa}$	Liege, 08. Nov. 1983 Herdtiefe: $h_0 = 6 \text{ km}$ Herdmoment: $M_0 = 1.0 \cdot 10^{16} \text{ Nm}$ Stress drop: $\Delta\tau = 1.6 - 2.5 \text{ MPa}$
	Roermond, 13. Apr. 1992 Herdtiefe: $h_0 = 14.6 \text{ km}$ Herdmoment: $M_0 = 6.5 \cdot 10^{16} \text{ Nm}$ Stress drop: $\Delta\tau = 2.5 - 4.1 \text{ MPa}$

Tabelle 4.4: Standardereignisse der E-DIN 4149, nach Schneider (1998)

mentbreite (N_γ) sind beim statischen Nachweis Funktionen des Reibungswinkels φ . Sie wurden durch Richards et al. (1993) dahingehend erweitert, daß sie auch den Einfluss erdbebeninduzierter Massenträgheitskräfte in Form von normierten Beschleunigungswerten erfassen:

$$k_h = a_{h,max}/g k_v = a_{v,max}/g \quad (4.2)$$

Unter Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwertes η , der beim statischen Grundbruchnachweis des jeweiligen Fundamentes verwendet wurde, ist es auf der Grundlage der von Richards et al. (1993) entwickelten Kurven (Abb. 4.23) möglich, ein kritisches Beschleunigungsniveau k_v^* zu ermitteln, bei dem bereits bestehende Fundamente unter Erdbebenwirkung versagen.

4.5.5 Ergebnisse und Diskussion

Aufgrund des großen Umfangs der von uns erzeugten Ergebnisse wurde dem BMBF über das Deutsche Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) bereits ein detaillierter Arbeitsbericht (Förderkennzeichen 01SF9974/2) zugesendet. Wir beschränken uns hier daher auf einen Abriss der Ergebnisse der ingenieurseismologischen Berechnungen sowie der Untersuchungen zum Grundbruch.

Ingenieurseismologische Berechnungen

Vergleich der drei verwendeten Rechenverfahren:

- Alle drei verwendeten Verfahren sind gut zur Berechnung der ersten Grundresonanzfrequenz geeignet. Der Vergleich der letzteren mit in-situ gemessenen Grundresonanzfrequenzen (Abb. 4.21) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung
- Aufgrund der Abnahme des Schubmoduls G mit größer werdenden Scherverformungen γ verschieben sich die höheren Resonanzfrequenzen der nichtlinearen Berechnungen zu niedrigeren Werten im Vergleich zu den linear ermittelten
- Ein Einfluss der nichtlinearen Bodeneigenschaften (G - γ ; D - γ) zeigt sich nur bei dem kleinen Standardereignis „Schwäbische Alb“ (Abb. 4.22). Sie sind auf die i.A. sehr konservativen Werte des Dämpfungsgrades D zurückzuführen, die im Labor bei kleinen Scherverformungen gemessen werden.
- Der Vergleich des 2-Schichtsystems mit den Mehrschichtmodellen zeigt, dass ab etwa der ersten Resonanzfrequenz sowohl die Transferfunktion als auch die Antwortspektren des erstgenannten

Verfahrens deutlich unterhalb derer der Mehrschichtmodelle liegen.

- Parametervariationen zeigten, dass insbesondere die Variation des Qualitätsfaktors Q_s oder gleichbedeutend des Dämpfungsgrades D zu einer Absenkung der Antwortspektren um 10% bis 20% führen kann – dieses Phänomen wurde mathematisch näher untersucht.

Vergleich mit den elastischen Antwortspektren der resultierenden Bodenbeschleunigung der E-DIN 4149, 50%-Fraktile:

- Erdbebenzone 1: Unter Vernachlässigung der konservativen, nichtlinear ermittelten Spektren repräsentiert das DIN-Spektrum für Sedimentmächtigkeiten $d > 100$ m die Antwortspektren des Standardereignisses gut; für $d \leq 100$ m treten aufgrund der höheren Resonanzfrequenzen der Sedimentschichten Überschreitungen des DIN-Spektrums im höherfrequenten Bereich auf (Abb. 4.22).
- Erdbebenzone 2: Das kleinere aber flache Standardereignis „Liège“ wird bis zu Sedimentmächtigkeiten von $d > 220$ m gut durch das DIN-Spektrum abgedeckt. Für geringere Sedimenttiefen überschreitet es das DIN-Spektrum im hochfrequenten Bereich – ein Umstand der ab etwa $d = 100$ m für alle verwendeten Berechnungsverfahren beobachtbar ist.
- Das relativ große aber tiefe Standardereignis „Roermond“ wird in allen Teilregionen gut durch das DIN-Spektrum repräsentiert.

Untersuchungen zur Grundbruchsicherheit

Unabhängig von der Ähnlichkeit der Versagensmechanismen in der theoretischen Behandlung des statischen und des dynamischen

Grundbruchs gibt es einen deutlichen Unterschied in der Versagensform. Während beim statischen Grundbruch i.A. sehr große plötzliche Vertikalverformungen auftreten, muss für das Eintreten des dynamischen Grundbruchs erst ein kritisches Beschleunigungsniveau $[k_h/(1 - k_v)]^*$ überschritten werden. Da dies bei Erregungen infolge Erdbeben i.d.R. nur für sehr kurze Zeit und auch nur für eine bestimmte Anzahl von Lastzyklen passiert, entstehen hier die Verformungen eher schrittweise und kumulativ. Für kohäsionslose Böden, bei denen nur die Faktoren N_γ und N_q erforderlich sind, lässt sich die kritische Horizontalbeschleunigung k_h^* in Abhängigkeit vom statischen Sicherheitsbeiwert sowie dem Verhältnis der Einbindetiefe zur Fundamentbreite d/B grafisch darstellen (Abb. 4.23).

Für die drei von uns untersuchten Standardereignisse ergaben sich aus den errechneten Freifeldbeschleunigungszeitverläufen folgende Maximalwerte a_{max} :

Erdbebenzone 1: Standardereignis vom 26.02.69, Schwäbische Alb
 $0.66 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} \leq 0.93 \text{ m/s}^2 \rightarrow$
 $0.067 \leq k_h \leq 0.095$

Erdbebenzone 2: Standardereignis vom 08.11.83, Liège
 $1.26 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} \leq 1.79 \text{ m/s}^2 \rightarrow$
 $0.128 \leq k_h \leq 0.183$

Standardereignis vom 13.04.92, Roermond
 $1.00 \text{ m/s}^2 \leq a_{max} \leq 1.39 \text{ m/s}^2 \rightarrow$
 $0.10 \leq k_h \leq 0.142$

Gemäß DIN 4017 (8.79) ist für statisch bemessene Flachgründungen im Lastfall 1 ein globaler Sicherheitsfaktor von $\eta_p = 2.0$ anzusetzen. Geht man mit diesem Sicherheitsfaktor in die Diagramme der Abb. 4.23 und vergleicht die zugehörigen kritischen Beschleunigungsverhältnisse k_h^* mit den oben genannten der Standardereignisse, so kann man Folgendes beobachten:

Für das Standardereignis „Schwäbische Alb“ der Zone 1 ist das Beschleunigungsverhältnis $k_h \leq 0.1$ sowohl für bindige Bö-

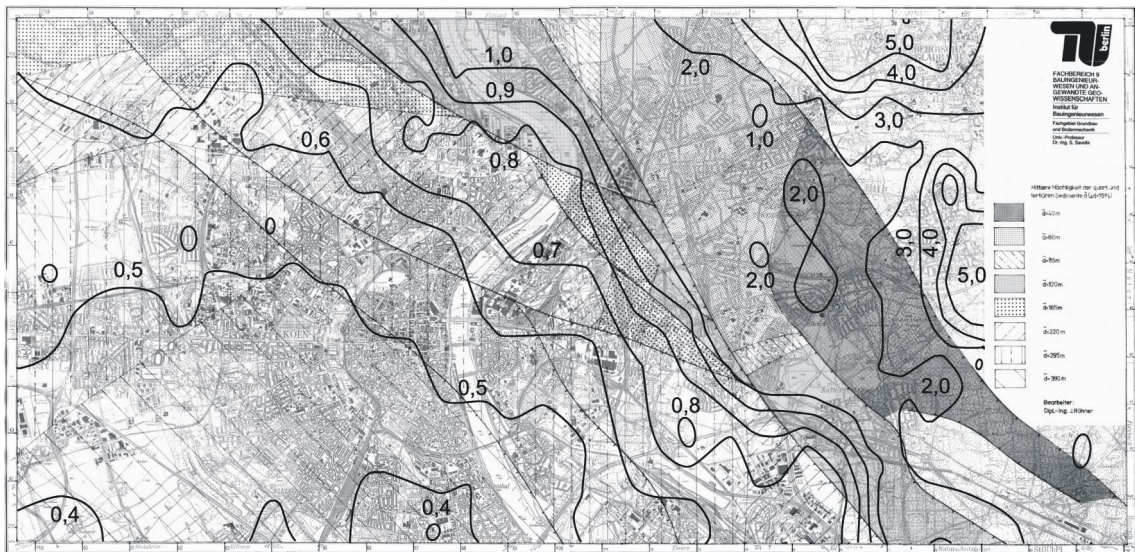


Abbildung 4.21: Unterteilung des Großraums Köln in acht Teilregionen; überlagert sind die Isolinien der in-situ gemessenen Grundresonanzfrequenzen von Parolai et al. (2001)

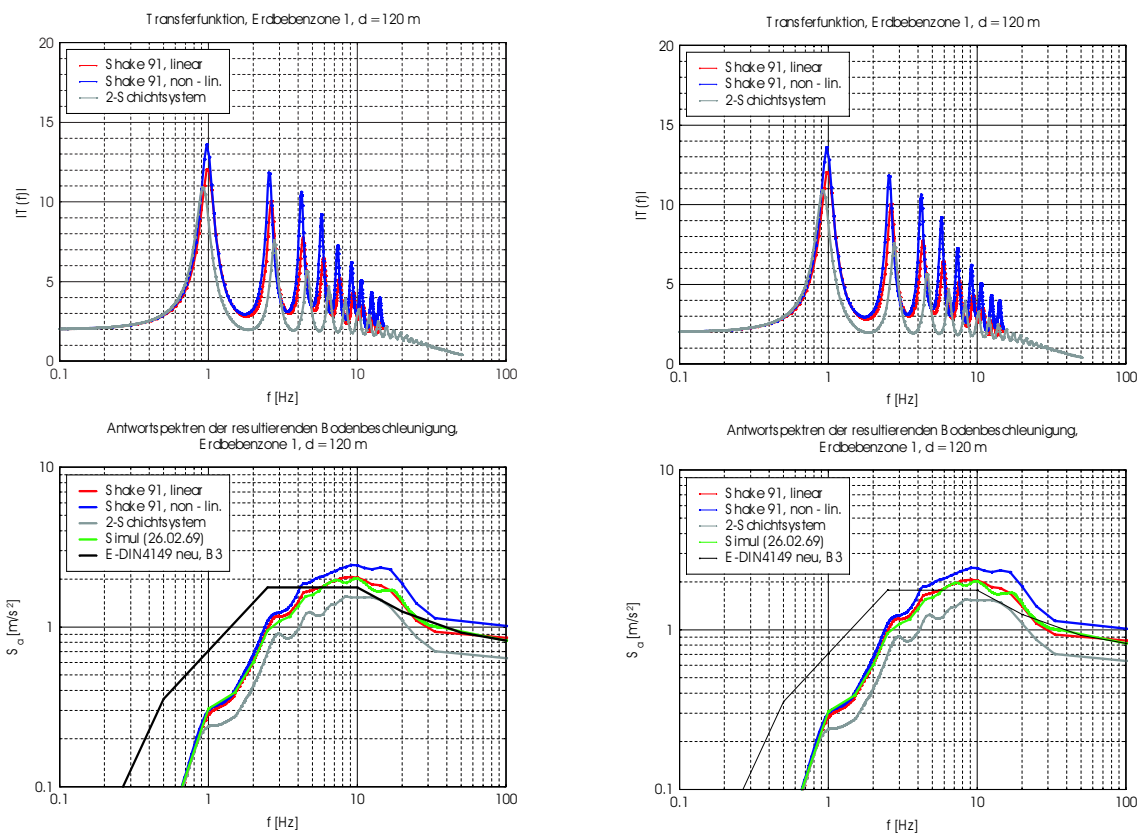


Abbildung 4.22: Transferfunktionen und Antwortspektren für das Standardereignis ‘‘Schwäbische Alb’’ vom 26.02.69; Sedimentmächtigkeiten $d = 390$ m und $d = 120$ m

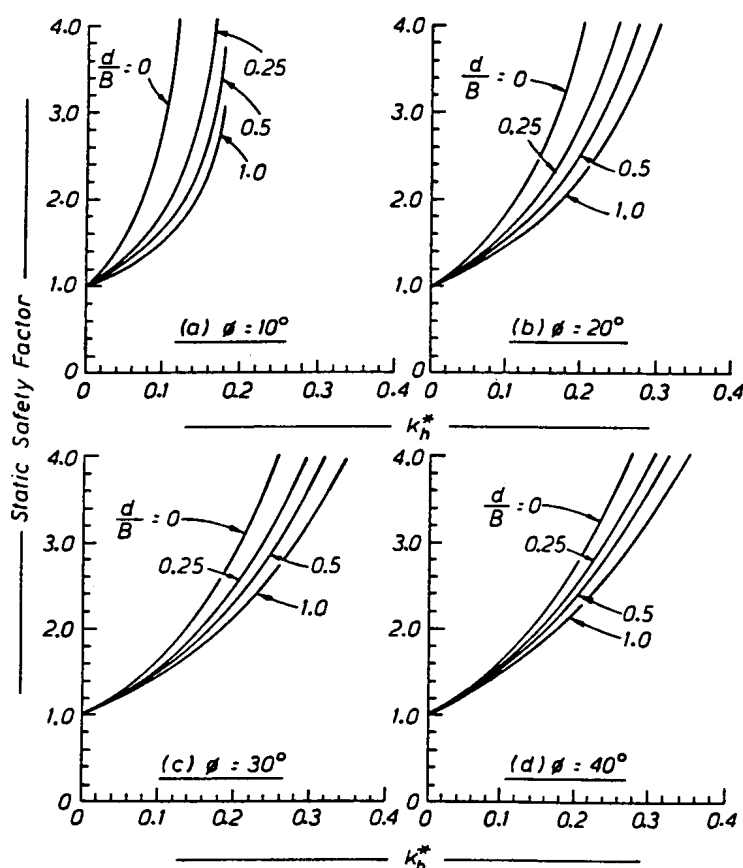


Abbildung 4.23: Kritische Horizontalbeschleunigung k_h^* , (Richards et al., 1993)

den deren Reibungswinkel i.A. zwischen etwa $15^\circ \leq \varphi \leq 27.5^\circ$ liegen als auch für rollige Böden mit $\varphi > 27.5^\circ$ immer kleiner als das kritische Verhältnis k_h^* aus Abb. 4.23. Somit kann geschlossen werden, dass die Sicherheitsmarke aus der statischen Bemessung nach DIN 4017 ausreichend ist, um erdbebeninduzierte Massenträgheitskräfte im Baugrund über kurze Zeitintervalle aufzunehmen. Dasselbe trifft auch für die Beschleunigungsverhältnisse $k_h \leq 0.14$ des Standardereignisses „Roermond“ der Erdbebenzone 2 zu. Für das zweite Standardereignis der Erdbebenzone 2 „Liège“ wurden Beschleunigungsverhältnisse $0.128 \leq k_h \leq 0.183$ ermittelt. Diese sind i.A. größer als die kritischen Verhältnisse k_h^* aus Abb. 4.23, so dass bei Bebenereignissen dieser Größenordnung Fundamentverschiebungen infolge dynamischen Grundbruchs nicht ausge-

schlossen werden können, sofern das Fundament nur für statische Lasten nach DIN 4017 bemessen war. Es muss jedoch angemerkt werden, dass das vorgestellte Nachweisverfahren lediglich die Massenkräfte im Baugrund berücksichtigt. Trägheitskräfte infolge von Horizontalbeschleunigungen, die auf oberirdische Bauwerksteile wirken, müssen zusätzlich noch in den Fundamentlasten erfasst werden.

4.5.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die Ergebnisse der ingenieurseismologischen Untersuchungen werden in der Institutsreihe des Fachgebiets für Grundbau und Bodenmechanik der TU Berlin veröffentlicht und über Publikationen in der Fachliteratur den potentiellen Nutzern vorgestellt. Mit der erstell-

ten Karte zur Mikrozonierung des Untersuchungsgebietes und den zugeordneten geophysikalischen Bodenmodellen stehen dem praktischen Ingenieur Hilfsmittel zur Verfügung, die ihm insbesondere die Modellbildung für ingenieurseismologische Problemstellungen im Großraum Köln vereinfachen. Der Vergleich der Berechnungsverfahren erleichtert ihm zum einen die Auswahl eines geeigneten Verfahrens und zum anderen die Beurteilung der Ergebnisse. Darüber hinaus stellt der Vergleich mit den Spektren der E-DIN 4149 einen Beitrag zur derzeit laufenden Diskussion des Entwurfes der neuen DIN 4149 dar.

72-12, College of Engineering, Berkeley, California

Schneider G. (1998): Neue Bemessungsspektren für Deutschland. Referatensammlung, Gemeinschaftstagung Eurocode 8 / DIN 4149, Leinfelden-Echterdingen, 1998

Schön J. (1983): Petrophysik. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.

4.5.7 Literatur

Budny M., (1984): „Seismische Bestimmung der bodendynamischen Kennwerte von oberflächennahen Schichten in Erdbebengebieten der Niederrheinischen Bucht und ihre ingenieurseismologische Anwendung“, Sonderveröffentlichung Nr. 57 des Geologischen Institutes der Universität zu Köln

Haskell N.A. (1953): The dispersion of surface waves in layered media. BSSA, 43, pp. 17-34

Haskell N.A. (1960): Crustal reflection of plane SH – waves. J.Geoph.Res., 65, pp.4147-4150

Murphy J.R., Davis A.H., Weaver N.L., (1971): Amplification of seismic body waves by low-velocity surface layers. BSSA, 61, pp. 109-145

Parolai S., Bormann P., Milkereit C. (2001): Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the cologne area (Germany) using noise measurements. Journ. Earthq. Eng., Vol.5, 541-564

Richards R., Elms D.G., Budhu M. (1993): Seismic bearing capacity and settlements of foundations. ASCE – J. Geot. Eng. 119, pp. 662-674

Schnabel P.B., Lysmer J., Seed H.B., (1972): User's manual for SHAKE. Report No. EERC

4.6 Risiken durch Sekundäreffekte von Erdbeben

Sergey Tyagunov¹, Dirk Hollnack² und Friedemann Wenzel¹

¹ *Universität Karlsruhe (TH)*

Geophysikalisches Institut

Email: sergey.tyagunov@gpi.uni-karlsruhe.de

² *Münchner Rückversicherung*

Bereich GeoRisikoForschung

TP B2.3: Risiken durch Sekundäreffekte von Erdbeben

4.6.1 Zusammenfassung

Die Mikrozonierung erdbebengefährdeter Gebiete, speziell in Ballungsräumen, ist ein wichtiger Teil zur Abschätzung der seismischen Gefährdung und des daraus resultierenden Risikos. Sie bildet die Grundlage für Landnutzungsplanung, erdbebensicheres Bauen sowie zur Katastrophenvorsorge und Schadenreduzierung. Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der lokalen Untergrundbedingungen im Untersuchungsgebiet, um das Gefährdungspotential durch seismische Bodenverstärkung und Bodenverflüssigung abzuschätzen zu können. Beide Phänomene sind miteinander gekoppelt und liefern einen erheblichen Beitrag zur seismischen Gefährdung. Eine Abschätzung sowohl der möglichen Bodenverstärkung als auch des Bodenverflüssigungspotentials im Raum Köln wurde auf Grundlage einer geologischen Modellierung durchgeführt. Zusätzlich wurden für repräsentative Punkte standortspezifische Spektren angefertigt, die eine bessere Einschätzung der Untergrundeinflüsse ermöglichen als Standardkurven.

Abstract

Microzonation of earthquake prone areas, especially urban areas, is an important part of seismic hazard and risk assessment, providing the basis for land-use planning, anti-seismic design and construction, disaster preparedness and mitigation. The main goal of this work is the assessment of possible site effects due to the influence of soil conditions. Taking into account peculiarities of the local soil conditions in the area under study, the analysis of site effects included both amplification of ground motions and liquefaction potential. These phenomena are interrelated and can considerably contribute to seismic hazard. On the basis of geo-modeling we estimated possible direct (amplification) and secondary (liquefaction) effects in the area around Cologne. Additionally, for selected representative sites we constructed site-specific design spectra, which provide more accurate estimates of the influence of local soil conditions, than generalized standard curves, and enable more balanced engineering decisions.

4.6.2 Motivation und Problemstellung 4.6.4 Methode

Der Raum Köln, eines der tektonisch aktivsten Gebiete in Deutschland, wurde im Rahmen des DFNK als Testgebiet für den Cluster Risikoanalyse Erdbeben ausgewählt. Obwohl die Wahrscheinlichkeit eines Starkbebens in diesem Gebiet als relativ gering einzuschätzen ist (Grünthal et al, 1998), birgt es aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte und Wertekonzentration ein nicht zu vernachlässigendes Erdbebenrisiko. Daher sollte im Rahmen des DFNK eine quantitative Abschätzung der seismischen Gefährdung und des daraus resultierenden Risikos durchgeführt werden. Ein Teilaspekt dieser Arbeiten bestand in der Durchführung einer Mikrozonierung unter besonderer Berücksichtigung der Einflüsse lokaler Untergrundbedingungen.

Anerkanntermaßen können lokale Untergrundfaktoren einen hohen Einfluss haben. Zum einen können lokale Verstärkungen zu einer Erhöhung der Intensität und somit zu einer stärkeren seismischen Beanspruchung für Bauwerke führen. Zum anderen stellen Sekundäreffekte wie Bodenverflüssigung und Hangrutschungen eine Gefährdung für Gebäude dar. Beide Phänomene können miteinander gekoppelt sein und einen erheblichen Beitrag zur seismischen Gefährdung liefern.

4.6.3 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Studie ist die Abschätzung lokaler Effekte im Raum Köln, die auf lokale Untergrundbedingungen zurückzuführen sind. Die Gefährdung durch Sekundäreffekte wird im wesentlichen von zwei Faktoren beeinflusst. Zum einen ist dies die Anfälligkeit (Suszeptibilität) des Untergrundes für Sekundäreffekte, zum anderen das mögliche Ausmaß an seismischer Energie. Beide Faktoren wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht.

Zunächst wurde die Geologie des Untergrundes bis zum Devon modelliert. Ein dreidimensionales geologisches Modell sowie eine geologische Datenbank des Raumes Köln wurden unter Verwendung der Geographischen Informationssysteme (GIS) ArcView und ArcInfo erstellt. Modelliert wurde das Gebiet von vier benachbarten Kartenblättern der TK25 und zwar die Blätter 5007 (Köln), 5008 (Köln-Mühlheim), 5107 (Porz), 5108 (Brühl). Zunächst wurden die Schichtgrenzen aus den analogen Hydrogeologischen Profilkarten (Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen in Maßstab 1:25000; Landesumweltamt NRW) digitalisiert. Zur Modellierung der Lockergesteinsfolge wurde ein „Top-down“-Ansatz verwendet, beginnend von der Geländeoberfläche bis hinunter zum devonischen Basement. Dabei wurde das digitale Geländemodell (DGM) jeweils um die Schichtmächtigkeit der zuletzt modellierten lithologischen Einheit reduziert. Die Gesamtmächtigkeit der Sedimentfüllung im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 4.24 dargestellt.

Das geologische Modell besteht aus 29 unterschiedlichen lithologischen Einheiten. Die für die weiteren Berechnungen benötigten geophysikalischen Parameter wurden der Arbeit von Budny (1984) entnommen. Das Ergebnis der Modellierung besteht aus einer Datenbank, die die geologische Struktur in Form eines Rasters aus „virtuellen Bohrprofilen“ im Abstand von 50m zusammenfasst. Die Anzahl der Bohrprofile, deren Teufe wenige Meter, aber auch bis mehrere hundert Meter betragen kann, liegt bei über 200 000.

Für die Berechnung lokaler Bodenverstärkungen und Antwortspektren wurde das Computerprogramm ProShake verwendet (EduPro Civil Systems, Inc., 1999). Für alle Berechnungen wurde von einem linearen Untergrundverhalten ausgegangen. Es wurden Transferfunktionen als Verhältnis von Fourier-Spektren zwischen Sedimentlokationen und Standorten

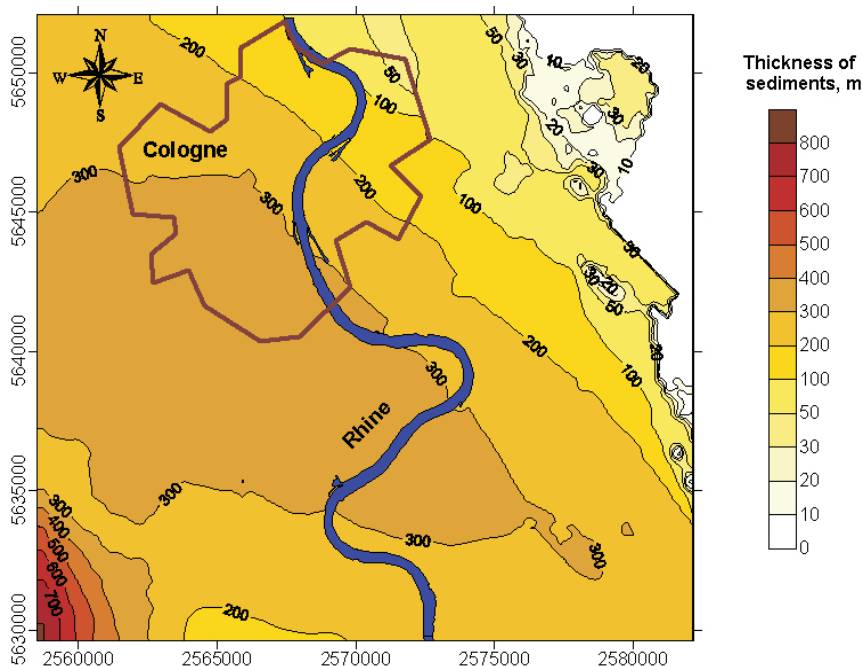


Abbildung 4.24: Mächtigkeit der Sedimentbedeckung im Raum Köln.

mit anstehendem Devon für Frequenzen zwischen 0 Hz und 20 Hz berechnet.

Für die Analyse der Antwortspektren und eine Abschätzung der möglichen maximalen Bodenbeschleunigung (Peak Ground Acceleration, PGA) wurden Zeitreihen der Bodenbeschleunigung, sogenannte synthetische Beschleunigungsseismogramme, unter Verwendung eines stochastischen Verfahrens nach Salganik et al. (1989) erstellt. Das Festgestein-Standardspektrum A1 der DIN 4149neu (Brüstle und Stange, 1999), das für eine Beschleunigung von 0.1 g normiert ist, wurde als Basisantwortspektrum für Festgesteinsstandorte verwendet.

Zur Ermittlung des Bodenverflüssigungspotenzials im Untersuchungsgebiet wurde ein Verfahren von Andrus and Stokoe (1997) verwendet, das eine Abschätzung der Bodenverflüssigungsneigung unter Verwendung der S-Wellen-Geschwindigkeiten ermöglicht. Die geologische Datenbank wurde verwendet, um den Sicherheitsfaktor (factor of safety, FS) für Bodenverflüssigung zu berechnen, der sich aus

dem Verhältnis zwischen dem Cyclic Resistance Ratio (CRR) und Cyclic Stress Ratio (CSR) ergibt. Zur Berechnung der Neigung zu Bodenverflüssigung an den jeweiligen Standorten wurde zudem der Verflüssigungsindex (potential liquefaction index, PLI) nach der Methode von Iwasaki et al (1982) verwendet. Diese Berechnungen wurden auf alle der mehr als 200.000 „Bohrprofile“ im Untersuchungsgebiet angewendet.

4.6.5 Ergebnisse und Diskussion

Für die seismische Mikrozonierung wurden die Ergebnisse der Berechnungen analysiert und in Karten dargestellt. In Abbildung 4.25 sind die Grundresonanzfrequenzen (a) und Bodenverstärkungen (b) flächenhaft gezeigt.

Die niedrigsten Grundresonanzfrequenzen (zwischen 0.50 und 0.55 Hz) treten in den Gebieten mit großen Sedimentmächtigkeiten im Südwestteil des Untersuchungsgebietes auf. In Richtung Nordosten nehmen die Grundresonanzfrequenzen mit abnehmenden

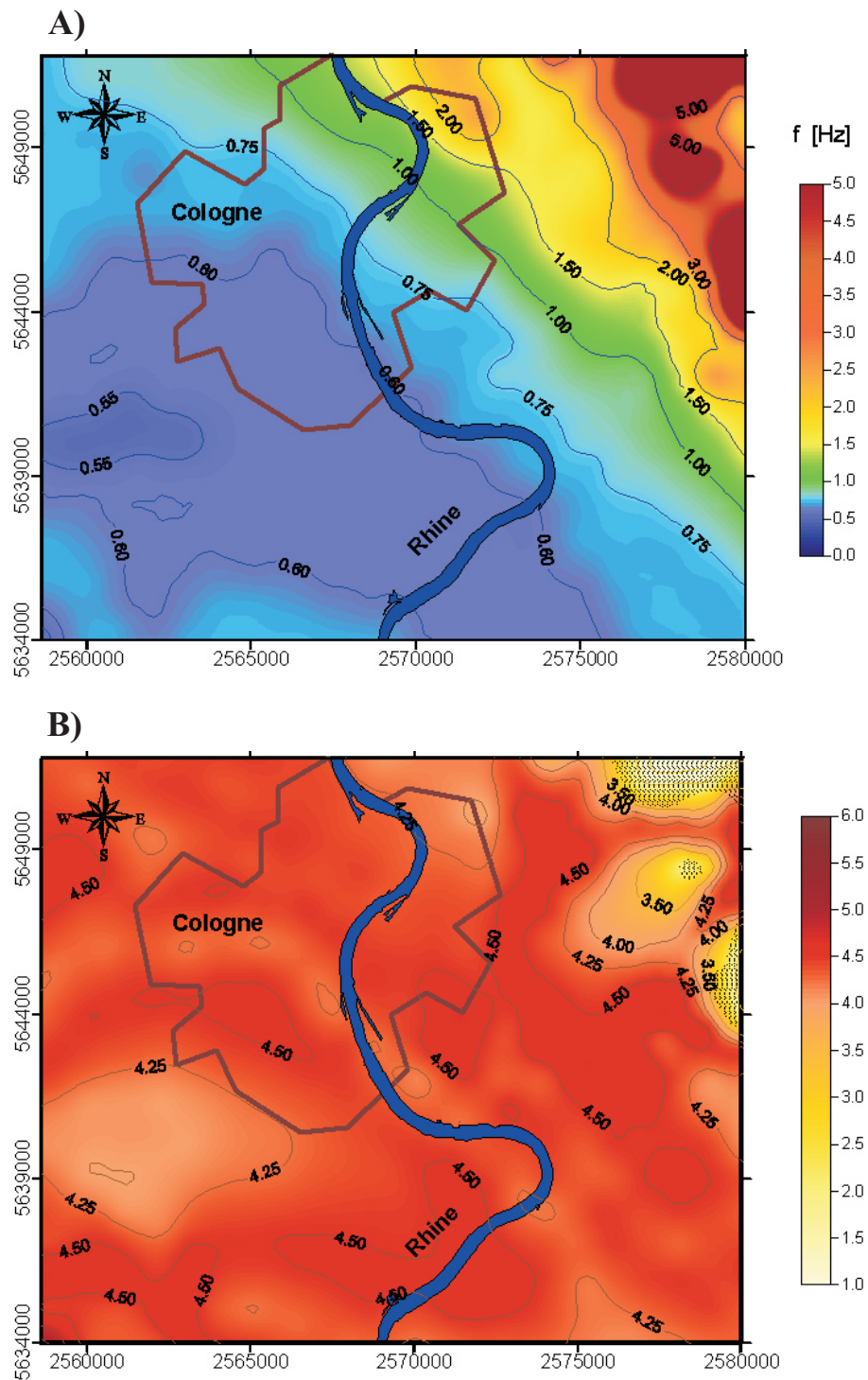


Abbildung 4.25: Grundresonanzfrequenz (a) und Verstärkungsamplituden (b).

Sedimentmächtigkeiten kontinuierlich zu. Abbildung 4.25B zeigt die Verteilung der Verstärkungsamplituden, die nur eine geringe Variationsbreite zwischen 4.25 und 4.75 aufweisen. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass für Frequenzen zwischen 0.5 Hz und 0.6 Hz die größten Verstärkungen im Südwesten und das Minimum im Nordosten des Untersuchungsgebietes auftreten. Für Frequenzen größer als 3-4 Hz, im Bereich des anstehenden Festgesteins im Nordosten des Gebietes, treten die größten Verstärkungswerte auf.

Das Untersuchungsgebiet kann anhand der Grundresonanzfrequenzen und der Untergrundverstärkungen in drei Bereiche aufgeteilt werden. In einem großen Teil des Gebietes, der sich aus dem Südwesten und dem mittleren Teil des Untersuchungsgebietes zusammensetzt, können die Amplituden niederfrequenter seismischer Wellen erheblich verstärkt werden. In einem kleinen Gebiet im Nordosten, in dem das Paläozoische Grundgebirge ansteht, ist hingegen eine Verstärkung hochfrequenter seismischer Wellen zu erwarten. Zwischen diesen beiden Extremen befinden sich Bereiche mit mittleren Grundresonanzfrequenzen. Diese Einteilung ist für Bauingenieure zur Beurteilung möglicher Rückkoppelungen zwischen Untergrund und Bauwerk wichtig, um Resonanzeffekte vermeiden zu können.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projektes wurden mit den Ergebnissen von TP B2.1 (GFZ, s. 4.3) verglichen, die auf seismischen Messungen nach der Nakamura-Methode beruhen (Parolai et al, 2001). Nakamura ist ein anerkanntes Verfahren zur Abschätzung der Grundresonanzfrequenzen, wohingegen die Anwendbarkeit zur Ermittlung von Amplitudenverstärkungen fraglich ist (Riepl et al, 1998). Die mit den beiden unterschiedlichen Methoden ermittelten Grundresonanzfrequenzen stimmen sehr gut miteinander überein, was als unabhängiges Qualitätsindiz für das geologische Modell gewertet werden kann.

Ein Satz von 20 mit ProShake berechneten synthetischen Seismogrammen für Festgesteinsstandorte wurde zur Erstellung von Beschleunigungsseismogrammen und Antwortspektren (5% Dämpfung) an der Oberfläche von Lockergesteinsstandorten verwendet. Insgesamt wurden Analysen der Bodenbewegungen (einschließlich Beschleunigungen, Geschwindigkeiten und Verschiebungen) und Antwortspektren für etwa 100 Lokalitäten erstellt, mit deren Hilfe sich Ausmaß und Verteilung der maximalen Bodenbeschleunigungen (PGA) auf Grundlage des vorgegebenen seismischen Energieniveaus berechnen lassen. Die Verteilung der abgeschätzten PGA-Werte im Untersuchungsgebiet ist in Abbildung 4.26 dargestellt, die für Bereiche mit Lockergesteinsuntergrund überwiegend zwischen 0.2 und 0.3 g variieren. Diese Werte waren Grundlage für die Abschätzung des Bodenverflüssigungspotentials im Untersuchungsgebiet.

Die berechneten Bodenverflüssigungspotentiale weisen einen Bereich stark erhöhter Verflüssigungsgefährdung für den Fall eines erhöhten Grundwasserspiegels aus. Dieser Bereich, dessen oberer Teil der Sedimentbedeckung (bis ca. 30m) aus künstlicher Auffüllung in Form von Braunkohleabraum besteht, befindet sich im Südwesten des Untersuchungsgebietes. Derartige Untergrundtypen sind ohne zusätzliche Verdichtung als Baugrund nicht geeignet. Mit Hilfe der verwendeten Methode nach Andrus und Stokoe (1997) wies lediglich dieses Gebiet ein Verflüssigungspotential auf. Da das Verfahren aufgrund der Verwendung von Scherwellengeschwindigkeiten gewissen Einschränkungen unterworfen ist, wurden weiterführende ingenieurgeologische Untersuchungen des Untergrundes hinzugezogen. Aufgrund dieser Auswertungen gibt es weitere Bereiche im Raum Köln, die ein Bodenverflüssigungspotential aufweisen könnten und für die somit detailliertere Untersuchungen angeordnet sind. Diese Gebiete treten im wesentlichen im Osten und Nordosten auf und sind ebenfalls in Abbildung 4.27 dargestellt. Sie sind charakterisiert durch das Auftreten von

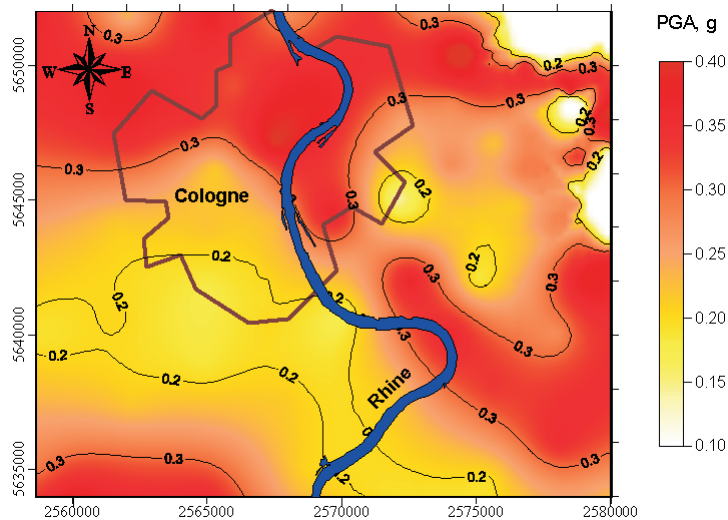


Abbildung 4.26: Abschätzung der PGA Verteilung im Raum Köln.

fein- bis mittelkörnigen Silten mit Mächtigkeiten bis zu 9m und kiesigen Sanden mit bis zu 7m Mächtigkeit. Daneben gibt es kleinräumigere verflüssigungsgefährdete Bereiche im Stadtgebiet von Köln, die Schichtlagerungen aus künstlichen Aufschüttungen von bis zu 4m, bis zu 1m mächtigen Feinsanden und siltigen Sandlagen von bis zu 15m aufweisen.

Zusätzlich wurden für repräsentative Punkte standortspezifische Spektren gerechnet. Die Antwortspektren wurden normiert, indem die Spektralwerte durch die dazugehörigen PGA-Werte an der Geländeoberfläche dividiert und anschließend mit den Standardkurven der DIN 4149neu verglichen wurden. Vergleiche der Spektren für die Gebiete in den oben genannten drei Grundresonanzfrequenzbereichen sind in Abbildung 4.28 dargestellt.

Aufgrund der Untergrundeinteilung nach der neuen Deutschen Norm E-DIN4149 gehören die meisten Gebiete im Raum Köln zu den Klassen C3 und B3 (im Bereich mittlerer und niedriger Grundresonanzfrequenzen) und einige wenige Gebiete zur Klasse A3 (höhere Frequenzen im Bereich anstehender Festgesteine). Anhand der dargestellten Spektrenkurven in Abbildung 4.28 lässt sich erkennen, dass die Standardspektren der DIN im wesentli-

chen konservativer verlaufen als die standortspezifischen Spektren. Im Periodenbereich von etwa 1.5 Sek. werden die seismischen Auswirkungen im Niederfrequenzbereich jedoch von den Standardkurven (speziell C3) unterschätzt. Dieser Periodenbereich entspricht etwa der Eigenfrequenz der Sedimente, so dass eine Verstärkung der seismischen Energie erwartet werden kann. Aus diesem Grund muss bei der Planung neuer Bauwerke mit Resonanzfrequenzen im Bereich von 1.5 Sek. (z.B. Hochhäuser und Brücken) in diesem Gebiet ein besonderes Augenmerk auf erdbebensichere Bauweise gelegt werden.

Standortspezifische Spektren wie in der vorliegenden Arbeit ermöglichen eine detailliertere Abschätzung der Untergrundeinflüsse als generalisierte Standardkurven und sind im Rahmen von Bauplanungen vorzuziehen.

4.6.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurde ein Verfahren angewendet, das im Bereich des Erdbebeningenieurwesens weltweit anerkannt ist. Die Qualität der vorgestellten Ergebnisse hängt im Wesentlichen von der Quali-

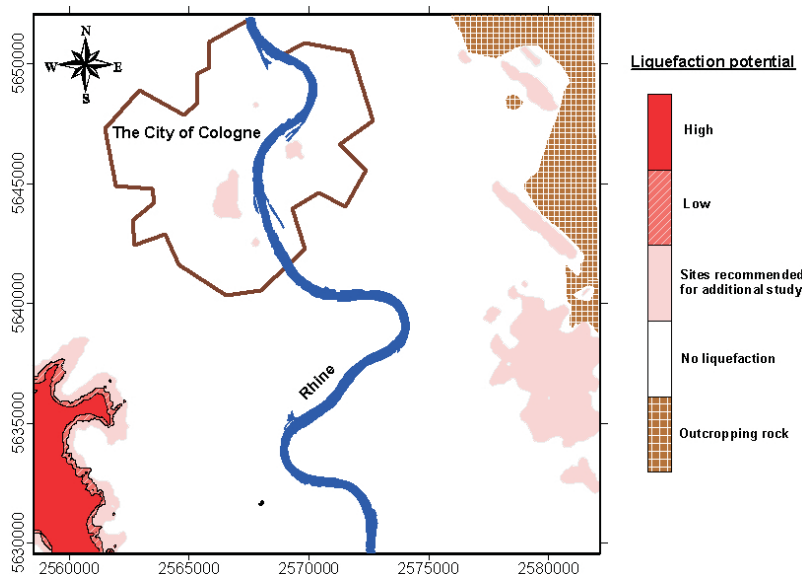


Abbildung 4.27: Abschätzung des Bodenverflüssigungspotentials im Raum Köln.

tät der Eingangsdaten für das geologische Modell und den nachfolgenden Berechnungen sowie der Genauigkeit der durchgeführten Berechnungen ab. Die vorgestellten Ergebnisse sind für andere Teilprojekte des Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ von Nutzen. Sie können speziell für die Analyse des seismischen Verhaltens von Bauwerken und zur Abschätzung des seismischen Risikos im Untersuchungsgebiet herangezogen werden. Weiterhin können sie von großem Wert für Ingenieure, Landnutzungsplanung sowie zukünftige Katastrophenvorsorge und Risikoreduzierung sein.

4.6.7 Offene Fragen

Für die Auswertungen wurden lediglich seismische Anregungen auf Grundlage von A1 Standardspektren der DIN 4149neu für Festgesteinsstandorte verwendet, die für eine Beschleunigung von 0.1 g normiert sind. Daher ist vermutlich nicht die gesamte Spannweite der möglichen Bodenbewegungen abgedeckt. Aber bis heute gibt es keine aufgezeichneten Beschleunigungsseismogramme aus dem Untersuchungsgebiet, die hätten verwendet werden können.

Da für das Testgebiet keine aktuellen Grundwasserstände zur Verfügung standen, wurde für die Berechnung des Bodenverflüssigungspotentials angenommen, dass alle Sedimentschichten bis zur Oberfläche mit Wasser gesättigt sind. Unter Berücksichtigung der Einschränkungen des Berechnungsverfahrens aufgrund der Verwendung von Scherwellengeschwindigkeiten, sollten weiterführende Untersuchungen wie z.B. Standard-Druck-Sondierungen (Standard Penetration Tests, SPT) zur Verifizierung der Ergebnisse durchgeführt werden.

4.6.8 Literatur

Andrus, R.D. and Stokoe, K.H. (1997): Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity. In: Proc. of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance Of Soils, Technical Report NCEER-97-0022, 89-128

Brüstle W. und Stange S. (1999): Geologische Untergrundklassen zum Entwurf von Normspektren für DIN 4149 (neu) - Vorstudie zum Forschungsvorhaben "Karte der geologischen Untergrundklassen für DIN 4149

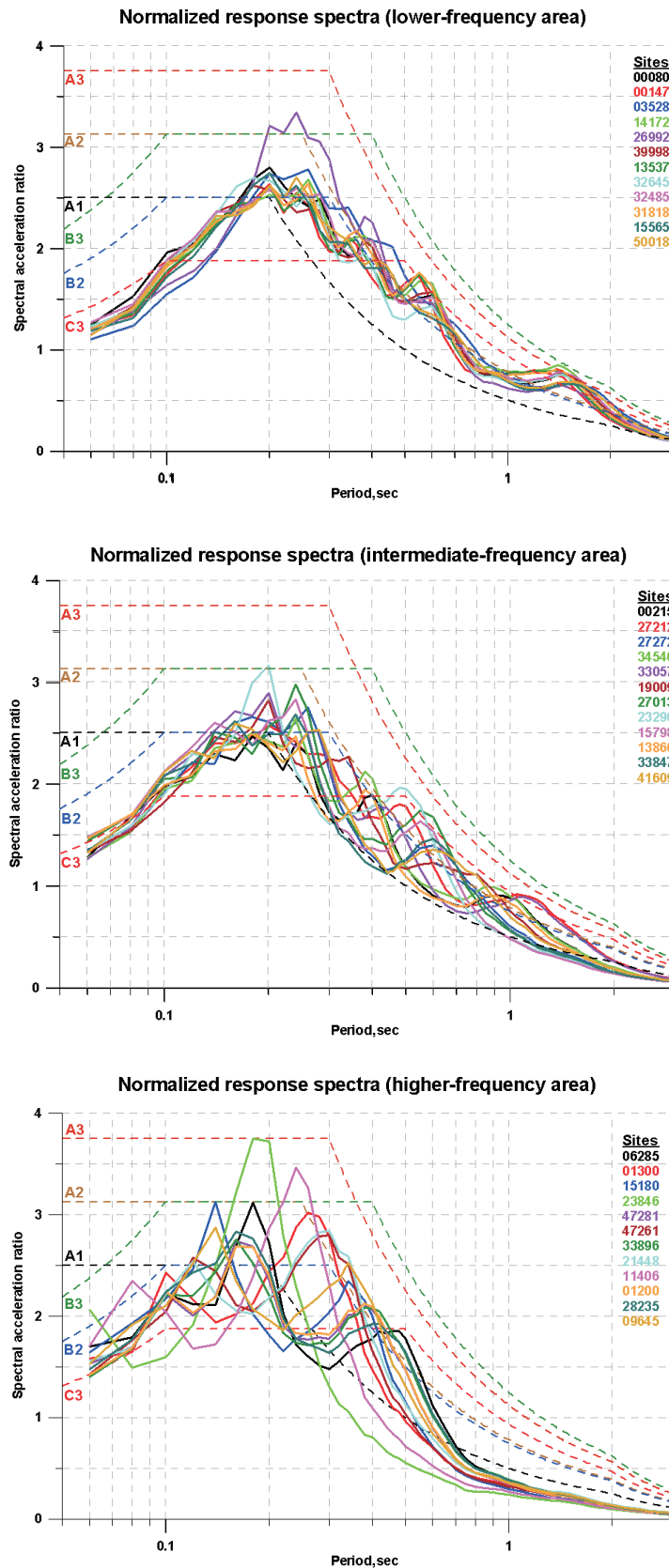


Abbildung 4.28: Normierte Antwortspektren (durchgezogene Linien) im Vergleich mit standortspezifischen Spektren aus der DIN 4149neu (gestrichelte Linien).

(neu)": Modellrechnungen mit Programm SIMUL für synthetische Tiefenprofile der Scherwellengeschwindigkeit zur Klassifizierung des Untergrundes in deutschen Erdbebengebieten. (Stand Juli 1999) Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, - 34 s.

Budny, M. (1984): Seismische Bestimmung der Bodendynamischen Kennwerte von oberflächennahen Schichten in Erdbebengebieten der Niederrheinischen Bucht und ihre Ingenieurseismologische Anwendung. - Geologisches Institut der Universität Köln zu Köln, Sonderveröffentlichung Nr.57.

EduPro Civil Systems, Inc. (1999): ProShake. Ground Response Analysis Program.

Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. and Lenhardt, W.A. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz, Bautechnik, 10, 19-33.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuoka, F., Watanabe, S., Yasuda, S. and Sato, H. (1982): Microzonation for Soil Liquefaction Potential Using Simplified Methods, In: Proc. 3rd International Microzonation Conference, 1319-1329.

Parolai S., Bormann, P., and Milkereit, C. (2001): Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements. J. Earthq. Eng. Vol.5, No. 4, 541-564.

Riepl, J., Bard, P.-Y., Hatzfeld, D., Papaioannou, C. and Nechtschein, S. (1998): Detailed Evaluation of Site-Response Estimation Methods across and along the Sedimentary Valley of Volvi (EURO-SEISTEST), Bull. Seism. Soc. Am. 88, 488-502.

Salganic, M.P., Groshev, M.E., Zheligovsky, V.A., Mostinsky, A.Z., Stepanova, N.L., and Shteinberg, V.V. (1989): Modeling of the accelerograms that are expected during maximum earthquake: a comparison of the methods, In: Seismological Research, 11, Moscow, 112-127 (in Russian).

4.7 Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotenziale

Jochen Schwarz, Holger Maiwald und Mathias Raschke

*Bauhaus-Universität Weimar
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Email: schwarz@bauing.uni-weimar.de*

TP B3.1: Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale auf der Grundlage der EMS-98

4.7.1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens B3.1 werden methodische Grundlagen einer GIS-basierten seismischen Risikobewertung entwickelt und an zwei Testgebieten erfolgreich zur Anwendung gebracht. Die Fallstudien der Kreisstadt Schmöln in Ostthüringen und der Großstadt Köln stellen aufgrund der Unterschiede in der urbanen Ausdehnung und im Bauwerksbestand qualitativ unterschiedliche Anforderungen an das (aufwandseffiziente) praktische Vorgehen. Sie ermöglichen jedoch aufgrund der vergleichbaren Gefährdung die Überprüfung von forschungsstrategischen Zielen und aktuellen Schwerpunkten des vorbeugenden Katastrophenmanagements. Grundlagen für die wirklichkeitsnahe Schadensprognose bilden neben der Berücksichtigung lokaler Standorteffekte vor allem die in dieser Form beispielhafte Analyse und Bewertung der Bausubstanz in deutschen Großstadträumen am Maßstab der *European Macroseismic Scale* EMS-98. Bebenszenarien gehen bezüglich der Epizentrenlage von der historischen Bebenitätigkeit und einer seismischen Aktivität an den Hauptstörungen aus. Anhand der durch probabilistische Gefährdungsanalysen ermittelten Standortintensitäten (für unterschiedliche Wiederholungsperioden zwischen 475 und 10000 Jahren) werden die Eintretensraten festgelegt, die letztlich auch eine Einordnung der abgeschätzten Verluste in Risikokurven ermöglichen. Zur Quantifizierung der Schadenspotentiale und deren Streubreiten werden unterschiedliche methodische Vorgehensweisen getestet und die in die Bebenszenarien eingeführten Parameter variiert. Die Verlustschätzungen konzentrieren sich auf den strukturellen Schaden. Die Schadenserwartung wird bezogen auf unterschiedliche Flächeneinheiten bzw. Flächennutzungselemente differenziert dargestellt; Regionen mit erhöhter Schadenserwartung werden deutlich herausgearbeitet und können direkt in ein präventives Katastrophenmanagement eingeführt werden. Besonders exponierte öffentliche Gebäude und soziale Einrichtungen werden identifiziert. Damit sind auch die Voraussetzungen für weiterführende Arbeiten z.B. zur Klärung des Ertüchtigungsbedarfs gegeben.

Abstract

In the course of research project B3.1 the fundamental methods for GIS-based seismic risk assessment technologies were developed and successfully applied on two test areas. The case studies of the district town of Schmöln in Eastern Thuringia and the city of Cologne require qualitatively distinct practical approaches due to the differences in urban spread and building stock. However, because of the comparable hazard level, the two cases allow to check and adjust strategic research aims and current focus points in preventative emergency management.

Alongside the consideration of local site effects, especially the exemplary analysis and evaluation of the building stock in German city regions by measure of the *European Macroseismic Scale EMS-98* has contributed to forming a basis for realistic damage prognosis. Regarding the location of the epicentre, earthquake scenarios are based on historical seismic activity in the main faults. Using the seismic site intensities derived from probabilistic hazard analyses (for different return periods between 475 and 10000 years) occurrence rates were determined, which ultimately enable the assembly of risk curves for loss estimation. Introduced parameters are varied and different methodological approaches tested in order to achieve a quantification of damage potentials and the associated scatter. The loss estimation is illustrated in varying detail regarding the area units; regions with an expectation of high loss are lined out clearly, so that the results can directly flow into preparations for preventative emergency management. Public buildings and social institutions with high exposure to risk are identified. Thus the preconditions for continuing works, e.g. respective the need for strengthening of particular objects, are provided.

4.7.2 Veranlassung und Problem

Für die Erdbebengebiete der Bundesrepublik Deutschland stehen keine Erfahrungswerte zur Verletzbarkeit des gegenwärtigen Bauwerksbestandes zur Verfügung; es fehlt zugleich der Maßstab, um Ergebnisse seismischer Risikoabschätzungen bzw. Schadensszenarien kalibrieren zu können. Das Vorhaben ist demzufolge als ein Kernstück der Wirkungskette Erdbeben aufzufassen, da in ihm einerseits der Zusammenhang zwischen den Erdbebenwirkungen, der vorhandenen Bausubstanz und den Folgen hergestellt und andererseits konkrete Risikoaussagen durch die Verkettung bzw. Vernetzung des Informationsflusses bereitgestellt werden.

Die Forschungsarbeiten zur Quantifizierung realistischer Schadenspotentiale verdeutlichen, dass die Erfassung des Bauwerksbestandes weiterhin mit erheblichen Aufwendungen verbunden sein wird. Diese Einschätzung ist u.a. wie folgt zu begründen:

- Der Gebäudebestand liegt nicht in den für die Abschätzung der Verletzbarkeit erforderlichen Kenngrößen bzw. Parametern vor (Schwarz et al., 2001b, 2002c).
- Die Erdbebentauglichkeit des Gebäudebestandes oder dessen Verletzbarkeit ist in der Regel nicht bekannt.

- Die im Katastrophenfall „überlebenswichtigen“ *Life-lines*-Bauwerke, Anlagen und Einrichtungen mit Bedeutung für die Katastrophenbewältigung (Krankenhäuser, Feuerwehrgebäude usw.) sind bisher nicht überprüft worden (Schwarz et al., 2002b).

Mit den durch das Teilprojekt B3.1 vorgelegten Ergebnissen zur seismischen Risikoabschätzung in Ostthüringen (Testgebiet Schmölln) und in der Niederrheinischen Bucht (Testgebiet Köln) besteht erstmals für deutsche Erdbebengebiete die Möglichkeit, eine vergleichende Analyse der Verletzbarkeit und Schadenserwartung vorzulegen.

4.7.3 Ziel

Im Vorhaben werden folgende Zielstellungen verfolgt:

1. Umsetzung der durch probabilistische Gefährdungsanalysen (Teilprojekt B1) ermittelten Standortintensitäten (für mittlere Wiederholungsperioden von 475, 2475 and 10000 Jahren) als Basisereignisse detaillierter Risikoanalysen
2. Ausarbeitung von Methoden zur Abschätzung von Schadenspotentialen und zur Prognose von Bauwerksschäden

3. Beispielhafte Analyse und Bewertung der Bausubstanz in deutschen Großstadträumen am Maßstab der *European Macroseismic Scale EMS-98*
4. Quantifizierung der Schadenspotentiale auf der Grundlage unterschiedlicher methodischer Vorgehensweisen und unter Variation der in die Bebenszenarien eingeführten Parameter
5. Bewertung der Erdbebentauglichkeit der in den Zielgebieten vorherrschenden Bauweisen
6. Identifikation von Einzelobjekten mit Relevanz im Katastrophenfall bzw. für die Aufrechterhaltung der (überlebenswichtigen) Versorgungslinien (*life-lines*)

4.7.4 Methode

Die Vulnerabilität (Verletzbarkeit) der verschiedenen Bauweisen und Bauwerkstypen wird am Maßstab der *European Macroseismic Scale EMS-98* sowie anhand ihrer dynamischen Charakteristik bewertet. Für den Bauwerksbestand werden repräsentative, d.h. auf die regionale Spezifik der Bauqualität, Bauausführung und Tragwerkstypen ausgerichtete Verletzbarkeitsfunktionen zur Prognostizierung der Verluste (Schadenserwartung) zugrunde gelegt, wobei auf Ergebnisse von Schadensaufnahmen der *Deutschen Task Force für Erdbeben* abgehoben wird.

Die Qualität seismischer Risikostudien wird wesentlich durch die Aufnahme und Bewertung der Bausubstanz geprägt. Zur Realisierung dieser Aufgaben wurden in den beiden Testgebieten unterschiedliche Vorgehensweisen gewählt:

- In *Schmölln* wurde nahezu der gesamte Gebäudebestand (im Ist-Zustand) vor Ort inspiziert und anhand von Auswertebögen (s.a. Schwarz et al., 2001a)

in den wesentlichen Bauwerksparametern (Bauweise, Tragwerkstyp, Höhe, Geschoszahl) dokumentiert. Zur Unterstützung der Einordnung in das Schema der Verletzbarkeitsklassen gemäß EMS-98 wurde jedes Bauwerk hinsichtlich der Einhaltung elementarer Grundregeln erdbebentauglicher Konstruktionen sowie hinsichtlich des Erhaltungszustands (hier nach fünf Stufen des Sanierungs- und Ertüchtigungsbedarfs) bewertet (Schwarz et al., 2001a).

- Aus Zeit- und Kapazitätsgründen war eine solche Vorgehensweise für das Untersuchungsgebiet *Köln* von vornherein auszuschließen. Hier bestand die Aufgabe darin, ausgehend von einem kleinräumigen, ebenfalls vor Ort aufgenommenen Gebiet, geeignete (letztlich jedoch nicht verfügbare) Modelle der geostatistischen Extrapolation zur Anwendung zu bringen. Im Testgebiet wurden ca. 800 Bauwerke aufgenommen. Aussagen zur Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz und zu den Schadensszenarien beziehen sich auf diese Auswertungen. Die Aufbereitung der vorhandenen Bebauungsangaben und Klassifikation der Bausubstanz unter Verwendung der unterschiedlich detaillierten Datenebenen ist Schwarz et al. (2002c) zu entnehmen.

Die Qualität der Aussagen wird durch die eingehende Würdigung des lokalen Verstärkungspotentials infolge durchgeführter Mikrozonierungsarbeiten (Teilprojekt B2.1), die Aufbereitung eines räumlichen Tiefenprofils (Teilprojekt B2.3) und die rastermäßige Bereitstellung der mit dem Szenarium konsistenten Bebenkenngrößen (Teilprojekt B2.2) gewährleistet. Die Aufbereitung standortspezifischer seismischer Einwirkungen erfolgt durch Teilprojekt B3.1 im mesoskaligen lokalen Maßstab in den für die dominanten Bauweisen charakteristischen Periodenbereichen. Auf Grundlage dieser standortabhängigen Spektralbeschleunigung

gungen wurde auch die lokale Intensität differenziert.

Aufgrund der Notwendigkeit, Grundlagen zu entwickeln und bausteinartig (modular) zusammenzufügen, werden im Rahmen des Förderungszeitraums beispielhafte Anwendungen vorgelegt bzw. die Methodik in einem beschränkten lokalen Umfeld getestet. Die im Vorhaben zu entwickelnden methodischen Grundlagen sind jedoch grundsätzlich auf andere Modell- bzw. Erdbebenregionen übertragbar.

4.7.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Quantifizierung der Schadenspotentiale bzw. die seismische Risikokartierung erfolgen in unterschiedlichen Bearbeitungsstufen, die sich in der Qualität der Produkte und dem Aufwand ihrer Erstellung unterscheiden (s.a. Schwarz 2003).

Diese Stufen und ihre Inhalte werden von Schwarz et al. (2002b) eingehend und projektübergreifend für die Bereiche Seismologie/Geophysik (SEIS), Baugrund (UG), Ingenieurwesen (BAU) und Wirtschaft-Soziales-Politik (WISP) vorgelegt. Sie werden hier erneut zitiert, um zugleich die praktische Umsetzung für die beiden Testgebiete zu überprüfen und die Verarbeitung von Daten aus anderen Projekten zu verdeutlichen (Tabelle 4.5).

Ergebnisse der einzelnen Bearbeitungsstufen werden für die Fallstudie Schmölln (Ostthüringen) und für das Testgebiet Köln (Niederrheinische Bucht) in den Beiträgen zum 3. bzw. 4. DKKV-Forum vorgestellt (Schwarz et al. 2003a, b). Stufe 6, geprägt durch die Ebene Wirtschaft-Soziales-Politik (WISP), erfordert dringend die Vorbereitung des politischen Umfelds; gemeint ist weniger die Abklärung des Nutzerbedarfs („Potenzialanalyse“) sondern vielmehr die Aufklärung über den Handlungsbedarf. (Dieser wurde vornehmlich innerhalb der Arbeitsgruppe „Synopsis der Naturgefahren“ diskutiert.)

Zu den wichtigen wissenschaftlich-technischen Ergebnissen zählen:

- die Entwicklung methodischer Grundlagen der seismischen Risikokartierung für deutsche Erdbebengebiete;
- die Durchführung von Schadensszenarien für verschiedenartige Fallstudien, die sich auf unterschiedliche Maßstäbe beziehen (Großstadtraum, Kleinstadt) und demzufolge in verschiedenartiger Auflösung vorzunehmen sind;
- die vergleichende Bewertung der Verletzbarkeit des Bauwerksbestandes in den beiden Testgebieten und die darauf abhebende Begründung forschungsstrategischer Zielstellungen;
- die Quantifizierung der Schadenspotentiale.

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

Auswahl der Testgebiete

Unterschiede zwischen beiden Fallstudien (Testgebieten) bestehen in der Größe der betroffenen Gebiete und ihrer Einwohner sowie in der Anzahl der Gebäude, verbunden mit grundsätzlich unterschiedlichen methodischen Anforderungen an die Aufnahme und Bewertung der Bausubstanz. Vergleichbar hingegen sind die Seismizität und Qualität der seismischen Gefährdung, wie anhand der Zonenordnung in den Karten der E DIN 4149 (2002) bzw. der noch geltenden DIN 4149 (1981) begründet werden kann (Schwarz et al., 2003a).

Erfassung des Bauwerksbestandes

Daten für den Großstadtraum Köln werden zusammengetragen und bereits im GIS-Format

Stufe	Gegenstand/ Zielstellung	Ergebnis/ Produkt (GIS-Karten)	Testgebiet	
			Schmöln	Köln
1	Aufbereitung und Reproduktion von verfügbaren Daten	Modelle des Oberflächen- und Tiefenprofils	●	● ⇨
		Aktualisierung der Bestandsunterlagen	●	●*
		Erfassung des Gebäudebestandes	●	●
2	Analyse und Interpretation von aufbereiteten Daten	Bewertung der Verletzbarkeit der Bauwerke (u.a. durch Vor-Ort-Begehung)	●	●*
3	Berechnung innerhalb einer Datenebene des GIS-Modells	Ermittlung der Standortperioden	●	● ⇨
		messtechnische Verifikation	○	⇨
		Abschätzung der Bauwerksperioden	●	●
		messtechnische Verifikation	●	⇨⇨
4	Verknüpfungen von mehreren Datenebenen des GIS-Modells	Definition von Modellbeben und ingenieurseismologischen Kenngrößen	●	● ⇨⇨⇨
		Standortanalysen: flächendeckende Spektralbeschleunigungen in den Bereichen charakteristischer Bauwerksperioden	●	●
		Ermittlung von standortspezifischen Bauwerksreaktionen (z.B. Verformungen)	⊙	⊙ ⇨
5	Verknüpfungen von mehreren Datenebenen des GIS-Modells	Schadenserwartung (Schadensgrad d_i für Einzelobjekte; mittlerer Schadensgrad d_m für ausgewählte Gebiete)	●	●*
		Loss estimation	○	⊙
6	Maßnahmen	Ertüchtigungsbedarf Ertüchtigung von Einzelobjekten	entfällt	

- durch Teilprojekt B3.1 realisiert (* für kleinräumiges Testgebiet)
- in Arbeit (nach Projektende vorgesehen) ⊙ realisiert für Einzelobjekte, mit Bedarf der Fortführung
- ⊙ in Zusammenarbeit mit AG „Synopsis“ (clusterübergreifend und nach Projektende) realisiert
- ⇨ Zuarbeit durch andere DFNK-Partner (Anzahl der Pfeile = Anzahl der Teilprojekte)

Tabelle 4.5: Bearbeitungsstufen und Ergebnisse/Produkte der seismischen Risikokartierung (nach Schwarz et al. 2002; auszugsweise wiedergegeben); Spiegelung der Umsetzung im Teilprojekt.

analysiert bzw. aufbereitet. Dabei mussten verschiedene Auflösungen der Objektbeschreibung berücksichtigt werden (Einzelobjekte, Blockstruktur, Stadtviertel usw.). Der Gebäudebestand wird hinsichtlich einfacher Eingangsparameter einheitlich beschrieben (z.B. über Alter, Etagenzahl usw.), um schließlich in größere Strukturen hochgerechnet bzw. zu Schadensaussagen extrapoliert zu werden. Bauwerksperioden werden auf der Basis der Geschosshöhe/Gebäudehöhe bauweisenabhängig abgeschätzt.

Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz nach Bauweisen und Verletzbarkeitsklassen

Eine detaillierte Aufschlüsselung zur Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz nach den vorherrschenden Bauweisen ist u.a. Schwarz et al. (2003a) zu entnehmen. Die Vulnerabilität (Verletzbarkeit) der Bauwerke wurde am Maßstab der EMS-98 anhand der Bauwerkstypen bzw. Bauweisen und deren dynamischer Charakteristik bewertet. Die Einordnung der Bauweisen in Verletzbarkeitsklassen führt zur regionalen Verteilung in den Testgebieten gemäß Abb. 4.29a bzw. 4.29b; die Aufschlüsselung

der prozentualen Beiträge an der gesamten Gebäudesubstanz geben die Abb. 4.30a bzw. b.

Ein Hauptteil des Bauwerksbestandes in Köln wurde in den letzten 50 Jahren errichtet; es dominieren demzufolge Bauwerke und Bauweisen geringerer Verletzbarkeit. Ca. 80 % der Bauwerke sind der Verletzbarkeitsklasse C und weniger als 15 % der Verletzbarkeitsklasse B zuzuordnen (Abb. 4.30a).

Im Bauwerksbestand des Untersuchungsgebietes Schmölln (Ostthüringen) stellen wie in vielen anderen Kleinstadtregionen die traditionellen Mauerwerksbauten mit Holzbalkendecken die vorherrschende Bauweise dar. Diese Bauwerke besitzen erfahrungsgemäß eine erhöhte Verletzbarkeit und sind u.a. aufgrund ihres Baualters als weniger erdbebenresistent einzuschätzen. Etwa 70 % der Bauwerke sind der Verletzbarkeitsklasse B und nur 21 % der Klasse C zuzuordnen (Abb. 4.30b).

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

Erdbebenszenarien und Umsetzung in ingenieurseismologische Kenngrößen

Aus dem normtypischen Niveau einer Überschreitenswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren folgen die Eintretensrate von $P = 0.0021/a$ bzw. eine mittlere Wiederholungsperiode T_R von 475 Jahren. Neben diesem Szenarium werden weitere für mittlere Wiederholungsperioden von 2475 und 10000 Jahren durchgespielt, die als extreme Ereignisse (in optimistischer bzw. pessimistischer Abschätzung) zu bewerten, an den Standorten aber nicht auszuschließen sind.

