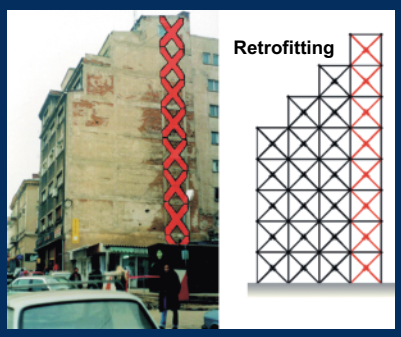
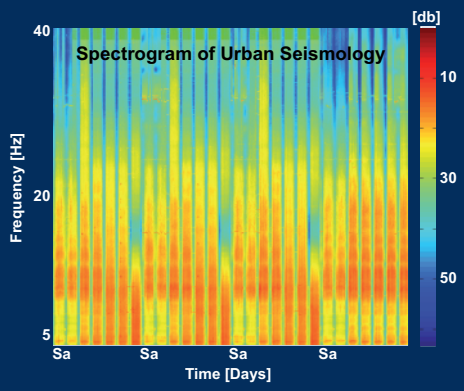
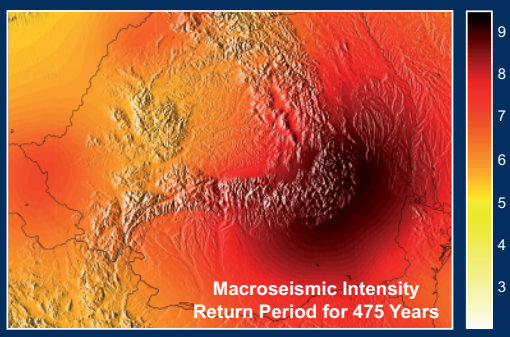
Sonderforschungsbereich 461

Starkbeben:
Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen

Abschlussbericht







universitätsverlag karlsruhe

Sonderforschungsbereich 461

Abschlussbericht für die Jahre 1996–2007 mit Berichtsband für die Jahre 2005–2007

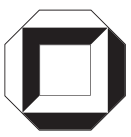
Sonderforschungsbereich 461

Starkbeben:
Von geowissenschaftlichen Grundlagen
zu Ingenieurmaßnahmen

Universität Karlsruhe (TH)

Abschlussbericht
für die Jahre 1996–2007 mit

Berichtsband
für die Jahre 2005–2007



universitätsverlag karlsruhe

Hrsg.: Sonderforschungsbereich 461
Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen
Universität Karlsruhe (TH)

Impressum

Universitätsverlag Karlsruhe
c/o Universitätsbibliothek
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe
www.uvka.de

Dieses Werk ist unter folgender Creative Commons-Lizenz
lizenziert: http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.0/de/

Universitätsverlag Karlsruhe 2008
Print on Demand

ISBN: 978-3-86644-234-4

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
	Vorwort des Sprechers	1
	Gremien des Sonderforschungsbereiches 461	2
1.	**Übersichten und Listen**	3
1.1	Liste aller am SFB während der gesamten Förderperiode beteiligten Teilprojektleiter/Teilprojektleiterinnen	3
1.2	Liste aller Teilprojekte, die im Rahmen des SFB gefördert wurden	5
1.3	Übersicht über alle während der verschiedenen Förderperioden beteiligten Fachbereiche, Institute und Einrichtungen der antragstellenden Hochschule, weiterer beteiligter Hochschulen und außeruniversitären Institute	10
1.4.	Für den SFB insgesamt in allen Förderperioden bewilligte Ergänzungsausstattung	17
2.	**Zentrale wissenschaftliche Ergebnisse des SFB**	18
2.1	Wissenschaftliche Entwicklung des SFB	18
2.2	Entwicklung der Kooperation im SFB und Außenwirkung des SFB	23
2.3	Erläuterung der internen Organisation des SFB und zum Umgang und zu den Verfahrensweisen mit den Mitteln des SFB	25
2.4	Veröffentlichungen aus dem SFB	27
2.5	Zahl der Promotionen, Habilitationen und Berufungen von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern aus dem SFB (Grund- und Ergänzungsausstattung)	31
3.	**Strukturelle Veränderungen an der Hochschule**	32
3.1	Strukturwirkung des SFB im personellen Bereich	32
3.2	Strukturwirkung des SFB im Bereich der Infrastruktur	33
4.	**Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft**	34
5.	**Berichte über die einzelnen Teilprojekte der letzten Förderperiode**	35
	Projektbereich A: *Lithosphärisches Szenario*	
A1	*J. Ritter, T. Forbriger:* Seismische Tiefensondierung über der Vrancea-Subduktionszone	37
A6	*O. Heidbach, B. Müller, G. Peters, D. Kurfeß, T. Buchmann, P. Ledermann:* Rezentes Spannungsfeld und Geodynamik	57
A7	*F. Wenzel, E. Gottschämmer, A. Oth, J. Miksat*: Prognose der Bodenbewegung bei Starkbeben	89

Projektbereich B: *Rezente Kinematik und Dynamik*

B1 *G. Schmitt, A. Nuckelt, A. Knöpfler, C. Marcu:* Dreidimensionale Plattenkinematik in Rumänien 127

B3 *V. Sokolov, M. Böse:* Seismogenic Potential of the Vrancea Subduction Zone – Quantification of Source and Site Effects from Strong Earthquakes 155

B4 *G. Huber, C. E. Grandas Tavera, D. Rebstock, H. Wienbroer:* Nichtlineare Wellenphänomene in feinst- und weichkörnigen Lockergesteinen 187

B6 *D. Ehret, H. Hötzl:* Geotechnische und seismische Mikrozonierung von Bukarest 215

B7 *D. Hannich, H. Hötzl*: Hydrogeologie und Standorteffekte bei Erdbeben in Bukarest 243

Projektbereich C: *Erdbebenauswirkungen und Ingenieurmaßnahmen*

C3 *F. Gehbauer, H. Engelmann, M. Markus, T. Zikas:* Planung und Durchführung von Hilfsmaßnahmen: Modellbildung und Simulation 273

C5 *M. Rehor, H.-P. Bähr, Th. Vögtle:* Bildanalyse in Geowissenschaften und bei Ingenieurmaßnahmen 307

C6 *S. Werder & H.-P. Bähr:* Wissensrepräsentation für Katastrophenmanagement in einem technischen Informationssystem (TIS) 339

C7 *F. Gehbauer, C. Schweier,, M. Markus:* Grundlagen neuer Technologien und Verfahrenstechniken für Rettungs-, Bergungs- und Wiederaufbaumaßnahmen 365

C9 *L. Stempniewski, S. Schnepf:* Seismische Gefährdung und Empfindlichkeitsbestimmung bestehender Bauwerke bei Erdbeben 393

Projektbereich Z

Z1 *W. Weisbrich & J. Wiesel:* Betrieb des zentralen Geo-Informationssystems (GIS) 423

Z2 *J. Ritter, G. Schmitt, U. Sturm*: Zentrale Angelegenheiten 447

Vorwort des Sprechers

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die gesamte Laufzeit des Sonderforschungsbereichs 461 „Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen“ von Juli 1996 bis Dezember 2007. Er beinhaltet insbesondere die Berichte der einzelnen Teilprojekte für die letzte Förderperiode, vom 1. Januar 2005 bis zum 31. Dezember 2007. Eingelegt wurde zudem die CD-ROM mit den Proceedings des Abschlusssymposiums vom 4. bis 6. Oktober in Bukarest, Rumänien.

Die Idee zu diesem SFB wurde geboren, kurz nachdem die UNO die Internationale Dekade zur Reduktion von Naturkatastrophen (IDNDR) ausgerufen hatte und damit ihre Mitgliedsländer verstärkt zu entsprechenden Aktivitäten im wissenschaftlichen und technischen Bereich verpflichtete. Dass wir uns in Karlsruhe für das Phänomen Erdbeben und für die Lokation Vrancea-Zone im südöstlichen Karpatenbogen in Rumänien als offensichtlich ortsfeste Erdbebenquelle entschieden, lag darin begründet, dass bereits damals langjährige Beziehungen zwischen Instituten der Universität Karlsruhe (TH) und rumänischen Partnerinstitutionen in den Bereichen Seismologie und rezente Krustenbewegungen existierten.

Die weltweit immer wieder stattgefundenen Starkbeben der letzten Dekaden und die dadurch entstandenen Schäden an Mensch und Infrastruktur verdeutlichen die gewachsenen Risiken insbesondere für Großstädte durch Konzentration der Bevölkerung, Mangel an erdbebensicheren Bauten und vorsorgender Stadtplanung, unzureichender Gefährdungsanalyse, alternder Infrastruktur und fehlenden handlungsfähigen Institutionen. Diese Risiken und die Gewissheit, dass auch Rumänien und seine Städte wieder von einem Starkbeben getroffen werden, bildeten die Motivation für unsere Arbeit, erkennend, dass Schadensminderung mit moderner Wissenschaft und Technologie und mit konsequenter Implementierung des Wissens möglich und aussichtsreich ist.

Der SFB 461 dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Möglichkeiten, die den beteiligten Instituten der Geo- und Ingenieurwissenschaften durch die Einrichtung des SFB eröffnet wurden. Unser Dank richtet sich gleichzeitig an das Land Baden-Württemberg und die Universität Karlsruhe (TH) für die tatkräftige Unterstützung. Die meisten unserer Arbeiten wären ohne die sehr gute Kooperation mit vielen rumänischen Kollegen und Institutionen nicht denkbar gewesen. Für diese Partnerschaft sind wir ausgesprochen dankbar und hoffen, dass die bestehenden Kontakte auch in Zukunft erfolgreich weitergeführt werden können.

Karlsruhe, 01. März 2008

Günter Schmitt

Gremien des Sonderforschungsbereichs 461

Sprecher:

Professor Dr. Friedemann Wenzel
(Sprecher 1996–2005; stellvertretender Sprecher 2005–2007)

Professor Dr. Günter Schmitt
(stellvertretender Sprecher 1996-2005; Sprecher 2006–2007))

Professor Dr. Fritz Gehbauer
(stellvertretender Sprecher)

Koordinierungsgremium:

Professor Dr. H.-P. Bähr

Dr. M. Böse
(Geschäftsführerin 01/2005–09/2007)

Professor Dr. F. Gehbauer

Professor Dr. H. Hötzl

Dr. M. Martin
(Geschäftsführer 07/2000–12/2004)

Dr. O. Novak
(Geschäftsführer 07/1997–07/2000)

AD Dr. C. Prodehl
(Leiter der Geschäftsstelle 7/1996–08/2001)

AOR PD Dr. J. Ritter
(Geschäftsführer 07/1996–06/1997, Leiter der Geschäftsstelle 01/2002–12/2007)

Professor Dr. G. Schmitt

Professor Dr. L. Stempniewski

Dipl. Geoökol. U. Sturm
(Geschäftsführerin 10/2007–04/2008)

Professor Dr. F. Wenzel

1. Übersichten und Listen

1.1 Liste aller am Sonderforschungsbereich während der gesamten Förderzeit beteiligten Teilprojektleiter/Teilprojektleiterinnen

Im Laufe der gesamten Förderperiode (07/1996–12/2007) waren in den 23 Teilprojekten 24 Teilprojektleiterinnen und -leiter tätig. Diese kamen aus 11 geo- und ingenieurwissenschaftlichen Instituten der Universität Karlsruhe (TH).

Tabelle 1: Bezeichnung der beteiligten Institute

Institut	**Abkürzung**
Geophysikalisches Institut	GEOK
Geologisches Institut	GEOL
Mineralogisches Institut	MIK
Geodätisches Institut	GIK
Institut für Petrographie und Geochemie	IPG
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Abteilung Felsmechanik	IBF
Lehrstuhl für Angewandte Geologie	AGK
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie	IfMB
Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb	IMB
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb	TMB
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung	IPF

Tabelle 2: Liste der Teilprojektleiterinnen und -leiter

Name, Vorname, akad. Titel	**Geschl. (m/w)**	**Geburts-jahr**	**Institut**	**Teilprojekt (Kennziffer)**	**gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)**
Prodehl, Claus, Akad. Dir. Dr.	m	1936	GEOK	A1	04/1998–12/2001
				Z2	07/1996–12/2001
Fielitz, Werner, Dr.	m	1955	GEOL	A1	04/1998–12/2004
				A4	07/1996–06/1999
Ritter, Joachim, AOR PD Dr.	m	1963	GEOK	A1	01/2002–12/2007
				Z2	01/2002–12/2007
Forbriger, Thomas, Dr.	m	1968	GEOK	A1	01/2005–12/2007
Wenzel, Friedemann, Prof. Dr.	m	1951	GEOK	A2	07/1996–12/2004
				A7	01/2005–12/2007
				B3	01/2005–12/2007
				Z2	07/1999–12/2007
Fuchs, Karl, Prof. Dr.	m	1932	GEOK	A2	07/1996–06/1999

Name, Vorname, akad. Titel	Geschl. (m/w)	Geburts-jahr	Institut	Teilprojekt (Kennziffer)	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
Althaus, Egon, Prof. Dr.	m	1933	MIK	A3	07/1996–12/2001
Karotke, Ekkehard, AOR Dr.	m	1938	MIK	A3	07/1996–12/2001
Stüben, Doris, Prof. Dr.	w	1955	IPG	A5	07/1996–06/1999
				B2	07/1996–06/1999
Heidbach, Oliver, Dr.	m	1965	GEOK	A6	01/2005–12/2007
Müller, Birgit, Dr.	w	1961	GEOK	A6	07/1999–12/2007
				B2	07/1996–06/1999
Schmitt, Günter, Prof. Dr.	m	1944	GIK	B1	07/1996–12/2007
Bonjer, Klaus-Peter, Dr.	m	1939	GEOK	B3	07/1996–12/2004
Gudehus, Gerd, Prof. Dr. Dr.	m	1938	IBF	B4	07/1999–01/2007
Gottlieb, Johannes, Dr.	m	1958	IBF	B4	07/1996–06/1999
Borm, Günter, apl. Prof. Dr.	m	1942	IBF	B4	07/1996–12/2004
Huber, Gerhard, AOR Dr.	m	1953	IBF	B4	01/2005–12/2007
Czurda, Kurt, Prof. Dr. Dr.	m	1940	AGK	B6	07/1999–12/2004
Rohn, Joachim, Dr.	m	1959	AGK	B6	07/1999–03/2006
				B7	01/2005–03/2006
Hötzl, Heinz, Prof. Dr.	m	1941	AGK	B6	04/2006–12/2007
				B7	01/2002–12/2007
Eibl, Josef, Prof. Dr.	m	1936	IfMB	C1	07/1996–12/2001
				C2	07/1996–12/2001
Stempniewski, Lothar, Prof. Dr.	m	1958	IfMB	C2	01/2002–12/2004
				C9	01/2002–12/2007
Gehbauer, Fritz, Prof. Dr.	m	1945	TMB	C3	07/1996–12/2007
				C7	07/1999–12/2007
Bähr, Hans-Peter, Prof. Dr.	m	1942	IPF	C5	07/1996–12/2007
				C6	07/1999–12/2007
				Z1	07/1996–12/2007
Wiesel, Joachim, Akad. Dir. Dr.	m	1947	IPF	Z1	07/1996–12/2007

1.2 Liste aller Teilprojekte, die im Rahmen des SFB gefördert wurden

Teil-projekt (Kenn-ziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut, Ort	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
Projektbereich A: Lithosphärisches Szenario				
A1	Seismische Tiefensondierung über der Vrancea-Subduktionszone	Geophysik (Seismik), Geologie (Strukturgeologie)	Prodehl, GEOK, Karlsruhe Fielitz, GEOL, Karlsruhe	04/1998–12/2001
			Ritter, GEOK, Karlsruhe Fielitz, GEOL, Karlsruhe	01/2002–12/2004
		Geophysik (Seismologie)	Ritter, GEOK, Karlsruhe Forbriger, GEOK, Karlsruhe	01/2005–12/2007
A2	Seismische Tomographie des Karpatenbogens	Seismologie, Kontinentale Lithosphäre, Geodynamik von Inselbogen-Strukturen, seismisches Risiko	Wenzel, GEOK, Karlsruhe Fuchs, GEOK, Karlsruhe	07/1996–06/1999
		Seismologie, Kontinentale Lithosphäre, Geodynamik von Subduktions-/ Kollisions-Strukturen, Seismische Gefährdung	Wenzel, GEOK, Karlsruhe	07/1999–12/2001
		Seismologie, Kontinentale Lithosphäre, Geodynamik von Subduktions-/ Kollisions-Strukturen, Frühwarnsysteme	Wenzel, GEOK, Karlsruhe	01/2002–12/2004
A3	Subduktionsverknüpfter Magnetismus, Fluidhaushalt und Mantelstruktur des Karpatenbogens	Mineralogie	Althaus, MIK, Karlsruhe Karotke, MIK, Karlsruhe	07/1996–12/2001
A4	Geothermisches Feld, Fluidregime und Tektonik in den Karpaten	Geophysik, Goethermie, Geologie, Tektonik	Wilhelm, GEOK, Karlsruhe Fielitz, GEOL, Karlsruhe	07/1996–06/1999

Teil-projekt (Kenn-ziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut, Ort	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
A5	Seismogeographische Signale und Stofftransportprozesse im krustalen Spannungsfeld der Vrancea-Subduktionszone		Stüben, GEOL, Karlsruhe	07/1996–06/1999
A6	Rezentes Spannungsfeld und Geodynamik	Tektonik, Spannungsinterpretation, Modellierung	Müller, GEOK, Karlsruhe	07/1999–12/2004
			Heidbach, GEOK, Karlsruhe Müller, GEOK, Karlsruhe	01/2005–12/2007
A7	Prognose der Bodenbewegung bei Starkbeben	Seismologie	Wenzel, GEOK, Karlsruhe	01/2005–12/2007
Projektbereich B: Rezente Kinematik und Dynamik				
B1	Dreidimensionale Plattenkinematik in Rumänien	Geodäsie, Geodynamik	Schmitt, GIK, Karlsruhe	07/1996–12/2007
B2	Spannungstransfer in der Kollisions-Subduktionszone Südosteuropas	Geophysik, Tektonik, Spannungsmessungen, Geochemie, Isotopengeochemie	Müller, GEOK, Karlsruhe Stüben, IPG, Karlsruhe	07/1996–06/1999
B3	Seismogenes Potential der Vrancea-Subduktionszone	Seismologie, Seismizität, Seismisches Risiko	Bonjer, GEOK, Karlsruhe	07/1996–06/1999
	Das seismogene Potential der Vrancea-Subduktionszone – Quantifizierung von Herd- und Standorteffekten bei Großbeben	Seismologie, Seismizität, Seismisches Risiko	Bonjer, GEOK, Karlsruhe	07/1999–12/2001
		Seismologie, Seismizität, Seismische Gefährdung	Bonjer, GEOK, Karlsruhe	01/2002–12/2004
			Wenzel, GEOK, Karlsruhe	01/2005–12/2007

Teil-projekt (Kenn-ziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut, Ort	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
B4	System-Identifikation der nichtlinearen Baugrund/Bauwerk-Wechselwirkung	Baugeologie, Ingenieurseismologie, Bodendynamik	Borm, IBF, Karlsruhe Gottlieb, IBF, Karlsruhe	07/1996–06/1999
	Nichtlineare Wellenphänomene in Lockergesteinen	Ingenieurseismologie, Seismik, Bodendynamik, Bodenmechanik	Gudehus, IBF, Karlsruhe Borm, IBF, Karlsruhe	07/1999–12/2001
	Nichtlineare Wellenphänomene in feinst- und weichkörnigen Lockergesteinen	Bodendynamik, Bodenmechanik, Stoffgesetze für granulare Böden, Ingenieurseismologie	Gudehus, IBF, Karlsruhe Borm, IBF, Karlsruhe	01/2002–12/2004
		Bodendynamik, Bodenmechanik, Stoffgesetze für Böden, Ingenieurseismologie	Gudehus, IBF, Karlsruhe Huber, IBF, Karlsruhe	01/2005–12/2007
B6	Geotechnische und seismische Mikrozonierung von Bukarest	Geologie, Geotechnik, Bodendynamik, GIS	Czurda, AGK, Karlsruhe Rohn, AGK, Karlsruhe	07/1999–12/2004
		Geologie, GIS, Bodendynamik	Rohn, AGK, Karlsruhe	01/2005–03/2006
			Hötzl, AGK, Karlsruhe	04/2006–12/2007
B7	Hydrogeologie und Standorteffekte bei Erdbeben in Bukarest	Hydrogeologie, Hydraulik, Bodendynamik, Geotechnik	Hötzl, AGK, Karlsruhe	01/2002–12/2004
		Hydrogeologie, Bodendynamik, Porenwasserdruck, Verflüssigungspotenzial	Hötzl, AGK, Karlsruhe Rohn, AGK, Karlsruhe	01/2005–03/2006
			Hötzl, AGK, Karlsruhe	04/2006–12/2007

Teil-projekt (Kenn-ziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut, Ort	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
Projektbereich C: Erdbebenauswirkungen und Ingenieurmaßnahmen				
C1	Entwicklung von Methoden zur realistischen Erfassung der Boden/Bauwerk-Wechselwirkung	Massivbau	Eibl, IfMB, Karlsruhe	07/1996–06/1999
	Überprüfung von Erdbebenprognosen zum Entwurf von Bauwerken	Massivbau	Eibl, IfMB, Karlsruhe	07/1999–12/2001
C2	Erdbebenprognose – Methoden zur nachträglichen Erdbebenertüchtigung	Massivbau	Eibl, IfMB, Karlsruhe	07/1996–06/1999
	Schadensprognose – Methoden zur nachträglichen Ertüchtigung bestehender, vorgeschädigter Bauwerke	Massivbau	Eibl, IfMB, Karlsruhe	07/1999–12/2001
			Stempniewski, IfMB, Karlsruhe	01/2002–12/2004
C3	Planung und Durchführung von Hilfsmaßnahmen: Modellbildung und Simulation	Baubetrieb, Projektmanagement	Gehbauer, TMB, Karlsruhe	07/1996–12/2007
C5	Bildanalyse in Geowissenschaften und bei Ingenieur-maßnahmen	Photogrammetrie	Bähr, IPF, Karlsruhe	07/1996–12/2001
		Photogrammetrie, Digitale Bildverarbeitung	Bähr, IPF, Karlsruhe	01/2002–12/2007
C6	Wissensrepräsentation für Katastrophen-management in einem technischen Informationssystem (TIS)	Photogrammetrie und Geoinformationssysteme	Bähr, IPF, Karlsruhe	07/1999–12/2007
C7	Grundlagen neuer Technologien und Verfahrenstechniken für Rettungs-, Bergungs- und Wiederaufbau-maßnahmen	Baubetrieb, Projektmanagement	Gehbauer, TMB, Karlsruhe	07/1999–12/2007

Teil-projekt (Kenn-ziffer)	Titel	Fachgebiet und Arbeitsrichtung	Leiter/in, Institut, Ort	gefördert im SFB von (Monat/Jahr) bis (Monat/Jahr)
C9	Seismische Gefährdung und Empfindlichkeits-bestimmung bestehender Bauwerke bei Erdbeben	Massivbau	Stempniewski, IfMB, Karlsruhe	01/2002–12/2007
Projektbereich Z				
Z1	Betrieb des zentralen Geo-Informationssystems	GIS, Datenbanktechnik, Metadaten, verteilte Systeme	Wiesel, IPF, Karlsruhe Bähr, IPF, Karlsruhe	07/1996–12/2007
Z2	Zentrale Angelegenheiten		Prodehl, GEOK, Karlsruhe	07/1996–06/1999
			Prodehl, GEOK, Karlsruhe Wenzel, GEOK, Karlsruhe	07/1999–12/2001
			Ritter, GEOK, Karlsruhe Wenzel, GEOK, Karlsruhe	01/2002–12/2007

1.3 Übersicht über alle während der verschiedenen Förderperioden beteiligten Fachbereiche, Institute und Einrichtungen der antragstellenden Hochschule, weiterer beteiligter Hochschulen und außeruniversitären Institute

Im Rahmen des SFB 461 bildeten sich zahlreiche Kooperationen und reger Gedankenaustausch wurde betrieben – innerhalb der Universität Karlsruhe (TH), wie auch innerhalb Deutschlands sowie international.

Im Folgenden werden in Tabelle 3 alle beteiligten Institute und Einrichtungen der Universität Karlsruhe aufgeführt. Die Liste geht über die direkt am SFB durch Mittel beteiligten Institute (siehe Tabelle 1) hinaus. Aus Tabelle 4 gehen weitere Kooperationen innerhalb Deutschlands hervor.

Zentrales Anliegen des SFB 461 war insbesondere die Zusammenarbeit mit rumänischen Partnern. Diese werden in Tabelle 5 benannt. Die relevanten rumänischen Partnerinstitute für den SFB 461 sind verschiedenen Ministerien und Behörden sowie der Rumänischen Akademie zugehörig. Schon während der ersten Phase kam es zur Gründung der Forschungsgruppe *Romanian Group for Strong Earthquakes in the Vrancea Area* (RGVA) unter dem Schirm der Rumänischen Akademie, der folgende Institutionen angehören: Faculty of Geology and Geophysics (University of Bucharest), Technical University of Civil Engineering Bucharest (UTCB), National Institute of Earth Physics (NIEP), Institute for Geotechnical and Geophysical Studies (GEOTEC), Building Research Institute (INCERC) Bucharest, Civil Protection Command.

Es entstanden Arbeitsbeziehungen schon vor und dann verstärkt während der Laufzeit des SFB 461 zu einer Reihe von internationalen Kollegen. Diese internationalen Kontakte gehen aus Tabelle 6 hervor.

Tabelle 3:Institute und Einrichtungen der antragstellenden Hochschule

Institute und Einrichtungen	**Abkürzung**
Geophysikalisches Institut	GEOK
Geologisches Institut	GEOL
Mineralogisches Institut	MIK
Geodätisches Institut	GIK
Institut für Petrographie und Geochemie	IPG
Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik	IBF
Lehrstuhl für Angewandte Geologie	AGK
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie	IfMB
Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb	IMB

Institute und Einrichtungen	Abkürzung
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb	TMB
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung	IPF
Institut für Fördertechnik, FB Strömungsfördertechnik, Universität Karlsruhe	Fördertech., KA
Institut für Logik, Komplexität und Deduktionssysteme, Universität Karlsruhe (TH)	ILKD
Institut für Algorithmen und kognitive Systeme, Universität Karlsruhe (TH)	IAKS
Institut für Angewandte Mathematik, Universität Karlsruhe (TH)	IAM
Mathematisches Institut II, Universität Karlsruhe (TH)	MI-II
Institut für Prozessrechentechnik, Automation und Robotik, Universität Karlsruhe (TH)	IPR
Forschungsstelle für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe (TH)	FFB
Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe (TH)	IMK
Rechenzentrum, Universität Karlsruhe (TH)	RZ

Tabelle 4: Beteiligte Institute und Institutionen innerhalb Deutschlands

Institute und Institutionen	Abkürzung
Forschungszentrum Umwelt, Karlsruhe	FZU
Universität Tübingen	Univ. Tübingen
Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Tübingen	
Universität Heidelberg	Univ. Heidelberg
FB Grundbau und Bodenmechanik, TU Berlin	
Institut für Geologische Wissenschaften, Freie Universität, Berlin	
SFB ‘Tragwerksdynamik’ Ruhr-Universität Bochum	
Institut für Geologie, Würzburg	GEOL WÜ
Universität Passau	
Institut für Baudynamik, München	
Universität Magdeburg	
Fraunhofer-Institut IFF, Magdeburg	
Institut für Stahlbau, Universität Braunschweig	
Universität Frankfurt	
Katastrophenforschungsstelle am Institut für Soziologie der Universität Kiel	
GeoForschungsZentrum Potsdam	GFZ

Institute und Institutionen	**Abkürzung**
Seismologisches Zentralobservatorium, Erlangen	SZGRF
Deutsches Komitee Katastrophenvorsorge	DKKV
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Hannover	BGR
Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle	NAGRA
Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften e.V. (FGAN)-Forschungsinstitut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie (FKIE), Wachtberg	FGAN-FKIE
ERC Frankona Rückversicherungs AG, München	ERC
SWISS Reinsurance, Zürich, Schweiz	SWISS
Münchner Rückversicherung	MÜNCH
DaimlerChrysler Forschung und Technik AG, München	
Altair, Böblingen	
Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe	BBK
Bundesanstalt Technisches Hilfswerk	THW

Tabelle 5: Rumänische Partner

Institut	**Abkürzung**
National Institut für Physik der Erde (National Institute for Earth Physics), Bukarest-Magurele	NIEP
Institut für Geodynamik der Rumänischen Akademie, Bukarest	IGR, Buk.
Fakultät für Geologie der Babes Bolyai Universität Cluj-Napoca	Univ. Cluj
Institute for Geotechnical and Geophysical Studies (GEOTEC)	GEOTEC
Institut für Hydroenergetische Studien und Projekte (ISPH-GEOTEC), Bukarest	ISPH-GEOTEC
Institut für Bauwesenforschung (Building Research Institute) (INCERC), Bukarest	INCERC
FORADEX S.A., Bukarest	FORADEX S.A.
Institut für Geodäsie, Photogrammetrie, Kartographie und Land Management (Institute for Geodesy, Photogrammetry, Cartography and Land Management (IGFCOT), Bukarest	IGFCOT
Hochschule für Bauwesen (Technical University of Civil Engineering) Bukarest	UTCB

Institut	Abkürzung
Geodätische Forschungsgruppe der Hochschule für Bauwesen (Geodetic Research Group, Technical University of Civil Engineering), Bukarest	Geod. FG, UTCB
Geodätische Fakultät der Hochschule für Bauwesen (Technical University of Civil Engineering, Faculty of Geodesy), Bukarest	Geod., UTCB
Universitatea Ecologica Bucuresti (Ökologische Universität), Bukarest	
Geologisches Institut Rumäniens	
Institut für Geodynamik, Universität Bukarest	
Fakultät für Geologie und Geophysik, Universität Bukarest	BUG
Institut für Geologische und Geophysikalisches Prospektion, Bukarest	
Rumänischer Zivilschutz (bis 2004 Civil Protection Command/ ab 2005 General Inspectorate for Emergency Situations)	Zivilschutz RO
PETROM	PETROM
Metroul S.A., Bukarest	Metroul
National Institute of Hydrology and Water Management, Bukarest	INHGA Bukarest

Tabelle 6: Weitere internationale Kooperationen

Kooperationspartner	Abkürzungen
Romanian Petroleum Company, c/o AMOCO Production Co. Houston, USA	Amoco, Buc. bzw. Amoco, USA
Federal Emergency Management Agency, USA	FEMA
U.S. Geological Survey, Menlo Park, USA	USGS
Rock Fracture Project, Stanford, USA	Stanford RFP
Stanford University, USA	
EQE International, USA	EQE, USA
University of Minnesota, USA	U of M
University of Pittsburgh, USA	
University of South Carolina, USA	
University of Texas at El Paso, USA	UTEP
New Jersey Institute of Technology, Newark, USA	
Purdue University, USA	

Kooperationspartner	**Abkürzungen**
Institute for Crisis, Disaster, and Risk Management der George Washington University, USA	
Los Alamos National Laboratory, USA	LANL
PASSCAL Instrument Center, Stanford University, USA	
Department of Physics & Astronomy, Los Angeles University, USA	
Center for Earthquake Research and Information, University of Memphis, USA	CERI, Memphis
Risk Management Solution, Inc., Menlo Park, USA	RMS, USA
Department of Geography, California State University at Long Beach, Long Beach, USA	CSU, USA
Institute for Crustal Studies, University of California, Santa Barbara, USA	UCSB
Oregon State University, Corvallis, USA	OSU Corvallis
Ecole et Observatoire de Physique du Globe, Strasbourg, Frankreich	EOST Strasb.
Institute de Physique du Globe, Strasbourg, Frankreich	IPG Strasb.
Institut National des Sciences Appliquées, Strasbourg, Frankreich	INSA Strasb.
Universität Nancy, Frankreich	
Laboratoire de Geophysique et Tectonique, Université de Montpellier, France	LGT, Montpellier
Geologisches Institut der Université des Sciences et Technologies de Lille, Frankreich	Geol. Inst., Lille
Institut für Geophysik, Universität Nizza, Frankreich	
Institut für Geodynamik, Universität Nizza, Frankreich	
IRRS Milano, Italien	IRRS
Department of Environmental Sciences, Caserta, Italien	
Department of Geophysics, Universität Utrecht, Niederlande	TU Utrecht
Vrije University Amsterdam, Niederlande	VU Amsterdam
Faculty of Geodesy, Technische Universität Delft, Niederlande	Geod., TU Delft
Aerospace Faculty, Technische Universität Delft, Niederlande	Aero., TU Delft
Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Salzburg, Österreich	Univ. Salzburg
Wirtschaftsuniversität Wien	
Geologisches - Paläontologisches Institut der Universität Basel, Schweiz	Univ. Basel
Institut für Geophysik der ETH-Zürich, Schweiz	ETH-Zürich
ETH-Lausanne, Schweiz	
Universität Genf, Schweiz	
Geologisches Institut der TU Budapest, Ungarn	

Kooperationspartner	**Abkürzungen**
Geophysical Department der Eötvös University, Budapest, Ungarn	
Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Ungarn	BMGE Budapest
Geophysikalisches Institut, Universität Prag, Tschechien	
School of Ocean and Earth Sciences, University of Hawaii, Hawai	SOEST
Panstwowy Instytut Geologiczny, Polen	
Polish Oil and Gas, Polen	
Universität Kiew, Ukraine	Uni Kiew
Institute of Geological Sciences, Academy of Sciences, Belarus	
Geological Institute of the Slovak Academy of Sciences, Slowakei	
International Center for Disaster-Mitigation Engineering, Japan	
University of Tokyo, Japan	
State Seismological Bureau, China	
Middle East Technical University, Ankara, Türkei	
Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute, Istanbul, Türkei	KOERI
Yildiz Universität, Istanbul, Türkei	YTU Istanbul
Department of Civil Engineering, Bogazici University, Istanbul, Türkei	BU, Türkei
Department of Geophysics, The Dead Sea Research Center, Tel Aviv, Israel	
Technion- Israel Institute of Technology, Faculty of Civil Engineering, Haifa, Israel	
Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Moskau, Russland	
Moscow State Geological Prospecting Academy, Russland	
Seismological Center of IGE, Russische Akademie der Wissenschaften, Moskau, Russland	
Geophysikalisches Institut der Russischen Akademie der Wissenschaften, Ekatarinburg, Russland	
RAS, Moskau, Russland	RAS Moskau
Universität Skopje, Mazedonien	
Indian Institutes of Technology	IIT
Department of Civil Engineering des IIT, Mumbai, Indien	
National Geophysical Research Institute, Hyderabad, India	
Seismological Institute, Tirana, Albanien	
Institute of Geological & Nuclear Sciences, Lower Hutt, Neuseeland	
University of Canterbury, Christchurch, Neuseeland	

Kooperationspartner	**Abkürzungen**
Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico-City, Mexico	
National Center for Research on Earthquake Engineering, Taipeh, Taiwan	
Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia	IT Bandung
Cranfield University, UK	
World Federation of Engineering Organisations, London, UK	WFEO, London
Defense Modeling and Simulation Office, USA	DMSO
Cambridge Architectural Research Ltd., UK	
Australian Research Council, Australien	ARC Austral.
Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasilien	UFSC Florianópolis
Universidade Federal de Paraná, Curitiba, Brasilien	UFPR Curitiba
North Atlantic Treaty Organization	NATO

1.4 Für den SFB insgesamt in allen Förderperioden bewilligte Ergänzungsausstattung

Haushaltsjahr	Ergänzungsausstattung (in €)			Gesamt (in €)
	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	
1996/2	405.301	119.029	173.839	**698.169**
1997	834.122	190.865	158.500	**1.183.487**
1998	793.116	185.548	12.782	**991.446**
1999/1	436.746	311.326	0	**748.072**
			Zwischensumme	**3.621.174**
1999/2	524.074	191.530	94.589	**810.193**
2000	1.023.709	216.583	99.702	**1.339.994**
2001	1.033.116	474.172	0	**1.507.288**
			Zwischensumme	**3.657.475**
2002	1.354.100	372.119	89.272	**1.815.491**
2003	1.352.200	276.496	0	**1.628.696**
2004	1.398.000	222.720	0	**1.620.720**
			Zwischensumme	**5.064.907**
2005	1.176.600	254.500	0	**1.431.100**
2006	1.190.100	197.800	0	**1.387.900**
2007	1.126.800	168.300	0	**1.295.100**
			Zwischensumme	**4.114.100**
			Gesamtsumme	**16.457.656**

2. Zentrale wissenschaftliche Ergebnisse des Sonderforschungsbereichs

2.1 Wissenschaftliche Entwicklung des Sonderforschungsbereichs

Langjährige Statistiken zeigen, dass in der Vrancea-Region, Rumänien, im südöstlichen Karpatenbogen immer wieder starke Erdbeben mit erheblichem Zerstörungspotential auftreten können. Die Ortsfestigkeit der Ereignisse und die hohe Wahrscheinlichkeit für Starkbeben prädestinieren die Region als sehr geeignetes Gebiet für die Entwicklung eines Expertensystems zur Modellierung von Schadensprognosen und zur Beherrschung der Folgen von Starkbeben. Im Zentrum stehen Modelle zur Beschreibung der geologischen und geophysikalischen Prozesse, die mit Starkbeben verknüpft sind, die Schadenswirkung von Starkbeben auf Bausubstanz und Infrastruktur sowie das Katastrophenmanagement.

Im Erstantrag wurden als unmittelbare Ziele des SFB 461 „Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen“ folgende genannt:

- Verstehen der tektonischen Ursache der mitteltiefen Beben
- Entwicklung von realistischen Modellen für Maximalbeschleunigungen
- Prognostik der Schadenswirkung auf der Basis von seismologischen Daten und Aufnahmen der Infrastruktur und des baulichen Zustandes
- Risikoverminderung durch präventive bauliche Ingenieurmaßnahmen, Entwicklung eines flexiblen Katastrophenmanagements sowie neuer Bergungstechnologien und Verfahrentechniken der Wiederherstellung

Wie es der Name des SFB 461 schon ausdrückt, sollte eine Brücke gespannt werden, welche die gesamte Palette von den geowissenschaftlichen Grundlagen bis hin zu den Maßnahmen nach einem Ereignis überspannt. Allein die interdisziplinäre Erforschung der Evolution und rezenten Dynamik der Karpaten stellte eine Herausforderung dar. Als ebenso attraktive Aufgabe wurde die Entwicklung von Ingenieurkonzepten gesehen, die zur Reduzierung des Risikos in einem Land beitragen sollten, dessen Bausubstanz nicht unbedingt den internationalen Standards der Erdbebensicherheit entspricht. Die eigentliche Herausforderung dieses SFB bestand in dem Anspruch, durch interdisziplinäre und interaktive Forschung auf dem Gebiet der Starkbeben einen Sprung nach vorne bei der Beherrschung ihrer Folgen zu machen, der bei getrennt arbeitenden Gruppen nicht zu erwarten gewesen wäre.

Die Teilprojekte des SFB 461 waren in drei Projektbereiche eingebettet. Projektbereich A sollte das **Lithosphärische Szenario** bearbeiten. „Vrancea ist der Bereich des Karpatenbogens, in dem eine Reihe junger und jüngster Spuren eines in seiner Gesamtheit noch unverstandenen gebirgsbildenden Prozesses anzutreffen ist (Zitat aus dem Erstantrag)“. Hier fanden Untersuchungen zur Dynamik der postulierten abtauchenden Platte (Slab) und des entsprechenden Delaminierungsprozesses statt. Entscheidende Zielparameter für die Starkbeben sind maximale Herdfläche, Tiefenlage, Spannung (Druck) und Temperatur im Slab. Zentrale Untersuchungsmethoden waren u.a. die hochauflösende seismische Tomographie, die Analyse des regionalen Vulkanismus der Tektonik sowie die 3D Spannungsmodellierung.

Projektbereich B beschäftigte sich mit **Rezenter Kinematik und Dynamik.** Hier stand die großräumige Erfassung des südosteuropäischen Spannungsfeldes mit Verdichtung im regionalen Bereich an. Geodätische Beobachtungen sollten die rezenten Relativbewegungen der regionalen tektonischen Einheiten (Platten) erfassen und deren Abgrenzung präzisieren. Es galt weiterhin Boden/Bauwerk-Wechselwirkungen als Bindeglied zwischen den vom Bebenherd abgestrahlten Wellen und den auf die Bauwerke wirkenden Beschleunigungen zu analysieren, wobei auch Verflüssigungsphänomene eine entscheidende Rolle spielen.

Im Projektbereich C **Erdbebenauswirkungen und Ingenieurmaßnahmen** waren die wesentlichen Ingenieurprojekte angesiedelt. Diese behandelten einerseits präventive bauliche Maßnahmen wie erdbebensichere Auslegung von Neubauten und nachträgliche Ertüchtigung des Bestandes und andererseits die Entwicklung optimaler Werkzeuge zum Katastrophenmanagement auf der Basis eines technischen Informationssystems, wobei automatisierte Bildanalysen aus der Photogrammetrie zur schnellen Schadenserfassung beitragen sollten. Hier spielte die Übertragbarkeit der Methoden auf andere Lokalitäten eine wichtige Rolle. Für das Testen der neu zu entwickelnden Rettungsmaßnahmen erfolgte eine enge Zusammenarbeit mit den rumänischen Behörden, insbesondere dem Romanian Civil Protection Command sowie der Folgeorganisation General Inspectorate for Emergency Situations.

Es ergaben sich in der Laufzeit des SFB 461 folgende **neue wesentliche Fragestellungen:**

Im Teilprojekt A1 wurde 2003/2004 ein neuartiges seismologisches Projekt durchgeführt. Mit 31 seismologischen Breitband-Stationen wurde kontinuierlich die Bodenbewegung in einer Großstadt – Bukarest – aufgezeichnet. Mit dem einmaligen Datensatz wurde gezeigt, dass man die seismische Tiefenstruktur einer urbanen Region trotz des hohen Rauschpegels mit passiven seismischen Methoden abbilden kann. Zudem gelang es, das urbane seismische Rauschen in einem breiten Frequenzbereich von 0.01 Hz bis 50 Hz zu charakterisieren. Fragestellungen der urbanen Seismologie werden zukünftig zunehmen, um die Gefährdung der ständig wachsenden Groß- und Megastädte besser beurteilen zu können. Dies ist nun ein Schwerpunktthema in Karlsruhe. Die intensive numerische Modellierung der Wellenausbreitung mitteltiefer Beben als auch der tektonischen Prozesse in der Vrancea Region sind Themen, die erst im Laufe des Sonderforschungsbereichs aufgegriffen wurden, weil erst im Laufe der Zeit die entsprechenden Möglichkeiten bezüglich Hard- und Software entwickelt werden konnten. Es gelang im Teilprojekt A7, Bodenerschütterungen von Vrancea Erdbeben in einem großen Modellvolumen (200 km x 200 km x 200 km) realistisch zu simulieren und mit den vorhandenen Beobachtungen abzugleichen. Diese Modellierung wurde mit finiten Differenzen durchgeführt und stellt weiterhin einen wesentlichen Aspekt der Arbeiten am Geophysikalischen Institut dar. Im Teilprojekt A6 gelang es mit den Finite Elemente Programmen ABAQUS und Hypermesh, eine 3D Modellierung der Auswirkungen von Starkbeben auf das Spannungsfeld, des Spannungstransfers und der zur Kopplung des abtauchenden Slabs an der Kruste zu erstellen. Dabei konnte auch der Prozess der Hebung und Erosion an der Oberfläche berücksichtigt werden.

Die Bearbeitung des Themenkomplexes seismische Welle - hydrogeologische Eigenschaften – Bodendynamik zeigte neue Wege der interdisziplinären Arbeit auf. Dies betrifft sowohl die kohärente Datenakquisition und Nomenklatur als auch die integrative Modellierung der Bodenbewegung.

Es ist gelungen, die enge Beziehung zwischen Bodenbewegung, Grundwasserstand und nichtlinearem Verhalten dieser Böden für die Stadt Bukarest offen zu legen. Dabei kamen Laborversuche, neu entwickelte numerische Methoden sowie Feldmessungen zum Einsatz. Der Einfluss von saisonal oder durch extreme Niederschlagsereignisse bedingten Grundwasserstandsschwankungen auf das Bodenverflüssigungspotenzial während Starkbeben konnte durch dazu erstellte Risikokarten für Bukarest dokumentiert werden. Letztlich dienen diese Analysen der Entwicklung einer Mikrozonierungskarte, welche für die weitere Stadtplanung von Bukarest von erheblicher Bedeutung ist.