Die Bereitstellung der Erdbebenszenarien einschließlich der Erdbebenparameter und der dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten erfolgt durch das Teilprojekt B1. Die Analyse der entsprechenden lokalen Eigenschaften der Bo-

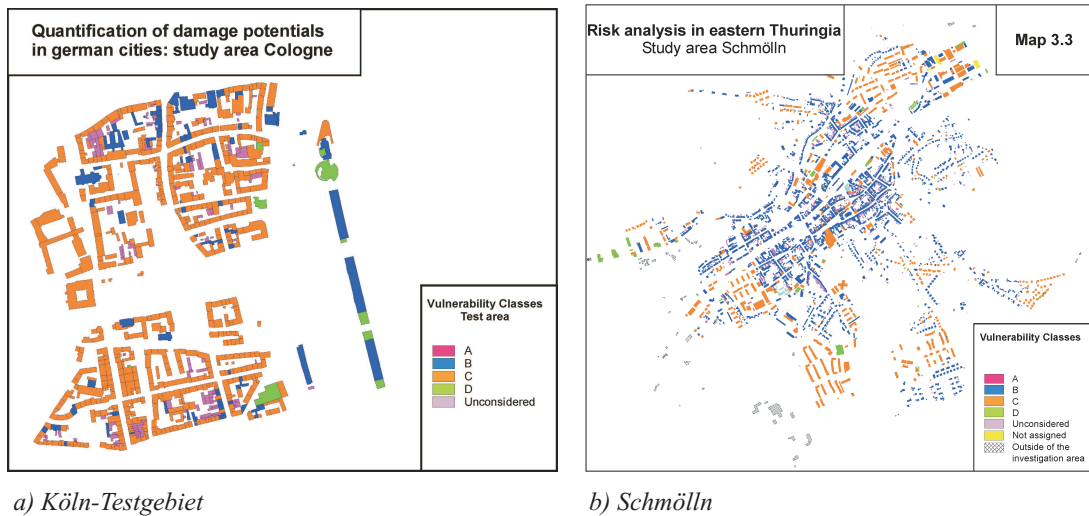
denbewegungen infolge Erdbeben wird durch das Teilprojekt B2.2 durchgeführt. Zur Gewährleistung einer konsistenten Bearbeitung der Teilaufgaben wurden für die Testgebiete Untergrundmodelle durch das Teilprojekt B3.1 selbst erstellt und die lokalen Übertragungseigenschaften für repräsentative Standortgruppen berechnet.

Standortspezifische seismische Einwirkungen

Der Großstadtraum und das Testgebiet in Köln zeichnen sich in Topografie und Untergrund im Vergleich zu der Region Schmölln in Ostthüringen durch eine relativ homogene Struktur bzw. allmähliche Übergänge der Untergrundsituation aus. Die mächtigen Sedimentschichten in Köln wirken in dem für allgemeine Hochbauten charakteristischen Periodenbereich eher dämpfend.

Der Untergrund in Schmölln ist durch anstehenden Fels, der durch Sedimentschichten geringerer Mächtigkeit (zwischen 10 und 15 m) überlagert ist, gekennzeichnet. Derartige Tiefenprofile lassen in dem für allgemeine Hochbauten charakteristischen Periodenbereich signifikante Verstärkungseffekte erwarten, die sich auch anhand der ermittelten Beschleunigungsspektren nachweisen lassen (Schwarz et al., 2001b).

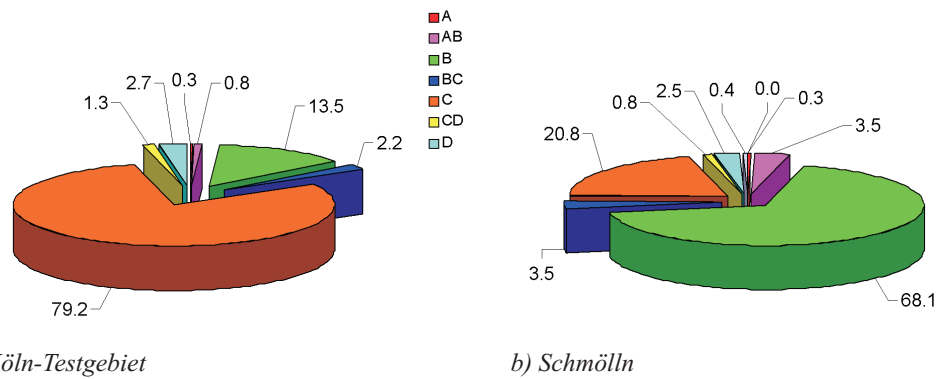
Um den Kontext zwischen Bodenbewegung und Bauwerksanregung zu präzisieren, werden die ermittelten standortspezifischen Spektren in Periodenbereiche eingeteilt, wobei sich an den charakteristischen Grundperioden ausgewählter Bauweisen bzw. Bauwerksgruppen orientiert wird; z.B. gibt die mittlere Spektralbeschleunigung im Periodenbereich $T = 0.1$ bis 0.2 s die typische Einwirkung für Wohnbauten in niedriger Bebauung (insbesondere zweigeschossige Mauerwerksbauten).



a) Köln-Testgebiet

b) Schmölln

Abbildung 4.29: Darstellung der Testgebiete (durch Vor-Ort-Begehungen im Detail aufgenommen) und Einordnung der einzelnen Gebäude in Verletzbarkeitsklassen (vulnerability classes) nach EMS-98.



a) Köln-Testgebiet

b) Schmölln

Abbildung 4.30: Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz in den Testgebieten nach Bauwerkstyp (building type) und Verletzbarkeitsklasse (vulnerability class) gemäß EMS-98.

Quantifizierung der Schadenspotentiale gestaffelt nach Erdbebenszenarien unterschiedlicher Eintretenswahrscheinlichkeiten

Durch die EMS-98 werden die Schadensgrade, Verletzbarkeitsklassen sowie in groben Konturen intensitätsabhängige Schadenserwartungen definiert. Im Vorhaben wird ein Wahrscheinlichkeitsmodell für die Schadensverteilung

bei Auftreten einer bestimmten Intensität eingeführt. Damit ist es möglich, die Streuung der Schadensgrade auf der Grundlage des mittleren Schadens zu implementieren. Aussagen zur Verletzbarkeit der Bauwerke beziehen sich auf die Definition und Einteilung der Schadensgrade in der EMS-98 und konzentrieren sich vornehmlich auf den strukturellen Bauwerksschaden.

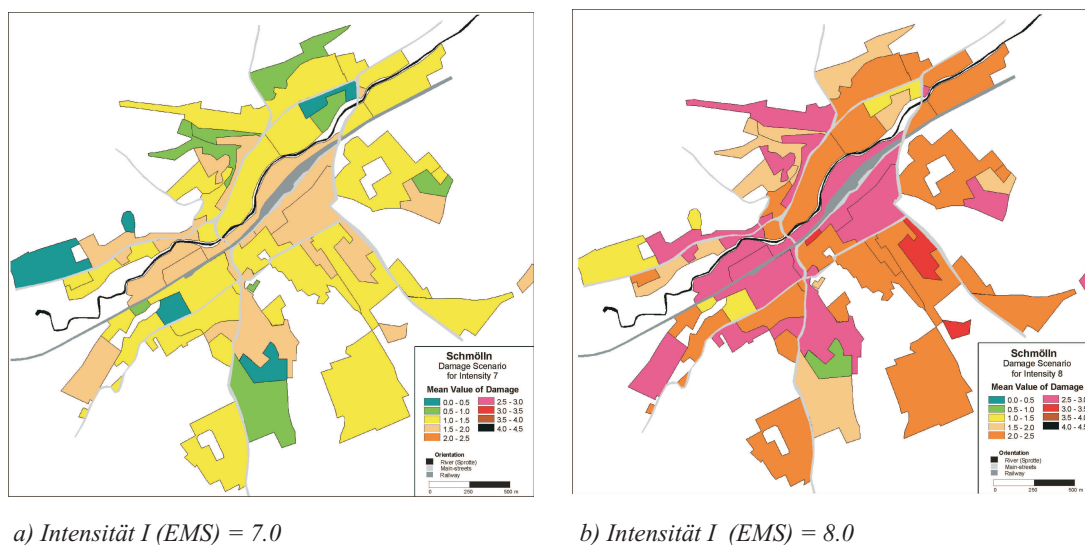


Abbildung 4.31: Ergebnisse für das Testgebiet Schmölln: Mittlere Schadensgrade in Abhängigkeit von der Bebenintensität (Durchschnittswerte in den Elementen des Flächennutzungsplans); aus: Schwarz et al. (2004).

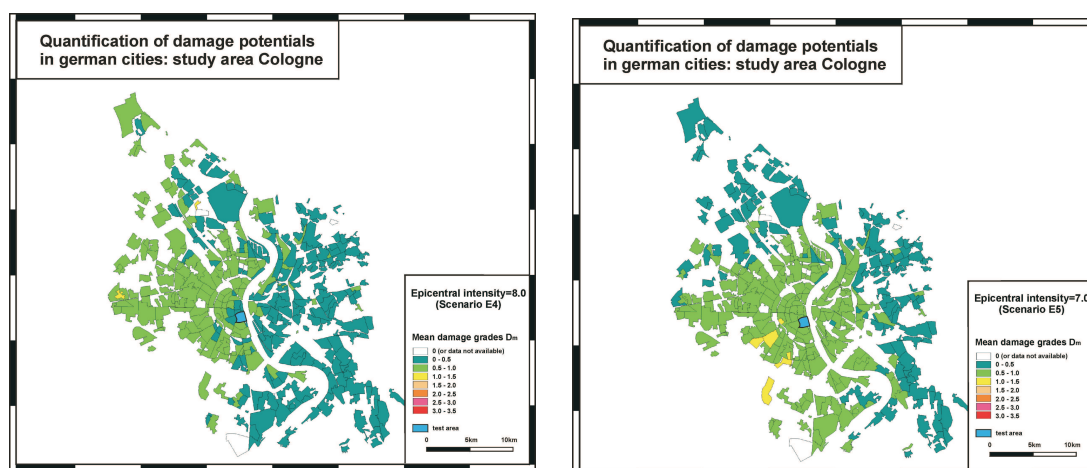
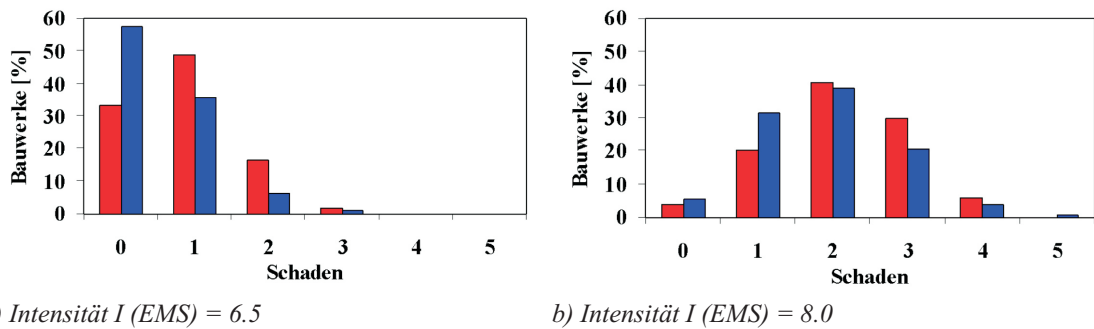


Abbildung 4.32: Ergebnisse für den Großstadtraum Köln: Mittlere Schadensgrade bei Wiederholung historischer Erdbeben (Durchschnittswerte in den Stadtvierteln); aus: Schwarz et al. (2004).

Der über die prozentualen Anteile der einzelnen Schadensgrade d_i bestimmbare mittlere Schadensgrad d_m (mean damage) ermöglicht dabei über den Mean Damage Ratio (MDR) erste Verlustschätzungen (loss estimation), die für die Versicherungswirtschaft von Interesse

sind (Abb. 4.31 und Abb. 4.32). Im Rahmen der verschiedenen Simulationen werden u.a. folgende Einflussfaktoren untersucht (Schwarz et al. 2003).



a) Intensität I (EMS) = 6.5

b) Intensität I (EMS) = 8.0

Abbildung 4.33: Schadenserwartung in den beiden Untersuchungsgebieten für unterschiedliche Bebenszenarien (Balken links/rot: Schmölln; Balken rechts/blau: Köln); aus: Schwarz et al. (2004).

- Einfluss der Bebenstärke (Intensität und deren Wiederholungsperiode) sowie der Lage des Herdes (vgl. auch Abb. 4.31, 4.32 und 4.33);
- Einfluss der verwendeten Elemente und Methode zur Verknüpfung der verschiedenen Datenebenen gemäß der Stufen 2 bis 5 in Tabelle 4.5;
- Einfluss der lokalen Standortbedingungen bzw. standortspezifischen Einwirkungsbeschreibung;
- Einfluss einer differenzierten Betrachtung von Bauwerksverletzbarkeit und dynamischer Gebäudecharakteristik.

Die Schadensszenarien für Schmölln konzentrieren sich auf herdnahe Ereignisse, was durch die Nähe zum Herd des Mitteldeutschen Bebens von 1872 begründet erscheint. Obwohl Schadensbewertungen in Form der Schadensgrade d_i (nach EMS-98) für die einzelnen Gebäude vorliegen, werden die Ergebnisse am Flächennutzungsplan orientiert bzw. bezogen auf Stadtviertel (Köln) dargestellt. Das heißt, die Resultate werden über die Angabe eines mittleren Schadensgrades (d_m) von Detailausagen weggeführt und somit „anonymisiert“ (Schwarz et al., 2001b).

Die Schadensszenarien für die Stadt Köln werden unter Berücksichtigung der historischen

Bebentätigkeit und der geologischen Bedingungen (Störungen) zunächst für unterschiedliche (z.T. hypothetische) Epizentren aufbereitet. Stellvertretend werden Schadensbewertungen für Szenarioereignisse wiedergegeben, die sich rein deterministisch aus der historischen Bebenaktivität ableiten lassen. Die Epizentren E4 und E5 folgen den Herdlagen historischer Beben in der Standortumgebung (E4: Beben vom 26.08.1878 bei Tollhausen, $I = 8.0$; E5: Beben 24.10.1841 bei Köln, $I = 7.0$), wobei die Ereignisse und Herdparameter aus aktuellen Bebenkatalogen unkritisch übernommen werden. Abb. 4.32 veranschaulicht den (eher begrenzten) Schadensumfang, der bei einfacher Wiederholung der genannten historischen Ereignisse in Köln zu erwarten wäre.

Abb. 4.33 zeigt die Schadenserwartung in den beiden Untersuchungsgebieten für unterschiedliche Bebenszenarien, wobei in den Simulationen für die Intensitäten $I(EMS) = 6.5$ und $I(EMS) = 8.0$ die lokalen Untergrundbedingungen differenziert eingehen. Aus der so prognostizierten Schadensverteilung lässt sich der mittlere Schadensgrad innerhalb der Darstellungsebenen des jeweiligen Testgebietes bestimmen.

Identifikation der im Katastrophenfall überlebenswichtigen Einzelobjekte

Ein präventives Katastrophenmanagement kann bereits dadurch unterstützt werden, dass die Erdbebeneinwirkungen an kritischen Bauwerken abgeschätzt und Unterbrechungen von Verbindungswegen zu kritischen Lokationen wie Feuerwehren, Krankenhäusern u.ä. aufgezeigt werden. Im Rahmen des Vorhabens werden die kritischen Objekte für das Katastrophenmanagement zwar identifiziert (vgl. Abb. 4.34), eine Bewertung ihrer Verletzbarkeit bedarf jedoch weitergehender Untersuchungen, die wiederum detaillierte Planungs- und Ausführungsunterlagen voraussetzen.

Die Identifikation der überlebenswichtigen Einzelobjekte erfolgt mittels der GIS-Datenebenen. Kriterien zur Begründung einer Hierarchie der besonders gefährdeten Objekte (Krankenhäuser, Feuerwehrgebäude, Schulen) könnten aus den Schadensszenarien und dem Grad der jeweiligen Standortgefährdung herausgearbeitet werden.

Auf dem baulichen Sektor konnten infolge der zeitlichen Beschränkung der Arbeiten die positiven Aspekte der Synopse der Naturgefahren Wasser, Erdbeben, Sturm und die interessanten Perspektiven einer komplex ausgerichteten Gebiets-, Städte- und/oder Bauwerksplanung diskutiert, jedoch nicht praxiswirksam umgesetzt werden. Die Ansatzpunkte einer effizienten Strategie liegen in der grundsätzlich einheitlichen Bewertung der Verletzbarkeit der vorhandenen Bausubstanz gegenüber den Einwirkungen aus den Naturgefahren. Abb. 4.34 soll am Beispiel von Krankenhausgebäuden exemplarisch verdeutlichen, wie durch mehrere Naturgefahren bedrohte Objekte (im Sinne eines multi-hazard approach) identifiziert werden können, wobei im Beispiel Ergebnisse aus Teilprojekt A4.2 einbezogen werden. Die im Stadtgebiet Köln prognostizierten mittleren Schadensgrade infolge Erdbeben werden mit den Überflutungsflächen (HQ500) überlagert. Mit diesen beiden Darstellungs- bzw. Ergebni-

sebenen kann gezeigt werden, welche Gebäude (hier gewählt: Krankenhäuser) von welcher Naturgefahr betroffen sein können. Auf dieser Basis könnten qualitative Anforderungen an präventive bauliche Maßnahmen (Stufe 6 gemäß Tabelle 4.5), die beiden Einwirkungsarten gerecht würden, begründet werden.

Verlustkenngrößen (loss estimation)

Anhand der durch B1 ermittelten Intensitätsraten (aus den vorliegenden Ergebnissen werden die Mittelwerte zugrunde gelegt) werden ausgehend von den Epizentren E4 und E5 durch entsprechende Steigerung der Intensität (in halben Intensitätsstufen) die Verluste bestimmt. Dabei wurden bezüglich der Werteverteilung zunächst die Angaben von B3.2 übernommen, letztlich aber wurde auf die durch die AG „Synopsis“ eingeführte Wertestatistik zurückgegriffen. Schadensszenarien werden in der Form kombiniert, dass die für die Koordinaten des Stadtzentrums von Köln probabilistisch berechneten Intensitäten mit den Intensitäten infolge deterministischer Szenarien (Verfolgung der Intensitätsabnahme ausgehend von den historischen bzw. potentiellen Erdbebenherden außerhalb Kölns) übereinstimmen.

Abb. 4.35 zeigt die zum Ende des Vorhabens berechneten Schadenskurven auf der Grundlage der von Teilprojekt B1 in Form der Fraktilen (Abb. 4.35a) bzw. Mittelwerte (Abb. 4.35b) vorgelegten Intensitätseintretensraten. In den Schadensszenarien ist der Einfluss lokaler Standorteffekte und dynamischer Bauwerkskenngrößen noch nicht berücksichtigt. Es bleibt festzustellen, dass die Ergebnisse auch im Extremfall im unteren Grenzbereich der ursprünglich vom Projektpartner B3.2 (Allmann et al., 1998) postulierten Schadenssumme zu liegen kommen. Hier sind jedoch weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Die Quantifizierung der Schadenspotentiale in ökonomischen Verlustkenngrößen wird weiterhin nur mit Einschränkungen vorgenom-

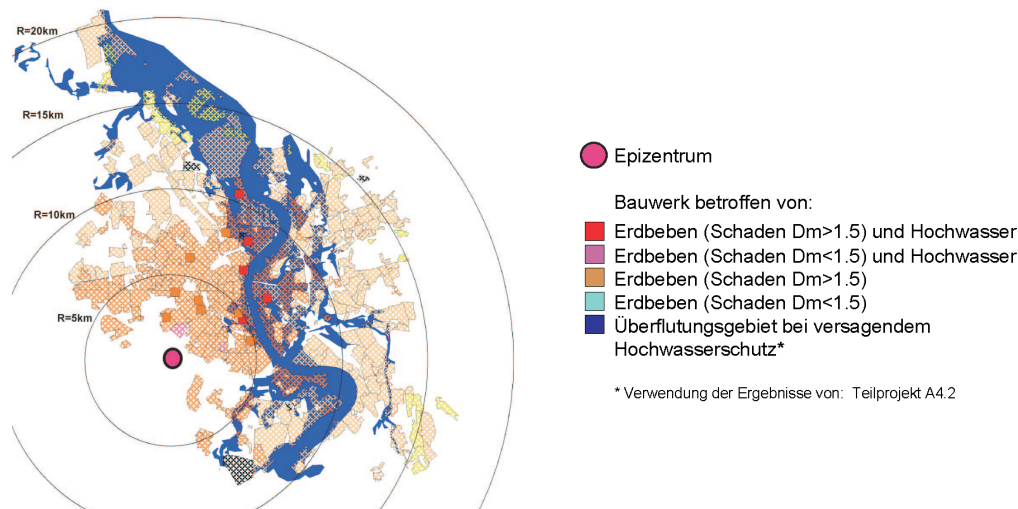


Abbildung 4.34: Einordnung von Krankenhäusern in die von extremen Erdbeben (E5 mit I (EMS) = 8.5) und extremen Hochwassern (HQ500) mit hoher Wahrscheinlichkeit betroffenen Gebiete Kölns.

men werden können. Hier sind u.a. zur Bewertung der industriellen Infrastrukturen Zuarbeiten aus dem Bereich WISP gemäß Tabelle 4.5 erforderlich, da - auch versicherungsseitig - keine flächendeckende Bestandserfassung bzw. Wertermittlung vorliegt.

4.7.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

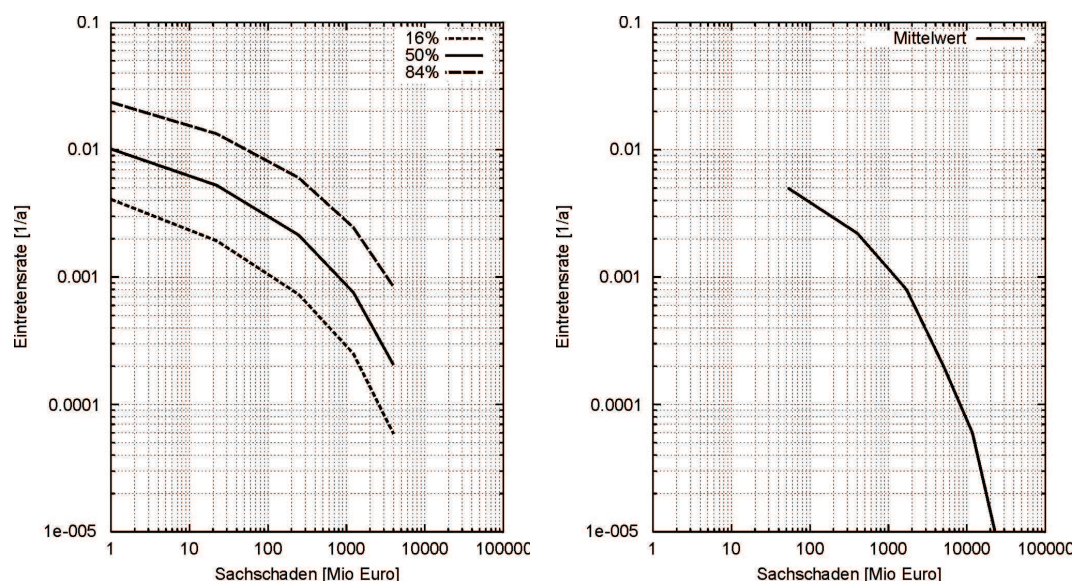
Die Ergebnisse des Teilprojekt B3.1 bieten einen direkten Einstieg in die Bewertung besonders gefährdeter Regionen (Abb. 4.31, Abb. 4.32), ermöglichen eine realistische Einschätzung zu erwartender Bebenfolgen und können als Entscheidungsgrundlage für Vorsorgemaßnahmen dienen (vgl. Abb. 4.34). Das prognostische Element der Aussagen kann in ein kurzfristiges Katastrophenmanagement und langfristig in Entscheidungen über Bebauung und Nutzung oder Verstärkungsnöwendigkeiten einfließen. Durch Differenzierung der Aussagen nach der Eintretenswahrscheinlichkeit unterschiedlicher Beben szenarien kann ein auf nationaler Ebene abgestimm-

tes Niveau von vorbeugenden und schadensmindernden Maßnahmen in Abhängigkeit von der Bedeutung der Bauwerke (Bauwerksklassen) bzw. vom Risiko-potential ausgewählter Gruppen von Spezialbauwerken diskutiert werden. Probleme und Konsequenzen der seismischen Risikokartierung sind vornehmlich im Bereich WISP (s. Tabelle 4.5) unter Kenntnisnahme der wirtschaftlichen Konsequenzen und der nicht auszuschließenden sozialen Beunruhigung anzusiedeln. So leitet sich die nicht unwesentliche Frage der Ergebnisdarstellung aus dem Umgang mit den Ergebnissen und den möglichen Konsequenzen außerhalb der eigentlichen wissenschaftlichen Arbeit ab (Schwarz et al., 2002b).

4.7.7 Offene Fragen

Im Hinblick auf die Weiterführung der Arbeiten (Visionen) sind zum Teilprojekt B3.1 folgende Feststellungen zu treffen:

- Die Abschätzung der Schadenspotentiale in Großstadträumen erfordert Grund-



a) Szenarium E4: $I = 8.0$ (26.08.1878, Tollhausen) b) Szenarium E5: $I = 7.0$ (24.10.1841, Köln)

Abbildung 4.35: Quantifizierung der Schadenspotentiale in Verlustgrößen (Epizentren gemäß Abb. 4.32) unter Zugrundelegung der Intensitätseintretensraten aus den Gefährdungsanalysen von Teilprojekt B1 (Grünthal und Wahlström, 2003).

lagenuntersuchungen bezüglich geostatistischer Erhebungen und Extrapolationsmodelle. Dies betrifft insbesondere die Erfassung des Bauwerkbestandes und Abschätzung der Verletzbarkeit. Zu klären bleibt, inwieweit repräsentative kleinräumige Gebiete detailliert erkundet und auf dieser Grundlage Rückschlüsse auf den Großstadtraum gezogen werden können.

- Die Identifikation kritischer, im Katastrophenfall überlebenswichtiger Einzelobjekte und Versorgungswege beschränkt sich auf ein Erdbebenzenario (um der mittleren Wiederholungsperiode von 475 Jahren) - und auf Brücken. Untersuchungen müssten ergänzt werden durch die Fragestellungen: wo passiert etwas und wo liegen im Katastrophenfall die Schwerpunktregionen (Orte mit erhöhter Schadensdichte)? Dies gilt umso mehr, wenn die Szenarien aus B1 in aller Konsequenz durchgespielt und weitere *Life-lines*-Bauwerke, die weitestge-

hend aus DFNK ausgeblendet sind, eingehender beleuchtet würden.

- Die Fallstudien verdeutlichen die Notwendigkeit, Schutzziele und Kriterien für den Handlungsbedarf zu diskutieren. Unter Beschränkung auf die zu erwartenden Bauwerksschäden und möglichen Konsequenzen für die Bevölkerung wäre die öffentliche Aufmerksamkeit insbesondere auf den Bestand allgemeiner Hochbauten und auf die für die traditionellen Bauweisen kritischen Einwirkungsbedingungen auszurichten.
- Wie anhand der Ergebnisse begründet werden kann, bedürfen die Kleinstadtgebiete aufgrund der erhöhten Verletzbarkeit, der zu erwartenden höheren Erdbebenwirkung und der Schäden im strukturellen Bereich einer größeren Aufmerksamkeit.

4.7.8 Literatur

- Allmann, A., Rauch, E. und Smolka, A (1998): New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe. Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. Proceedings 11th European Conference on Earthquake Engineering, Paris. Balkema Rotterdam.
- DIN 4149 (1981): Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- E DIN 4149 (2002): Bauten in deutschen Erdbebengebieten, Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Grünthal, G. (ed.), Musson, R., Schwarz, J. and Stucchi, M. (1998): European Macroseismic Scale 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Sismologie, Volume 15, Luxembourg 1998.
- Grünthal, G., Wahlström, R. (2003): New generation of probabilistic seismic hazard assessment for the area Cologne/Aachen considering the uncertainties of the input data. Natural Hazards. Special Issue.
- Raschke, M. (2002): Basic approaches of the vulnerability function and the local level of earthquake shaking, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., Paper No 383.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H. (2001a): Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmöln/ Ostthüringen (1): Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes, *Thesis* Heft 1/2 2001. Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, 180-199.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H. (2001b): Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmöln/ Ostthüringen (2): Modellereignisse, lokale Verstärkungseffekte und Schadensszenarien, *Thesis* Heft 1/2 2001. Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar, 200-219.
- Schwarz J., Raschke, M. and Maiwald, H. (2002a): Seismic Risk Studies for Central Germany on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science Ltd., Paper Reference 295.
- Schwarz, J., Raschke, M. und Maiwald, H. (2002b): Seismische Risikokartierung auf der Grundlage der EMS-98 – Fallstudie Ostthüringen. Tagungsband zum 2. Forum Naturkatastrophen 25. bis 27.09.2001, Leipzig, S. 325-336.
- Schwarz, J. Raschke, M., Gerstberger, A. (2002c): Seismische Schadenspotentiale in deutschen Großstadträumen – Fallstudie Köln. In: Meskouris, K., Hinzen, K.-G. (Hrsg.) Schutz von Bauten gegen natürliche und technische Erschütterungen. DGEB-Publikation Nr. 11, 69-83.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H. (2003a): Schadenspotentiale in deutschen Erdbebengebieten - Ergebnisse von Fallstudien. Tagungsband zum 3. Forum Naturkatastrophen 06. bis 08.10.2002, Potsdam (Beitrag eingereicht).
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H. (2003b): Schadenspotentiale in deutschen Erdbebengebieten. 4. Forum Naturkatastrophen 14.07. bis 16.07.2003, München.
- Schwarz J., Raschke, M., Maiwald, H. (2004): Comparative Seismic Risk Studies for German Earthquake Regions on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. Natural Hazards, in print.
- Schwarz, J. (2003): Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“; Übersichtsdarstellung und zusammenfassende Bemerkungen (dieser Berichtsband).

4.8 Identifikation und Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential bzw. Sicherheitsanspruch (Fallstudien)

Andreas Fäcke und Lothar Stempniewski

Universität Karlsruhe (TH)

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Email: andreas.faecke@ifmb.uni-karlsruhe.de

TP B4: Identifikation und Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential bzw. Sicherheitsanspruch (Fallstudien)

4.8.1 Zusammenfassung

Die Erdbeben vulnerabilität von vier Rheinbrücken in Köln wurde durch numerische Simulation mit der Methode der Finiten Elemente bestimmt. Eine Analyse der infrastrukturellen Einrichtungen zur Rettung und Bergung deutet auf ein erhöhtes Risikopotential dieser Brücken hin, da sie die links- und rechtsrheinisch verteilten Einrichtungen verbinden und ihr Versagen zu sehr großen Umwegen führt. Zum einen wurden die Brücken nicht für Erdbeben bemessen, zum anderen deuten tiefe fundamentale Bodenresonanzen im Bereich der Brücken, die in TP B2.1 (GFZ) ermittelt wurden, auf Amplitudenverstärkungen bei diesen weitgespannten Brücken hin. Für die dynamische Simulation wurden Bodenbewegungsszenarien aus TP B2.2 (GFZ) mit einem 475-jährigen Gefährdungsniveau für Köln, sowie künstlich generierte Erdbebenzeitverläufe nach der im Entwurf vorliegenden Erdbebennorm E-DIN 4149 verwendet. Obwohl die Szenarien aus den beiden Methoden deutliche Unterschiede in Frequenzgehalt und Spitzenbeschleunigung aufweisen, sind die Vulnerabilitätsaussagen ähnlich. An der Köln-Deutzer Brücke und der Mülheimer Brücke ist mit Lagerbrüchen zu rechnen. Kritisch sind diese insbesondere bei der erstgenannten, da die Befahrbarkeit nach einem Erdbeben gefährdet ist. Bei der Severinsbrücke und der Rodenkirchener Brücke wurde kein Schadensmechanismus festgestellt. Schwingungsmessungen am Krankenhaus Holweide und am Kölner Dom, die in Zusammenarbeit mit TP B2.1 und B2.2 durchgeführt wurden, zeigten eine gute Übereinstimmung des dynamischen Bauwerkverhaltens mit numerischen Berechnungen. Während numerische Simulationen gezeigt haben, dass das Krankenhaus Holweide bezüglich des 475-jährigen Gefährdungsniveaus sicher ist, sind am Kirchenhaus des Kölner Doms weitere Untersuchungen ratsam.

Abstract

The earthquake vulnerability of four Rhine bridges in Cologne was assessed using numerical finite element simulations. An investigation of the infrastructural facilities relevant for rescue action indicated a high risk potential of these bridges because they connect the facilities lying left and right of the Rhine River and would lead to large detours in case of a failure. On the one hand these bridges were not designed for earthquake loads and on the other hand low resonance frequencies of the sedimentary cover (subproject B2.1, GFZ) near the long spanned bridges point to high amplifications. For the simulations ground shaking scenarios with a 475-year hazard level from subproject B2.2 (GFZ) as well as time histories which were generated with SIMQKE according to E-DIN 4149 were used.

Although the scenarios of both methods have very different peak ground accelerations the spectral accelerations and the conclusion of their vulnerability are similar. At the bridge Cologne-Deutz and the Mülheimer bridge a failure of the bearings is probable. Especially the failure at the former is critical because the trafficability is endangered. The Severinsbridge and the Rodenkirchener bridge seem secure. The assessment of the structural dynamics of a hospital and the Cathedral of Cologne using ambient seismic noise measurements as well as finite element method has shown good agreement. Furthermore the numerical simulations have indicated that the hospital is secure for the 475-year hazard level whereas for the cathedral further investigations are advisable.

4.8.2 Veranlassung und Problem

Eine der Ursachen für die hohe Zahl von Todesopfern bei Erdbebenkatastrophen ist, dass Hilfsmaßnahmen oft nur unzureichend und verspätet durchgeführt werden können, da zum einen die notwendigen Verbindungswege blockiert sind und zum anderen keine Katastrophenpläne existieren. Aus diesem Grund sollte schon im Vorfeld einer Katastrophe die Organisation von Hilfsmaßnahmen geplant werden, um diese nach einem Starkbeben möglichst reibungslos durchführen zu können. Es soll untersucht werden, ob dieser Umstand, der 1995 bei dem Erdbeben in Kobe (Japan) zu verheerenden Folgen führte, auch in Deutschland in einem Gebiet mit moderater Erdbebengefährdung jedoch geringerer Vorsorgemaßnahmen möglich ist.

Als Untersuchungsgebiet wurde Köln ausgewählt, da es sich hierbei um ein Ballungszentrum mit hoher Industrialisierungs- und Bevölkerungsdichte handelt, das sich im Einzugsgebiet der Niederrheinischen Bucht einer seismisch aktiven Region befindet. Die Erfahrung hat gezeigt, dass den Brücken eine besondere Bedeutung zukommt, da diese kaum kurzfristig reparabel oder ersetzbar sind. Als kritisch sind hierbei insbesondere die Brücken einzustufen, die im Versagensfall zu großen Umwegen führen, und die aufgrund älteren Baujahrs und fehlender Normung zum Zeitpunkt der Planung nicht für Erdbebenlasten bemessen wurden.

4.8.3 Ziel

In Köln gibt es zur Zeit keine Katastrophenpläne für ein Ereignis, das auf einen Schlag das gesamte Stadtgebiet betrifft, wie dies bei einem Erdbeben der Fall wäre. In diesem Teilprojekt sollte die für ein erfolgreiches Katastrophenmanagement notwendige technische Bedingung, ein auf den Katastrophenfall Erdbeben zugeschnittenes Rettungswegenetz, entwickelt und seine Nutzbarkeit erforscht werden. Mögliche Beeinträchtigungen des entwickelten Rettungswegenetzes sollten für realistische Erdbebenszenarien untersucht werden. Hierfür war die Vulnerabilität ausgewählter Brücken mit hohem Risikopotential durch dynamisch numerische Simulationen zu ermitteln. Daraus sollten prinzipielle Erkenntnisse gewonnen werden, die eine Verallgemeinerung und Übertragbarkeit auf andere Lokationen ermöglichen.

Dieses Rettungswegenetz soll den örtlichen Behörden als Grundlage zur weiteren Entwicklung eines Katastrophenmanagements dienen. Die Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse sollen Entscheidungsträgern helfen, weitere Schritte wie Ertüchtigungsmaßnahmen und die Untersuchung weiterer Bauwerke mit erhöhtem Sicherheitspotential abzuwägen.

4.8.4 Methode

TP B4 bearbeitete folgende Teilaspekte:

Entwicklung des Rettungswegenetzes und Auswahl der Bauwerke mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential

In Zusammenarbeit mit den örtlichen Behörden wurden die für den Katastrophenfall relevanten infrastrukturellen Einrichtungen wie Feuerwehr, Krankenhäuser und Rettungsdienste lokalisiert und an ein Straßennetz bestehend aus einem inneren Stadtring, einem äußeren Autobahnring und einer sternförmigen Verbindung beider Ringe angebunden. So können Hilfskräfte über kurze aber auch redundante Wege zu den Einsatzorten gelangen.

Das Versagen von Brücken kann zu erheblichen Beeinträchtigungen der Rettungsarbeiten führen, weshalb diese Art von Bauwerken für die Vulnerabilitätsanalyse ausgewählt wurde. Es wurden speziell vier Rheinbrücken ausgewählt, da sie eine wichtige Verbindung zwischen den links- als auch rechtsrheinisch verteilten infrastrukturellen Einrichtungen darstellen, und im Falle eines Versagens zu sehr großen Umwegen führen würden. Außerdem wurden die Brücken - alle vor 1979 erbaut - nicht für den Lastfall Erdbeben bemessen.

Vulnerabilitätsanalyse

Die Brücken wurden mit der Methode der Finiten Elemente (FE) auf Grundlage von Tragwerksbeschreibungen aus der Literatur und Konstruktionsplänen der örtlichen Behörden modelliert. Für eine erste Beurteilung der dynamischen Eigenschaften und Abschätzung von Amplitudenverstärkungen wurden die Eigenmoden der Brücken mit dem FE-Programm ABAQUS/Standard bestimmt. Die dynamische Antwort auf ausgewählte Erdbebenszenarien wurde mit dem direkten Zeitschrittverfahren (implizit), das ebenfalls in diesem Programm implementiert ist, berechnet.

Die ermittelten Strukturantworten wie Momente, Kräfte und Verformungen wurden Grenzwerten gegenübergestellt, um Schadensmechanismen zu erkennen. Die Grenzwerte re-

präsentieren entweder Traglasten, die der Literatur entnommen oder auf Grundlage von Ausführungsplänen ermittelt wurden, oder maximale Verformungen, die z.B. einen Zusammenprall verschiedener Bauteile anzeigen.

Auswahl und Generierung repräsentativer Erdbebenszenarien

Als Eingangsgrößen für die Vulnerabilitätsanalyse kamen Freifeld-Bewegungsszenarien in Form von Antwortspektren oder Beschleunigungszeitverläufen in Frage, in denen der Einfluss der unter den Bauwerken befindlichen Sedimentschichten berücksichtigt wird. In TP B2.2 (GFZ) wurden vier Bodenbewegungsszenarien mit einer 2D-Hybridmethode entwickelt, die einen punktförmigen Erdbebenherd an vier verschiedenen Stellen entlang des nahe gelegenen Verwerfungssystems (Erftsprung) simulieren und unter Berücksichtigung von Quell- sowie Laufwegseffekten die Bodenerschütterung im direkten Umfeld der Brücken liefern. Die Epizentraldistanz zur Innenstadt, wo sich die Köln-Deutzer Brücke und Severinsbrücke befinden, beträgt 25 (17, 23, 34) km für Szenario 1 (2, 3, 4). Die Bebenstärke für das 475-jährige Gefährdungsniveau wurde mit Hilfe von spektralen Werten auf Festgestein (TP B1) kalibriert und entspricht einer Momenten-Magnitude (M_w) von 5,3.

Zusätzlich zu den vier Erftsprung-Szenarien wurden fünf künstliche Akzelerogramme mit dem Programmcode SIMQKE konform zum elastischen Antwortspektrum (Untergrundklasse B, Baugrundklasse 2) der E-DIN 4149 generiert. Die Zeitverläufe (Normszenarien) unterscheiden sich lediglich in den zufällig ermittelten Phasenwinkeln, wodurch die Bauwerksantwort jedoch um bis zu $\pm 35\%$ streut. Als Bauwerksantwort wurde jeweils der Mittelwert der fünf Szenarien verwendet. Die Akzelerogramme wurden mit dem Bemessungswert der Bodenbeschleunigung also den effektiven Beschleunigungen für Erdbebenzone 1 (Intensitätsintervall 6,5 bis 7) skaliert. Damit stimmt das Gefährdungsniveau dieser

fünf Szenarien mit den Erftsprung-Szenarien überein und erlaubt einen direkten Vergleich beider Methoden. Die Starkbebendauer wurde nach Hosser (1987) mit fünf Sekunden angenommen, was mit der Intensitätsfunktion nach Klein (1985) eine Gesamtbebendauer von 16 s ergibt.

Aufbereitung der Daten für potentielle Nutzer

Die infrastrukturellen Einrichtungen zur Rettung und Bergung zusammen mit deren Verbindung über Rettungswege wurden in einem GIS erfasst, welches dem Katastrophenmanagement als Grundlage zur weiteren Entwicklung dienen soll. Des Weiteren wurden 185 Brücken und Unterführungen entlang der Rettungswege, die durch Versagen zu Beeinträchtigungen der Hilfsmaßnahmen führen können, lokalisiert und in der Datenbank erfasst. Die dynamischen Kennwerte der vier als besonders kritisch eingestuften und für eine Vulnerabilitätsanalyse ausgewählten Brücken (Abb. 4.36 und 4.37), wurden ebenfalls gespeichert. So könnte die GIS-Datenbank in Kombination mit dem geologischen Modell aus TP B2.3 zu einem Simulations- und Visualisierungstool für Erdbebenszenarien erweitert werden, um z.B. Rettungskräften Schadensprognosen über Rettungswege direkt nach Auftreten eines Erdbebens in Abhängigkeit weniger seismologischer Kennwerte zu ermöglichen.

4.8.5 Ergebnisse und Diskussion

Abb. 4.36 zeigt das entwickelte Rettungsnetz, in dem die für den Katastrophenfall relevanten infrastrukturellen Einrichtungen über Rettungswege miteinander verbunden sind. Der Standort der vier ausgewählten Brücken ist in Abb. 4.36, deren Ansicht und Querschnitt in Abb. 4.37 dargestellt. Die Köln-Deutzer Brücke (KB) ist eine dreifeldrige Balkenbrücke mit zwei parallelen Überbauten.

Hier wurde nur der südliche Überbau untersucht, der als Spannbeton-Hohlkastenträger mit Festpunkt (Topflager) in Brückenlängsrichtung über dem westlichen Stropfpeiler realisiert wurde. In Brückenquerrichtung ist der Überbau in vier Punkten (Führungslager an Widerlagern, Topflager an Stropfpeilern) fixiert. Die Severinsbrücke (SB) ist eine Schrägseilbrücke mit einem Pylon und vier mal drei als Fächer angeordneten Tragkabeln. Zusätzlich ist der Überbau durch ein Kalottenlager gelenkig an den Pylon angeschlossen. Die Mülheimer Brücke (MB) und die Rodenkirchener Brücke (RB) stellen Hängeseilbrücken dar, deren Überbauten in Brückenlängsrichtung pendelartig an den Hängern getragen werden. In Brückenquerrichtung werden sie an den Widerlagern über Schubdornlager und an den Pylonen über Seilkonstruktionen gehalten.

Die ausgewählten Brücken sind in ihrer Linieneinführung gerade, so dass die Anregung getrennt in Längs- und Querrichtung erfolgen kann. Zur Erfassung des Schwingungsverhaltens der Kabelbrücken in lateraler Richtung wurde eine 3D-Modellierung gewählt. Die vertikale Anregung ist bei Brücken im Allgemeinen, so auch bei den Ausgewählten, unerheblich. Der Überbau der KB wurde durch einen Balken mit entsprechender Massen- und Steifigkeitsverteilung modelliert. Die Pfeiler werden ebenfalls durch Balken und die Widerlager durch Massenpunkte repräsentiert. Wie Vergleichsberechnungen gezeigt haben und auch von Bachmann et al. (1989) bestätigt wird, ist für die vorhandenen Brückenlager der Ansatz einer starren Verbindung ausreichend. Außerdem haben Vergleichsrechnungen gezeigt, dass die Boden-Bauwerks-Wechselwirkungen (BBW) bei der KB aufgrund ihrer gedrunge- nen Stropfpeiler einen entscheidenden Einfluss haben. Diese wurden durch ein Modell für eingebettete Fundamente nach Wolf (1988) bestehend aus Federn, Dämpfern und Massen berücksichtigt. Es wurde das Modell mit zwei Freiheitsgraden je Richtung gewählt, das die Frequenzabhängigkeit der BBW näherungsweise berücksichtigt. Bei den Kabel-

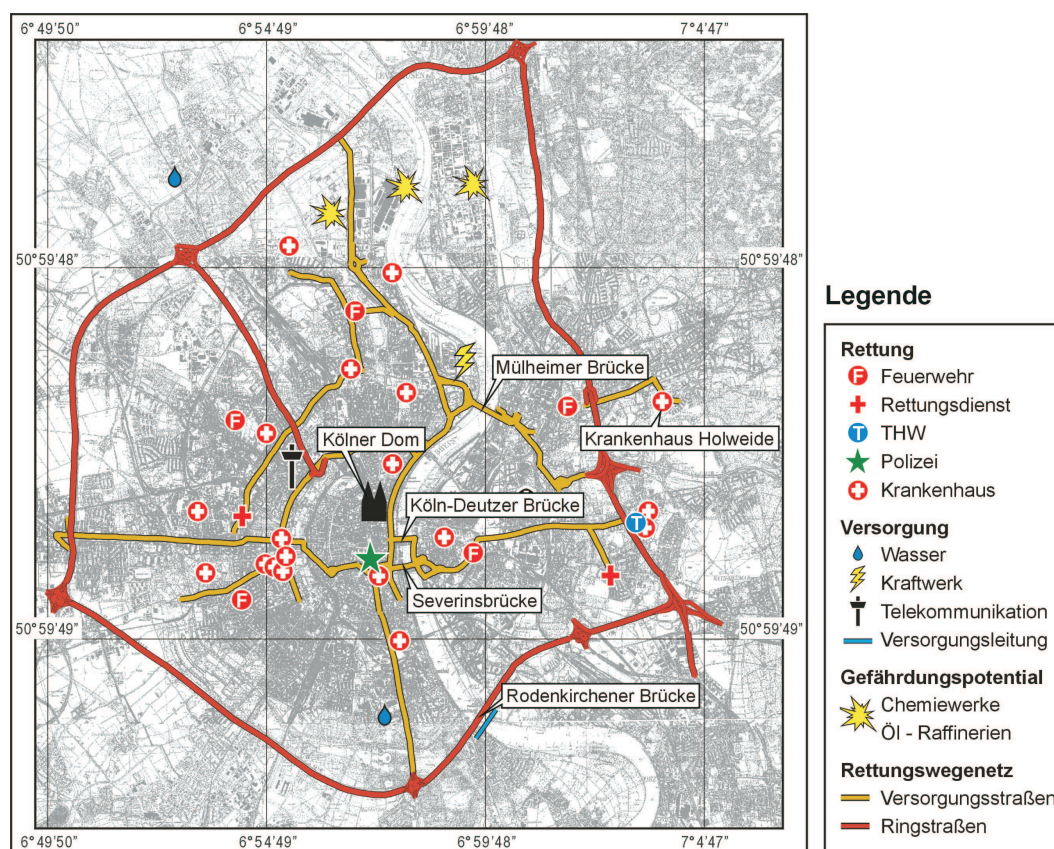


Abbildung 4.36: Rettungswegenetz für die Stadt Köln mit den untersuchten Bauwerken

brücken wurden die BBW vernachlässigt, da sie fast keinen Einfluss auf das dynamische Bauwerksverhalten haben. So konnte unter Berücksichtigung der BBW lediglich ein Anstieg der Grundeigenperiode von 0,1 % festgestellt werden. Der Überbau der Kabelbrücken wurde mit Balkenelementen für die Hauptträger und Membranelementen für die Fahrbahnplatte mit Längssteifen modelliert.

Die Querträger, welche auf die integrale Steifigkeit der Brücke keinen Einfluss haben, wurden lediglich durch ihr Eigengewicht berücksichtigt. Das pendelartige Schwingen des Überbaus in Längsrichtung bei den Hängeseilbrücken wurde durch Vorspannung der Tragkabel und Hänger entsprechend der vorhandenen Belastung und eine geometrisch nichtlineare Berechnung realisiert. Da die während eines Erdbebens vorhandene Verkehrslast das dynamische Verhalten der Brücken beeinflusst,

muss diese mit einem wahrscheinlichen Wert berücksichtigt werden. Hier wurde die Angabe aus Eurocode 8 übernommen, wonach sie zu 20 % des Bemessungswertes aus der Statik anzusetzen ist. Zur Beurteilung der Brückendynamik wurden zunächst die Eigenformen und -perioden ermittelt (Abb. 4.38).

Mit einer bauwerksbezogenen Darstellung der Erdbebenlast in Form von Antwortspektren ist es möglich, die maximale Antwort jedes einzelnen Eigenmodes direkt abzulesen und die Gesamtantwort des Bauwerks mit geeigneter Überlagerung abzuschätzen. Ein Vergleich der Perioden der KB mit den Szenario- Antwortspektren nach Abb. 4.39 zeigt, dass alle relevanten Moden stark angeregt werden, so dass es zu einer sehr großen Gesamtantwort und folglich zu einer hohen Wahrscheinlichkeit von Schäden kommt. Bei der SB wurde die Anpassung der Steifigkeitsverteilung

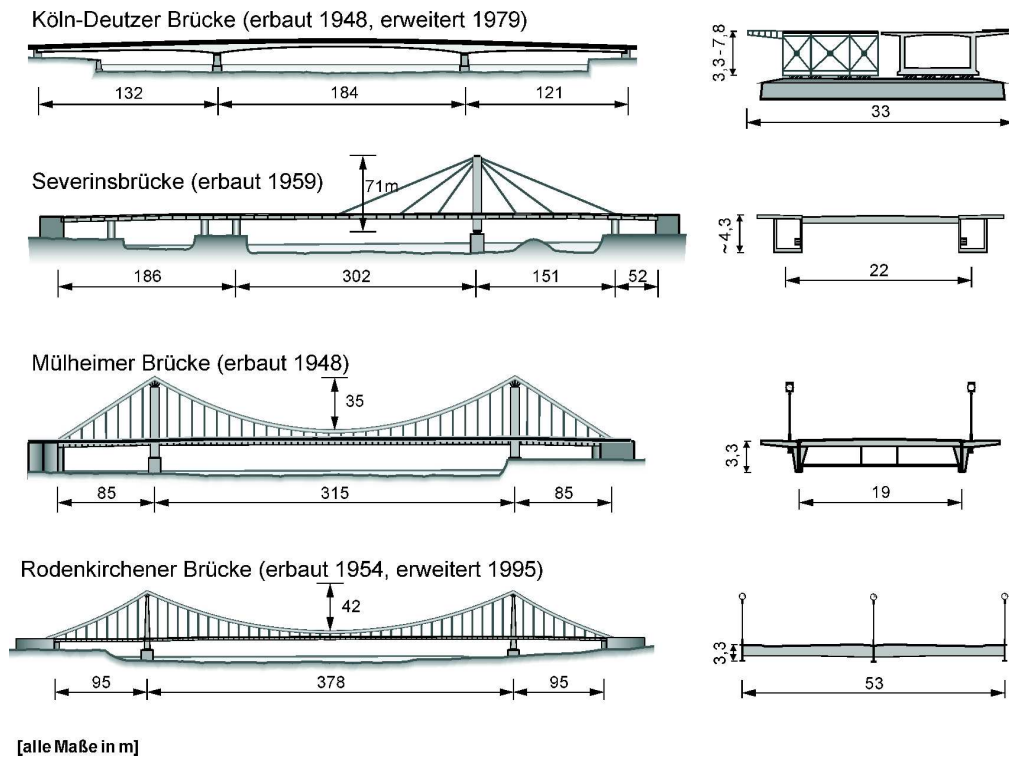


Abbildung 4.37: Untersuchte Rheinbrücken in Süd-Ansicht und Querschnitt

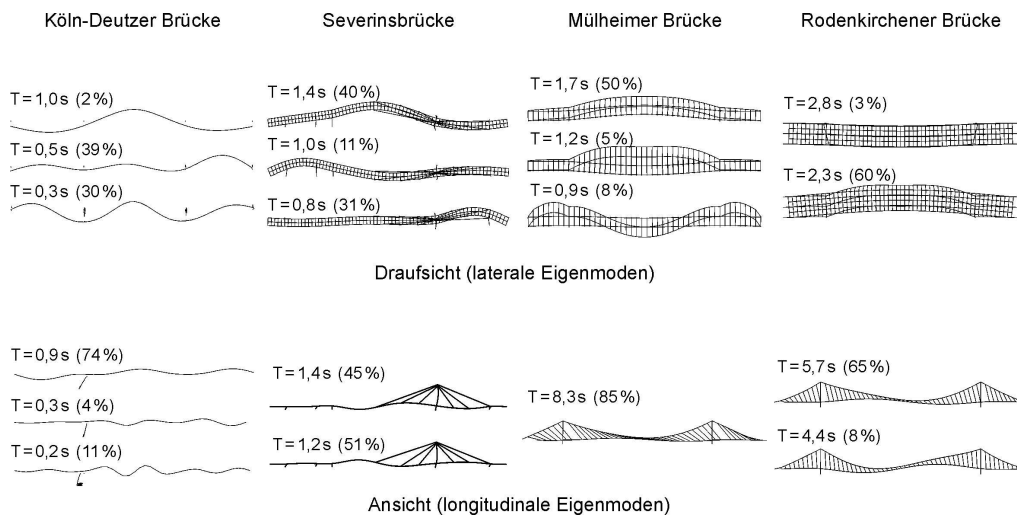


Abbildung 4.38: Eigenformen und -perioden der Rheinbrücken mit Massenbeteiligungen (in %)

der Hauptträger verfeinert, was eine Verringerung der Eigenperioden um ca. 10 % im Vergleich zu früheren Veröffentlichungen zur Folge hatte. Auch bei dieser Brücke werden re-

levante Eigenmoden in lateraler und longitudinaler Richtung angeregt. Das niederfrequente Schwingen des Überbaus in Längsrichtung bei den beiden Hängeseilbrücken kommt einer

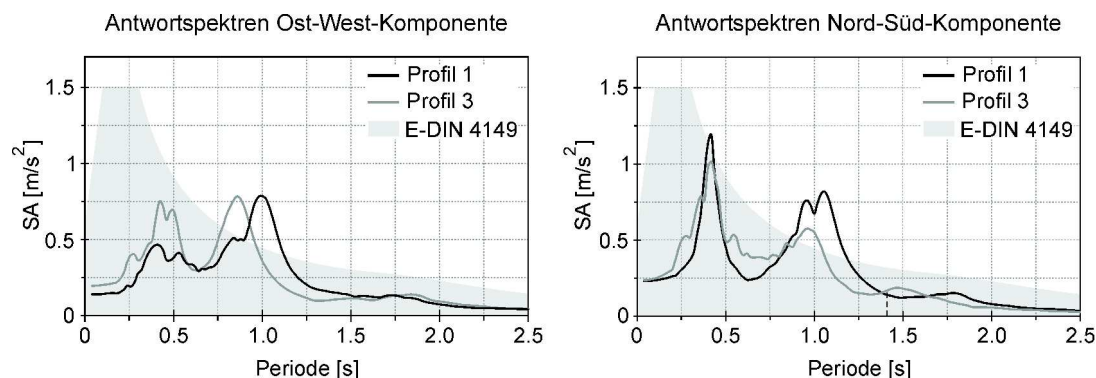


Abbildung 4.39: Bemesungsspektrum nach E-DIN 4149 und Antwortspektren der zur KB und SB nächstgelegenen Zeitverlaufs-Spuren nach TP B2.2 (GFZ).

seismischen Isolation gleich, so dass in dieser Richtung fast keine Anregung zu erwarten ist. Während bei der MB jedoch in lateraler Richtung Amplitudenverstärkungen zu erwarten sind, erscheint auch diese Anregungsrichtung bei der RB unkritisch.

Der Vergleich der Bauwerksresonanzen mit den Antwortspektren weist bei drei der Brücken auf Amplitudenverstärkungen und damit auf ein erhöhtes Risikopotential hin. Für konkrete Vulnerabilitätsaussagen muss zusätzlich die dynamische Bauwerksantwort den Grenzwerten der Traglast und Verformung gegenübergestellt werden. Zur genauen Berechnung der Bauwerksantwort wurde das Zeitverlaufsverfahren gewählt, da die ermittelten Ergebnisse im Vergleich zum Antwortspektrenverfahren genauer sind, Nichtlinearitäten z.B. geometrischer Art und Systemveränderungen wie Lagerbrüche berücksichtigt werden können. Die Brücken wurden synchron in allen Fundamenten getrennt in lateraler und longitudinaler Richtung angeregt. Eine räumliche Veränderlichkeit der Erdbebenbewegung (korrelierte Anregung) wurde mit verschiedenen Methoden u.a. durch Wahl entsprechender Spuren der Erftsprung-Szenarien entlang der Brücken untersucht, zeigte hier jedoch kaum Einfluss auf deren maximale Antwort. Ob dennoch eine Korrelation zwischen der Verformung einzelner Eigenmoden mit der Wellen-

länge relevanter Oberflächenwellen möglich ist und dadurch erhöhte Bauwerksantworten zu erwarten sind, bedarf weiterer systematischer Auswertungen des Baugrundes. Die Brücken sind alle in Ost-West-Richtung orientiert, was bei der Wahl der Komponenten der Erftsprung-Szenarien berücksichtigt wurde. Die Anregung durch die Normszenarien erfolgte hingegen in beide Richtungen mit identischen Zeitverläufen.

Die Berechnungen haben ergeben, dass weder der Überbau noch die Pfeiler, Pylone, Tragkabel und Hänger annähernd an ihre Traglast herankommen. Bei vereinfachten Berechnungsmethoden ist eine Abminderung der Erdbebenlasten durch ein duktilen Verhalten der Bauwerke in Kombination mit den moderaten Beschleunigungen demnach nicht möglich. Kritisch sind bei diesen Brücken die Lager, die aufgrund ihrer geringen Verformungsfähigkeit nicht für dynamische Belastungen geeignet sind. Gerade in Gebieten mit moderater Seismizität werden diese Lager jedoch häufig verwendet. Tab. 4.6 zeigt die in den Lagern während der Simulation maximal ermittelten Kräfte zusammen mit den dazugehörigen Traglasten. Da bei der Planung der Brücken der Erdbebenfall nicht berücksichtigt wurde, entsprechen die angegebenen Traglasten dem Bemessungswert aus Wind-, Bremslasten bzw. Lagerreibung, die auf eine Brücke den gleichen Ef-

fekt ausüben wie ein Erdbeben. Traglasten, die in der Literatur nicht angegeben waren, mussten auf Grundlage von Ausführungsplänen ermittelt werden und sind durch eine Tilde gekennzeichnet.

Bei der KB treten Lasten auf, welche die Tragfähigkeit um ein Vielfaches übersteigen. Besonders kritisch ist die Überlastung der Führungslager an den Widerlagern bei lateraler Anregung, da diese im Gegensatz zu Topflagern lediglich horizontale Lasten übernehmen. Aus diesem Grund befinden sich neben dem Führungslager Gleitlager, welche die vertikalen Lasten übernehmen. Diese werden durch ein Versagen des Führungslagers nicht beschädigt, so dass keine zusätzlichen Reibungskräfte aktiviert werden und der Überbau große Verschiebungen erfahren kann.

Simulationen haben gezeigt, dass nach dem Lagerbruch ein Zusammenprall mit dem benachbarten Überbau möglich ist. Eine Ertüchtigungsmaßnahme mit Elastomerlagern ergab zwar höhere planmäßige jedoch akzeptable Schwingungsamplituden des Überbaus, dafür lagen die Lagerkräfte unterhalb der Traglasten (Stempniewski et al., 2003). Die SB erwies sich für die vorgegebene Belastung als sicher. Im Gegensatz zu einer früheren Veröffentlichung zeigt das verbesserte Modell keine Überlastung mehr bei den Erftsprung-Szenarien. Obwohl die Änderung der Modellierung nur geringfügig ist, kommt es bei gleicher Anregung doch zu erheblichen Unterschieden in der Antwort. Bei der Verwendung von Zeitverläufen aus Bodenbewegungsszenarien ist zu beachten, dass Maxima in den daraus generierten Antwortspektren nur über einen sehr schmalen Periodenbereich wirken. So kann es vorkommen, dass sich die maximale Antwort bei geringfügiger Variation der Bauwerksperiode um ein Vielfaches verändert. Da die Modellierung der Bauwerke sowie der Bodenbewegungsszenarien naturgemäß mit Näherungen verbunden ist, sind Abweichungen in dieser Größenordnung jedoch unumgänglich. Um die Gefahr einer Unterschätzung der auftretenden Lasten zu ver-

meiden, ist es empfehlenswert, die Vulnerabilitätsanalyse mit einer großen Zahl von Erdbebenszenarien unterschiedlicher Epizentren und Herdmechanismen durchzuführen. Die Ergebnisse der beiden Hängeseilbrücken bei Anregung in Längsrichtung wurden hier nicht dargestellt, da sie zu vernachlässigbaren Werten führten. Auch die Anregung der RB in lateraler Richtung führte zu unkritischen Belastungen. Anders sieht es bei der MB bei lateraler Anregung aus. Bei ihr wird die Traglast im Schubdornlager bei dem Normszenario um fast das Doppelte überschritten, und auch bei den Erftsprung-Szenarien sind deutliche Lastüberschreitungen zu erkennen. Auch wenn es an diesem Lager aufgrund mangelnder Überfestigkeit zu einem Versagen kommen sollte, ist dies nicht so kritisch wie bei der KB, da die Rückstellkraft der Hänger den Überbau nach dem Erdbeben wieder in seine Ausgangslage ziehen würde.

Obwohl die Spitzenbeschleunigungen der Normszenarien mehr als doppelt so groß wie die der Erftsprung-Szenarien sind, ergeben sich vergleichbare Belastungen bei den Brücken. Dies liegt an dem für die Brücken ungünstigeren Frequenzgehalt der Erftsprung-Szenarien, welche die Standorteffekte wesentlich differenzierter und realistischer berücksichtigen als dies in der Erdbebennorm möglich ist.

Neben der Sicherstellung der Befahrbarkeit von Rettungswegen kommt den Krankenhäusern gerade nach einer Erdbebenkatastrophe eine besondere Bedeutung zu. Repräsentativ wurde die Vulnerabilität für eines der wichtigsten Krankenhäuser in Köln, das Krankenhaus Holweide, mit moderner Unfallchirurgie und knapp 500 Betten analysiert. Die Bauwerksdynamik wurde mit zwei voneinander unabhängigen Methoden ermittelt. Zum einen wurden in Zusammenarbeit mit TP B2.1 (GFZ) und TP B2.2 (GFZ) Schwingungs-Messungen an dem 11-stöckigen Hochbau durchgeführt und durch Berechnung der spektralen Verhältnisse ausgewertet. Zum anderen wurde ein FE-Modell er-

	E1	E2	E3	E4	DIN	Traglast
Widerlager bei KB bei (lat)	1,47	1,93	1,63	0,65	2,02	0,5
Strompfeiler bei KB (lat)	3,04	3,79	2,90	1,38	4,01	2,6
Strompfeiler bei KB (long)	13,8	21,4	23,6	3,60	15,43	4,3
Pylon bei SB (lat)	0,76	0,76	0,92	0,38	1,10	1,62
Pylon bei SB (long)	1,55	2,35	0,84	0,27	2,53	3,25
Widerlager bei MB (lat)	0,60	0,51	0,42	0,22	0,92	0,48
Pylon bei MB (lat)	2,19	1,83	1,95	1,54	2,82	3,13
Sattellager am Pylonkopf	0,11	0,08	0,11	0,04	0,13	0,12
Widerlager bei RB (lat)	0,64	0,57	0,64	0,23	1,49	~3,0

Tabelle 4.6: Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse der Rheinbrücken für laterale (lat) und longitudinale (long) Anregung. Werte sind die betragsmäßig maximale Lagerkraft in MN für die Erftsprung Szenarien E1 bis E4 sowie der Mittelwert der fünf Normszenarien und die Lager-Traglast.

stellt, um dessen modale Eigenschaften zu analysieren.

Beide Methoden ergaben in Übereinstimmung eine Grundresonanzfrequenz von knapp 1,8 Hz. Damit liegt die Grundresonanzfrequenz des Krankenhauses im Bereich der in TP B2.1 (GFZ) gemessenen Grundresonanzfrequenz der Sedimentschicht (Fäcke et al., 2004), was zu hohen Amplitudenverstärkungen führt. Die Amplitudenverstärkungen konnten durch eine dynamische Simulation mit dem Zeitverlaufsverfahren unter Verwendung der Erftsprung-Szenarien bestätigt werden. Dennoch waren keine Tragwerksschäden zu verzeichnen, was an den ausreichend und regelmäßig angeordneten Wandscheiben aus Stahlbeton liegt. Die Auswirkung der Amplitudenverstärkung auf empfindliche Installationen wird vom Verfasser jedoch als kritisch eingestuft, da die Berechnungen sehr hohe spektrale Beschleunigungen bei 1,8 Hz in den oberen Stockwerken zeigten.

Die Bauwerksdynamik des Kirchenhauses des Kölner Doms wurde ebenfalls in Zusammenarbeit mit TP B2.1 (GFZ) und B2.2 (GFZ) analysiert. Die Auswertung von Messungen an zehn Stationen innerhalb des Kirchenhauses ergaben Resonanzfrequenzen von 0,7, 1,1 und 1,4 Hz. Damit liegt die Grundresonanzfrequenz des Kölner Doms nicht weit von je-

ner der Sedimentschicht mit 0,5 Hz entfernt. Eine Simulation mit den Erftsprung-Szenarien an einem vereinfachten FE-Modell des Kölner Doms, das auf die Ergebnisse der Messungen kalibriert wurde, zeigte dass klaffende Mörtelfugen in den Stützen möglich sind (Fäcke et al., 2004). Aus diesem Grund sollten weitere Untersuchungen mit verbesserten numerischen Modellen durchgeführt werden.

4.8.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Es hat sich gezeigt, dass bei der KB, wie sie in ähnlicher Weise mehrfach in Deutschland gebaut wurde, schwerwiegende Schäden durch ein Erdbebenereignis mit 475-jährigem Gefährdungsniveau für Köln zu erwarten sind. Dies liegt zum einen in der Wahl der Festlager (Topflager, Führungslager) begründet, die durch eine sehr hohe Steifigkeit hohe Lasten anziehen, auf der anderen Seite aber nur für Wind-, Brems- und Reibungslasten bemessen wurden. Hinzu kommt bei derartigen Brücken mit kurzen aber massiven Strompfeilern eine mangelnde Energiedissipationsfähigkeit, die insbesondere in den Lagern hohe Lasten verursacht. Weit weniger gefährdet sind Brücken, bei denen die vertikalen Lasten durch Kabel abgetragen werden und dadurch der

Überbau auf seine Länge und Breite bezogen wesentlich leichter ist. So konnten bei der SB und RB für die ausgewählten Szenarien keine und bei der MB lediglich geringe Schäden prognostiziert werden. Besonders günstig wirkt sich ein pendelartiges Schwingen des Überbaus in Längsrichtung bei den Hän-geseilbrücken aus, das einer niederfrequenten Schwingungsisolierung gleichkommt.

Die Ergebnisse zeigen, dass gerade im Innen-stadtbereich von Köln durch ein mögliches Versagen der KB die Rettungsarbeiten nach einem Erdbeben behindert werden können. Gerade Brücken von ähnlichem Konstruktions-typ wie die KB, die nicht für Erdbebenlas-ten bemessen wurden, sollten bei folgenden Projekten ähnlicher Art verstärkt untersucht werden. Dabei hat sich die Durchführung von Schwingungsmessungen als effektives Instru-ment zur Abschätzung von Amplitudenverstär-kungen und damit zur Abschätzung eines er-höhten Risikopotentials herausgestellt.