Im oberflächennahen Bereich bis zu einer Tiefe von 100m sind die relativen Spannungsänderungen vergleichsweise groß. Somit sind bei den in Teilprojekt B4

betrachteten gesättigten Böden hier verstärkt nichtlineare Effekte von der transienten Abnahme der Steifigkeit bis zur Verflüssigung (transiente Abnahme der Korn-zu-Korn-Spannungen) zu beobachten. Dies gilt sowohl bei gleichartigem Material als auch bei geschichtetem Boden. Insbesondere galt es den Einfuß von nicht bindigen (Sand/Feinsand) Schichten zwischen bindigen (Tone, tonige Schluffe) Schichten klären. Dabei rückte immer mehr auch der Einfluss der Mächtigkeiten der einzelnen Schichten in den Vordergrund. Die Mannigfaltigkeit des Verhaltens wird infolge der Nichtlinearität auch hinsichtlich der Stärke der Anregung noch weiter vergrößert. Es galt deshalb, neben der Anregung mit Erdbebensignalen, eine andere Methode für Nachrechnungen und die Laborversuche zu entwickeln. Das nichtlineare Verhalten, das zu einer zeitlich veränderlichen Steifigkeit auch bei stationärer harmonischer Anregung führt, hängt auch von der Stärke der Anregung ab. Diese Nichtlinearität zeigt sich dabei in langsam veränderlichen Schwingungsmoden bis hin zu asymptotischem Verhalten nach hoher Zyklenzahl. Die Brücke zu den üblichen Berechnungen mit linear äquivalenten Modellen (SHAKE) ist eigentlich nicht möglich, da die Effekte infolge Abnahme der Korn-zu-Korn-Spannungen und Änderung der Lagerungsdichte nicht berücksichtigt werden. Die nichtlinearen Berechnungen ergeben transiente Verstärkungsfaktoren, die mit wachsender Amplitude unterproportionale Maxima zeigen. Der Einfluss der in-situ Lagerungdichte des Bodens konnten durch Fallstudien berücksichtigt werden, so dass sensitive Schichten identifiziert werden können.

Eine wesentliche Weiterentwicklung zur Vorbereitung von weiteren Forschungsansätzen bildet die Integration des Software Tools EQSIM zu Schadensprognose und Optimierung von Gebäudeverstärkungsmaßnahmen in GoogleEarth. Die Überführung der Clientfunktionalität in Web2.0-Technologie und die Anbindung an das frei verfügbare und populäre Programm GoogleEarth ermöglichen eine leichte Verbreitung und einfache Übertragbarkeit auf neue Gebiete. Eine Ausweitung des Systems auf weitere Gebiete wie Istanbul ist vorstellbar, wobei sich dort die benötigten Daten über eine interaktive Erhebung bei den Bewohnern ermitteln ließen. Mit einer Art „EQ-Wikipedia“ könnten so Geophysiker und Ingenieure sowie die betroffenen Personen auf einer Plattform zusammenarbeiten und die Risikowahrnehmung der Bevölkerung verbessern.

Es zeigten sich während der Laufzeit des SFB 461 folgende weitgreifende **methodische Erkenntnisse:**

Zur Untersuchung des seismischen Rauschens in Groß- und Megastädten wurden neue Ansätze für die Datenprozessierung und statistischen Analyse entwickelt. Dies erlaubt eine Kartierung der stochastischen Signale und wird nun für Echtzeitsysteme weiterentwickelt. Diese Methodik kann auch auf andere, technische Prozesse übertragen werden und wurde 2007 mit dem Siemens Exzellenz Award ausgezeichnet.

Die Laufzeit des SFB 461 fiel in eine Periode wichtiger Neuerungen der Sensortechnik: Entwicklung des Laserscannings und der Erweiterten Realität („augmented Reality, AR“). Beides wurde jeweils in den Teilprojekten C5 und C6 als zentrales Thema aufgegriffen und für Einsatzmöglichkeiten im Katastrophenmanagement untersucht, die ersten Untersuchungen dieser Sensoren in solchen Szenarien überhaupt. Die dabei gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass Laserscanning und Erweiterte Realität zukünftig unverzichtbare Werkzeuge für pre- und post-event Einsatz sein werden.

Zur Bestimmung der rezenten Plattenkinematik aus GPS-Beobachtungen verlagert sich die Technologie immer mehr von epochalen Netzmessungen hin zur Einrichtung von Permanentstationen. Die Zusammenarbeit im Teilprojekt B1 mit der TU Delft im Rahmen des niederländischen ISES-Programms (Integrated Solid Earth Sciences) erlaubte in den letzten Bewilligungszeiträumen die Einrichtung von fünf speziell für dieses Projekt eingerichteten Permanentstationen. Weiterhin konnte teilweise auf die neu eingerichteten Stationen der rumänischen Landesvermessung zurückgegriffen werden.

Die **wichtigsten Ergebnisse des SFB** sollen im Folgenden kurz charakterisiert werden:

Es wurde das **Disaster Management Tool (DMT)** entwickelt, welches Katastrophenvorsorge und –management in einem einzigen Werkzeug zusammenfasst. Solch integrierte Lösungen waren bisher in der Praxis nicht verfügbar. Durch die finanzielle Bewertung von Verstärkungsmaßnahmen für Gebäude in Erdbebengebieten und eine Verknüpfung mit Schadensszenarien lässt sich erstmals auch direkt eine Kosten-Nutzen-Analyse sowohl großflächig als auch für Einzelgebäude durchführen. Der Katastrophenstab und die Einsatzleitungen vor Ort nutzen gemeinsam das Technische Informationssystem (TIS), das Schadensprognosen, Gebäudeinformationen sowie ein Geoinformations- und Kommunikationstool beinhaltet und die Basis für die entscheidungsunterstützenden Komponenten bildet. Das DMT wurde durch die direkte Zusammenarbeit mit dem rumänischen Zivilschutz in zwei Katastrophenübungen getestet und erweitert.

Es wurde ein **Informationssystem für Erdbeben** entwickelt, das Erdbebenfrühwarnung und schnelle Informationen über die Bodenerschütterung beinhaltet. Neue methodische Entwicklungen erlauben es, Erdbebenfrühwarnungen für Bukarest mit einer Vorwarnzeit von ca. einer halben Minute zu liefern. Dieses System ist in der Testphase operationell. Wenige Minuten nach einem Beben ist man in der Lage, Karten der Bodenerschütterung dieses Erdbebens mit besonders hoher Auflösung für den Raum Bukarest, aber auch für den ganzen südostrumänischen Raum zur Verfügung zu stellen. Diese dienen zur Erkennung der Größe des potentiellen Schadens, seiner räumlichen Verteilung und unterstützen Entscheidungen der Hilfsorganisationen.

Erstmals ist eine **probabilistische Gefährdungsanalyse** für die gesamte Erdbebentätigkeit Rumäniens erstellt worden. Diese hat Eingang in die Berechnung von jährlichen Durchschnittsrisiken gefunden, die ihrerseits wiederum als Grundlage einer Schadensversicherung in Rumänien benutzt werden. Weiterhin sind die Analysen des SFB in diesem Kontext in die Entwicklung eines Schadensszenarios für Bukarest auf der Grundlage der Katastrophenvorsorge für die Stadt eingegangen.

Es ist gelungen, die enge Beziehung zwischen Bodenbewegung, Grundwasserstand und nichtlinearem Verhalten der Böden für die Stadt Bukarest offen zu legen. Dabei kamen Laborversuche, neu entwickelte numerische Methoden sowie Feldmessungen zum Einsatz. Letztlich dienen diese Analysen der Entwicklung einer **Mikrozonierungskarte**, welche für die weitere Stadtplanung von Bukarest von erheblicher Bedeutung ist.

Während vor zehn Jahren die Ursache der sehr stark lokalisierten mitteltiefen **Erdbebentätigkeit** Südostrumäniens Gegenstand geowissenschaftlicher Spekulationen war, existiert heute ein **verlässliches Modell**. Dieses rekonstruiert die Starkbebentätigkeit als späte Auswirkung miozäner Subduktionstätigkeit und fasst sämtliche Erkenntnisse der Seismologie, seismischen Tomographie, Geologie, Geodäsie und aufwändige numerische Modellierungen zusammen.

2.2 Entwicklung der Kooperation im Sonderforschungsbereich und Außenwirkung des Sonderforschungsbereichs

Die Entwicklung der Zusammenarbeit im SFB 461 war in zweifacher Hinsicht sehr reizvoll. Zum Einen war es eine absolute Notwendigkeit, dass sich die Mitarbeiter aus den Geowissenschaften und diejenigen aus dem Ingenieurbereich gegenseitig verständigen konnten. Dies führte zu intensiven Diskussionen mit hohem Lerneffekt insbesondere zwischen den jungen Wissenschaftlern. Das zeigte sich sowohl bei den regelmäßig monatlich durchgeführten Seminaren und bei den im Zweijahresturnus veranstalteten jeweils zweitägigen Klausurtagungen, die wesentlich zur konsequenten mittelfristigen Fortplanung der Forschungsarbeiten beitrugen.

Auch die des Öfteren von und mit externen Seminarvortragenden zusätzlich durchgeführten Vortrags- und Diskussionsrunden mit Workshopcharakter trugen zu einer optimalen Verzahnung der Teilprojekte bei.

Zum Anderen ist die sehr gute Kooperation mit den rumänischen Partnern herauszustellen. Schon früh bildete sich parallel zum SFB die „Romanian Group for Strong Vrancea Earthquakes“ (RGVE), in der sich die Partner in den einzelnen Teilprojekten zusammmenfanden. Hier konnte zum Teil auf bereits existierende Kooperationen mit rumänischen Institutionen zurückgegriffen werden, die z.B. seit mehr als einer Dekade in den Bereichen Geophysik und Geodäsie existierten. Die wissenschaftliche Zusammenarbeit konnte durch regelmäßige Gastaufenthalte an beiden Lokationen stetig ausgebaut und verbessert werden. Der SFB 461 kann für

sich in Anspruch nehmen, dass er wesentlich zur Stabilisierung der Lage der rumänischen Geo- und Ingenieurwissenschaften, soweit sie in der RGVE integriert waren, beigetragen hat, da diese in den Jahren nach der Wende in einer national und international geschwächten Position waren.

Zum nationalen Umfeld des SFB 461 ist zu sagen, dass er sich als ein deutscher Beitrag zur UN-Initiative „International Decade for Natural Disaster Reduction“ (IDNDR) verstand. Er wurde von Beginn an im Wissenschaftlichen Beirat und später im Deutschen Komitee für Katastrophenvorsorge vertreten. Der erste Sprecher des SFB, Prof. F. Wenzel, war in den Jahren 2000 bis 2005 Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats des Deutschen Komitees für Katastrophenvorsorge und stellvertretender Vorsitzender des Komitees.

Die Darstellung des SFB 461 im einschlägigen internationalen wissenschaftlichen Umfeld erfolgte durch Teilnahme von SFB-Mitgliedern an verschiedensten Kongressen und Symposien. Hier sind zum Einen die vom SFB 461 selbst in Kooperation mit den rumänischen Partnern in Bukarest veranstalteten Symposien zu nennen, auf die im Abschnitt 2.3 eingegangen wird. Zum Anderen wurden regelmäßig bei den im Jahresturnus stattfindenden Generalversammlungen der europäischen geowissenschaftlichen Vereinigungen Vorträge gehalten und Poster präsentiert. Dies waren die General Assemblies der European Geophysical Society (EGS) 1999 in Den Haag und in den Folgejahren in Nizza, die Joint Assembly von EGS, AGU (American Geophysical Union) und EUG (European Union of Geosciences) 1993 in Nizza und die General Assemblies der European Geosciences Union (EGU), der Vereinigung von EGS und EUG, ab 2005 in Wien. Eine weitere Veranstaltung auf der die Intention des SFB 461 und erste Ergebnisse aus Teilprojekten präsentiert wurden, war die General Assembly der International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) 1999 in Birmingham.

Besondere Highlights waren die vierte „Stephan Müller Conference“ der EGU zum Thema „Geodynamic and Tectonic Evolution of the Carpathian Arc and its Foreland: Environmental Tectonics and Continental Topography” in den Retezat Mountains in den Südkarpaten, Rumänien, und die folgende Konferenz im Jahr 2005 in Lissabon:

Zum 250sten Jahrestag des Erdbebens von Lissabon führte das Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC) mit breiter internationaler Unterstützung und unter dem Schirm der Stadt Lissabon vom 1. bis 4. November 2005 eine wissenschaftliche Konferenz „250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake“ in Lissabon durch. Der SFB 461 wurde eingeladen, am Gesamtprogramm mitzuarbeiten, insbesondere aber den Programmpunkt „Urban planning facing natural hazards, information and warning“ zu gestalten. In der entsprechenden Sitzung wurde in sieben Beiträgen des SFB dessen Arbeit vorgestellt.

Vom 1. bis 3. März 2007 fand in Bukarest die Konferenz “30 Years from the Romania Earthquake of 4 March 1977” statt. Sie wurde vom Romanian National Center for Earthquake Engineering and Vibrations organisiert, das Teil der technischen Universität Bukarest ist. Die Schirmherrschaft über die Konferenz hatte die European Association for Earthquake Engineering (EAEE) übernommen. Die Konferenz hatte internationalen Zuschnitt, bedingt durch die Teilnahme von Kollegen und Kolleginnen aus USA, Frankreich, Mexiko, Griechenland, Indien, Türkei, Großbritannien, Israel, Italien und anderen. Der SFB spielte bei der Vorbereitung und Durchführung der Konferenz eine wesentliche Rolle: Professor Friedemann Wenzel war Mitglied des Scientific Committee. Er präsentierte am Eröffnungstag eine “Special Lecture: Earthquake Risk Reduction in Romania – 10 Years of Collaborative Efforts”. Weitere 3 Beiträge aus dem SFB wurden von rumänischen Kollegen in Koautorenschaft mit SFB-Mitgliedern vorgestellt. Die Konferenz wurde von ca. 100 Personen besucht und fand erhebliches Interesse in den öffentlichen Medien.

Zur Erprobung und Demonstration des Disaster Management Tools (DMT) wurde nach der ATLAS 2004 nun die Großübung ATLAS 2007 in Bukarest im Oktober 2007 in Zusammenarbeit mit dem General-Inspektorat für Notfallsituationen und den im Katastrophenfall involvierten Organisationen ausgerichtet. Die dreitägige Übung war in eine Stabs- und eine Feldübung aufgeteilt, bei der von der obersten Entscheidungsebene in Bukarest bis hin zu Helfern des Roten Kreuzes insgesamt 180 Personen zum Einsatz kamen, die im Erdbebenfall in gleichen Positionen eingebunden sind. So konnte die Funktionalität des DMT und seiner Komponenten unter realistischen Bedingungen gemeinsam mit den Anwendern demonstriert werden. Über die Übung wurde sehr positiv in Zeitungen und im Fernsehen berichtet.

2.3 Erläuterung zur internen Organisation des SFB und zum Umgang und zu den Verfahrensweisen mit den Mitteln des SFB

Nach den Erfahrungen während der Laufzeit des SFB 461 bleibt festzustellen, dass sich die interne Organisation mit Mitgliederversammlung und Koordinierungsgremium bewährt hat und dass sich die Zusammenarbeit zwischen Sprecher, Geschäftsstelle, Koordinierungsgremium, Teilprojektleitern und den Mitgliedern gut gestaltet hat. Die Doktoranden und Postdoktoranden haben sich regelmäßig, z.B. anlässlich der Klausurtagungen, getroffen und waren bei der Organisation von Veranstaltungen sowie bei Antragstellung und Berichterstellung teilweise eigenverantwortlich aktiv.

Die Flexibilität des Einsatzes der in einem Haushaltsjahr bewilligten Mittel wurde durch gezielte Umschichtungen genutzt, wobei als Kriterium der wissenschaftliche Bedarf angesetzt wurde wie z.B. bei Durchführung notwendiger Messkampagnen.

Die interne Vergabe zentral bewilligter Mittel und der zusätzlich von der Universität zugeteilten Landesmittel in Höhe von 50.000,- EUR jährlich erfolgte nach Beratung im Koordinierungsgremium unter Berücksichtigung des Gesamtinteresses des SFB.

Längerfristige Aufenthalte von Gastwissenschaftlern (im wesentlichen rumänische Partner) im SFB und Auslandsaufenthalte Karlsruher Wissenschaftler (siehe auch 2.2) wurden nach Beratung im Koordinierungsgremium vom SFB 461 finanziert. Drei internationale Tagungen, jeweils in Bukarest, wurden gemeinsam mit den rumänischen Partnern organisiert und vom SFB teilfinanziert:

First International Workshop on Vrancea Earthquakes, 1.-4. November 1997. Die Proceedings erschienen kostenneutral in der Reihe “Advances in Natural and Technological Hazards Research” bei Kluwer Academic Publishers (Herausgeber F. Wenzel und D. Lungo, 374 Seiten) unter dem Titel **Vrancea Earthquakes, Tectonics, Hazard and Risk Mitigation**.

Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction, Second International Conference on Vrancea Earthquakes, 24.-26. Oktober 2004. Die Proceedings wurden in zwei Bänden mit knapp 800 Seiten bei “Independent Film” in Bukarest verlegt (Herausgeber D. Lungo, F. Wenzel, P. Mouroux und I. Tojo). Es erfolgte eine Kofinanzierung durch den SFB 461 in Höhe von 4.900,- EUR aus Landesmitteln.

International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, 4.-6. Oktober 2007 als Abschlussveranstaltung des SFB 461. Die Proceedings erschienen im “Matrix Rom” Verlag in Bukarest (Buch mit 493 Seiten und CD[1]). Die Finanzierung erfolgte aus Mitteln des SFB: 2.255,64 EUR für den Buchdruck und 780,39 EUR für die CD-Erstellung.

Weiterhin wurden, um den SFB im wissenschaftlichen und außerwissenschaftlichen Bereich bekannt zu machen, zu jeder Förderungsperiode englischsprachige Broschüren in Auflagen von ca. 500 Exemplaren gedruckt und national und international verteilt. Maßnahmen zur lokalen Öffentlichkeitsarbeit wurden mit der Abteilung für Presse und Kommunikation der Universität abgesprochen, die entweder Kurzberichte in der Universitätszeitschrift UNIKATH veröffentlichte oder Mitteilungen an die lokale Presse weitergab.

[1]Die Proceedings wurden diesem Abschlussband in der Einlage beigefügt.

2.4 Veröffentlichungen aus dem SFB

Hier werden die 40 wichtigsten Veröffentlichungen der Gesamtlaufzeit des SFB 461 aufgeführt. Gesamtlisten können den einzelnen Berichtsbänden entnommen werden.

2.4.1 Begutachtete Veröffentlichungen

Bartlakowski, J., F. Wenzel, F. Radulian, M., Ritter, J. and Wirth, W. (2006): Urban shakemap methodology for Bucharest. GRL, Vol. 33, L14310, Doi: 10.1029/2006GL026283.

Böse, M., Wenzel, F. & Erdik, M. (2008): PreSEIS: A Neural Network-Based Approach to Earthquake Early Warning for Finite Faults, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 98, No. 1, pp. 366–382; doi: 10.1785/012007002.

Dinter, G., G. Schmitt (2001): Three Dimensional Plate Kinematics in Romania.Natural Hazards, Vol 23, pp. 389–149.

Fiedrich, F., F. Gehbauer, U. Rickers (2000): Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. Safety Science, Vol. 35, Issue 1–3. pp. 41–57.

Fielitz, W. and Seghedi, I. (2005): Late Miocene-Quaternary volcanism, tectonics and drainage system evolution in the East Carpathians, Romania. Tectonophysics, Vol. 410, pp. 111–136.

Gehbauer, F., M. Markus, F. Fiedrich, S. Gentes, C. Schweier (2003): Forschungsarbeiten zur technischen und organisatorischen Bewältigung von Katastrophen mit Gebäudeschäden. Bauingenieur, Vol. 78, S. 36 –378.

Gudehus, G., R. O. Cudmani, A. B. Libreros-Bertini, M. M. Bühler (2004): In-plane and anti-plane strong shaking of soil systems and structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, Issue 4. pp. 319–342.

Hannich, D., Hötzl, H., and Cudmani, R., 2006: Einfluss des Grundwassers auf die Schadenswirkung von Erdbeben – ein Überblick. Grundwasser, Bd. 11, No. 4, S. 286–294

Hauser, F., V. Raileanu, W. Fielitz, A. Bala, C. Prodehl, G. Polonic, A. Schulze (2001): VRANCEA99 – The crustal structure beneath the southeastern Carpathians and the Moesian Platform from a seismic refraction profile in Romania. Tectonophysics, Vol. 340, Issues 3–4: 233–256.

Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Dinu, C., Landes, M., Bala, A. and Prodehl, C., (2007): Seismic crustal structure between the Transsylvanian Basin and the Black Sea, Romania. Tectonophysics, Vol. 430, pp. 1–25.

Ismail-Zadeh, A., B. Müller, and G. Schubert (2005): Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data, Phys. Earth Planet. Int.,149 (1-2), 81–98.

Kienzle, A.; Hannich, D., Wirth, W.; Ehret, D.; Rohn, J., Ciugudean, V., Czurda, K. (2006): A GIS-based study of earthquake hazard as a tool for the microzonation of Bucharest. Engineering Geology, Vol. 87, 1–2, pp.13–32.

Loukachev, I., N. Pralle, G. Gudehus (2002): Dilatancy-induced P waves as evidence for nonlinear soil behavior. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 92, No. 2: 854–862.

Martin, M., Ritter, J.R.R. and the CALIXTO working group (2005): 3D crustal seismic velocity model of SE Romania: Implications for 3D vs. 1D crustal correction strategies for high-resolution teleseismic tomography. Geophys. J. Int., Vol. 162, pp. 448–460, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02661.x .

Martin,M. F. Wenzel and the CALIXTO working group (2006): High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania – II. Imaging of a slab detachment scenario Geophys. J. Int., Vol. 164, pp. 579–595 doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02884.x

Miksat, J., Müller, T., Wenzel, F. (2008). Simulating 3D seismograms in 2.5D structures by combining 2D finite-difference modeling and ray tracing. Geophys. J. Int., in review.

Necea, D., Fielitz, W. and Matenco, L. (2005): Late Pliocene?Quaternary tectonics in the frontal part of the SE Carpathians: Insights from tectonic geomorphology, Tectonophysics, Vol. 410, pp. 137–155.

Rehor, M. (2007): Classification of building damages based on laser scanning data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland, Vol. XXXVI, Part 3/W52, S. 326–331.

Ritter, J.R.R., Balan, S.F., Bonjer, K.-P., Diehl, T., Forbriger, T., Marmureanu, G., Wenzel, F. and Wirth, W. (2005): Broadband urban seismology in the Bucharest metropolitan area. Seism. Res. Lett., Vol. 76, pp. 573–579.

Saito, K., R. J. S. Spence, C. Going, M. Markus (2004): Using High-Resolution Satellite Images for Post-Earthquake Building Damage Assessment: A Study Following the 26 January 2001 Gujarat Earthquake. Earthquake Spectra, Vol. 20, Issue 1: 145–169.

Schweier, C., M. Markus (2006): Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 2: 177–192.

Schweier, C., M. Markus, E. Steinle (2004): Simulation of earthquake caused building damages for the development of fast reconnaissance techniques. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 4, No. 2: 285–293.

Sokolov V., K.-P. Bonjer, F. Wenzel (2004): Accounting for site effect in probabilistic assessment of seismic hazard for Romania and Bucharest: a case of deep seismicity in Vrancea zone. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, No. 12: 927–947.

Sokolov V. Yu, Bonjer, K-P., Oncescu M, and M Rizescu (2005): Hard Rock Spectral Models for Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America Vol. 95, pp. 1749–1765.

Sperner, B., F. Lorenz, K. Bonjer, S. Hettel, B. Müller, F. Wenzel (2001): Slab break-off – abrupt cut or gradual detachment? New insights from the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania). Terra Nova, Vol. 13, No. 3: 172–179.

Van der Hoeven, A., Mocanu, V., Spakman, W., Nutto, M., Nuckelt, A., Matenco, L.,Munteanu, L., Marcu, C. und B. Ambrosius (2005): Observation of present-day Tectonic motions in the Southeastern Carpathians: Results of the ISES/CRC 461 GPS-mesurements. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 239, pp. 177–184

Vögtle, T., E. Steinle (2005): Fusion of 3D building models derived from first and last pulse laserscanning data. Information Fusion, Elsevier, Vol. 6, Issue 4: 275–281.

Wenzel, F., M. Baur, F. Fiedrich, C. Ionescu, M. C. Oncescu (2001): Potential of Earthquake Early Warning Systems. Natural Hazards, Springer, Vol. 23, No. 2–3: 407–416.

Wirth, W., F. Wenzel, V. Y. Sokolov, K.-P. Bonjer (2003): A uniform approach to seismic site effect analysis in Bucharest, Romania. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 23, N. 8: 737–758.

2.4.1 Nicht begutachtete Veröffentlichungen

Bähr, H.-P. (2005): Sprache, ein Datentyp der Bildanalyse. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bilderverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 211–228.

Cudmani, R. O., R. Cudmani (2004): Numerical study of the soil-structure interaction during strong earthquakes. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2959.

Hannich, D., G. Huber, D. Ehret, H. Hötzl, S. Balan, A. Bala, M. Bretotean, V. Ciugudean (2006): SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981–992.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, M. Bretotean, A. Danchiv, V. Ciugudean (2005): The impact of hydrogeology on the earthquake ground motion in soft soils. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 358–361.

Ehret, D., Hannich, D., Schmitt, S., Huber, G. (2007): Numerical modelling of site effects - Influences of groundwater level changes. In: Krope, J., Necasova, S., Tutyshkin, N., Sapountzakis, E., Mucciarelli, M., Proceedings 1st IASME/WSEAS International Conference on Geology and Seismology, pp.233–237.

Leebmann, J. (2006): Dreidimensionale Skizzen in erweiterter Realität. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/2584 (Stand März 2008).

Lungu, D., F. Wenzel, P. Mouroux, I. Tojo (Hrsg.) (2004): Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Contributions from the Second International Conference on Vrancea Earthquakes, Volume 1, Bucharest, October 24–26, 2002. Independent Film, Bucureşti, Romania, 366 S.

Lungu, D., F. Wenzel, P. Mouroux, I. Tojo. (Hrsg.) (2004): Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Contributions from the Second International Conference on Vrancea Earthquakes, Volume 2, Bucharest, October 24–26, 2002. Independent Film, Bucureşti, Romania, 421 S.

Nuckelt, A. (2007): Dreidimensionale Plattenkinematik; Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone/ Rumänien. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe. 84 S.

Rickers, U. (1998): Modellbasiertes Ressourcenmanagement für die Rettungsphase in Erdbebengebieten. Dissertation am Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH). Veröffentlichungen des Instituts für Maschinenwesen im Baubetrieb der Universität Karlsruhe (TH), Reihe F, Heft 47, Karlsruhe.

SFB 461 (2007): Proceedings International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, October 4-6, 2007. Matrix Rom, Bucureşti, Romania, 496 pp.

Staub, G. M. (2006): Navigation mit mobilen Augmented Reality Systemen im Gelände. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/2586 (Stand März 2008).

Wenzel, F., D. Lungu, O. Novak (Hrsg.) (1999): Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Selected papers of the First International Workshop on Vrancea Earthquakes, Bucharest, November 1–4, 1997. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, 374 S.

2.5 Zahl der Promotionen, Habilitationen und Berufungen von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern aus dem SFB (Grund- und Ergänzungsausstattung)

	Anzahl 1. FP		**Anzahl 2. FP**		**Anzahl 3. FP**		**Anzahl 4. FP**	
	w	**m**	**w**	**m**	**w**	**m**	**w**	**m**
Promotionen	-	2	-	1	2	9	2	12
Habilitationen	-	-	-	-	-	-	-	-
Berufungen von Nachwuchswissenschaftlern auf Professuren nach C3, C4, W2 oder W3	-	-	-	-	-	-	-	2

3. Strukturelle Veränderungen an der Hochschule

3.1 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs im personellen Bereich

Alle im SFB 461 vereinigten Institute waren durch die Reduktion von Personalstellen in allen Bereichen der Grundausstattung durch den im Jahr 2006 ausgelaufenen Solidarpakt zwischen der Landesregierung und den Hochschulen stark beeinträchtigt. Von den Stellenstreichungen waren die Teilprojekte A3 und A4 insofern betroffen, als die Planstellen der Projektleiter Althaus (Mineralogie) und Wilhelm (Geophysik) nach Ablauf der Projekte dem Solidarpakt zum Opfer fielen. Momentan befinden sich die Geowissenschaften in einem gewissen Aufwind. Der Abschlussbericht der Gutachterkommission zur Strukturevaluation der Geowissenschaften an den Universitäten des Landes Baden-Württemberg verdeutlicht die Stärke des Standortes Karlsruhe auch im Rahmen des zukünftigen Geoverbundes Nordbaden. Der interfakultative SFB Starkbeben wird an vielen Stellen positiv erwähnt und hat zweifellos zu der positiven Einschätzung beigetragen, die auch ihren Niederschlag in der aktuellen Berufungspolitik der Universität findet.

Die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses erfolgte wesentlich über eine interdisziplinäre Doktorandenausbildung. Ein zentrales Werkzeug hierzu war das in den Jahren 1998 bis 2007 geförderte Graduiertenkolleg 450 „Naturkatastrophen“, in dem ca. 45 junge Wissenschaftler zur Promotion geführt wurden und 11 Postdoktoranden arbeiteten. Die im Forschungsprogramm beinhalteten Katastrophenarten waren Erdbeben, Massenbewegungen, Überflutungen und Stürme, wobei auch ökonomische und soziale Aspekte betrachtet wurden.

Was die Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie die Vereinbarkeit von Familie und Beruf angeht, gab es keine besonderen Maßnahmen im SFB 461. Wie den bisherigen Berichten entnommen werden kann, gab es diesbezüglich auch keine wesentlichen Probleme. Die verantwortliche Geschäftsführung des SFB 461 lag in den letzten Jahren in den Händen zweier Mitarbeiterinnen.

3.2 Strukturwirkung des Sonderforschungsbereichs im Bereich der Infrastruktur

In der Vrancea Region und ihrem Umfeld mit dem Schwerpunkt Bukarest wurde ein Netzwerk mit Beschleunigungsmessstationen errichtet (Investitionssumme ca. 590.000 EUR). Die Erdbeben-Registrierungen können teilweise in Echtzeit abgerufen werden, und zusätzlich befinden sich an einigen Standorten Breitband-Geschwindigkeitssensoren sowie Fluiddrucksensoren. Dieses moderne Messnetz wird nun vom Nationalen Institut für Physik der Erde (NIEP) in Bukarest koordiniert und betrieben.

Im Jahr 1999 fand das internationale seismologische Großprojekt CALIXTO99 (Carpathian Arc Lithosphere X-Tomography) statt, das von Mitarbeitern des SFB 461 koordiniert wurde. An den über 130 Registrierpunkten wurden zirka 90 mobile seismische Stationen des Geophysikalischen Gerätepools des GeoForschungsZentrums Potsdam erfolgreich eingesetzt.

Im Bereich Katastrophenmanagement wurden enge Kooperationen mit den folgenden Institutionen begonnen:

- Bundesanstalt Technisches Hilfswerk (THW), insbesondere die Bundesschule Hoya und Spezialisten für Gebäudeeinsturz im ganzen Bundesgebiet. Es wurden Einsatzberichte gesammelt und ausgewertet, Befragungen durchgeführt und Erprobungen des Experten- und Informationssystems für Rettungsarbeiten durchgeführt. Jährliche Expertentreffen wurden organisiert.
- Feuerwehren, insbesondere die Landesfeuerwehrschule Bruchsal. Neben Erfahrungsaustausch im Bereich Rettungsarbeiten wurde hier die Bedarfsermittlung für Rechnersysteme zur Unterstützung des Katastrophenstabes durchgeführt.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), insbesondere mit der ihm unterstellten Akademie für Notfallplanung und Zivilschutz (AKNZ). Es wurden Möglichkeiten für eine Anpassung des Disaster Management Tools (DMT) auf deutschte Anforderungen diskutiert. Außerdem wurde der Bedarf an Rechnerunterstützung im Bereich Stabsarbeit ermittelt sowie die Entscheidungsprozesse in der Stabsarbeit analysiert. Dazu wurden Einsatzübungen begleitet und eine Expertenbefragung durchgeführt.

4. Hinweise an die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Hier gilt es nach unserer Erfahrung drei Punkte anzusprechen:

Die Verwendung von **Publikationsmitteln** nach Abschluss eines SFB setzt bisher voraus, dass bereits während der Laufzeit des SFB eine Verpflichtung gegenüber dem jeweiligen Verlag eingegangen wurde. Diese Voraussetzung gilt als erfüllt, sofern die aus den Projektarbeiten resultierenden wissenschaftlichen Aufsätze vor Ende der Förderung zur Veröffentlichung eingereicht wurden. Diese Einschränkung ist unserer Meinung nach zu eng, da manche Veröffentlichungen aus zeitlichen Gründen erst nach dem Abschluss geschrieben werden können. Es wäre sehr hilfreich die Förderung generell auf zwei Jahre nach dem Abschluss zu gewähren.

Es kommt häufig vor, dass wissenschaftliche Mitarbeiter bei Abschluss eines SFB ihre **Promotion** noch nicht ganz abgeschlossen haben und auch nicht auf andere Stellen übernommen werden können. Hier wäre eine Abschlussfinanzierung in gewissem Umfang aus DFG-Mitteln sehr hilfreich (Promotionsabschlussstipendium), insbesondere dann, wenn Mittel anderweitig im SFB eingespart wurden.

Ein weiterer kritischer Punkt ist der Umgang mit der **Programmpauschale**. Zum einen sollte sie im Abschlussjahr nicht an die verwendeten sondern an die bewilligten Mittel gekoppelt sein, da im Folgejahr kein Ausgleich möglich ist. Zum anderen sollte eine klare Regelung der DFG mit der Universität bezüglich der Verwendung dieser Mittel erfolgen, um zu verhindern, dass die Universität einen unverhältnismäßig hohen Anteil (z.B. 75%) einbehält. Die durch die Programmpauschale bereitgestellten Mittel würden eine sinnvolle Entwicklung der aus dem SFB entstandenen, bzw. entstehenden Forschungsvorhaben fördern.

An dieser Stelle seien einige solcher Vorhaben genannt, die wegweisend sind: Zum einen fließen die Erfahrungen aus dem SFB in CEDIM ein, dem Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology. Andererseits ist in Ländern, wo Naturkatastrophen zum Alltag gehören, das Interesse an Ergebnissen des SFB 461 besonders ausgeprägt. In Kooperation mit der TU Yildiz (Istanbul,TR) und dem INSA (Strasbourg, Frankreich) wird ein EU-Antrag gestellt, der die im SFB erarbeiteten Methoden der raschen Erkennung und Klassifizierung von Gebäudeschäden nach einem Starkbeben auf ein reales Gebiet in der Türkei zur Optimierung von Rettungsmaßnahmen übertragen soll. Das Geophysikalische Institut wird ein fast-Echtzeit urbanes seismologisches Projekt in Istanbul durchführen, das auf den Erfahrungen von URS in Bukarest beruht. Auch in der Lehre im Ausland zeigt sich das Interesse. So wird beispielsweise z.Zt. in Chile mit Unterstützung von Prof. Bähr (TP C5, C6 und Z1) ein Masterstudiengang „Geomática – aplicada en desastres naturales“ eingerichtet (Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles). Die Erfolge mit dem Monitoring des seismischen Rauschens werden in Zukunft in Karlsruhe verstärkt fortgeführt.

5.

Berichte über die einzelnen Teilprojekte der letzten Förderperiode (2005–2007)

Teilprojekt A1

Seismische Tiefensondierung über der Vrancea-Subduktionszone

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 – 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

PD Dr. Joachim Ritter[1]
Dr. Thomas Forbriger[1,2]

[1] Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
[2] Black Forest Observatory (BFO), Schiltach, Germany

5.1 General information about the completed project A1

5.1.1 Title:

Deep Seismic Sounding Across the Vrancea Subduction Zone

5.1.2 Research Areas:

Seismology, Wave Propagation

5.1.3 Principal investigators:

Dr. Forbriger, Thomas, 18.02.1968
PD Dr. Ritter, Joachim, 16.10.1963
Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, Germany

Telefon:	07836/ 2151 (T.F.)	0721/ 608-4539 (J.R.)
Telefax:	07836/ 7650 (T.F.)	0721/71173 (J.R.)
E-Mail:	thomas.forbriger@gpi.uni-karlsruhe.de	
	joachim.ritter@gpi.uni-karlsruhe.de	

5.1.4 Staff:

Dipl.-Geophys. Jörn Groos
Dipl.-Geophys. Andreas Hippel
Dr. Olivier Sèbe (now at CEA-DASE Bruyères-le-Châtel)
Dipl.-Geophys. Henriette Sudhaus (now at ETH Zürich)
Dipl.-Geophys. Britta Wawerzinek
Dipl.-Geophys. Julia Ziehm

5.1.5 Romanian Partners:

Dr. Andrei Bala, National Institute for Earth Physics, Bucharest
Dr. Stefan Balan, National Institute for Earth Physics, Bucharest

5.2 Project development report

5.2.1 Report

Abstract

Bucharest, the capital of Romania with about 2.5 million inhabitants, is frequently struck by intense, damaging earthquakes (1940, 1977, 1986 & 1990). Within the framework of the Collaborative Research Centre 461 (CRC 461) "Strong Earthquakes - A Challenge for Geosciences and Civil Engineering" and the “Romanian Group for Strong Earthquakes” seismic wavefields were recorded continuously in Bucharest with broadband instruments for 9 months. During this URban Seismology (URS) project the Karlsruhe BroadBand Array (KABBA) with 32 mobile broadband stations was installed in the city centre and the periphery of Bucharest between October 2003 and August 2004 (previous funding period of CRC 461). The aims of the field project were on one hand the recording of local, regional and teleseismic earthquakes and on the other hand the continuous acquisition of urban seismic noise. These data should serve as basis for comprehensive studies of the subsurface of Bucharest and the properties of the seismic wavefield in a major city.

The analysis of recordings from regional intermediate-depth Vrancea earthquakes provides information on the properties of the related seismic wavefields, amplitude variations across the network, crustal structure from receiver functions and transfer functions of a ten-story tower building in Măgurele (south of Bucharest city). Teleseismic waves were used to study low-frequency amplitude variations as well as lithospheric structure from receiver functions and Love wave dispersion. Ambient seismic noise is analysed for site effects using the horizontal-over-vertical spectral ratio as well as to characterise the noise sources and their temporal behaviour. Here we summarise the main results, for further details we refer to the reference list.

5.2.1.1 State of knowledge at the last application

In the last phase of CRC 461 the subproject A1 concentrated on urban seismology in the metropolitan area of Bucharest. Before 2005 only coarse information on the crustal structure was available from long-range seismic refraction profiles and few receiver function studies in the region. The shallow structure, composed of Neogene sediments was partly better known, especially in the city were numerous shallow boreholes (<30 m) exist. Several H/V studies were published by different groups, however a deeper insight in the application of this method in the region was missing. The properties of the seismic noise wavefield in the city were not studied before. Only preliminary receiver function sections could be shown in the last application, because the URS dataset was just acquired and still under data processing.

5.2.1.2 Applied methods, results and their importance

URS project

During the URS project (RITTER ET AL. 2005) we deployed 32 seismological broadband stations in Bucharest city and its surroundings (Fig. 1). This network consisted of 32 Earthdata 24-bit data loggers with 3 and 6 input channels, GPS time synchronisation and removable 6.4-GByte harddisks. As sensors we used 22 Streckeisen STS-2 seismometers (120 s free period), 5 Geotech KS2000 (100 s), 3 Güralp 40T and ESP (30 s) and 2 Lennartz LE-3D (5 s). The stations included 34 different sites. Installation started at the end of October 2003 and station dismounting was done at the beginning of August 2004. The recording was performed in continuous mode with a sampling rate of 100 Hz. Additionally, we can make use of the data from the permanent K2 strong-motion network of 40 stations which is run by the Universität Karlsruhe (TH) and the National Institute for Earth Physics at Bucharest-Măgurele (CRC 461 subproject B3).

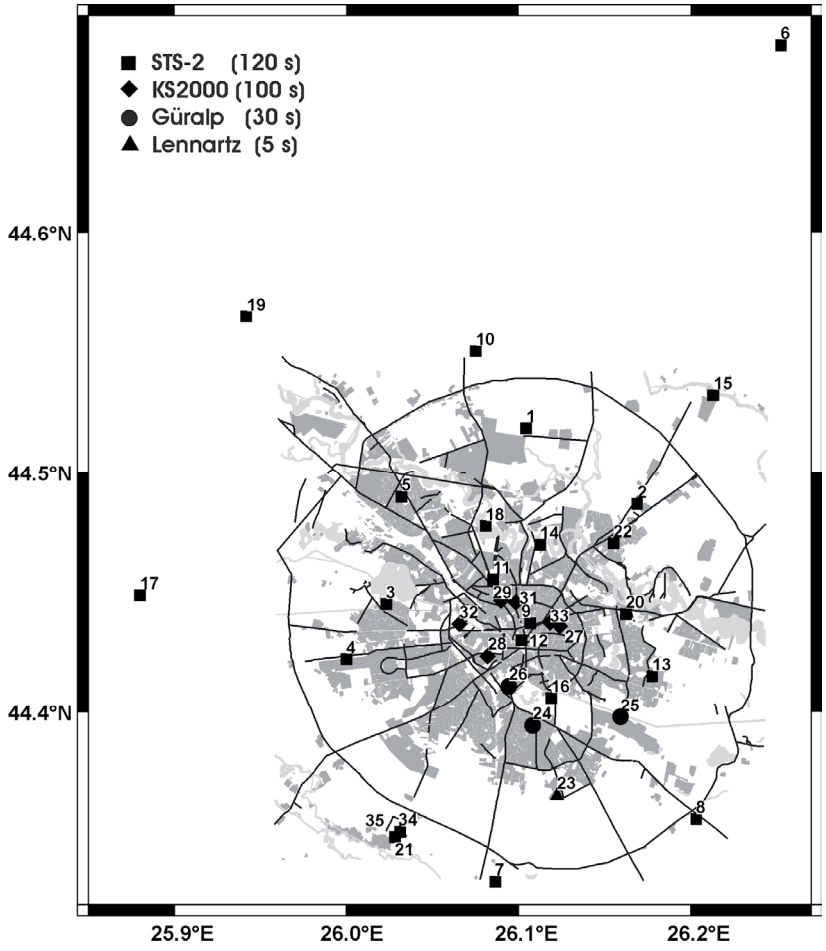


Figure 1: Metropolitan area of Bucharest, Romania, with the station network of the URban Seismology (URS) experiment. Areas with buildings are shaded in dark grey, lakes and rivers are indicated by light grey. The characteristic ring road has a diameter of about 20 km.

About 20 URS stations were deployed directly in the city centre mainly in the cellars of private and public buildings. Three stations in the city centre were installed under free-field conditions in parks. Stations in the suburbs were put into cellars as well as some at free-field sites. For 3 months two instruments (URS34 and URS35) were installed in the 10-story building of the physics department at Bucharest-Măgurele (one in the basement and one in the top floor).

Structural Analyses

The URS dataset is used to further constrain the elastic structure underneath the city. The roughly known crustal structure consists from top to bottom of loose loess-like and recent fluvial sediments (~0-50 m), Quaternary and Tertiary sediments (~600 m in the south and ~2000 m in the north), Mesozoic and Palaeozoic sediments, the crystalline crust (at 6-8 km depth) and the Moho (~38 km depth). The sedimentary and crustal thicknesses increase from south to north, for further details see MÂNDRESCU ET AL. (2004) and MARTIN AND RITTER (2005). Using teleseismic P-wave receiver functions (RF) at periods of 0.5-12 s, we find major interfaces from the converted phases. Synthetic waveform modelling combined with a Monte Carlo approach for the starting models results in the following main shear wave velocity (*vs*) discontinuities in the crust (DIEHL AND RITTER 2008): At ~3 km depth with a *vs* jump from ~1.4 km/s to ~3 km/s (possibly low unconsolidated - consolidated sediment interface), at ~9 km depth *vs* jumps to ~3.9 km/s (sediment-basement) and at 37-40 km depth (Moho) *vs* reaches ~4.5 km/s in the uppermost mantle. The sedimentary layers dip from south to north. These results are confirmed by high-resolution P-wave RF from Vrancea earthquake waveforms at shorter periods of 0.2-2.0 s (Fig. 2). Due to their higher frequency content, the Vrancea RF reveal much more structural elements, e.g. another interface is found that dips from ~0.7 km depth in the south of the URS network to ~1.6 km depth in the north (Neogene-Cretaceous boundary).