4.8.7 Offene Fragen

Auch wenn während der Projektlaufzeit die vier wichtigsten Brücken untersucht werden konnten, existieren allein entlang der Rettungswege 181 weitere zumeist kleine Brücken und Unterführungen, die im Fall ei-nes Versagens nach einem Erdbeben zu Be-hinderungen der Rettungsarbeiten führen kön-nen. Zur Bewältigung des großen Bestandes z.T. ähnlicher Brückenbauwerke ist ein Ver-fahren wünschenswert, das die Vulnerabili-tät analog zur probabilistischen Schadenspro-gnose des Gebäudebestandes entsprechend TP B3.1 abzuschätzen vermag. Der Einsturz von Bauwerken kann zum einen ebenfalls zu einer Blockierung von Rettungswegen führen, zum anderen kann er in besonders stark betroffene-nen Gebieten einen erhöhten Bedarf an Ret-tungskräften bewirken. Diesem Umstand sollte Rechnung getragen werden, indem das vorhan-dene Rettungswegenetz mit den Ergebnissen aus TP B3.1 kombiniert wird, wodurch gege-

benenfalls eine Optimierung der Verbindungs-wege möglich wird.

Eine Variation der Eintrittswahrscheinlichkeit der Erdbebenszenarien würde eine sinnvolle Erweiterung der Untersuchungen darstellen, mit der das Risiko der Beeinträchtigung von Rettungsmaßnahmen noch besser eingeschätzt werden könnte. Für die Entwicklung entspre-chender Freifeld-Bodenbewegungsszenarien unter Berücksichtigung der Sedimentschichten könnten die spektralen Beschleunigungen auf Festgestein aus TP B1 herangezogen werden. Zusätzlich zur Eintrittswahrscheinlichkeit von 10 % in 50 Jahren, die der hier verwendeten 475-jährigen Wiederkehrperiode entspricht, wurde in diesem TP die Eintrittswahrschein-lichkeit von 2 % in 50 Jahren und das maximal zu erwartende Erdbeben berücksichtigt. Die Untersuchung weiterer Einzelobjekte mit erhöhtem Risikopotential wie Öl-Raffinerien, Energie- und Wasserversorgungsanlagen und Krankenhäuser wäre ebenfalls wünschens-wert, um eine mögliche Beeinträchtigung von Rettungs-, Bergungs- und Wiederauf-baumaßnahmen umfassender abschätzen zu können.

4.8.8 Literatur

E-DIN 4149 (2000): Auslegung von Hochbau-ten gegen Erdbeben (Entwurf). Deutsches In-stitut für Normung, NaBau, Berlin.

Eurocode 8: Design provisions for earthqua-ke resistance of structures. ENV 1998-1 (1994, 95), ENV 1998-2 (1998), European Commit-tee for Standardization, Brüssel.

Fäcke A., Parolai S., Richwalski S.M., Stemp-niewski L. (2004): Assessing the vibrational frequencies of the Cathedral of Cologne (Ger-many) by means of ambient seismic noise analysis. *Natural Hazards, special edition on DFNK*, in print.

Fäcke, A., Stempniewski, L., Richwalski, S.M., Parolai, S., Milkereit, C., Wang, R., Bor-mann, P., and Roth, F. (2002): A combined

- geophysical/engineering approach for the seismic safety of long-span bridges. In "Challenges for Earth Sciences in the 21st Century", Springer Verlag, in print.
- Heß H. (1960): Die Severinsbrücke Köln – Entwurf und Fertigung der Strombrücke. *Der Stahlbau*, 29, 225-261.
- Hosser D. (1987): Realistische seismische Lastannahmen für Bauwerke. *Der Bauingenieur*, 62, 567-574.
- Klein H. H. (1985): Kenngrößen zur Beschreibung der Erdbebeneinwirkung. In König, G. u.a. (eds) Mitteilungen aus dem Institut für Massivbau der TH Darmstadt, Heft 32.
- Knop D. (1979): Die Verbreiterung der Brücke Köln-Deutz. *Beton-Information*, 2+3, 14-34.
- Leonhardt, F., Schneider, M. (1950/ 51): Die Autobahnbrücke über den Rhein bei Köln-Rodenkirchen. *Die Bautechnik*, 27/ 28, 169-177, 237-245, 283-291, 310-314/ 225-232, 246-253, 289-295, 351-359.
- Richwalski S.M., Fäcke A., Parolai S., Stempniewski L. (2004a): Influence of site and source dependent ground motion scenarios on the seismic safety of long-span bridges in Cologne, Germany. Natural Hazards, special edition on DFNK, in print.
- Richwalski S.M., Parolai S., Fäcke A., Hollnack D. (2004b): An interdisciplinary approach for the microzonation of the Cologne area (Germany). 3rd Forum Katastrophenvorsorge DKKV (German Committee for Catastrophe Mitigation), submitted.
- Schüßler K., Pelikan W. (1951): Die neue Rheinbrücke Köln-Mülheim. *Der Stahlbau*, 20, 141-150.
- Stempniewski L., Fäcke A. (2003): Erdbebenrisiko von Infrastrukturen in Deutschland am Beispiel der Kölner Rheinbrücken. *Der Prüfingenieur*, 22, 56-62.
- Stempniewski L., Fäcke A., Baur M. (2002): Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential. In: Fuchs, Werner u.a. (eds.) *Befestigungstechnik Bewehrungstechnik und...*, ibidem-Verlag, Stuttgart.
- Wolf J. P. (1988): Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

4.9 Satellitengestützte Erfassung von Gebäudeparametern als Beitrag zur Vulnerabilitätsabschätzung bei Erdbeben

Marina Müller, Karl Segl, Hans-Ullrich Wetzel und Hermann Kaufmann

*GeoForschungsZentrum Potsdam
Sektion 1.4 Fernerkundung
Email: segl@gfz-potsdam.de*

TP C1: Satellitengestützte Erfassung von Gebäudeparametern als Beitrag zur Vulnerabilitätsabschätzung bei Erdbeben

4.9.1 Zusammenfassung

Ziel des Projekts war die Analyse, inwieweit fernerkundliche Daten und Methoden zur Unterstützung naturkatastrophen-relevanter Fragestellungen beitragen können. Im Cluster "Risikoanalyse Erdbeben" wurde dabei speziell das Potential räumlich sehr hochauflösender Satellitensensoren für die Abschätzung von Vulnerabilitätsparametern für Gebäude untersucht sowie Verfahren zu deren automatischen Extraktion analysiert und weiterentwickelt. Zusätzlich wurde eine Kartierung geologischer Störungen auf der Basis von Radar- und optischen Satellitendaten als Basisinformation für Einschätzungen der Erdbebengefährdung zur Verfügung gestellt.

Abstract

Aim of this project was to analyse in how far remote sensing data and methods contribute to solutions of problems in the context of natural hazards. Within the cluster "earthquake risk assessment", the potential of especially very high spatially resolving satellite sensors for the estimation of parameters for an assessment of building vulnerability was evaluated. Additionally, methods for the automatic extraction of these parameters were analysed and new approaches developed. The work in this cluster concerning earthquake risk assessment was further supported by supplying a map of geological fracture zones that was generated based on radar and optical satellite imagery.

4.9.2 Veranlassung und Problem

Die Vulnerabilitätsabschätzung von Gebäuden bezogen auf Erdbebenszenarios, wie sie z.B. im Teilprojekt B3.1 durchgeführt wurde, erfordert eine großräumige Inventur des Gebäudebestandes im Untersuchungsgebiet. Bisherige Verfahren zur Berechnung der Vulnerabilität basieren dabei entweder auf detaillierten Analysen jedes einzelnen Hauses mittels

komplexen Modellen oder auf einer globaleren Schadensabschätzung auf der Basis von Experteneinschätzungen. Da jedoch die detaillierte Analyse jedes einzelnen Gebäudes zu zeitaufwendig ist und nicht für jede Region mit seismischer Gefährdung auch ein entsprechendes Erfahrungspotential aus früheren Erdbeben vorhanden ist, werden vermehrt Ansätze entwickelt, die einen Kompromiss zwischen beiden Ansätzen darstellen. Dabei wird eine

Auswahl aussagekräftiger Parameter identifiziert, die eine relativ schnelle, aber zuverlässige Abschätzung der Vulnerabilität des gesamten Gebäudebestandes erlauben. Trotz dieser Einschränkung auf wenige relevante Parameter, ist eine komplette Inventur aller Gebäude immer noch sehr aufwendig.

Satellitendaten erlauben, im Gegensatz zu Begehungen vor Ort oder Luftbildaufnahmen, eine gleichzeitige Erfassung eines großflächigen Gebietes. Seit 1999 und 2001 sind mit IKONOS und QuickBird zwei Sensoren im Orbit, die außerdem eine ähnliche räumliche Auflösung (IKONOS/QuickBird: 1 m/0,7 m im panchromatischen Kanal, 4 m/2,8m in den vier multispektralen Kanälen) aufweisen wie Luftbilddaten, die bisher für Evaluationszwecke oft herangezogen wurden. Damit ergab sich die Frage im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“, inwieweit satellitengestützte Fernerkundungsdaten zur Inventarisierung des Gebäudebestandes im Rahmen einer Vulnerabilitätsabschätzung beitragen können.

4.9.3 Ziel

Generelles Ziel des Teilprojekts C1 war die Analyse der Anwendbarkeit fernerkundlicher Daten und Methoden als Werkzeug zur Inventarisierung von natürlichen und anthropogenen Objekten vor bzw. nach einer Naturkatastrophe. Im Rahmen des Clusters "Risikoanalyse Erdbeben" sollte speziell untersucht werden, inwieweit die neue Generation von hochauflösenden Satellitensensoren die Erfassung einzelner Parameter der Vulnerabilitätsabschätzung unterstützen können und inwieweit dieser Prozess bereits automatisiert werden kann.

4.9.4 Methode

Es wurde zunächst gemeinsam mit unseren Partnern im Teilprojekt B3.1 und mittels Literaturrecherche analysiert, welche Parameter für eine Vulnerabilitätsabschätzung bei großen Erdbebenszenarios relevant sind. Notwendige

Informationen sind u.a. (Schwarz et al., 2001; Schwarz et al. 2003; Grünthal, 1998)

- die Topographie, Geologie und Bodenbedingungen,
- der Gebäudetyp, d.h. beispielsweise Baumaterial, Gebäudehöhe und Baujahr,
- Kontextinformationen, z.B. die räumliche Position eines Hauses in Bezug zu anderen Gebäuden.

Da zu Beginn der Arbeiten noch keine Daten der Satellitensensoren erhältlich waren, wurden erste Tests zunächst anhand von Luftbildern durchgeführt. Dazu wurden von der Thüringer Landesanstalt für Umwelt Farb- und Infrarotaufnahmen bereitgestellt, die im Teilprojekt C1 gescannt und zu digitalen Luftbildmosaiken zusammengefügt wurden. Diese Bildmosaiken wurden wiederum als Produkt der Landesanstalt, ebenso wie unseren Projektpartnern, zur Verfügung gestellt.

Auch im weiteren Verlauf des Projekts wurden keine Szenen der im TP B3.1 untersuchten Testgebiete in den Archiven der Sensoren aufgenommen, weshalb detailliertere methodische Analysen mittels einer Szene des Sensors IKONOS (5 km x 5 km Ausschnitt von Berlin, panchromatisch und multispektral) sowie zusätzlichen Höhen- und spektralen Informationen der gleichen Gegend vom flugzeuggetragenen Sensor HRSC-A durchgeführt wurden. Es wurde dabei geprüft, inwieweit die jeweiligen Vulnerabilitätsparameter aus Daten der hochauflösenden Satellitensensoren generell gewonnen werden können. Hinsichtlich der Automatisierung wurden vor allem existierende Verfahren zur Gebäudeextraktion getestet und neue Verfahren entwickelt.

4.9.5 Ergebnisse und Diskussion

Topographie und Geologie

Digitale Geländemodelle (DGMs) werden bereits mit für viele Anwendungen ausreichender räumlicher Auflösung von anderen Satellitensensoren zur Verfügung gestellt. Radarsysteme (z.B. SRTM – Shuttle Radar Topography Mission) und optische Sensoren mit Stereoaufnahmemodus, wie ASTER, liefern entsprechende morphologische Daten. Lokale Bodeninformationen sind in den meisten Fällen nicht direkt mit Satellitensensoren zu beobachten aufgrund von Versiegelungen der Oberfläche durch Gebäude, Straßen, Parkplätze etc. oder bedingt durch Vegetation. Allerdings ermöglicht der großräumige Überblick, den Satellitendaten bieten, Rückschlüsse auf tektonische Aktivitäten basierend auf der Interpretation der vorliegenden Geomorphologie. Solche Interpretationen wurden auf Grundlage von Radardaten und optischen Satellitendaten für den gesamten deutschen Raum durchgeführt (Wetzell und Franzke, 2001). Wie diese geologischen Informationen im Rahmen des DFNK bereits genutzt werden, wird im Bericht des Teilprojekts C2 näher erläutert.

Gebäudetyp

Der Gebäudetyp lässt sich auf der Basis verschiedener Indikatoren bestimmen. Abgesehen vom Dachmaterial, der Gebäude- und Dachform sowie der Höhe des Gebäudes ermöglicht insbesondere Wissen über die Umgebung des Hauses Rückschlüsse auf dessen Typ.

Studien mit flugzeuggetragenen Hyperspektralsensoren haben gezeigt, dass es möglich ist, anhand spektraler Informationen die meisten Dachmaterialien voneinander zu differenzieren (Roessner et al., 2001). IKONOS und QuickBird sind multispektrale Sensoren mit vier Kanälen (blau, grün, rot, infrarot). Bei spektralen Untersuchungen ist festzustellen, dass die Hauptdachmaterialien immer noch voneinander zu trennen sind aufgrund der

Albedo- und Farbinformation, z.B. stark reflektierende Metalle und Kunststoffe, rötliche Ziegel und dunkler Bitumen. Dagegen sind beispielsweise rote Ziegel nicht separierbar von roten Dachbetonsteinen. Die Trennbarkeit von unterschiedlichen Dachmaterialien wird außerdem beeinflusst vom Alter des Materials und Beleuchtungseffekten. Allerdings garantiert auch eine höhere spektrale Auflösung eines Sensors nicht die Unterscheidbarkeit von Dach- gegenüber anderen Oberflächenmaterialien, da sie z.T. aus ähnlichen Materialien bestehen, beispielsweise Asphalt und Bitumen/Teerpappe.

Die Form des Gebäudes erlaubt nicht nur Aussagen über seinen Typ sondern auch z.B. über die Regelmäßigkeit bzw. Symmetrie des Gebäudes. Bis auf Verdeckungen durch benachbarte Objekte oder Schatten, lässt sich die Form eines Gebäudes in IKONOS Daten und insbesondere in den räumlich noch höher auflösenden QuickBird Daten sehr gut erkennen (Beispiele Abb. 4.41a und 4.42). Da Verfahren zur automatischen Gebäudeextraktion nicht auf das komplexe Welt- und Kontextwissen zurückgreifen können, wie es einem menschlichen Experten zur Verfügung steht, ist die Entwicklung geeigneter zuverlässiger Methoden ein sehr aktives Forschungsgebiet (Baltsavias et al., 2001). Innerhalb des Projekts wurde einerseits getestet, inwieweit die spektrale Information von IKONOS Daten und zusätzlich ermittelte Kontextinformation (Schatten, Fassade) eine erfolgreiche Detektion von Häusern erlaubt (Mueller und Segl, 2001, siehe auch Endbericht des Teilprojekts C1 im Rahmen des Clusters „Risikoanalyse Hochwasser“). Es zeigt sich, dass gerade in urbanen Gebieten die Trennung von Oberflächenmaterialien, die sowohl für Hausdächer als auch für Straßenbeläge Verwendung finden, auch mit zusätzlicher Kontextinformation nur schwer möglich ist. Da - wie später noch ausgeführt wird - es auch möglich ist, Höheninformationen aus hochauflösenden Satellitendaten zu gewinnen, wurde das Potential der Einbindung von Höheninformationen getestet. Ca. 82 % der

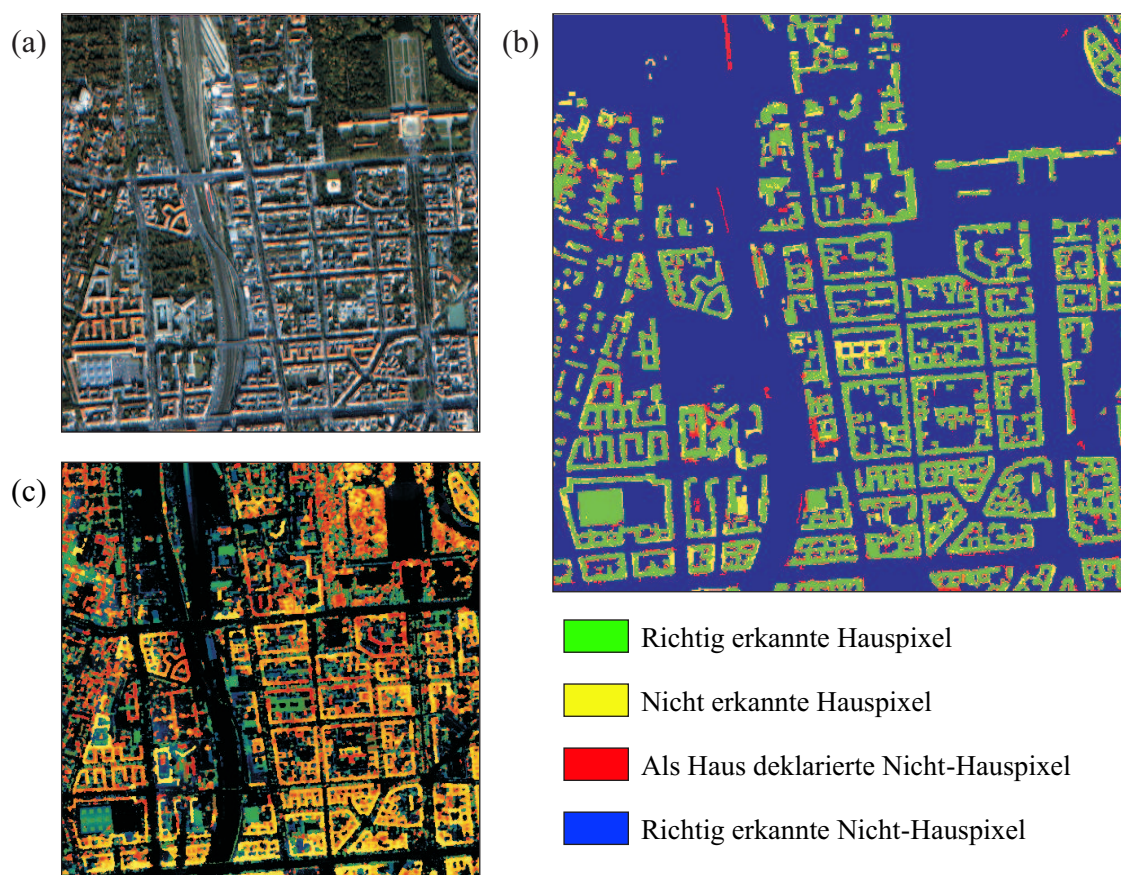


Abbildung 4.40: (a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene von Berlin, (b) erkannte Häuser aufgrund der spektralen, panchromatischen und zusätzlichen (c) Höheninformation, die in diesem Beispiel auf Daten des Sensors HRSC-A basieren.

Häuser lassen sich in dem Beispiel in Abbildung 4.40 (Mueller et al., 2004) auf dieser Datengrundlage erfolgreich detektieren. Verbleibende Unsicherheiten ergeben sich vor allem durch Ungenauigkeiten in dem aus Stereodaten automatisch generierten Höhenmodell, die durch einen Fuzzy Logik Ansatz minimiert werden können (Mueller und Segl, 2002). Weitere Gründe für Fehlklassifikationen sind z.B. begrünte Dächer, die sich spektral nur schwer von Baumbereichen unterscheiden lassen, oder Schatten benachbarter Gebäude.

Dachformen und die Schräge des Daches lassen sich aufgrund von Beleuchtungseffekten ebenfalls sehr gut im Bild erkennen. Bei einem schrägen Aufnahmewinkel des Sensors werden symmetrische Dachhälften wegen ihrer Orientierung zum Sensor unterschiedlich

breit im Bild abgebildet. Dieser Effekt lässt sich nutzen, um in günstigen Fällen (die Achse des Daches steht ungefähr senkrecht zum Azimutwinkel des Sensors) auf die Dachneigung zu schließen (Mueller et al., 2004).

Einzelne Stockwerke lassen sich selbst bei schrägem Aufnahmewinkel des Sensors nicht differenzieren. Grundsätzlich gibt es allerdings zwei Möglichkeiten, Informationen über Gebäudehöhen aus IKONOS oder QuickBird Daten zu gewinnen, entweder eine Schätzung aus der Schattenlänge oder eine präzise Berechnung basierend auf Stereoaufnahmen. Abbildung 4.41a zeigt einen Ausschnitt einer IKONOS Szene von Berlin mit überlagerten Rändern der im Ausschnitt enthaltenen Gebäude. Da für die Testzwecke keine Stereodaten des Satellitensensors zur Verfügung stan-

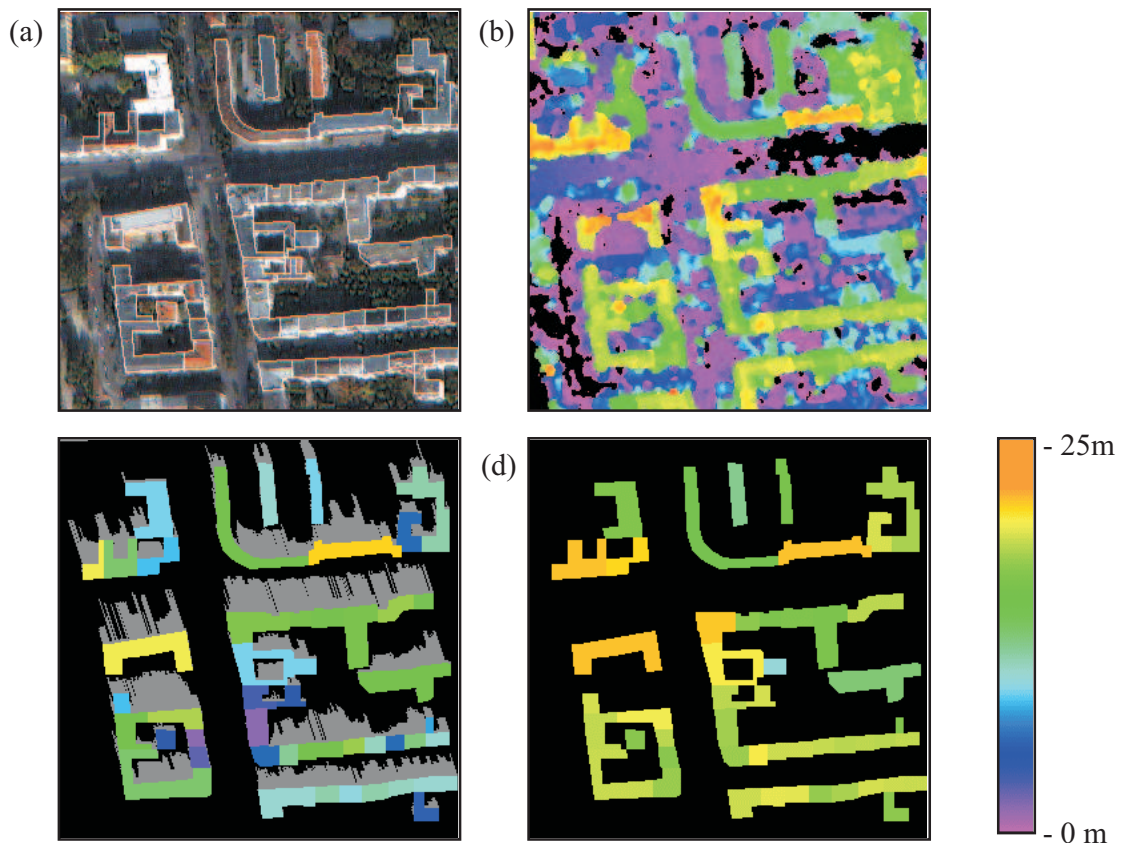


Abbildung 4.41: Höheninformation aus Satellitendaten: (a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene mit überlagerten Hausgrenzen, (b) normalisiertes digitales Oberflächenmodell basierend auf Stereoinformationen des HRSC-A Sensors, (c) Höhendaten aus Schatteninformation, (d) Gebäudehöhen aus (b).

den, wurde auf das ebenfalls aus Stereodaten von der DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) automatisch generierte Oberflächenmodell des HRSC-A Sensors zurückgegriffen. Zur Gewinnung der eigentlichen Objekthöhen wurde im Projekt ein weitestgehend automatisches Verfahren zur Generierung eines normalisierten Oberflächenmodells entwickelt (Mueller und Segl 2002, Abb. 4.41b). Abb. 4.41c und Abb. 4.41d zeigen die jeweils aus der Schatten- und der Stereoinformation gewonnene mittlere Gebäudehöhe.

Die aus Stereodaten gewonnene Höheninformation ist zuverlässiger, da Schatten oftmals durch benachbarte Häuser oder andere Objekte verkürzt werden. Bei automatisch generierten Oberflächenmodellen sind die Ge-

bäuderänder meist nicht präzise erfasst bedingt durch Schwierigkeiten beim automatischen Finden von korrespondierenden Bildpunkten in den Stereodaten. Halbautomatische Verfahren, die bisher für Analysen des IKONOS und des QuickBird Sensors eingesetzt wurden (Fraser et al., 2002; Toutin et al., 2002), erlauben die Berechnung von Höheninformationen aus Satellitendaten mit Subpixelgenauigkeit und sind damit vollautomatischen Verfahren in ihrer Genauigkeit bisher noch überlegen.

Kontextinformation

Ein wesentlicher Vorteil von Satellitendaten ist der flächenmäßige Überblick, den sie gewäh-

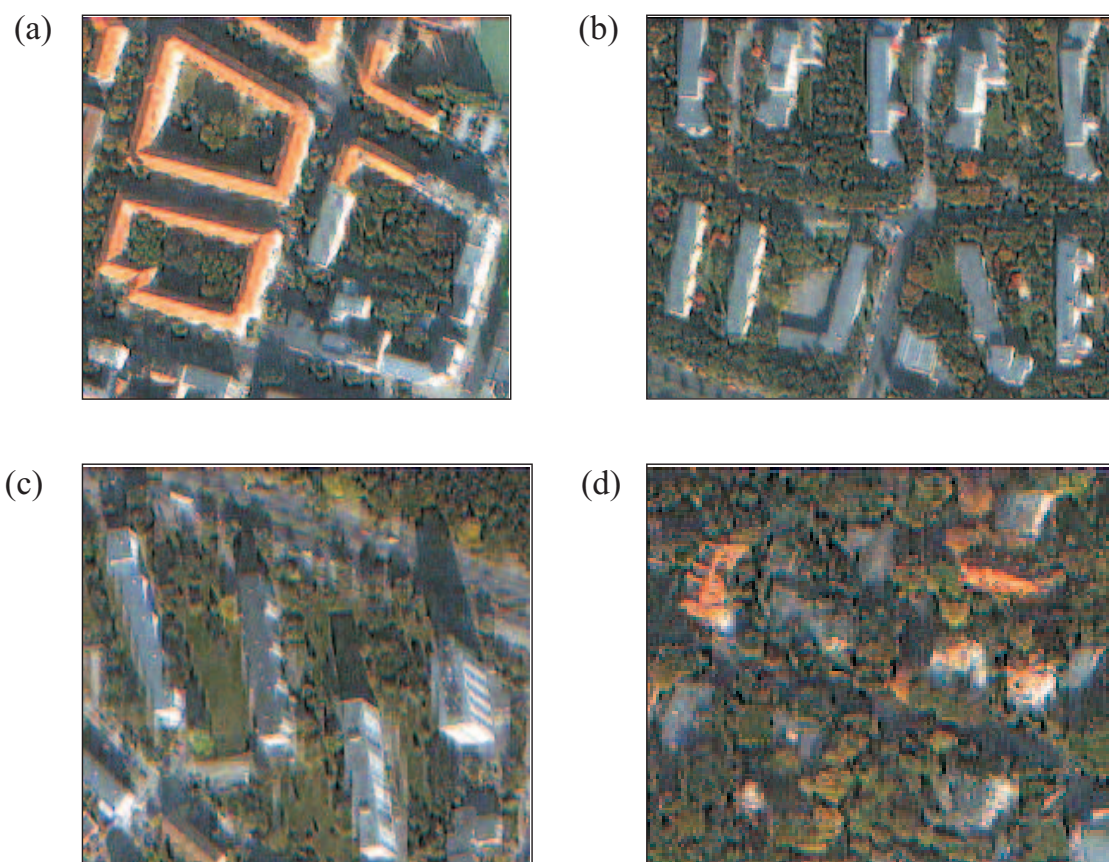


Abbildung 4.42: Beispiele von Stadtstrukturtypen, die sich in IKONOS Daten identifizieren lassen: (a) Blockrandbebauung, (b) Zeilenbebauung (c) Großformbebauung/Hochhäuser, (d) Villenviertel.

ren. Wenn erst einmal die einzelnen Gebäude extrahiert sind, ergibt sich daraus die Position und Distanz zu anderen Gebäuden automatisch. Zusätzlich ermöglichen sie die Einordnung der Gebäude in den jeweiligen Stadtstrukturtyp (Wittig et al., 1998, Abb. 4.42).

Dies erlaubt wiederum Rückschlüsse auf den konkreten Typ des Gebäudes, das Alter und mit der Information über die Gesamtgebäudehöhe auch auf die Stockwerksanzahl. Beispielsweise sind die Blockrandbebauungen in Abb. 4.42a typisch für Wohngebiete, die zur Gründerzeit zwischen 1850 und 1920 gebaut wurden. Sie besitzen üblicherweise eine Höhe von 4-5 Stockwerken. Ist eine stichprobenartige detaillierte Untersuchung von einzelnen Häusern gewünscht, ist auf Grundlage der ge-

gebenen Informationen eine gezielte Auswahl von Gebäuden möglich.

4.9.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Da von den Testgebieten des TP B3.1 während der Projektlaufzeit noch keine Daten von IKONOS oder QuickBird vorlagen, und die Luftbildmosaike (Beispiel Abb. 4.43) nur eine ungefähre Simulation der räumlichen Auflösung bieten, und abweichende spektrale sowie praktisch keine Höheninformationen zur Verfügung stellen, war kein direkter Vergleich mit den Ergebnissen aus dem TP B3.1 möglich. Jedoch wurde die Berlin-Szene so ausgewählt, dass in ihr die in Deutschland gängigsten Stadtstrukturtypen weitestgehend abgedeckt

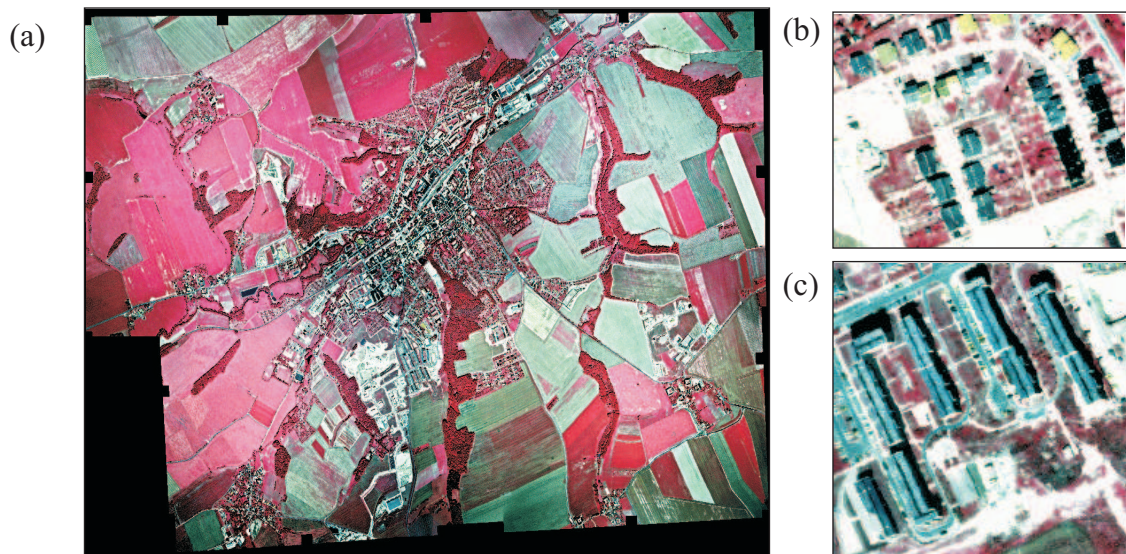


Abbildung 4.43: Höheninformation aus Satellitendaten: (a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene mit überlagerten Hausgrenzen, (b) normalisiertes digitales Oberflächenmodell basierend auf Stereoinformationen des HRSC-A Sensors, (c) Höhendaten aus Schatteninformation, (d) Gebäudehöhen aus (b).

sind, was bei einem Vergleich (Abb. 4.43b, 4.43c) bestätigt wird. Somit ist prinzipiell eine Übertragung der gewonnenen Ergebnisse auch auf andere Gebiete Deutschlands möglich.

Generell wurde die Untersuchung zur Abschätzung von Vulnerabilitätsparametern für Satellitensensoren der neuesten Generation mit der höchsten räumlichen Auflösung durchgeführt, die je mit zivilen Satellitensensoren erreicht wurde. Derzeit sind keine Systeme geplant, die eine noch höhere räumliche Auflösung bzw. bei gleicher räumlicher Auflösung eine höhere spektrale Auflösung bieten als die untersuchten Sensoren IKONOS und QuickBird. Damit ist die Aktualität der Analyse hinsichtlich des grundsätzlichen Potentials von Satellitensensoren bis auf weiteres gewährleistet. Methoden zur automatischen Auswertung von Bilddaten, z.B. zur Gewinnung von Höheninformation und zur Extraktion von Gebäuden, werden stetig weiterentwickelt, so dass dort in Zukunft noch bessere Produkte zu erwarten sind.

Auch wenn sich die Untersuchung auf die Anwendbarkeit im Bereich der Vulnerabilitätsab-

schätzung von Gebäuden bei Erdbebenszenarien beschränkte, so zeigt sich damit auch das Potential von Satellitendaten in anderen Anwendungsbereichen, z.B. dem Siedlungsmonitoring für allgemeinere Planungsfragen im Bereich des Risikomanagements.

4.9.7 Offene Fragen

Aufgrund der zeitlichen Beschränkung des Projekts wurde nur das Potential von hochauflösenden Satellitendaten für eine Inventarisierung *vor* dem Eintreten einer Naturkatastrophe untersucht. Eine Abschätzung des Potentials für den Zeitpunkt *nach* einem Ereignis steht noch aus. Es gibt bereits einige Ansätze, die die Möglichkeiten von Fernerkundungsdaten in diesem Zusammenhang untersuchen (z.B. Eguchi et al., 2000), jedoch wurden in diesen Analysen bisher keine Sensoren mit der räumlichen Auflösung berücksichtigt, wie sie IKONOS und QuickBird bieten.

4.9.8 Literatur

- Baltsavias, E.P., Gruen, A., and Van Gool, L., Hrsg. (2001), Automatic extraction of man-made objects from aerial and space images (III), Ashgate Pub Co., Aldershot, UK.
- Eguchi, R.T., Houshmand, B., Huyck, C.K., Mansouri, B., Matsuoka, M., Shinozuka, M., Yamazaki, F., Ulgen, S. (2000), Using advanced technologies to conduct earthquake reconnaissance after the 1999 Marmara earthquake. In: Proc. 2nd Workshop on Advanced Technologies in Urban Earthquake Disaster Mitigation, DPRI, Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan.
- Fraser, C.S., Baltsavias, E., and Gruen, A. (2002), Processing of IKONOS imagery for submetre 3D positioning and building extraction, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 56, 177-194.
- Grünthal, G. (1998). European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, 15.
- Mueller, M., Segl, K. (2001). House detection in IKONOS data using region and edge based segmentation. In Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Science and Technology – Application of Digital Image Processing XXIV, volume 4472, pp.500-507.
- Mueller, M., Segl, K. (2002). Fuzzy information fusion for the extraction of urban features based on HRSC data, In: Proc. SPIE's 9th International Symposium on Remote Sensing - Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII, 4885, 152-161.
- Mueller, M., Segl, K., Heiden, U., Kaufmann, H. (2004). Potential of high-resolution satellite data in the context of vulnerability of buildings, Natural Hazards, in print.
- Roessner, S., Segl, K., Heiden, U., Kaufmann, H. (2001). Automated differentiation of urban surfaces based on airborne hyperspectral imagery, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(7), 1525-1532.
- Schwarz, J., Raschke, M., Maiwald, H. (2001). Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmöln/Ostthüringen (1): Erfassung und Bewertung des Bauwerksbestandes. Thesis-Heft 1/2 2001: Ingenieurseismologie und Erdbebeningenieurwesen, 180-199.
- Schwarz, J. Raschke, M., Gerstberger, A. (2003). Seismische Schadenspotentiale in deutschen Großstadträumen – Fallstudie Köln. In: Meskouris, K., Hinzen, K.-G. (Hrsg.) Schutz von Bauten gegen natürliche und technische Erschütterungen. DGEB-Publikation Nr. 11, 69-83.
- Toutin, Th., Chénier, R., Carbonneau, Y. (2002). 3D models for high resolution images: examples with QuickBird, IKONOS and EROS, In: Int. Archives of ISPRS Symposium, Comm. IV, Ottawa, Ontario, Canada, July 8-12, 2002, vol. 43, part 4, 547-551.
- Wetzel, H.-U., Franzke, H.J. (2001). Geologische Interpretation eines ERS-1 Radarmosaiks von Deutschland, In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (DGPF), 10, 503 –510.
- Wittig, R., Sukopp, H., Klausnitzer, B., Brande, A. (1998). Die ökologische Gliederung der Stadt, In: Sukopp, H. und Wittig, R. (Hrsg.) Stadtökologie (2. Edition), Kapitel 12, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 316-372.

4.10 Deutschlandweite GPS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von kontinuierlichen hochgenauen GPS-Beobachtungen

Sybille Göbell, Hans-Ulrich Wetzel und Christoph Reigber

*GeoForschungsZentrum Potsdam
Dept.1 Geodäsie und Fernerkundung
Email: goebell@gfz-potsdam.de*

TP C2: Deutschlandweite GPS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von kontinuierlichen hochgenauen GPS-Beobachtungen

4.10.1 Zusammenfassung

Mit modernen satellitengeodätischen Verfahren ist eine kontinuierliche und hochpräzise Deformationsüberwachung in dichten Netzen innerhalb kontinentaler Platten möglich. Die resultierenden Daten und Ergebnisse werden gegenwärtig evaluiert, um dem Bedarf einer verbesserten seismischen Gefährdungs- und Risikoeinschätzung deutschlandweit zu entsprechen. Dies gilt besonders für Regionen, in denen bei wachsender Verletzbarkeit der Gesellschaft Erdbeben zwar selten, aber dennoch nicht unwahrscheinlich sind. In diesem Beitrag dient das GPS der einheitlichen Erfassung und der kontinuierlichen Überwachung tektonischer Bruchelemente in Deutschland. Genutzt wird eine große Anzahl von Daten eines deutschlandweiten permanenten GPS-Stationsnetzes. Die Berechnung der Stationsgeschwindigkeiten mit Hilfe des GPS und des daraus resultierenden geodätischen Strains ermöglicht einen neuen Beitrag zur Erdbebengefährdungseinschätzung. Wesentliches Ziel des Vorhabens ist die Bereitstellung und Modellierung von zeitlich und räumlich hochauflösenden Deformationsdaten und die Erörterung des Nutzens für eine verbesserte Einschätzung der geologischen Gefährdung besonders in den tektonisch aktivsten Regionen Deutschlands wie Rheingraben, Schwäbische Alb, Alpenvorland und Vogtland. Gezeigt werden vorläufige Ergebnisse von einem Messzeitraum von zwei Jahren für derzeit ca. 140 deutsche GPS-Stationen. Dabei hat sich der Prozessierungszeitraum als zu kurz und die Stationsdichte noch als zu dünn erwiesen, um die Erdbebengefährdungseinschätzung zu unterstützen.

Abstract

Modern space geodetic techniques based on satellite technology enable deformation monitoring of continental plate interiors with high spatial and temporal coverage. Resolving data and results are currently evaluated for their application for the integrated assessment of seismic hazard and risk in Germany. This goes especially for regions where earthquakes are generally rare but high magnitudes are still not unrealistic while vulnerability of today's society is steadily growing. The present contribution deals with the uniform recording and continuous monitoring of tectonic fracture systems in Germany using the GPS. A large number of data is used from a permanent GPS station network in Germany. The calculation of the station velocities with the GPS and the resulting geodetic strain allows a new earthquake hazard assessment. The essential goal of this program is to provide and model highly precise deformation data and to discuss its needs for a better assessment of geological hazard, especially for the most active tectonic regions in Germany, the Rhine-Graben, the Swabian Alb, the Alpine foreland, and the Vogtland.

Here we present preliminary results from two years of measurements at currently about 140 GPS stations throughout Germany. The period of time for processing has been proven to be too short and the density of the station network to be not dense enough yet for supporting the earthquake hazard assessment.

4.10.2 Veranlassung und Problem

In Deutschland sind die rezenten tektonischen Bewegungen im Allgemeinen gering und die jährlichen NNW-SSE Einengungsraten liegen im Bereich von 1-3 mm. Dabei ist in vielen Fällen unklar, ob diese Bewegung weiträumig verteilt ist oder ob sie sich auf bestimmte Störungen konzentriert. Ferner besteht Klärungsbedarf, ob diese Bewegung im Bereich vollständig gekoppelter Störungszonen zu einem langfristigen Spannungsaufbau in der Kruste beiträgt, der dann durch seltene starke Erdbeben oder aber durch sogenannte Kriechprozesse abgebaut wird. Es ist auch möglich, dass die Spannungen vollständig in Kriechprozesse „umgewandelt“ werden, so dass gar kein langfristiger Spannungsaufbau stattfinden kann. Außerdem ist ungewiss, welche Anteile der momentanen Deformation anthropogen induzierte Bewegungen repräsentieren (z. B. Wasserentnahme oder Bergbau).

Trotz aller Unsicherheiten lässt sich mit Bestimmtheit sagen, dass die Verletzbarkeit der Gesellschaft insbesondere in Ballungsräumen hochtechnisierter Staaten ständig anwächst und somit ein immer größeres Potential geschaffen wird, das im schlimmsten Fall zerstört, zumindest aber stark beschädigt werden kann. Dies gilt besonders für Regionen, in denen starke Erdbeben selten aber nicht unmöglich sind, und somit auf eine unvorbereitete und damit hoch verletzbare Gesellschaft treffen.

Zudem mangelt es in Deutschland an einer synergetischen Erfassung und Bewertung des Risikos durch Erdbeben. Es gibt bisher keine einheitliche und flächendeckende Methode, tektonische Strukturen im Hinblick auf ihre Bewegungsraten und somit ihre Gefährdung für die angrenzenden Gebiete zu überwachen.

Abb. 1 zeigt die Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten. Die Erdbebengefährdung ist in Form berechneter Intensitätswerte für eine Nichtüberschreitenswahrscheinlichkeit von 90% in 50 Jahren dargestellt. Sofort erkennbar sind die hohe Gefährdung für den Rheingraben, insbesondere für die Gebiete um Köln und Aachen, sowie für die Schwäbische Alb, das Alpenvorland und das Vogtland. Zusätzlich ist die Karte mit den Epizentren tektonischer Beben untersetzt, worin die unterschiedlichen Gefährdungsstufen begründet sind.

Für das Territorium der Bundesrepublik Deutschland steht seit wenigen Jahren ein von den Landesvermessungsämtern der Bundesländer betriebenes dichtes Netz von permanenten GPS-Referenzstationen zur Verfügung, das für detaillierte Deformationsuntersuchungen nutzbar ist. Innerhalb des Clusters „Risikoanalyse Erdbeben“ ist TP C2 mit TP B1 „Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen“ verknüpft, wofür es neuartige Input-Daten liefert, die es bisher in dieser Form nicht gab.

4.10.3 Ziel

Wesentliche Ziele sind:

- Deutschlandweit einheitliche Erfassung und kontinuierliche Prozessierung von GPS-Daten,
- Bereitstellung von Ergebnissen eines möglichst dichten permanent registrierenden GPS-Netzes zur hochgenauen kontinuierlichen Erfassung momentaner Deformation und Bewegung,
- Überwachung der regionalen Deformation Deutschlands,

Earthquake Hazard of the D-A-CH Countries

(Germany, Austria, Switzerland)

with added epicentres of tectonic earthquakes

earthquake hazard in form of calculated values for a non-exceedence probability of 90% within 50 years

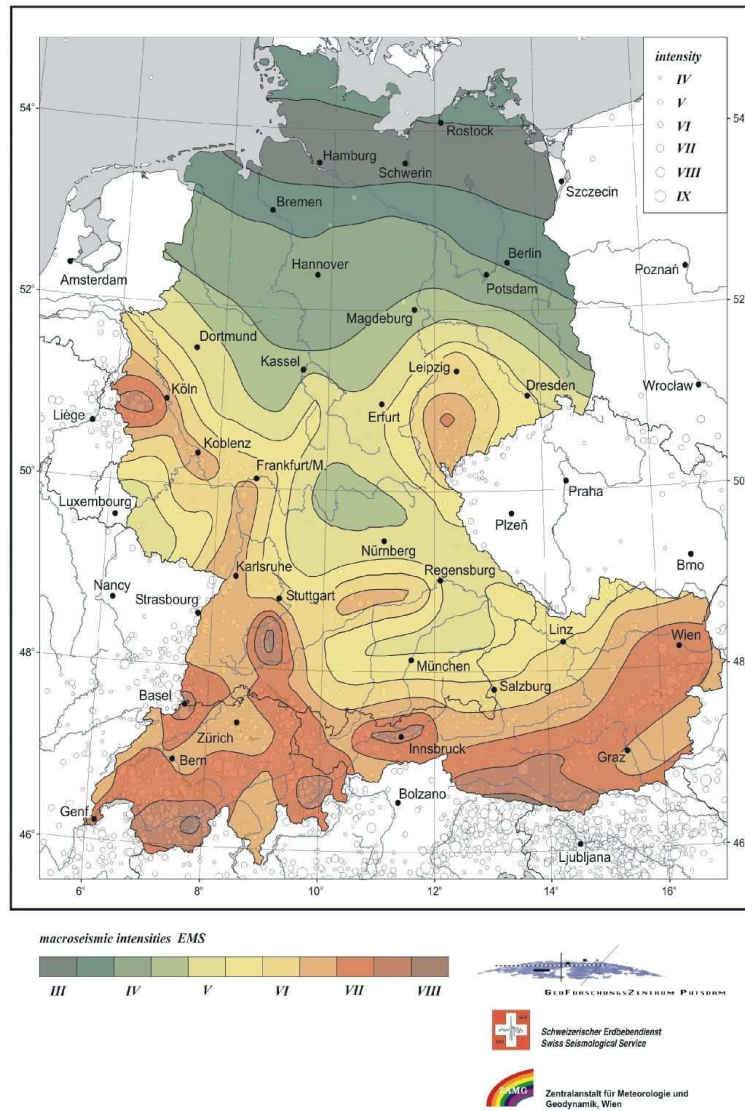


Abbildung 4.44: Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten (Grünthal et al, 1998)

- Überwachung der tektonisch aktiven Gebiete Deutschlands (Rheingraben, Schwäbische Alb, Alpenvorland und Vogtland),
- Interpretation der Ergebnisse unter Berücksichtigung moderner neotektonischer Verfahren einschließlich Fernerkundungsmethodik zur Ableitung bzw. besseren Einschätzung von seismisch aktiven Strukturen, seismischer Gefährdung und anthropogen induzierter Deformation und Gefährdung.

4.10.4 Methode

Zum Erreichen der genannten Ziele ist in erster Linie ein möglichst flächendeckendes und permanentes Stationsnetz von GPS-Empfängern nötig, deren Daten zentral zum GFZ übertragen und anschließend ausgewertet werden. Sowohl die Errichtung von Stationen, die vom GFZ betrieben werden, als auch der Aufbau und die Sicherstellung der Datenübertragung aller zur Verfügung stehenden GPS-Stationen war im Wesentlichen die Aufgabe von M. Ramatschi, GFZ. Des Weiteren ist die Durchführung von Strainberechnungen nötig, die unmittelbar einen Beitrag zur Erdbebengefährdungseinschätzung liefern. Die Prozessierung erfolgte mit der Software EPOS-P.V2 des GFZ Potsdam (Gendt, 1995).

GPS-Stationsnetz

Mit dem Global Positioning System (GPS) steht ein modernes Satellitennavigationssystem zur Verfügung (Hofmann-Wellenhopf et al 1994), das eine einheitliche, flächendeckende Erfassung von Deformationen erlaubt. Hierfür eignet sich insbesondere ein permanentes Stationsnetz aus GPS-Empfängern, wie z.B. das des Satelliten-Positionierungsservices (SAPOS) der Allgemeinen deutschen Vermessungsverwaltungen (AdV) der Länder. Das SAPOS-Stationsnetz besteht zur Zeit aus ca. 250 GPS-Stationen („planned“ in Abb. 4.45), das jährlich um einige Stationen erweitert wird. Routinemäßig werden gegenwärtig vom GFZ Daten von 120 SAPOS-Stationen genutzt (Abb. 4.45). Auch hier werden Daten von zunehmend mehr Stationen einbezogen. Einige der neuen Stationen wurden ab Mitte des Jahres 2001 verfügbar. Das GFZ hat ebenfalls ein Stationsnetz bestehend aus 24 GPS-Empfängern aufgebaut (Abb. 4.45). Auch diese Daten werden online zum GFZ übertragen. Die Daten des Gesamtnetzes werden analysiert und entsprechend den Anforderungen prozessiert. Ergebnisse der Prozessierung sind Stationskoordinaten und Stationsgeschwindigkei-

ten mit täglicher Auflösung. Aus Abb. 4.45 ist außerdem eine Anzahl von Stationen („other“) hauptsächlich in den Nachbarländern erkennbar, deren Daten dazu dienen, auch Grenzregionen besser bewerten zu können. Innerhalb Deutschlands haben diese Stationen andere Betreiber als SAPOS oder GFZ.

Berechnung des geodätischen und seismischen Strains

Bisher wurde die seismotektonische Information, also die der Beziehung zwischen seismischen Ereignissen und tektonischen Strukturen aus der Geologie und der Seismizität gewonnen. Dies ist ein mehr oder weniger statistisches Verfahren, nämlich die Abschätzung, wo aufgrund der aufgetretenen Erdbeben nach Stärke und Häufigkeit weitere auftreten könnten. Mit Hilfe des GPS ist es möglich, aus den horizontalen Stationsgeschwindigkeiten den geodätischen Strain zu berechnen und somit einen Beitrag zur Erdbebengefährdungseinschätzung für Deutschland zu liefern, der bisher auf dieser Basis nicht berechenbar war.

Zur expliziten Methodik der Strainberechnungen wird auf die Literatur verwiesen (Kostrov, 1974; Hanks et al, 1979). Für den vorliegenden Bericht hat D. Stromeyer, GFZ, die Berechnung der Strains durchgeführt, wobei die Abschätzung des geodätischen Strains auf einem Least-Squares Algorithmus nach Savage et al (2001) basiert. Für die ebenfalls von D. Stromeyer durchgeführte Berechnung des seismischen Strains wurden Daten eines Erdbebenkatalogs verwendet, der Momentmagnituden der letzten 300 Jahre enthält. Die Häufigkeitsverteilung wurde mit einer Gutenberg-Richter-Beziehung (Mitteilung von G. Grünthal, DFNK-TP B1, GFZ) abgeschätzt. Während der seismische Strain nur den Strain darstellt, der seismisch freigesetzt wurde (in Tab. 4.7 3.7×10^{-10}), beinhaltet der geodätische Strain zusätzlich den akkumulierten elastischen Strain. Die Differenz von seismischem und geodätischem Strain approximiert die anhaltende Strainakkumulation. Der aufgebaute

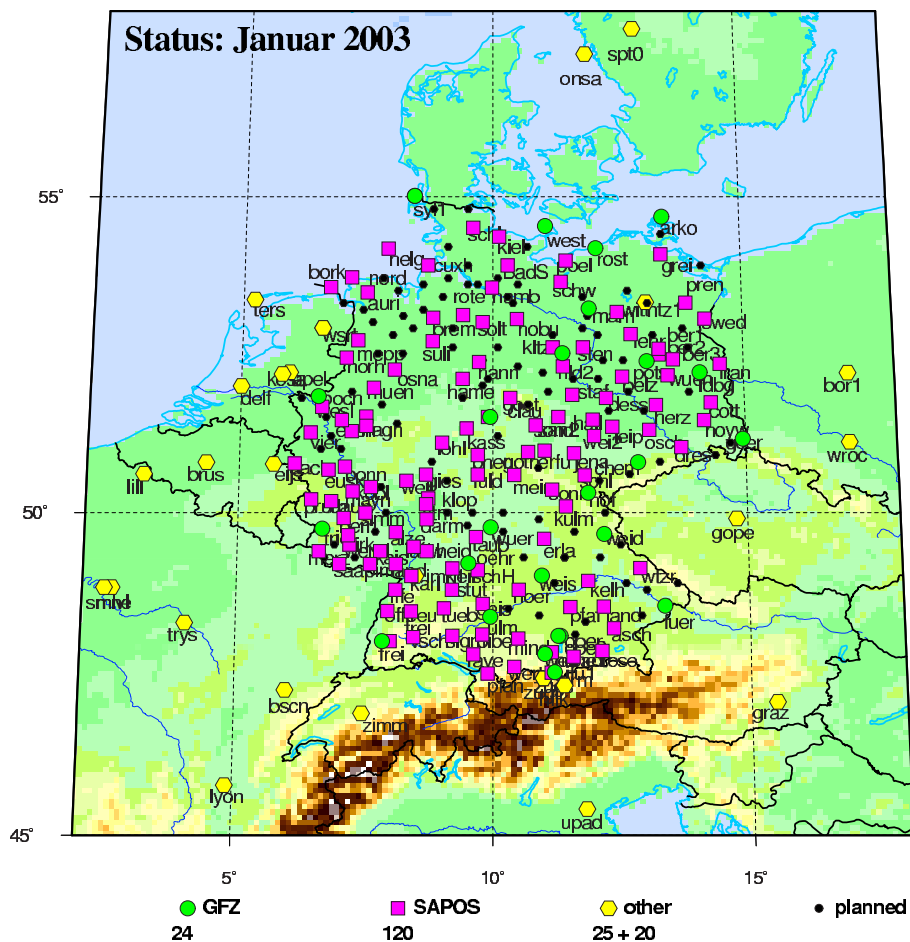


Abbildung 4.45: GPS-Netz in Deutschland

Strain könnte durch ein starkes Erdbeben oder durch Kriechprozesse abgebaut werden.

4.10.5 Ergebnisse und Diskussion

Die vorgelegten Ergebnisse sind vorläufig. Sie werden mit fortschreitender Zeit und Erweiterung des GPS-Stationsnetzes an Genauigkeit und damit an Relevanz für die Erdbebengefährdungseinschätzung gewinnen. Die wesentlichen Ergebnisse sind horizontale Geschwindigkeiten der GPS-Stationen, auf denen die Berechnung des geodätischen Strains basiert.

In Abb. 4.46 sind vorläufige horizontale Geschwindigkeiten einiger GPS-Stationen des Gesamtnetzes dargestellt. Seit Beginn des Jahres 2000 werden Daten für die meisten Stationen des GFZ prozessiert. Seitdem werden

schrittweise immer mehr Stationen, hauptsächlich aber die des SAPOS-Netzes, der Auswertung zugefügt. Die Daten von ca. 60 SAPOS-Stationen sind seit Anfang des Jahres 2001 sukzessive für die Prozessierung verfügbar. Die Datenübertragung für die restlichen 60 Stationen erfolgte hingegen erst seit Anfang des Jahres 2002, wobei die Gewinnung von Daten neuer Stationen über das ganze Jahr verteilt war, so dass seit Ende des Jahres 2002 Daten von 120 SAPOS-Stationen prozessiert werden. Der Zeitraum von nur einem Jahr ist zu kurz, um annähernd reale Geschwindigkeiten zu erhalten. Der Fehler der Geschwindigkeiten bewegt sich hierbei in Bereichen, die gegenüber den zu erwartenden Bewegungsraten um Größenordnungen zu groß sind. Deshalb sind in Abb. 4.46 nur die Geschwindigkeitsvektoren der Stationen gezeigt, deren Da-

ten über einen Zeitraum von mindestens einem Jahr prozessiert werden konnten.

Die Bewegungsdaten wurden in Bezug auf die NUVEL 1A Lösung (DeMets et al, 1990) für Eurasien berechnet. Sie stellen eine erste Näherung der derzeitigen Lösung dar. Zusätzlich sind wichtige Bruchzonen und Bruchelemente abgebildet. Für einige GPS-Stationen stimmt die Richtung der Stationsgeschwindigkeiten mit der Richtung der horizontalen Bewegungen der geologischen Interpretation überein. Die Beispiele Freiburg und Wettzell zeigen dies sehr deutlich. Für die meisten Stationen sind die Geschwindigkeiten jedoch nicht signifikant, da sie nur eine Genauigkeit von ± 2 mm aufweisen.

Es ist möglich, aus den horizontalen Stationsgeschwindigkeiten den geodätischen Strain zu berechnen. In Abb. 4.47 ist der mittlere geodätische Strain für das Gebiet des Niederrheingrabens (umrandet) dargestellt. Die dargestellten Richtungen von Kompression (compression) und Extension (extension) des geodätischen Strains stimmen annähernd mit denen des seismischen Strains überein (Tab. 4.7). Der Betrag der geodätischen Strainrate bzw. der skalaren geodätischen Momentenrate ist gegenüber den Beträgen für die seismische Strainrate jedoch eine Größenordnung zu groß.

Ergänzend muss erwähnt werden, dass die Stationsverteilung für die Ermittlung des geodätischen Strains sehr ungünstig ist. Wie erkennbar, mussten überwiegend Geschwindigkeiten von Stationen außerhalb des zu betrachtenden Gebiets herangezogen werden, da es innerhalb an Stationen mangelt. Bei optimaler Stationsverteilung wird eine sehr viel kleinere Differenz von seismischem und geodätischem Strain erwartet, womit die anhaltende Strainakkumulation approximiert werden kann. Für den Oberrheingraben und die Schwäbische Alb ist ebenfalls eine Strainberechnung denkbar, da die Seismizität recht hoch und der Erdbebenkatalog nahezu vollständig ist. Jedoch ist das GPS-Netz noch nicht

dicht genug und die Datenübertragung einiger Stationen begann erst kürzlich.

Der derzeit errechnete geodätische Strain ist noch um eine Größenordnung gegenüber dem seismischen Strain zu groß. Mit einem künftig weiter verdichteten Stationsnetz und höheren Genauigkeiten bei den Bewegungen aufgrund längerer Datenverfügbarkeiten wird es möglich sein, wesentlich zur Erdbebengefährdungseinschätzung beizutragen.

4.10.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Derzeit sind die Ergebnisse noch nicht praxisrelevant. Wenn die Prozessierung fortgeführt wird, kann in 2-3 Jahren mit abgesicherten Ergebnissen gerechnet werden. Diese lassen sich dann in die Praxis übertragen und konkret z.B. von geologischen Landesämtern oder seismologischen Einrichtungen nutzen. Voraussetzung für eine gesicherte Strainberechnung ist jedoch die Weiterführung der GPS-Auswertungen und die weitere Verdichtung des Messnetzes.

4.10.7 Offene Fragen

Eine offene Frage ist die weitere kostenfreie Verfügbarkeit der SAPOS-Daten und die Weiterfinanzierung der GPS-Auswertearbeiten nach Beendigung des DFNK-Vorhabens.

4.10.8 Literatur

DeMets, C., Gordon, R.G., Argus, D. F. und Stein, S. (1990): Current plate motion, *Geophys. J. Int.*, 101, 425-478.

Gendt, G., Dick, G., Reigber, Ch. (1995): Das IGS Analysezentrum am GFZ Potsdam: Verarbeitungssystem und Ergebnis, *ZfV*, Vol. 9, No. 120, September 1995, pp. 431-437.

Grünthal, G., Mayer-Rosa, D., Lenhardt, W. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung

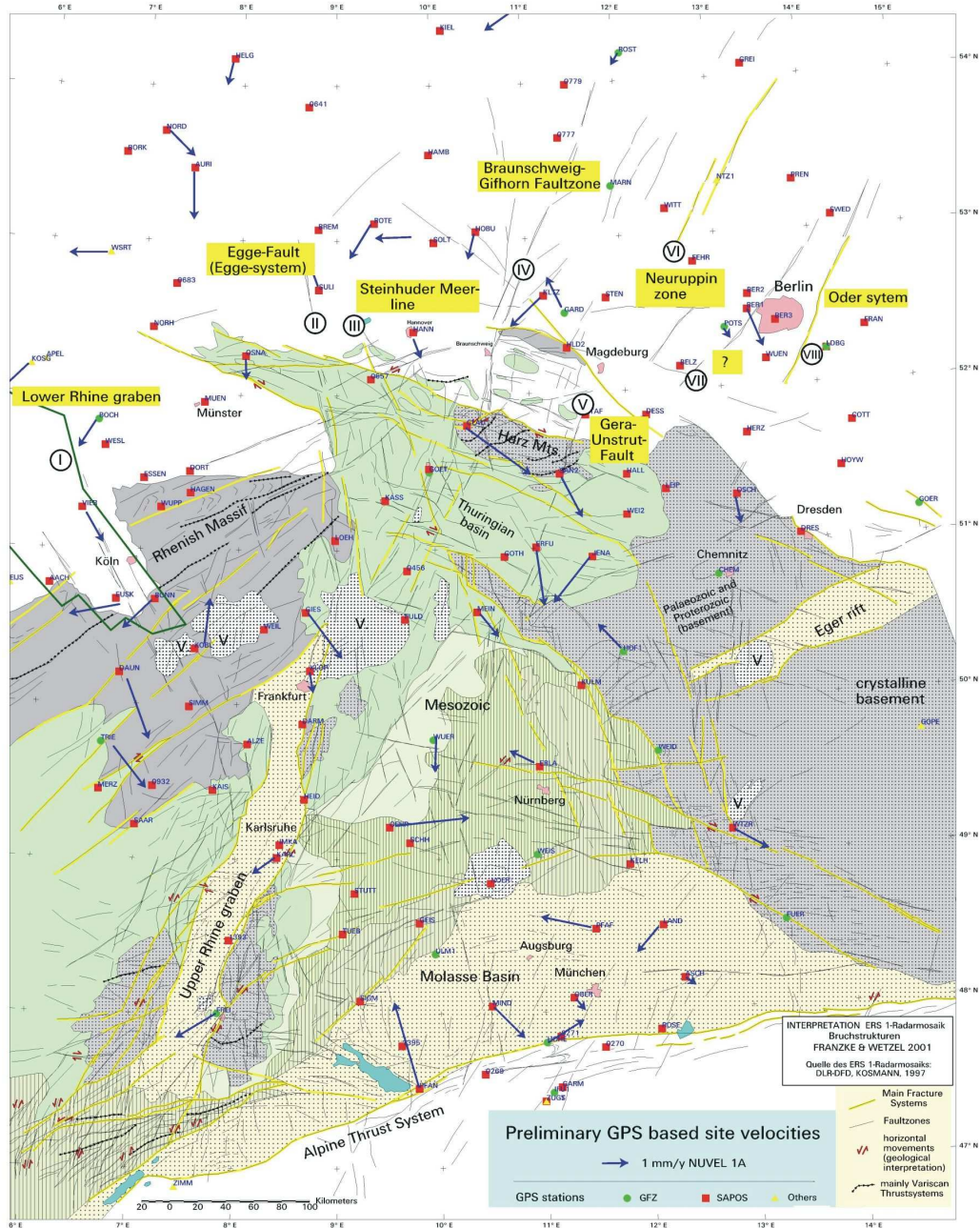


Abbildung 4.46: Vorläufige GPS-Stationsgeschwindigkeiten zur Erdbebengefährdungseinschätzung mittels Strainberechnung

für die D-A-CH Staaten Deutschland, Österreich, Schweiz. Bautechnik 75, Heft 10, Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

Hankemeier, P. (1996): Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung – SAPOS. 80, Deutscher Geodätentag in

Dresden. DVW-Schriftenreihe 24/96, pp. 182-191.

Hanks, T. und Kanamori, H. (1979): A moment magnitude scale, J. Geophys. Res., 84 (B5), 2348-2350.

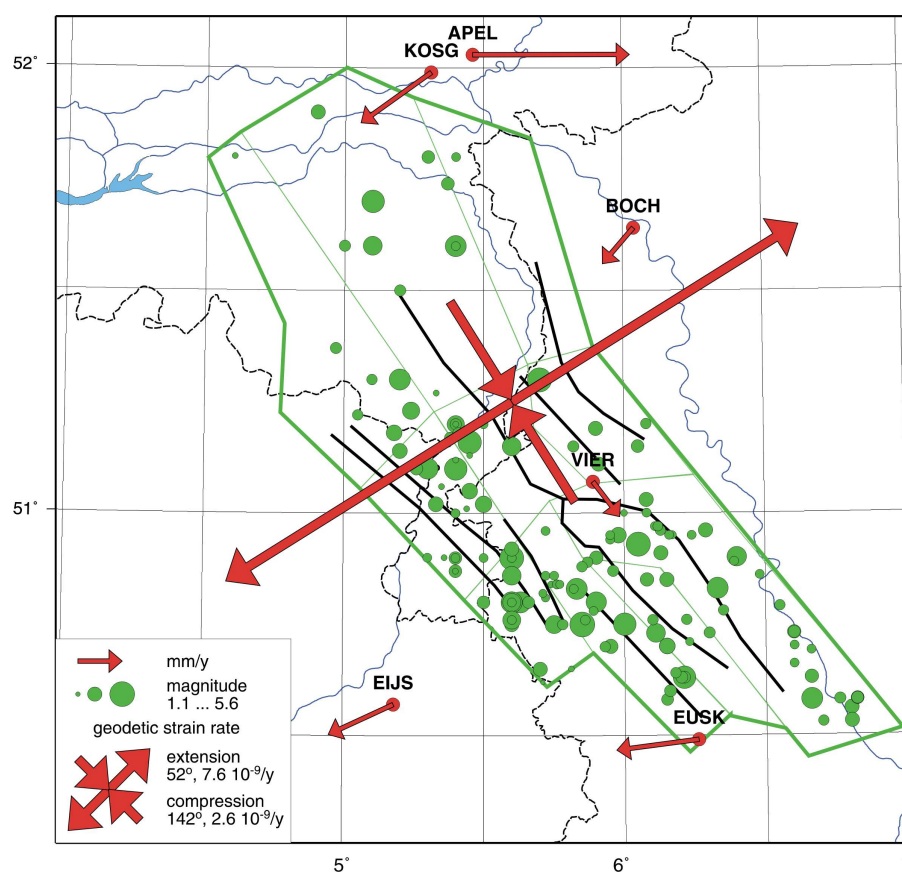


Abbildung 4.47: Geodätischer Strain für das Gebiet des Niederrheingrabens

<i>Geodätische Strainrate</i>	<i>Seismische Strainrate</i>
Kompression 2.6×10^{-9} /a, Azimuth 142°	Kompression 3.7×10^{-10} /a, Azimuth 134°
Extension 7.6×10^{-9} /a, Azimuth 52°	Extension 3.4×10^{-11} /a, Azimuth 44°
<i>Skalare geodätische Momentenrate</i>	<i>Skalare seismische Momentenrate</i>
$\dot{M}_{geod} = 1.14 \times 10^{17}$ Nm/a	$\dot{M}_s = 0.77 \times 10^{16}$ Nm/a

Tabelle 4.7: Geodätische und seismische Strainraten

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. und Collins, J. (1994): GPS Theory and Practice. Springer Verlag Wien-New York.

Kostrov, B. V. (1974): Seismic moment and energy of earthquakes and seismic flow of rock, Izv. Earth Phys., 1:23-40.

Savage, J. C., Gan, W. und Svarc, J. L. (2001): Strain accumulation and rotations in the eastern California shear zone, J. Geophys. Res. 106 (B10).

Kapitel 5

Cluster Simulationssystem Waldbrand

5.1 Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr

Johann G. Goldammer¹, Alexander C. Held¹, Marco Hille^{1,2}, Klaus-Peter Wittich³,
Ekkehart Kuehrt⁴, Nikos Koutsias¹, Dieter Oertel⁴, Kirsten Thonicke^{5,6} und Wolfgang Cramer⁵

¹ *Max-Planck-Institut für Chemie, Abteilung Biogeochemie
Arbeitsgruppe Feuerökologie / Global Fire Monitoring Center (GFMC)
c/o Universität Freiburg
Email: fire@fire.uni-freiburg.de*

² *Wageningen University, The Netherlands
Department of Environmental Sciences
Forest Ecology and Forest Management Group*

³ *Deutscher Wetterdienst (DWD)
Agrarmeteorologische Forschung*

⁴ *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
Institut für Planetenforschung*

⁵ *Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
Abteilung Natürliche Systeme*

⁶ *Max-Planck-Institut für Biogeochemie
Arbeitsgruppe Globale Ökologie*

TP A2: Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr

5.1.1 Zusammenfassung

Der Cluster "Simulationssystem Waldbrand" im DFNK erarbeitete ein Konzept für ein Informationssystem für die im Feuer-Management involvierten Stellen. Die erste Komponente des Vorhabens besteht aus einem Konzept für die Waldbrandmodellierung für operative bzw. operationelle Zwecke. Die erstellten bzw. abrufbaren Informationen umfassen (i) Frühwarnung vor Waldbrandgefahr, d.h. die potentielle Gefährdung durch Waldbrände auf Grundlage von Vorhersagen des DWD, (ii) Echtzeit-Feuer-Detektion über das Automatisierte Waldbrand-Früherkennungssystem des DLR, (iii) Hilfen zur Entscheidungsunterstützung durch Simulationsmodelle des potentiellen Feuerverhaltens (wie Feuerintensität, Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung etc.) durch Anpassung der Modelle BEHAVE und FARSITE. Zusätzlich wurden eine Reihe von Untersuchungen der ökologischen Auswirkungen von Feuer durchgeführt (Boden, Flora und Fauna). Der zweite Schwerpunkt befasste sich mit der Erweiterung des globalen Feuer-Informationssystems "Global Fire Monitoring Center"(GFMC) im Sinne eines internationalen Systems zur Entscheidungsunterstützung und Kooperation. Dabei wurden auch Instrumente der Unterstützung nationaler und internationaler Politik aufgebaut. Als Plattform diente die International Strategy for Disaster Reduction der Vereinten Nationen (UN ISDR).

Das Verbundvorhaben ermöglichte darüber hinaus, den Experimentalsatelliten BIRD (Bi-Spectral Infrared Detection) zu testen bzw. validieren, der für die Detektierung und Charakterisierung von Hochtemperaturereignissen (High-Temperature Events - HTE) gebaut wurde. BIRD stellte den ersten weltraumgestützten Sensor mit der Fähigkeit, tagsüber Feuer mit einer Ausbreitungsfläche von etwa $>15 \text{ m}^2$ zu lokalisieren und ihre Wärmeabstrahlung zu bestimmen. Diese Fähigkeit ist besonders wichtig für die Detektierung kleiner Feuer, d.h. beispielsweise entstehende Waldbrände, oder auch Waldbrände (Bodenfeuer) unter dem Kronendach. Während der DFNK-Waldbrandexperimente wurde auch der flugzeuggestützte Advanced BIRD Airborne Simulator (ABAS) eingesetzt, insbesondere vor dem Schuss von BIRD in den Orbit im Oktober 2001. Eine weitere Komponente des Clusters befasste sich mit den langfristigen Veränderungen der Waldbrandgefahr aufgrund von Änderungen des Klimas und der Bestandesstruktur (siehe Kapitel 5.2).

Abstract

The Cluster „Simulation system forest fire“ includes three major components. The first component consists of an innovative conceptual model for a fire information system and decision-support for early warning, monitoring, information management and simulation of wildfires in pine forests of Brandenburg State, Germany. The system includes the adaptation of established fire behaviour simulations models (BEHAVE, FARSITE) implemented by the Fire Ecology Research Group, a fire detection component (Automated Fire Detection System - AWFS) implemented by the German Aerospace Center (DLR) and a fire danger rating and forecast system implemented by the German Meteorological Service (DWD). The second component is a global fire information and decision-support system by the Global Fire Monitoring Center (GFMC) as a contribution to the United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN ISDR). The two first components provided an opportunity to test the advanced spaceborne Bi-Spectral Infrared Detection (BIRD) sensing system for the detection and characterization of high-temperature events (HTE). BIRD is the first space borne sensor that offers the capability to provide daytime detection of small fires with areas exceeding $\sim 15 \text{ m}^2$ and to estimate their radiative energy release. For fires with areas exceeding $\sim 0.15 \text{ ha}$, an estimation of the effective fire temperature and area is also feasible. This capability of BIRD is especially important for the detection of small fires. In addition, the high sensitivity of the BIRD IR sensor system might also allow the characterization of low intensity surface fires in forests (under canopy) which are difficult to be detected by other satellite systems. During the project's scientific forest fire experiment the Advanced BIRD Airborne Simulator (ABAS) was used to test the capabilities of this new spaceborne fire detection and characterization system before BIRD was launched to the orbit in October 2001. The third component investigated the effects of changes of climate and forest structure on the fire behaviour (see chapter 5.2).

5.1.2 Veranlassung und Problem

Zur Zeit der Konzipierung des DFNK bestanden nur rudimentäre Kapazitäten in der Forschung in Deutschland, die sich mit der Problematik des Waldbrand-Managements auseinander setzten. Während sich in den alten Bundesländern in der Nachkriegszeit nur

kleinere Forschungsvorhaben mit Teilaspekten von Waldbrand befassten (Verhütung, Bekämpfung, Ökologie), gab es in der DDR eine etwas umfassendere Forschungs- und Entwicklungstätigkeit, die nach der Wiedervereinigung weitestgehend eingestellt wurde. Einschlägige Forschung im außereuropäischen Ausland wurde aber von Deutschland sehr in-

tensiv betrieben, insbesondere in Hinblick auf ökologische, sozio-ökonomische und auch politische Fragestellungen durch die Freiburger Arbeitsgruppe Feuerökologie und im Kontext von globalen Fragestellungen (Auswirkung von Vegetationsbränden auf biogeochemische Kreisläufe, Atmosphäre und Klima) durch das Max-Planck-Institut für Chemie (Mainz). Mit der Vereinigung beider Einrichtungen im Jahr 1990 wurde die Forschung in interdisziplinären Projekten intensiviert, die sich aber ausschließlich mit den großen Naturräumen der Tropen und der borealen Zone befassen.

In Deutschland hatte nach den Großwaldbränden in Niedersachsen 1975-76 ein Schub von technischen Entwicklungen für eine Verbesserung der Ausstattungen von Forstverwaltungen (Funkwelle Forst) und Feuerwehren (geländegängige Fahrzeuge, Beschaffung von Löschmittel-Außenlastbehältern für Hub-schrauber) geführt. Auch andere Organisationen, die im Katastrophenschutz eingesetzt werden (THW, Bundeswehr, Bundesgrenzschutz), wurden an dieser Ausstattung bzw. deren Einsatz beteiligt. Die Entwicklung des Feuerlöschrüstsatzes für das Flächenflugzeug C-160 Transall wurde nicht umgesetzt. Es gibt keinerlei spezielle Ausbildung der im Feuer-Management beteiligten oben genannten Einrichtungen. Selbst die Feuerwehren werden nicht in Grundlagen der Waldbrandbekämpfung geschult! Die in der DDR aufgebauten Strukturen, geprägt durch effiziente Führung und Verwendung von Ressourcen aus anderen Sektoren (z.B. Einsatz von Agrarflugzeugen und landwirtschaftlichen Fahrzeugen zu Feuerbekämpfung), wurden nach der Wiedervereinigung systematisch abgebaut.

Der Cluster Waldbrand war so angelegt, dass konzeptionelle Ansätze aus dem internationalen Raum auf Deutschland projiziert werden sollten, mit besonderer Fokussierung auf Brandenburg, die am meisten waldbrandgefährdete Region in Deutschland.

Dieser große Nachholbedarf war für die Förderung dieses Clusters eine ausreichende Recht-

fertigung. Es wurde angestrebt, innerhalb des Clusters Synergien mit Institutionen und anderen Forschungsprojekten zu schaffen (Abb. 5.1). Eine konsequente Umsetzung sollte innerhalb des Clusters vergleichbare Netzwerkforschung aufbauen und damit die Intentionen des DFNK widerspiegeln.

5.1.3 Ziel

Das zentrale Ziel des Clusters lag in der Entwicklung eines Konzepts für ein Informationssystem im Bereich Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr für Einrichtungen, die für die Waldbrandbekämpfung zuständig sind. Hierbei wurde ursprünglich angestrebt, über das Medium Internet den Zugriff auf das gesamte Informationssystem zu ermöglichen, das periodisch (real time, near-real time, täglich, etc.), manuell oder automatisch aktualisiert wird. Dies wurde in dieser Form aber nicht für alle Komponenten des Informationssystems umgesetzt. Folgender Stand ergibt sich zum Ende des Projekts:

Frühwarnung vor Waldbrandgefahr

Die Frühwarnung erfolgt über Karten, die die regionale potentielle Gefährdung durch Waldbrände auf Grundlage von Vorhersagen des DWD aufzeigen (über das WWW abrufbar).

Echtzeit-Feuer-Monitoring

Das Monitoring erfolgt über einen Zugang zu dem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelten Automatisierten Waldbrand-Früherkennungssystem (AWFS), das nach einer Testphase auf Feuerwachtürmen im Bereich des Amtes für Forstwirtschaft Peitz/Brandenburg mittlerweile als ein kommerzielles Produkt FIREWATCH (IQ Wireless) in anderen Teilen Brandenburgs bzw. in anderen Bundesländern aufgebaut wird. Über das automatisierte System der

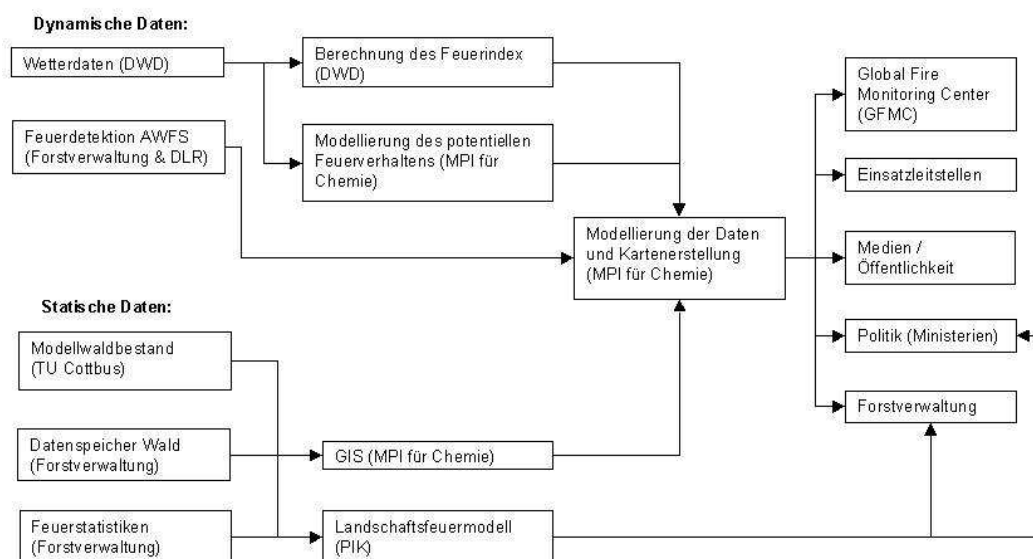


Abbildung 5.1: Vernetzung und Informationsfluss des Clusters Simulationssystem Waldbrand

Feuerdetektierung kann die genaue Lage eines entstehenden Feuers über das Auftreten von Rauchwolken ermittelt und visuell dargestellt werden. Die Begleitung der Entwicklung bzw. Validierung des Satelliten BIRD (Bi-Spectral Infrared Detection) konnte dazu beitragen, dass dieses weltraumgestützte System zur Entdeckung und Charakterisierung von Vegetationsbränden im internationalen Bereich als Innovation, und da es kein konkurrierendes System gibt konzeptionell als Kandidat für ein operatives System angesehen wird. Durch die Entscheidung des DLR, die beiden an der Entwicklung von BIRD federführend beteiligten Abteilungen mit Wirkung vom 1.9.2003 zu schließen, ist die Umsetzung dieser Vorarbeit in ein operatives System allerdings gefährdet.

Modelle zur Entscheidungsunterstützung

Durch die Anwendung der U.S. Softwarepakete BEHAVE und FARSITE wird das potentielle Feuerverhalten (Intensität, Ausbreitungsgeschwindigkeit und -richtung etc.) bei unterschiedlichen Wetterbedingungen simuliert. Die ursprünglich angedachte Idee, ein interaktives Modellierungspaket auf dem Internet

anzubieten, wurde aber fallengelassen, da es nicht angemessen erschien, diese Modellierungsmöglichkeiten für Jedermann anzubieten. Hinzu kommt, dass das abgeschlossene Projekt nur eine modellhafte Lösung anbietet, die ohne eine spezielle Waldkartierung nicht flächendeckend angewendet werden kann.

Langfristige Modellierung der Waldbrandgefahr

Durch das PIK wurden langfristige Analysen der Auswirkungen sowohl möglicher Klimawandel als auch Waldzustandsänderungen auf die Feuergefährdung in Brandenburg und deren Rückkopplungseffekte auf die Vegetationsdynamik und -struktur (Wachstumsraten und Artensammensetzung) im Rahmen von Simulationsstudien in der Zeitskala von Jahren bis Jahrzehnten durchgeführt (siehe Kapitel 5.2).

Internationales Umfeld

Die Weiterentwicklung des Global Fire Monitoring Center (GFMC) ermöglichte den Anschluss eines nationalen Forschungs- und Entwicklungsvorhabens an internationale Anfor-

derungen (Monitoring, Frühwarnung, Dokumentation, Interpretation von Vegetationsbränden). Die Unterstützung nationaler und internationaler "policies" erfolgt vor allem über die "Working Group on Wildland Fire"(UN-ISDR Inter-Agency Task Force for Disaster Reduction), die vom GFMC koordiniert wird. Das GFMC ist auf dem Internet frei zugänglich und wird routinemäßig alle zwei Tage – bei Krisensituationen täglich – per Update aktualisiert und archiviert. Zur Zeit dieser Berichterstattung umfasst das GFMC-System 107.000 files.

Das Global Fire Monitoring Center (GFMC) wurde im Jahr 1998 mit einer Starthilfe des Auswärtigen Amtes, Arbeitsstab Humanitäre Hilfe, an der Arbeitsgruppe Feuerökologie, Max-Planck-Institut für Chemie, aufgebaut. Im Rahmen DFNK wurde das GFMC als ein Beitrag Deutschlands bzw. der Wissenschaft an die UN International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) weiterentwickelt. Das GFMC erstellt auf Grundlage eines globalen Netzwerkes von Informations-Providern u.a.:

- Regelmäßige Lagebilder und Interpretationen über das Auftreten von Wald- und anderen Vegetationsbränden weltweit
- Globale, regionale und nationale Ausgabe von Frühwarnung von Feuergefahr
- Wissenschaftlich-technische Unterstützung bei Identifizierung und Umgang mit Problemfeuern bzw. Anwendung von Feuer im Sinne nachhaltiger Entwicklung
- Informations-Management (Archiv, Informationsvermittlung)
- Politikberatung, insbesondere mit den Vereinten Nationen

Das GFMC hat dabei vor allem innerhalb der ISDR die Aufgabe der Koordination der Arbeitsgruppe *Wildland Fire* übernommen, in der eine globale interdisziplinäre und intersektorale Plattform im UN-System zur Reduzierung der negativen Auswirkungen von Wald-

bränden und anderen Vegetationsfeuern aufgebaut wird. Das GFMC stimmt den Informationsfluss bei internationalen Hilfeleistungen bei Feuerkatastrophen zusammen mit dem Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (UN-OCHA) ab.

5.1.4 Ergebnisse und Diskussion

Waldbrandmodellierung

Der vom DFNK-Cluster Waldbrand entwickelte Prototyp eines Waldbrand-Informationssystems für Brandenburg sah vor, die für spezifische lokale Bedingungen erforderlichen Informationen zusammenzustellen, mit Hilfe derer Entscheidungen bei einem Großwaldbrand unterstützt werden können. Hierbei spielen Kenntnis und Verknüpfung der Parameter Topographie, Eigenschaften des Brennmaterials (Menge, räumliche Anordnung, Austrocknungsgrad, etc.) und Wetter eine zentrale Rolle.

Die Arbeiten im Cluster Waldbrand haben gezeigt, dass es trotz der ersten größeren Waldbrandexperimente in Deutschland (Abb. 5.2, 5.3) Schwierigkeiten gab, ausreichende Datengrundlagen zu erheben. Es ist technisch und sicherheitstechnisch genauso schwierig, ein echtes Validierungs-Experiment durchzuführen, wie in Hinblick auf die rechtlichen (Erlangung von Genehmigungen) und psychologischen Probleme (Zurückhaltung der Behörden, Vermittlung an die Öffentlichkeit).

Daher ist ein vergleichsweise kurzer Zeitraum von drei Jahren nicht ausreichend, umfassende Simulationsmodelle zu erstellen, die beispielsweise in Nordamerika einen Forschungsaufwand von Hunderten von Personenjahren erfordert haben; die Forschung in Deutschland muss daher auch auf diesen Arbeiten aufbauen.

In einem weiterführenden Forschungsprojekt sollte der Prototyp des Waldbrandinformationssystems erweitert werden. Dabei spielt die meteorologische Waldbrandforschung eine



Abbildung 5.2: Ansicht des ersten DFNK-Waldbrandexperiments in der Lausitz (August 2001). Hier baut sich ein Bodenfeuer in einem jungen Kiefernbestand als Kronenfeuer auf.

entscheidende Rolle. Erstrebenswert ist ebenfalls eine Koppelung mit dem automatisierten Waldbrand-Früherkennungssystem.

Prognose der witterungsbedingten Waldbrandgefahr

Der vom DWD während der Waldbrandsaison täglich auf dem Internet veröffentlichte Waldbrandgefahrenindex ist ein Indikator, der gleitend in Tagesschritten die witterungsbedingte nachmittägliche Waldbrandgefährdung diagnostiziert bzw. prognostiziert. Ein Defizit aller gängigen operativen Warnsysteme und auch des DWD-Indexes besteht darin, dass die Tagesperiodik der Gefährdung nicht erkennbar ist. Es sollen deshalb Arbeiten fortgesetzt und ergänzt werden, die darauf abzielen, die Gefährdung im Tagesverlauf (Stundenauflösung) zu quantifizieren. Grundlage des neuen Indexsystems ist ein bereits entwickeltes

Streufeuchtemodell, das die Zündfähigkeit der Streu in Abhängigkeit von dessen Wassergehalt formuliert. Dieses Modell bedarf weiterer Validierung (Streufeuchtemessungen) und physikalischer Verfeinerung, wobei zur praxisgerechten Überprüfung auch Waldbrandexperimente notwendig sind.

Die operationell zu betreibende stündliche Einstufung der Waldbrandgefahr in Gefahrenklassen (*fire danger rating*) soll ergänzt werden durch ein breiteres Hintergrundwissen und Verständnis der Wechselwirkung zwischen Feuerdynamik und Atmosphäre. Hierzu ist es notwendig, ein mesoskaliges Modell zu entwickeln, welches die Feuer- und Atmosphärenphysik dreidimensional miteinander verzahnt, um etwa Feuerlinienstrukturen im gegliederten Gelände, die atmosphärischen Querkirkulationen und konvektive Strukturen (Rauchsäulen, Ausbreitung von Luftbeimengungen) zu beschreiben. Die Validierung des



Abbildung 5.3: Ansicht eines weiteren DFNK-Waldbrandexperimentes in der Lausitz (August 2002). Es handelt sich hierbei um eine typische Heidefläche mit eingestreuten Birken, in dem sich Feuer hoher Intensität und rascher Ausbreitungsgeschwindigkeit entwickeln können.

Modells geschieht über Waldbrandexperimente.

Die theoretische Beschreibung des Wassergehaltes von Streuauflagen und kleinen Ästen greift auf verschiedene hydrologische Parameter zurück, deren Zuverlässigkeit – bezogen auf die in Deutschland vorkommenden Brennmaterialklassen – recht unsicher ist. Fragen, wie viel Wasser eine Streuschicht definierter Mächtigkeit und Porosität interzipieren und absorbieren kann, welche Absorptionsgeschwindigkeiten auftreten können und wie die Transportwiderstände des Wasserdampfaustausches mit der Atmosphäre (Adsorptions- und Desorptionsvorgänge) exakt zu formulieren sind, sind bisher nicht umfassend beantwortet. Ziel sollte deshalb sein, (i) das in Deutschland bisher erworbene Grundwissen diesbezüglicher hydrologischer Vorgänge zu vertiefen, und (ii) exakte Parameter für die Modellierung bereitzustellen.

Einsatz eines automatisierten Waldbrand-Früherkennungssystems in Brandenburg

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Hauptforderung nach zuverlässiger Rauchdetektierung erfüllt wird. Auch während der Feuerexperimente im Rahmen des DFNK-Forschungsvorhabens konnte AWFS seine Zuverlässigkeit nachweisen. Mittlerweile ist AWFS (Abb. 5.6, 5.7) erfolgreich der Industrie übergeben und wird als FIREWATCH von der Firma IQ Wireless in Deutschland und international vermarktet.

Satellit BIRD

BIRD (Bi-Spectral Infrared Detection) und dessen flugzeuggestützter Simulator Advanced BIRD Airborne Simulator (ABAS) wurden nicht nur anlässlich der DFNK-Feuerexperimente in der Lausitz, Brandenburg, in den Jahren 2001 und 2003

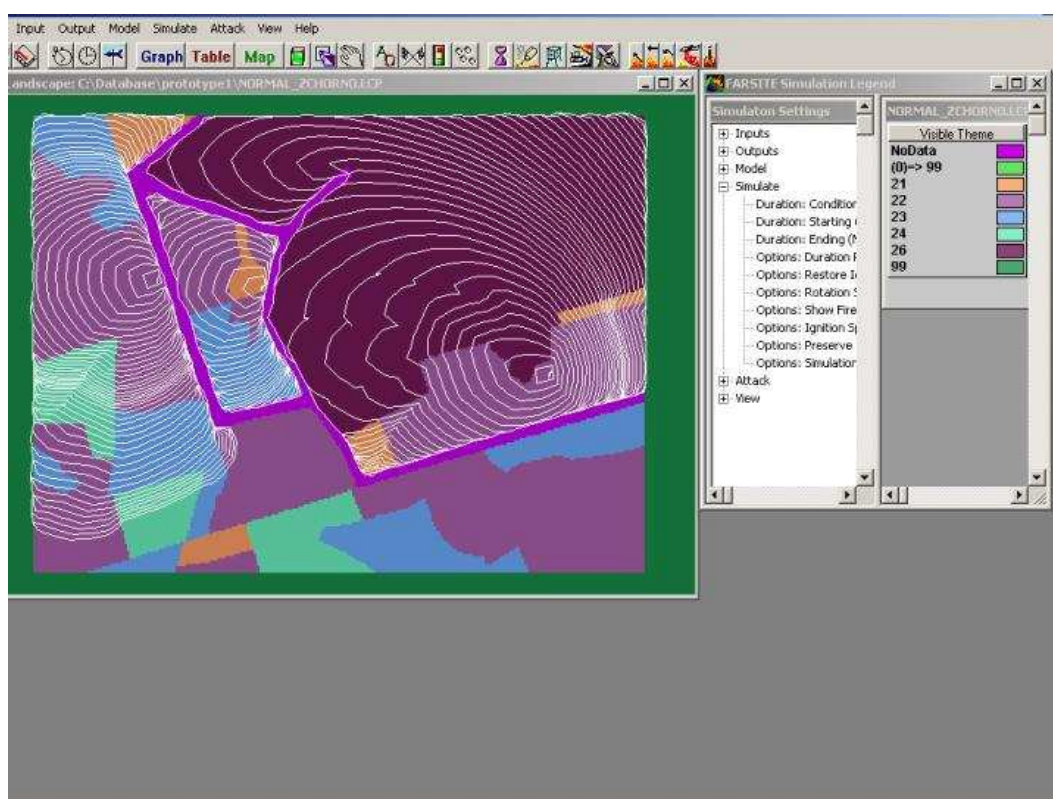


Abbildung 5.4: Simulation eines Waldbrandes im Forstrevier Zschorno (Lausitz, Brandenburg) unter trocken-heißen Wetterbedingungen (simulierte Lufttemperatur 32°C, Ostwind 35-55 km/h in Böen, relative Luftfeuchtigkeit unter 20%). Das Feuer ist im rechten Teil des Simulationsfensters auf einer Heidefläche entstanden und ist – vom Ostwind getrieben – in der Lage, zwei Brandschneisen, die in N-S-Richtung verlaufen, zu überspringen und sich in den Wald auszubreiten. Die Brandschneise südlich des Brandherdes hält hingegen das Feuer auf. Bei flächendeckender Einführung eines solchen Simulationssystems, die eine ebenfalls flächendeckende Kartierung der Vegetation erforderlich macht, und bei Verfügbarkeit von lokalen Wetterdaten können der Verlauf eines Großwaldbrandes simuliert und die Löschkräfte gezielt eingesetzt werden.

getestet bzw. validiert. Es gab eine Reihe von operativen Einsätzen von BIRD weltweit, u.a. während der zwei extremen Feuer-Episoden in Australien 2002-2003 und in Portugal 2003. Die BIRD-Produkte wurden vor allem über das GFMC an die entsprechenden operativen Akteure in den Ländern weitergereicht und wurden nachweislich genutzt. Weitere gemeinsame Validierungsprojekte wurden in Nord- und Südamerika, Afrika und Südostasien durchgeführt. Die Zukunft des BIRD-Konzepts ist derzeit allerdings gefährdet.

Global Fire Monitoring

Um die vom Global Fire Monitoring Center (GFMC) gelieferten Leistungen im Bereich der Frühwarnung, Überwachung und des Informationsmanagements von Vegetationsbränden aufbringen zu können, musste ein weltweites System für Informationsflüsse und Informationsverarbeitung aufgebaut werden. Bei der regelmäßigen Erstellung eines globalen Lagebildes (alle zwei Tage bzw. tägliche Lagen im Fall von Feuerereignissen von besonderer Signifikanz) müssen sehr unterschiedliche Quellen ausgewertet werden. Beispiels-

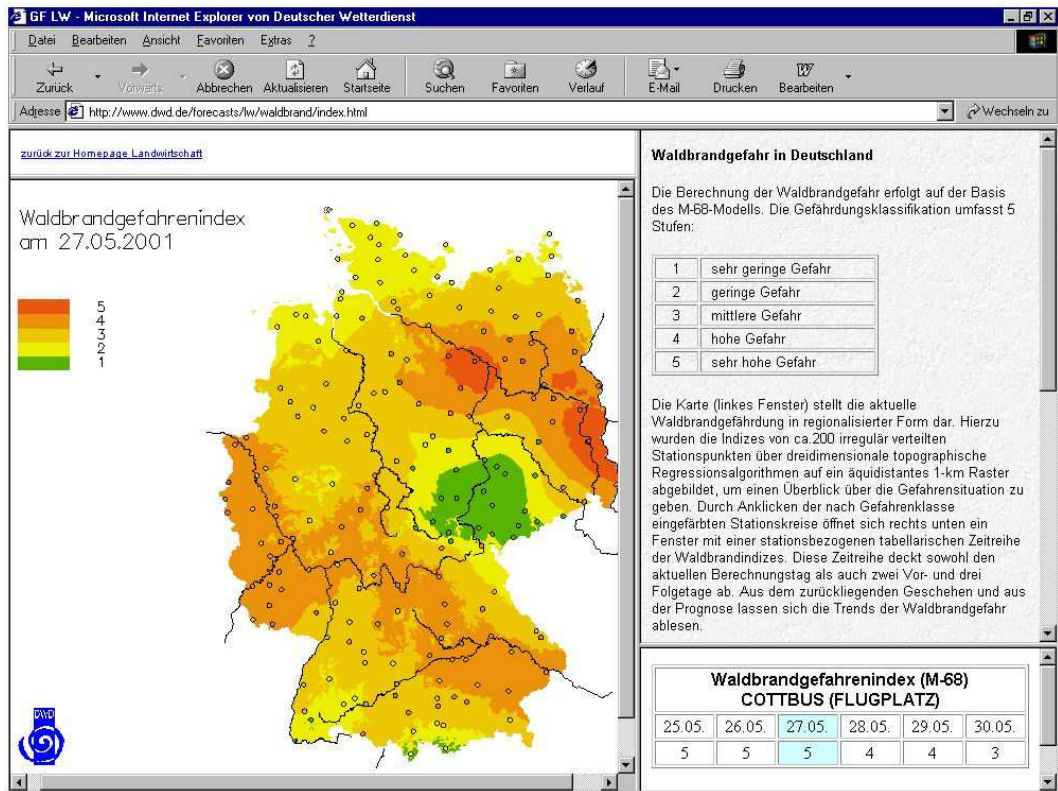


Abbildung 5.5: Beispiel des Waldbrandgefahren-Indexes des DWD (27. Mai 2003), der während der Feuersaison täglich auf dem Internet zur Verfügung gestellt wird. Das System erlaubt eine detaillierte Vorhersage des Indexes in den Bundesländern. Im rechten unteren Teil des „Screenshots“ ist das Beispiel von Cottbus (Brandenburg) vom gleichen Tag gezeigt. Dort erscheint neben dem aktuellen Index die Vorhersage für die nächsten drei Tage und retrospektiv für die vergangenen beiden Tage.

weise erfolgen so genannte *downloads* (Herunterladen von regelmäßig erstellten Produkten aus Servern bzw. Web-Seiten) halbautomatisch, d.h. sie müssen manuell initiiert und ggf. eingebaut werden. Dieses im Verlauf des Jahres 2002 eingerichtete Verfahren erwies sich als zeitsparend. Dennoch muss eine große Zahl von GFMC-Produkten manuell generiert werden, beispielsweise das gezielte Heraussuchen von Satellitenszenen oder schriftliche Berichte und Analysen.

Ein Beispiel für die Verknüpfung des GFMC mit einem DFNK-Partner ist die Verwendung von BIRD-Produkten bei der Lageanalyse von Großwaldbränden. So konnten beispielsweise während der Buschbrände der vergangenen zwei Jahre in Australien oder in Portugal

im Sommer 2003 Lagebilder mit bislang nicht gelieferten Informationsgehalten erstellt werden. Hierbei ergab sich auch eine Anknüpfung an das Gemeinsame Melde- und Lagezentrum (GMLZ) der Bundesrepublik.

Insgesamt hat das GFMC bis Anfang September 2003 mehr als 107.000 files in 2200 Ordnern zum Thema Vegetationsbrände in das Internet gestellt, die jederzeit abrufbar sind.

In Hinblick auf die Umsetzung strategischer Entscheidungen im Umfeld nationaler bis internationaler Politik (und *policies*) steht das GFMC im Mittelpunkt einer Reihe von internationalen und bilateralen Entwicklungen. Nach der Aufnahme der Arbeit der vom GFMC koordinierten *Working Group on Wild-*

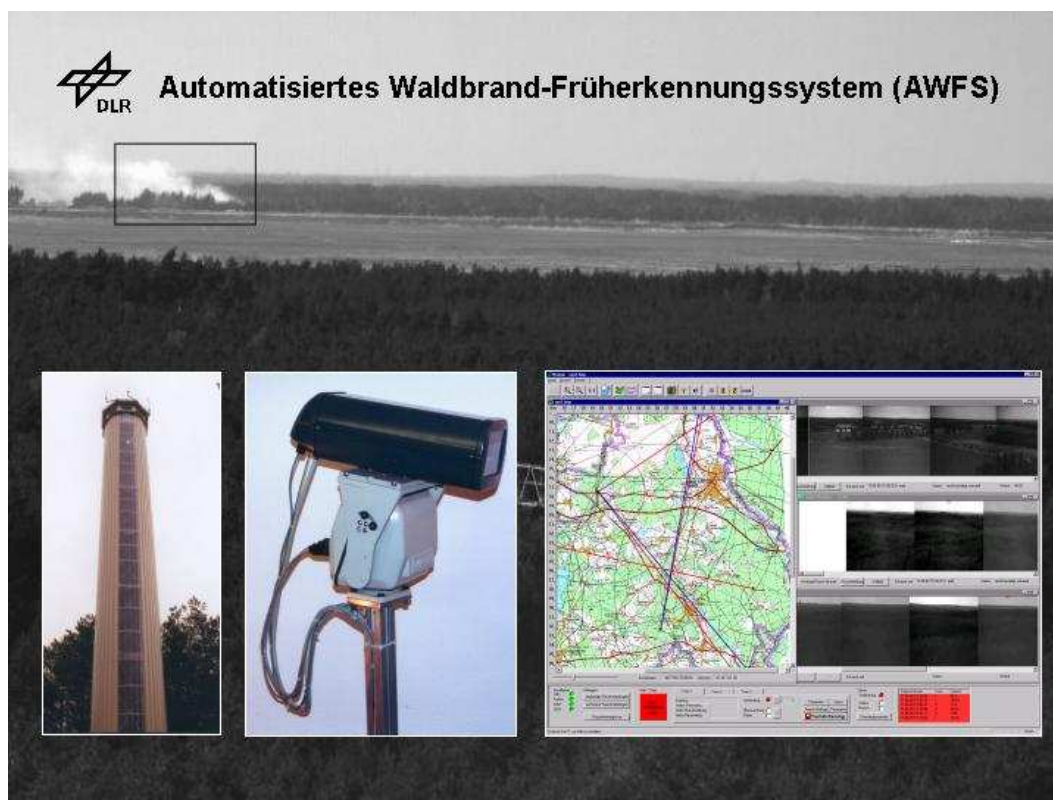


Abbildung 5.6: AWFS/FIREWATCH im Einsatz in Brandenburg. Das Hintergrundbild zeigt eine Bildwiedergabe eines entdeckten Feuers. Unten sind (v.l.n.r.) ein Turm, die Kamera und ein Screenshot des automatischen Lokalisierungssystems dargestellt.

land Fire der UN International Strategy for Disaster Reduction (ISDR) wurde im Jahr 2002 mit dem systematischen Aufbau des *Global Wildland Fire Network* begonnen.

5.1.5 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Waldbrandmodellierung

Das Forschungsprojekt hat die Prinzipien aufgezeigt, die für den Aufbau eines flächendeckenden Waldbrandinformationssystems notwendig sind. Wenn auch die am meisten feuergefährdeten Waldbestände in Deutschland – z.B. die Kiefernwälder Brandenburgs – in den verschiedenen Altersklassen relativ einfach strukturiert sind und daher Richtlinien zur Klassifizierung des Brennmaterials vergleichsweise einfach zu erstellen sind, so erfordert

eine flächendeckende Kartierung doch einen erheblichen Aufwand. Dies erscheint problematisch im Hinblick auf die Neuorganisation der Forstwirtschaft, die insbesondere in Brandenburg einen Abbau der Forstverwaltung und eine Privatisierung von den sich derzeit noch im Besitz der öffentlichen Hand befindenden Waldflächen vorsieht.

Automatisiertes Waldbrand-Früherkennungssystem

Das vom DLR zu Anwendungsreife entwickelte Automatisierte Waldbrand-Früherkennungssystem hat bereits den Übergang in die Anwendung geschafft. Seit 2002 vertreibt die Firma IQ Wireless das ehemalige AWFS als FIREWATCH kommerziell im In- und Ausland. Tatsächlich sind in Anbetracht hoher Lohnkosten für bemannte

Waldbrand-



Abbildung 5.7: Installation des Systems FIREWATCH in Brandenburg.

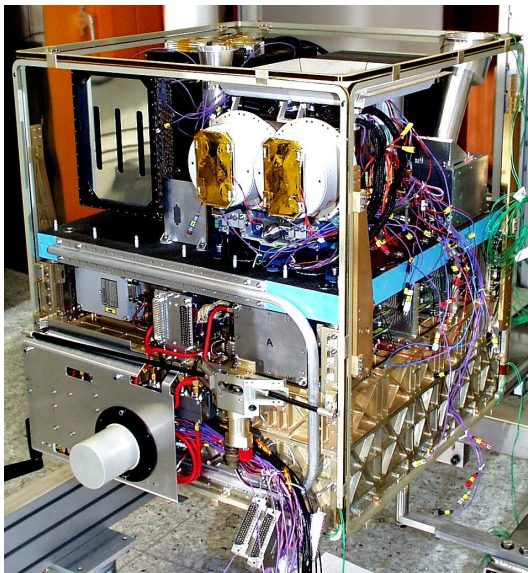


Abbildung 5.8: Struktur-mechanisches Modell des BIRD, der im Oktober 2001 mit einer indischen Rakete in den Orbit geschossen wurde.

Feuerwachtürme und der schwierigen Arbeitsbedingungen auf den Türmen diese alten

Feuerentdeckungsmethoden nicht mehr zu halten. Die Nachfrage nach dem System ist im In- und Ausland daher sehr groß.

Die Möglichkeit, das System FIREWATCH mit einem automatisierten Waldbrandmodell zu verknüpfen, stellt wiederum eine realistische Zielsetzung für den Technologietransfer dar. Die automatisierte Feuerentdeckung muss mit vor Ort generierten Wetterdaten verknüpft werden und das Feuerausbreitungsmodell starten. IQ Wireless und die Arbeitsgruppe Feuerökologie stehen hierzu im Gespräch.

Satellit BIRD

Die Situation bei BIRD ist trotz des vielversprechenden innovativen Ansatzes gefährdet. Der Grund hierzu ist der Beschluss des DLR, zwei Abteilungen (IR Instrumente und Systemtechnik) zum 31. August 2003 zu schließen, die entscheidend bei der Entwicklung des Satelliten BIRD beteiligt waren. Die von BIRD gelieferten Produkte hatten wohl seit 2002 bei Wald- und anderen Vegetationsbränden in Australien, Brasilien, Indonesien, Afrika und kürzlich auch in Portugal und Kanada gezeigt, dass das System eine kritische Lücke zwischen der flugzeuggestützten Aufklärung und den bislang international genutzten weltraumgestützten Sensoren schließt. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von BIRD und sogar die Nutzung von BIRD bei der Lageeinschätzung und operativen Planung bei Großwaldbränden – zuletzt in Portugal im Sommer 2003 – war wegweisend. Dieser Beschluss der DLR ignoriert auch, dass die in Berlin-Adlershof entwickelte Technologie einen Durchbruch geschafft hat, der internationale Gremien wie GOF-C-GOLD und die Vereinten Nationen oder auch Raumfahrtagenturen wie die ESA und die NASA in einem Maß interessiert hat, dass das System BIRD weit vorn in internationalen Empfehlungen und Strategieentwicklungen platziert hat. Es sind darüber hinaus auch Verpflichtungen entstanden, wie beispielsweise BIRD im FUEGOSAT gegenüber der ESA, die von einer nachhalti-

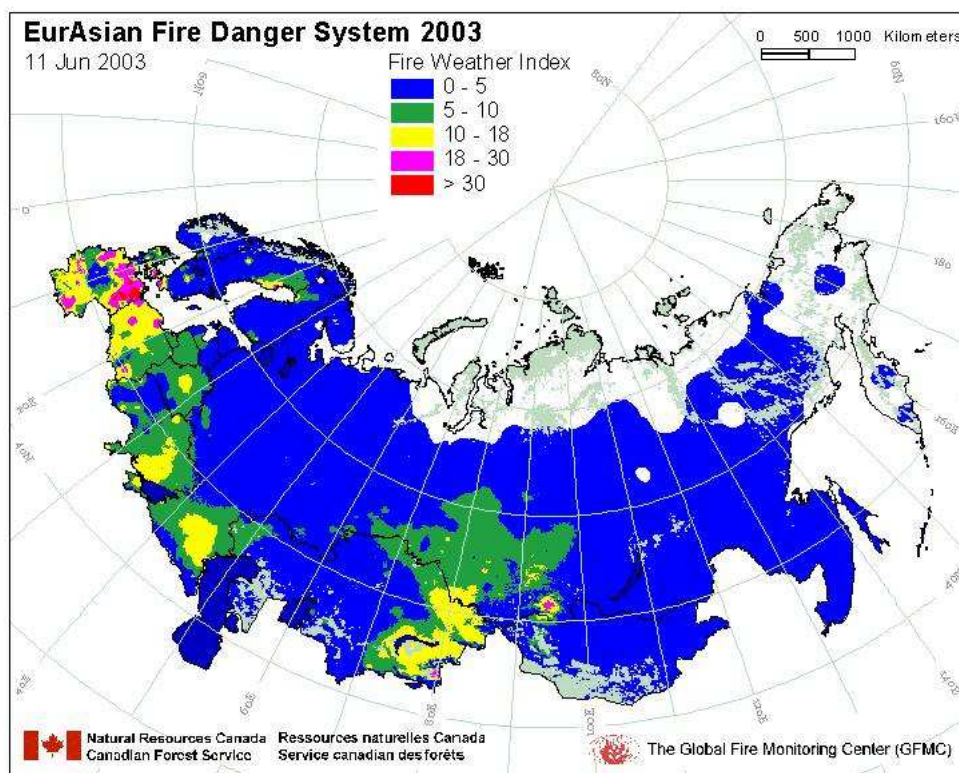


Abbildung 5.9: Beispiel des Waldbrandgefahren-Indexes für Eurasien (11. Juni 2003). Dieser Index wird während der Feuersaison täglich auf die GFMC-Website (tägliche Lage für die Russische Föderation) gestellt.

gen Weiterentwicklung von BIRD ausgegangen sind.

Der Übergang von einem Experimentalsatelliten oder Prototypen in ein operationelles System zur weltweiten Abdeckung ist überfällig, und die internationale Gemeinschaft wartet auf eine Weiterentwicklung von BIRD.

Der Leiter des DFNK-Clusters Waldbrand hat daher am 5. September 2003 einen Brief an den Vorsitzenden des DLR-Vorstands geschickt, mit der eindringlichen Aufforderung, sich für eine Revision des Beschlusses einzusetzen.

Dabei wurde unterstrichen, dass BIRD für das vom BMBF geförderte Deutsche Forschungsnetz Naturkatastrophen eine zentrale Rolle gespielt hat und dass erheblicher Aufwand betrie-

ben wurde, um BIRD – wie auch AWFS – mit terrestrischer Forschung zu begleiten, mit dem Ziel, die Systeme zur Marktreife zu bringen.

Global Fire Monitoring

Die Praxisrelevanz des GFMC ist auf internationaler Ebene unumstritten, da die "Produkte" des GFMC, das sich als eine Schnittstelle zwischen Wissenschaft und Anwendung – einschließlich Politik – versteht, verbindlich in internationale Prozesse eingebunden sind.

In Deutschland hat sich anlässlich der umfangreichen und katastrophalen Waldbrände in Südeuropa im Sommer 2003 auch ein neues Interesse an der Arbeit des GFMC ergeben. Sowohl im europäischen als auch im bi-

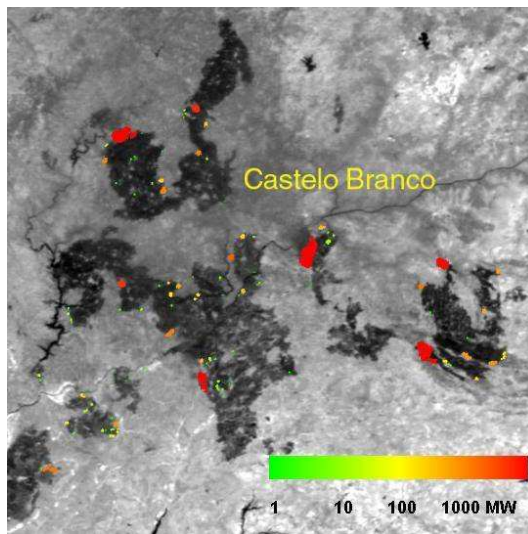


Abbildung 5.10: Bewährung von BIRD bei der Feuerkatastrophe in Portugal im Sommer 2003: Diese BIRD-Szene vom 4. August 2003 nachmittags wurde innerhalb von wenigen Minuten nach Empfang vom DLR dem GFMC übermittelt, dort auf den Lagebericht Portugal ins Internet gestellt und von den portugiesischen Behörden zur Lagebeurteilung und Entscheidungsunterstützung verwendet.

lateralen Kontext war die Bundesrepublik herausgefordert, bei den Waldbränden in Frankreich und Portugal Hilfe zu leisten. Dies geschah durch Entsendung von Hubschraubern des BGS, die in beiden Ländern zu Waldbrandbekämpfung aus der Luft eingesetzt wurden. Damit einhergehend entwickelte sich eine Zusammenarbeit mit dem Gemeinsamen Melde- und Lagezentrum (GMLZ) der Bundesrepublik, das für seine täglichen Lagedarstellungen autorisiert wurde, Materialien des GFMC zu verwenden.

Zusätzliche Anmerkungen

Abschließend soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Arbeit des Clusters Waldbrand nicht in dem Umfang hätte realisiert werden können, wenn nicht aus dem privaten und dem öffentlichen Bereich erhebliche, zu-

vor nicht eingeplante Unterstützung gewährt worden wäre.

Hierbei ist in erster Linie die ehemalige Lausitzer Braunkohle AG (LAUABAG) – seit vergangem Jahr Vattenfall Mining Europe – zu nennen. LAUBAG / Vattenfall ermöglichte die Durchführung der für Mitteleuropa einzigartigen Serie von Waldbrandexperimenten. Ohne die zur Verfügung gestellten Versuchsflächen wäre es nicht möglich gewesen, die Arbeiten an der Waldbrandmodellierung durchzuführen. Ferner bewirkten diese Waldbrandexperimente die erwünschten Synergien, da jeweils mit mehreren Institutionen an diesen Versuchen gearbeitet wurde. Die Kultur der gemeinsamen, interdisziplinären Waldbrandforschung wuchs mit diesen gemeinsam durchgeführten Experimenten. (Es muss hier auch erwähnt werden, dass im vorliegenden Bericht die ökologischen Untersuchungen mit den Partnern der Landesforstanstalt Eberswalde und der BTU Cottbus nicht abgehandelt wurden, da diese für die DFNK-Belange nicht von direkter Relevanz sind.)

Weiterhin soll der Bundesforstverwaltung gedankt werden, die durch Bereitstellung von Offenlandflächen und aktive Mitarbeit die Untersuchung von Ausbreitung und Auswirkung von Feuer auf typischen Heide- und Sukzessionsflächen zwischen den Brandenburger Kiefernwäldern ermöglichte. Diese experimentellen Ansätze haben darüber hinaus auch die Forschung und Entwicklung in der Anwendung des kontrollierten Feuers in Deutschland weitergetrieben, bei der die Freiburger Gruppe mit ihren Partnern in Europa eine führende Rolle spielt.

5.1.6 Offene Fragen

Aus Sicht des Clusters Waldbrand bleibt die Frage offen, wie es nach Ende des Vorhabens weitergeht. Der Aufbau der einschlägigen Expertise im DFNK wurde durch erhebliche eigene Ressourcen des Max-Planck-Instituts für Chemie und der im Bericht gelis-

teten Partner und Sponsoren unterstützt. Das ist ein Zeichen dafür, dass es nach Abschluss der Förderung durch DFNK auch weitergehen wird. Dennoch fehlt es an einer längerfristigen Finanzierung der einschlägigen Forschung, die sich von Anfang an interdisziplinär und damit vernetzt verstehen muss. Da es kein DFNK-Nachfolgeprogramm geben wird, sind die Aussichten schlecht.

Der Beschluss des DLR, im eigenen Haus die Abteilungen zu schließen, die für eine Weiterentwicklung des BIRD in ein operatives System entscheidend sind, wirft weiterhin einen Schatten auf die künftige Entwicklung.

5.1.7 Literatur

1. Feuermmodellierung, Feuerinformationssystem

Goldammer J.G., Hille M., Held A. (2001): Feuerexperiment Brandenburg (2001). Forschungsvorhaben A2, Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK).

Goldammer J.G., Held A., Hille M., Cramer W., Thonicke K., Kührt E., Oertel D., Preussner K. (2003): DFNK-Cluster Waldbrand: Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrand-Gefahr. In: Drittes Forum Katastrophenvorsorge, Potsdam, 7.-9. Oktober 2002. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (im Druck).

Goldammer J.G., Held A.C., Hille M., Wittich K.-P., Kührt E., Koutsias N., Oertel D. (2004): An innovative conceptual model of a forest fire management information and decision-support system for Brandenburg State. Nat. Hazards. Spec. Issue "German Research Network on Natural Disasters"(in Vorb.).

Hille M., Goldammer J.G. (2002): Dispatching and modelling of fires in Central European pine stands: New research and development approaches in Germany. In: Improving dispatching for forest fire control. Proceedings of a workshop held in the Mediterranean Agronomic Institute of Chania (MAICH), Crete, Greece,

6-8 December 2001 (General Secretariat for Civil Protection, Greece, and MAICH, Greece, ed.), 59-74. MAICH, Chania, 162 p.

Kührt E., Behnke T., Jahn H., Hetzheim H., Knollenberg J., Mertens V., Schlotzhauer G., Gotze B. (2000): Autonomous early warning system for forest fires tested in Brandenburg (Germany). *Int. Forest Fire News* 22, 84-90.

Sitch S., Smith B., Prentice I.C., Arneth A., Bondeau A., Cramer W., Kaplan J.O., Levis S., Lucht W., Sykes M.T., Thonicke K., Venevsky S. (2002) Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global Vegetation Model. *Global Change Biology* 9, 161-185.

Venevsky S., Thonicke K., Sitch S., Cramer W. (2002). Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. *Global Change Biology* 8, 984-998.

Wittich, K.-P., Janssen W. (2001): Waldbrandgefahrenvorhersage für Deutschland im Internet. *Allg. Forst Z. - Der Wald* 56, 794-795.

Wittich, K.-P. (2002): Prognose der witterungsbedingten Waldbrandgefahr und waldbrandspezifische Forschung des Deutschen Wetterdienstes, 3. Forum Katastrophenvorsorge (Third German Forum on Disaster Prevention), Potsdam, 7-9 October 2002 (in press).

2. Global Fire Monitoring Center (GFMC): Fire Monitoring, Arbeit des Clusters in internationalen Netzwerken

Bemerkung: Die hier exemplarisch ausgesuchten Veröffentlichungen betreffen die GFMC-Komponente des Vorhabens

Ahern F., Goldammer J.G., Justice C. (eds.) (2001): Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 302 p.

Ahern F.J., Belward A.S., Elvidge C.D., Goldammer J.G., Grégoire J.-M., Justice C.O., Pereira J., Prins E.M., Stocks B.J. (2001): The Fire Component of Global Observation of Forest Cover: a Plan of Action. In: Global and re-

- gional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort (F. Ahern, J.G. Goldammer, and C. Justice, eds.), 267-290. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 302 p.
- FAO (2001): Global Forest Fire Assessment 1990-2000. Forest Resources Assessment (FRA) Programme, Working Paper 55. FAO, Rome, 495 p. (Redaktion J.G. Goldammer und R.E.Mutch, mit 16 Länder- bzw. Regionalbeiträgen von J.G.Goldammer).
- Goldammer J.G. (2000): Forest fires in the Baltic region: National and international issues. In: Conjugate problems of mechanics and ecology. Proc. of the International Conference (A.Grishin, ed.), 257-275. University of Tomsk Publ., Tomsk, Russian Federation, 300 p.
- Goldammer J.G. (2000): The Ethiopia fire emergency between February and April 2000. Int. Forest Fire News No. 22, 2-8.
- Goldammer J.G. (2001): Current state of synthesis initiatives in global vegetation fire monitoring. In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort (F. Ahern, J.G. Goldammer, and C. Justice, eds.), 71-103. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 302 p.
- Goldammer J.G. (Hrsg.) (2001): Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, 29.-30. September 2000. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, 173 S.
- Goldammer J.G. (2001): The preparatory work of the Fire Ecology Research Group and the Global Fire Monitoring Center (GFMC) towards the establishment of the Inter-Agency Task Force Working Group on Wildland Fire within the UN International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). In: Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, 29.-30. September 2000 (J.G. Goldammer, Hrsg.), 73-88. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, 173 S.
- Goldammer J.G. (2001): The Ethiopia Fire Emergency between February and April 2000. A Summary Retrospective. In: Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, 29.-30. September 2000 (J.G. Goldammer, Hrsg.), 89-99. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, 173 S.
- Goldammer J.G. (2001): International Fire (Wildland Fire, Industrial Fire) and HAZMAT Emergency Assistance in the Frame of INSARAG Europe-Africa. In: Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, 29.-30. September 2000 (J.G. Goldammer, Hrsg.), 100-105. Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn, 173 S.
- Goldammer J.G. (2001): BALTEX FIRE 2000 (Baltic Exercise for Fire Information and Resources Exchange). International Forest Fire News No.24, 2-11.
- Goldammer J.G., Davidenko E.P. (2001): A global system for early warning, monitoring and management of wildland fire disasters. In: International Scientific and Practical Conference "Emergency Situations: Prevention and Liquidation", Minsk, Belarus, 22-24 May 2001 (E.P. Bariev, ed.), 88-89. Research Institute for Fire and Disaster Safety, Minsk, Belarus. ISBN 985-445-460-6.
- Goldammer J.G., Buchholz G., Resch F. (2003): The contribution of the Global Fire Monitoring Center (GFMC) for Early Warning and Management of wildfires. In: Early warning systems for natural disaster reduction (J. Zschau and N. Küppers, eds.), 585-592. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 834 p.
- Buchholz G., Goldammer J.G., Martell D. (2003): Application of logistic models to predict human-caused forest fires in Siberia. In: Early warning systems for natural disaster reduction (J. Zschau and N. Küppers, eds.), 593-

599. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 834 p.

Goldammer J.G. (2003): Towards international cooperation in managing forest fire disasters in the Mediterranean region. In: Security and the environment in the Mediterranean. Conceptualising security and environmental conflicts, Chapter 50 (H.G. Brauch, P.H. Liotta, A. Marquina, P.F. Rogers, and M. El-Sayed Selim, eds.), 907-915. Springer Verlag, Heidelberg, 1134 p.

Goldammer J.G. (2003): The wildland fire season 2002 in the Russian Federation. An assessment by the Global Fire Monitoring Center (GFMC). International Forest Fire News No. 28, 2-14.

Oertel, D., K. Briess, W. Halle, M. Neidhardt, E. Lorenz, R. Sandau, F. Schrandt, W. Skrbek, H. Venus, I. Walter, B. Zender, B. Zhukov, J.G. Goldammer, A.C. Held, M. Hille, H. Brueggemann (2002): Airborne forest fire mapping with an adaptive infrared sensor. *Int. J. Remote Sensing* 24, 3663-3682.

Stocks B.J., Goldammer J.G., Frost P.G.H., Cahoon D.R. (2001): Towards the development of an informed global policy on vegetation fires: what role for remote sensing? In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort (F. Ahern, J.G. Goldammer, and C. Justice, eds.), 35-46. SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 302 p.

3. Cluster Websites

Forest Fire Experiments of the DFNK Research Cluster Forest Fire:

<http://www.fire.uni-freiburg.de/dfnk/experiment.htm>

GFMC information system:

<http://www.fire.uni-freiburg.de>

Arbeitsgruppe Feuerökologie:

<http://www.forst.uni-freiburg.de/feueroeekologie/>

UN ISDR Inter-Agency Task Force for Disaster Reduction, Working Group on Wildland Fire / Wildland Fire Advisory Group:

<http://www.unisdr.org/eng/task%20force/tf-working-groups4-eng.htm>

Waldbrandgefahrenindex des DWD:

<http://www.agrowetter.de/Agrowetter/waldix.htm>

Eurasian Experimental Fire Weather Information System:

<http://www.ruf.uni-freiburg.de/fireglobe/fwf/eurasia.htm>

BIRD

<http://www.spacesensors.dlr.de/SE/bird/index.html>

<http://www.dlr.de/bird>

FIRE WATCH - Automatic Early Warning System for Forest Fires

<http://www.fire-watch.de>

5.2 Klimaänderungen und Waldbrand: Eine Analyse für Brandenburg

Kirsten Thonicke^{1,2}, Wolfgang Cramer¹

¹ Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Abteilung Natürliche Systeme

Email: Kirsten.Thonicke@pik-potsdam.de

² Max-Planck Institut für Biogeochemie

Arbeitsgruppe Globale Ökologie

Email: kthon@bgc-jena.mpg.de

TP A2: Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrandgefahr

5.2.1 Zusammenfassung

Feuer ist in seiner Entstehung sowohl vom Klima als auch von der Bestandesstruktur der Vegetation abhängig. Vor dem Hintergrund von Klimaänderungen würden sich Feuer und Vegetation und deren bisherige Wechselwirkungen sehr wahrscheinlich ändern. Langfristige Auswirkungen (Jahre bis Jahrzehnte) sowohl möglicher Änderungen des Klimas und der Bestandesstruktur der Wälder auf die Feuerentstehung und -ausbreitung wurden in Simulationsexperimenten analysiert und Wechselwirkungen zwischen Feuer und Vegetation untersucht. Die Bestandesstruktur hat einen größeren Einfluß auf die Feuerausbreitung als auf die Feuerentstehung, wie aus entsprechenden Simulationsexperimenten abgeleitet werden konnte. Daraus lässt sich schließen, dass eine Änderung in der brandenburgischen Waldstruktur nicht unbedingt an der Feueranzahl messbar sein muss, sich vielmehr jedoch in den verbrannten Flächen niederschlagen könnte. Der klimatische Einfluß auf mittel- bis langfristige Änderungen im Feuerregime der brandenburgischen Wälder wurde für den Zeitraum 2001-2100 unter Verwendung von drei verschiedenen Klimaszenarien getestet. Dementsprechend unterscheiden sich potentielle Änderungen sowohl in der klimatischen Feuergefährdung und der Feueranzahl als auch der verbrannten Flächen qualitativ, die eine genaue Aussage über das zukünftige Waldbrandgeschehen noch nicht ermöglichen. Der Einfluß des CO₂-Effektes auf die Transpirationsleistungen und damit Photosynthese und Bodenfeuchte, ist von entscheidender Bedeutung für das zukünftige Waldbrandgeschehen. Entsprechende weiterführende Untersuchungen sind daher besonders notwendig. Die Vegetation, wenn potentiell natürlich, ist in ihrem Fortbestand unter Klimaänderungsbedingungen nicht gefährdet. Hingewiesen sei jedoch auf die Sensitivität der Feuerausbreitung bei veränderten Streueigenschaften durch einen erhöhten Grasanteil, die sich noch zu einem Zeitpunkt auswirken kann, wo klimatische Bedingungen die klimatische Feuergefährdung und die Feueranzahl bereits stabilisieren können. Dies unterstreicht die Notwendigkeit gekoppelter, dynamischer Waldbrand-Vegetationsmodelle in der feuerökologischen Forschung.

Abstract

Fire occurrence depends on both climate and vegetation dynamics. In the background of climate change, it is very likely that fire and vegetation would change, also in its interactions.

Long-term changes (years to decades) in climate and forest structure and its effects on fire occurrence and fire spread, and their interactions with vegetation were analysed in simulation experiments. Vegetation composition has a larger influence on fire spread than fire occurrence, as was conducted from simulation experiments with various types of vegetation composition. It can therefore be concluded that a change in forest structure might not be noticed in the change of number of fires, but area burnt. The influence of regional climate change on fire regimes was analysed by applying 3 different climate scenarios for 2001-2100. Since the scenarios differ mainly in precipitation trends, results of simulated climatic fire danger, number of fires and area burnt differ qualitatively among the simulation experiments. It is therefore difficult to make clear statements about future forest fire developments in Brandenburg at the current stage. The influence of rising CO₂ concentration on transpiration of plants and thus photosynthesis and soil moisture is very high on the fire regimes. These physiological interactions can buffer climate-induced changes to a large extent and result in buffered or even reduced number of fires and area burnt. Further investigations are needed to elaborate these interactions in Brandenburg forests more detailed. The potential natural vegetation in Brandenburg is very likely to be stable under climate change conditions. It is important to note that fire spread is sensitive to changes in litter composition due to increasing grass cover and can increase area burnt still at a time, when climate would already stabilize climatic fire danger and number of fires. This underlines the importance of dynamic fire models that are incorporated into dynamic vegetation models, in fire-related investigations.

5.2.2 Veranlassung und Problem

Waldbrände zeichnen sich durch vielfältige Effekte und Einflüsse aus, die sowohl in den betroffenen Waldflächen durch Änderungen in der Vegetation und anderer Ökosystemfunktionen als auch im globalen Maßstab durch die Freisetzung klimarelevanter Spurengase und Aerosole, die durch die Verbrennung der Biomasse entstehen, charakterisiert sind. Zukünftige mögliche Klimaveränderungen ihrerseits können die Entstehung von Waldbränden beeinflussen sowie das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Vegetation und damit die Wechselwirkungen mit dem Feuer verändern.

Die Wälder Brandenburgs sind durch besonders trockene Sommer und die oft auf sandigen Böden wachsenden Kiefernforste (*Pinus sylvestris* L.) in Deutschland am meisten von Waldbränden betroffen. Die zukünftige Entwicklung der dortigen Waldbrandsituation hängt zum einen vom technischen Fortschritt und der Fähigkeit ab, wie extreme Ereignisse gemanagt werden können, und zum anderen, wie auf mittel- bis langfristige Trends

im regionalen Klima und der Vegetation vor dem Hintergrund globaler Klimaveränderungen eingegangen werden kann.

Wälder entwickeln sich auf Zeitskalen von Jahren bis Jahrzehnten. Änderungen in der Produktivität und der Bestandesstruktur haben nicht zuletzt Auswirkungen auf die Feuerentwicklung. Feuer ist in seiner Entstehung sowohl vom Klima als auch von der Bestandesstruktur der Vegetation abhängig. Vor dem Hintergrund von Klimaänderungen würden sich Feuer und Vegetation und deren bisherige Wechselwirkungen sehr wahrscheinlich ändern. Entsprechende Abschätzungen sind daher erforderlich, um weiterführende Arbeiten zu Waldumbaumaßnahmen und Möglichkeiten der Feuerbekämpfung langfristig zu ermöglichen. Die langfristigen Trendergebnisse zur Waldbrandentwicklung unter Klimaänderungsbedingungen bilden den Rahmen für die unmittelbare Behandlung einzelner Feuerereignisse und sind ein unerlässliches Hintergrundwissen für das Informationsmanagement im Waldbrandsimulationssystem.

5.2.3 Ziel

Langfristige Auswirkungen möglicher Änderungen des Klimas und der Bestandesstruktur der Wälder auf die Feueregefährdung und -ausbreitung werden in Simulationsexperimenten analysiert und Wechselwirkungen zwischen Feuer und Vegetation untersucht. Sie tragen als Anhaltspunkt über potentielle, zukünftige Entwicklungen unterstützend zur Planung und Entscheidung langfristiger Waldumbaumaßnahmen bei.

5.2.4 Methode

Untersuchungen zu den eingangs beschriebenen Forschungsgegenständen können mit Hilfe eines Simulationsmodells durchgeführt werden, das die folgenden Eigenschaften erfüllt. Eingebettet in ein Vegetationsmodell sollte das Waldbrandmodell Auftreten und Ausbreiten der Waldbrände in den allgemeinen Eigenschaften, also soweit wie möglich an den Prozessen orientiert, simulieren und Wechselwirkungen mit der Vegetationsdynamik (Regeneration der Vegetation, Kohlenstoffspeicherung der Streumasse, Feuerresistenz der Vegetationstypen) erlauben. Das Waldbrandmodell sollte auf statische oder statistische Modellierungsansätze verzichten, um Änderungen in den Beziehungen zwischen Feuer, Klima und Vegetation zuzulassen. Bevorzugt wird ein Vegetationsmodell, das Pflanzenwachstum, Populationsdynamik, die Kohlenstoff- und Wasserbilanz mit Eingangsdaten zu Klima, CO₂-Konzentration und Boden simuliert.

Einer erster Schritt ist dabei die Simulation von Waldbränden innerhalb des dynamischen Vegetationsmodells (Lund-Potsdam-Jena Dynamisches Globales Vegetationsmodell, LPJ-DGVM, Sitch *et al.* 2003) und die Bewertung der Modellgüte mit Hilfe von Beobachtungen der Waldbrandstatistik des Landes Brandenburg für den Zeitraum 1975-98. Der Einfluss der Bestandesstruktur auf das historische Waldbrandgeschehen wird in entsprechenden Simulationsexperimenten, in denen

verschiedene Vegetationszustände angenommen werden, analysiert. Dies dient als Grundlage für mögliche, durch Klimaänderung induzierte Änderungen in den Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und Feuer.

Für das 21. Jahrhundert werden globale und klimatische Änderungen durch den Anstieg der Treibhausgase in der Atmosphäre angenommen. Auswirkungen einer sich sozioökonomisch ändernden Welt spiegeln sich u.a. in CO₂-Emissionen wider, die aus entsprechenden Änderungen in der Nutzung fossiler Brennstoffe, der Entwicklung der Weltbevölkerung und der Technologie resultieren. Entsprechend optimistische oder eher pessimistische Annahmen wurden dazu erstellt und in sogenannten SRES-Szenarien, u.a. über den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre (IPCC Special Report on Emission Scenarios, SRES, Nakicenovic and Swart 2000) zusammengefasst. Abhängig von den Emissionen sind die klimatischen Auswirkungen, die von Generellen Zirkulationsmodellen (GCM) berechnet wurden, die ihrerseits in ihren regionalen Auswirkungen zwischen den einzelnen Modellen schwanken (Cubasch *et al.* 2001). Sie geben daher eine Spannungsbreite möglicher Klimaänderungen wieder und eine Auswahl dessen wurde für die Abschätzung der Waldbrandentwicklung in Brandenburg genutzt.

5.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Simulation historischer Feuerregime

Um das Waldbrandgeschehen und die Interaktionen zwischen Feuer und Vegetation zu simulieren, wurde das auf längeren Zeitskalen (Jahre bis Jahrzehnte) gültige regionale Feuermodell Reg-FIRM, (Venevsky *et al.* 2002) in das dynamische, globale Vegetationsmodell LPJ-DGVM (Sitch *et al.* 2003) implementiert. Reg-FIRM simuliert die klimatische Feueregefährdung und berücksichtigt Blitzschlag und anthropogen verursachte Brände als Feuerursachen, um daraus die Feueranzahl und, in Ab-

hängigkeit von Streueigenschaften, Branddauer und der Windgeschwindigkeit, die verbrannten Flächen und die Feuereffekte auf die Regeneration der modellierten Vegetationstypen und damit die Bestandesstruktur zu simulieren. Das kombinierte Feuer-Vegetationsmodell wurde für die Forstflächen Brandenburgs angewendet, um sowohl die Bestandesstruktur und die Vegetationsdynamik (wiederum vom Feuer beeinflusst) als auch das Feuerregime selbst zu simulieren. Dazu waren neue Parameterisierungen erforderlich, die aus Beobachtungen der in der Waldbrandstatistik Brandenburgs erfassten Daten abgeleitet wurden.

Als erster Teil der Simulationsexperimente wurden Modellsimulationen für die Bedingungen potentiell natürlicher Vegetation (PNV), wie sie vom LPJ-DGVM simuliert wurde, durchgeführt. Reg-FIRM ist in der Lage, auf dem richtigen Niveau und mit gut übereinstimmender interannueller Variabilität Feueranzahl und verbrannte Flächen zu simulieren. Unterschiede bestehen in der exakten quantitativen Erfassung einzelner Jahresmaxima, die auch auf die verwendete monatliche Klimatologie zurückgeführt werden können (vgl. Abb. 5.11, hellgraue Linie). Des weiteren können größere Unterschiede zwischen simulierten und beobachteten, verbrannten Flächen festgestellt werden. Das Modelldesign geht hierbei von ungehinderter Feuerausbreitung aus, was in der Realität nicht zutrifft, da alle Feuer so schnell wie möglich bekämpft werden. Insofern gibt der Vergleich von Simulation und Beobachtung einen Hinweis, wie hoch der Verlust an Waldflächen ohne Waldbrandbekämpfung wäre.