SÈBE ET AL. (2007) studied Love waves from eight East European earthquakes. Using a frequency-wavenumber analysis, they find that the Love wave dispersion varies distinctly from high phase velocities in the south to low velocities in the north of the city. They are able to explain the phase velocity dispersion by a simple model with linearly increasing velocity with depth in the upper part and an underlying homogeneous halfspace. Both are separated by a discontinuity, which is believed to be the Neogene-Cretaceous boundary at increasing depth (from ~1000 m in the south to ~1500 m in the north underneath the city).

Hazard-Related Studies

Properties of Vrancea Earthquake Waves in Bucharest

JASKOLLA (2006) studied the wavefields of Vrancea events (Mw 3.1-4.4) in Bucharest. Using array processing methods, it was possible to analyse the wavefield properties at the URS network in the city centre. As main finding she could show that the P-, S- and surface waves do not have a measurable backazimuthal deviation from the theoretical backazimuth when the waves arrive in the city. However, the slowness of the Vrancea body waves is systematically smaller than predicted by the *ak135* earth model. At the same time the vertical incidence angles of the body waves are also much smaller than predicted. These two observations can be explained with the low-velocity sedimentary layers (JASKOLLA AND RITTER 2008). Distinct wavefield perturbations, e.g. due to the Vrancea slab etc., could not be detected. JASKOLLA (2006) also revised the problem about the K-phase, an assumed vigorous seismic phase directly following the first arrival phase. For this analysis waveforms recorded at the URS, CALIXTO99 and K2 strong motion networks were uniformly processed. After restitution to ground displacement no unusual phase following the first arrival could be found between 0.2 and 5 Hz. Therefore, the K-phase needs not to be accounted for hazard-related analysis.

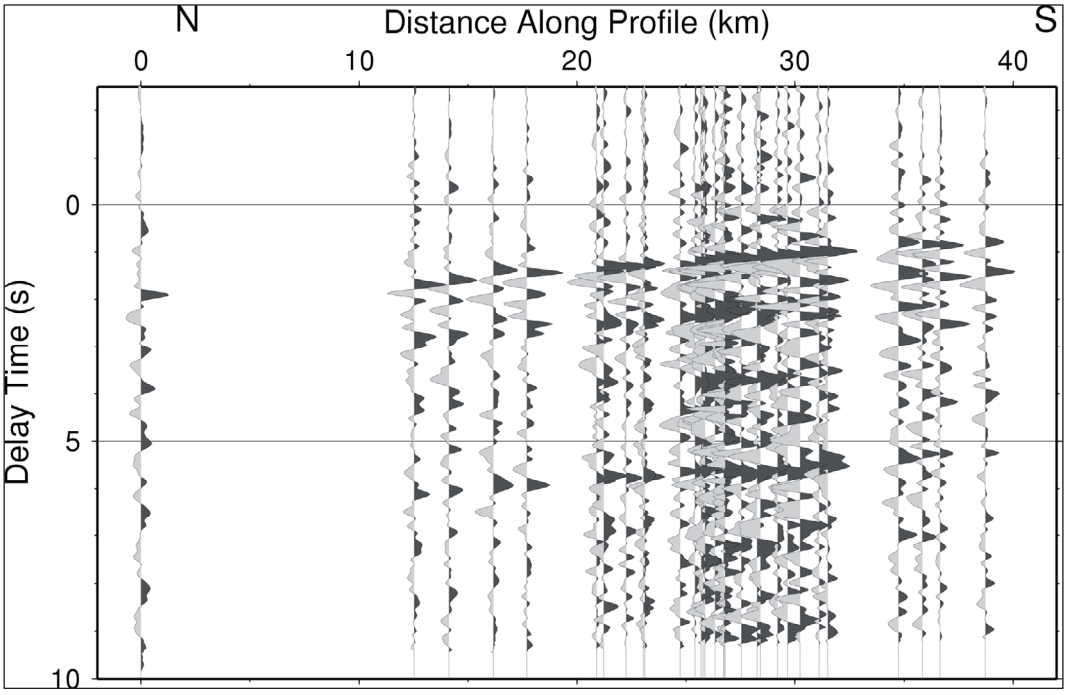


Figure 2: North-south receiver function profile across the URS network. Waveforms from several Vrancea earthquakes are stacked and show well-correlated P-to-S converted phases with increasing delay time towards north (after DIEHL AND RITTER 2008).

Amplitude Amplification

The ratio between signal power of horizontal components and vertical components (H/V ratio) was investigated in the frequency domain for the background signal recorded with the URS network (ZIEHM 2006). The analysis with the program *geopsy* (http://www.geopsy.org, WATHELET ET AL. 2005) revealed two peaks in H/V ratio observed at all stations. One maximum in H/V is observed at approximately 0.7 Hz over the whole URS network and has a more complex shape with two peaks in parts of the data. The other appears between 0.09 Hz and 0.26 Hz (Fig. 3). Its frequency varies with latitude from high frequencies in the south to low frequencies in the north. The frequency of both peaks is very stable over the whole recording period of nine months. Only few time windows could be found where the peaks were obscured by other signals, predominantly caused by strong winds. The H/V ratio at most stations increases strongly with decreasing frequency below 0.2 Hz. In some time windows this obscured the lower frequency peak. The increase of H/V with decreasing frequency can be explained by local tilt presumably induced by passing vehicles or buildings shaking due to wind within the city area (FORBRIGER 2007). The dependency of the lower frequency peak on latitude is attributed to the dipping of the interface between the Neogene and the Cretaceous from 800 m in the south to 2000 m in the north (MANDRESCU ET AL. 2004). Shear wave velocity models obtained by the inversion of Love waves (SEBE ET AL. 2007) predict H/V peaks in the frequency between 0.15 and 0.25 Hz in the city area with a tendency to lower frequencies in the north. The stability of the frequency of the peak at 0.7 Hz over the whole URS network is surprising. The properties of the seismic wavefield at this frequency are mainly controlled by the subsurface structure within the uppermost 100 m.

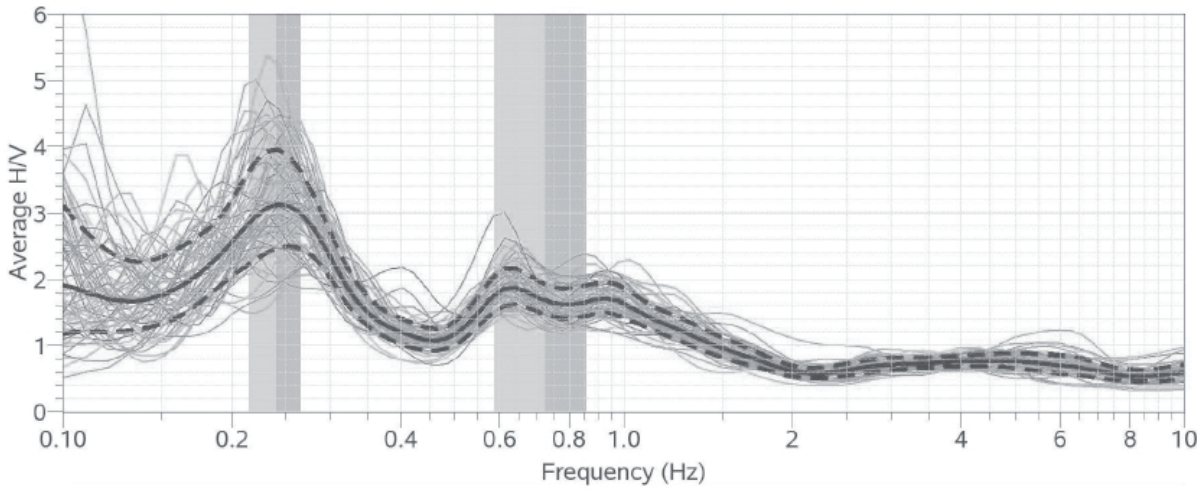


Figure 3: H/V ratios at station URS21 for several measurements during the night. The solid line is the average H/V ratio; the dashed lines delineate the standard deviation. The grey region corresponds to the standard deviation of the frequency of the peaks.

From other studies at boreholes in this area it is well known that the subsurface in this depth range is strongly heterogeneous, vertically as well as laterally. We have no explanation for the stability of the peak at 0.7 Hz so far. The analysis reveals significant variations in H/V amplitude in particular for the lower frequency peak. Similar observations are reported by TANIMOTO ET AL. (2006). Spatial beating due to the interference of Rayleigh wave overtones and artefacts due to inappropriate smoothing of power spectra are currently under discussion as a possible cause.As broadband instruments were used for URS, the amplitude variation of seismic waves could be studied for a wide frequency range. SUDHAUS AND RITTER (2007) measured spectral amplitudes of teleseismic (0.14-0.86 Hz) and Vrancea (1.4-8.8 Hz) earthquakes at the URS stations. For low frequencies (<1 Hz) they find a systematic spatial amplification pattern. This pattern can be explained with resonance effects in the unconsolidated sediments. For high frequencies (>1 Hz) the spatial amplitude variation is small-scale and explained with local site effects. These site effects were specifically studied by BARTLAKOWSKI ET AL. (2006) in subproject B3. Their aim was to find a new approach to determine rapidly a shakemap based on few observations. By introducing previous seismological observations using Fourier amplitude spectra and an interpolation algorithm they could generate detailed shakemaps for Bucharest (Fig. 4). The sites of previous observations are called phantom sites and the URS experiment provides 17 such phantom sites for future applications.

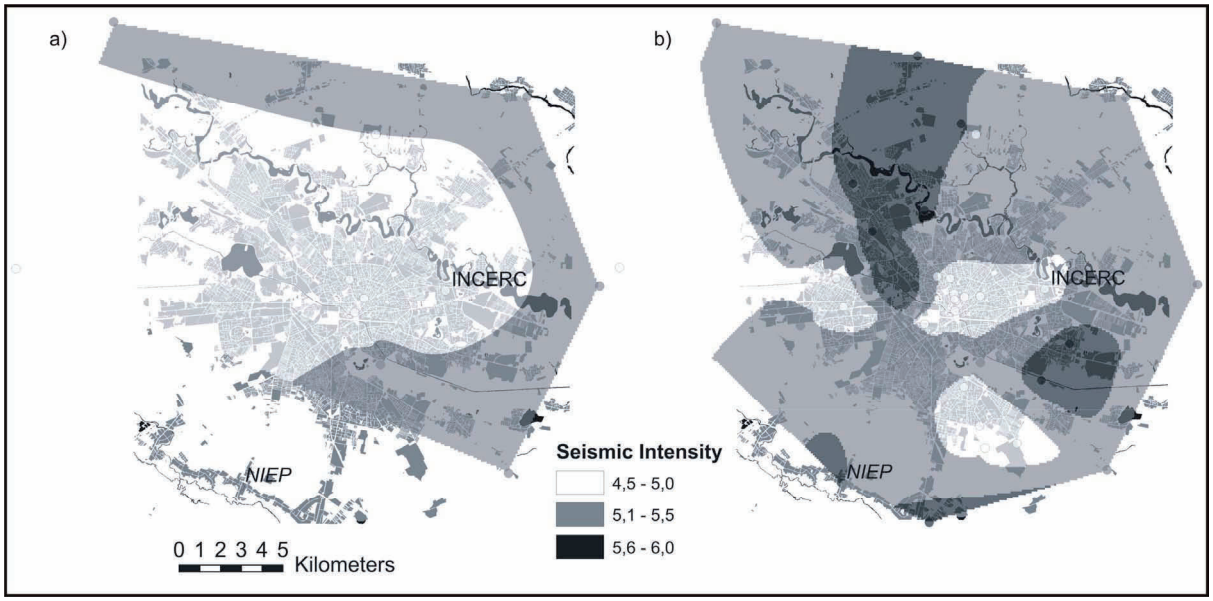


Figure 4: Comparison of shakemaps for Bucharest for the event from 24th Oct. 2004 (Mw=5.8); a) based only on actual measurements of the event, b) interpolation using phantom sites (after Bartlakowski et al. 2006).

Seismic Noise Analysis

GROOS (2007) and GROOS AND RITTER (2007) used the URS dataset to systematically determine the noise properties in a major city. For the characterisation of the noise they chose two approaches: long-term spectrograms and automatic estimation of statistical parameters. The spectrograms of up to four weeks duration reflect the life in the city (Fig. 5). The highest spectral noise amplitudes due to anthropogenic activity are observed during the day. The reduced noise during the night lasts only for a few hours (about 1 am to 5 am) and reduced noise power can be also observed at the weekends relative to working days. The anthropogenic noise is strong at high frequencies (>1 Hz) but is also recorded down to 0.008 Hz. These low-frequency signals are possibly due to ground tilt induced from heavy-load traffic such as trucks and trains. At frequencies between 0.1 Hz and 0.5 Hz the oceanic-generated microseismicity is the dominating signal. Using array techniques specific storm systems could be identified (GROOS 2007).

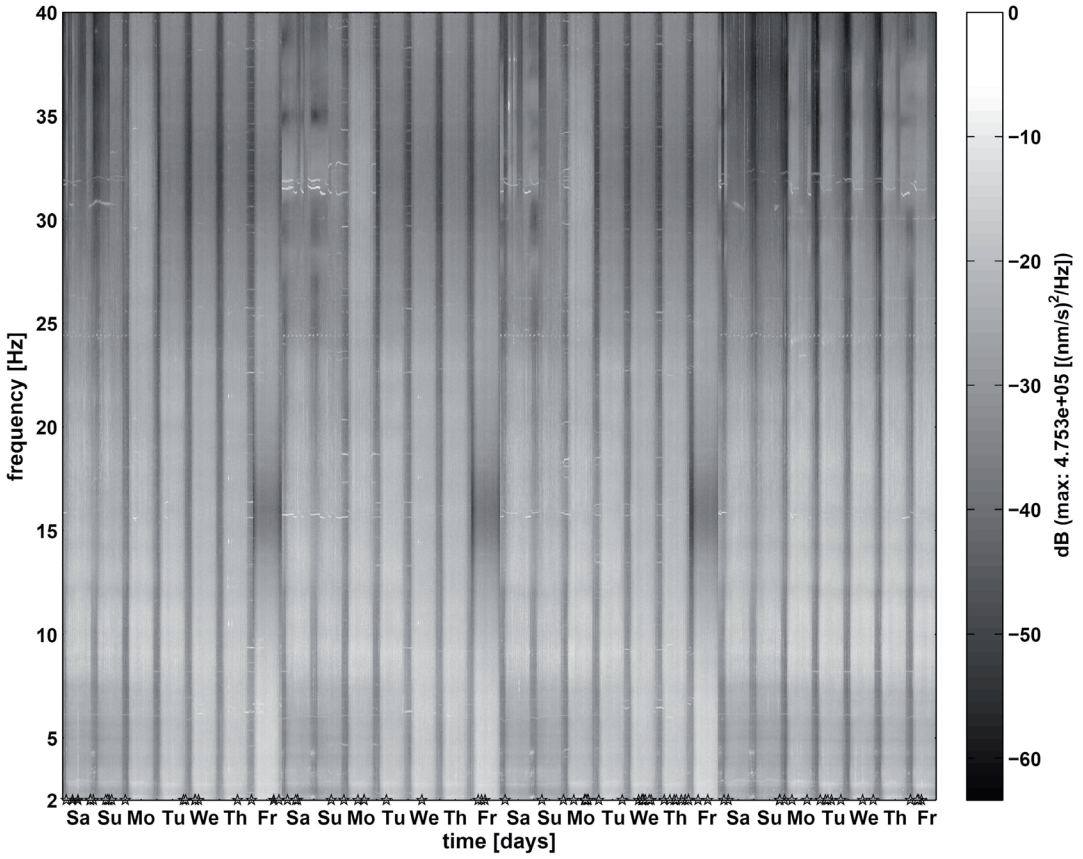


Figure 5: Spectrogram of the seismic noise in Bucharest over a duration of 28 days at a frequency range 2-40 Hz. Stars at the bottom indicate world-wide earthquakes that could be measured in Bucharest. The spectrograms display the frequency-dependent heartbeat of the activity in the city. There is a clear day and night difference in the noise power as well as differences between working days and the weekend. Horizontal events arise from engines with discrete frequencies.

To describe the statistical properties of the noise and its amplitudes across the city a new approach was developed and applied to the URS data. This method allows

describing temporal changes of the noise characteristics and may be used in the future for new monitoring applications.

From May until August 2004 a ten-story tower building at Magurele was equipped with seismometers in the basement and the uppermost story. The deconvolution method proposed by SNIEDER AND SAFAK (2006) was used to extract the response of the building to body waves of Vrancea earthquakes (REHOR AND FORBRIGER 2007). In comparison to amplitude spectra of seismic recordings this method provides pronounced narrow resonance peaks at 1.67 Hz. Acausal components of the response in some datasets might indicate a significant contribution of shaking excited by wind on the surface of the building. The traveltime of impulses through the building was estimated to 0.12 s from the basement to the roof. This corresponds to a frequency of 2.08 Hz in a simple organ pipe model of the building's resonance and is thus at variance with the observed frequency of 1.67 Hz (Fig. 6). The analysis discussed by SNIEDER AND SAFAK (2006) reveals the same discrepancy, but is not discussed there. We have no explanation for the deviation from the organ-pipe model so far. A sensitivity of the resonance frequency to precipitation could not be observed within the available data.

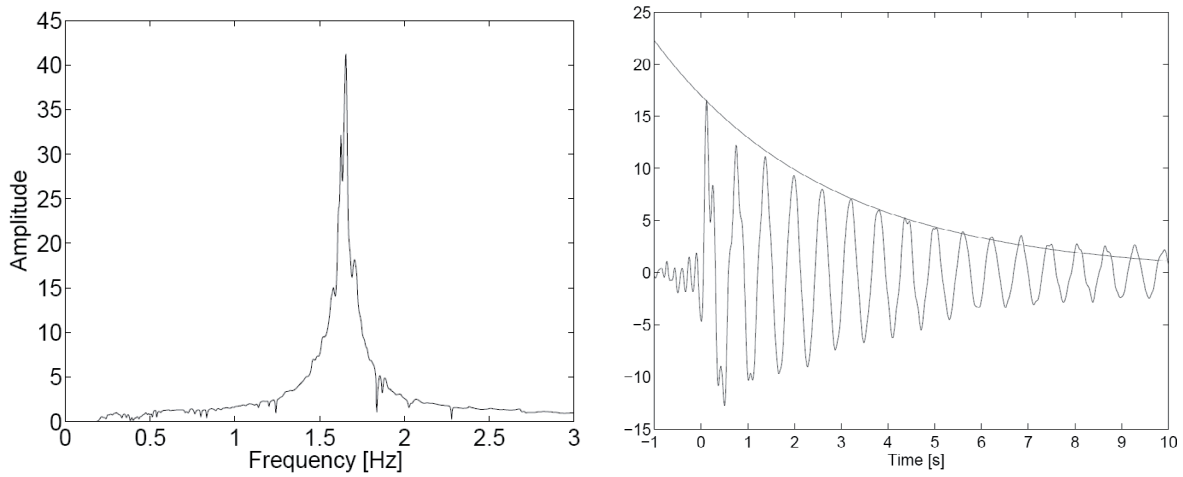


Figure 6: Left: The impulse response of the Physics building at Bucharest-Măgurele shows a clear resonance peak. Right: The decay rate of the swinging building can be used to estimate its damping properties.

Remarks:

1) The studies that had begun in the previous funding periods were continued and their results were published. These studies dealt with the seismic refractions programme done by the CRC 461 (mainly subproject A1), the passive seismology network CALIXTO99 (previous subproject A2 and A1) and geological-tectonic investigations (A1). The Romanian partners were at NIEP (Dr. Bala and Dr. Raileanu) and the University of Bucharest (Prof. Dinu).

2) For comparison with cone penetration tests (CPTs) done in Bucharest by subprojects B4, B6 and B7 (responsible), we conducted shallow seismic refraction measurements in parks (Bazilescu and Tineretului) in Bucharest (von Steht et al., 2007).

3) Within the collaboration between Karlsruhe and Bucharest we acquired a NATO-funded project (Science for Peace Project 981882 – Dr. Bala, Dr. Balan, Dr. Ritter & Dr. Rohn) on site effect studies in the city of Bucharest. NATO finances the drilling and coring of ten 50 m deep boreholes in the city close to URS sites including geotechnical laboratory tests. This project is supported also by CRC 461 subprojects B4, B6 and B7 and demonstrates our interdisciplinary work. Results from SfP 981882 will be published separately.

5.2.1.3 Comparison with research outside the CRC

Urban seismology is mainly done at the west coast of the US in California, especially in the region of the Los Angeles Basin (LARSE experiments) and in Washington, Pudget region (SHIPS experiment). There active-source seismic measurements were done to study the structure of the basins as well as search for unknown faults. Also in Mexico City the subsurface is partly studied as well as wave propagation effects. In Europe noise studies were done in several cities (e.g. Basel, Cologne, Naples, etc.) to map out site effects and shallow structure. For this kind of studies the SESAME consortium did pioneering work. Passive broadband studies for several months, as we conducted the URS experiment in an urban environment, are still rarely done. Our close cooperation with other geosciences is also hardly done within other research projects. The URS dataset was a major reason for funding by NATO of a drilling project in Bucharest (SfP 981882). Within this project we will continue the work on site effects in the next year in close cooperation with the National Institute for Earth Physics.

5.2.1.4 Open questions

Complications: The postdoc position could not be filled as planned, because the originally proposed person decided to take another position in England. After 5 month Dr. Olivier Sebe took this position, but he also left before the end of the project, because he was offered a permanent position in France. Thus we partly used the position to employ geophysicist that had just completed their diploma and that helped to publish their results or assisted the data processing and archiving.

Open questions:

- H/V-analysis: The cause in subsurface structure for the peak at 0.7 Hz is not yet identified,
- Seismic interferometry with data from the tower at Magurele: The apparent discrepancy between traveltime readings and resonance frequency is not yet resolved,
- A unique seismic model for the high-resolution receiver functions based on the Vrancea events is not yet determined,
- The correlation of site effects with the local, small-scale lithology is still under way, however we expect progress through the integration with the NATO SfP 981882 project.

5.2.1.5 Reason for terminating the project

The project A1 ends due to the completion of the CRC 461.

5.2.1.6 Literature

Bartlakowski, J., Wenzel, F., Radulian, M., Ritter J.R.R. and Wirth, W. (2006): Urban shakemap methodology for Bucharest. Geophys. Res. Lett., 33, L14310, doi:10.1029/2006GL026283.