Um den Einfluß der Vegetation auf die Feuerentstehung und -ausbreitung unter historischen Klimabedingungen zu analysieren, wurde das jeweilige Feuerregime für die potentielle natürliche Vegetation, die aktuelle Vegetation, wie sie aus der brandenburgischen Biotopkartierung erstellt wurde, und ausschließlich für Laubwälder simuliert. Hierbei stellte sich heraus, dass die Bestandesstruktur einen größeren Einfluß auf die Feuerausbreitung als

auf die Feuerentstehung hat. Daraus lässt sich folgern, dass eine Änderung in der brandenburgischen Waldstruktur nicht unbedingt an der Feueranzahl messbar sein muss, sich vielmehr jedoch in den verbrannten Flächen niederschlagen könnte (Abb. 5.11).

Möglichkeiten, die Simulationsergebnisse auch für Interpretationen über den Einfluss des Feuermanagements zu nutzen, wurden im Vergleich mit Simulationen für die Iberische Halbinsel getestet. Übereinstimmungen zwischen simulierten und beobachteten Daten zur Feueranzahl und zu verbrannten Flächen zeigten für beide Testgebiete unterschiedliche Diskrepanzen auf, die sich auch in den Regressionskoeffizienten widerspiegeln. Während in Brandenburg eine bessere Übereinstimmung zwischen der Feueranzahl festgestellt werden konnte, traf dies für das spanische Gebiet für die verbrannten Flächen zu. Bemerkenswert soll an dieser Stelle, dass die simulierte Feueranzahl eine unmittelbare Auswirkung auf die simulierten verbrannten Flächen hat. Das brandenburgische Feuerregime wird im wesentlichen durch die Waldbrandbekämpfung dominiert, die unweigerlich zu entsprechenden Unterschieden zwischen Simulation und Beobachtung bei den verbrannten Flächen führt, während in Spanien Feuer aktiv zur Gestaltung der Landschaft eingesetzt wird. Intensivierungen in der Feuerbekämpfung führten dort zu entsprechenden Reaktionen, die sich im Anstieg der Feueranzahl, jedoch nicht in den verbrannten Flächen widerspiegeln (Thonicke et al. 2002). Somit konnte in einem ersten Test gezeigt werden, dass das Simulationsmodell durchaus zum Testen verschiedener Managementoptionen herangezogen werden kann.

Simulation Feuerregime unter Klimaänderungsbedingungen

Der Einfluss der Vegetation auf mittel- bis langfristige Änderungen im Feuerregime der brandenburgischen Wälder wurde für drei verschiedene Klimaszenarien getestet, die sich im

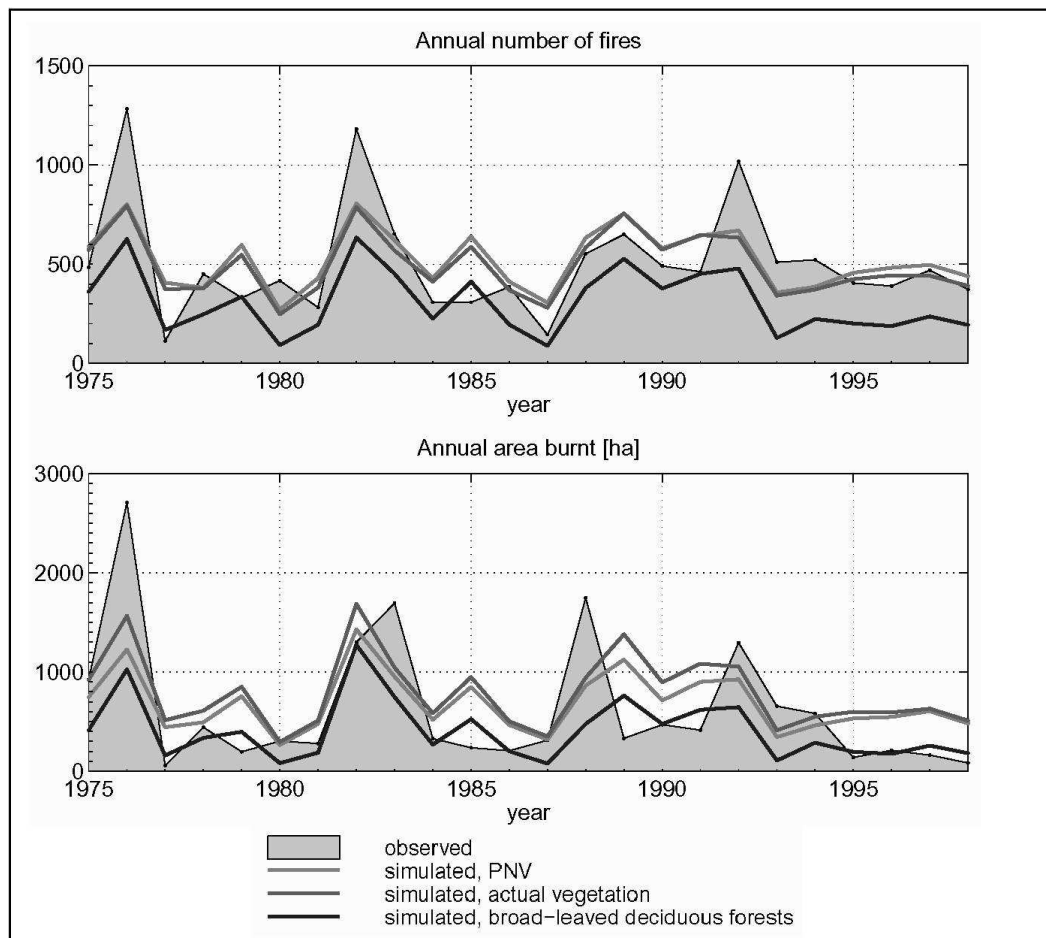


Abbildung 5.11: Jährliche Feueranzahl (oben) und verbrannte Fläche (unten) in den Waldflächen Brandenburgs 1975-98. Simuliert vom regionalen Feuermodell Reg-FIRM, das in das Vegetationsmodell LPJ-DGVM eingebettet ist, für drei verschiedene Bestandesstrukturen, potentiell natürliche Vegetation (PNV - hellgraue Linie), aktuelle Vegetation (mittelgraue Linie) und ausschließlich Laubwälder (schwarze Linie). Als graue Flächen unterlegt sind entsprechende Beobachtungen aus der Waldbrandstatistik des Landes Brandenburg.

Zeitraum 2001-2100 zwar in den Trends des Niederschlages und der täglichen Temperaturamplitude unterscheiden, aber den gleichen Anstieg der Lufttemperatur annehmen. Diese Klimaszenarien wurden mit dem Szenario zur Änderung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration erstellt, das auf einer extremen wirtschaftlichen, ressourcenintensiven Wirtschafts- und Sozialentwicklung basiert (A1FI SRES-Szenario).

Mit diesen Eingangsdaten wurde das Waldbrandgeschehen für den Fall der potentiell natürlichen Vegetation simuliert. Entsprechend

spiegeln sich die klimatischen Änderungen im Waldbrandgeschehen wider, die sich qualitativ unterscheiden (Abb. 5.12). Es ist daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig, klare Aussagen zu potentiellen Änderungen im Waldbrandgeschehen für Brandenburg zu machen. Um den Einfluss der ansteigenden CO_2 -Konzentration auf Feuer herauszustrichen, wurden die gleichen Simulationsexperimente, aber mit konstanter CO_2 -Konzentration ab dem Jahr 2001 durchgeführt (Abb. 5.12 gestrichelte Linie). Sie unterstreichen, dass der Einfluss, den die ansteigende CO_2 -Konzentration

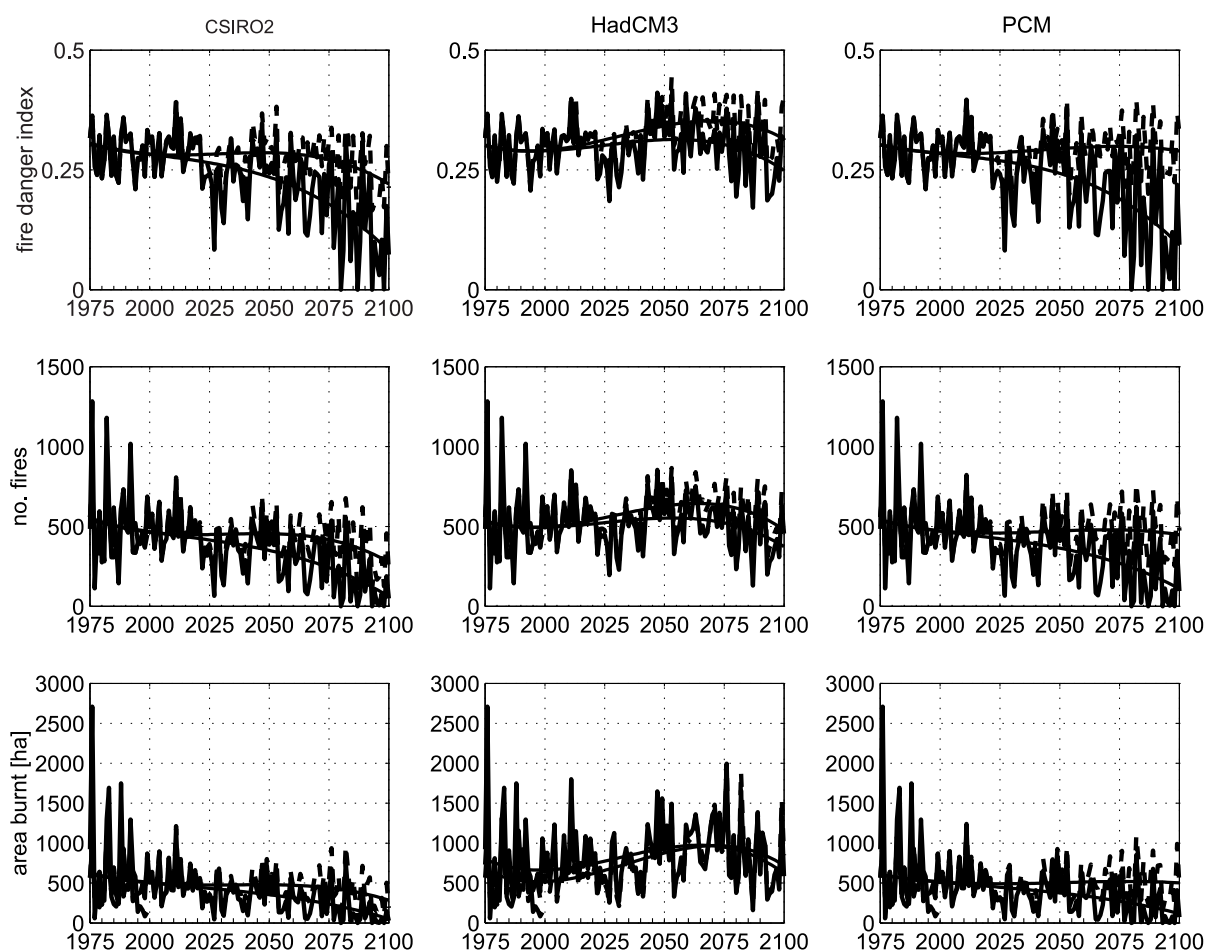


Abbildung 5.12: Zeitliche Veränderung der klimatischen Feuergefährdung (oben), der Feueranzahl (Mitte) und der verbrannten Flächen (unten) wie von Reg-FIRM, eingebettet in das LPJ-DGVM, für die Szenarien der GCMs HadCM3 (Hadley Center Coupled Model des United Kingdom Met Office), PCM (Parallel Climate Model des National Center for Atmospheric Research, USA) und CSIRO2 (CSIRO coupled model, Australia) simuliert. Gestrichelt hervorgehoben sind die gleichen Simulationsergebnisse, aber mit konstanter CO₂-Konzentration ab dem Jahr 2001, um den entsprechenden Einfluß des CO₂-Effektes hervorzuheben.

auf die stomatale Leitfähigkeit und damit die Photosynthese- und Transpirationsleistungen der Pflanzen hat, entscheidend zur puffernden bzw. abnehmenden Tendenz der Waldbrände beiträgt. Diese Wechselwirkungen zukünftig genauer zu untersuchen, wird ein wesentlicher Bestandteil in der Waldbrand- wie Ökologieforschung sein müssen.

Bei allen Simulationsexperimenten war jedoch die Vegetation an sich in ihrer Stabilität nicht gefährdet (Abb. 5.13). Wechselwirkungen mit

dem Feuer wurden im Falle des HadCM3-Klimaszenarios sichtbar, als nach 2050 die Grasbedeckung ansteigt, was Rückkopplungen auf die verbrannte Fläche zur Folge hat. Denn die Maxima der verbrannten Flächen wurden zu einem Zeitpunkt erreicht als sich der klimatische Feuergefährdungsindex und die Feueranzahl bereits stabilisierten. Dies ist möglich, weil die Streueigenschaften sich mit der Bestandesstruktur verändern und sich direkt auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Feuer auswirken. Es soll aber an dieser Stel-

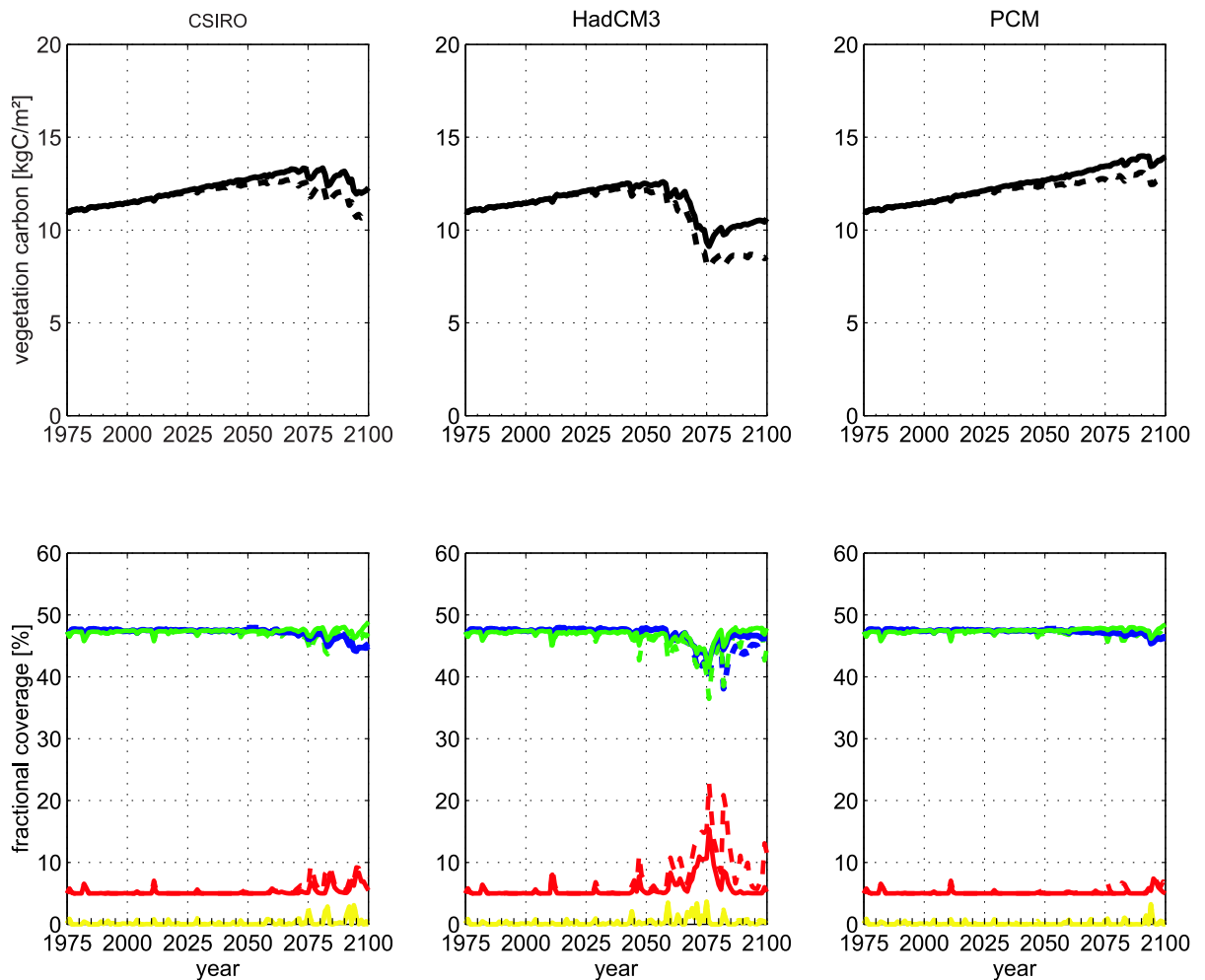


Abbildung 5.13: Einfluss des Feuers und der Klimaänderung auf den in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoff (oben) und die Bestandesstruktur (unten) wie vom LPJ-DGVM mit dem Reg-FIRM Waldbrandmodell für drei Klimaänderungsszenarien simuliert (Gestrichelte Linien: konstante CO₂-Konzentration ab 2001. Unten: Nadelwald - blau, Laubwald - grün, C₃-Gräser - rot, unbedeckte Flächen - gelb.)

le angemerkt werden, dass diese Verhältnisse sowohl des Waldbrandgeschehens als auch der Bestandesstruktur der Vegetation für den Fall der potentiell natürlichen Vegetation untersucht wurde. Es ist daher auf jeden Fall empfehlenswert, entsprechende Waldumbaumaßnahmen zu fördern, die den Laubwaldanteil an das Niveau der potentiell natürlichen Vegetation heranführen.

5.2.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Die vorgestellten potentiellen Trends in der langfristigen Entwicklung des Waldbrandgeschehens und deren Wechselwirkungen mit der Vegetationsdynamik haben Empfehlungscharakter für die Entscheidung und Planung langfristiger Waldumbaumaßnahmen. Die Einflüsse der Bestandesstruktur, insbesondere der Erhöhung des Grasanteils, auf das Feuerverhalten stellen einen kritischen Punkt dar, wie Änderungen in der Bestandesstruktur auf das

Feuerregime rückwirken können. Dies ist von großer Bedeutung für das Waldbrandinformationssystem und für die Planung der Waldbrandbekämpfung.

5.2.7 Offene Fragen

Folgende Aspekte sind zukünftig näher zu bearbeiten:

- Dynamische Modellierung von Forststrukturen, die nicht den potentiellen, natürlichen Bedingungen entsprechen. Wie verhalten sich diese unter Klimaänderungsbedingungen und erhöhter CO₂-Konzentration?
- Einfluss des Wald- und Feuermanagements auf Waldbrand. Welche ökonomischen Kapazitäten sind für ein optimales Feuerregime erforderlich?
- Sensitivität der Transpirationsleistungen der Wälder und damit der Streufeuchte auf Effekte durch wachsende, atmosphärische CO₂-Konzentration. Können entsprechende Wechselwirkungen für brandenburgische Wälder, um regionale Klimabedingungen zu berücksichtigen, bestätigt werden?

5.2.8 Literatur

Cubasch, U., G. A. Meehl, G. J. Boer, R. J. Stouffer, M. Dix, A. Noda, C. A. Senior, S. Raper and K. S. Yap, 2001. Projections of Future Climate Change. In: J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell and C. A. Johnson (Editors), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 525-582.

Nakicenovic, N. and R. Swart, 2000. Emission Scenarios. Special Report of the Intergovern-

mental Panel on Climate Change, IPCC, Cambridge.

Sitch, S., et al., 2003. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ Dynamic Global Vegetation Model. *Global Change Biology*, 9: 161-185.

Thonicke, K., S. Venevsky and W. Cramer, 2002. Vegetation and fire interactions under different climate conditions - Two examples of human-dominated fire regimes,. In: D. X. Viegas (Editor), *IV International Conference of Forest Fire Research*, Luso-Coimbra, Portugal., 18.-23. Nov., Millpress.

Thonicke, K. and Cramer W. (2004): Long-term trends in vegetation dynamics and forest fire risk for Brandenburg (Germany) under a changing climate (Natural Hazards - DFNK special issue, in print.

Venevsky, S., K. Thonicke, S. Sitch and W. Cramer, 2002. Simulating fire regimes in human-dominated ecosystems: Iberian Peninsula case study. *Global Change Biology*, 8 : 984-998.

Kapitel 6

Cluster Datenbanken und Informationssysteme

6.1 Struktur, Konzeption und Bewertung der Arbeiten

Petra Köhler und Joachim Wächter

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)

Daten- und Rechenzentrum

Email: p.koehler@gfz-potsdam.de

6.1.1 Zielsetzung und Struktur

Neben den thematischen Clustern „Risikoanalyse Hochwasser“, „Risikoanalyse Erdbeben“, „Risikoanalyse Sturm“ und „Simulationssystem Waldbrand“ nahm der Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ eine Querschnittsaufgabe im Deutschen Forschungsnetz Naturkatastrophen wahr. Hier waren Teilprojekte verknüpft, deren Aufgaben wichtige Einsatzfelder der Informationstechnologie im Katastrophenmanagement umfassen, beginnend bei dem grundlegenden Informationsmanagement und dem Zugang zu Daten bis hin zu Systemtechnologien für das Monitoring, die Modellierung und Simulation:

- C1: Charakterisierung und Inventarisierung von katastrophenrelevanten Elementen der natürlichen und anthropogenen Landschaftsausstattung (siehe Kapitel 2.5)
- C2: Deutschlandweite GPS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von kontinuierlich hochgenauen GPS-Beobachtungen (siehe Kapitel 4.10)
- C3: Vernetzte Informations- und Frühwarnsysteme für den Einsatz im Katastrophenmanagement
- C4: Technologie von Schadensszenarien im Rahmen eines interaktiven, nutzerorientierten Informationssystems
- C5: Aufbau eines schnellen Informationssystems für Erdbeben in Deutschland und in benachbarten Ländern

Ziel dieser Projekte war zum einen die Bereitstellung von Daten (z.B. flächendeckende Basisdaten durch Satellitentechnologie) und die Entwicklung von Informationssystemen (z.B. schnelles Informationssystem für Erdbeben) und zum anderen die Integration von Informationen und Werkzeugen in einer übergeordneten Informationsinfrastruktur.

Aufgabe des TP C2 war die Nutzung kontinuierlicher GPS-Daten zur Modellierung und Bereitstellung zeitlich und räumlich hochauflösender Daten zu tektonischer Bewegung und Deformation in Deutschland als Input für eine optimierte seismische Gefährdungs- und Risikoeinschätzung. Auch TP C1 lieferte Input für weitere Vorhaben, beispielsweise aktuelle Landnutzungskarten auf der Basis fernerkundlicher Daten und Methoden als Grundlage für die hydrologische Modellierung im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“.

Während sich das TP C4 mit dem Vergleich und der Bewertung existierender Methoden zur Schadensabschätzung einschließlich deren Umsetzung mittels gängiger Informationstechnologien (IT) im Bereich Erdbeben befasste, ist im Rahmen der Arbeiten des TP C5 ein Informationssystem entwickelt worden, dessen Aufgabe die zeitnahe Bereitstellung umfassender und zuverlässiger Informationen zu einem akuten Erdbebenereignis in Deutschland für interessierte Institutionen sowie die Öffentlichkeit ist. Aktuelle Daten werden dabei durch geeignete Hintergrundinformationen (z.B. topographische und geologische Karten) ergänzt.

Schwerpunkte bei der Entwicklung der übergreifenden Informationsinfrastruktur im und

für das DFNK durch das TP C3 waren der Aufbau einer gemeinsam nutzbaren Datenbasis und eines Projektportals zur allgemeinen Darstellung nach außen sowie als interne Informationsplattform. Dabei ist ein Informationssystem integriert worden, das eine gezielte Recherche nach in DFNK vorhandenen Daten und Informationen ermöglicht. Moderne Internettechnologien und globale Standards liefern die grundlegenden technologischen Konzepte für die Umsetzung der Komponenten.

6.1.2 Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis

Ziel des DFNK war die Entwicklung neuer wissenschaftlicher Methoden für ein optimiertes Risikomanagement von Naturkatastrophen in Deutschland und deren Bereitstellung für die Praxis des Katastrophenmanagements. Da der Transfer von Wissen und Methoden aus der Forschung in die Anwendung häufig an IT-gestützte Lösungen und Systeme gebunden ist, ist aus dem Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ heraus 2002 die Special Interest Group „Transfer von DFNK-Ergebnissen in die Praxis“ (SIG Transfer) gegründet worden. Ihr Ziel war die Erhebung und Bewertung der Potentiale von DFNK-Ergebnissen für das aktive Katastrophenmanagement und die Erarbeitung von Empfehlungen zur Umsetzung von Wissens- und Technologietransfer.

Durch folgende Aktivitäten des Teilprojektes C3 sind die Voraussetzungen für die Umsetzung der Zielsetzungen der SIG geschaffen worden:

- Nutzer- und Anwendungsorientierung: kontinuierliche Sammlung an Informationen über aktuelle Methoden sowie Daten- und Systemprodukte und Netzwerke im Bereich Katastrophenmanagement über Messe- und Veranstaltungsbesuche; Präsentation von DFNK-Ergebnissen bei Tagungen und Workshops; Kontaktaufnahme und Kooperationsgespräche mit potentiellen Nutzern

und möglichen Partnern aus Forschung und Privatwirtschaft für die Weiterentwicklung von DFNK-Produkten und den Praxistransfer

- DFNK-Potentialanalyse: Bestandsaufnahme bereits vorliegender bzw. bis zum Ende des Projekts zu erwartender DFNK-Produkte und Bewertung hinsichtlich ihrer Eignung (Realisierungsgrad, Praxisrelevanz, Integrations- und Entwicklungsmöglichkeiten etc.) für eine Nutzung in der Praxis

Die DFNK-Potentialanalyse bildete die Grundlage zur Umsetzung der Ziele der SIG Transfer. In einem ersten Schritt wurden existierende bzw. zu erwartende Produkte des DFNK und ihre Merkmale und Ausprägungen in einer projektinternen Umfrage erhoben. Über einen Fragebogen wurden Informationen gesammelt über die Art des Produkts (z.B. Datenprodukte, Karten, Modelle, Informationssysteme etc.), seine Eigenschaften, den Reifegrad etc. Darüber hinaus wurden die Projektteilnehmer aufgefordert, eigene Ideen und Konzepte zur Integration ihrer Forschungsergebnisse in das operationelle Katastrophenmanagement einzubringen und Vorschläge möglicher Nutzer und auch Partner für etwaige Weiterentwicklungen bzw. Technologietransfer abzugeben.

Basierend auf den durch die Mitglieder der SIG vereinbarten Bemessungskriterien – Bedeutung des Anwendungsfeldes, Realisierungsgrad des Produktes, herausragende Eigenschaften (im Vergleich mit bereits existierenden ähnlichen Produkten), Mehrwerte für potentielle Nutzer sowie mögliche Einschränkungen – wurde die Eignung des Produktes für die Anwendung in der aktiven Katastrophenvorsorge und –bewältigung bewertet. Die Resultate der Analyse zeigten schließlich diverse Produkte, insbesondere im Bereich der Hochwasserforschung und den Themen Waldbrand und Erdbeben, welche ein hohes Potential für den Einsatz im praktischen Katastrophenmanagement bergen.

Dennoch ist der Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis kein trivialer Prozess. Diskussionen mit Akteuren des operationellen Katastrophenmanagements zeigten, dass es zur Lösung konkreter Anwendungsprobleme keineswegs wissenschaftlicher Publikationen bedarf. Stattdessen sind sie angewiesen auf wissenschaftlich fundierte Aussagen zu speziellen Fragestellungen, auf anwendungsorientiert aufbereitete Daten- und Kartenprodukte, Interpretationen sowie Werkzeuge zur gezielten Entscheidungsunterstützung. Der Erfolg von Transferprozessen ist demnach abhängig von Anwendungs- und Nutzerorientierung, außerdem spielen Marktaspekte wie Kosten-Nutzen-Relationen etc. eine nicht zu unterschätzende Rolle. Doch auch Umstände auf Seiten der Nutzer erschweren den Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung. Transferprozesse machen häufig die Prüfung und Umstellung von etablierten Vorgehensweisen und Organisationsstrukturen nötig, was nicht selten zu Ablehnung führt.

6.1.3 Bewertung und Ausblick

Während die Zielsetzungen der einzelnen Teilprojekte des Clusters „Datenbanken und Informationssysteme“ für das Gesamtvorhaben DFNK i.d.R. erreicht und wesentliche Beiträge geleistet worden sind, hat sich die Einbeziehung der Endnutzer, beispielsweise aus dem Bereich der Planung und des operationellen Katastrophenmanagements im Rahmen des Forschungsnetzes schwieriger gestaltet. Eine umfassende Analyse der Nutzeranforderungen an Daten, Informationen und Anwendungen bei der Vorsorge und Bewältigung von Naturkatastrophen konnte nicht umgesetzt werden. Dies hatte zur Folge, dass das übergeordnete Ziel der Bereitstellung moderner Methoden und Werkzeuge für die Anwender im deutschen Risikomanagement und somit der Transfer anwendungsorientierter Lösungen in die Praxis nur schwer zu realisieren war.

Auch spielte in der Wissenschaft der Transfer von Wissen und Technologien bislang nur ei-

ne untergeordnete Rolle. Nach wie vor werden die Leistungen von Wissenschaftlern an der Anzahl und Qualität ihrer Publikationen gemessen und die Chancen der Nutzung neuer Erkenntnisse und neuartiger Methoden in der Praxis kaum ergriffen. Die derzeit stattfindende Neuorientierung sowie Umstrukturierungen von Wissenschaftsorganisationen bieten jedoch die Möglichkeit des steigenden Bewusstseins der vielfältigen Potentiale wissenschaftlicher Erkenntnisse und von Know-how- und Technologietransfer.

Ziel sollte es schließlich sein, geeignete Forschungsergebnisse durch Weiterentwicklungen und Folgeprojekte nach Ablauf einer Projektlaufzeit zur Praxisreife zu bringen. Die Nutzung neuartiger Daten und Methoden in den Arbeitsprozessen der Katastrophenvorsorge und –bewältigung ist jedoch häufig gebunden an neue Technologien und IT-gestützte Anwendungen. Da die Entwicklung marktfähiger Lösungen und Systeme in reinen Forschungsprojekten häufig nicht geleistet werden kann, sind Kooperationen mit Partnern aus der Industrie notwendig, um tragfähige Umsetzungsmodelle zu entwerfen und die Produkte zur Praxisreife zu bringen.

6.2 Informationssysteme für den Einsatz im Katastrophenmanagement

Petra Köhler und Joachim Wächter

GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)

Daten- und Rechenzentrum

Email: p.koehler@gfz-potsdam.de

TP C3: Vernetzte Informations- und Frühwarnsysteme für den Einsatz im Katastrophenmanagement

6.2.1 Zusammenfassung

Die Entwicklung neuer und verbesserter Methoden für Katastrophenvorsorge und –management erfordert eine Vielzahl heterogener Datenbestände von Geobasisdaten (topographischen Karten, Digitalen Geländemodellen) bis hin zu Fachdaten (z.B. Niederschlagsdaten, Landnutzung, Pegelstände, soziodemographische Daten). Ein abgestimmtes Daten- und Informationsmanagement und der Aufbau einer umfassenden Informationsinfrastruktur waren eine Voraussetzung für den Erfolg des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK). Zur Unterstützung der Datenbeschaffung wurde eine Recherche über vorhandene und benötigte Daten durchgeführt. Ein Internetportal wurde aufgebaut, um Ziele und Aufgaben des DFNK der interessierten Öffentlichkeit zu präsentieren. Über einen internen Bereich wurden Dokumente, Software-Tools etc. der Projektgemeinschaft zur Verfügung gestellt. Ein Katalogdienst wurde eingerichtet, der Metadaten der dezentral vorliegenden Projektdaten bereitstellt und über geeignete Suchfunktionalitäten die gezielte Datenrecherche ermöglicht. Internettechnologie sowie akzeptierte Konzepte und Standards bildeten die Grundlage für den Aufbau der Informationsinfrastruktur. Die Berücksichtigung dieser Prinzipien von Geodateninfrastrukturen (GDI) garantieren Offenheit und Kompatibilität nach innen und außen.

Abstract

The development of new and better methods for preventing and managing natural disasters requires a variety of different data sets, covering the range from referenced data (topographic data, digital elevation models) to thematic data (e.g. precipitation, land usage, water gauges, sociodemographic data). A professional well-organised data and information management and the generation of a comprehensive information infrastructure were decisive for the success of the German Research Network Natural Disasters (DFNK). A survey on existing and required data was performed to support data acquisition. A web-based portal was set up to give general information about the objectives and tasks of DFNK to the public. Disaster relevant documents, software tools etc. were provided to the project community by an internal access. A catalog service was established providing metadata of decentral data resources and appropriate search tools to support data retrieval. Internet technology and approved concepts and standards built the foundation for implementing the information infrastructure. Following these principles of Spatial Data Infrastructures (SDI) guarantees openness and compatibility.

6.2.2 Veranlassung und Problem

Ziel des DFNK war es, neue wissenschaftliche Grundlagen für ein modernes Risikomanagement von Naturkatastrophen zu entwickeln und potentiellen Nutzern zur Verfügung zu stellen. Die Bereitstellung von Methoden, von Daten- und Informationsprodukten sowie Systemlösungen erforderte ein gemeinsames Daten- und Informationsmanagement. Eine geeignete Datengrundlage musste aufgebaut und die Verknüpfung und Vernetzung katastrophenrelevanter Daten und Informationen mit Softwarelösungen zur Umsetzung komplexer Szenarien und Arbeitsprozesse gewährleistet werden.

Im Cluster „Datenbanken und Informationssysteme“ befassten sich Teilprojekte zum einen mit der Bereitstellung von Daten und zum anderen mit der Integration von Daten und Anwendungen in übergeordneten Informationssystemen. Die Aufgabenstellungen der Teilprojekte umfassten damit wichtige Einsatzfelder informationstechnologischer Methoden, beginnend bei grundlegendem Informationsmanagement bis hin zu Systemtechnologien für das Monitoring, die Modellierung und Simulation. Der Aufbau einer Informationsinfrastruktur stellte eine Querschnittsaufgabe dar zur Abstimmung und Zusammenführung der verschiedenen Ansätze.

6.2.3 Ziel

Ziel des TP C3 war es, Produkte und Dienste zu erarbeiten, welche die Projektgemeinschaft in ihrem gemeinsamen Daten- und Informationsmanagement unterstützen sollten. Mit Hilfe der Potentiale moderner Informationstechnologien war eine Infrastruktur für das Gesamtvorhaben DFNK zu schaffen, die zum einen den Aufbau einer gemeinsam nutzbaren Datengrundlage und den ungehinderten Austausch von Daten innerhalb des Projektes und zum anderen den Aufbau einer Projektplattform zur Abbildung interner Informationsflüsse und zur Außendarstellung umfassen sollte.

Grundlage der Arbeiten sollte die Orientierung der Arbeiten an den Prinzipien sogenannter Geodateninfrastrukturen (GDI) sein. Im Rahmen von Geodateninfrastrukturen dienen sowohl organisatorische Konzepte, z.B. die Abstimmung und Einführung einheitlicher Zugangs- und Nutzungsbedingungen für raumbezogene Daten (Geodaten) als auch technologische Konzepte der vereinfachten und flexibleren Nutzung von Daten für beliebige Anwendungszwecke. Die Berücksichtigung anerkannter Technologiekonzepte und Standards bildete die Grundlage beim Aufbau einer Informationsinfrastruktur für das DFNK.

6.2.4 Methode

Die Existenz einer aktuellen und anwendungsorientierten Datengrundlage ist Voraussetzung für die Erarbeitung neuer und effektiver Methoden nicht nur im Bereich des Katastrophenmanagements. Zur Organisation und Koordination von Datenbeschaffung und -austausch wurde eine Bestands- und Bedarfsrecherche über Daten im und für das DFNK durchgeführt. Ziel war es herauszufinden, welche Daten bereits in dem Verbundprojekt vorhanden waren und welche weiterhin benötigt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes sollte es den Partnern stets möglich sein, sich einen Überblick über die im DFNK vorhandenen Daten zu verschaffen. Da die Daten i.d.R. in den Teilprojekten und damit dezentral gehalten wurden, war ein zentraler Dienst zum Abruf von Informationen über die verteilten Daten bzw. zur gezielten Datenrecherche aufzubauen.

So genannte „Katalog-Services“ stellen derartige Dienste dar und sind vergleichbar mit aus dem Bibliothekswesen bekannten Mikrofiche- oder Online-Katalogen. Diese Kataloge enthalten Informationen zu in der jeweiligen Bibliothek und in angeschlossenen Bibliotheken vorhandenen Büchern, Zeitschriften etc. Die Informationen umfassen z.B. Angaben zu Autor(en), Buch- oder Aufsatztitel und dem Jahrgang, in dem die jeweilige Veröffentlichung erschienen ist. Diese beschreibenden Informa-

tionen werden als „Metainformationen“ oder „Metadaten“ bezeichnet („Daten über Daten“) und werden auch in anderen Anwendungsbereichen genutzt. So werden Metadaten als Instrument zur Dokumentation von Geodaten in den Geowissenschaften eingesetzt, hier umfassen sie beispielsweise Informationen über den Raumausschnitt, für den die Daten gelten, Erzeuger bzw. Halter der Daten, Datenqualität und Aktualität.

Für die im DFNK vorhandenen Daten wurde ein Metadatenprofil erarbeitet, das die zu beschreibenden Datenmerkmale definierte. Es basierte auf dem international anerkannten Standard „Directory Interchange Format“ (DIF). In der Abschlussphase des TP C3 wurde eine Transformation hin zu dem im Juni 2003 veröffentlichten Metadatenstandard für Geographische Information der International Organisation for Standardisation „ISO 19115“ vorgenommen (Köhler et al. 2003). Dieses Profil war die Grundlage zur Erfassung der Metadaten und zur technologischen Umsetzung des Katalogdienstes.

Zum Aufbau einer Projektplattform wurde ein Internetportal konzipiert, das sowohl die Vernetzung des Projektes unterstützen als auch der Außendarstellung dienen sollte. Das Angebot war somit auf zwei übergeordnete Zielgruppen auszurichten, zum einen die Projektgemeinschaft selbst und zum anderen die Öffentlichkeit.

6.2.5 Ergebnisse und Diskussion

Folgende Komponenten sind vom TP C3 zum Aufbau einer Informationsinfrastruktur für das DFNK umgesetzt worden.

Datenbasis

Die Auswertung der internen Bestands- und Bedarfsrecherche über im DFNK bereits vorhandene und darüber hinaus benötigte Daten zeigte, dass eine gewisse Grundausstattung an topographischen und geologischen Karten, di-

gitalen Geländemodellen sowie meteorologischen Daten vorhanden war. Diese war jedoch bei weitem nicht vollständig, häufig war das Material veraltet, die Auflösung für die geplanten Forschungsarbeiten nicht geeignet etc. Darüber hinaus mangelte es an Pegelstandsdaten, Orthophotos u.a. Die Ergebnisse der Recherche wurden der Projektgemeinschaft über das Portal zugänglich gemacht. So konnte abgeglichen werden, inwieweit der Datenbedarf durch den existierenden Bestand im Projekt bereits abgedeckt werden konnte, und weitergehende Datenbeschaffung sowie Datenaustausch konnten koordiniert und unterstützt werden.

DFNK-Clearinghouse

Um einen Überblick über die in DFNK vorhandenen und dezentral gehaltenen Daten bzw. eine konkrete Datenrecherche zu ermöglichen, wurde ein Katalog-Service eingerichtet, das so genannte „DFNK-Clearinghouse“ (Braune et al. 2001a). Auf der Grundlage der zu den Projektdaten erhobenen Metadaten kann mit Hilfe des Systems über bestimmte benutzerdefinierte Suchkriterien gezielt nach Daten recherchiert werden. Folgende Kriterien werden dabei angeboten und können einzeln ausgewählt oder miteinander verknüpft werden:

- Recherche über einen Themenbereich bzw. über frei zu definierende Schlagworte (thematische Recherche)
- Recherche über einen Zeitraum (zeitliche Recherche)
- Recherche über einen Raumausschnitt (raumbezogene Recherche)

Da Naturkatastrophen stets mit einer geographischen Region verknüpft sind, hat die raumbezogene Recherche eine hohe Priorität und wird durch spezielle Softwarewerkzeuge unterstützt. Die Eingabe erfolgt entweder durch Auswahl geeigneter Suchbegriffe aus einer

strukturierten Schlagwortliste, dem sog. „Geo-Locator“ (Braune et al. 2001b), oder über eine digitale Karte, in der der Nutzer den ihn interessierenden Raumausschnitt graphisch markieren kann.

Der GeoLocator ist ein geographisches Namensverzeichnis bzw. ein alphabetischer Ortsindex, im Englischen „Gazetteer“ genannt. Er bildet ortsbezogene Namen ab, beispielsweise Bundesländer, Regierungsbezirke und Landkreise, denen der betreffende Ausschnitt der Erdoberfläche in Form von Koordinaten zugeordnet ist.

Die Datenrecherche über das DFNK-Clearinghouse und die Unterstützung durch den GeoLocator sollen am Beispiel einer Suche nach aktuellen Wasserstandspegeln am Rhein dargestellt werden (Abb. 6.1). Für die Auswahl des geographischen Bezuges können dabei folgende Alternativen gewählt werden:

- Alphanumerisch: Manuelle Angabe bekannter Koordinaten bzw. Auswahl eines geographischen Stichwortes über den GeoLocator, hier: Regierungsbezirk Köln
- Graphisch: Markierung des relevanten Raumausschnittes in einer digitalen Karte

Im Ergebnis werden die Pegelmesspunkte des gewählten Raumausschnitts wahlweise aufgelistet oder als Punktsymbole in einer Karte dargestellt. Durch Anklicken eines Punktes bzw. durch Auswahl eines Eintrages in der Ergebnisliste wird die entsprechende Beschreibung (Metadaten) des Datensatzes angezeigt. Über einen Hyperlink können schließlich – in diesem Fall - die aktuellen Pegelstandsdaten der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz in tabellarischer und graphischer Form abgerufen werden.

Zur Erfassung der Metadaten wurde ein Editor entwickelt und ebenfalls über das Portal zur Verfügung gestellt. Der Export der Metadaten für ihre Integration in das DFNK-

Clearinghouse ist über eine entsprechende Schnittstelle gewährleistet.

DFNK-Portal

Zur Abbildung interner Informationsflüsse und zur wirkungsvollen Außendarstellung des DFNK ist ein umfassendes Internetportal entstanden (<http://dfnk.gfz-potsdam.de/>, Abb. 6.2). Der Öffentlichkeit und Interessenten aus Wissenschaft, Verwaltung und Wirtschaft bietet es einen Einstieg in die Organisation und die Aufgaben des Forschungsnetzes über allgemeine Informationen zu Gesamtprojekt und Teilprojekten sowie über Berichte und Flyer, die zum Download zur Verfügung stehen. Dem Projektteilnehmer selbst bietet das Portal über einen passwortgeschützten Bereich den Zugang zu internen Projektinformationen, Dokumenten und Arbeitsergebnissen und auch zum DFNK-Clearinghouse. Mit seinen Inhalten und Angeboten stellt es somit die zentrale Drehscheibe im gemeinsamen Daten- und Informationsmanagement des Projektes dar.

Mit Hilfe der dargestellten Komponenten konnten die grundlegenden Bestandteile einer Informationsinfrastruktur basierend auf Methoden der Informationstechnologie gewährleistet werden. Die Nutzung von Internettechnologie sowie standardisierter Daten, Metadaten und Systemschnittstellen und die Anlehnung an anerkannte Konzepte gewährleisten Kompatibilität und Offenheit sowie partnerübergreifenden Datenzugriff und -austausch. Diese Prinzipien von Geodateninfrastrukturen müssen Grundlage auch in zukünftigen und weiterführenden Projekten sein und es muss die Orientierung und Beteiligung an entsprechenden Entwicklungen sichergestellt werden (Wächter & Kalmes 2001).

Die Erfahrung zeigt jedoch, dass neben den technologischen Entwicklungen eine entsprechende organisatorische Unterstützung unerlässlich ist. Die Propagierung eines abgestimmten und gemeinsamen Daten- und Informationsmanagements in einem Netzwerk wie

The image shows a composite screenshot of several web browser windows from the DFNK-Clearinghouse. The top window is 'GeoLocator - Netscape', showing a search for 'Köln' with coordinates W=5.770, S=50.276, E=7.888, N=51.299. Below it is the 'Spatial Search - SVG Version' window, displaying a map of the region with various geographical features and a search bar. The bottom-left window is 'Pegelmessstelle Oberwinter (Rhein)', showing a summary of the station's data, including the date 2001-05-21 and a table of water levels. The bottom-right window is 'Die Wasserstände der letzten 7 Tage am Pegel Oberwinter', featuring a line graph and a table of water levels.

Table 1: Die Wasserstände der letzten 7 Tage

Datum	Uhrzeit (MEZ)	Pegel in cm	Differenz zum Vortag
22.09.2001	04.00	363	+3
23.09.2001	04.00	375	+12
24.09.2001	04.00	353	-22
25.09.2001	04.00	324	-29
26.09.2001	04.00	311	-13
27.09.2001	04.00	302	-9
28.09.2001	04.00	283	-19

Abbildung 6.1: Das DFNK-Clearinghouse: Beispiel einer Recherche nach Pegelmessstationen und Wasserstandsdaten am Rhein

dem DFNK muss frühzeitig und auf allen Ebenen erfolgen, um durch die Projektgemeinschaft angenommen zu werden. Die Einführung infrastruktureller Leistungen erfordert die Akzeptanz und Beteiligung einer Vielzahl verteilter Partner. Eine solche Einführung gestaltet sich nach fortgeschrittener Projektlaufzeit

schwierig, da dann bereits etablierte Arbeitsweisen umstrukturiert werden müssen.

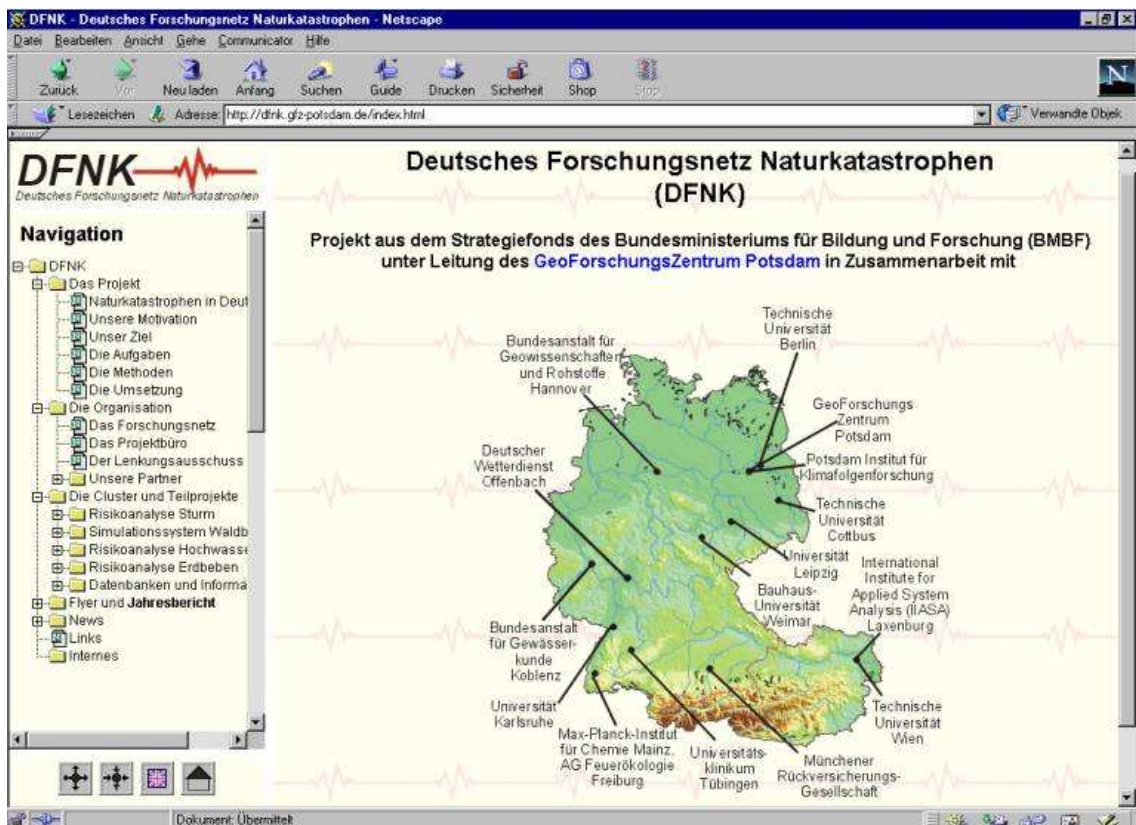


Abbildung 6.2: Web-Portal des DFNK, die zentrale Drehscheibe für Daten- und Informationsmanagement und Außendarstellung

6.2.6 Übertragbarkeit und Praxisrelevanz

Der Aufbau von Informationsinfrastrukturen ist relevant für vielfältige Fragestellungen, die in Netzwerken bearbeitet werden und abhängig sind von einem umfassenden Zugang zu relevanten Daten und Informationen und deren einrichtungsübergreifendem Austausch. Die Erfahrungen im DFNK haben Potentiale für zahlreiche Anwendungen aufgezeigt. Auch aus technologischer Sicht ist die Übertragbarkeit durch die Gründung der Arbeiten auf anerkannten Standards und Richtlinien aus dem Bereich der Geodateninfrastrukturen ohne weiteres gewährleistet. So wird eine vergleichbare, jedoch erweiterte Informationsinfrastruktur zurzeit im Rahmen des „Centers for Disaster Management and Risk Reduction Technology“ aufgebaut (Köhler 2003). CEDIM ist eine gemeinschaftliche Einrich-

tung des GFZ und der Universität Karlsruhe, die im Dezember 2002 gegründet wurde. Der Aufbau einer Informationsinfrastruktur hat hier einen hohen Stellenwert bereits zu Beginn der Projektarbeiten erhalten und einige Leistungen konnten bereits erfolgreich und unter allgemeiner Akzeptanz eingebracht werden.

6.2.7 Offene Fragen

Die Einsatzfelder von Methoden, Informations- sowie Softwareprodukten im Katastrophenmanagement reichen von der Darstellung von Schadensszenarien und daraus ableitbaren Aktionsplänen über den örtlichen Einsatz bei Katastrophenstäben bis hin zur Unterstützung von Hilfsmannschaften vor Ort und der Nachbearbeitung von Extremereignissen. Der Erfolg der jeweiligen

Mission steht und fällt dabei mit dem problemorientierten Informationsfluss. Integrierende und offene Systeme sowie harmonisierte Datenbasen sind somit Voraussetzung für ein effektives Risikomanagement und gewinnen durch das zunehmende Angebot ausgereifter technologischer Möglichkeiten an Bedeutung.

Ein umfassender Überblick über bestehende Lösungen existiert jedoch bislang nicht. Eine systematische Bestandsaufnahme über Methoden und Werkzeuge im deutschen Katastrophenmanagement kann im Rahmen von Forschungsverbänden wie dem DFNK erarbeitet werden und die Grundlage bilden zur Abschätzung von Potentialen zukünftiger Entwicklungen und zu deren Integration und Förderung. Eine verstärkte Zusammenarbeit mit Anwendern sowie Partnern aus der Wirtschaft ist dabei unbedingt erforderlich, um entsprechende Konzepte und Know-how in die Praxis zu bringen.

Im Zuge des Aufbaus der Geodateninfrastruktur Deutschland (GDI-DE) durch den Interministeriellen Ausschuss für Geoinformationswesen (IMAGI) waren Wissenschaft und Forschung bislang nur wenig integriert, obgleich Institutionen und Projekte wie beispielsweise das Deutsche Forschungsnetz Naturkatastrophen als Betreiber wertvoller Datenbestände und als Träger entsprechenden Know-hows anerkannt sind. Der Aufbau von Geodateninfrastrukturen wird im Bereich der Wissenschaft noch kaum wahrgenommen, und eine Integration wissenschaftlicher Daten- bzw. Metadatenbestände in die Bundesaktivitäten ist noch ungeklärt.

6.2.8 Literatur

Braune, S., Kalmes P., Mie F., Braun P., Wächter J. (2001a): Das Clearinghouse zur Integration der Datenbestände im DFNK. Tagungsband Zweites Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, S. 364-371

Braune S., Czegka W., Mie F. (2001b): Einsatz von Metaserver und GeoLocator in online GeoInformations-Systemen im Rahmen des Projektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK). Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 4/2001, S. 431-438

Köhler P., Lochter F., Häner R. (2003): Entwicklung eines Brandenburgischen Metadatenprofils der ISO 19115 und dessen Umsetzung am Beispiel des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen und des behördlichen Produktvertriebs. Umweltdatenbanken - Nutzung von Metadaten und Standards, UBA-Texte 54/03, S. 19-44

Köhler P. (2003): Development of an open information infrastructure for disaster research: Results and prospects from DFNK and CEDIM. The Information Society and Enlargement of the European Union, Umwelt-Informatik aktuell Vol. 31 Part 1, p. 438-445

Wächter J., Kalmes P. (2001): Potenziale ausnutzen - Neue Technologien für ein integriertes Katastrophen-Management. Wirtschaftsschutz und Sicherheitstechnik, 8-9/2001, S. 36-38

6.3 Aufbau eines Erdbeben-Informationssystems für Deutschland

Nicolai Gestermann, Manfred Henger, Ulrich Hunfeld, Agneta Schick, Jörn Flebbe
und Erwin Hinz

*Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover
Seismic Data Analysis Center - Deutsches Nationales Datenzentrum NDC
Email: nico@sdac.hannover.bgr.de*

TP C5: Aufbau eines schnellen Informationssystems für Erdbeben in Deutschland und benachbarten Ländern

6.3.1 Zusammenfassung

TP C5 hatte die Entwicklung eines Erdbeben-Informationssystems zum Ziel. Unmittelbar nach einem starken Beben innerhalb Deutschlands, sowie in Grenznähe auch außerhalb, sollten möglichst umfassende und zuverlässige Informationen über das Ereignis ermittelt und interessierten Institutionen bereitgestellt werden. Das Informationssystem setzt sich aus den folgenden Einzelkomponenten zusammen: Einem Netz aus Seismometerstationen an Standorten mit niedrigem Bodenunruhepegel und wenigen seismischen Störsignalen, einem Kommunikationssystem, das Daten in nahezu Echtzeit an ein zentrales Erfassungs- und Verarbeitungssystem überträgt, einer leistungsfähigen Software zur schnellen und zuverlässigen Datenbearbeitung, Schnittstellen zu Kommunikationseinrichtungen (Internet, SMS, E-Mail, Fax) zur Verbreitung eventueller Alarmmeldungen und einem graphischen Informationssystem, das detaillierte Informationen über die Herdregion des Schadenbebens und über die mögliche Schadenwirkung liefert. Zwei neue Stationen wurden nordöstlich von Hannover und bei Bad Hersfeld errichtet, um ausgewählte Stationen des GRSN (German Regional Seismic Network) zu einem geeigneten Stationsnetz mit insgesamt sieben Stationen zu ergänzen. An den neuen Stationen wurden verschiedene Techniken der Datenübertragung erprobt. Das nunmehr angewandte Verfahren basiert auf einem Kommunikationsprotokoll, das über eine Internetverbindung per ISDN die parallele Übertragung aktueller und älterer Daten nach einer Unterbrechung der Datenverbindung ermöglicht und dadurch einen schnellen Zugriff auf aktuelle Daten sicherstellt. Um bei dem Stationsnetz mit nur sieben Stationen die Zielvorgaben im Hinblick auf Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Auswertergebnisse erfüllen zu können, kommt der Verarbeitung der seismischen Messdaten besonderes Gewicht zu. Neben verbesserten Verfahren zur Phasenidentifikation wurde ein weiterer Schwerpunkt auf die Entwicklung von Konsistenzprüfungen gelegt. Hiermit ist die Bewertung der Ergebnisse zum besseren Erkennen von Fehlern bei der Datenbearbeitung möglich. Für die graphische Darstellung der Ergebnisse wurde mit der Entwicklung eines Graphischen Informationssystems begonnen, welches die Schnittstelle zu den Nutzern darstellt. Auf verschiedenen topographischen und geologischen Karten wird die Lage des Erdbebens und ergänzende Informationen über historische Erdbeben, seismische Stationen, Bergwerke, Steinbrüche, Gas- und Erdölfelder sowie geologische Störungszonen dargestellt.

Abstract

The objective of C5 is the development of an earthquake information system. Comprehensive and reliable data should be available immediately after an earthquake in Germany and adjacent areas. The information system consists of the following main components: (a) a seismometer network at selected sites with low noise and with a minimum number of disturbing signals from man-made activities; (b) a communication system which allows near real-time transmission of waveform data to a central data recording and processing system; (c) powerful processing software for rapid event location; (d) an interface to communication facilities, such as internet, SMS, e-mail and fax for the distribution of alert messages; and (e) a graphic information system which allows detailed information on the epicenter region and on potential damage to be displayed. Two new seismic stations have been built northeast of Hannover and close to Bad Hersfeld to supplement selected stations of the GRSN (German Regional Seismic Network) to make up a network of seven stations. Several techniques for data transfer were tested at the new stations. The currently implemented method is based on a communication protocol which allows, in case of an interruption, simultaneous transmission of most recent and earlier waveform data via an ISDN internet connection. This protocol ensures immediate access to the most current data. With a network of only seven stations, data processing is the most important element of the information system. The drawback of having only seven stations is compensated by sophisticated software which makes use of improved procedures for seismic phase identification and consistency checks. These methods make it possible to recognize errors in the processing of the data, minimizing the number of erroneous epicenter locations. A graphic information system has been developed for display of results. This system acts as an interface for the users. The epicenter of an earthquake can be plotted on topographical and geological maps together with additional information such as historical earthquakes, seismic stations, mines, quarries, oil and gas fields, as well as geological fault zones.

6.3.2 Veranlassung und Problem

Obwohl die Bundesrepublik nicht zu den von schweren Erdbeben häufig betroffenen Ländern gehört, treten in bestimmten Regionen wie dem gesamten Rheintalgraben, der Schwäbischen Alb oder im Vogtland immer wieder schadenverursachende Erdbeben auf. Die Vorschriften für den Bau von Gebäuden und Industrieanlagen in diesen Regionen haben dazu beigetragen, dass Erdbeben in der jüngeren Vergangenheit keine katastrophalen Folgen hatten, obwohl solche Naturereignisse in der Zukunft nicht ausgeschlossen werden können. Bei dem Erdbeben am 13. April 1992 nahe Roermond in der Niederrheinischen Bucht wurden mehr als 500 Gebäude beschädigt und der Schaden wurde von den Versicherungen auf weit über 100 Mio. € beziffert. Paläoseismo-

logische Untersuchungen in der Niederrheinischen Bucht haben Hinweise ergeben, dass im Rurtaigraben ein Erdbeben mit der Moment-Magnitude $M_w=6.3$ stattgefunden haben könnte (Camelbeeck & Meghraoui 1998). Die Auswirkungen eines solchen Erdbebens nahe Köln wären verheerend. Allerdings treten Beben dieser Stärke in Deutschland sehr selten auf. So gibt Ahorner (2001) für ein Beben der Magnitude $M_w=6.3$ im Großraum Köln eine Wiederkehrperiode von etwa 4900 Jahren an.

Die Implementierung eines Frühwarnsystems, welches Informationen noch vor dem Eintreffen der zerstörenden seismischen Wellen liefert, wäre wegen der geographischen Verteilung der Beben und der großen Anzahl der zu schützenden Orte und Städte in den seismisch aktiven Zonen in Deutschland wenig sinnvoll und extrem kostspielig. Zudem wäre

wegen der geringen Auftrittswahrscheinlichkeit starker Beben der Aufwand im Verhältnis zum Nutzen nicht zu rechtfertigen. Mit dem nachfolgend beschriebenen Erdbeben-Informationssystem wird versucht, der seismischen Situation in Deutschland gerecht zu werden.

6.3.3 Ziel

Das in TP C5 entwickelte System zielt darauf ab, unmittelbar nach einem Beben zuverlässige Daten zu liefern, um die Öffentlichkeit objektiv über das Ereignis informieren und gegebenenfalls in den sehr seltenen Fällen, gezielt Hilfsmaßnahmen einleiten zu können. Neben den Angaben, wo und wann sich das Erdbeben ereignet hat, sollen Angaben zur Stärke, Ausdehnung des Schütterbereichs und Angaben über potenzielle Schäden in der Herdregion geliefert werden.

Neben den wenigen starken Erdbeben führen oft auch kleinere Ereignisse, die keine nennenswerten Schäden verursachen, in den betroffenen Gebieten zu einer erheblichen Verunsicherung der Bevölkerung. Einrichtungen, wie Polizei, Feuerwehr oder Lagezentren der Innenministerien sind durch den Informationsbedarf der Bevölkerung oft überfordert, da ihnen selbst keine verlässlichen Informationen vorliegen. Auch hier kann ein Erdbeben-Informationssystem die erforderlichen Daten liefern, um ein objektives Bild eines Erbebens zu vermitteln und dazu beitragen, die Situation zu beruhigen.

Diese Ziele verdeutlichen, dass das Erdbeben-Informationssystem sehr zuverlässig arbeiten muss, um die Anforderungen und Erwartungen zu erfüllen. Schon wenige falsche Angaben reichen aus, um die Akzeptanz des Systems zu erschweren.

6.3.4 Ergebnisse

Seismisches Messnetz

Die geographische Verteilung sowie Anzahl, Zuverlässigkeit und Datenqualität der verfügbaren Seismometerstationen sind entscheidend für das Leistungsvermögen des zu entwickelnden Erdbeben-Informationssystems. Aus Kostengründen stand von Beginn an die Einrichtung eines speziellen Netzes seismischer Stationen für das Informationssystem nicht zur Debatte. Vielmehr sollte die Infrastruktur vorhandener Seismometerstationen genutzt, den Bedürfnissen angepasst und falls notwendig um 1-2 Stationen ergänzt werden.

Aus Gründen der geographischen Verteilung, der technischen Ausstattung und der universellen Nutzbarkeit boten sich die Stationen des GRSN (German Regional Seismic Network) als Messeinrichtung für das zu entwickelnde Erdbeben-Informationssystem an. Da generell nur Ereignisse mit einer Magnitude von 3.0 und höher von Interesse sind, spielt die Detektionsfähigkeit des Messnetzes keine entscheidende Rolle. Vielmehr stehen bei der Auswahl geeigneter Stationen Faktoren wie die Überdeckung des interessierenden Gebietes, geringe Anzahl an Störsignalen durch künstliche Quellen (Verkehr, Industrie, etc.) und die Ausfallsicherheit im Vordergrund.

Eine wirkungsvolle Methode, um die Lokalisierungsgenauigkeit eines Stationsnetzes zu bewerten, ist der Grad der Überdeckung. Je mehr Stationen im Umfeld möglichst gleichmäßig um den Erdbebenherd verteilt sind, umso genauer kann das Epizentrum bestimmt werden. Das zur Berechnung verwendete Geschwindigkeitsmodell spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Als Maß zur quantitativen Erfassung des Überdeckungsgrades dient der größte Winkel, den zwei das Epizentrum umgebende benachbarte Stationen mit dem Epizentrum einschließen, wie in Abb. 6.3 an zwei Beispielen skizziert wird. Je kleiner dieser Winkel ist, der im Englischen als „gap“ bezeichnet wird, desto höher ist der Grad der

Stationsüberdeckung und damit die Lokalisierungsgenauigkeit.

Werden zunächst nur die GRSN-Stationen mit der besten Datenqualität bei möglichst hoher Überdeckung der Bundesrepublik ausgewählt, so erfüllen nur sieben Stationen des GRSN die Anforderungen: BFO, TNS, GRFO, WET, MOX, BRG, CLL und CLZ. Bei den übrigen GRSN-Stationen ist entweder der Unruhepegel zu hoch oder die Anzahl der Störungen durch künstliche Quellen zu groß. Die Verteilung des „gap“ für die am besten geeigneten GRSN-Stationen ist in Karte 1 der Abb. 6.4 dargestellt. Werte unterhalb 120 Grad werden bei dieser Stationsverteilung nur in einem kleinen Gebiet erreicht.

Um diese Situation zu verbessern, wurde das Netz um die Stationen NRDL, UBBA und die GRSN-kompatible Breitbandstation des GERESS-Arrays erweitert. Während GERESS bereits existierte und als empfindlichstes Registriersystem in Mitteleuropa die gestellten Anforderungen erfüllt, sind die Standorte der Stationen NRDL und UBBA das Ergebnis sorgfältiger Erkundungsmessungen, die im Rahmen dieses Projektes erfolgten und zur Errichtung und Inbetriebnahme dieser Stationen führten. Unter Einbeziehung dieser drei Stationen wird eine deutliche Verbesserung, wie in Karte 2 der Abb. 6.4 dargestellt, erreicht. Die dritte Karte in Abb. 6.4 zeigt den Überdeckungsgrad für ein Netz, dessen Realisierung angestrebt wird. Es umfasst wiederum sieben Stationen bestehend aus den GRSN-Stationen BRG, BFO, dem GERESS Array, den neuen Stationen NRDL und UBBA sowie zwei neuen Stationen im Westen und Süden. Dieses Stationsnetz führt erneut zu einer Verbesserung der Überdeckung der Bundesrepublik und wird nachfolgend als Primärnetz bezeichnet (Abb. 6.5). Es ist geplant, die beiden zusätzlichen Stationen innerhalb des nächsten Jahres in Zusammenarbeit mit den betreffenden Landesämtern bzw. geophysikalischen Universitätsinstituten zu errichten, um das Stationsnetz zu komplettieren und hinsichtlich seiner

Aufgabenstellung als Basis eines Erdbeben-Informationssystems zu optimieren.

Auch auf die Daten der übrigen GRSN-Stationen wird nicht verzichtet. Diese Stationen werden dazu genutzt, gegebenenfalls Ausfälle einzelner Stationen des Primärnetzes zu kompensieren und dessen Redundanz zu erhöhen. Darüber hinaus werden diese Daten zur weiteren Verbesserung der mit dem Primärssystem ermittelten Herdparameter herangezogen.

Neue Stationen

Um das vorhandene Stationsnetz zu ergänzen und neue Techniken der Datenerfassung und Datenübertragung zu testen, wurden im Rahmen des Projektes zwei neue seismische Stationen NRDL (Niedersachsen Riedel) und UBBA (Unterbreizbach) aufgebaut und installiert.

Die Station NRDL befindet sich in dem stillgelegten Kali-Bergwerk Niedersachsen Riedel (Abb. 6.7) nordöstlich von Hannover. Für das Erdbeben-Informationssystem kommt dieser Station besondere Bedeutung zu, da im gesamten norddeutschen Raum keine weitere Station mit ähnlich günstigen Unruhebedingungen existiert. Die zweite neue Station UBBA wurde im Bergwerk Unterbreizbach (Abb. 6.7) in der Nähe von Bad Hersfeld aufgebaut. Diese Station liegt praktisch in der Mitte Deutschlands und zeichnet sich ebenfalls durch günstige Unruhebedingungen aus. Vor allem die geringe Anzahl der durch künstliche Quellen (Industrie, Verkehr, etc.) hervorgerufenen Störungen in den Daten reduziert die Anzahl von Falschalarmen bei der automatischen Auswertung und trägt daher wesentlich zur Zuverlässigkeit der Ergebnisse bei.