Diehl, T. and Ritter, J.R.R. (2008): High-resolution receiver functions study of the crust below the metropolitan area of Bucharest, Romania. In prep.

Forbriger, T. (2007): Low-frequency limit for H/V studies due to tilt. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany.

Groos, J. (2007): Analyse des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest. Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 102 pp (in German).

Groos, J. and Ritter, J.R.R. (2007): The heartbeat of a city revealed from seismic noise. Submitted.

Jaskolla, B. (2006): Untersuchung der Koda-Phasen in Rumänien. Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 83 pp (in German).

Jaskolla, B. and Ritter, J.R.R. (2008): Wavefield properties of Vrancea earthquakes in Bucharest, Romania. In prep.

Mândrescu, N., Radulian, M., and Marmureanu, G. (2004): Site conditions and predominant period on seismic motion in the Bucharest urban area. Revue Roumaine de Geophysique, Vol. 48: 37–48.

Rehor, L. and Forbriger, T. (2007): Bestimmung einer Gebäudeantwort aus seismischen Breitbandregistrierungen, 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany (in German).

Ritter, J.R.R., Balan, S.F., Bonjer, K.-P., Diehl, T., Forbriger, T., Marmureanu, G., Wenzel, F. and Wirth, W. (2005): Broadband urban seismology in the Bucharest metropolitan area. Seism. Res. Lett., Vol. 76: 573–579.

Sèbe, O., Forbriger, T. and Ritter, J.R.R. (2007): The shear wave velocity underneath Bucharest city, Romania, from the analysis of Love waves. In prep.

Snieder R. and Safak E. (2006): Extracting the building response using seismic interferometry: Theory and application to the Millikan Library in Pasadena, California. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 96: 586–598.

Sudhaus, H. and Ritter, J.R.R. (2007): Broadband frequency-dependent amplification of seismic waves across Bucharest, Romania, J. Seismology. In print.

Tanimoto, T., Ishimaru, S., and Alvizuri, C. (2006): Seasonality in particle motion of microseisms. Geophys. J. Int., Vol. 166: 253–266.

Wathelet, M., Jongmans, D., and M. Ohrnberger (2005): Direct Inversion of Spatial Autocorrelation Curves with the Neighborhood Algorithm. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 95: 1787–1800.

von Steht, M., Jaskolla, B. and Ritter, J.R.R. (2007): Shallow shear wave velocity in a City: A study in Bucharest, Romania, Near Surface Geophys. Revised.

Ziehm, J. (2006): Seismisches Monitoring einer Großstadt, Analyse von H/V-Spektralverhältnissen. Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 89 pp (in German).

5.2.2 List of publications resulting from the project since the last proposal

5.2.2.1 Peer-reviewed publications

a) in scientific journals

Bartlakowski, J., Wenzel, F., Radulian, M., Ritter J.R.R. and Wirth, W. (2006): Urban shakemap methodology for Bucharest. Geophys. Res. Lett., 33, L14310, doi: 10.1029/2006GL026283.

Bocin, A., Stephenson, R., Tryggvason, A., Panea, I., Mocanu, V., Hauser, F. & Matenco, L. (2005): 2.5D seismic velocity modelling in the south-eastern Romanian Carpathians Orogen and its foreland. In: Cloetingh, S. L. Matenco, G. Bada, C. Dinu & V.Mocanu (Eds): The Carpathians-Pannonian Basin System, Natural Laboratory for Coupled Lithospheric-Surface Processes. Tectonophysics, Issues 410, 1–4: 273–292.

Diehl, T., Ritter, J.R.R. and the CALIXTO working group (2005): The crustal structure beneath southeastern Romania from teleseismic receiver functions. Geophys. J. Int., Vol. 163: 238–251, doi:10.1111/j.1365-246X.2005.02715.x.

Fielitz, W. and Seghedi, I. (2005): Late Miocene-Quaternary volcanism, tectonics and drainage system evolution in the East Carpathians, Romania. Tectonophysics, Vol. 410, Issues 1–4: 111–136.

Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Dinu, C., Landes, M., Bala, A. & Prodehl, C. (2007): Seismic crustal structure between the Transsylvanian Basin and the Black Sea, Romania. Tectonophysics, Vol. 430: 1–25.

Martin, M., Ritter, J.R.R. and the CALIXTO working group (2005): 3D Crustal seismic velocity model of SE Romania: Implications for 3D vs. 1D crustal correction strategies for high-resolution teleseismic tomography. Geophys. J. Int., 162, 448–460, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02661.x.

Necea, D., Fielitz, W. and Matenco, L. (2005): Late Pliocene-Quaternary tectonics in the frontal part of the SE Carpathians: Insights from tectonic geomorphology, Tectonophysics, Vol. 410, 1–4: 137–155.

Panea, I., Stephenson, R., Knapp, C., Mocanu, V., Drijkoningen, G., Matenco, V., Knapp, J. & Prodehl, C. (2005): Near-vertical seismic reflection image using a novel acquisition technique across the Vrancea Zone and Foscani Basin, south-eastern Carpathians (Romania). Tectonophysics, Vol. 410, 1–4: 293–310.

Raileanu, V., Bala, A., Hauser, F., Prodehl, C. and Fielitz, W. (2005): Crustal properties from S-wave and gravity data along a seismic refraction profile in Romania. Tectonophysics, Vol. 410, 1–4: 251–272.

Ritter, J.R.R. and Sudhaus, H. (2007): Characterization of small local noise sources with array seismology. Near Surface Geophys., Vol. 5: 253–261.

Ritter, J.R.R., Balan, S.F., Bonjer, K.-P., Diehl, T., Forbriger, T., Marmureanu, G., Wenzel, F. and Wirth, W. (2005): Broadband urban seismology in the Bucharest metropolitan area. Seism. Res. Lett., Vol. 76: 573–579.

Sudhaus, H. and Ritter, J.R.R. (2007): Broadband frequency-dependent amplification of seismic waves across Bucharest, Romania, J. Seismology. In print.

Sudhaus, H. and Ritter, J.R.R. (2005): High-resolution measurement of the seismic attenuation across the Vrancea region, Romania. Geophys. Res. Lett. Vol. 32, L10301, doi:10.1029/2004GL022148.

b) at major scientific conferences

none

c) in monographs

none

5.2.2.2 Non peer-reviewed publications

a) in scientific journals

none

b) at major scientific conferences

Bala, A., Balan, S., Hannich, D., Ritter, J.R.R. and Rohn, J. (2007): Local site effects based on in situ seismic measurements in Bucharest city, Romania. Geophys. Res. Abs., 8, 02551.

Bala, A., Balan, S.F., Ritter, J.R.R., Hannich, D., Huber, G. and Rohn, J. (2007): Seismic site effects based on in situ borehole measurements in Bucharest, Romania. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Proceedings, Matrix Rom, Bucharest, pp. 190–204.

Bala A., Ritter J.R.R., Hannich D., Balan S.F. and Arion C. (2007): Local site effects based on in situ measurements in Bucharest city Romania, in the frame of NATO SfP Project 981882, Proceedings of the international symposium on seismic risk reduction. Ed. Orizonturi Universitare Timisoara, pp. 367–374.

Balan, S.F., Cioflan, C.O., Apostol, B., Tataru, D., Ritter, J.R.R. (2007): Urban seismology research in the metropolitan area of Bucharest. Geophys. Res. Abs., 9, 02272.

Balan, S.F., Bartlakowski, J., Diehl, T., Forbriger, T., Groos, J., Jaskolla, B., Rehor, L., Ritter, J.R.R., Sebe, O., Sudhaus, H., Wenzel F. and Ziehm, J. (2007): Results from the URban Seismology (URS) project in Bucharest, Romania. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Proceedings, Matrix Rom, Bucharest, pp. 277–283.

Balan, S.F., Bala, A., Ritter, J.R.R., Hannich, D., Huber, G. and Rohn, J. (2007): Geotechnical laboratory tests for the microzonation of Bucharest. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Proceedings, Matrix Rom, Bucharest, pp. 244–247.

Grandas, C., Huber, G., Hannich, D., Ehret, D., Hoetzl, H. and Ritter, J.R.R. (2007): Field investigations and site response analysis for Bucharest. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Proceedings, Matrix Rom, Bucharest, pp. 253–258.

Raileanu, V., Ritter, J., Radulian, M., Martin, M., Bala, A., Hauser, F., Popa, M. and Ionescu, C. (2006): Crustal and lithospheric structure within and around the Vrancea seismogenic zone, Romania. Geophys. Res. Abs., 8, 05493.

Ritter, J.R.R., Balan, S.F., Bartlakowski, J., Diehl, T., Jaskolla, B., Sebe, O., Sudhaus, H. and Wenzel, F. (2006): URS – URban Seismology in Bucharest, Romania. Geophys. Res. Abs., 8, 06433.

Ritter J.R.R., Balan, S., Diehl, T., Bonjer, K.-P., Wirth, W. and Wenzel, F. (2005): Urban Seismology in Bucharest, Romania. Geophys. Res. Abs., 7, 10496.

Sèbe, O., Forbriger, T. and Ritter, J.R.R. (2007): The shear wave velocity underneath Bucharest city inferred from Love waves. Geophys. Res. Abs., 9, 08858.

Sèbe, O., Forbriger, T. and Ritter, J.R.R. (2007): The shear wave velocity underneath Bucharest city inferred from Lova waves, International conference on seismic site effects, Ulaanbaator, Mongolia. Accepted.

Sebe, O., Forbriger, T. and Ritter, J.R.R. (2006): The shear wave velocity underneath Bucharest City from surface wave analysis at the URS broadband network. IIIrd International Symposium on "The site effects of surface geology on seismic motion", ESG 2006, Grenoble, 29 August - 01 September, 063.

c) in monographs

Groos, J. (2007): Analyse des seismischen Rauschens im Großraum Bukarest Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 102 pp (in German).

Jaskolla, B. (2006): Untersuchung der Koda-Phasen in Rumänien. Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 83 pp (in German).

Ziehm, J. (2006): Seismisches Monitoring einer Großstadt, Analyse von H/V-Spektralverhältnissen. Diploma Thesis, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 89 pp (in German).

5.2.2.3 Oral Presentations

Diehl, T., Ritter, J.R.R. (2006): Die Scherwellen-Geschwindigkeitsstruktur unter Bukarest aus Receiver Funktion. 66th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 126, Bremen, Germany.

Forbriger, T. (2007): Low-frequency limit for H/V studies due to tilt. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany.

Groos, J. Ritter, J.R.R. (2007): Analyse des seismischen Rausches im Großraum Bukarest. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 367, Aachen, Germany (in German).

Groos, J. Ritter, J.R.R. (2007): Parameterisierung im Zeitbereich des breitbandigen seismischen Rausches im Großraum Bukarest. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 397, Aachen, Germany (in German).

Jaskolla, B., von Steht, M., Ritter, J.R.R. (2006): S-Wellengeschwindigkeit im Stadtgebiet von Bukarest. 66th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 396, Bremen, Germany.

Rehor, L. and Forbriger, T. (2007): Bestimmung einer Gebäudeantwort aus seismischen Breitbandregistrierungen. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany (in German).

Sebe, O., Forbriger, T. and Ritter, J. (2007): The shear wave velocity underneath Bucharest City inferred from Love waves. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany.

Sèbe, O., Forbriger, T., Ritter, J. (2006): The shear waves velocity underneath Bucharest City from surface waves analysis at the URS broad-band network. 66th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 397, Bremen, Germany.

Sudhaus, H., Ritter, J.R.R. (2006): Variationen seismischer Amplituden in Bukarest. 66th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 124, Bremen, Germany.

Sudhaus, H., Ritter, J.R.R. (2005): Bestimmung der seismischen Dämpfung in der Vrancea Region mit multipler Fenstertechnik. 65th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 251, Leoben, Austria.

Wenzel, F., Bartlakowski, J., Radulian, M., Ritter, J., Wirth, W. (2006): Urban Shakemap Methodology for Bucharest. 66th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 127-128, Bremen, Germany

Ziehm, J. and Forbriger, T. (2007): Untersuchung der Stabilität von H/V-Spektralverhältnissen in Bukarest. 67th annual meeting of the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft, abstract volume 403, Aachen, Germany.

5.3 Approval funds for the current funding period

The project was funded in the Collaborative Research Centre from 07/1996 to 12/2007.

Financial year	Funding for staff	Funding for direct costs	Funding for instrumentation	Total
Up to 2004	605.583 €	486.698 €	0	1.092.281 €
2005	76.800 €	5.300 €	0	82.100 €
2006	76.800 €	500 €	0	77.300 €
2007	76.800 €	500 €	0	77.300 €
Total	**835.983 €**	**492.998 €**	**0**	**1.328.981 €**

5.3.1 Staffing of the project

	Name, acad. title,position	Field of research	Department of the university or non-universitary institution	Employed by the SFB from (month/year) until (month/year)	Salary scale
Core support					
Research assistants (invl. student assistants)	Forbriger, Th., Dr. ,Akad. Rat Jaskolla, B., Dipl.-Geophys. Ritter, J., PD Dr., Akad. Rat	Seismology Seismology Seismology	GEOK GEOK GEOK	01/2005–12/2007 07/2007–12/2007 01/2002–12/2007	
Non-scientific assistants	Plokarz, R., Dipl.-Ing. (FH) Scherer, W., Dipl.-Ing. (FH)		GEOK GEOK	07/1996–12/2007 07/1996–12/2007	
Auxiliary support					
Research assistants (invl. student assistants)	Gehrig, M. Groos, J., Dipl.-Geophys. Hippel, A. Jaskolla, B. Mathar, J. Rehor, L. Schlömer, A. Sebe, O., Dr. Sudhaus, H., Dipl.-Geophys. Wagner, M. Wawerzinek, B., Dipl.-Geophys. Ziehm, J., Dipl.-Geophys.	Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology Seismology	GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK	01/2005–06/2005 04/2006–04/2007 05/2007–12/2007 11/2006–12/2006 07/2007–12/2007 08/2005–06/2006 11/2007–12/2007 01/2005–07/2005 09/2006–12/2007 11/2006–12/2007 05/2005–12/2006 08/2004–11/2005 07/2006–12/2007 06/2005–04/2007 05/2007–12/2007 12/2006–12/2007	stud. HK stud. HK 0,5 E13 stud. HK 0,25 E13 stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK 1,0 BAT IIa 0,5 BAT IIa stud. HK stud. HK 0,5 E13 0,5 E13
Non-scientific assistants					

Teilprojekt A6

Rezentes Spannungsfeld und Geodynamik

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 – 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dr. Oliver Heidbach[1]
Dr. Birgit Müller [2]
Dr. Gwendolyn Peters[1]
Daniel Kurfeß [1]
Thies Buchmann[1]
Paola Ledermann[1]

[1] Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
[2] Heidelberger Akademie der Wissenschaften, Heidelberg, Deutschland

5.1 General information about the completed project A6

5.1.1 Title:

Contemporary Tectonic Stress Field and Geodynamics

5.1.2 Research Areas:

4D numerical model of Vrancea subduction zone in the SE-Carpathians, analysis of stress data, river terrace analysis, coupled process studies: surface-crust and crust mantle interaction

5.1.3 Principal investigators:

Dr. Heidbach, Oliver, 20.08.1965
Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe
Telefon: 0721/ 608-4609
Telefax: 0721/ 71173
E-Mail: oliver.heidbach@gpi.uni-karlsruhe.de

Dr. Müller, Birgit, 07.01.1961
Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe
Telefon: 0721/ 608-4621
Telefax: 0721/ 71173
E-Mail: birgit.mueller@gpi.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Staff:

Dr. Gwendolyn Peters
Dipl.-Geol. Thies Buchmann
Dipl.-Geophys. Paola Ledermann
Dipl.-Phys. Daniel Kurfeß

5.1.5 Romanian Partners:

Prof. Corneliu Dinu, University of Bucharest, Bucharest
Dr. Mihaela Negut, PETROM, Bucharest
Dr. Liviu Matenco, Vrije University of Amsterdam, Amsterdam

5.2 Project development report

5.2.1 Report

Abstract

On geological timescales detachment of descending oceanic lithosphere is a short-term process and can be studied only at few localities on Earth. The Vrancea region in the SE-Carpathians is one of these rare places. Here, Miocene subduction of oceanic crust of the Tethian Ocean was accompanied by rollback of the subduction zone and slab steepening in its final phase after continental collision had started in Mid Miocene. Seismic tomography determined that the high-velocity body beneath Vrancea extends today to a depth of at least 350 km with a dip of 90°. Within the NE part of this high-velocity body strong earthquakes occur in a very limited seismogenic volume at intermediate-depth (75–175 km). These events are thought to be triggered by slab pull as indicated by the vertical extension axes from earthquake focal mechanism solutions. The SW part of the high-velocity body is aseismic.

In the final phase of the CRC 461 we employed analysis of new stress data, geomorphological studies, and numerical experiments in order to: (1) Determine and constrain the sources of crustal stress and strain field. (2) Quantify the degree of slab coupling and stress transfer into the crust. (3) Investigate the main cause of stress concentrations in the seismogenic volume and test the hypothesis of stress triggering of the strong earthquakes sequence.

Key results are: (1) In the gathered data sets of geomorphology, GPS and stress no regional pattern is visible as to be expected from either an attached slab or ongoing break-off. This is confirmed in our numerical models that reveal a strong regional trend in the stress and strain field when the slab is attached. Numerical results show that the upper bound of coupling degree is <10%. We also conclude that the slab has passed already the state of break-off. (2) Coupling of mass-redistribution and tectonic processes reveal that this is a feedback process. Locally up to 20% change of sedimentation rate occurs with a coupled model. The code CASQUS combines the commercial finite element software ABAQUS with CASCADE, the surface process code of Jean Braun. It is publicly available and will be further developed in collaboration with the Emmy-Noether research group of Dr. Andrea Hampel, University of Bochum. (3) Static stress transfer can explain the sequence of strong earthquakes. Modelling results favour the location of the next strong event at greater depth. (4) Stress concentrations at seismogenic depth are a consequence of slab section geometry and resulting internal shear stress concentrations. After lateral tear-off, the lower section of the slab (> 200 km depth) rotated counter-clockwise into a striking N-S position. The upper section strikes NE-SW. The earthquakes occur in a hinge that connects these sections. Here, the shear stress reaches maximum values.

5.2.1.1 State of knowledge at the last application

After the third phase of the CRC 461 the Miocene-Pliocene geodynamic evolution had been reconstructed by Sperner ET AL. (2004; 2001; 2002) and MATENCO ET AL. (2007). The Neogene tectonic evolution of the Carpathians is mainly driven by the NE- and later E-ward retreat of a NW-, later W-dipping subduction zone (Fig. 1) (CSONTOS 1995). Subduction retreat pulled them into an oceanic embayment, the last remnant of the Alpine Tethys south of the European continent (STAMPFLI AND BOREL 2002). When the European continent started to enter the subduction zone, the buoyancy forces of the thick continental crust exceeded the slab pull forces and convergence stopped after a short period of continental thrusting. The age of the youngest thrusting in the fold-and-thrust belt of the accretionary wedge is 13 Ma in the northern part and 10 Ma in the south-eastern part (JIRICEK 1979). This indicates that collision first took place in the northern part of the Carpathian arc while subduction was still going on for a short time in the eastern part (Fig. 1).

Today the subducted lithosphere beneath the SE Carpathians, the so-called Vrancea region, is in a sub-vertical position as indicated by the distribution of intermediate-depth earthquakes (Fig. 2) and by the results of seismic tomography (Fig. 3) (MARTIN ET AL. 2006; WENZEL ET AL. 1998; WORTEL AND SPAKMAN 1992; WORTEL AND SPAKMAN 2000).

Fig. 2 presents a WNW-ESE cross section of the geological units and the intermediate depth seismicity with respect to the position of the high-velocity body based on seismic tomography. Taking into account that the Focsani Basin is still subsiding (BERTOTTI ET AL. 2003; MATENCO ET AL. 2007) an attached slab below the basin could be expected.

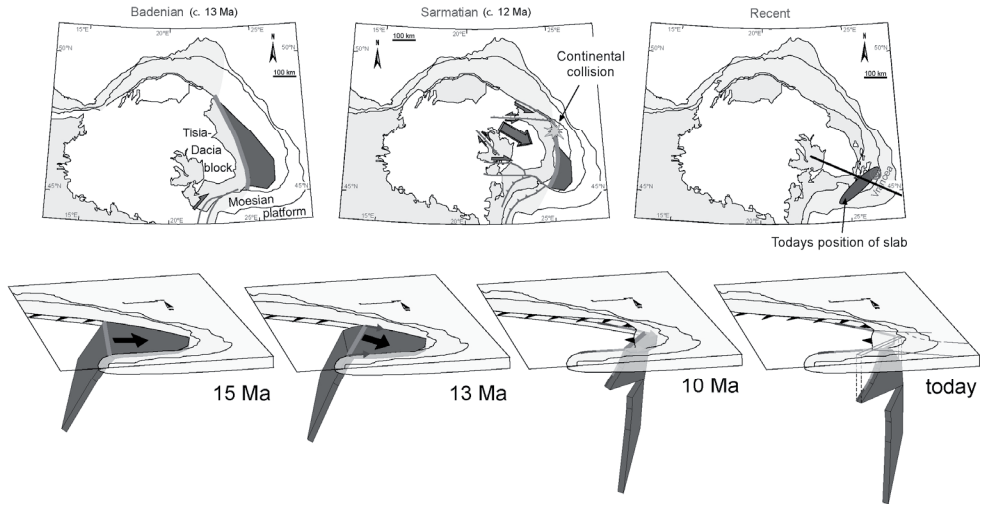


Figure 1: Tectonic evolution of the SE-Carpathians after SPERNER ET AL. (2005). Black line in the present-day map of the tectonic evolution indicates the position of the cross-section of Figure 2. Note that subduction orientation changes at around 12 Ma (Sarmatian) from E-W to NW-SE probably initiating lateral tear-off.