Bei der Entwicklung der Hard- und Software für die Stationen wurde nach einer kostengünstigen Realisierung einer den GRSN-Stationen kompatiblen Lösung gesucht, die zudem flexibel und modular aufgebaut ist, um problemlos eine Anpassung an die örtlichen Standortgegebenheiten vornehmen zu

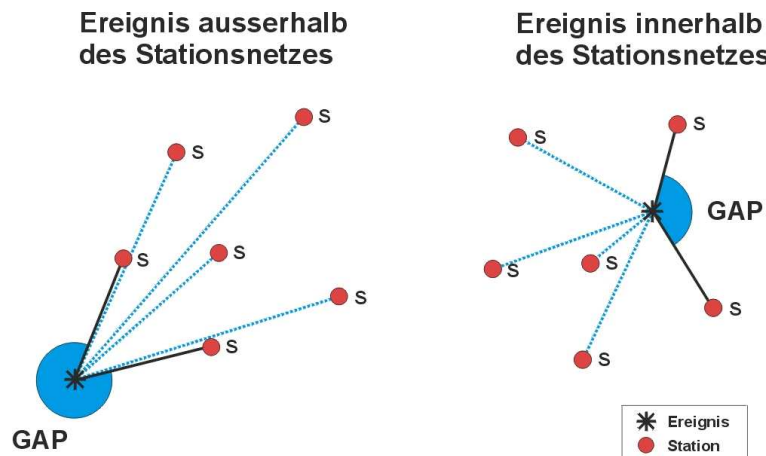


Abbildung 6.3: Darstellung des „gap“ für die Epizentren von zwei Ereignissen relativ zu einem Stationsnetz.

können. Da an den in Bergwerken installierten Stationen in der Regel größere Entfernungen zwischen dem eigentlichen Seismometerstandort und den Schnittstellen zu Telefon und Stromversorgung zu überbrücken sind, wurde die Station in zwei Baugruppen unterteilt (Abb. 6.6). Der aus Seismometer und Datenerfassungseinheit bestehende Teil wird von dem zentralen System mit Schwachstrom versorgt und kann somit völlig autark an jeder geeigneten Stelle, ohne zusätzliche Infrastruktur, installiert werden.

An den neuen Stationen NRDL und UBBA wurde das in Abb. 6.6 gezeigte Konzept erfolgreich realisiert. Die Stationszentrale, die im Fall von NRDL in einem Versorgungsgebäude des Bergwerks über Tage untergebracht ist, besteht aus einem PC mit dem Betriebssystem Linux, der die gesamte Infrastruktur bereitstellt und eine Zwischenspeicherung der Daten in einem Ringspeicher (Disk Loop) vornimmt. Das Datenerfassungssystem mit dem Seismometer unter Tage ist bei der Station NRDL über RS232-RS485 Konverter und bei UBBA über Modems mit der jeweiligen Stationszentrale über Tage verbunden. Über diese Kommunikationswege werden die Wellenformdaten sowie das Zeitsignal zur Synchronisation der Station und Steuersignale übertragen. Mit den eingesetzten Converttern bzw. Modems lassen sich Entfernungen von mehr

als 7 km zwischen Zentralsystem und Datenerfassungssystem überbrücken.

Über den Telefonanschluss kann die Stromversorgung der Datenerfassungseinheit und des PCs geschaltet werden, um im Bedarfsfall einen Neustart zu erzeugen. Die Stromversorgung der Station ist mit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) gegen Stromausfälle abgesichert, um eine möglichst hohe Datenverfügbarkeit zu gewährleisten.

Kommunikation zur Übertragung der Messdaten

Um der Anforderung an das Informationssystem nach möglichst aktuellen Daten über ein Ereignis zu genügen, ist die direkte Anbindung der Stationen des Primärnetzes an die Datenzentrale ebenso erforderlich wie eine quasi-kontinuierliche Datenübertragung in nahezu Echtzeit. Zu Beginn des Projekts wurden die Möglichkeiten, diese Anforderungen zu erfüllen, auf ihre Machbarkeit und Finanzierbarkeit hin untersucht. Die in Betracht kommenden Verfahren reichen von Point-To-Point (PtoP) ISDN-Verbindungen bis zu Satellitenübertragungen zu einem zentralen Netzknoten, von wo aus die gesammelten Daten an das Datenzentrum gesendet werden.

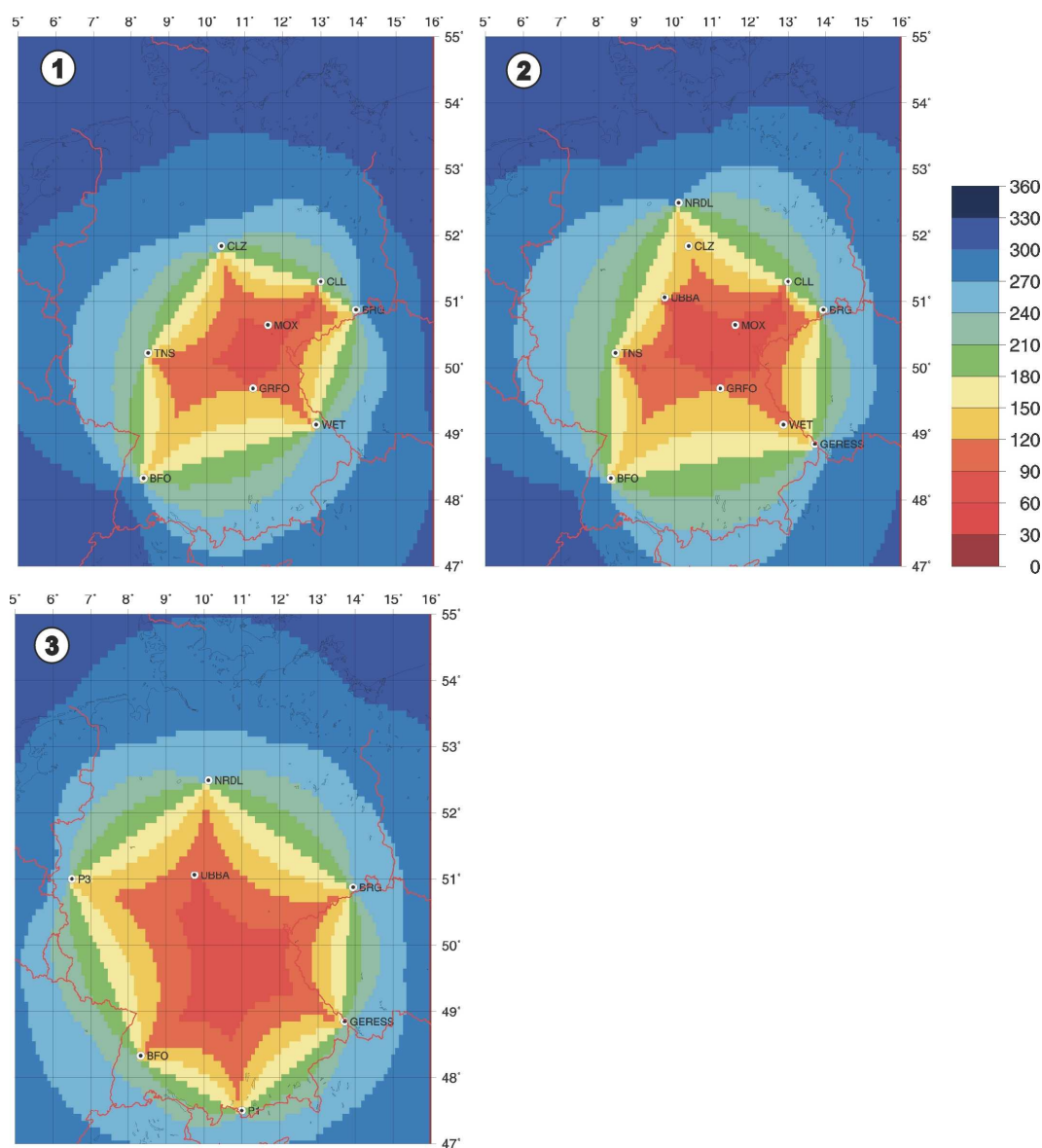


Abbildung 6.4: Verteilung des „gap“ (in Grad) für verschiedene Stationsverteilungen. In Karte 1 werden ausgewählte Stationen des GRSN berücksichtigt. In Karte 2 ist dieses Stationsnetz um GERESS und die neuen Stationen NRDL und UBBA erweitert. Karte 3 zeigt die Verteilung des „gap“ für das angestrebte Stationsnetz mit insgesamt sieben Stationen.

Das ausgewählte Konzept für die Datenkommunikation musste mehrmals revidiert werden, da geeignete Produkte wie z.B. die „T-Online Flatrate“ kurzfristig vom Markt genommen wurden. Insgesamt war der Kommunikationsbereich speziell während der letzten drei Jahre von kurzlebigen Entwicklungen geprägt. Dadurch ergaben sich zwar viele neue Möglichkeiten, aber auch das Problem, dass

die notwendige Kontinuität der angebotenen Produkte nicht gewährleistet wurde.

Die Übertragung der Wellenformdaten über die Einwahl der Station ins Internet mittels eines geeigneten Anbieters erwies sich letztendlich als die kostengünstigste und zuverlässigste Methode. Diese favorisierte Übertragungstechnik basiert auf ISDN. Eine DSL-Verbindung wäre noch kostengünstiger gewe-

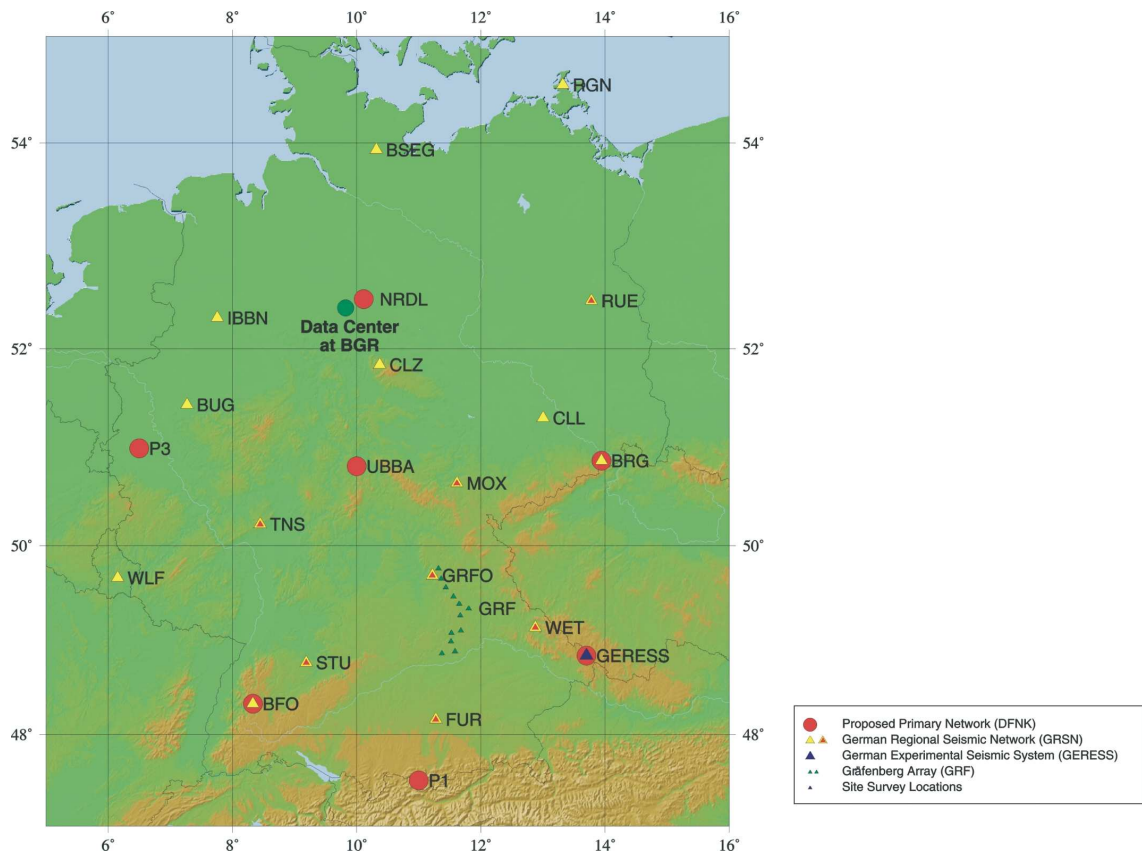


Abbildung 6.5: Die Karte zeigt die angestrebte Konfiguration des primären Stationsnetzes für das Erdbeben-Informationssystem (rote Punkte). Ebenfalls eingetragen sind die Stationen des GRSN und des Gräfenberg Arrays. An den rot markierten Stationen ist bereits die SeedLink Software für die kontinuierliche Datenübertragung installiert.

sen, da hierfür ein Pauschaltarif (Flatrate) für die Internetanbindung angeboten wird. Die DSL-Technologie steht jedoch an den Standorten bislang nicht zur Verfügung. Als Provider wurde aus Gründen der Planungssicherheit T-Online ausgewählt.

Zur Übertragung der Daten wurde bei den neuen Stationen das CD-1 Protokoll implementiert (Abb. 6.8), das speziell für die schnelle und kontinuierliche Datenübertragung von Seismometerstationen entwickelt wurde, die an der Überwachung des Kernwaffenteststoppvertrags mitwirken. Gegenüber SeedLink, einem Kommunikationsprotokoll, welches bei den GRSN-Stationen eingesetzt wird, besitzt CD-1 mehrere entscheidende Vorteile. Die Übertragung nach dem Lifo-Prinzip (last in first out) stellt sicher, dass direkt nach ei-

ner Unterbrechung der Kommunikationswege wieder aktuelle Daten zur Verfügung stehen. Dadurch treten keine unnötigen Verzögerungen bei der Datenauswertung auf. Bei der Internet-Einwahl über entsprechende Provider wird der Station eine dynamische IP-Adresse vergeben, die bei jeder Einwahl wechselt. Beim CD-1 Protokoll wird die Übertragung der Daten von der Station aus initiiert. Der Austausch der IP-Adresse der Station ist bereits im Protokoll integriert und bedarf gegenüber SeedLink keiner weiteren Programme.

Die Software zur Datenübertragung ermöglicht ohne spezielle Anpassungen sowohl einen kontinuierlichen Datenfluss im Fall einer Standleitung, als auch eine Übertragung der Daten in Zeitsegmenten. Allein die Verfügbar-

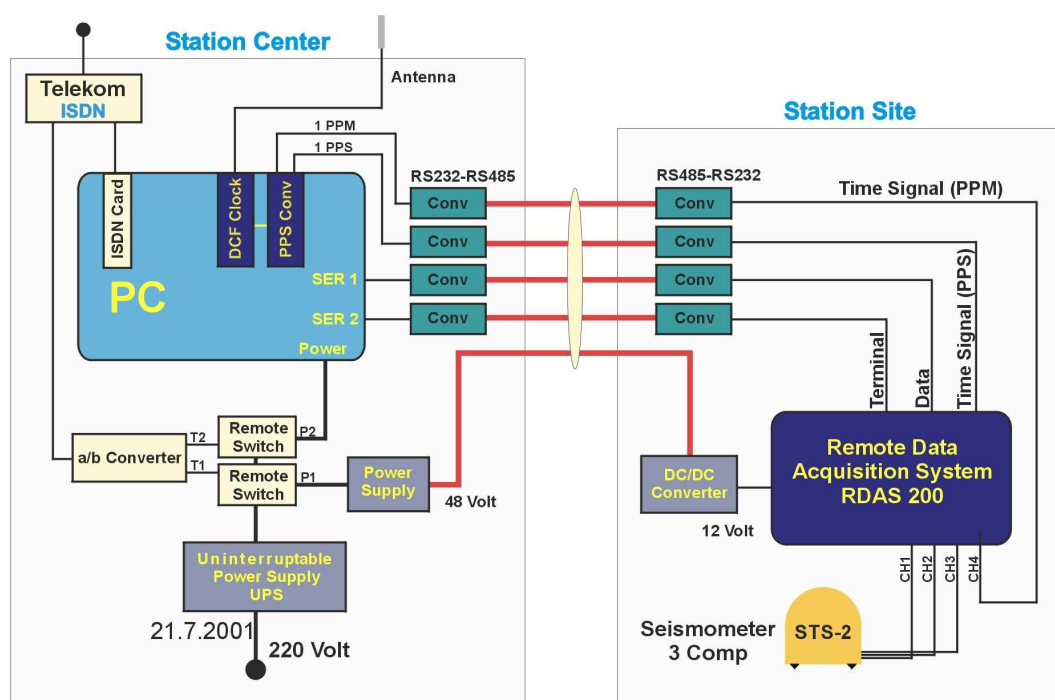


Abbildung 6.6: Hardware-Komponenten der Station NRDL im Bergwerk Niedersachsen Riedel. Der Aufbau besteht aus zwei Teilen. Die rechte Seite mit dem Seismometer und dem Datenerfassungsgerät beschreibt den Teil des Aufbaus unter Tage. Er benötigt keine eigene Infrastruktur.



Abbildung 6.7: Seismometer-Standorte (unter Tage) an den Stationen NRDL (links) und UBBA (rechts). Die Seismometerabdeckung zur Verringerung von Unruhe durch Temperaturschwankungen und Konvektion ist an der Station NRDL entfernt.

keit der Kommunikationsverbindung zur Zentrale bestimmt beim CD-1 Protokoll die Art der Übertragung.

Software zur automatischen Datenbearbeitung

Obwohl die Seismometerstationen des Primärnetzes das Gebiet der Bundesrepublik relativ gut abdecken, ist nicht zu verkennen, dass dieses Netz eine geringe Dichte aufweist. Um dennoch sicherzustellen, dass die Zielvor-

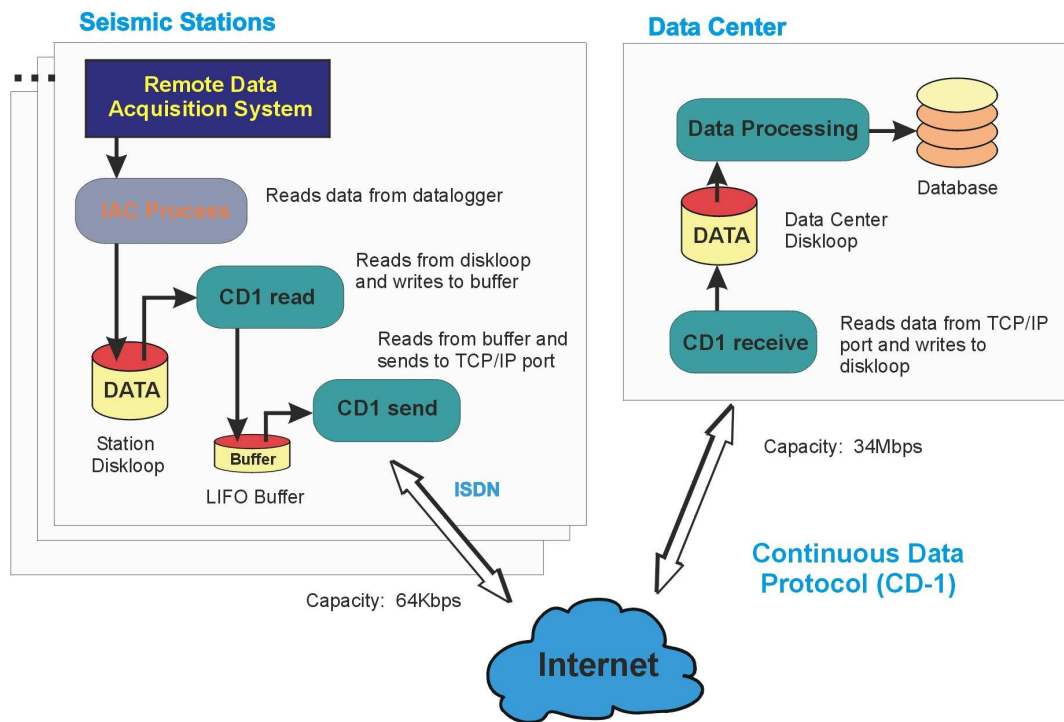


Abbildung 6.8: Software-Komponenten der Datenerfassung und Datenübertragung zwischen den neuen Stationen NRDL bzw. UBBA und dem Datenzentrum in der BGR.

gaben hinsichtlich Lokalisierungsgenauigkeit und Zuverlässigkeit erreicht werden, so dass es keine Fehlalarme gibt, ist bei der Datenbearbeitung und automatischen Datenanalyse ein weitaus höherer Aufwand als bei einem vergleichsweise dichten Netz mit vielen Stationen erforderlich.

Eine Übersicht über die einzelnen Schritte bei der Auswertung der Wellenformdaten gibt Abb. 6.9. Im ersten Schritt werden die Einsätze in den Daten mittels eines Murdock-Hutt Detektors ermittelt. Bei der anschließenden Phasenidentifikation wird anhand verschiedener Verfahren der Phasen-Typ des Einsatzes bestimmt, so dass im anschließenden Prozess die zu einem Ereignis gehörenden Phasen assoziiert werden können. Die mit diesen Informationen durchgeführte Lokalisierung kann Fehler enthalten. Um diese zu erkennen, schließen sich mehrere Konsistenzprüfungen an. Unter Einbeziehung aller Ergebnisse der Datenbearbeitung wird die Qualität der Auswertung abgeschätzt und je nach Ergebnis die Auswer-

tung mit veränderten Parametern wiederholt. Die Arbeiten in dem Projekt konzentrieren sich vor allem auf die Bereiche Phasenidentifikation und Phasenassoziation sowie Verfahren zur Konsistenzprüfung.

Fehler treten bei automatischer Lokalisierung im lokalen und regionalen Entfernungsbereich überwiegend durch falsche Identifikationen einzelner Phasen der von den eingesetzten Detektoren gefundenen Einsätze auf. Dieses Ergebnis überrascht nicht, da bei Einzelstationen, im Gegensatz zu Arrays, die Phasengeschwindigkeit als zuverlässiger Indikator für die Phaseninterpretation fehlt. Aber auch bei der Auswertung der Array-Daten von GERESS, die Phasengeschwindigkeit und das Backazimut detektierter seismischer Signale mittels einer Frequenz-Wellenzahl-Analyse liefert, sind Fehler möglich. Schwierigkeiten ergeben sich aus den nicht ausreichend voneinander getrennten Geschwindigkeitsbereichen der seismischen Phasen und bei kurz aufeinander folgenden Ereignissen aus ähnlichen Richtungen.

Eine Zuordnung der Phasen zu dem jeweiligen Ereignis ist in diesen Fällen nicht mehr möglich.

Da keine Methode allein die Phasenidentifikation zuverlässig ermöglicht, sieht das Konzept die gleichzeitige Anwendung verschiedener Verfahren vor. Neben der bereits erwähnten Frequenz-Wellenzahl-Analyse für Arraydaten wurde für die Einzelstationen eine Methode getestet, bei der die Ähnlichkeit zwischen vorgegebenen Mustersignalen und der Seismogramm-Einhüllenden berechnet wird. Der Korrelationsfaktor wird dann als Qualitätsmaß für die Phasenidentifikation verwendet. Die von den Mustersignalen stammenden Einsätze können so auf ermittelte Detektionen übertragen werden. Mit Hilfe dieses Verfahrens lassen sich auch kurze Störsignale identifizieren und aus der weiteren Auswertung eliminieren. Des Weiteren sollen eine Polarisationsanalyse und Verfahren, die Unterschiede im Signal-Spektrum von P- und S-Phasen nutzen, getestet werden.

Wenn die zeitliche Korrelation der Einsätze an mindestens drei Stationen prinzipiell möglich ist, werden die entsprechenden Phasen für die anschließende Lokalisierung assoziiert. Im ersten Schritt erfolgt eine Lokalisierung mittels eines Grid-Search-Algorithmus. Der Vorteil dieses Verfahrens ist die Robustheit des Ergebnisses, allerdings mit Nachteilen bei der Genauigkeit. Um die Genauigkeit der Epizentrumsbestimmung zu verbessern, wird mit diesem Ergebnis als Startlösung mit dem Programm „HYPOSAT“ (Schweitzer 2001) eine erneute Lokalisierung durchgeführt.

Mit Hilfe der Konsistenzprüfungen lässt sich die Qualität der automatischen Epizentrumsbestimmung abschätzen und so mögliche Fehler bei der Lokalisierung erkennen. Zum Einsatz kommen verschiedene Verfahren, die das Ergebnis anhand der berechneten Magnitudenwerte, sowie nach räumlichen und zeitlichen Kriterien untersuchen.

Die Residuen der ermittelten Phasen-Einsätze in Bezug auf das theoretische Laufzeit-

modell liefern die Ausgangsdaten für zeitliche Konsistenzprüfungen. Einzelne falsch assoziierte Einsätze oder eine fehlerhafte Phasen-Interpretation werden damit zuverlässig erkannt. Bei den Magnituden-Konsistenzprüfungen wird untersucht, ob das an einer Station gemessene Signal auf Grund seiner Amplituden zu dem jeweiligen Ereignis gehören kann. Eine fehlerhafte Assoziation von gemessenen Einsätzen kann sich z.B. durch stark unterschiedliche Magnitudenwerte oder durch physikalisch nicht sinnvolle Absolutwerte bemerkbar machen. Die entwickelten numerischen Verfahren ermöglichen die automatische Bewertung dieser Ergebnisse.

Für die Konsistenzprüfung nach räumlichen Kriterien wird unter Berücksichtigung der Empfindlichkeit und der Verteilung der Stationen, die zur Lokalisierung beigetragen haben, anhand eines numerischen Verfahrens ein Konsistenzmaß C_p berechnet. Liegt das berechnete Epizentrum innerhalb eines Gebietes mit kleinem C_p -Wert, so bedeutet dies, dass Signale des entsprechenden Ereignisses an einigen Stationen hätten registriert werden müssen, falls die Lokalisierung zutreffend ist, dort aber nicht detektiert wurden – ein zuverlässiger Hinweis auf eine fehlerhafte Auswertung.

Unter Einbeziehung aller Konsistenzparameter wird in einem regelbasierten System eine Entscheidung über die Qualität des berechneten Epizentrums getroffen. Je nach Ergebnis dieser Untersuchung wird eine erneute Auswertung der Wellenformdaten mit veränderten Parametern durchgeführt oder das Ergebnis verworfen.

Dieser wichtige aber sehr umfangreiche Teil des Projekts konnte während der Projektlaufzeit nicht abschließend bearbeitet werden. Wesentliche Teilbereiche der Auswertesoftware wurden aber realisiert. An einer geschlossenen Lösung für diese Software wird weiter gearbeitet.

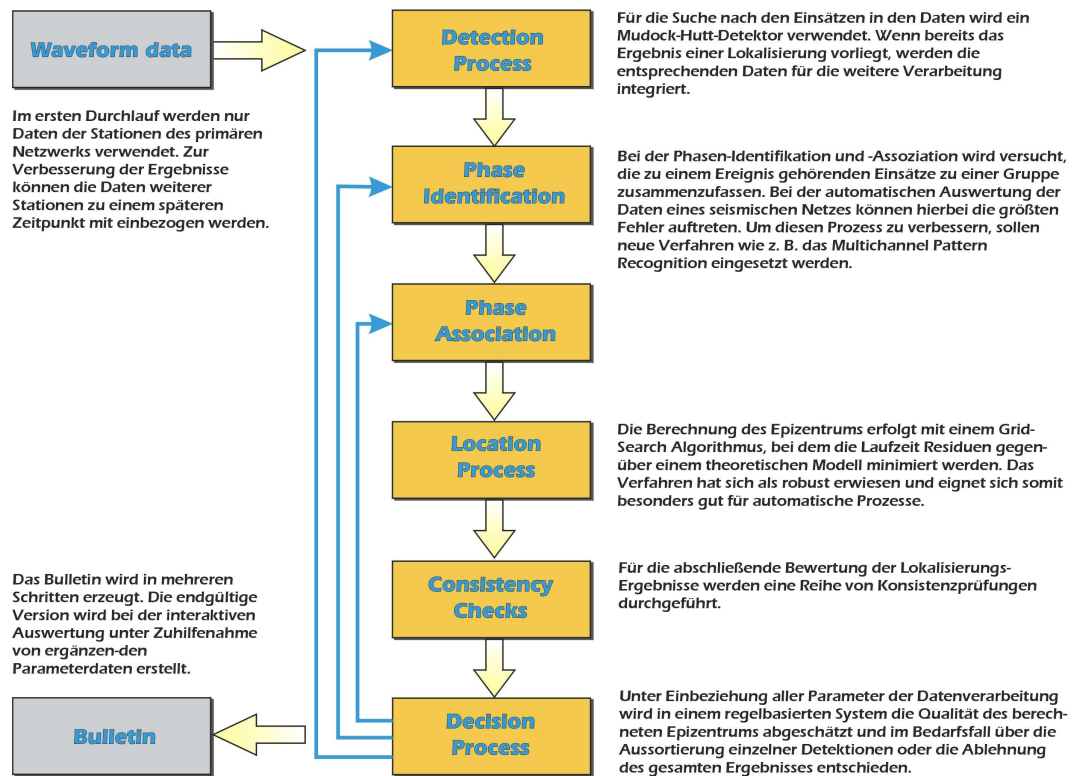


Abbildung 6.9: Übersicht über die Prozesse bei der Bearbeitung der Wellenformdaten

Informationsdienste

Um die Informationen des Erdbeben-Informationssystems potenziellen Interessenten zu übermitteln, werden verschiedene Techniken eingesetzt, die sowohl nach dem so genannten Pull-Prinzip als auch dem Push-Prinzip arbeiten. Welche Methode angewendet wird, hängt vom jeweiligen Empfänger und von der zu übermittelnden Information ab.

Informationen über ein aktuelles Erdbeben, das von dem Primärnetz aufgezeichnet und von der Analysesoftware lokalisiert wurde, können per SMS an mobile Telefone und per E-Mail (Push-Prinzip) an vorher festgelegte Empfänger übertragen werden. Diese Meldungen werden jedoch nur dann generiert, wenn bestimmte Kriterien hinsichtlich der Stärke des Bebens sowie der Lage des Epizentrums erfüllt sind. Für die Magnitude wurden Werte von $M_L \geq 3.0$ innerhalb des Gebiets mit den geographischen Koordinaten $47^\circ - 55^\circ$ Nord

und $6^\circ - 15^\circ$ Ost festgesetzt. Innerhalb eines erweiterten Gebiets mit den Koordinaten $45^\circ - 56^\circ$ Nord und $4^\circ - 18^\circ$ Ost wurde die Untergrenze auf $M_L \geq 3.5$ erhöht. Die Übermittlung dieser Meldungen ist ebenfalls als FAX möglich, wird jedoch gegenwärtig nicht praktiziert.

Weitergehende Informationen muss sich der Interessent selber beschaffen (Pull-Prinzip). Dazu wurde das im nächsten Kapitel vorgestellte graphische Informationssystem entwickelt. Mit Hilfe dieses Systems kann der Nutzer die seinen Erfordernissen entsprechenden Informationen abrufen.

Informationen über ein Erdbeben erreichen eine breite Öffentlichkeit im Allgemeinen durch die Informationsübermittlung nach dem Pull-Prinzip. Hierfür wurden entsprechende Webseiten mit Basisinformationen vorbereitet. Sie dienen in erster Linie einer schnellen Bereitstellung von Informationen. Voraussetzung ist allerdings, dass dieser Dienst und die entspre-

chenden Internet-Seiten bekannt sind, wofür im Vorfeld gesorgt werden muss.

Graphisches Informationssystem

Für die Darstellung der Ergebnisse wurde mit der Entwicklung eines Graphischen Informationssystems begonnen, das die Benutzerschnittstelle des in der Entwicklung befindlichen Erdbeben-Informationssystems darstellt. Die Lage des ermittelten Epizentrums und der geschätzte Lokalisierungsfehler werden auf verschiedenen Karten zusammen mit weiteren relevanten Informationen dargestellt (Abb. 6.10).

Bislang sind Übersichtskarten Deutschlands sowie topographische und geologische Karten im Maßstab 1:1.000.000 bzw. 1:200.000 implementiert, die durch zahlreiche Informationen erweitert werden. Derzeit stehen folgende ergänzende Informationen zur Verfügung: Historische Erdbeben, Sprengungen und andere nichtseismische Ereignisse, seismische Stationen, Bergwerke, Steinbrüche, Gas- und Erdölfelder, geologische Störungszonen und Kernkraftwerke (als Beispiel für potenziell gefährdete Bauwerke).

Auf Basis der berechneten Stärke des jeweiligen Ereignisses ist geplant, den Schütteradius ebenfalls graphisch darzustellen. Unter Einbeziehung der Bevölkerungsdichte und Bebauungsdichte ist die Erstellung einer allgemeinen Gefährdungskarte für Bauwerke in Vorbereitung. Hier sollen Ergebnisse aus anderen Teilprojekten des DFNK eingebunden werden, die sich mit dem Einfluss des Untergrundes auf die durch Erdbeben erzeugten Erschütterungen und mit der Kartierung des Bauwerksbestands und seiner Verletzbarkeit befassen. Untersucht wurden in diesen Teilprojekten meist kleinräumige Bereiche wie z.B. die Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung im Kölner Raum (Projekt B2.1) oder die seismische Risikokartierung auf der Grundlage der EMS-98 mit einer Fallstudie für die Stadt Schmölln

in Ostthüringen (Projekt B3.1). Die Ergebnisse können als exemplarisch angesehen werden und sind für eine Einbindung in das Erdbeben-Informationssystem geeignet. Um diese Daten für die Unterstützung des Katastrophenmanagements nutzbar zu machen, ist eine Erweiterung der Untersuchungsgebiete notwendig.

Das Erdbeben-Informationssystem ermöglicht die schnelle und umfassende Bewertung von Erdbeben und lässt sich sukzessive erweitern. Mit der Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit des Epizentrums können neben den Karten mit großflächigen Strukturen auch solche mit kleinräumigen Strukturen wie z.B. Straßenkarten eingebunden werden, um bei einem schweren Erdbeben detaillierte Informationen über Zugangs- und Verbindungswege oder notwendige Straßensperrungen zu erhalten. In Zusammenarbeit mit interessierten Nutzern besteht die Möglichkeit, das graphische Informationssystem „Erdbeben“ den verschiedenen Anforderungen anzupassen. Damit steht ein Werkzeug zur Verfügung, das den sichtbaren Teil des Erdbeben-Informationssystems repräsentiert und gleichzeitig die wichtigste Komponente für den Nutzer darstellt.

6.3.5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Nach dem Ende der Laufzeit des TP C5 ist die grundlegende Entwicklung der verschiedenen Komponenten dieses umfangreichen Systems weitgehend abgeschlossen. So wurden zwei neue seismische Messstationen mit modularen Baugruppen entwickelt und in Betrieb genommen, die eine hohe Flexibilität bei der Standortauswahl gewährleisten und auch für die Installation in Bergwerken geeignet sind. Diese Technik wird auch bei zwei weiteren Stationen zur Anwendung kommen, die das bestehende Messnetz noch erweitern sollen, um die Abdeckung der Bundesrepublik mit seismischen Stationen zu verbessern.

In der Praxis hat sich das zur schnellen Übertragung seismischer Wellenformdaten von

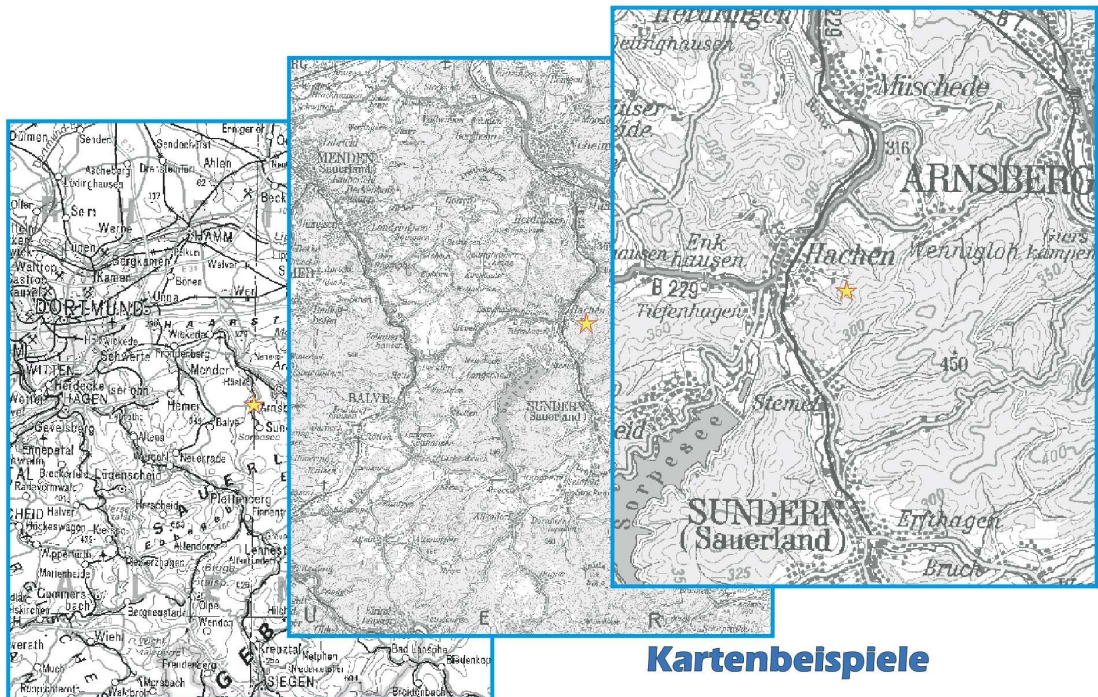
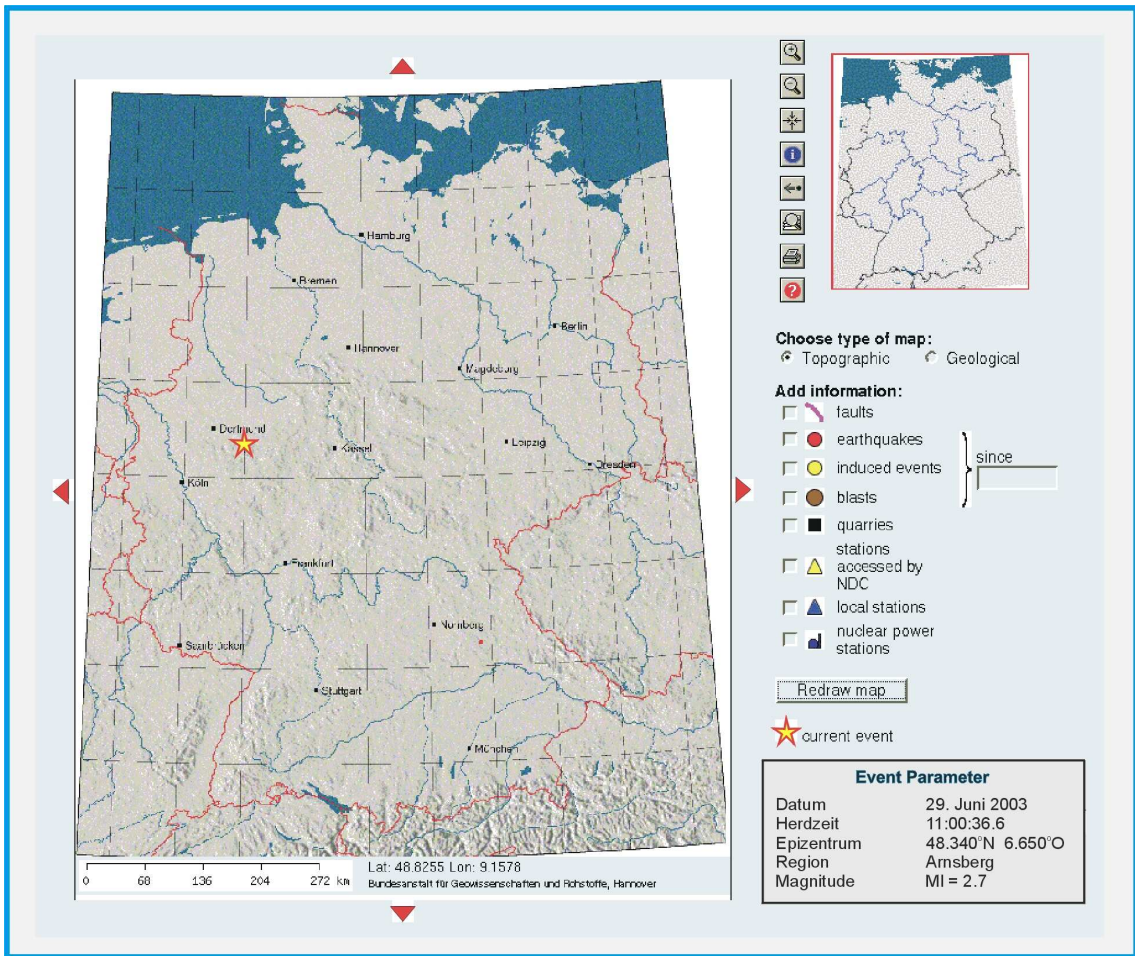


Abbildung 6.10: Oberfläche mit Übersichtskarte und weiteren Kartenbeispielen des Graphischen Informationssystems.

den Stationen zur Datenzentrale ausgewählte Kommunikationsverfahren bewährt, das auf der Internet-Einwahl über ISDN basiert. Sobald an den Stationen ein DSL-Anschluss bereitgestellt wird, kann die Umstellung auf diese Kommunikationstechnik erfolgen, da die entsprechenden technischen Voraussetzungen bereits vorliegen.

Für die Auswertung der Wellenformdaten ist die Entwicklung der wichtigsten Module eines umfangreichen Softwarepakets weitgehend abgeschlossen, wobei sich verschiedene Modulgruppen zur Detektion seismischer Einsätze, zur Identifizierung und nachfolgenden Phasenassoziiierung sowie zur Lokalisierung in Verbindung mit Konsistenzüberprüfungen noch in der Erprobungsphase befinden. Der Schwerpunkt verschiebt sich zunehmend auf das Zusammenwirken der verschiedenen Module. Auch wenn in den letzten Monaten bei der Softwareentwicklung große Fortschritte gemacht wurden, sind noch erhebliche Anstrengungen erforderlich, um die Zielvorgaben zu erreichen.

Mit der Entwicklung des Graphischen Informationssystems auf Basis eines Map-Servers steht ein leistungsfähiges Werkzeug zur Verfügung, um die nach einem starken Erdbeben benötigten Informationen schnell und umfassend bereitstellen zu können. Es ist geplant, dieses System durch weitere Karten und neue Features zu erweitern und externen Interessenten den direkten Zugriff mittels eines Browsers über das Internet zu ermöglichen. Abhängig von den Anforderungen der Interessenten können über einfache Datendienste wie E-Mail, SMS und Fax Informationen unmittelbar nach einem Erdbeben automatisch bereitgestellt werden.

Aufgrund des nach Ablauf des Projekts erreichten Stands bei der Entwicklung eines Erdbeben-Informationssystems sollten die noch verbleibenden Arbeiten zum Abschluss gebracht werden. Durch das von verschiedenen Seiten an einem derartigen System bekundete Interesse ist genug Motivation zur Fortset-

zung vorhanden. Es wird deshalb angestrebt, dieses Projekt mit Eigenmitteln in der nächsten Zeit erfolgreich abzuschließen.

6.3.6 Literatur

Ahorer, L., 2001. Abschätzung der statistischen Wiederkehrperiode von starken Erdbeben im Gebiet von Köln auf Grund von geologisch-tektonischen Beobachtungen an aktiven Störungen. DGG Mitteilungen, Nr.2, 2-10.

Camelbeeck, T. & Meghraoui, M., 1998. Geological and geophysical evidence for large paleo-earthquakes with surface faulting in the Roer Graben (northwest Europe). *Geophys. J. Int.*, 132, 347-362.

Schweitzer, J., 2001. HYPOSAT – An Enhanced Routine to Locate Seismic Events. *Pure and Applied Geophysics*, 158, 277-289.

6.4 Technologie der Schadensschätzung

Friedemann Wenzel¹ und Anselm Smolka²

¹ *Universität Karlsruhe (TH)*
Geophysikalisches Institut
Email: friedemann.wenzel@gpi.uni-karlsruhe.de

² *Münchner Rückversicherung*
Bereich GeoRisikoForschung

TP C4: Technologie von Schadensszenarien im Rahmen eines interaktiven, nutzerorientierten Informationssystems

6.4.1 Zusammenfassung

Die fortgeschrittenste Technologie der Schätzung von Schäden durch Naturkatastrophen liegt mit dem Programm HAZUS vor. Das bezieht sich auf die Methodologie, die Datenbasis und die Option zu Erweiterungen auf andere Naturkatastrophen als Erdbeben. Bei dem gegenwärtigen Stand der Aufnahme des Gebäudeinventars von Städten und Regionen, sowie der Erkenntnisse über das Auftreten von Schäden und Vulnerabilitäten in Gebäudetypen wie sie im nördlichen Europa vorhanden sind (z.B. Ziegelbauten) ist eine Technologie wie HAZUS noch in weiter Ferne, sodass zunächst sicherlich mit Ansätzen wie von Allmann und Smolka (1998) gearbeitet werden muss.

Abstract

The most advanced methodology for damage estimates for natural disasters is HAZUS with its sophisticated approach to model the physical impact on structures, its extensive database and its options for extensions from earthquakes to other types of disasters such as floods and storms. In central Europe the database for modelling impacts and for the inventory of buildings is slim so that a technology such as HAZUS cannot be implemented in the short run and simplified approaches of risk estimates have to be used.

6.4.2 Motivation und Problemstellung

Risiken sind zu erwartende Verluste an Leben, Eigentum, ökonomischer und ökologischer Substanz, die sich aus dem Wirken eines oder mehrerer Naturereignisse auf die menschliche Gesellschaft ergeben. Risiken werden kontrolliert durch das Ausmaß der Naturgefahr, wie viele Menschen und welche Sachwerte exponiert sind und wie vulnerabel oder wi-

derstandsfähig die betroffene Gesellschaft und ihre Einrichtungen sind. Daher erfordert die Beschreibung des Risikos neben der verbesserten Abschätzung der Gefährdung durch Naturkatastrophen die Erfassung der Vulnerabilität und die quantitative Verknüpfung von Parametern zur Beschreibung der Naturgefahr mit Parametern zur Beschreibung der Verletzlichkeit von Bauwerken und Infrastruktur. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Verfahren entwi-

ckelt, die es erlauben, Schätzungen der auftretenden Schäden zu produzieren. Die Methoden hängen naturgemäß sehr stark vom Zweck der Schätzung (grob- oder feinskalig) und von der verfügbaren Datenbasis ab.

6.4.3 Zielsetzung

Aufgabe dieses Projekts war es, eine Übersicht über verschiedene Methoden zur Abschätzung von Schäden im Fall von Naturkatastrophen zu gewinnen, und die Methoden zu vergleichen, um so zu einer Strategie für künftige Arbeiten zu gelangen. Im Folgenden werden solche Methoden für Erdbebenrisiken diskutiert.

6.4.4 Methode

Zur Erreichung des Ziels wurden verschiedene zugängliche Verfahren untersucht, getestet und verglichen. Die untersuchten Methoden umfassen (1) das in den USA entwickelte Software-System HAZUS und seine laufenden Weiterentwicklungen, (2) eine Methode, die im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 461 'Starkbeben' an der Universität Karlsruhe entwickelt wurde und ebenfalls als Software-Paket verfügbar ist, (3) ein kanadisches System Natural Hazards Electronic Map and Assessment Tools Information System, ebenfalls als Software-Paket verfügbar, und (4) eine Methode, die von der Münchener Rückversicherung entwickelt wurde.

6.4.5 Ergebnisse und Diskussion

HAZUS

HAZUS repräsentiert ein Softwarepaket zur Schätzung von Erdbebenschäden in den USA, das gegenüber früheren Ansätzen charakterisiert ist durch:

- Die Software läuft auf einer GIS (Map-Info) Plattform.

- Die Bodenbewegung wird durch spektrale Werte und nicht durch Intensitäten spezifiziert.
- Es werden Schäden an Gebäuden aber auch an Versorgungslinien (Pipelines, Straßen, etc.) in einem Programm beschrieben.
- HAZUS enthält umfangreiche Datenbanken zum Gebäudebestand der USA sowie demographische Daten.
- HAZUS berechnet nicht nur die direkten Schäden sondern auch die indirekten, also die längerfristigen Auswirkungen auf die regionale Wirtschaft.

Die Entwicklung von HAZUS begann 1992 mit einer Vereinbarung zwischen der Federal Emergency Management Agency (FEMA) und dem National Institute of Building Services (NIBS). NIBS wertete in Zusammenarbeit mit Risk Management Solutions, Inc. (RMS) und dem Konsortium Californian Universities for Research in Earthquake Engineering (CUREe) vorhandene Studien aus und entwickelte zwischen 1994 und 1997 die Technologie (NIBS, 1997).

HAZUS besteht im Wesentlichen aus 6 Modulen:

1. Potential Earth Science Hazard (PESH): Dient der Schätzung von Bodenbewegung und permanenten Setzungen hervorgerufen durch Verflüssigung, Rutschungen. Grundlage für die Angabe der Bodenbewegung sind standardisierte Antwortspektren unter Berücksichtigung von Standorteffekten.
2. Inventar von Gebäuden und Infrastruktur: Gebäude werden dabei nach Bautyp und Nutzungsart klassifiziert. Bautypen unterscheiden sich nach Bauart, Material (Stahl, Stahlbeton, Holz) und Höhe. Versorgungseinrichtungen schließen ein: Straßen Brücken, Pipelines. Räumliche Einheiten, innerhalb derer

die Anzahl von Gebäuden oder Kilometer Versorgungslinien quantifiziert werden, sind die Einheiten der Volkszählungen (Census).

3. Direkte Schäden: In diesem Modul werden Schäden an Gebäuden und Versorgungslinien geschätzt, indem zunächst eine Schadenskategorie ermittelt wird. Ein erheblicher Fortschritt in der Methodologie von HAZUS besteht in der Ermittlung von Gebäudeschäden durch den 'Schnitt' von Antwortspektren und Kapazitätskurven für die jeweilige Gebäudeklasse (Kirchner et al., 1997).
4. Als direkte wirtschaftliche Schäden gelten: Wiederherstellungskosten sowie Kosten für den Umzug aus beschädigten Objekten, Verlust an Einkommen und Verlust an Mieten. Diese Posten hängen von der Wiederherstellungszeit ab.
5. Induzierte Schäden ergeben sich aus Feuer nach dem Erdbeben, Freisetzung toxischer Stoffe, Überschwemmungen durch Bruch von Dämmen, Beseitigung von Schutt.
6. Indirekte wirtschaftliche Verluste schließen ein: Änderung in der Beschäftigungsrate, Verlust von Steuereinnahmen, Reduzierung der Nachfrage.

HAZUS kann von der FEMA bezogen werden, ist aber nur auf die USA anwendbar und insofern nicht übertragbar. Es kann auf verschiedene GIS-Plattformen (MapInfo, Arc View) sowie auf Workstations und PCs betrieben werden.

Gleichzeitig wird HAZUS für andere Gefährdungen als Erdbeben weiterentwickelt (HAZUS-MH). Sie operieren mit den für Erdbeben definierten 6 Modulen. Bei Hochwasser und Sturm kommen zu den Risikoelementen, wie sie für Erdbeben definiert sind, noch Fahrzeuge, Flugzeuge, Boote sowie landwirtschaftliche Produktionen und Produktionseinrichtungen hinzu.

EQSIM

EQSIM (Earthquake Simulation) wurde zwischen 1999 und 2001 im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 461 'Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen' in Karlsruhe als Szenarioorientiertes Werkzeug zur Schadensabschätzung bei Erdbeben für die rumänische Hauptstadt Bukarest entwickelt. Die Methodologie zur Abschätzung der Erdbebenschäden, die für EQSIM gewählt wurde, beruht auf dem Konzept der HAZUS-Methodologie (NIBS, 1997). Sie wurde an die in Rumänien anzutreffenden Bedingungen angepasst.

Die Berechnung der Schadensszenarien erfolgt auf der Basis von Antwortspektren. Hierbei können zwei Arten von Antwortspektren in die Schadensprognose einfließen: (1) reale Antwortspektren aus Aufzeichnungen des seismischen Messnetzes oder (2) Antwortspektren, die mit Hilfe erdbebenspezifischer Parameter eines realen oder fiktiven Erdbebenereignisses berechnet wurden. Kapazitäts- und Schadenskurven beschreiben das Verhalten einer Gebäudeklasse unter Erdbebenlast. Mit Hilfe dieser Kurven können unter Einbeziehung des Gebäudebestands, der Mikrozonierung und des inelastischen Antwortspektrums für jedes Gebäude des Testgebiets die Schadenswahrscheinlichkeiten berechnet werden. Hierzu wird die Kapazitäts-Spektrum-Methode eingesetzt.

EQSIM ist auf der Basis eines Geoinformationssystems (GIS) erstellt worden, um raumbegrenzte Daten mit Datenbanken zu kombinieren und die Ergebnisse in thematischen Karten anzuzeigen. Als Programmierumgebung wurde das Geoinformationssystem 'ArcView' mit seiner programmeigenen Scriptsprache 'Avenue' gewählt.

Um die Eingangsdaten und die Ergebnisse der Szenarienberechnung vorzuhalten, war es erforderlich, die Daten in einer Datenbank abzuspeichern. Hierfür musste ein einheitliches Datenbankdesign entwickelt werden. Als Daten-

bank wurde Microsoft Access mit Open Database Connectivity (ODBC) gewählt, da es so möglich ist, auf die Datenbank sowohl vom lokalen Rechner als auch über ein Computernetzwerk zuzugreifen. Die Datenbank enthält folgende Tabellen, die für die Berechnung genutzt werden können: Historischer Erdbebenkatalog, Parameter für die Abklingfunktion, Parameter zur Berechnung der Antwortspektren, Mikrozonierungsdaten, Gebäudedatenbasis, Kapazitätskurven, Schadenskurven, Tabellen für Szenarioergebnisse.

Nhematis

Nhematis (Natural Hazards Electronic Map and Assessment Tools Information System) wurde zwischen 1995 und 1999 vom Emergency Preparedness Canada (EPC) in Zusammenarbeit mit Nobility Inc. entwickelt. Nhematis dient der Dokumentation, Repräsentation und Analyse von Informationen zur Gefährdung durch Naturkatastrophen. Es enthält Informationen zur Bevölkerung und Infrastruktur und verbindet die Technologie von Expertensystemen mit GIS (ArcView). Nhematis enthält:

- Einen nationalen Atlas der Naturgefahren Canadas
- Modelle und Algorithmen zur Prognose von Erdbebenschäden durch Bodenbewegung, Verflüssigung, Erdbeben und Feuer.
- Einen allgemeinen Algorithmus zur Schätzung von Gebäudeschäden, die durch Erdbeben und andere Naturgefahren hervorgerufen werden.
- Algorithmen für Hochwasser, Hangrutschungen und Tornados.
- Datenbasen vorwiegend zu den Regionen Vancouver, Edmonton, Ottawa-Carleton, Montreal, Fredericton.

Nhematis liefert Karten, die die Intensität und die Wirkung spezifischer Gefährdungen

beschreiben. Es liefert außerdem materielle und menschliche Schäden in Form eines Berichts. Nhematis nutzt Datenbasen in Microsoft Access, ArcView als GIS, das mit anderen Komponenten des Systems durch Avenue Scripts verbunden ist. Die Architektur ist offen, d.h. Nhematis kann prinzipiell auch für nicht-kanadische Studien verwendet werden.

Methode der Münchener Rück

Allmann und Smolka (1998) berechnen zum ersten Mal Schadensszenarien für deutsche Großstädte (Köln, Frankfurt) für Szenarienbeben verschiedener Stärke ($M = 5.5$ und 6.0 für Frankfurt, $M = 6.0, 6.4, 6.7$ für Köln). Es wurde folgende Verfahren gewählt:

1. Ein Erdbeben mit gegebenem Hypozentrum und Magnitude wird definiert.
2. Eine Epizentral-Intensität wird aus Skalierungsrelation zugeordnet.
3. Die Intensität dieses Ereignisses kann in jeder beliebigen Epizentralentfernung mit Abminderungskurven berechnet werden.
4. Es wird angenommen, dass sich in einer Region, die durch die gleiche Postleitzahl definiert ist, die Intensität nicht ändert.
5. Der Gebäudewert in einer solchen Region kann aus Daten der Gebäudeversicherer ermittelt werden.
6. Aus Untersuchungen des Albstadt-Bebens (1978, $M_L = 5.8$) ist die Vulnerabilität dieser Baustruktur bekannt. Sie wird ausgedrückt durch ein Schadensverhältnis in Abhängigkeit von der Intensität.
7. Damit kann die Schadenssumme in jeder Region gleicher Postleitzahl berechnet werden. Der Gesamtschaden wird durch die Integration über alle Postleitzahlen ermittelt.

6.4.6 Bewertung der Verfahren

Die fortgeschrittenste Technologie der Schätzung von Schäden durch Naturkatastrophen liegt mit dem Programm HAZUS vor. Das bezieht sich auf die Methodologie, die Datenbasis und die Option zu Erweiterungen auf andere Naturkatastrophen als Erdbeben. Mit EQSIM wurde ein System, das methodisch eng an HAZUS angelehnt ist, entwickelt, das mit seiner offenen Architektur im Prinzip auf beliebige Regionen anwendbar ist, sofern die Datenbasen verfügbar sind. Allerdings ist es zur Zeit auf Gebäudeschäden beschränkt.

Die Methode von Allmann und Smolka (1998) hat zum ersten Mal Schadensschätzungen für Erdbeben für zwei deutsche Großstädte geliefert. Sie basiert auf einfachen Annahmen, benötigt aber auch nur Daten, die heute verfügbar sind. Nhematis ist für kanadische Verhältnisse entwickelt worden, wo Erdbeben nicht die Hauptrolle bei Naturgefahren spielen. Es basiert auf einem offenen Softwaresystem und ist daher im Prinzip übertragbar und auf keine spezielle Gefährdungsart beschränkt.

Bei dem gegenwärtigen Stand der Aufnahme des Gebäudeinventars von Städten und Regionen, sowie der Erkenntnisse über das Auftreten von Schäden und Vulnerabilitäten in Gebäudetypen wie sie im nördlichen Europa vorhanden sind (z.B. Ziegelbauten) ist eine Technologie wie HAZUS noch in weiter Ferne, sodass zunächst sicherlich mit Ansätzen wie von Allmann und Smolka (1998) gearbeitet werden muss.

6.4.7 Literatur

Allmann, A., Rauch, E. und Smolka, A. (1998): New paleoseismological findings on major earthquakes in Central Europe: Possible consequences for the earthquake loss potential in Germany. In: Proc. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterdam, ISBN 90-5410-982-3.

Baur, M., Bayraktali, Y., Fiedrich, F., Lungu, D. und Markus, M. (2000): EQSIM - A GIS-Based Damage Estimation Tool for Bucharest, In: Proceedings of the JICA-Workshop, Bukarest, 23-25.11.2000.

Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. und Lenhardt, W.A. (1998): Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten – Deutschland, Österreich, Schweiz. Bautechnik, 75Jg., H, 10, 3-17.

Grünthal, G., Merz, B., Friedrich, J., Thieken, A., Schwarz, J., Allmann, A. und Radtke, K. (2001): Synopse der Naturgefahren für die Stadt Köln, 2. Forum Katastrophenvorsorge, „Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge“, Leipzig, 24.-26. September 2001.

HAZUS (1997): Earthquake Loss Estimation Methodology, Technical Manual I, II, III. National Institute of Building Sciences for Federal Emergence Management Agency.

Kirchner, C.A., Nassar, A.A., Kustu, O. and Holmes, T. (1997): Development of building damage functions for earthquake loss estimation. Earthquake Spectra, 13, 4, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.

National Institute for Building Sciences (1997): Earthquake Loss Estimation Methodology HAZUS. Technical Manuals, Vol.I-III.

Internet Ressourcen

<http://www.fema.gov/>

<http://www.fema.gov/hazus/hazus6.htm>

<http://www.fema.gov/pdf/FEMA366.pdf>

http://www.nobility.com/apps/emerg/index_fr.htm

Kapitel 7

Synopsis of Natural Hazards

Anmerkung der Herausgeber: Diese Synopse war zu Beginn des DFNK nicht vorgesehen. dementsprechend gibt es hierzu kein spezifisches Teilprojekt. Die Mitglieder der Gruppe haben über die Arbeit in den einzelnen Teilprojekten hinaus die im Folgenden vorgestellte Methode zur vergleichenden Risikobewertung entwickelt. Dieser Text erscheint in leicht veränderter Form im Sonderband über das DFNK in der Fachzeitschrift *Natural Hazards*.

7.1 Comparative risk assessments for the city of Cologne – storms, floods, and earthquakes

Grünthal, G.¹⁾, Thieken, A.H.¹⁾, Schwarz, J.²⁾, Radtke, K.S.³⁾, Smolka, A.⁴⁾, Merz, B.¹⁾

¹*GeoForschungsZentrum Potsdam, Telegrafenberg, D-14473-Potsdam, Germany*

²*Bauhaus-University Weimar, Geschwister-Scholl-Str. 8, D-99421 Weimar, Germany*

³*University Leipzig, , Stephanstr. 3, 04103 Leipzig, Germany*

⁴*Munich Reinsurance Company, 80791 Munich, Germany*

7.1.1 Abstract

In this paper a methodology for a multi-risk assessment of an urban area is introduced and performed for the city of Cologne, Germany, considering the natural hazards windstorm, flooding and earthquake. Moreover, sources of the uncertainty in the analysis and future needs for research are identified. For each peril the following analyses were undertaken: hazard assessment, vulnerability assessment and estimation of losses. To compare the three hazard types on a consistent basis a common economic assessment of exposed assets was developed. This was used to calculate direct economic losses to buildings and their inventory. The perils were compared by risk curves showing the exceedence probability of the estimated losses. For Cologne, most damages that occur frequently are due to floods and windstorms. For lower return periods (10 – 200 years) the risk is dominated by floods. For return periods of more than 200 years the highest damages are caused by earthquakes.

7.1.2 Introduction

Risk assessments for natural hazards have usually been carried out separately for the various pertinent hazards in the considered regions or cities, without attempting to combine these studies to one holistic risk assessment. There are only a few exceptions: e.g. the UNDRP study (1977) for Manila, the KATANOS report for Switzerland (BZS, 1995), the AGSO Cities project for geohazards in Australian urban communities (e.g. Granger et al., 1999) and the more recent studies for Turrialba, Costa Rica (van Westen et al., 2002) and Toronto, Canada (Ferrier and Haque, 2003). As demonstrated by Durham (2003), it is, however, such

a synoptical view that enables planners and decision-makers to make adequate decisions on risk reduction and loss prevention programs.

The methodological approaches in risk assessment studies range from very coarse indices to elaborate assessments. An example of a coarse index approach is the methodology of Ferrier and Haque (2003). Based on readily available data and expert knowledge about the hazards and their possible effects on the municipality, this method yields a ranking of the different risks in a community and provides guidance to both mitigation and preparedness priorities. Another coarse index was proposed by Munich

Re (2003) and also uses available data and expert opinion. On the other end of the spectrum are in-depth assessments which consider the complete risk chain ('triggering natural event – direct impacts on population; built and natural environment – secondary and long-term consequences') by means of complex simulation tools for hazard and vulnerability analyses. Most of them lack, however, the multi-hazard aspect (Davidson, 1999; UN/IDNDR, 2000). One example of a true multi-hazard study is given by Blong (2003) who developed a damage scale for Australia that quantifies the damage to buildings resulting from a range of natural hazards.

This study aims to provide a multi-risk assessment for the city of Cologne, Germany, performed within the DFNK (German Research Network Natural Disasters) project. Cologne was chosen as a demonstration site since there is a huge accumulation of people (1,014,837 inhabitants in 2000) and assets, such as cultural assets, industrial sites (chemical industry, vehicle construction), an important commerce and services sector (including a trade fair) providing nearly 230,000 jobs, several radio and television stations, etc. (Urban Development Authority of Cologne, 2002). Moreover, Cologne is exposed to the three hazards types windstorm, flood and earthquake, representing the most important hazards in Germany.

Storms take in a top position in damages caused by natural hazards in Germany (Munich Re, 1999). In particular extratropical cyclones are responsible for about 53 per cent of economic losses. The total insured loss from the series of gales in December 1999 exceeded €10 billion (Munich Re, 2001). Also flood events are of major concern in Germany with the highest losses of more than € 9 billion in 2002 at the Elbe river. The last severely damaging floods which also affected Cologne occurred in 1993 and 1995 with economic losses of € 530 mill. and € 280 mill., for the whole Germany. In Cologne, losses amounted to € 77 mill. in 1993 and € 33 mill. in 1995

despite similar water levels of 10.63 m and 10.69 m, respectively (Vogt, 1995; Fink et al., 1996). The significant reduction of losses in 1995 was mainly explained by an enhanced risk awareness and a better preparedness of the people at risk – a phenomenon that was also observed in adjacent catchments (Wind et al., 1999).

Whereas windstorms and floods are well known publicly, damaging earthquakes are rather rare in Germany and there is little public awareness of this risk. Nevertheless, and in spite of only moderate event magnitudes, the total losses can be considerable due to the large number and the high values of exposed objects. The 1992 Roermond earthquake (moment magnitude $M_w=5.3$, local magnitude $M_L=5.9$), northwest of Cologne killed one and injured 25 people, damaged 7,200 buildings and caused losses of € 150 mill. Paleoseismologically constrained earthquakes with M_w up to 6.7 (Camelbeeck et al., 2000) would, of course, produce much higher losses, in the order of tens of billions of €. Not the frequency of earthquakes is of concern in the risk management, but their extreme loss potential.

In order to compare the three hazard types, the following framework is used. The term **risk** is used to describe the probability that a given loss will occur. Risk encompasses three aspects: **hazard, vulnerability and exposed assets (or people)**. According to this definition the following analysis steps were performed within this study:

1. **Hazard assessment**, focusing on the probability of occurrence of potentially damaging natural events.
2. **Development of the assets inventory**, i.e. identifying the values that are exposed and vulnerable to hazard events.
3. **Vulnerability assessment**, evaluating how exposed assets will suffer by various hazard events.

4. **Loss estimation**, superimposing value distribution and vulnerability functions and assigning the corresponding scenario event probabilities. In this study only direct monetary losses were considered, i.e. indirect losses as well as intangible damages (casualties, evacuated people etc.) were completely neglected.
5. **Synthesis**, linking the loss estimates of the different hazard types. Whereas linking losses as such is easy, a true comparison of the hazards is difficult, since different risks may have very different characteristics concerning their impact on the city or their probability of occurrence.

The multi-risk assessment presented in this study differs from the few approaches for multi-risk assessment existing so far, especially in the degree of detail, and partially in the novel approach for vulnerability assessment. In the following sections, the hazard assessment for windstorms, floods and earthquakes is described. The calculation of the assets in Cologne is introduced as a common basis for all these perils. The vulnerability assessment and the loss estimation methods for each hazard type is described. The paper ends with a comparison of the three different risk curves for the city of Cologne as a common risk indicator.

7.1.3 Hazard assessment

For each of the three considered perils a hazard assessment was performed focusing on the estimation of the probabilities of occurrences of potentially damaging events and effects. At this stage, different hazard types are not comparable with each other since hazards due to windstorms, floods and earthquakes are described by different strength parameters: wind speed, discharge or inundation depth and ground motion or macroseismic intensity, respectively.

Assessment of the windstorm hazard

For studying the storm hazard two kinds of observed wind speed time series are available, gust data and time averaged wind speeds. For the region of Cologne such time series were provided by the German Weather Service (DWD) observed at the DWD station "Köln-Wahn". The first series contains hourly wind speeds, averaged over a sampling period of 10 minutes. Its length covers 30 years, from 1971 to 2000. The series of the maximum daily 3 s gusts is 45.5 years long, from 1957 to 2002. These two different measures for wind speed are to be compared with data from known damaging events. The question arises, which one is more suitable for the assessment of storm risks. The strongest gust values cannot be assigned to the occurrence of known disastrous cyclones. Therefore, a use of the gust series data would lead to an overestimation of storm damage risk. In contrast to the maximum gusts, the highest values of the mean wind speed series correspond to the well known damaging events.