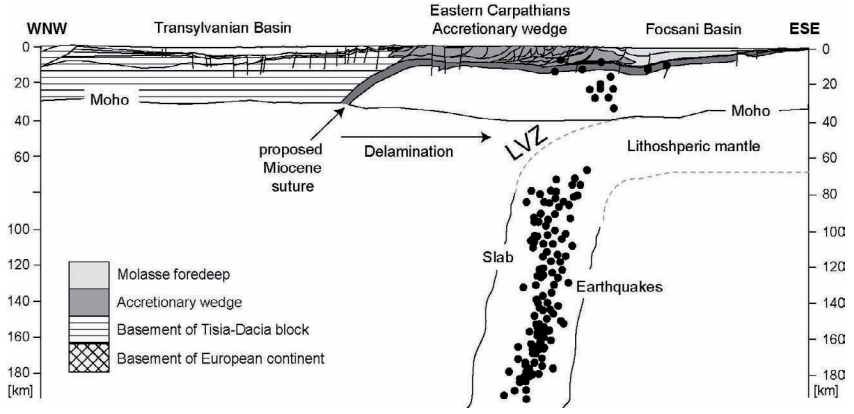


Figure 2: Geological profile through the Vrancea region with proposed delamination of slab. Slab outline comes from seismic tomography of Martin et al. (2006). LVZ= Low velocity zone as indicated by the seismic profile VRANCEA 2001 (Hauser et al. 2007). Note the location of the proposed Miocene suture zone and the present-day location of the high-velocity body (the slab) and the earthquakes within the slab.

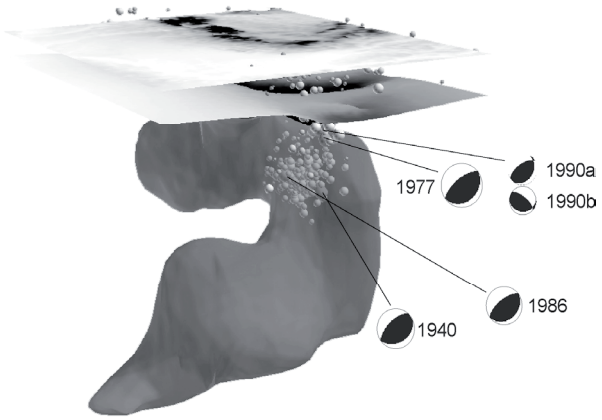


Figure 3: Topography and Moho layer and the isosurface of the 2.2% p-wave velocity anomaly of the Vrancea area from the seismic tomography work by Martin et al. (2006). Spheres within the high-velocity body are the earthquakes. Large spheres mark the location of the strong earthquakes. Beachballs of the focal mechanism solutions are from map view; black indicates the compressional quadrant. Note the alternating depth of the strong earthquakes.

The resulting stress and strain field has been observed in great detail (HEIDBACH ET AL. 2007c; HEIDBACH ET AL. 2007d, VAN DER HOEVEN ET AL. 2005), but its sources are still a matter of debate. BADA ET AL. (1998; 2007), CLOETINGH ET AL. (2004) and MATENCO ET AL. (2007) hypothesize that the Adria push, the slab pull and lithospheric folding are the first-order sources for the stress field. However, these forces would give a large-scale stress and strain pattern, both not seen in the new data compilations. Furthermore, the lateral variability of crustal strength and density contrast need to be taken into account to further develop the concept of tectonic evolution of the Vrancea area (CLOETINGH ET AL. 2004; HEIDBACH ET AL. 2007d; MATENCO ET AL. 2007).

First numerical models show that the shear stress concentrations are probably due to the down-sinking slab that is elongating under its own weight (ISMAIL-ZADEH ET AL. 2005a; 2005b; 1999). However, these models and the geological concept of the evolution act on time scales of several million years and need not be reflected in the contemporary observations of stress and strain.

Thus, key questions of the fourth and final phase for project A6 had been to investigate the sources and processes controlling the contemporary stress and strain field. In particular we addressed the following questions:

- Sources: What is the cause of the crustal stress and strain field?
- Coupling: What is the degree of coupling between slab and crust?
- Transfer: Is stress from the down-sinking slab transferred into the crust?
- Triggering: Is there a causal relationship between the strong earthquakes?
- Concentrations: What are the sources of shear stress concentrations in the very limited seismogenic volume at intermediate depth?

5.2.1.2 Applied methods, results and their importance

In the following sections we present methods and data that were employed in order to address these questions and what the key findings are. As some of the work is still ongoing – two PhD thesis are ongoing and to be finished in mid 2008 – publications on each of these issues are in preparation and will be submitted within the first half of 2008. Results are not presented in the order of the raised questions, but follow a top to bottom and contemporary to past signals manner.

Crustal stress pattern from data analysis

New stress information have been increased by 108 data records (M. Negut and A. Negut, pers. communication). These data are quality ranked according to the and integrated in the World Stress Map database (HEIDBACH ET AL. 2007a; HEIDBACH ET AL. 2007b; REINECKER ET AL. 2005). 98 of the 208 stress data records have A-C quality, i.e. the orientation of maximum horizontal compressional stress (S_H) is accurate to within ±25°. However, in contrast to other continental areas, the stress pattern from this compilation does not show any regional trend (Figs. 4 & 5). This is in contrast to the results presented by BADA ET AL. (1998), which indicate a regional trend of WNW-ESE S_H orientation. There are three possible explanations for this enigma: (1) The stress data set used by BADA ET AL. (1998) probably also included focal mechanism solutions from sub-crustal earthquakes within the subducting slab at 70–130 km (whereas the WSM database only includes data within the upper 40 km of the earth). (2) The smoothing parameter applied by BADA ET AL. (1998) filtered only the first-order pattern on a plate-wide scale. (3) The smaller number of stress data records could not reveal the complicated local stress pattern.

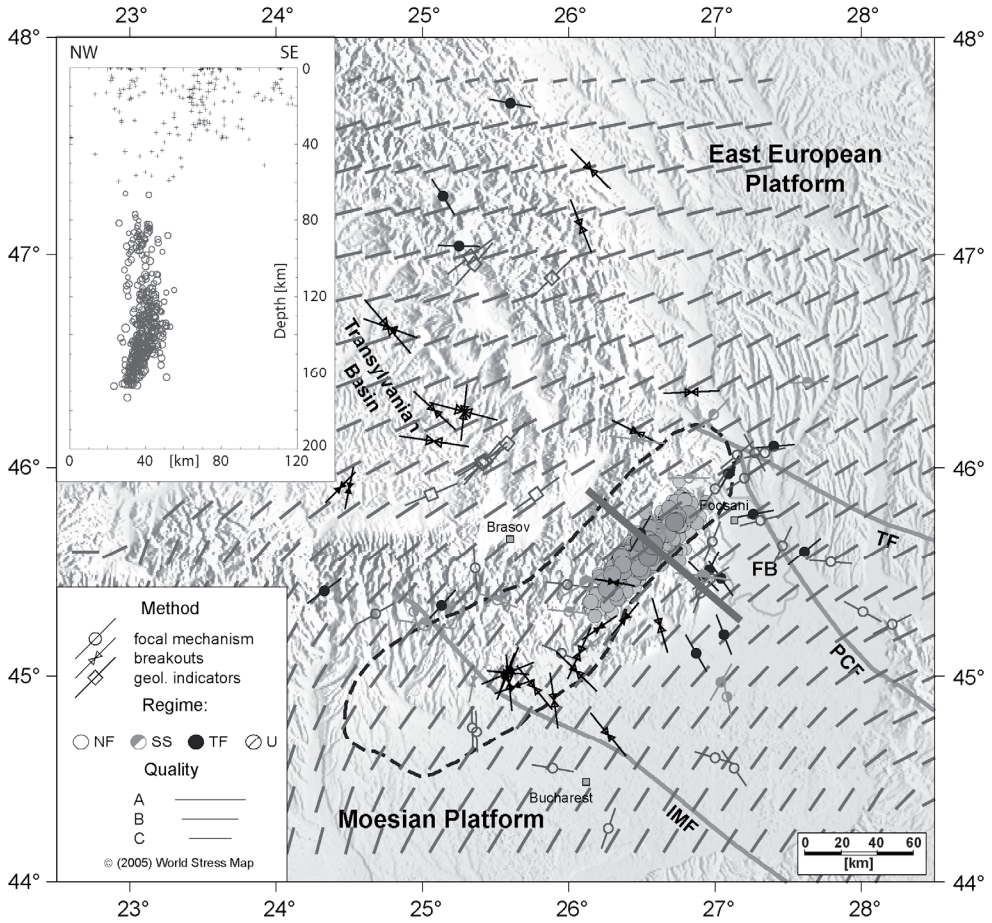


Figure 4: Crustal in situ stresses from the World Stress Map Project (HEIDBACH ET AL. 2007a; REINECKER ET AL. 2005). Lines on the grid represent the smoothed stress map with a search radius of 100 km (quality- and distance-weighted method). Dotted line is the 2.2% isoline of the p-wave velocity anomaly at 110 km depth from seismic tomography (MARTIN ET AL. 2006). TF=Trotus Fault, IMF=Intra-Moesian Fault, PCF=Peceneaga-Carmena Fault. Circles indicate the location of earthquakes >50 km depth. Note the variation in tectonic regime and the high deviations of the observed data with respect to the stress orientations of the smoothed stress field.

The high variability of S_H orientations in our stress map (Fig. 4) is most likely the result of relatively isotropic and thus low deviatoric far-field horizontal stress magnitudes in the SE Carpathians. Such close to isotropic far-field stress magnitudes allow small local stress effects to control the in-situ stress and thus result in a perturbed stress field. According to SONDER (1990), the net stress field is a superposition of local and regional stresses in dependence on the magnitudes of the regional principal stresses, the magnitudes of the local stress component as well as the angular difference of the regional principal stress directions to the stresses caused by the local stress source. Local additional stresses that are not parallel to the regional stresses cause a change of the orientations of the principal stresses and can also change the faulting style. Similar localized stress perturbations, thought to be due to low and/or isotropic horizontal stresses, are observed in the central and northern North Sea and Permian Basin (TINGAY ET AL. 2006).

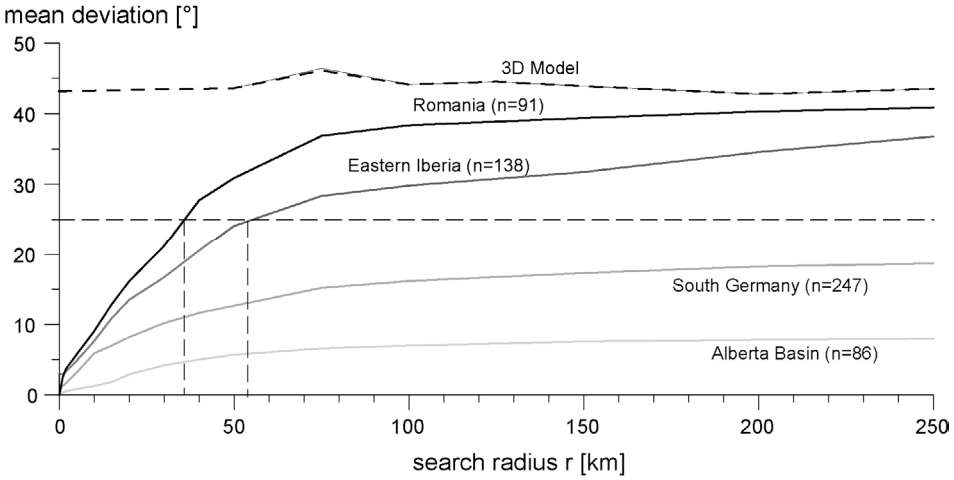


Figure 5: Mean value of the deviation between the orientation of maximum horizontal compressional stress (S_H) of each WSM data record and a smoothed value in dependence of the search radius r of the smoothing algorithm. Numbers in brackets indicate the number of WSM data records in the region. All four regions are approximately of similar dimension. Note the steep increase of mean deviation with increasing search radius in Iberia and Romania where small-scale third-order stress sources are probably dominant and the small increase in South Germany and the Alberta basin where regional to plate-scale first- and second order stress sources control the stress orientations. Dotted line is the deviation between the 3D numerical model and the smoothed WSM data set except at r=0 km search radius where WSM stress data are directly compared with the nearest modelled stress orientation. Note that the model does not account for the short wave-length changes seen in the data.

From the diversity of S_H orientations and the changes in the tectonic regime on short spatial scales in Romania (Fig. 4) we conclude that the contribution from plate boundary forces on the magnitude of tectonic stresses is small and that the stress tensor has similar eigenvalues, i.e. a stress state that is close to isotropic. This implies that second- and third-order sources are in control of both, the S_H orientation and the tectonic regime in the SE Carpathians (HEIDBACH ET AL. 2007d). Possible local stress sources are topography, lateral density and strength contrasts (Focsani Basin with 11 km depth, foreland, Moesian platform), basin subsidence due to slab pull of a former subduction zone, and stress rotations at active fault tips. Superposition of these stress sources leads to a complex stress field with highly variable S_H orientations and short-scale changes of the tectonic regime.

Furthermore, the high variation of the local stress pattern in Romania puts also an upper bounds to potential regional stress sources in the region such as the degree of coupling of the subducting Vrancea slab. From this stress data analysis we hypothesize that the slab beneath the Vrancea does not transfer large amounts of stresses to the crust and that the coupling is weak. A strong coupling would produce a large regional signal in the stress pattern that cannot be identified in the stress observations. This scenario also fits to the findings of GPS observations and the data from Geomorphology that are presented in the next two sections.

Velocity field pattern from GPS observations

Assuming that the slab is either attached to the crust and pulls downward or that it has recently detached, would imprint a strong, spatially coherent signal at least in the vertical component of the GPS observations. However, no clear trend can be detected in the GPS data (Fig. 6). In particular the vertical signal seems not to be related to the slab that is indicated with its isoline of the v_p=2.2% velocity anomaly at 110 km depth. Indeed there is a small region above the slab that shows subsidence and therefore indicating a slab pulling downwards.

The lateral extension of areas with a similar vertical signal is < 80 km, e.g. the subsidence above the center of the slab (Fig. 6). West and north-east of this area an uplift pattern prevails. This high variability of the sign in the vertical signal is also an indicator that no first-order sources such as an attached slab (wide-scale subsidence) or rebound after and during break-off (wide-scale uplift) exist. However, GPS only displays the recent velocity field pattern and its signal can a superposition of a number of processes such as interseismic strain accumulation (FRIEDERICH ET AL. 2003; HEARN 2003; HEIDBACH AND BEN-AVRAHAM 2007), post-seismic relaxation processes (FREED AND LIN 2001; HERGERT AND HEIDBACH 2006), and tectonic response of mass-redistribution due to sedimentation and erosion (KURFEß AND HEIDBACH 2007). In the following section we extend the time-scale backwards in time using the analysis of river terraces in order to learn about the uplift/incision rate on time scales of 10–100 ka. The other two contributions to the GPS sign from surface processes and postseismic relaxation are addressed later in the modelling section.

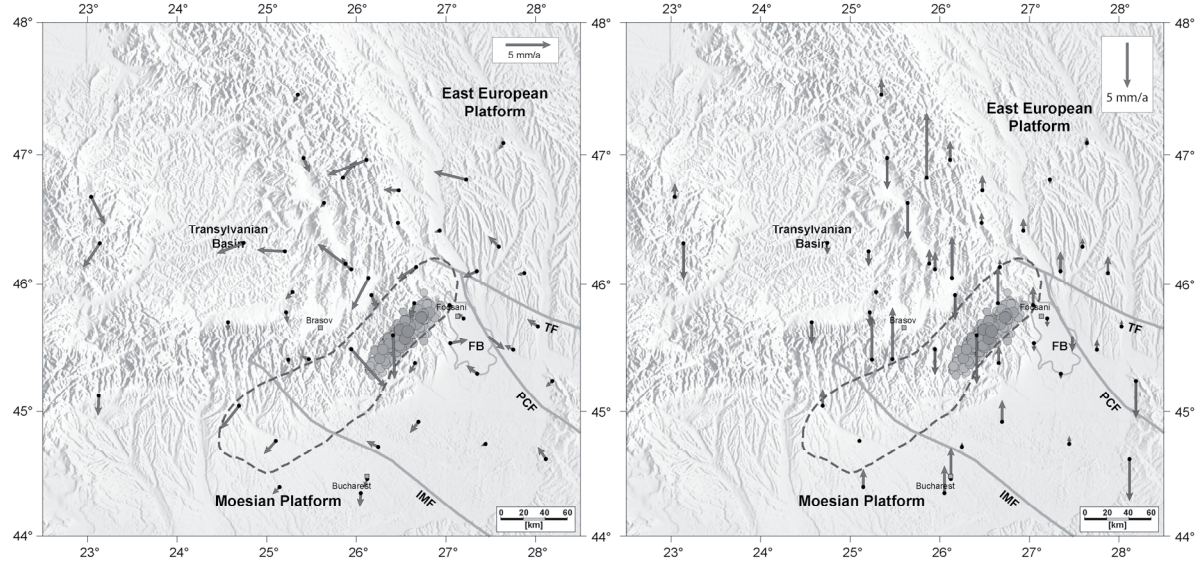


Figure 6: Horizontal (left) and vertical (right) component of GPS observations derived in 1996–2006 (for details please refer to report of Project B1). Velocities are referenced to the East European Platform, that is defined by six permanent international GPS sites referenced in the ITRF 2000. Same legend as in Fig. 4. Circle indicate the location of seismicity at intermediate depth (50–150 km).

Study of river terraces in the SE Carpathians foreland

River terraces have been studied in the area of the SE Carpathians foreland with the aim to search for indications of Quaternary tectonic activity. The study uses the relative position of river terraces to determine uplift rates of the region and incision rates of the rivers incising into the terraces. In the foreland of the SE Carpathians river terraces of Quaternary age are exposed (Fig. 7). These terraces have been mapped by the Structural Geology and Basin Analysis Group of the Department of Geology and Paleontology at the University of Bucharest. Terrace ages are mainly relative and based on height positions of terrace surfaces.

The terrace surfaces are interpreted to document the position of former valley floors. By correlating these surfaces, which belong to the same age, a longitudinal profile of the former valley floor can be reconstructed. Based on this profile the average height positions of the individual terraces can be determined and uplift / incision rates can be evaluated. It should be noted that the used age determination relies solely on the mapping shown in Fig. 7. For future studies, absolute datings should be performed in order to verify the terrace ages and consequently the results of this study.

Along the Putna river, Necea ET AL. (2005) recently mapped terraces and determined their ages based on relative height positions.

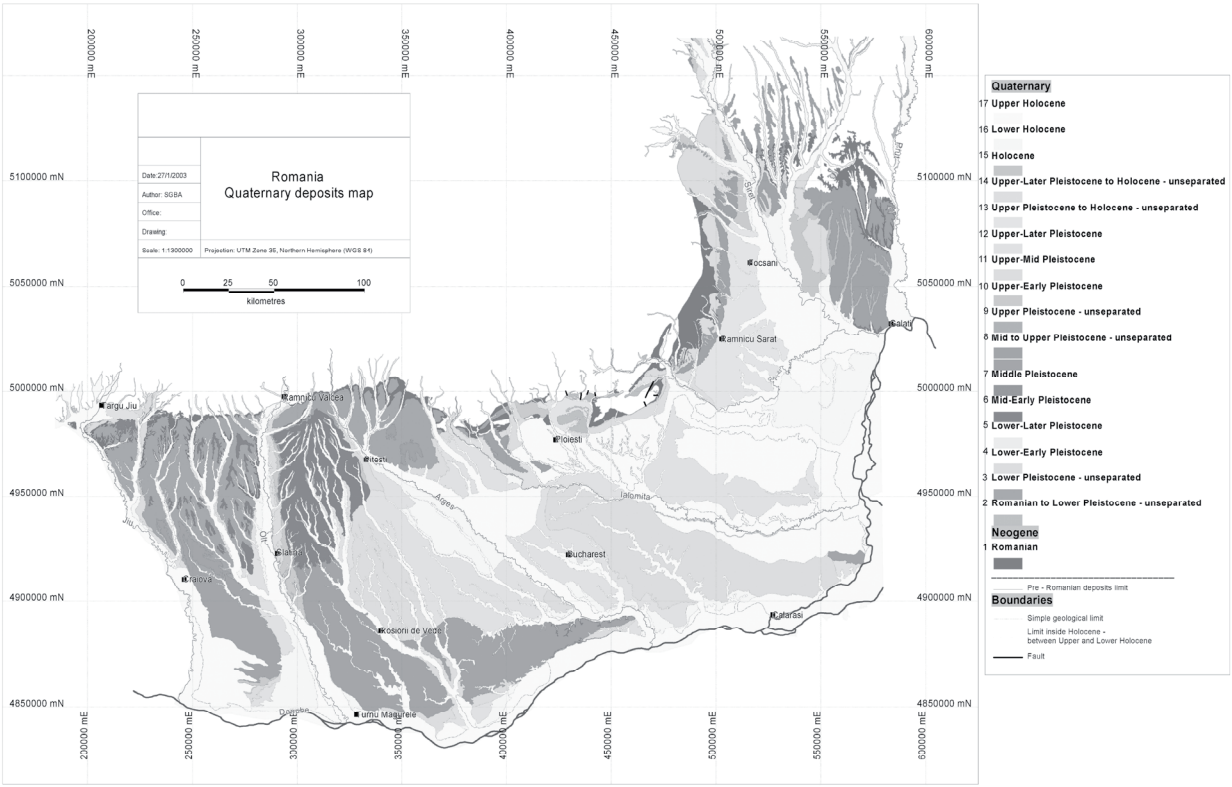


Figure 7: Map of river terraces in the foreland of the SE Carpathians (Source: Quaternary deposits map of Structural Geology and Basin Analysis Group, Dept. of Geology & Paleontology, University of Bucharest). The terraces have been numbered according to their relative ages from 1 (oldest) to 17 (youngest).

Ongoing work focuses on optically stimulated luminescence datings of these terraces. By means of a longitudinal profile along the Putna river, the authors calculated uplift rates of 0.75 mm/yr for the Early Pleistocene on ~1000 ka old terraces. For the Middle Pleistocene (781 – 200 ka) 0.4 mm/yr have been obtained and for the Middle Pleistocene to recent (200 ka – recent) 0.2 mm/yr. For this study terraces have been investigated along four major rivers. Using the terrace mapping from Fig. 7 the elevations of river terraces along the rivers Siret, Trotus, Arges and Olt have been determined (Fig. 8). Table 1 lists the average height of the individual terraces above the present-day riverbed. Ages in absolute numbers have been determined from the classification given in Fig. 7. The mapping of terrace elevations along the rivers north of the Bend Zone (Siret and Trotus) and south of the Bend Zone (Arges and Olt) shows relatively consistent results. For the older terraces with ages of 300 and 100 ka the uplift rates are in the order of 0.5 mm/yr (Table 2). This result is in good agreement with the results of Necea ET AL. (2005), who give a rate of 0.4 mm/yr for this period. For the younger terraces the rates are slightly higher in the northern region than in the southern region. However, the values are still in the same order in magnitude. It is interesting to note that the younger uplift rates are up to one order in magnitude larger than the uplift rates for the older time intervals. Necea ET AL. (2005) document a decrease in uplift rate from the Early Pleistocene to the Late Pleistocene. Geomorphological and geological studies show that the level of tectonic activity is relatively low for the Late Pleistocene and Holocene period (MATENCO ET AL. 2007; NECEA ET AL. 2005). These observations suggest that the increase in uplift/incision rates by one order in magnitude obtained from the elevations of Late Pleistocene terraces of this study cannot result from tectonic processes. It is more likely that the increase is related to climatic processes.