Different distribution functions were taken into consideration for the extrapolation of the time series. According to Troen and Petersen (1989) the Weibull distribution estimates extreme values insufficiently. As expected, the Weibull method gave incorrect estimates for the tail of the distribution. Two other functions were tested, i.e. the Schmidt distribution (Schmidt, 1980), which was developed especially for wind speeds, and the Gumbel type I distribution (Gumbel, 1958). The accuracy of estimates following Schmidt is sufficient also at the tails. This distribution is valid for sea areas, as well as over land with a flat relief. The extreme values resulting from the Gumbel type I fit only the tail of the distribution sufficiently well. Since this is the important point here, this method was used, too, although its use has clear limitations since it allows infinitely large events and does not consider a physically existing upper bound.

The extrapolation of threshold values of wind speed for some exceedence probabilities is presented in Fig. 7.1. The mean wind speed is presented up to a return period of 300 years (Gumbel method) and alternatively up to 100 years (Schmidt method). The latter is the upper bound of extrapolations suggested by Schmidt. At first glance, both estimations seem to be small compared, e.g., with mean wind speeds of 26.1 m/s measured during the storm Lothar (26.12.1999) in Karlsruhe. The Cologne region, however, is known for weaker wind speeds in comparison to locations in the open North German lowland. This is due to the protected location of Cologne in the Lower Rhine Embayment (Dütemayer, 2000).

As described above, the mean wind speed was used to develop the loss scenarios. Losses as such, however, are more related to peak gusts than to mean wind speeds. Therefore, the peak gusts had to be derived from the mean wind speeds. A conventional gust factor G was derived as the quotient of the peak gust and the mean wind speed. According to Wieringa (1973) the gust factor was calculated as a function of the mean wind speed v_m (averaged over a period $T = 10$ minutes), the gust duration t , the roughness length z_0 (a parameter for the effect of surface roughness in turbulent flow) and the height above ground z :

$$G(t, T = 10 \text{ min}, z, z_0, v_m) = 1 + \frac{1.42 + 0.3013 \cdot \ln \left(\frac{990}{\sqrt{m \cdot t}} - 4 \right)}{\ln \left(\frac{z}{z_0} \right)}$$

The duration of the gusts was assumed to be 3 s.

Taking into account the length of the used time series, a reliable estimate for longer return periods than a few hundred years is hardly possible. On the other hand, gust speeds of up to 45 - 50 m/s were already observed in the North German lowland in the past (Cappel and Emmerich, 1975). In principle, the occurrence of even higher values is possible.

Although the occurrence of damaging tornadoes is possible in Germany (Dotzek, 2001) this risk type is not considered here.

Assessment of the flood hazard

The estimation of the flood hazard is based on an extreme value analysis of the discharge data at the gauge Cologne on the river Rhine. At this gauge a discharge series with reliable daily data from 1880 to 1999 is available. For each hydrological year (from 1st November to 31st October), the maximum discharge was determined. Different distribution functions were adapted to this Annual Maximum Series (AMS): Gumbel type I, Pearson type III, Weibull and Lognormal. The parameters of these distribution functions were estimated by the method of moments (Stedinger et al., 1992). Fig. 7.2 shows the four distribution functions as well as the observed events, whose empirical probabilities were assessed by six different plotting position formulas (Weibull, Gringorden, Cunnane, Median, Blom and Hazen) given in Stedinger et al. (1992). The four distribution functions were then weighted by a Maximum Likelihood method to construct a composite probability distribution function (Wood and Rodríguez-Iturbe, 1975), which gave the following weights θ_i for the individual distributions: Pearson type III ($\theta_1 = 0.858$), Weibull ($\theta_2 = 0.072$), Lognormal ($\theta_3 = 0.067$), and Gumbel type I ($\theta_4 = 0.003$). The Pearson type III distribution seems to be the best option for this series since it is almost identical with the composite distribution. However, in comparison with the estimates of the German Federal Institute of Hydrology, where multiple annual maximum series and the log-Pearson type III distribution have been used, the Pearson type III in combination with the AMS 1880-1999 deliver lower discharge estimates especially for return periods larger than 50 years. The estimates of the German Federal Institute of Hydrology are fairly well represented by the Gumbel type I distribution in Fig. 7.2.

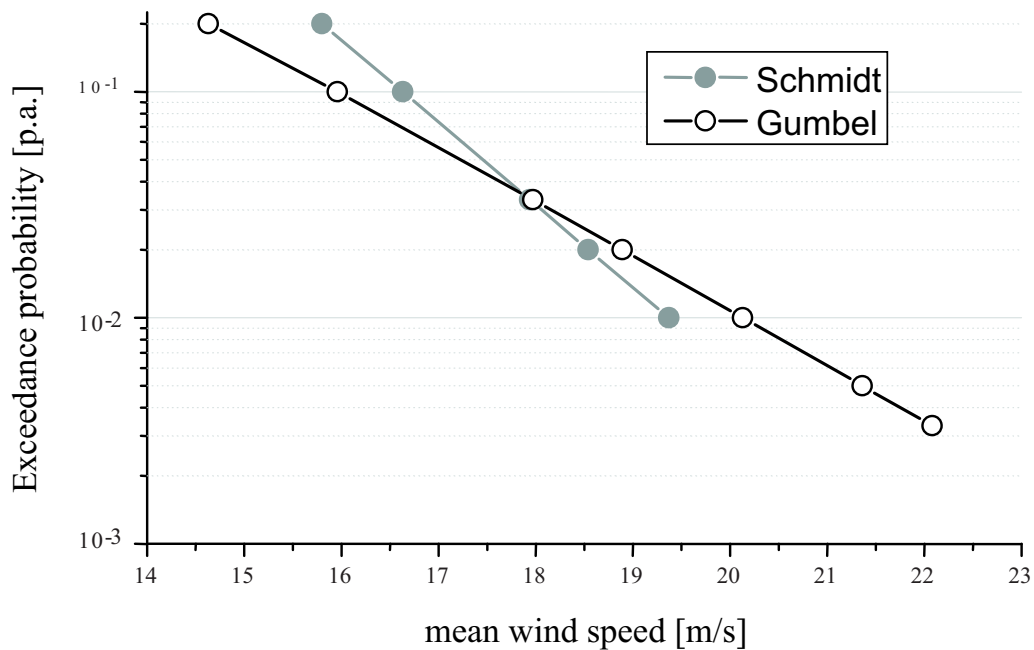


Figure 7.1: Extrapolated mean wind speeds for selected return periods up to 100 years (following Schmidt) and 300 years (following Gumbel).

In general, the uncertainty of flood frequency analysis is enormous because sample sizes are limited, the sample types [(multiple) annual maximum series or partial duration series] differ and a variety of distributions and parameter estimation methods are available (e.g. Chhab, 1995). To overcome this problem many countries published guidelines and recommended certain distributions. For example, the log-Pearson type III distribution is the most frequently used distribution in the USA, whereas the generalized extreme value distribution is popular in Great Britain, the Lognormal distribution in China and other distributions in other countries (Singh and Strupczewski, 2002).

The four highest events in the AMS 1880-1999 nearly have the same order of magnitude: 10,700 m³/s to 10,900 m³/s (Fig. 7.2). These discharges equal a water level at the Cologne gauge of 10.55 m to 10.66 m. Therefore, it seems that a discharge of around 11,000 m³/s might serve as an upper bound. However, an analysis of historic flood events in Cologne provided by Krahe (1997) reveals that the ex-

treme floods of 1342, 1374 and 1497 – with water levels and discharge values of 11.53 m (12,435 m³/s), 13.30 m (15,680 m³/s) and 11.50m (12,380 m³/s), respectively – clearly exceed the largest flood events in AMS 1880-1999. Empirical probabilities of the historic events were estimated by combining the historic events with the AMS 1880-1999 following DVWK (1999). Assuming different plotting position formulas (see above) a return period between 670 and 1350 years was assigned to the largest flood event which occurred in 1374 (Fig. 7.2). It was therefore classified as a 1000-year flood (Fig. 7.2). It has, however, to be emphasised that the discharges of the historic events were obtained with the current rating curve. Owing to morphological and hydraulic changes in the river bed these calculations are fairly uncertain.

For the estimation of flood losses certain discharges have to be converted into water levels and inundation areas. The transformation of discharges into water levels was performed by the rating curve of the Cologne gauge. Inun-

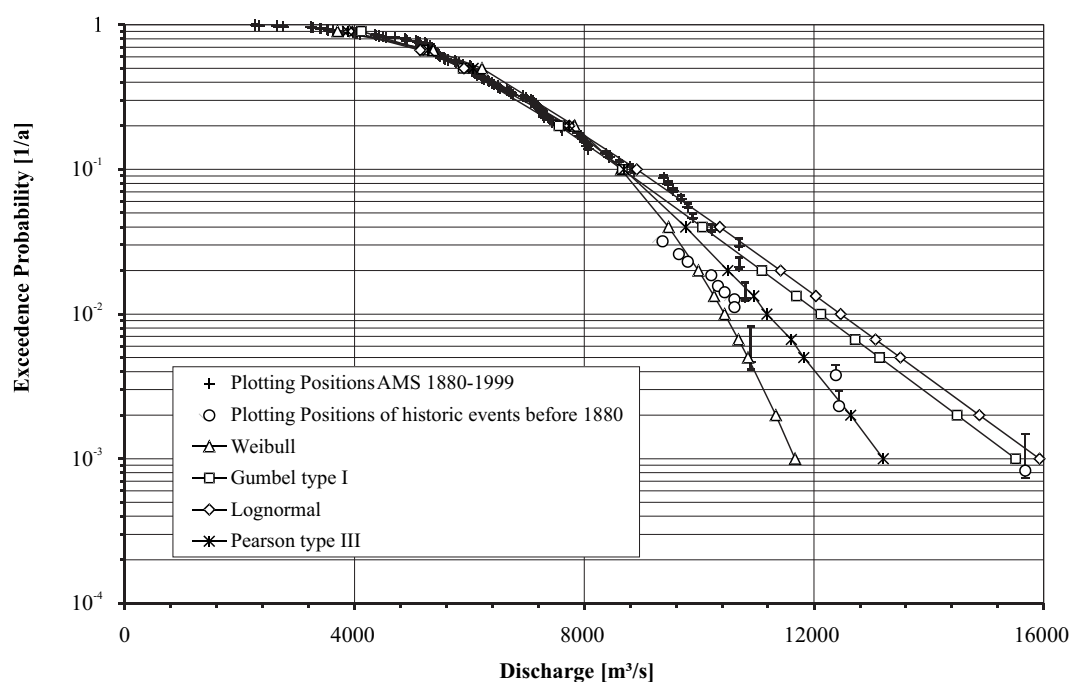


Figure 7.2: Four possible distributions of discharge at the Cologne gauge based on the annual maximum series from 1880 to 1999 (AMS 1880-1999) and empirical probabilities of observed and historic flood events estimated with different plotting position formulas (cf. text).

ation scenarios considering the flood protection outlined in Stadt Köln (1996) were provided by MURL (2000) for the water levels 11.30 m, 11.80 m and 12.50 m at the Cologne gauge. Additionally, inundation maps were calculated by interpolating the water levels given at 13 cross sections along the Rhine in Cologne and by intersecting the resulting water surface with a digital elevation model of 50 m grid size. Fig. 7.3 shows a few inundation scenarios. The resolution of the digital elevation model is, however, too coarse to calculate the impacts of the local flood protection measures and the resulting inundation areas exactly. This is relevant for water levels below 11.30 m and is a further source of uncertainty which will affect the risk assessment.

Assessment of seismic hazard

The Lower Rhine Embayment represents one of the most seismic active areas of Germany. Fairly strong earthquakes have occurred there

in the past; e.g. an intensity $I=VIII$, magnitude $M_L=6.1$ earthquake on 18 February 1756 near Düren and the $M_L=5.9$ earthquake 1991 near Roermond/Heinsberg, which had, due to the large focal depth of 20 km, an $I=VII$ only, still causing extensive damage (see introduction). Cologne lies close to the eastern border of the seismically active area.

The observed seismic record is sufficiently complete since 1250 for intensity VIII and since 1500 for intensity VII (Grünthal et al., 1998). Since the goal of the study is an intensity based risk assessment, the hazard assessment was performed for this parameter. A harmonized earthquake catalogue covering the entire western Central European area was used (Grünthal and Wahlström, 2003). Seismic source zones according to the seismotectonics of this larger area were taken from Grünthal et al. (1998), while for the Lower Rhine Embayment and the Ardennes 14 smaller seismic source zones were derived on the basis of the detailed neotectonic pattern and tectonic

Water level (gauge Cologne)

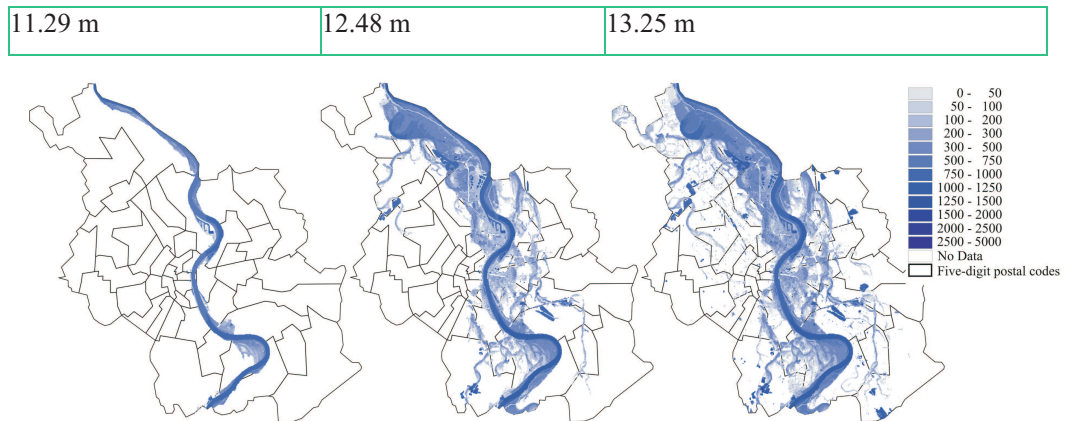


Figure 7.3: Selected inundation scenarios for Cologne. According to the current rating curve the water levels of 11.30 m, 12.50 m and 13.25 m correspond to a discharge of 12,018 m³/s, 14,247 m³/s and 15,677 m³/s, respectively.

studies (Grünthal and Wahlström, this issue). Different combinations of the 14 small source zones represent the epistemic uncertainty of the source zonation input for the probabilistic seismic hazard assessment. All the other input parameters were also treated with their uncertainties with the logic tree technique.

Intensity related fractile hazard curves for the centre of Cologne are given in Fig. 7.4. The mean hazard curve, representing the best estimate, is used here for the further procedure regarding loss estimation. Corresponding seismic hazard maps for the area of Cologne for different hazard levels are the basis for the following estimations of seismic losses. Three of these maps are shown in Fig. 7.4.

Assets assessment for the city of Cologne

In order to estimate direct losses that might be caused by various hazards, it is necessary to develop an inventory of potentially exposed assets in the area under consideration. For a consistent comparison of different risks a uniform data base of the assets is essential. Therefore the aim is to calculate values – here defined as replacement values for the reference year 2000 - for buildings and their contents in

different economic sectors, particularly in the sectors of private housing, commerce and services as well as industry. As a spatial data base the land register ATKIS, i.e. the German official topographic-cartographic information system, was used.

The assets were estimated by means of the following statistics: On the basis of data on the gross stock of fixed assets in 1997 (Statistical Office North Rhine-Westphalia, 2002) and data concerning type and expanse of land uses in North Rhine-Westphalia (MURL, 2000) a unit value [€/m²] was calculated for all economic sectors that are included in the system of national accounts from 1958. The unit values were scaled to the year 2000 by data on the development of the gross stock of fixed assets in North Rhine-Westphalia (Federal Statistical Office Germany, 2002), i.e. the figures for 1997 were multiplied by 1.0525. As assets are not distributed uniformly throughout the country, but data on the gross stock of fixed assets are only available per federal state, a measure had to be found which accounts for the high concentration of assets in the Cologne region. Therefore, the unit values for North Rhine-Westphalia were adjusted to Cologne using the gross value added per employee. The

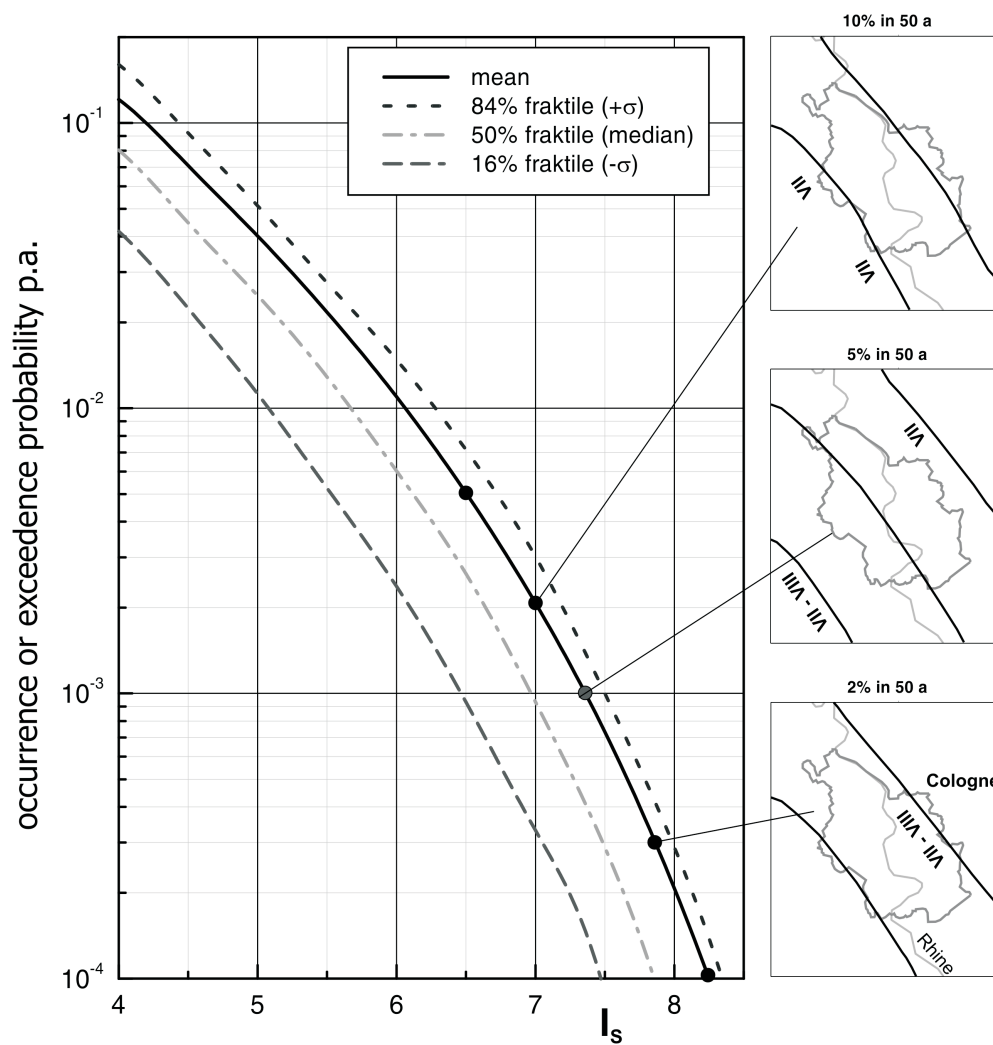


Figure 7.4: Probabilistic seismic hazard curves for the centre of Cologne in terms of intensities and their fractiles. Basis for the risk assessments are here generally the mean hazard values. Corresponding intensity hazard maps for the city of Cologne are shown as inlay maps for different probability levels.

underlying rationale is that there is a relationship between assets involved in production and value creation: The higher the asset's worth, the higher productivity will be. Gross value added per employee is a productivity measure. In 1996, the average value added per employee throughout Germany was € 50,406 (= 100%). In North Rhine-Westphalia it was € 52,821 (= 105%), and in the city of Cologne it was € 65,010 (= 129%) (Statistical Office Baden-Württemberg, 2000). The unit values for North Rhine-Westphalia were therefore multiplied by 1.23.

The use of the gross stock of fixed assets for asset assessment does not work well for the sector of private housing since the data do not include all private residential buildings. Therefore, an approach based on statistics of the Urban Development Authority of Cologne (2002) and insurance data (GDV, 2003, pers. comm.) was chosen for this sector: The number of buildings, households and cars in 2000 was each multiplied by the corresponding average insured value in Cologne. By this approach a total value of €80.25 billion and a mean unit value of 1015 €/m² was obtained (Table 7.1).

For loss estimation models a spatial distribution of the assets is needed. Therefore, the values had to be allocated to object classes within the land register ATKIS. Since there is no exact correspondence between the economic sectors in the national accounts and the ATKIS land use codes, the scheme proposed by MURL (2000) was slightly modified and used to assign ATKIS land use classifications to economic sectors. The resulting spatial pattern of economic sectors in Cologne is shown in Fig. 7.5.

By multiplying the unit value by the area of an object the economic value of each ATKIS-object was obtained. The object values were then aggregated within five-digit postal codes and for Cologne as a whole. The main results are given in Table 7.1, the total value amounts to €133 billion.

There exist other approaches for the estimation of assets. For example, an approach based on the number of inhabitants multiplied by the mean insured values per capita in Germany yields considerably higher values (i.e. an augmentation of 30 % for housing and 65 % for commerce and industry). Furthermore, data gathered by primary insurers which represent 20 % of Cologne's total portfolio for residential buildings show that the average building value in Cologne is probably higher than the value assumed here. This is due to a higher share of multi-family housing and more valuable urban housing. This leads to the conclusion that the values derived by the above described approach represent a rather low estimate of the total values. However, a validation remains difficult.

7.1.4 Vulnerability assessment and estimation of direct losses

For each of the three natural disasters a set of potentially damaging scenario events was selected. They were related to certain probability levels of the hazard assessments and were applied also for the seismic risk assessments. For these scenarios it was evaluated which assets are exposed by the hazardous events and what the effects are. In case of damaging earthquakes and windstorms the whole town is affected, as opposed to floods. Monetary direct losses to buildings and inventory were then estimated considering only the sectors of private housing, commerce and industry with a total value of €110 billion (see Table 7.1).

Vulnerability and loss estimates due to windstorms

The assessment of expected losses for different return periods was performed by use of a simple empirical damage function developed by Munich Re (Munich Re, 1993 and 2001). It is based on studies of the gust fields of disastrous cyclones like the 1990 storms Daria, Wiebke,

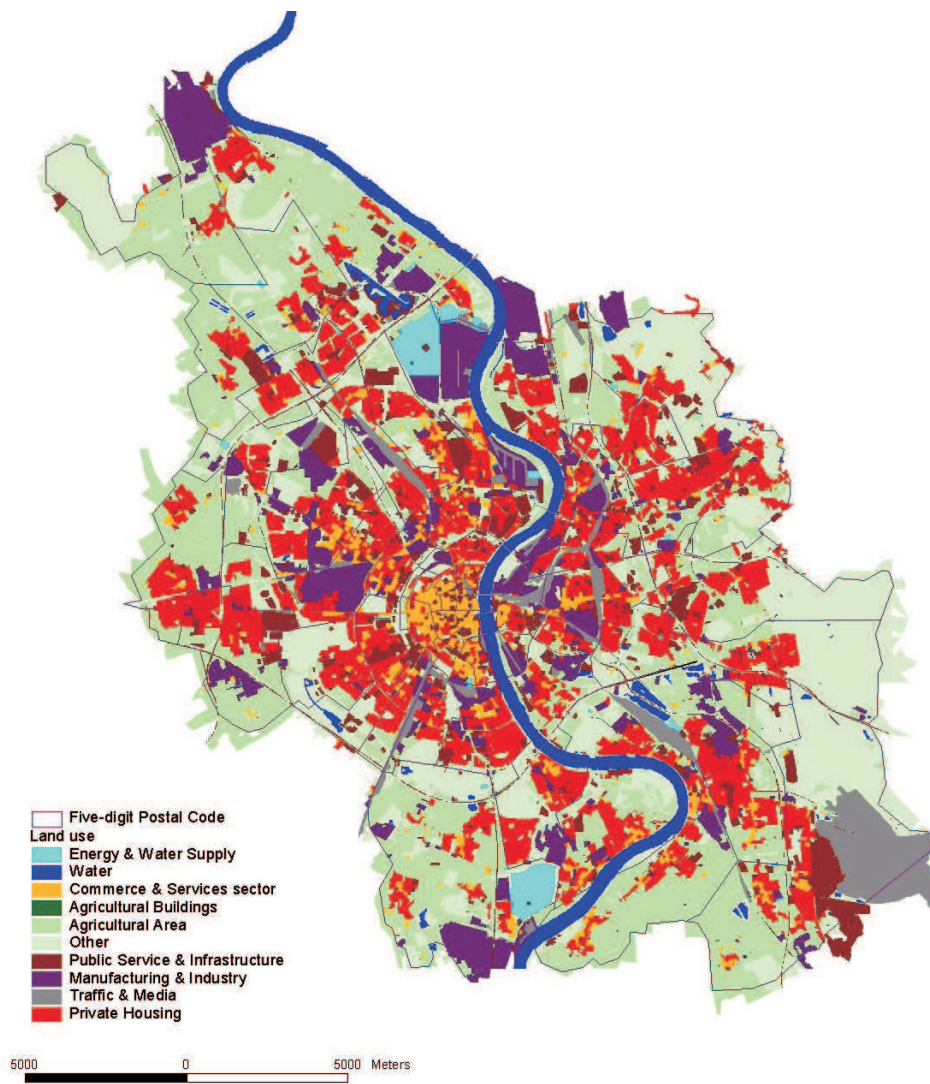


Figure 7.5: Spatial pattern of economic sectors in Cologne according to the land register ATKIS.

Economic sector	Area [km ²]	Share of total [%]	Unit economic value [€/m ²]	Total asset in Cologne [billion €]	Share of total [%]
Agricultural Area	111.01	26%	---	---	---
Other	100.38	25%	---	---	---
Private Housing	79.10	20%	1015	80.25	60%
Manufacturing & Industry	35.30	9%	362	12.79	10%
Public Service & Infrastructure	26.77	7%	467	12.49	9%
Commerce & Services Sector	14.25	4%	1179	16.81	13%
Traffic & Communication	17.87	4%	67	1.09	1%
Water	15.27	4%	---	---	---
Energy & Water Supply	5.19	1%	1785	9.25	7%
Total	405.14	100%	---	132.68	100%

Tabelle 7.1: Estimation of assets in the city of Cologne on the basis of land use information system ATKIS and unit economic values (Statistical Office North Rhine-Westphalia, 2000) (Reference year: 2000, cf. text).

Herta and Vivian and the 1999 storms Lothar, Martin and Anatol:

$$LR(v_G) = LR(80 \text{ km/h}) \cdot \left(\frac{v_G}{80 \text{ km/h}} \right)^\gamma$$

Here, $LR(v_G)$ is the loss ratio, v_G the gust wind speed. This equation is valid for speeds above 80 km/h. No significant damages occur in Germany below this value. The analysis of the 1990 data suggests a γ of 3 to 4. For the 1999 gales γ is rather in the range between 4 and 5. No differentiation between coastal area and inland was made, because the data do not support such differences.

Two estimations were made to take into account the uncertainty of the assessment. For an upper estimate a roughness length (cf. chapter 2.1) (see section 2.1) of 0.55 m and a γ of 5 in the vulnerability function was assumed; for a lower estimate a roughness length of 0.45 m and a γ of 4 (see Table 7.2). The exceedence probability for losses up to a return period of 300 years as a mean of a lower and an upper es-

timate is shown in Fig. 7.8 in comparison with the two other risks.

The maximum of the time series of 18.9 m/s represents the storm Wiebke on March 1 1990. Peak gusts derived here range between 32.2 m/s and 33.3 m/s, which correspond to observations. When applying this windspeed uniformly over the whole city area, the resulting loss ranges from €39 to 66 million.

Estimation of losses due to inundation

Direct monetary losses due to inundation were estimated by superimposing inundation patterns (Fig. 7.3) with the ATKIS land use cover (Fig. 7.5) which was transformed to a grid with a cell size of 50 m). For each grid cell the inundation depth and the economic sector were determined. As described in section 3, each economic sector corresponds to a unit economic value. Therefore, the total economic value per grid cell can be calculated easily.

The relative flood loss per grid cell was then estimated by means of stage-damage functions according to MURL (2000). For each eco-

Return period	Lower estimation	Upper estimation
5 a	20	29
10 a	24	36
50 a	37	60
100 a	43	60
300 a	70	135

Tabelle 7.2: Monetary losses in million € up to a mean return period of 300 years. The Schmidt method was used to extrapolate the mean wind speeds up to 100 years mean return period and the Gumbel method for 300 years. For the upper estimate a roughness length of 0.55 m in the gust assessment and a γ of 5 in the damage function was assumed; for the lower estimate a roughness length of 0.45 m and an exponent of 4.

conomic sector such a function shows the damage ratio on buildings and contents in dependence of the inundation depth. Monetary flood loss results from the multiplication of the damage ratio by the total economic value per grid cell. Losses per grid cell were aggregated for each economic sector and for Cologne.

For the three inundation scenarios shown in Fig. 7.3 this approach yielded total flood losses of €157 million, €3.5 billion and €5.3 billion, respectively. All in all, flood losses were estimated for 15 inundation scenarios so that a relationship between the water level at Cologne gauge and the total direct flood losses in the sectors private housing, commerce and industry was constructed. The resulting data, assumed as mean values, are shown in Fig. 7.8.

Estimation of losses due to earthquakes

The earthquake resistance of the building stock in Cologne or its vulnerability is not known. Therefore, a test area with approx. 800 buildings in the town center was surveyed in detail. Buildings were inspected and identified with respect to their building type and importance category as well as with respect to their structural system (Schwarz et al., 2002a, b). Con-

sidering the expected differences in the way that buildings will respond to earthquake shaking including factors like workmanship, state of maintenance etc., the most probable vulnerability class (A, B, C, D) was assigned to each building. Additionally, transitional classes (A-B, B-C, C-D) were introduced (Schwarz et al., 2004). This follows strictly the European Macroseismic Scale EMS-98 (Grünthal, 1998).

It has to be stressed that the building stock in Cologne was affected by severe destruction due to the second world war and its aftermath. The greatest part of the building stock was erected in the past 50 years. Consequently, buildings and construction types of low vulnerability dominate; 80 % of the buildings can be assigned to vulnerability class C and less than 14 % to vulnerability class B (Fig. 7.6).

In the sense of geo-statistical extrapolation, the composition of the building stock was applied to the entire town area with consideration of the given age structure of the buildings in the town quarters concerned.

The earthquake scenarios developed in the context of risk studies mainly building damage according to the local intensity and corresponding distributions of damage grade for

each vulnerability class. Therefore, the differences between buildings types are transformed in vulnerability classes. For each town district the composition of buildings with respect to their vulnerability classes is extrapolated. For further details of the procedure see Schwarz et al. (this issue), where also further references are given.

Losses due to earthquakes were estimated on the basis of deterministic scenarios assuming epicentres within the context of historic seismicity (Schwarz et al., this issue). Return periods of intensities were assigned in accordance to Fig. 7.4. For the purpose of the integrated approach within this study probabilistic intensity hazard maps for the city of Cologne as given by Fig. 7.4 were applied directly.

Seismic risk maps were prepared for different EMS-intensities. The impact of model assumptions and the step-wise refinement of input variables (like site conditions, building stock or vulnerability functions) on the distribution of expected building damage is considered by Schwarz et al. (this issue) in more detail. From these investigations, it can be concluded that these modifications have an impact on the distribution of damage but are of minor importance for the total loss integrated over the city of Cologne. The estimated damage distribution for the given scenarios is described using the mean grade of damage for each town district.

Within recent case studies a procedure was developed to transform the site-specific description of seismic action (within the period ranges characteristic for the dominant building types) into intensity differences introduced as "Delta-Intensities" (Raschke, 2003). On the basis of those site-specific spectral accelerations calculated in tightly spaced grid elements the local intensity is differentiated.

On the basis of the results of the site-response-analyses, differences in intensities were determined for each town district depending on the subsoil type. These intensity increments can be understood as correction values for the site

intensity and were finally inserted as such into the calculation of the mean damage grades d_m .

For the town of Cologne it seems allowable to assume uniform input values over large areas, minimizing the impact of local site conditions and the scatter of risk assessments. However, it should be stressed that in general, site effects have to be considered by refined 2- or 3-dimensional models. Thus the case of Cologne reflects rather an exceptional than the standard situation (Schwarz et al., 2002c). In the scenarios of Fig. 7.7 the influence of local site effects was not considered. Schwarz et al. (this issue) illustrate the variations for specific site conditions as well as the effect of building height. It should be repeated that by this procedure the regional damage distribution of mean damage grades is slightly modified, while the loss over the entire town will be less affected.

The assets were taken as given in Fig. 7.5 using a correlation between mean damage grade (d_m) and Mean Damage Ratio MDR (indicating the loss as percentage of the value). The correlation is based on the description of damage grades as per the European Macroseismic Scale EMS-98. The loss is summed up over the town districts. Assuming that within each town district the intensity according to scenario maps are representative the loss can be expressed in terms of annual probabilities of exceedence corresponding to the mean or other statistical fractile intensity given in Fig. 7.4. Surprisingly, probabilistic and deterministic scenarios as presented by Schwarz et al., this issue in more detail indicate only minor differences. Probabilistic results according to Fig. 7.4 and Fig. 7.7 are used for comparing earthquake losses with those of other hazards (storm, flood).

7.1.5 The synopsis of natural risks for Cologne

For the comparison of different risks it is a fundamental prerequisite to use a common risk indicator. In this study we agreed to calcu-

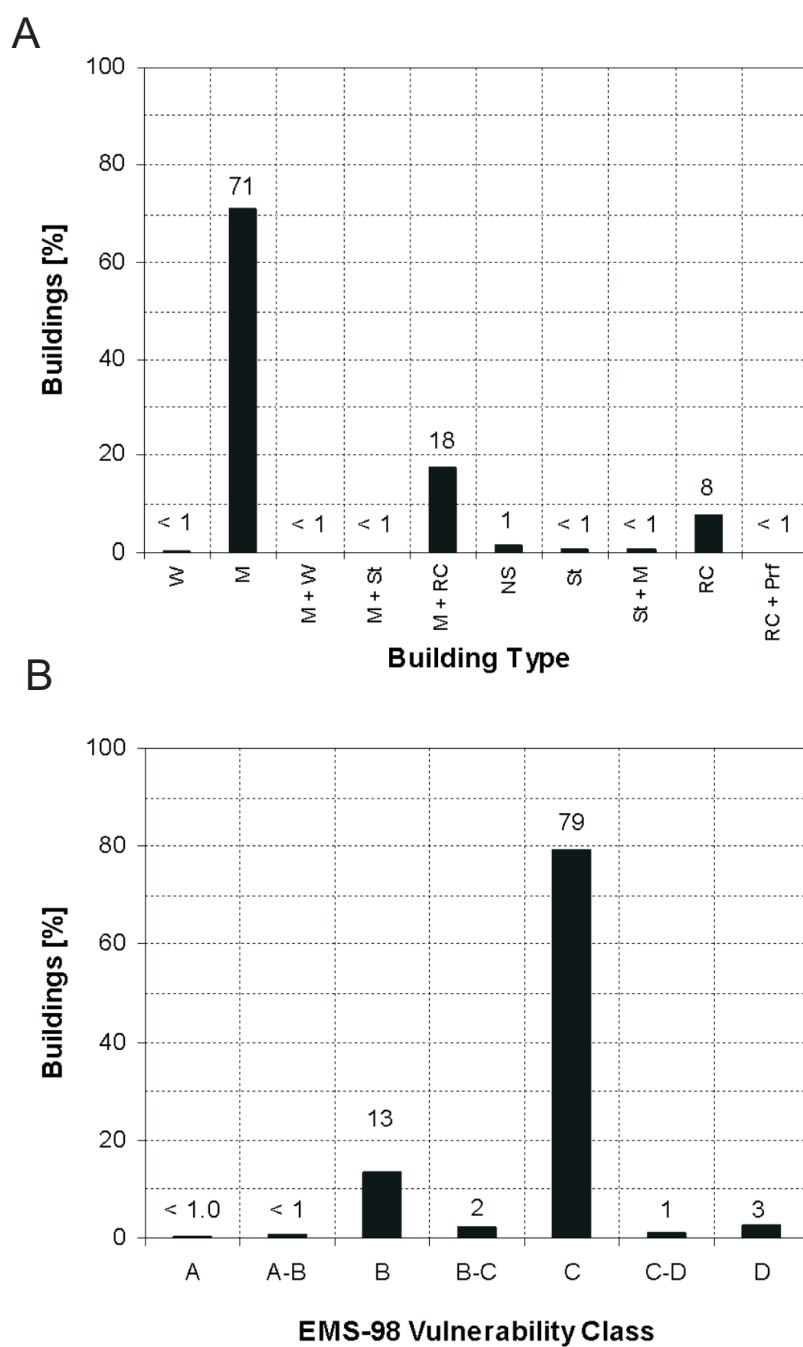


Figure 7.6: A: Composition of building types in the study area of Cologne (W-wooden; M-masonry, St-steel, RC-reinforced concrete; NS-natural stone, Prf-Prefabricated). B: Composition of vulnerability classes (EMS-98) in the study area of Cologne.

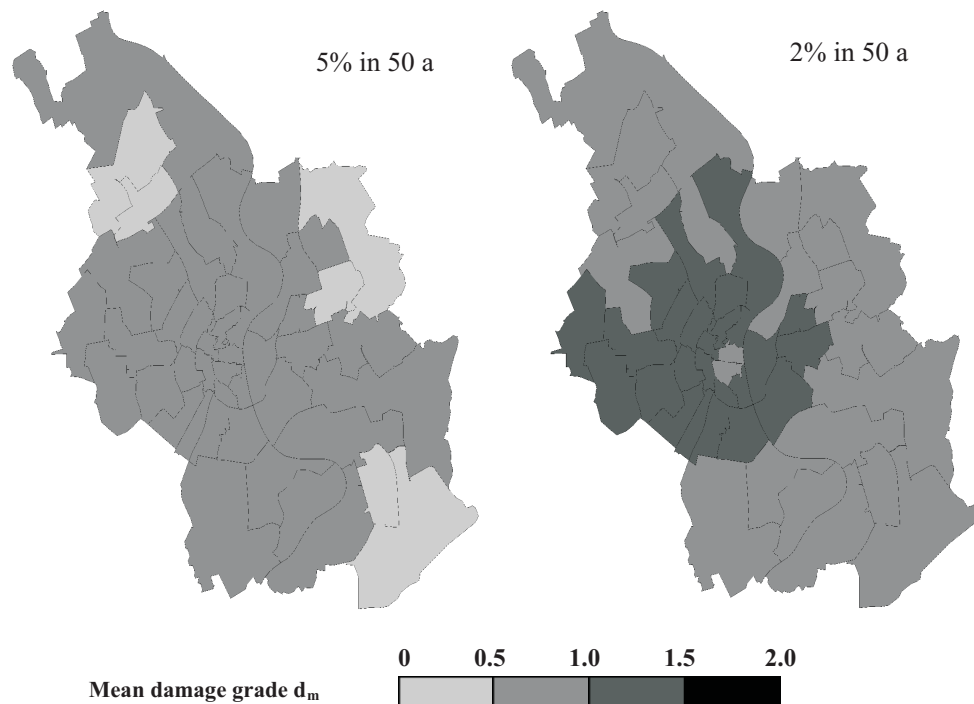


Figure 7.7: Mean damage grades d_m according to the EMS-98 in ZIP code-areas of Cologne for two different hazard levels (5% in 50 years, $T=475$ years; 2% in 50 years, $T=2,475$ years).

late a risk curve for each disaster type. Such a risk curve shows the total direct monetary losses to buildings and inventory in the sectors private housing, commerce and industry in Cologne against their exceedance probability. Different risk curves can be plotted in one graph (Fig. 7.8). This enables the direct quantitative comparison of the risks for the probability ranges which are covered by all three risk curves.

In the case of windstorm risk the curve was calculated as a mean of the lower and upper estimate shown in Table 7.2. A flood risk curve was constructed by combining the exceedance probabilities of discharges, the transformation of discharges into water levels as well as the relationship between water level and direct losses in Cologne. The seismic risk curve was derived from damage scenarios for Cologne according to determined frequency distributions of vulnerability classes in the town, which were associated to certain haz-

ard levels of the corresponding mean hazard curve.

The risk curves in Fig. 7.8 were calculated for the most probable estimates only, i.e. uncertainties were not considered. But the uncertainties can be large. The uncertainties in the estimation of hazards, of assets, of the vulnerability assessments and in the modelling of losses have to be taken into account. The uncertainties in the seismic hazard assessment were explicitly calculated (cf. fractiles in Fig. 7.4), while the ranges of different distributions considered for the windstorm hazard and the flood hazard provide a very rough first qualitative impression of their uncertainties (Figs. 7.1 and 7.2). For the 100-year flood, for example, the flood damage estimate doubles if the Gumbel type I distribution (Fig. 7.2) is assumed. To overcome the uncertainty of the flood frequency analysis it is necessary to supplement the statistical analysis by hydrologic process understanding and modelling. Thus,

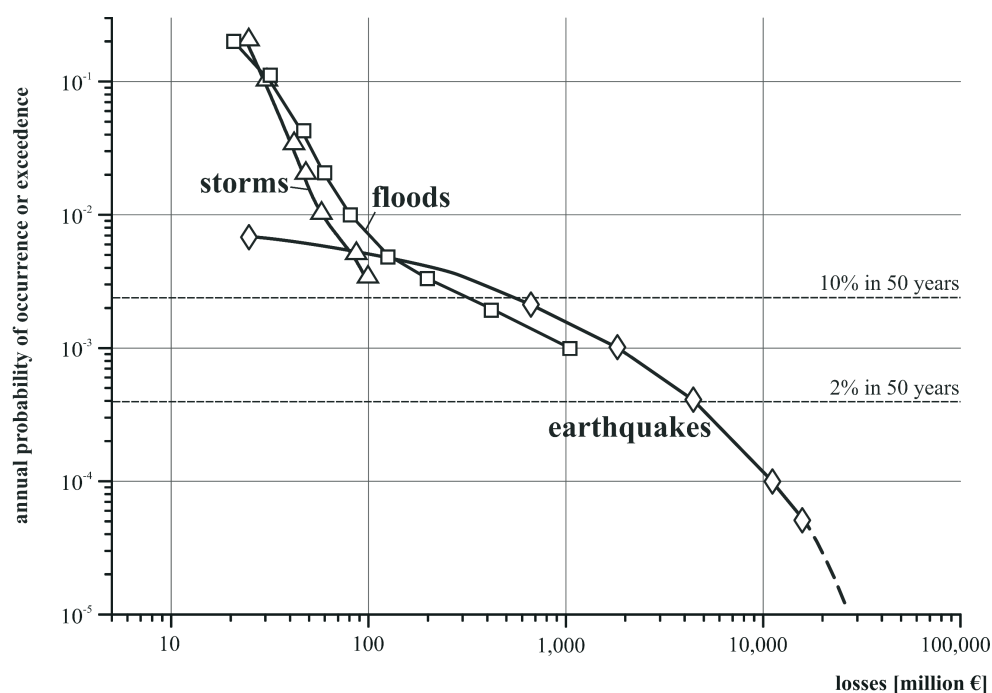


Figure 7.8: Risk curves of the hazards due to windstorms, floods and earthquakes for the city of Cologne considering losses at buildings and in the sectors private housing, commerce and industry (reference year: 2000).

special care is required when comparing the risk curves.

Nevertheless, repeated observations in the last years show that for higher occurrence probabilities the risk is clearly dominated by windstorms and floods. Due to the exposed location of Cologne at the River Rhine, the flood risk is prevailing despite the large efforts in flood protection. It should, however, be recognised that actual damages of frequently occurring floods will be smaller than estimated in this study. The flood events of 1993 and 1995 showed that preparedness can considerably reduce damages (Wind et al., 1999). Effects of early warning, adaptive behaviour and private precautionary measures are, however, neglected in the present applied loss estimation. A better model that accounts for these effects is recently under development. The flood risk losses are followed by the losses due to the frequent exposure to medium sized windstorms. Cologne itself remained less affected by the strong storms

during the last decades. For occurrence levels smaller than about $5 \cong 10^{-3}$ p.a., the course of the flood risk curve shows a drastical increase in losses for decreasing occurrence probabilities due to the failure of the flood defense system. At the occurrence level of about $5 \cdot 10^{-3}$ p.a. the earthquake risk curve exceeds that for floods. So, earthquakes seem to be of at least equal importance as floods risk for small exceedence probabilities.

When interpreting the results it must be mentioned that the city of Cologne represents only a minor fraction of the total area affected by the underlying scenario events. This is true for all three natural hazards. For example, about 12 % of the German damages due to the flood events in 1993 and 1995 occurred in Cologne. From a country-wide perspective windstorms play a very important role due to the high frequency of damages. In the period 1970-1998 75 % of the economic damages were caused by windstorms, followed by floods with 19 % (Mu-

nich Re, 1999). Earthquakes are still very important considering their high probable maximum loss potential. Altogether, the risk curves demonstrate such relationships between losses and probabilities fairly well.

As opposed to the other two natural hazards studied here the earthquake risk can be assessed with sufficient reliability even for relatively small occurrence probabilities. This is due to the distinctly longer observation period for earthquakes, as well as to the availability of paleoseismological indications and geological strain data, which confirm the respective occurrence rates, and well established distribution functions of upper bound earthquake magnitudes (Grünthal and Wahlström, this issue).

Additionally, in Fig. 7.7 the probability level of earthquake building codes (10% occurrence or exceedence within 50 years, corresponding to 475 years mean return period) is depicted as well as the 2% level in 50 years ($T=2,475$). The latter is more and more used for risk studies in low seismicity regions and is the hazard level required in the German code for water reservoirs. With regard to the high damage potential of earthquakes, there is an urgent need for a strict implementation of seismic building codes.

7.1.6 Conclusions

Experiences with decision makers (e.g. disaster management agencies, urban planners, insurers, regional and local authorities) show that they need comprehensive information which includes all relevant hazard types within a region. This case study shows that multi-risk assessments enable the comparison of different risks within an urban area and can reveal the characteristics of different disaster types. Risk curves encompassing the entire range of exceedence probabilities, with direct monetary losses as a risk indicator, provide better and more complete information for disaster mitigation than expected annual damages (EAD), since EAD is mainly influenced by the losses

due to the more frequent events. When using EAD only the damage potential of extreme events with low probabilities is easily ignored. Complete multi-hazard risk curves allow to evaluate the significance of different disaster types better, to raise awareness for the various aspects of disaster mitigation, and to develop tailor-made mitigation strategies.

For concrete planning decisions and emergency strategies, however, even more detailed information is needed. Maps which show the spatial distribution of the hazard intensities, exposed population and values, as well as expected losses due to various disasters in more detail, have to be developed in the future. Furthermore, other hazards should be included in the assessment, if pertinent. Especially, the uncertainties in the whole chain of risk assessment have to be quantified.

7.1.7 Acknowledgements

This study was prepared in the frame of the research project German Research Network Natural Disasters (DFNK) funded by the German Ministry for Education and Research (project number 01SFR9969/5). The authors are much obliged to Martin Gocht, Water and Finance – Economic Consulting for Water and Environment, Berlin, who contributed valuable data for the asset inventory of Cologne. Data provision from the German Federal Institute of Hydrology, Koblenz, the German Insurance Association (GDV), Berlin and ProAqua, Aachen are gratefully acknowledged.

7.1.8 References

- Blong, R.: 2003, A New Damage Index, *Natural Hazards*, **30**,1, 1-23.
- BZS Bundesamt für Zivilschutz: 1995, *KATANOS Katastrophen und Notlagen in der Schweiz – Eine vergleichende Übersicht*, Bundesamt für Zivilschutz, Bern, 77 pp.

- Camelbeeck, T., Martin, H., Vanneste, K., Maghraoui, M., Verbeeck, K. and Brondeel, M.: 2000, Geomorphic evidence of active faulting in slow deformation areas: the example of the Lower Rhine Embayment, *Proceedings of the Evaluation of the potential for large earthquakes in regions of present day low seismic activity in Europe*, Han-sur-Lesse, Belgium, March 13 – 17, 31-34.
- Cappel, A. and Emmerich, P.: 1975, Zwei Wetterkatastrophen des Jahres 1972: Der Niedersachsen-Orkan und das Gewitterunwetter von Stuttgart, *reports of the German weather service* 135, Offenbach.
- Chbab, E.H.: 1995, How extreme were the 1995 flood waves on the rivers Rhine and Meuse? *Phys. Chem. Earth*, **20**, 5/6, 455-458.
- Davidson, R.: 1999, *An Urban Earthquake Disaster Risk Index*, Stanford, CA: Stanford University.
- Dotzek, N.: 2001, Tornadoes in Germany, *Atmospheric Research*, **56**, 1-4, 233-251.
- Durham, K.: 2003, Treating the Risks in Cairns, *Natural Hazards*, **30**, 2, 251-261.
- Dütemayer, D.: 2000, Urban-Orographische Bodenwindssysteme in der städtischen Peripherie Kölns, *Essener Ökologische Schriften* **12**, 171 pp.
- DVWK: 1999, *Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen*, Wirtschafts- und Verlags-Ges. Gas und Wasser, Bonn, 42 pp.
- Federal Statistical Office Germany: 2002, Gross stock of fixed assets (annual average), 1991 to 2000, <http://www.statistik-bw.de/VolkswPreise/ArbeitskreisVGR/tab09.asp> (Date of computation: August 2002).
- Ferrier, N. and Haque, C.E.: 2003, Hazards Risk Assessment Methodology for Emergency Managers: A Standardized Framework for Application, *Natural Hazards*, **28**, 2/3, 271-290.
- Fink, A., Ulbrich, U. and Engel, H.: 1996, Aspects of the January 1995 flood in Germany, *Weather*, **51**, 34-39.
- Granger, K., Jones, T., Leiba, M. and Scott, G.: 1999, Community Risks in Cairns: A Multi-Hazard Risk Assessment, Australian Geological Survey Organisation, Canberra.
- Grünthal, G. (Editor): 1998, European Macro-seismic Scale 1998 (EMS-98), *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Volume **15**, 99 pp., Luxembourg.
- Grünthal, G., Mayer-Rosa, D. and Lenhardt, W. A.: 1998, Abschätzung der Erdbebengefährdung für die D-A-CH-Staaten - Deutschland, Österreich, Schweiz, *Bautechnik* **75**, 10, 753-767.
- Grünthal, G. and Wahlström, R.: 2003, An M_w based earthquake catalogue for central, northern and northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions, *Journal of Seismology*, **7**, 4, 507-531.
- Grünthal, G. and Wahlström, R.: 2004, New generation of probabilistic seismic hazard assessment for the area Cologne/ Aachen considering the uncertainties of the input data, *Natural Hazards* (this issue).
- Gumbel, E.J.: 1958, *Statistics of Extremes*, Columbia University Press, 375 p.
- Krahe, P.: 1997, Hochwasser und Klimafluktuationen am Rhein seit dem Mittelalter. In: Immendorf, R. (ed.), *Hochwasser - Natur im Überfluß?* Müller, Heidelberg, pp. 57-82.
- Munich Re: 1993, Winterstürme in Europa – Schadenanalyse 1990 – Schadenpotentiale, Munich Re.
- Munich Re: 1999, Naturkatastrophen in Deutschland – Schadenerfahrungen und Schadenpotentiale, Munich Re.
- Munich Re: 2001, Winterstorms in Europe II – Analysis of 1999 losses and loss potentials, Munich Re.
- Munich Re: 2003, Topics – Annual Review: Natural Catastrophes 2002. Munich Re Group, 48 pp.
- MURL Ministry of Environment, Regional Planning and Agriculture in North Rhine-

- Westphalia: 2000, *Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW*, Final Report of the Ministry of Environment, Regional Planning and Agriculture in North Rhine-Westphalia, 32 pp.
- Raschke, M.: 2003, Die Korrelation zwischen Erdbebenstärke und Bauwerksschaden und deren Anwendung in der Risikoanalyse, *PhD Thesis*, Bauhaus-Universität Weimar, 2003.
- Schmidt, H.: 1980, Zur Extrapolation empirischer Verteilungen der Windgeschwindigkeit für Standorte im Flachland und auf freier See, *Meteorologische Rundschau*, **33**, 129-137.
- Schwarz, J. Raschke, M. and Maiwald, H.: 2001, Methodische Grundlagen der seismischen Risikokartierung am Beispiel der Stadt Schmöln/ Ostthüringen (2) Modellereignisse, lokale Verstärkungseffekte und Schadensszenarien, *Thesis Wiss. Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, Heft 1/2, 200-219.
- Schwarz, J. Raschke, M. and Gerstenberger, A.: 2002a, Seismische Schadenspotentiale in deutschen Großstadträumen – Fallstudie Köln, In: Meskouris, K. Hinzen, K.-G. (Hrsg.) *Schutz von Bauten gegen natürlichen und technische Erschütterungen*, DGEb-Publikation Nr. 11, 69-83.
- Schwarz, J. Raschke, M., Maiwald, H.: 2002b, Seismic Risk Studies for Central Germany on the Basis of the European Macroseismic Scale EMS-98, 12th European Conference on Earthquake Engineering, Elsevier Science LTD., Paper Reference 295.
- Schwarz, J.; Raschke, M., Maiwald, H.: 2002c, Verletzbarkeit des Bauwerksbestandes in deutschen Erdbebengebieten – Ergebnisse von Fallstudien, 3. Forum Katastrophenvorsorge Potsdam (paper submitted).
- Schwarz, J.; Raschke, M., Maiwald, H.: 2004, Comparative seismic risk studies for German earthquake regions on the basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. *Natural Hazards*, in print.
- Singh, V.P. and Strupczewski, W.G.: 2002, On the status of flood frequency, *Hydrological Processes*, **16**, 3737-3740.
- Stadt Köln: 1996, *Hochwasserschutzkonzept Köln*, Stadt Köln, Dezernat Bauen und Verkehr, 216 pp.
- Statistical Office Baden-Württemberg: 2000, *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung der Länder. Bruttowertschöpfung der kreisfreien Städte und der Landkreise in der Bundesrepublik Deutschland 1980, 1992, 1994 und 1996*, Stuttgart, Report 33, 215 pp.
- Statistical Office North Rhine-Westphalia: 2002, pers. communication, *Gross stock of fixed assets in North Rhine Westphalia 1997*.
- Stedinger, J.R., Vogel, R.M. and Foufoula-Georgiou, E.: 1992, Frequency analysis of extreme events, In: Maidment, D.R., *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill, Inc., New York, pp. 18.1-18.66.
- Troen, I. and Petersen, E.L.: 1989, *European Windatlas*, Ris.Ø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- UNDRO (ed.): 1977, *Composite Vulnerability Analysis - A Methodology and Case Study of the Metro Manila Area*, Geneva, 55pp.
- IDNDR Secretariat, UN: 2000, RADIUS: Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas against Seismic Disasters, Geneva
- Urban Development Authority of Cologne: 2002, Kölner Strukturdaten 2001, <http://www.stadt-koeln.de/zahlen/index.html> (Date of computation: 28.11.2002).
- Van Westen, C.J., Montoya, L. and Boerboom, L.: 2002, Multi-Hazard Risk Assessment using GIS in urban areas: A case study for the city of Turrialba, Costa-Rica, In: *Proc. Regional workshop on Best Practise in Disaster Mitigation*, Bali, 120-136.
- Vogt, R.: 1995, Hochwasser in Köln, In: *Proceedings Mit dem Hochwasser leben*, 48-55.

Wieringa, J.: 1973, Gust factors over open water and built-up country, *Boundary Layer Meteorology*, **3**, 424-441.

Wind, H.G., Nierop, T.M., de Blois, C.J. and de Kok, J.L.: 1999, Analysis of flood damages from the 1993 and 1995 Meuse floods, *Water Resources Research*, **35**, 11, 3459-3465.

Wood, E.F. and Rodríguez-Iturbe, I.: 1975, A Bayesian approach to analyzing uncertainty among flood frequency models, *Water Resources Research*, **11**, 6, 839-843.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Die 15 Partner des DFNK	5
1.2	Die fünf thematischen Cluster des DFNK	6
1.3	Die Elemente der Wirkungskette Hochwasserrisiko	8
1.4	Zusammenwirken der Teilprojekte im Cluster „Risikoanalyse Erdbeben“ am Beispiel von Schadensprognosen für Rettungswege in Köln (zur Verfügung gestellt von J. Schwarz)	9
1.5	Innovationstransfer von wissenschaftlichen Ergebnissen in die Anwendung (zur Verfügung gestellt von J. Wächter)	11
2.1	Die Teilprojekte des Clusters „Risikoanalyse Hochwasser“ und ihre räumliche Zuordnung im Rheineinzugsgebiet	23
2.2	Das Zusammenwirken der Teilprojekte im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“	24
2.3	Jahresmittel und -maximum für das EDS-Gebiet 2280 für OBS (schwarz), ANA (blau), CTL (grün) und SCA (rot). Beachtenswert ist die Vergleichbarkeit der Variabilität in beiden Fenstern, aber auch die langsamen Fluktuationen bei den GCM-Szenarien. Deutlich zu erkennen ist die Zunahme von SCA im Jahresmittel ab 2000. Ein ähnlicher Trend, allerdings weniger klar, existiert für die Maxima.	31
2.4	Oberes Fenster: Beobachtete (OBS , schwarz) und EDS-simulierte (ANA , blau) tägliche durchschnittliche Niederschläge für das EDS-Gebiet 2100 (Saar) im Jahr 1986. Deutlich erkennbar ist die realistische Variabilität. Ebenso werden Niederschlagscluster sowie Trockenperioden gut wiedergegeben. Dies verdeutlicht das 7-Tage Mittel (unteres Fenster). Man beachte die erstaunliche Ereignisfolge im September-Oktober: Ein starkes Doppelereignis wird gefolgt von einer Trockenperiode von etwa einem Monat und beendet durch das stärkste Ereignis der gesamten Beobachtungsperiode. Dies wird bis auf das Doppelereignis durch das EDS recht gut reproduziert.	32
2.5	Räumliche Verteilung der erwarteten Änderung der winterlichen täglichen Niederschlagssumme, über alle Stationen interpoliert. Alle Werte sind positiv, mit lokalen Maxima im Raum Spessart und in der westfälischen Bucht. Für fast das gesamte Gebiet ist diese Zunahme signifikant bei einem Niveau von 5%.	33

2.6	Räumliche Verteilung der erwarteten Änderung für die sommerliche Wahrscheinlichkeit (links) und Intensität (rechts) des täglichen Niederschlags, über alle Stationen interpoliert. Deutlich ist das unterschiedliche Vorzeichen der beiden Felder für fast die gesamte Region.	33
2.7	Kumulative Verteilungsfunktion jeweils 30-jähriger Niederschlagsdaten eines Nahe-Gebietes (dabei 10 Abschnitte von CTL , siehe Text) für Winter (links) und Sommer (rechts). Deutlich erkennbar ist die große Spanne bei sehr starken Ereignissen (>5 Jahre Wiederkehrzeit), was auf entsprechende natürliche Fluktuationen (CTL) bzw. auf mögliche Modellfehler zurückgeht (ANA/Sommer). Trotzdem ist ein klarer Trend zu einer Intensivierung der Ereignisse erkennbar, welche im Winter eher uniform und moderat, im Sommer dagegen auf 1- bis 3-jährige Ereignisse beschränkt, aber umso stärker ist.	34
2.8	Wechselwirkungen zwischen TP A4.1 und weiteren Teilprojekten im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“.	39
2.9	Lage des Untersuchungsgebiets und dessen Untergliederung in 23 Teilgebiete. Die Hauptzuflüsse des Rheins (Main, Mosel, Neckar) setzen sich aus jeweils vier bzw. fünf Teilgebieten zusammen.	40
2.10	Vereinfachte Übersicht zur Methode der Durchflusssimulation auf der Basis von Klimaszenarien. P=Luftdruck, T=Temperatur, q=spezifische Feuchte, N=Niederschlag (aus Menzel et al., 2002; verändert).	41
2.11	Abweichungen von den aus Stationsmessungen 1961-1990 bestimmten Gebietsmitteln des Niederschlags N und der Temperatur T, dargestellt für drei Teilgebiete sowie das gesamte Rhein-Einzugsgebiet zwischen den Pegeln Maxau und Köln. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufes geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger Mittelwerte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.	43
2.12	Abweichungen von den aus Stationsmessungen 1961-1990 bestimmten Gebietsmitteln der Temperatur T (oben) und des Niederschlags N (unten) für das Gebiet des Neckars bis Pegel Plochingen. Der Winterzeitraum umfasst die Monate November bis April, das Sommerhalbjahr schließt die Monate Mai bis Oktober ein.	43
2.13	Prozentuale Abweichungen von den aus Pegelmessungen 1961-1995 abgeleiteten, mittleren jährlichen Durchflüssen MQ. Die schwarzen Säulen (jeweils ganz links) geben den mittleren Fehler des hydrologischen Modells HBV-D unter Nutzung von Messwerten des Niederschlags und der Temperatur an. Alle weiteren Auswertungen beruhen auf der Anwendung der Modellkette GCM - EDS - HBV-D. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufs geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger MQ-Werte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.	44

2.14	Prozentuale Abweichungen von den gemittelten Jahreshöchstabflüssen MHQ der Messperiode 1961-1995. Die schwarzen Säulen (jeweils ganz links) geben den mittleren Fehler des hydrologischen Modells HBV-D unter Nutzung von Messwerten des Niederschlags und der Temperatur an. Alle weiteren Auswertungen beruhen auf der Anwendung der Modellkette GCM - EDS - HBV-D. Die Fehlerbalken um die jeweiligen Daten des Kontrolllaufes geben die gesamte Variationsbreite 30-jähriger MHQ-Werte über den Simulationszeitraum von 300 Jahren wieder.	45
2.15	Versuchsstandorte Lietzen (oben) und Kahlenberg (unten)	52
2.16	2D-horizontale Verteilung der gefärbten (grün) und ungefärbten (rot) Makroporen sowie der Getreide-Pflanzreihen am Löss-Standort Adenstedt (links konventionelle Bodenbearbeitung, rechts reduzierte Bodenbearbeitung; oben Bodenoberfläche, unten 30 cm Bodentiefe).	54
2.17	Makroporosität von landwirtschaftlich genutzten Ackerstandorten: Vergleich der konventionellen zur konservierenden Bodenbearbeitung am Sand-Standort Lietzen.	55
2.18	Ausschnitt aus den Luftbildern von (a) 1984 und (b) 1996, (c) Differenzbild, wobei sehr negative Differenzwerte sehr dunklen Grauwerten entsprechen, sehr positive Differenzwerte entsprechend durch sehr helle Grauwerte dargestellt werden.	62
2.19	Änderungen in der Albedo von Dächern: (a) Änderung von dunkel nach hell, (b) Änderung von hell nach dunkel, (c) gleichbleibende Albedo.	62
2.20	Mögliche Prozessierungsschritte im zweiten Teil des Ansatzes: (a) Extraktion gerader Kanten, (b) Segmentierung des Bildes in homogene Regionen, (c) Extraktion von Schatteninformation.	62
2.21	Ergebnis der Landnutzungsklassifizierung im Leintestgebiet: (a) Landsat-Szene (Echtfarbendarstellung) vom 11.9.1999 mit Überlagerung der Gemarkungsgrenzen, (b) Ergebnis der Klassifikation unter Einbeziehung zusätzlicher Geofaktoren.	63
2.22	Mit SOBEK modellierte Flussstrecken (oben) und Teileinzugsgebiete der Niederschlags-Abfluss-Modellierung (unten)	69
2.23	Anpassung von 2D-Simulation und Transferfunktion (links) und Vergleich der berechneten Abflussganglinien für den Polder Mehrum (rechts)	71
2.24	Vollständiger Algorithmus zur analytischen Berechnung des Abflusses durch eine Bruchstelle	72
2.25	Überflutungsgebiet mit Deichbruchstelle (Kreis)	73
2.26	Berechnete Überflutungsflächen und -tiefen im Polder Mehrum der Hochwasserereignisse 1993, 1995 und 1995+.	74
2.27	Wasserstandsänderungen bei variierenden Bruchzeitpunkten am Polder Krefeld beim Hochwasser 1995+	74
2.28	Maximal mögliche Wellenscheitelreduzierungen im Rheinverlauf bei Deichbruch am Polder Krefeld (b = Breschenbreite)	75

2.29 Verknüpfung von Hochwasservorhersagemodell und Simulationsmodell für Deichbruchszenarien zur Verbesserung der Hochwasservorhersage	75
2.30 Einfluss der Rasenqualität fg auf Deichbruch durch Überströmen für den Deich bei Krefeld. Der Deich bricht, wenn die abgebildeten Grenzzustandlinien „aktueller Überfluss - kritischer Überfluss = 0“ überschritten werden.	82
2.31 Deichbruchwahrscheinlichkeit durch Überströmen in Abhängigkeit von Überströmdauer t_e und Überströmhöhe dh unter Annahme einer Normalverteilung für fg mit Mittelwert 1.05 und Standardabweichung 0.1504 (99% der Werte im Intervall 0.7 - 1.4)	82
2.32 Lage des Untersuchungsgebietes	87
2.33 Hochwasserwelle im Jahr 1993 in der Natur und im Modell	89
2.34 Startseite des Informationssystems mit Fluss-Profilaten.	89
2.35 Szenario II – Ausbreitung der Überflutung nach 18 bzw. 36 Stunden.	90
2.36 Szenario III - Überflutung und Schadstoffausbreitung 37 bzw. 56 Stunden nach Bruch, Schadstoffeintrag 36 Stunden nach dem Dammbbruch (Angaben als relative Konzentrationen C/C_0).	91
2.37 Szenario II – Darstellung von Linien gleicher Wassertiefen über Infrastrukturdaten 6 Stunden nach Deichbruch. Kleines Bild (oben) Wasserstände über der Zeit an roten Punkten, kleines Bild (unten) Foto für gelb markierten Bereich.	91
2.38 HTML Browser mit Java (links) und ArcPad auf einem PDA handheld PC (rechts).	92
2.39 Dimensionen der Hochwasseradaption und Fokus des TP A6	95
2.40 Privathaushalte: Risikowahrnehmung in Abhängigkeit von der horizontalen und vertikalen Entfernung zum Fluss	98
2.41 Privathaushalte: Wahrgenommene Wirksamkeit, Kosten und Möglichkeit präventiven Selbstschutzes	98
2.42 Privathaushalte: Durchführungsgrad präventiven Selbstschutzes und Herausforderungen der Risikokommunikation	98
2.43 Unternehmen: Wahrgenommene Wirksamkeit, Kosten und Möglichkeit präventiven Selbstschutzes	101
2.44 Unternehmen: Durchführungsgrad präventiven Selbstschutzes	101
2.45 Das Zielgebiet der Risikoanalyse, der Polder Mehrum und seine Nutzungsklassifikation	110
2.46 Glieder der Wirkungskette Hochwasser, deren Beschreibung mit deterministischen Modellen der einzelnen Projektpartner und die entsprechenden vereinfachten Ansätze im probabilistischen Modellsystem des TP A4.2	111
2.47 Schematische Darstellung des Modellsystems zur Ableitung der Risikokurven und assoziierter Unsicherheitsbänder im TP A4.2 (AMS: annual maximum series bzw. Serie der jährlichen Maximalabflüsse, Q: Durchfluss, H: Wasserstand, V = Volumen)	112

2.48	Wiederkehrintervalle T und jährlicher Maximalabfluss in Rees für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 in Krefeld, Rasenqualität $fg = 1.05$	113
2.49	Unsicherheitsbänder für den Maximalabfluss bei Rees für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 (A - D), $fg = 1.05$	113
2.50	Wiederkehrintervalle T und zu erwartender Schaden im Polder Mehrum für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 in Krefeld, Rasenqualität $fg = 1.05$	114
2.51	Unsicherheitsbänder für die Risikokurven für den Polder Mehrum für Breschenbreitenszenarios K100 – K400 (A - D), $fg = 1.05$	114
3.1	Die Szenariogruppe Ginger; a) Zeitliche Entwicklung der maximalen Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund. Hervorgehoben ist der Referenzlauf und der Lauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz; b) Zeitliche Entwicklung des Kerndruckes; c) Maximalwindfeld für den Referenzlauf in m/s; d) Maximalwindfeld für den Modelllauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz in m/s	122
3.2	Die Szenariogruppe Anna; a) Zeitliche Entwicklung der maximalen Windgeschwindigkeit in 10 m über Grund. Hervorgehoben ist der Referenzlauf und der Lauf mit um 5 K erhöhtem Temperaturgegensatz; b) Zugbahnen, d.h. Bewegung des Punkts mit dem tiefsten Druck im auf NN reduzierten Druckfeld.	123
3.3	a) Extrapolierte Windgeschwindigkeiten für eine Wiederkehrperiode bis 500 a nach Schmidt und Gumbel; b) Abgeschätzte Sturmschäden. Bis zu einer Wiederkehrperiode von 100 Jahren liegen die nach Schmidt extrapolierten Windgeschwindigkeiten zugrunde, für den 500 Jahreswert wurde die Gumbelverteilung verwendet.	125
4.1	„Risikoanalyse Naturgefahr Erdbeben“: Teilprojekte, Informationsfluss und Verbindungen zwischen den Bearbeitungsebenen, Zuordnung und Überlappung der Fachgebiete (Erläuterungen siehe Tabelle 4.1)	130
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.	140
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).	141

- 4.4 Entscheidungsbaumstruktur der Eingangsdaten für die Gefährdungsanalyse auf der Grundlage von Beschleunigungen (Spitzenbeschleunigung, 0,4s und 1,0s Pseudobeschleunigung). Die Herdzonenmodelle werden in Abb. 4.2 gezeigt. Die Dämpfungsfunktionen 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 Herdtiefenordnung wird im Text diskutiert. Für intensitätsbasierte Gefährdungsrechnungen findet ein analoger Entscheidungsbaum mit den entsprechenden Intensitätsrelationen Anwendung. 142
- 4.5 Mittel, Median und Median \pm 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. 143
- 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. 144
- 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. 145
- 4.8 Bebenverteilung, GPS-Stationsgeschwindigkeiten und geodätische Deformationsrate in der Niederrheinischen Bucht. 146
- 4.9 H/V-Spektren wie sie an zwei Messpunkten im ostrheinischen Gebiet von Bonn aus Messungen des seismischen Rauschens bestimmt wurden. Links: Messpunkt am Flugplatz Bonn Hangelor; rechts: Messpunkt an der Burg Lede bei Vilich (Bonn). Die ausgezogene Kurve entspricht dem mittleren H/V-Verhältnis, der graue Bereich \pm einer Standardabweichung. 153
- 4.10 Karte der aus H/V-Messungen nach der Nakamura-Methode geschätzten Grundresonanzfrequenz der Sedimentbedeckung im Untersuchungsgebiet Köln. Weiße Linien markieren die Position bekannter tektonischer Störungen, graue Punkte Orte mit einem H/V-Verhältnis von etwa 1 im gesamten untersuchten Frequenzbereich. Letzteres ist typisch für Standorte auf ausstreichendem Grundgebirge (d.h. keine spektrale Bodenverstärkung auf Felsuntergrund). 153
- 4.11 Vergleich der Nakamura-Spektren an drei Standorten mit den dort erbohrten Mächtigkeiten der Sedimente über dem devonischen Grundgebirge. Die Messpunkte lagen nahe der Erft-Störung (links), im Rheinpark am rechten Rheinufer (Mitte) und im Ort Refrath im Bergischen Vorland (rechts). 154

4.12 Karte der Sedimentmächtigkeit h im Untersuchungsgebiet Köln, abgeleitet aus H/V-Messungen an 376 Meßstellen (graue Punkte). Die Isolinienabstände betragen 20 m, 100 m und 200 m für $h < 100$ m, $100 \text{ m} < h < 1400$ m bzw. $h > 1400$ m. Die 30 m Konturlinie ist hervorgehoben. 154

4.13 Aus der Amplitude des H/V-Maximums geschätzte Werte der Schwingungsverstärkung bei der Grundresonanzfrequenz f_o für die Messpunkte im Untersuchungsgebiet Köln. 156

4.14 Spektren der Bodenverstärkung für drei ostrheinische Messpunkte mit geringer Sedimentmächtigkeit (< 100 m). Die Verhältnisspektren wurden berechnet nach der H/V-Methode aus seismischen Rauschmessungen (links) bzw. Registrierungen schwacher lokaler Erdbeben (Mitte) sowie für die Erdbebenregistrierungen auch nach der Standard Spectral Reference Site Method (SSR; rechts). Die SSR bestimmt für gleiche Registrierkomponenten das Verhältnis der Spektren an den Sedimentstandorten zu den an nahen Referenz-Messpunkten auf Felsgestein ermittelten Spektren. 157

4.15 Vergleich der Bodenschwinggeschwindigkeit zwischen Pseudo-2D- (links) und 2D-Hybrid-Modellierung (rechts) für ein identisches Untergrundmodell und identische Bebenparameter. Es wurde eine globale Skalierung gewählt, damit die Amplituden vergleichbar sind. 165

4.16 Lage der vier Profile für die 2D-Hybrid-Modellierung. Die Profile treffen in Köln am Standort der Köln-Deutzer Brücke zusammen. Die Mächtigkeit der Sedimentschichten (in m) ist als Grauschattierung wiedergegeben. 165

4.17 Variation der Mächtigkeit der Sedimentschichten entlang der vier Profile aus Abb. 4.17 (60-fach überhöht). Die Sedimentmächtigkeit im westlichen Abschnitt von Modell 1 musste an die Vorgaben der 2D-Hybrid-Modellierung angepasst werden, die besagen, dass die lokale Untergrundstruktur ein in horizontaler Richtung deutlich abgegrenzter Bereich sein muss. Diese Anpassung hat keinen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse aus dem östlichen Abschnitt des Modells, da sowohl Bebenherd als auch Testgebiet weit genug entfernt liegen. Die Projektion des Bebenherdes (Erftsprung- System) auf das Profil (Stern) und der Schnittpunkt aller Profile (Kreuz) sind eingezeichnet. 166

4.18 EW-Komponenten der Bodenschwinggeschwindigkeit (in einheitlicher Skalierung) für die 4 Profile aus Abbildung 4.17 (in derselben Anordnung). Der Referenzpunkt für die Distanzskalierung befindet sich am Kreuzungspunkt der Profile (+ in Abbildung 4.17). 166

4.19 NS-Komponenten der Bodenschwinggeschwindigkeit (in einheitlicher Skalierung) für die 4 Profile aus Abbildung 4.17(in derselben Anordnung). Der Referenzpunkt für die Distanzskalierung befindet sich am Kreuzungspunkt der Profile (+ in Abbildung 4.17). 167

4.20	Einen Überblick über im Wellenfeld vorhandene Resonanzfrequenzen bietet die Berechnung von spektralen Verhältnissen (hier: gemittelte horizontale zu vertikalen Spektren) für Modell 1(links) und Modell 3(rechts). Je dunkler die Grauschattierung ist, desto größer ist die Amplitudenverstärkung. Die gestrichelten Linien geben den theoretischen Verlauf der Grundresonanzfrequenz an (1D). Einige Eigenfrequenzen von Severinbrücke (Punkte) und Köln-Deutzer Brücke (Dreieck) sind eingezeichnet.	168
4.21	Unterteilung des Großraums Köln in acht Teilregionen; überlagert sind die Isolinien der in-situ gemessenen Grundresonanzfrequenzen von Parolai et al. (2001)	176
4.22	Transferfunktionen und Antwortspektren für das Standardereignis "Schwäbische Alb" vom 26.02.69; Sedimentmächtigkeiten $d=390$ m und $d=120$ m . . .	176
4.23	Kritische Horizontalbeschleunigung k_h^* , (Richards et al., 1993)	177
4.24	Mächtigkeit der Sedimentbedeckung im Raum Köln.	181
4.25	Grundresonanzfrequenz (a) und Verstärkungsamplituden (b).	182
4.26	Abschätzung der PGA Verteilung im Raum Köln.	184
4.27	Abschätzung des Bodenverflüssigungspotentials im Raum Köln.	185
4.28	Normierte Antwortspektren (durchgezogene Linien) im Vergleich mit standortspezifischen Spektren aus der DIN 4149neu (gestrichelte Linien).	186
4.29	Darstellung der Testgebiete (durch Vor-Ort-Begehungen im Detail aufgenommen) und Einordnung der einzelnen Gebäude in Verletzbarkeitsklassen (vulnerability classes) nach EMS-98.	194
4.30	Zusammensetzung der Bauwerkssubstanz in den Testgebieten nach Bauwerkstyp (building type) und Verletzbarkeitsklasse (vulnerability class) gemäß EMS-98.	194
4.31	Ergebnisse für das Testgebiet Schmölln: Mittlere Schadensgrade in Abhängigkeit von der Bebenintensität (Durchschnittswerte in den Elementen des Flächennutzungsplans); aus: Schwarz et al. (2004).	195
4.32	Ergebnisse für den Großstadtraum Köln: Mittlere Schadensgrade bei Wiederholung historischer Erdbeben (Durchschnittswerte in den Stadtvierteln); aus: Schwarz et al. (2004).	195
4.33	Schadenserwartung in den beiden Untersuchungsgebieten für unterschiedliche Bebenszenarien (Balken links/rot: Schmölln; Balken rechts/blau: Köln); aus: Schwarz et al. (2004).	196
4.34	Einordnung von Krankenhäusern in die von extremen Erdbeben (E5 mit I (EMS) = 8.5) und extremen Hochwassern (HQ500) mit hoher Wahrscheinlichkeit betroffenen Gebiete Kölns.	198
4.35	Quantifizierung der Schadenspotentiale in Verlustgrößen (Epizentren gemäß Abb. 4.32) unter Zugrundelegung der Intensitätseintretensraten aus den Gefährdungsanalysen von Teilprojekt B1 (Grünthal und Wahlström,2003).	199
4.36	Rettungswegenetz für die Stadt Köln mit den untersuchten Bauwerken	205
4.37	Untersuchte Rheinbrücken in Süd-Ansicht und Querschnitt	206

4.38	Eigenformen und -perioden der Rheinbrücken mit Massenbeteiligungen (in %)	206
4.39	Bemessungsspektrum nach E-DIN 4149 und Antwortspektren der zur KB und SB nächstgelegenen Zeitverlaufs-Spuren nach TP B2.2 (GFZ).	207
4.40	(a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene von Berlin, (b) erkannte Häuser aufgrund der spektralen, panchromatischen und zusätzlichen (c) Höheninformation, die in diesem Beispiel auf Daten des Sensors HRSC-A basieren.	215
4.41	Höheninformation aus Satellitendaten: (a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene mit überlagerten Hausgrenzen, (b) normalisiertes digitales Oberflächenmodell basierend auf Stereoinformationen des HRSC-A Sensors, (c) Höhendaten aus Schatteninformation, (d) Gebäudehöhen aus (b).	216
4.42	Beispiele von Stadtstrukturtypen, die sich in IKONOS Daten identifizieren lassen: (a) Blockrandbebauung, (b) Zeilenbebauung (c) Großformbebauung/Hochhäuser, (d) Villenviertel.	217
4.43	Höheninformation aus Satellitendaten: (a) Ausschnitt aus der IKONOS Szene mit überlagerten Hausgrenzen, (b) normalisiertes digitales Oberflächenmodell basierend auf Stereoinformationen des HRSC-A Sensors, (c) Höhendaten aus Schatteninformation, (d) Gebäudehöhen aus (b).	218
4.44	Erdbebengefährdung für die D-A-CH Staaten (Grünthal et al, 1998)	222
4.45	GPS-Netz in Deutschland	224
4.46	Vorläufige GPS-Stationsgeschwindigkeiten zur Erdbebengefährdungseinschätzung mittels Strainberechnung	226
4.47	Geodätischer Strain für das Gebiet des Niederrheingrabens	227
5.1	Vernetzung und Informationsfluss des Clusters Simulationssystem Waldbrand .	233
5.2	Ansicht des ersten DFNK-Waldbrandexperiments in der Lausitz (August 2001). Hier baut sich ein Bodenfeuer in einem jungen Kiefernbestand als Kronenfeuer auf.	235
5.3	Ansicht eines weiteren DFNK-Waldbrandexperiments in der Lausitz (August 2002). Es handelt sich hierbei um eine typische Heidefläche mit eingestreuten Birken, in dem sich Feuer hoher Intensität und rascher Ausbreitungsgeschwindigkeit entwickeln können.	236
5.4	Simulation eines Waldbrandes im Forstrevier Zschorno (Lausitz, Brandenburg) unter trocken-heißen Wetterbedingungen (simulierte Lufttemperatur 32°C, Ostwind 35-55 km/h in Böen, relative Luftfeuchtigkeit unter 20%). Das Feuer ist im rechten Teil des Simulationsfensters auf einer Heidefläche entstanden und ist – vom Ostwind getrieben – in der Lage, zwei Brandschneisen, die in N-S-Richtung verlaufen, zu überspringen und sich in den Wald auszubreiten. Die Brandschneise südlich des Brandherdes hält hingegen das Feuer auf. Bei flächendeckender Einführung eines solchen Simulationssystems, die eine ebenfalls flächendeckende Kartierung der Vegetation erforderlich macht, und bei Verfügbarkeit von lokalen Wetterdaten können der Verlauf eines Großwaldbrandes simuliert und die Löschkräfte gezielt eingesetzt werden.	237

- 5.5 Beispiel des Waldbrandgefahren-Indexes des DWD (27. Mai 2003), der während der Feuersaison täglich auf dem Internet zur Verfügung gestellt wird. Das System erlaubt eine detaillierte Vorhersage des Indexes in den Bundesländern. Im rechten unteren Teil des „Screenshots“ ist das Beispiel von Cottbus (Brandenburg) vom gleichen Tag gezeigt. Dort erscheint neben dem aktuellen Index die Vorhersage für die nächsten drei Tage und retrospektiv für die vergangenen beiden Tage. 238
- 5.6 AWFS/FIREWATCH im Einsatz in Brandenburg. Das Hintergrundbild zeigt eine Bildwiedergabe eines entdeckten Feuers. Unten sind (v.l.n.r.) ein Turm, die Kamera und ein Screenshot des automatischen Lokalisierungssystems dargestellt. 239
- 5.7 Installation des Systems
FIREWATCH in Brandenburg. 240
- 5.8 Struktur-mechanisches Modell des BIRD, der im Oktober 2001 mit einer indischen Rakete in den Orbit geschossen wurde. 240
- 5.9 Beispiel des Waldbrandgefahren-Indexes für Eurasien (11. Juni 2003). Dieser Index wird während der Feuersaison täglich auf die GFMC-Website (tägliche Lage für die Russische Föderation) gestellt. 241
- 5.10 Bewährung von BIRD bei der Feuerkatastrophe in Portugal im Sommer 2003: Diese BIRD-Szene vom 4. August 2003 nachmittags wurde innerhalb von wenigen Minuten nach Empfang vom DLR dem GFMC übermittelt, dort auf den Lagebericht Portugal ins Internet gestellt und von den portugiesischen Behörden zur Lagebeurteilung und Entscheidungsunterstützung verwendet. 242
- 5.11 Jährliche Feueranzahl (oben) und verbrannte Fläche (unten) in den Waldflächen Brandenburgs 1975-98. Simuliert vom regionalen Feuermodell Reg-FIRM, das in das Vegetationsmodell LPJ-DGVM eingebettet ist, für drei verschiedene Bestandesstrukturen, potentiell natürliche Vegetation (PNV - hellgraue Linie), aktuelle Vegetation (mittelgraue Linie) und ausschließlich Laubwälder (schwarze Linie). Als graue Flächen unterlegt sind entsprechende Beobachtungen aus der Waldbrandstatistik des Landes Brandenburg. 250
- 5.12 Zeitliche Veränderung der klimatischen Feuergefährdung (oben), der Feueranzahl (Mitte) und der verbrannten Flächen (unten) wie von Reg-FIRM, eingebettet in das LPJ-DGVM, für die Szenarien der GCMs HadCM3 (Hadley Center Coupled Model des United Kingdom Met Office), PCM (Parallel Climate Model des National Center for Atmospheric Research, USA) und CSIRO2 (CSIRO coupled model, Australia) simuliert. Gestrichelt hervorgehoben sind die gleichen Simulationsergebnisse, aber mit konstanter CO₂-Konzentration ab dem Jahr 2001, um den entsprechenden Einfluß des CO₂-Effektes hervorzuheben. . . 251
- 5.13 Einfluss des Feuers und der Klimaänderung auf den in der Biomasse gespeicherten Kohlenstoff (oben) und die Bestandesstruktur (unten) wie vom LPJ-DGVM mit dem Reg-FIRM Waldbrandmodell für drei Klimaänderungsszenarien simuliert (Gestrichelte Linien: konstante CO₂-Konzentration ab 2001. Unten: Nadelwald - blau, Laubwald - grün, C₃-Gräser - rot, unbedeckte Flächen - gelb.) . . . 252

6.1	Das DFNK-Clearinghouse: Beispiel einer Recherche nach Pegelmessstationen und Wasserstandsdaten am Rhein	263
6.2	Web-Portal des DFNK, die zentrale Drehscheibe für Daten- und Informationsmanagement und Außendarstellung	264
6.3	Darstellung des „gap“ für die Epizentren von zwei Ereignissen relativ zu einem Stationsnetz.	270
6.4	Verteilung des „gap“ (in Grad) für verschiedene Stationsverteilungen. In Karte 1 werden ausgewählte Stationen des GRSN berücksichtigt. In Karte 2 ist dieses Stationsnetz um GERESS und die neuen Stationen NRDL und UBBA erweitert. Karte 3 zeigt die Verteilung des „gap“ für das angestrebte Stationsnetz mit insgesamt sieben Stationen.	271
6.5	Die Karte zeigt die angestrebte Konfiguration des primären Stationsnetzes für das Erdbeben-Informationssystem (rote Punkte). Ebenfalls eingetragen sind die Stationen des GRSN und des Gräfenberg Arrays. An den rot markierten Stationen ist bereits die SeedLink Software für die kontinuierliche Datenübertragung installiert.	272
6.6	Hardware-Komponenten der Station NRDL im Bergwerk Niedersachsen Riedel. Der Aufbau besteht aus zwei Teilen. Die rechte Seite mit dem Seismometer und dem Datenerfassungsgerät beschreibt den Teil des Aufbaus unter Tage. Er benötigt keine eigene Infrastruktur.	273
6.7	Seismometer-Standorte (unter Tage) an den Stationen NRDL (links) und UBBA (rechts). Die Seismometerabdeckung zur Verringerung von Unruhe durch Temperaturschwankungen und Konvektion ist an der Station NRDL entfernt.	273
6.8	Software-Komponenten der Datenerfassung und Datenübertragung zwischen den neuen Stationen NRDL bzw. UBBA und dem Datenzentrum in der BGR.	274
6.9	Übersicht über die Prozesse bei der Bearbeitung der Wellenformdaten	276
6.10	Oberfläche mit Übersichtskarte und weiteren Kartenbeispielen des Graphischen Informationssystems.	278
7.1	Extrapolated mean wind speeds for selected return periods up to 100 years (following Schmidt) and 300 years (following Gumbel).	290
7.2	Four possible distributions of discharge at the Cologne gauge based on the annual maximum series from 1880 to 1999 (AMS 1880-1999) and empirical probabilities of observed and historic flood events estimated with different plotting position formulas (cf. text).	291
7.3	Selected inundation scenarios for Cologne. According to the current rating curve the water levels of 11.30 m, 12.50 m and 13.25 m correspond to a discharge of 12,018 m ³ /s, 14,247 m ³ /s and 15,677 m ³ /s, respectively.	292
7.4	Probabilistic seismic hazard curves for the centre of Cologne in terms of intensities and their fractiles. Basis for the risk assessments are here generally the mean hazard values. Corresponding intensity hazard maps for the city of Cologne are shown as inlay maps for different probability levels.	293

7.5	Spatial pattern of economic sectors in Cologne according to the land register ATKIS.	295
7.6	A: Composition of building types in the study area of Cologne (W-wooden; M-masonry, St-steel, RC-reinforced concrete; NS-natural stone, Prf-Prefabricated). B: Composition of vulnerability classes (EMS-98) in the study area of Cologne.	299
7.7	Mean damage grades d_m according to the EMS-98 in ZIP code-areas of Cologne for two different hazard levels (5% in 50 years, $T=475$ years; 2% in 50 years, $T=2,475$ years).	300
7.8	Risk curves of the hazards due to windstorms, floods and earthquakes for the city of Cologne considering losses at buildings and in the sectors private housing, commerce and industry (reference year: 2000).	301

Tabellenverzeichnis

1.1	Nutzergespräche des Cluster Risikoanalyse Hochwasser	10
2.1	Definition der Schnittstellen zwischen den Teilprojekten im Cluster „Risikoanalyse Hochwasser“	25
2.2	Übersicht zu den verwendeten Datengrundlagen	39
2.3	Aufstellung der pro Teilgebiet verfügbaren Durchflusszeitreihen sowie der zu ihrer Simulation mit HBV-D verwendeten Klimadaten. Die aus Pegelmessungen abgeleiteten Durchflüsse dienen der Kalibrierung des hydrologischen Modells HBV-D. Nicht aufgeführt sind die Daten aus der Reanalyse für die Eich- und Validierungsphase von EDS.	41
2.4	Quantifizierung der Modellunsicherheiten GCM-EDS (-HBV-D) des Referenzzeitraums sowie simulierte Veränderungen der Klima- und Abflussparameter im Projektionszeitraum auf Basis der beiden Klimamodelle. Die Unsicherheiten setzen sich aus Modellfehlern und der angenommenen, natürlichen Variabilität zusammen.	46
2.5	Übersicht ausgewählter bodenhydrologischer Kenngrößen der untersuchten Ackerstandorte.	54
2.6	Übersicht ausgewählter bodenhydrologischer Kenngrößen der untersuchten Waldstandorte.	55
2.7	Potentielle Hydrophobie in 0-5 und 5-10 cm Bodentiefe der vier untersuchten Waldumbaustadien.	56
2.8	Vergleich der prozentualen Flächenanteile der Klassifikation (KLA) mit der Gemarkungsstatistik des statistischen Landesamtes (STA).	65
2.9	Vergleich der Ergebnisse der Klassifikation von interannual dynamischen Klassen (KLA) mit der Flächenstatistik des Landwirtschaftsamts Heilbronn für das Jahr 2000 (STA).	65
2.10	Übersicht zu historischen Deichbrüchen in Deutschland.	80
4.1	Bearbeitungsstufen im Rahmen der seismischen Risikoanalyse (Schwarz et al. 2002).	131
4.2	Bebenszenarien für Köln	145
4.3	Seismologisch und geodätisch ermittelte horizontale Deformationsraten	146
4.4	Standardereignisse der E-DIN 4149, nach Schneider (1998)	174
4.5	Bearbeitungsstufen und Ergebnisse/Produkte der seismischen Risikokartierung (nach Schwarz et al. 2002; auszugsweise wiedergegeben); Spiegelung der Umsetzung im Teilprojekt.	192

4.6	Ergebnisse der Vulnerabilitätsanalyse der Rheinbrücken für laterale (lat) und longitudinale (long) Anregung. Werte sind die betragsmäßig maximale Lagerkraft in MN für die Erftsprung Szenarien E1 bis E4 sowie der Mittelwert der fünf Normszenarien und die Lager-Traglast.	209
4.7	Geodätische und seismische Strainraten	227
7.1	Estimation of assets in the city of Cologne on the basis of land use information system ATKIS and unit economic values (Statistical Office North Rhine-Westphalia, 2000) (Reference year: 2000, cf. text).	296
7.2	Monetary losses in million € up to a mean return period of 300 years. The Schmidt method was used to extrapolate the mean wind speeds up to 100 years mean return period and the Gumbel method for 300 years. For the upper estimate a roughness length of 0.55 m in the gust assessment and a γ of 5 in the damage function was assumed; for the lower estimate a roughness length of 0.45 m and an exponent of 4.	297
A.1	Beteiligte Organisationen	322

Anhang A

A.1 Beteiligte Organisationen

Nr.	Partner	Beteiligt bei Teilprojekt
1	GeoForschungsZentrum Potsdam	PM, A4.2, A5.1, B1, B2.1, B2.2, B3.1, 1, C2, C3, C5
2	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung	A2, A3, A4.1, A6
3a	Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, TU Cottbus	A2, A4.3
3b	Lehrstuhl für Bauinformatik, TU Cottbus	A5.2
4	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe	C5
5a	Geophysikalisches Institut, TU Karlsruhe	B2.1, B4, C4
5b	Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, TU Karlsruhe	B4
6	Institut für Bauingenieurwesen, TU Berlin	B2.2
7	Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Bauhaus Universität Weimar	- B3.1, B4
8	Institut für Meteorologie, Universität Leipzig	A1
9	Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz (AG Feuerökologie Freiburg)	A2
10	Bundesanstalt für Gewässerkunde	A5.1
11	Universitätsklinikum Tübingen (Katastrophenmedizin)	C6
12	Deutscher Wetterdienst	A1, A3, C3
13	Münchener Rückversicherungsgesellschaft	A1, B3.2, C3, C4
14	International Institute for Applied System Analysis, Laxenburg	A6
15	Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU Wien	A4.2

Tabelle A.1: Beteiligte Organisationen

A.2 Liste der Teilprojekte

<i>Extreme Witterungsereignisse</i>	
A 1 (Kap. 3.2, 7.1)	<i>Quantitative Ermittlung des Sturmrisikos für repräsentative Regionen Deutschlands in hoher räumlicher Auflösung</i> Institut für Meteorologie der Universität Leipzig Deutscher Wetterdienst Münchener Rückversicherungsgesellschaft
A 2 (Kap. 5.1, 5.2)	<i>Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation für Waldbrandgefahr</i> Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, AG Feuerökologie, c/o Universität Freiburg Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
A 3 (Kap. 2.2)	<i>Bereitstellung von Szenarien für extreme meteorologische Ereignisse (Starkniederschläge) unter Berücksichtigung von projizierten Klimaänderungen</i> Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung Deutscher Wetterdienst
A 4	<i>Hydrologische Untersuchungen zu Hochwasserabflüssen unter Aspekten von Landnutzungs- und Klimaänderung</i>
A 4.1 (Kap. 2.3)	<i>Erstellung eines hydrologischen Rahmenmodells zur Modellierung der Abflussbildung unter besonderer Berücksichtigung der Bedingungen der Landoberfläche und der Landnutzung</i> Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
A 4.2 (Kap. 2.9, 7.1)	<i>Methoden zur Abschätzung von Hochwasserrisiken unter Aspekten von Unsicherheit</i> GeoForschungsZentrum Potsdam Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Wien

A 4.3 (Kap. 2.4)	<i>Untersuchungen zur Steigerung des Wasserretentionspotentials forstlich und landwirtschaftlich genutzter Wassereinzugsgebiete</i> Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
A 5	<i>Simulation des Hochwasserablaufs und von Überflutungsvorgängen unter besonderer Berücksichtigung von Deichversagen, Bebauung und Infrastruktur</i>
A 5.1 (Kap. 2.6)	<i>Quantifizierung der Hochwassergefährdung für die Rheinanlieger unter Berücksichtigung von Deichversagen</i> Bundesanstalt für Gewässerkunde (Referat M1) GeoForschungsZentrum Potsdam
A 5.2 (Kap. 2.7)	<i>Simulation der raum-zeitlichen Ausbreitung von Hochwasserwellen auf Vorländern und in (nach Deichbruch) ungeschütztem Gelände unter Berücksichtigung von Topographie, Bebauung und Infrastruktur</i> Institut für Bauinformatik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus
A 6 (Kap. 2.8)	<i>Sozio-ökonomische Vulnerabilitätsabschätzung für Hochwasserrisiken</i> Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung International Institute for Applied System Analysis (IIASA), Laxenburg, Österreich

<i>Geologische Desaster</i>	
B 1 (Kap. 4.2, 7.1)	<i>Neue Generation von Erdbebengefährdungseinschätzungen</i> GeoForschungsZentrum Potsdam
B 2 (Kap. 4.5)	<i>Standortspezifische Bebenwirkungen im Gefährdungsraum Köln/Aachen</i>
B 2.1	<i>Erdbebenmikrozonierung zur Kartierung standortspezifischer Erschütterungsübertragung</i> GeoForschungsZentrum Potsdam Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe Institut für Bauingenieurwesen (Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik) der Technischen Universität Berlin

(Kap. 4.3)	
B 2.2	<i>Erdbebensimulation von Bodenerschütterungen im Bereich kritischer Bauwerke</i> GeoForschungsZentrum Potsdam Institut für Bauingenieurwesen (Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik) der Technischen Universität Berlin
(Kap. 4.4)	
B 2.3	<i>Risiken durch Sekundäreffekte von Erdbeben</i> Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
(Kap. 4.6)	
B 3	<i>Umsetzung von Erdbebengefährdungsaussagen in Risikoaussagen</i>
B 3.1	<i>Zu erwartende Erdbebenszenarien für deutsche Großstadträume und Quantifizierung der Schadenspotentiale auf der Grundlage der EMS-98</i> Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar GeoForschungsZentrum Potsdam
(Kap. 4.7, 7.1)	
B 3.2	<i>Umsetzung der Schadenserwartungswerte in Verlustgrößen (loss estimation)</i> Münchener Rückversicherungsgesellschaft
(Kap. 7.1)	
B 4	<i>Identifikation und Vulnerabilitätsanalyse von Bauwerken mit erhöhtem Erdbebenrisikopotential bzw. Sicherheitsanspruch (Fallstudien)</i> Institut für Massivbau und Baustofftechnologie der Universität Karlsruhe Institut für Konstruktiven Ingenieurbau der Bauhaus-Universität Weimar Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe
(Kap. 4.8)	

Operationelle und technische Instrumente des Katastrophenmanagements

C 1	<i>Satellitengestützte Charakterisierung und Inventarisierung von katastrophenrelevanten Elementen der natürlichen und anthropogenen Landschaftsausstattung (Rhein-Teileinzugsgebiet mit Schwerpunkt Köln/Aachen)</i> GeoForschungsZentrum Potsdam
(Kap. 2.5 & 4.9)	
C 2	<i>Deutschlandweite GPS-basierte Deformationsanalyse unter Nutzung von kontinuierlichen hochgenauen GPS-Beobachtungen</i> GeoForschungsZentrum Potsdam
(Kap. 4.10)	

C 3 (Kap. 6.2)	<i>Vernetzte Informations- und Frühwarnsysteme für den Einsatz im Katastrophenmanagement</i> GeoForschungsZentrum Potsdam Münchener Rückversicherungsgesellschaft Deutscher Wetterdienst
C 4 (Kap. 6.4)	<i>Technologie von Schadensszenarien im Rahmen eines interaktiven, nutzerorientierten Informationssystems</i> Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe Münchener Rückversicherungsgesellschaft
C 5 (Kap. 6.3)	<i>Aufbau eines schnellen Informationssystems für Erdbeben in Deutschland und in benachbarten Ländern</i> Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover GeoForschungsZentrum Potsdam

A.3 Assoziierte Partner des DFNK und Ansprechpartner

Kommission für die Hydrologie des Rheins (KHR)

Marius Meulenberg
Postbus 9072
NL-8200 AA Lelystad

Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (LGRB)

Dr. W. Stackebraucht
Stahnsdorferdamm 77
14532 Kleinmachnow

Akademie für Raumforschung und Landesplanung

Prof. Dr. D. Scholich
Hohenzollernstraße 11
30161 Hannover

Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen

Herrn Barwinski
Muffendorfer Str. 19-21
53177 Bonn

Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge e.V. (DKKV)

Karl-Otto Zentel
Tulpenfeld 4
53113 Bonn

Geologischer Dienst NRW -Landesbetrieb-

Hans D. Hilden
De-Greiff-Strasse 195
47803 Krefeld

Institut für Allgemeine und Angewandte Geophysik, Ludwig-Maximilians Universität

H. Koffel
Theresienstraße 41
80333 München

Hochwasserschutzzentrale der Stadt Köln, Stadthaus

Bela Dören
Willy Brandt-Platz 2
50679 Köln

Deutsche Rück/Verband öffentlicher Versicherer

Meike Müller, Dr. Reindl
Hansaallee 177
40549 Düsseldorf

Deutsche Gesellschaft für Erdbeben-Ingenieurwesen und Baudynamik (DGEB) e.V.

Prof. S. Savidis
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin

A.4 Mitglieder des Lenkungsausschusses

Prof. Dr. Dr. h.c. Rolf Emmermann

(Vorsitzender)
GeoForschungsZentrum Potsdam
Telegrafenberg
14473 Potsdam

Dr. Gerhard Berz

Münchner Rückversicherung
Königin-Straße 107
80791 München

Udo Gärtner

Präsident des
Deutschen Wetterdienstes (DWD)
Frankfurter Str. 135
63067 Offenbach

Prof. em. Dr. Robert Geipel

Technische Universität München
Geographisches Institut
Arcisstr. 21
80290 München

Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz

Geschäftsst. c/o Arbeiter-Samariter-Bund
Deutschland e. V.
Sülzburgstr. 140
50937 Köln

Ministerialdirigent H.-J. Knöll

Finanzministerium Brandenburg
Steinstrasse 104-106
14467 Potsdam

Dipl.-Ing. Dietrich Löpke

Leiter der
Akademie für Krisenmanagement,
Notfallplanung und Zivilschutz
Ramersbacherstr. 95
53474 Bad Neuenahr-Ahrweiler

Prof. em. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Erich J. Plate

Universität Karlsruhe (TH)
Postfach 6980
76128 Karlsruhe

Prof. Dr. Ortwin Renn

Akademie für Technikfolgenabschätzung
Industriestr. 5
70565 Stuttgart

Ministerialdirigent a.D. Klaus Henning Rosen

Rheinblickstrasse 40
53619 Rheinbreitbach

Dr.-Ing. Karl-Heinz Rother

Präsident des
Landesamtes für Umweltschutz und Gewerbeaufsicht
Rheinland-Pfalz
Amtsgericht-Platz 1
55276 Oppenheim

Prof. Dr. Dr. h. c. mult. Eugen Seibold

Geologisches Institut der Albert-Ludwigs-Universität
Albertstr. 23-B
79104 Freiburg im Breisgau

Alfred Thorwarth

Westdeutscher Rundfunk
Jahnstr. 2a
50259 Puhlheim

Prof. Dr. Dietmar Grünreich

Präsident des
Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie
Richard-Strauss-Allee 11
60598 Frankfurt a. Main

A.5 Publikationen im Rahmen des DFNK

A.5.1 Allgemeine Publikationen

Friedrich, J., Grünthal, G., Merz, B., Radtke, K., Raschke, M., Schwarz, J. and Thieken, A. (2002): Synopse der Naturgefahren für die Stadt Köln - Eine Strategie. G. Tetzlaff, T. Trautmann and K. Radtke (Eds.), Proceedings of 2. Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig, Schriftenreihe des DKKV, 352-363

Grünthal, G., A. Thieken, J. Schwarz, K. Radtke, A. Smolka and B. Merz (2004): Comparative risk assessments for the city of Cologne - storms, floods, earthquakes. Natural Hazards (Special Issue on DFNK), in print

Merz, B. and Friedrich, J. (Hrsg.) (2001): Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK): Konzeption und Stand der Arbeiten. GeoForschungsZentrum Potsdam, 103 Seiten

Merz, B. and J. Friedrich (2001): Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen: Interdisziplinäre Risikoforschung als Beitrag zum Katastrophenmanagement. Tagungsband, In: Goldammer, J.G. (Hrsg.), Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, 28.-30.9.2000, Freiburg, Schriftenreihe des DKKV, Bonn, 129-134

Merz, B. and Friedrich, J. (Hrsg.) (2002): Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK): Jahresbericht 2002. GeoForschungsZentrum Potsdam, 151 Seiten

Merz, B., J. Friedrich, J. Zschau, P. Bormann, S. Parolai, K. Milkereit, S. Richwalski, F. Roth and R. Wang (2002): Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen: Von der Gefährdung zum Risiko. Zweijahresbericht 2000/20001, GeoForschungsZentrum Potsdam, 135-145

Merz, B. (2002): German research network for natural disasters: An interdisciplinary and user-oriented approach. Proceedings International Conference Research and Application on Hydrogeological Disarray in the World, 7.-10.12.2000, Rome, 100-105

Merz, B., Thieken, A. and Grünthal, G. (2004): Interdisciplinary Risk Analyses as Contribution to Disaster Prevention: Experiences of the German Research Network Natural Disasters, in: King, L. (ed.), Climate change and Yangtze floods, Science Press New York

Merz, B., Friedrich, J., Disse, M., Schwarz, J. and Goldammer, J. G. (2004): Possibilities and limitations of interdisciplinary user-oriented research: Experiences from the German Research Network Natural Disasters. Natural Hazards (Special Issue on DFNK), in print.

A.5.2 Cluster Risikoanalyse Hochwasser

Apel, H., Thieken, A., Merz, B. and Blöschl, G. (2004): Flood Risk Assessment and Associated Uncertainty. Natural Hazards and Earth Science Systems 4, 295-308p.

Apel, H., Thieken, A., Merz, B. and Blöschl, G. (2003): A probabilistic modelling system for assessing flood risks. Natural Hazards (Special Issue on DFNK), in print.

Bens, O., Buczko, U. and Hüttl, R. F. (2000): Hochwasserprävention durch Steigerung des Wasserretentionspotentials in Böden forst- und landwirtschaftlich genutzter Flusseinzugsgebiete - Ein Beitrag im Rahmen des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen (DFNK). Schriftenreihe der Dt. Geol. Ges. 12, 201 pp.

- Bens, O. and Felix-Henningsen, P. (2001): Variability of litter decomposition and nitrogen turnover in different Scots pine (*Pinus sylvestris*) ecosystems in Northwest Germany under the influence of groundwater lowering. In: *Wetlands in Central Europe. Soil organisms, soil ecological processes and trace gas emissions*. G. Broll, W. Merbach and E.-M. Pfeifer (Eds.), Springer, Berlin: 133-148p.
- Bens, O., Wahl, N. A., Buczko, U. and Hüttl, R. F. (2001): Makroporosität und Infiltrationseigenschaften von Ackerböden unter differenzierter Bewirtschaftung. *Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges.* 96(1), 59-60.
- Bens, O., Wahl, N. A., Fischer, H. and Hüttl, R. F. (2004): Flood risk analysis - impacts of forest transformation on hydrological properties of soils in river catchments. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)* (in print)
- Bronstert, A., Bismuth, C. and Menzel, L., Eds. (2000): *European Conference on Advances in Flood Research*. PIK-Report No. 65. Potsdam, Potsdam Institut für Klimafolgenforschung 712.
- Bronstert, A., Kundzewicz, L. and Menzel, L. (2000): Achievements and future needs towards improved flood protection in the Oder river basin: Results of the EU-expert meeting on the Oder flood in summer '97. In: *Flood issues in contemporary water management*. J. Marsalek (Eds.), Kluwer, Dordrecht: 75-83p.
- Bronstert, A. and Menzel, L. (2002): Advances in flood research. *Journal of Hydrology* 267(1-2), 1.
- Bronstert, A., Menzel, L., Middelkoop, H., de Roo, A. P. and van Beek, E., Eds. (2001): *River basin research and management: Integrated modelling and investigation of land-use impacts on the hydrological cycle*. *Phys. Chem. Earth* 26 (7-8) 155.
- Buczko, U., Bens, O., Fischer, H. and Hüttl, R. F. (2002): Water repellency in sandy luvisols under different forest transformation stages in northeast Germany. *Geoderma* 109, 1-18.
- Buczko, U., Bens, O., Hangen, E., Brunotte, J. and Hüttl, R. F. (2003): Infiltration and macroporosity of a silt loam soil under two contrasting tillage systems. *FAL Agricultural Research* 53(2/3), 181-190.
- Chua, L. H. C., F., M. and K.-P., H. (2002): Numerical Simulation and Web-based GIS System for Flooding Processes (Eds.), *Proceedings of 5th Int. Conf. on Hydraulic-Science and Engineering*, Warsaw 2002
- Chua, L. H. C. and K.-P., H. (2004): Hybrid Neural Network-Numerical River Flow Model. *Int. J. for Hydraulic Research* (submitted).
- Chua, L. H. C., Merting, F. and Holz, K.-P. (2001): River Inundation Modelling for Risk Analysis. R. A. Falconer and W. R. Blain (Eds.), *Proceedings of 1st Int. Conf. River Basin Management*, 373-382
- Disse, M., Hammer, M., Merz, B., Thieken, A. and Blöschl, G. (2002): Vorsorgender Hochwasserschutz im Rheingebiet - welchen Beitrag leistet das DFNK? (Eds.), *Proceedings of Zweites Forum Katastrophenvorsorge (DKKV): Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge*, Leipzig, 269-277
- Disse, M. (2001): Quantifizierung der Hochwassergefährdung für die Rheinanlieger - die Projekte LAHoR und DFNK. *BfG-Veranstaltungen* 1, 1-10.

Disse, M. and Assmann, A. (2003): Bestimmung der Überflutungsflächen infolge von Deichbrüchen durch die Kopplung eines 1D-Modells mit einem 2D-Modell. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 6.

Disse, M. and Buschhüter, E. (2002): Überschwemmungsrisiko vor und nach technischen Maßnahmen. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 02 (Hochwassermanagement - Gefährdungspotenziale und Risiko der Flächennutzung), 147-164.

Disse, M., Hammer, M., Merz, B., Thieken, A. and Blöschl, G. (2002): Hochwasserschutz am Rhein - welchen Beitrag leistet das DFNK? G. Tetzlaff, T. Trautmann and K. Radtke (Eds.), Proceedings of 2. Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig, Schriftenreihe des DKKV, 269-277

Disse, M., Kamrath, P., Wilhelmi, J. and Königeter, J. (2003): Simulation des Hochwasserwellenablaufes und der Ausbreitung von Überflutungsflächen unter Berücksichtigung von Deichbrüchen. Wasserwirtschaft 5, 24-29.

Fischer, H., Bens, O. and Hüttl, R. F. (2002): Veränderung von Humusform, -vorrat und -verteilung im Zuge von Waldumbau-Maßnahmen im Nordostdeutschen Tiefland. Forstwissenschaftliches Centralblatt 121(6), 322-334.

M. Gocht and B. Merz (2004): The contribution of damage assessments to flood defence. Drittes Forum Katastrophenvorsorge "Katastrophenvorsorge und Industriegesellschaft", 7.-8.10.2002, Potsdam (accepted for publication)

Grothmann, T. (2002): Coping Capacity of People at Risk: Predictors of Households' Coping with the Risk of Flooding. (Eds.), Proceedings of 12th SRA Europe Annual Meeting., Humboldt-Universität Berlin

Grothmann, T. (2002): Coping mit Naturgefahren: Ein Vergleich von Unternehmen und Privathaushalten (Eds.), Proceedings of 43. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie, Humboldt-Universität Berlin

Grothmann, T. (2002): Hochwasser: Risikowahrnehmung, Selbstschutz und Nachbarschaftshilfe in Privathaushalten und Unternehmen. (Eds.), Proceedings of Workshop „Nach der Flut ist vor der Flut - Hochwasser und Hochwasserschutz aus Sicht des DFNK und der Stadt Köln“. Stadthaus Köln

Grothmann, T. (2003): Selbstschutz vor Hochwasserschäden: Wie hochwassergefährdete Haushalte und Unternehmen mit der Hochwassergefahr umgehen. A. u. A. e. V. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Landesverband Bayern (Eds.), Proceedings of Nürnberger Wasserwirtschaftstag, Seminar 2: Hochwasser hat Zukunft., Nürnberg, 196-214

Grothmann, T. and Reusswig, F. (2003): Learning (only) from experience? Flood damage prevention of residents and firms at risk. (Eds.), Proceedings of 4. Forum Katastrophenvorsorge, München

Grothmann, T. and Reusswig, F. (2004): People at Risk of Flooding: Why some residents take precautionary action while others don't. Natural Hazards (Special Issue on DFNK) (in print).

Hangen, E., Buczko, U., Bens, O., Brunotte, J. and Hüttl, R. F. (2002): Infiltration patterns into two soils under conventional and conservation tillage: influence of the spatial distribution of plant root structures and soil animal activity. Soil Tillage Research 63, 181-186.

- Holz, K.-P., Hildebrandt, G. and Weber, L. (2004): Concept for a web-based information system for flood management. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)*, in print
- Kamrath, P., Disse, M., Hammer, M. and Königeter, J. (2004): Simulation of flood wave propagation and inundation areas by considering dike break scenarios. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)*, in review
- Kundzewicz, L., Budhakooncharoen, S., Bronstert, A., Hoff, H., Lettenmaier, D., Menzel, L. and Schulze, R. (2002): Coping with variability and change: Floods and droughts. *Natural Resources Forum* 26, 263-274.
- Menzel, L. and Blongewicz, M. (2000): LADEMO - a user supported model for the development of land use scenarios. In: *European Conference on Advances in Flood Research (PIK Report No.65)*. A. Bronstert, C. Bismuth and L. Menzel (Eds.), PIK, Potsdam: 43-51p.
- Menzel, L., Bronstert, A., Bürger, G. and Krysanova, V. (2000): Environmental change scenarios and flood responses in the Elbe catchment (Germany). In: *European Conference on Advances in Flood Research*. A. Bronstert, C. Bismuth and L. Menzel (Eds.), PIK, Postdam: 138-148p.
- Menzel, L., Bürger, G. and Schwandt, D. (2002): Climate change scenarios and runoff response in the Mulde catchment (Southern Elbe, Germany). *Journal of Hydrology* 267(1-2), 53-64.
- Menzel, L., Bürger, G. and Schwandt, D. (2002): Klimaänderungen und Hochwasser: Ergebnisse aus einer DFNK-Studie im Rheingebiet. In: *Zweites Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge“*, Leipzig 24.-26. September 2001. G. Tetzlaff, T. Trautmann and K. S. Radtke (Eds.), Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge, Bonn und Leipzig: 278-285p.
- Menzel, L., Gerstengarbe, F. W. and Werner, P. (2004): Regionale Unterschiede des Klimawandels und deren Einflüsse auf die hydrologischen Charakteristika in Deutschland. *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* (in review).
- Menzel, L., Kundzewicz, L. and Welp, M. (2003): Wasserstreß im Treibhaus - Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen. *Politische Ökologie* 80, 44-46.
- Menzel, L., Niehoff, G., Bürger, G. and Bronstert, A. (2002): Climate change impacts on river flooding: A modelling study of three meso-scale catchments. In: *Climatic change: Implications for the hydrological cycle and for water management. Advances in global change research*. M. Beniston (Eds.), Kluwer, Dordrecht, 10: 249-269p.
- Menzel, L., Thielen, A., Schwandt, D. and Bürger, G. (2004): Impact of climate change scenarios on the regional hydrology - modelling studies in the German Rhine catchment. *Natural Hazards (Special Edition on DFNK)* (in print).
- Merting, F., Chua, L. H. C. and Holz, K.-P. (2002): Numerical Simulation and Web-based GIS System for Flooding Process (Eds.), *Proceedings of Workshop Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften, Cottbus*, 74 - 86
- Merz, B., Thielen, A. and Gocht, M. (2000): Probabilistic Risk Assessment as a Planning Tool for Flood Design. A. Bronstert, C. Bismuth and L. Menzel (Eds.), *Proceedings of European Conference on Advances in Flood Research, PIK-Report No. 65*, 346-355
- Merz, B., Thielen, A. and Blöschl, G. (2002): Uncertainty analysis for Flood Risk Estimation. M. Spreafico and R. Weingartner (Eds.), *Proceedings of International Conference on Flood Estimation, CHR Report II-17*, 577-585

- Merz, B. (2002): Hochwasser in Deutschland - Vorbereiten auf den Notfall. In: DVW Intergeo 2002: Wissenschaft im Dialog, Frankfurt, 12-14
- Merz, B. (2002): Gefährdungs- und Risikoanalysen im Hochwasserschutz. Notfallvorsorge, 4/2002, 11-13
- Merz, B. and M. Gocht (2003): Karten für die Hochwasservorsorge und das Risikomanagement auf der lokalen Skala. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 47(5), 186-194
- Merz, B., H. Kreibich, A. Thielen and R. Schmidtke (2004): Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 153-163
- Merz, B. and A. Thielen (2004): Flood risk analysis: Concepts and challenges. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 56(3-4), 27-34
- Merz, B. and Thielen, A. (2004): Separating Aleatory and Epistemic Uncertainty in Flood Frequency Analysis. Journal of Hydrology (in review).
- Schäfer, B., Bens, O., Buczko, U. and Hüttl, R. F. (2001): Einfluss differenzierter forstlicher Bewirtschaftungsweisen auf die Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden Nordost-Brandenburgs. Mitt. Dt. Bodenkdl. Ges. 96(1), 115-116.
- Schäfer, B., Bens, O., Fischer, H. and Hüttl, R. F. (2002): Einfluss des Baumartenwechsels auf die Wasserspeicherfähigkeit von sandigen Böden Nordost-Brandenburgs. Forst und Holz 57(19), 571-575.
- Schwandt, D. (2004): Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins - Meßwerte, Simulationen und Szenarien. In: Drittes Forum Katastrophenvorsorge „Katastrophenvorsorge und Industriegesellschaft“ (Eds.), DKKV-Schriftenreihe, Bonn (in print).
- Schwandt, D. and Menzel, L. (2001): Niederschlag-Abfluß-Modellierung des Rheineinzugsgebietes zwischen den Pegeln Maxau und Emmerich. In: Abflußverhältnisse im Rheingebiet - Ansätze, Instrumentarien und Ergebnisse aus ausgewählten Projekten, Schriftenreihe BfG-Veranstaltungen 1/2001 (Eds.), Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Schwandt, D., Menzel, L., Winkler, M. and Müller, M. (2004): Classification and resolution of land-cover data and their influence on runoff simulation. Remote Sensing of Environment (submitted).
- Thielen, A., Menzel, L., Bürger, G., Schwandt, D. and Merz, B. (2004): Klimaänderungsszenarien und Hochwasserentwicklung im Rheingebiet: Modellierung und Unsicherheiten (Eds.), Proceedings of Tag der Hydrologie 2003, Schriftenreihe der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften, München (in print).
- Thielen, A., Merz, B. and Blöschl, G. (2001): Abschätzung von Hochwasserrisiken unter Berücksichtigung von Unsicherheiten (Eds.), Proceedings of Abflußverhältnisse im Rheingebiet - Ansätze, Instrumentarien und Ergebnisse aus aktuellen Projekten, Kolloquium am 05.04.2001, Koblenz, BfG-Veranstaltungen 1/2001, 1-12
- Thielen, A., Merz, B. and Blöschl, G. (2002): Ein probabilistischer Modellansatz zur Abschätzung von Hochwasserrisiken und ihren Unsicherheiten. G. Tetzlaff, T. Trautmann and K. Radtke (Eds.), Proceedings of 2. Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge, Leipzig, Schriftenreihe des DKKV, 294-300
- Thielen, A., Merz, B., Menzel, L., Bürger, G. and Schwandt, D. (2004): Klimaänderungen und Hochwasser im Rheingebiet: Unsicherheiten der Modellierung. In: Drittes Forum Katastrophenvorsorge

vorsorge „Katastrophenvorsorge und Industriegesellschaft“ (Eds.), DKKV-Schriftenreihe, Bonn (in print).

Thieken, A., Merz, B., Menzel, L., Bürger, G. and Schwandt, D. (2004): Klimaänderungen und Hochwasser im Rheingebiet: Unsicherheiten der Modellierung. A. Küppers, R. Herrmanns and B. Merz (Eds.), Proceedings of 3. Forum Katastrophenvorsorge: Risikovorsorge und Industriegesellschaft, Potsdam, Schriftenreihe des DKKV, Bonn (in print).

Wahl, N. A., Bens, O., Schäfer, B. and Hüttl, R. F. (2002): Veränderung pedo-hydrologischer Eigenschaften als Folge differenzierter Bewirtschaftung von Waldböden. In: Bodengeographische Studien stark veränderter Standorte - Monitoring, Modellierung und Bewertung. O. Bens and R. F. Hüttl (Eds.), BTU Cottbus Aktuelle Reihe, 4(2002): 47-56p.

Wahl, N. A., Bens, O., Schäfer, B. and Hüttl, R. F. (2003): Impact of changes in land-use management on soil hydraulic properties: Hydraulic conductivity, water repellency and water retention. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 1377-1387.

Wahl, N. A., Bens, O., Buczko, U. and Hüttl, R. F. (2004): The effects of different tillage systems on soil physical properties: infiltration capacity and macroporosity. Küppers, A., Herrmanns, R. und Merz, B. (Hrsg.): Proceedings of 3. Forum Katastrophenvorsorge: Risikovorsorge und Industriegesellschaft, Schriftenreihe des DKKV, Bonn (in print).

Wahl, N. A., Bens, O., Buczko, U., Hangen, E. and Hüttl, R. F. (2004): Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty loam soil. *Physics and Chemistry of the Earth* (accepted for publication).

Wöllecke, B., Woche, S., Bachmann, J., Bens, O. und Hüttl, R. F. (2003): Einfluss der organischen Bodensubstanz auf das Wasseraufnahmevermögen sandiger Böden bei unterschiedlicher Landnutzung. *Mittlg. Dt. Bodenkdl. Ges.* 102, 153-154.

A.5.3 Cluster Risikoanalyse Sturm

Radtke, K.S., G. Tetzlaff, 2002: Untersuchung des Orkans Ginger mit dem Lokal Modell. *Wissenschaftliche Mitteilungen aus dem Institut für Meteorologie der Universität Leipzig*, S. 56-66.

Radtke, K.S., G. Tetzlaff, 2002: Modellierung einer Sturmzyklone mit dem Lokal Modell, Tagungsband des Zweiten Forum Katastrophenvorsorge, Bonn und Leipzig.

A.5.4 Cluster Risikoanalyse Erdbeben

Bormann, P., Grünthal, G., Milkereit, C., Parolai, S., Richwalski, S. M., Roth, F., Stromeyer, D., Wahlström, R., Wang, R. and Zschau, J. (2002): Bedeutung geowissenschaftlicher Arbeiten für die Erdbebenrisikoabschätzung. *Notfallvorsorge* 2, 15-21.

Fäcke, A., Parolai, S., Richwalski, S. M. and Stempniewski, L. (2004): Assessing the vibrational frequencies of the Cathedral of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis. *Natural Hazards (Special Edition on DFNK)*, in print.

Fäcke, A., Stempniewski, L., Richwalski, S. M., Parolai, S., Milkereit, C., Wang, R., Bormann, P. and Roth, F. (2004): A combined geophysical/engineering approach for the seismic safety of long-span bridges. *Challenges for Earth Sciences in the 21st Century*, Springer Verlag (in print).

Goebell, S. and Wetzel, H.-U. (2004): Contributions to the deformation analysis in Germany based on highly precise and continuous GPS measurements. *Natural Hazards (Special Edition on DFNK)*, in print.

Grünthal, G. and Wahlström, R. (2000): Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. (Eds.), *Proceedings of XXVII General Meeting of the European Seismological Commission (ESC)*, Lisbon, 46

Grünthal, G. and Wahlström, R. (2001): Sensitivity of parameters for probabilistic seismic hazard analysis using a logic tree approach. *J. Earthq. Engrg.* 5, 309-328.

Grünthal, G. and Wahlström, R. (2002): Quantification of uncertainties in hazard and risk calculations (Eds.), *Proceedings of 9. International Symposium on Natural and Human-made Hazards, Disaster Mitigation in the Perspective of the New Millennium*, Antalya, Turkey, 49

Grünthal, G. and Wahlström, R. (2004): New generation of probabilistic seismic hazard assessment for the area Cologne/Aachen considering the uncertainties of the input data. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)* (in print).

Parolai, S., Bormann, P. and Milkereit, C. (2001): Assessment of the natural frequency of the sedimentary cover in the Cologne area (Germany) using noise measurements. *J. Earthq. Eng.* 5(4), 541-564.

Parolai, S., Bormann, P. and Milkereit, C. (2002): Measurements of the fundamental resonance frequency of the sedimentary cover in the Cologne area: contribution to the seismic microzonation. G. Tetzlaff, T. T. and K. S. Radtcke (Eds.), *Proceedings of 2nd Forum Katastrophenvorsorge DKKV (German Committee for Catastrophe Mitigation)*, Leipzig, 301-305

Parolai, S., Bormann, P. and Milkereit, C. (2002): 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). *Bull. Seism. Soc. Am.* 92(6), 2521-2527.

Parolai, S. and Richwalski, S. M. (2004): The importance of converted waves in comparing H/V and RSM site responses. *Bull. Seism. Soc. Am.*, (accepted for publication).

Parolai, S., Richwalski, S. M., Milkereit, C. and Bormann, P. (2004): Assessment of the stability of H/V spectral ratios and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany). *Tectonophysics (special issue "Strong Ground Motion, Earthquake Hazard and Risk in Alpine-Himalayan and Pacific Regions")*, (in print).

Richwalski, S. M., Fäcke, A., Parolai, S. and Stempniewski, L. (2004): Influence of site and source dependent ground motion scenarios on the seismic safety of long-span bridges in Cologne, Germany. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)* (in print).

Richwalski, S. M., Parolai, S., Fäcke, A. and Hollnack, D. (2004): An interdisciplinary approach for the microzonation of the Cologne area (Germany). *3rd Forum Katastrophenvorsorge DKKV (German Committee for Catastrophe Mitigation)* (submitted).

Richwalski, S. M., Wang, R. and Roth, F. (2002): A new hybrid method for modelling ground motion. G. Tetzlaff, T. T. and K. S. Radtcke (Eds.), *Proceedings of 2nd Forum Katastrophenvorsorge DKKV (German Committee for Catastrophe Mitigation)*, Leipzig

Savidis, S. A. and Röhner, J. (2004): Influence of the sedimentary cover in the Cologne region on the shape of elastic acceleration response spectra. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)*, in print

Schwarz, J., Raschke, M. and Maiwald, H. (2004): Comparative seismic risk studies for German earthquake regions on the basis of the European Macroseismic Scale EMS-98. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)*, in print

Tyagunov, S., Hollnack, D. and Wenzel, F. (2004): Engineering-seismological analysis of site effects in the area of Cologne. *Natural Hazards (Special Issue on DFNK)*, in print

A.5.5 Cluster Simulationssystem Waldbrand

Ahern, F., Goldammer, J. G. and Justice, C., Eds. (2001): Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort. The Hague, The Netherlands, SPB Academic Publishing 302.

Ahern, F. J., Belward, A. S., Elvidge, C. D., Goldammer, J. G., Grégoire, J.-M., Justice, C. O., Pereira, J., Prins, E. M. and Stocks, B. J. (2001): The Fire Component of Global Observation of Forest Cover: a Plan of Action. In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort. F. Ahern, J. G. Goldammer and C. Justice (Eds.), SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands: 267-290p.

Buchholz, G., Goldammer, J. G. and Martell, D. (2003): Application of logistic models to predict human-caused forest fires in Siberia. In: Early warning systems for natural disaster reduction. J. Zschau. a. A. Küppers (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 593-599p.

FAO (2001): Global Forest Fire Assessment 1990-2000. Forest Resources Assessment (FRA) Programme, Working Paper 55, Rome, FAO 495 (Redaktion J.G. Goldammer und R.E.Mutch, mit 16 Länder- bzw. Regionalbeiträgen von J.G.Goldammer).

Goldammer, J. G. (2000): Forest fires in the Baltic region: National and international issues. A.Grishin (Eds.), Proceedings of Proc. of the International Conference on Conjugate problems of mechanics and ecology, Tomsk, Russian Federation

Goldammer, J. G. H. (2001): Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, 29.-30. September 2000, Bonn, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (DKKV) 173.

Goldammer, J. G. (2001): Current state of synthesis initiatives in global vegetation fire monitoring. In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort. F. Ahern, J. G. Goldammer and C. Justice (Eds.), SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands, 71-103

Goldammer, J. G. (2001): The Ethiopia Fire Emergency between February and April 2000. A Summary Retrospective. J. G. G. (Hrsg.) (Eds.), Proceedings of Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (DKKV), Bonn, 89-99

Goldammer, J. G. (2001): Feuer. In: Naturkatastrophen: Ursachen, Auswirkungen, Vorsorge. E. J. Plate and B. Merz (Eds.), Schweizerbart, Stuttgart: 208-228p.

Goldammer, J. G. (2001): International Fire (Wildland Fire, Industrial Fire) and HAZMAT Emergency Assistance in the Frame of INSARAG Europe-Africa. J. G. G. (Hrsg.) (Eds.), Proceedings of Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (DKKV), Bonn, 100-105

Goldammer, J. G. (2001): The preparatory work of the Fire Ecology Research Group and the Global Fire Monitoring Center (GFMC) towards the establishment of the Inter-Agency Task Force Working Group on Wildland Fire within the UN International Strategy for Disaster Reduction (ISDR). J. G. Goldammer (Eds.), Proceedings of Erstes Forum Katastrophenvorsorge „Extreme Naturereignisse und Vulnerabilität“, Freiburg im Breisgau, Deutsches Komitee für Katastrophenvorsorge (DKKV), Bonn, 73-88

Goldammer, J. G. and Davidenko, E. P. (2001): A global system for early warning, monitoring and management of wildland fire disasters. E. P. B. (ed.) (Eds.), Proceedings of International Scientific and Practical Conference „Emergency Situations: Prevention and Liquidation“, Minsk, Belarus, Research Institute for Fire and Disaster Safety, Minsk, Belarus, 88-89

Goldammer, J. G. (2003): Towards international cooperation in managing forest fire disasters in the Mediterranean region. In: Security and the environment in the Mediterranean. Conceptualising security and environmental conflicts. H. G. Brauch, P. H. Liotta, A. Marquina, P. F. Rogers and M. E.-S. Selim (Eds.), Springer Verlag, Heidelberg: 907-915p.

Goldammer, J. G., Buchholz, G. and Resch, F. (2003): The contribution of the Global Fire Monitoring Center (GFMC) for Early Warning and Management of wildfires. In: Early warning systems for natural disaster reduction. J. Zschau. a. A. Küppers (Eds.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York: 585-592p.

Goldammer, J. G., Held, A., Hille, M., Cramer, W., Thonicke, K., Kührt, E., Oertel, D. and Preussner, K. (2003): DFNK-Cluster Waldbrand: Frühwarnung, Monitoring, Informationsmanagement und Simulation von Waldbrand-Gefahr. DKKV, Proceedings des Dritten Forum Katastrophenvorsorge, Potsdam, (in print)

Goldammer, J. G., Held, A. C., Hille, M., Wittich, K.-P., Kuehrt, E., Koutsias, N. and Oertel, D. (2004): An innovative conceptual model of a forest fire management information and decision-support system for Brandenburg State. Natural Hazards (Special Issue on DFNK), in print

Hille, M. and Goldammer, J. G. (2002): Dispatching and modelling of fires in Central European pine stands: New research and development approaches in Germany. G. General Secretariat for Civil Protection, and MAICH, Greece (Eds.), Proceedings of Improving dispatching for forest fire control. Proceedings of a workshop held in the Mediterranean Agronomic Institute of Chania (MAICH), Crete, Greece, 59-74

Oertel, D., Haschberger, P., Tank, V., Schreier, F., Schimpf, B., Zhukov, B., Briess, K., Röser, H.-P., Lorenz, E., Skrbek, W., Goldammer, J. G., Tobehn, C., Ginati, A. and Christmann, U. (2000): Two dedicated spaceborne fire missions. 1 (Eds.), Proceedings of Proc. Joint Fire Science Conference and Workshop, Boise, Idaho, USA, Published by the University of Idaho and the International Association of Wildland Fire

Stocks, B. J., Goldammer, J. G., Frost, P. G. H. and Cahoon, D. R. (2001): Towards the development of an informed global policy on vegetation fires: what role for remote sensing? In: Global and regional vegetation fire monitoring from space: Planning a coordinated international effort. F. Ahern, J. G. Goldammer and C. Justice (Eds.), SPB Academic Publishing bv, The Hague, The Netherlands: 35-46p.

Thonicke, K. and Cramer, W. (2004): Long-term trends in vegetation dynamics and forest fires in Brandenburg (Germany) under a changing climate. Natural Hazards (Special Issue on DFNK), in print

Wittich, K.-P. (2004): Prognose der witterungsbedingten Waldbrandgefahr und waldbrandspezifische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (Eds.), Proceedings of 3. Forum Katastrophenvorsorge (Third German Forum on Disaster Prevention), Potsdam (in print).

A.5.6 Cluster Datenbanken und Informationssysteme

Braune, S., Czegka, W. and Mie, F. (2001): Einsatz von Metaserver und GeoLocator in online GeoInformations-Systemen im Rahmen des Projektes Deutsches Forschungsnetz Naturkatastrophen (DFNK). Zeitschrift für Geologische Wissenschaften 4, 431-438.

Braune, S., Czegka, W., Mie, F. and Wächter, J. (2001): Konzeption eines GeoLocator für das räumliche Retrieval in online GI-Systemen im Rahmen des Projektes DFNK. In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XIII, Beiträge zum AGIT-Symposium, Salzburg. J. Strobl, T. Blaschke and G. Griesebner (Eds.): 90-95p.

Braune, S., Kalmes, P., Mie, F. and Wächter, J. (2001): Das Clearinghouse zur Integration der Datenbestände im DFNK. In: Tagungsband Zweites Forum Katastrophenvorsorge: Extreme Naturereignisse - Folgen, Vorsorge, Werkzeuge (Eds.), DKKV-Schriftenreihe, Bonn: 364-371p.

Köhler, P. (2004): Development of an open information infrastructure for disaster research: Results and prospects from DFNK and CEDIM (Eds.), Proceedings of EnviroInfo 2003, Cottbus, Germany (in print).

Köhler, P., Lochter, F. and Häner, R. (2004): Entwicklung eines Brandenburgischen Metadatenprofils der ISO 19115 und dessen Umsetzung am Beispiel des Deutschen Forschungsnetzes Naturkatastrophen und des behördlichen Produktvertriebs. Umweltdatenbanken 2003, UBA-Texte, Umweltbundesamt (in print).

Köhler, P. and Wächter, J. (2004): Information management inside DFNK: Towards an open information infrastructure for disaster research and management. Natural Hazards (Special Issue on DFNK) (in print).

Mueller, M. and Segl, K. (2001): House detection in IKONOS data using region and edge based segmentation (Eds.), Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Sciences and Technology - Application of Digital Image Processing XXIV, San Diego, USA, 500-507

Müller, M. and Kaufmann, H. (2002): Satellite-based characterization and inventory of disaster-sensitive elements of the natural and anthropogenic environment. K. S. T. Tetzlaff, T. (Eds.), Proceedings of 2. Forum Katastrophenvorsorge, Leipzig, Germany, 451-457

Müller, M. and Segl, K. (2001): House detection in IKONOS data using region and edge based segmentation (Eds.), Proceedings of SPIE's International Symposium on Optical Sciences and Technology - Application of Digital Image Processing XXIV, San Diego, USA, 500-507

Müller, M. and Segl, K. (2002): Fuzzy information fusion for the extraction of urban features based on HRSC data. 4885 (Eds.), Proceedings of SPIE's 9th International Symposium on Remote Sensing - Image and Signal Processing for Remote Sensing VIII

Müller, M., Segl, K., Heiden, U. and Kaufmann, H. (2004): Potential of high-resolution satellite data in the context of vulnerability of buildings. Natural Hazards (Special Edition on DFNK) (in print).

Müller, M., Winkler, M. and Segl, K. (2001): Bayes Ansatz zur Fusion multitemporaler Landsat 7 Daten innerhalb einer Landnutzungsklassifizierung (Eds.), Proceedings of Dreiländertagung

und DFD-Nutzerseminar, Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung, Konstanz, 433-440

Wächter, J. and Kalmes, P. (2001): Potenziale ausnutzen - Neue Technologien für ein integriertes Katastrophen-Management. *Wirtschaftsschutz und Sicherheitstechnik* 8-9, 36-38.

Wächter, J., Merz, B. and Lochter, F. (2000): Das Deutsche Forschungsnetz Naturkatastrophen. *GIS-Geo-Informationssysteme* 13(5), 5-6.

Winkler, M., Müller, M. and Segl, K. (2001): Ein semi-automatischer Ansatz zur satellitengestützten Landnutzungsklassifikation als aktuelle Basisinformation für hydrologische Modelle. *Forum der Geoökologie* 12(3), 44.