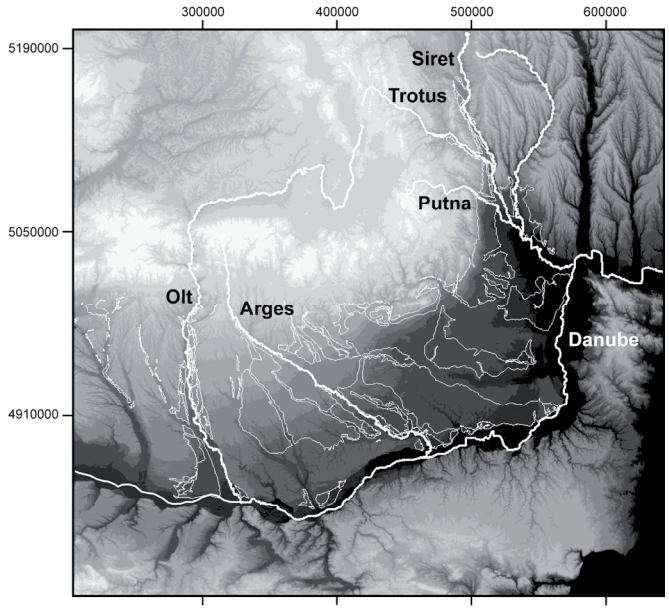


Figure 8: Topographic map of the SE Carpathians and foreland. White lines the extends of individual terrace surfaces after the mapping shown in Fig. 7.

Table 1. Table shows average height position of individual terrace levels with respect to present-day riverbed of rivers Siret, Trotus, Arges and Olt.

Profile along river	Terrace level	Average height above river (m)	Age (ka)
Siret	T8	172	300
	T10	82	100
	T12	45	20
	T13	70	12
	T16	45	10
Trotus	T8	180	300
	T10	83	100
	T16	47	10
Arges	T11	60	100
	T12	35	20
	T16	15	10
Olt	T10	95	300
	T11	82	100
	T12	48	20
	T16	35	10

Table 2. Uplift / incision rates for various time intervals from terrace mapping.

Region	Time interval (ka)	Uplift/incision rate (mm/yr)
Siret - Trotus	300 – 12	0.47
	100 – 10	0.45
Arges - Olt	100 – 10	0.63
	60 – 10	0.77
Siret - Trotus	20 – 10	2.3
Arges - Olt	20 – 10	1.7
Siret - Trotus	10 – 0	5
Arges - Olt	10 – 0	2.5

The relatively high elevations of the Late Pleistocene terraces (20 to 10 ka old) with respect to the present-day riverbed could result from a period of increased incision of the rivers in the SE Carpathians foreland. After the last glacial maximum (LGM, at ~ 20 ka), the climate in Europe gradually changed to a warmer climate. From 18 to 15 ka a significant retreat of the glaciers in the Alps is documented. As a consequence rivers feeding the Black Sea (Dneper in Belarus and Dnister in Ukraine) showed increased incision. It is thus possible that also the Danube river actively incised during this period. As a consequence it is likely that the tributaries of the Danube in the SE Carpathians foreland incised too.

To summarize the terrace study, elevations of Early to Late Pleistocene terraces in the SE Carpathians foreland point to an uplift rate of the region of 0.5 mm/yr for Early to Middle Pleistocene (1000–100 ka). For Late Pleistocene to Holocene it is assumed that the uplift rate was either at the same level or lower. The increase in incision rate is interpreted to result from a climatic event that caused increased river incision in the study area due to the retreat of Alpine glaciers. The distribution of terrace elevations showed also that the terraces in the Carpathians foreland have not been significantly affected by motions of major crustal faults in the area.

Modelling of feedback between surface processes and tectonic response

In particular the vertical signal of GPS measurements might be affected by the tectonic response due to mass-redistribution. So far, existing programs calculate this response with a simple crustal model that does not allow for heterogeneities of rock properties in the subsurface and active faults in terms of reactivation. In order to study this feedback process we developed the numerical tool CASQUS. It includes the surface processes model CASCADE from Jean Braun (Rennes, France) into the Finite Element software package ABAQUS™. The Finite Element method allows for geomechanical simulations of the subsurface with geometrically complex structures in 3D, including heterogeneities and faults. Additionally, in the commercial software ABAQUS™ various types of rheological behaviour are already implemented.

CASCADE simulates erosion and sedimentation as the combination of fluvial transport and hillslope processes. For the integration of CASCADE into ABAQUS™ an Arbitrary Lagrangian-Eulerian modelling technique is used, which makes a fully coupled and automated simulation possible. Two benchmark models presented in Figures 10 &11 demonstrate the functionality of CASQUS, and the numerical results verify its precision (KURFEß AND HEIDBACH 2007).

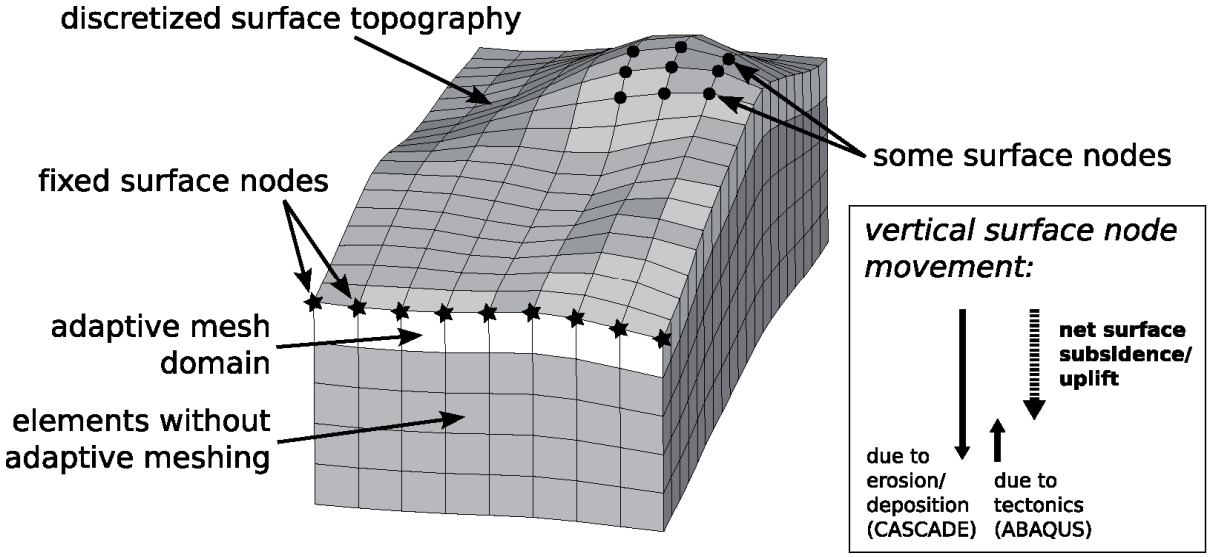


Figure 9: Sketch illustrating the basic layout of a CASQUS FE model. The surface nodes (some are shown as black dots) form the upper face of the uppermost layer of elements that act as an adaptive mesh domain (white). These nodes are defined by the ABAQUS™ input file; they are also used by the CASCADE routines as the discretization of the Earth's surface to calculate vertical changes in topography due to surface processes. Some of the surface nodes need to be defined as 'fixed' (black stars): Their height coordinate is not changed by CASCADE due to erosion or sedimentation. All the sediment load of the simulated rivers that reach these fixed surface nodes is transported out of the model as outflow. Inset: Because in an CASQUS model the geomechanical stress/displacement analysis by ABAQUS™ simulates uplift (or subsidence) of rock and the CASCADE routines mimic exhumation (or burial), the fundamental principle "surface uplift = uplift of rock - exhumation" is directly accounted for.

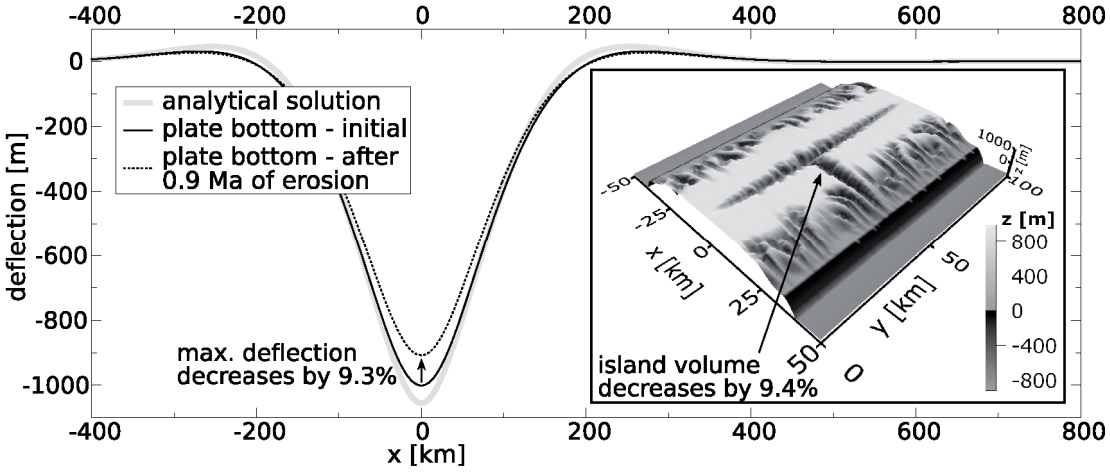


Figure 10: Comparison of analytical and numerical model results. The gray curve shows the deflection resulting from the analytical solution of the flexure equation and the black solid line the result from the numerical model. In the numerical model, during 0.9Ma the island loses 9.4% of its volume due to river erosion (see inset) while the maximum deflection of the lithosphere decreases by 9.3% (dotted line).

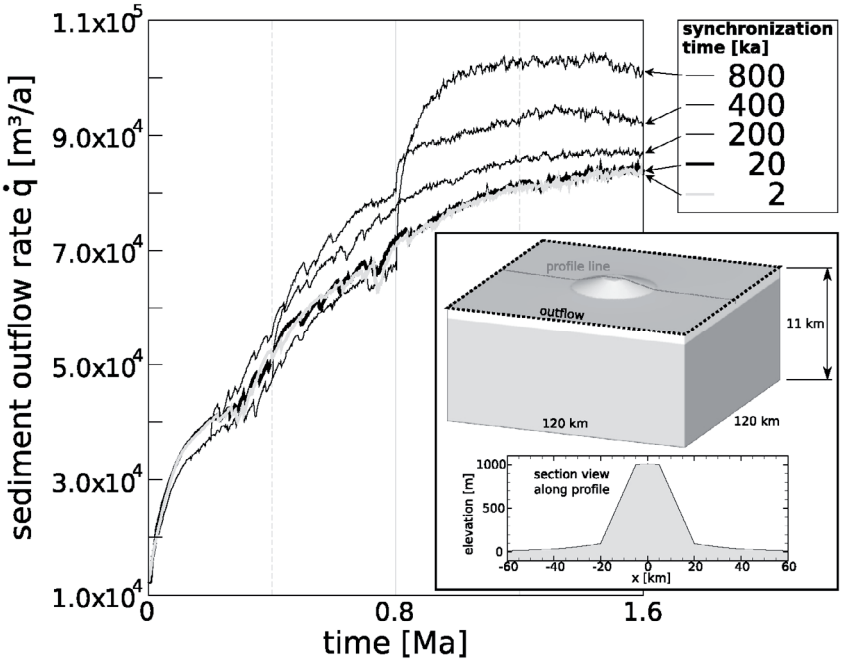


Figure 11: Sediment outflow rate over time for different synchronization times, i.e. the time after which the computation of surface processes and the geomechanical simulation are synchronized. Topography is steepened while the plate elastically responds to decreased loading. After synchronization, surface processes react to increased mean slope. Inset: Setup of model B, vertically exaggerated. Boundary conditions are the same as in model A (Fig. 11). Rheological parameters are: E=20 GPa and ρ=2800 kg/m^3 for the adaptive mesh domain (white), E=70 GPa and ρ=3300 kg/m^3 for the rest of the plate (grey). ν=0.25 throughout the model. The initial shape of the circular symmetric mountain topography is shown at the bottom.

After these successful studies we applied the tool on the SE Carpathians area (see next section for details on the 3D model). First, but preliminary results of this ongoing research shows that the uplift and subsidence rates determined are one order below the ones observed by the analysis of river terraces (Fig. 12).

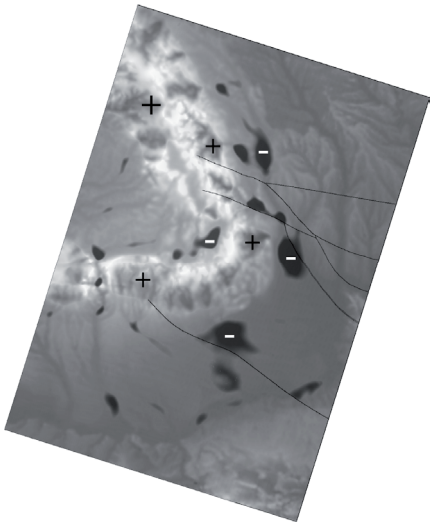


Figure 12: Map view at 3 km depth showing uplift and subsidence due to mass redistribution and its tectonic response in the SE Carpathians, simulated for 60 ka.

3D numerical modelling of the stress pattern including slab pull forces

From the analysis of the stress and kinematic data we hypothesized that the slab is neither attached to the crust nor in the state of break-off. This implies that the slab has already took a leave from the crust earlier, but no imprints are left in the contemporary uplift and the stress field pattern. This is supported by the decreasing uplift rates from 0.75 mm/yr for the Early Pleistocene on (~1000 ka) to 0.4 mm/yr in Middle Pleistocene to 0.2 mm/yr for Late Pleistocene.

The following three numerical experiments clearly show that neither the Adria push nor any slab pull can produce the observed crustal stress pattern. The stress magnitudes of the three principal stresses are probably close to isotropic and third-order effects from small local density contrast control the stress orientations and the tectonic regime (HEIDBACH ET AL. 2007c; HEIDBACH ET AL. 2007d).

Model A: Homogeneous density, no slab, push from Adria of ~20 MPa, boundary geometry and boundary conditions in terms of kinematics are chosen in that way that they fit the smoothed stress field, rollers at the bottom.

Model B: Density variations, topography, gravity, slab pull of 50 MPa vertically down, boundaries are extended at the sides, bottom has reaction forces and foundations, rollers at the sides of the model.

Model C: Only density variations, topography, gravity, no slab pull, no Adria push, rollers at the sides and at the bottom of the model.

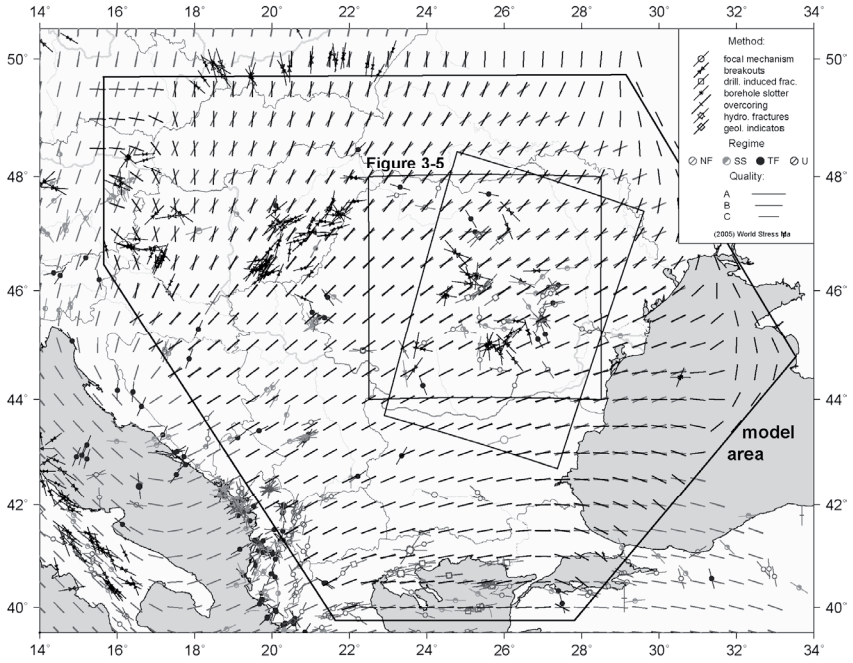


Figure 13: WSM data points in comparison with model results (black grid) and a smoothed stress field (grid). Boxes mark the position of the model where results are interpreted and the area displayed in figure.

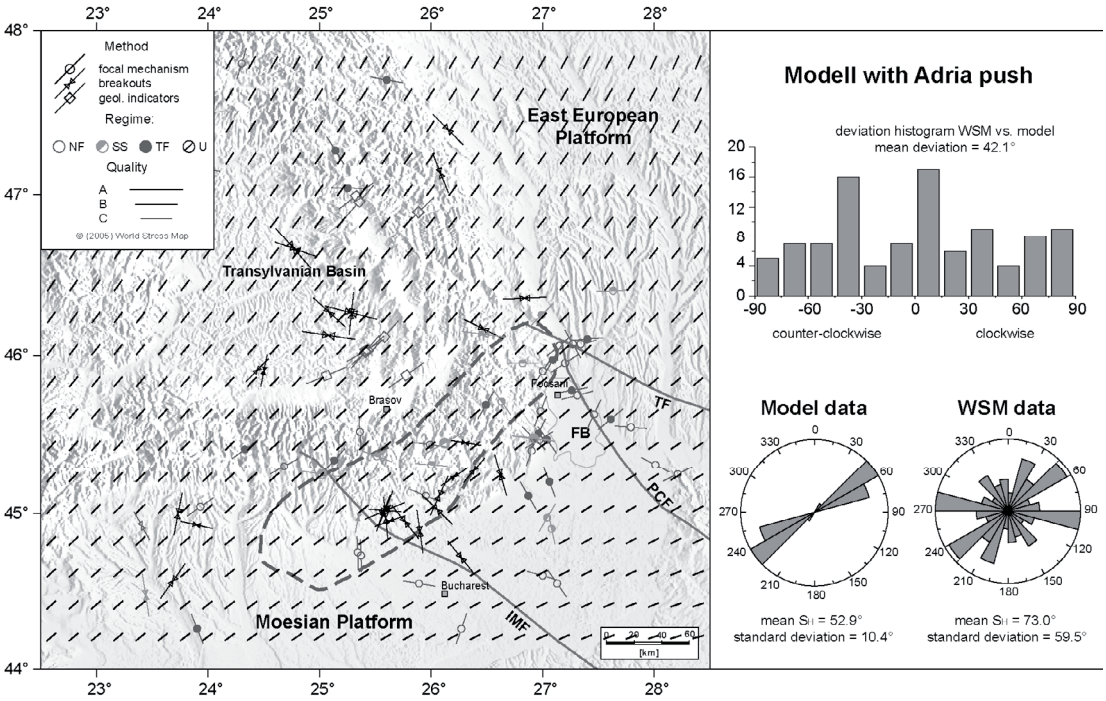


Figure 14: Stress Map or Romania in comparison with the results of the model A displayed on a 0.2° grid. Histogram shows the deviation between each WSM data record and the nearest modelled data point. The model rose diagram is given only for the data points used in the histogram. Note that the high standard deviation between the modelled and the observed stress orientation indicates that the Adria push can not explain the stress pattern.

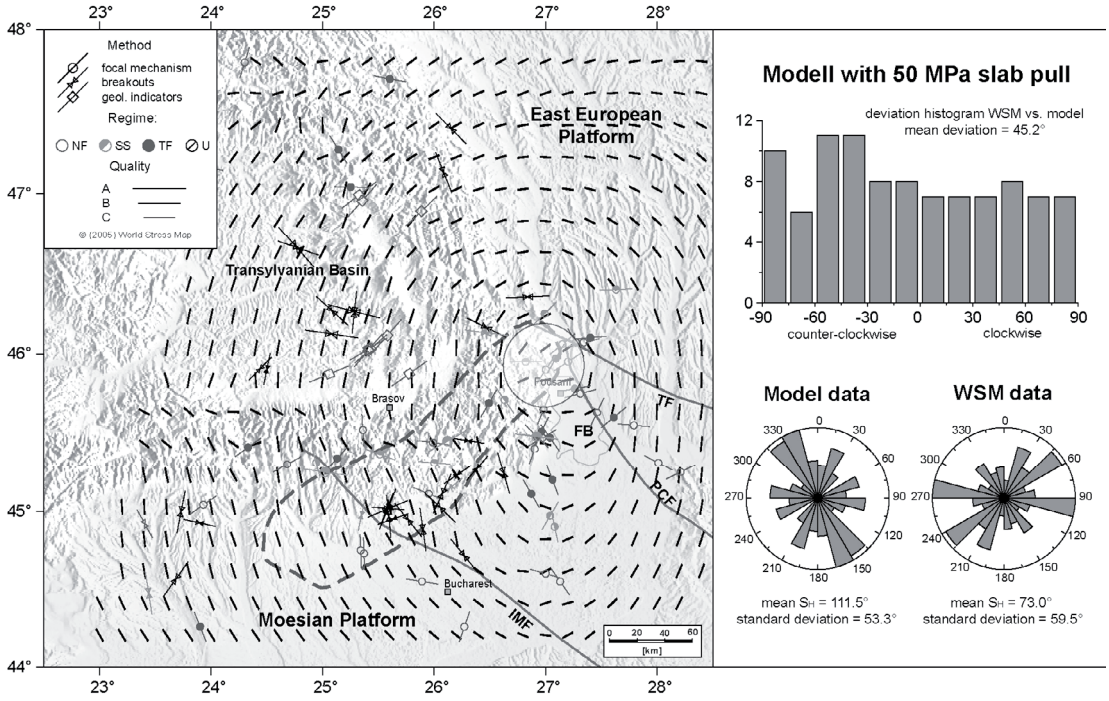


Figure 15: Same legend as in Fig. 14. Circle with 50 km diameter indicates the location where the slab pull of 50 MPa is applied. High standard deviation between modelled and observed stress orientation reveals that slab pull cannot explain the stress pattern.

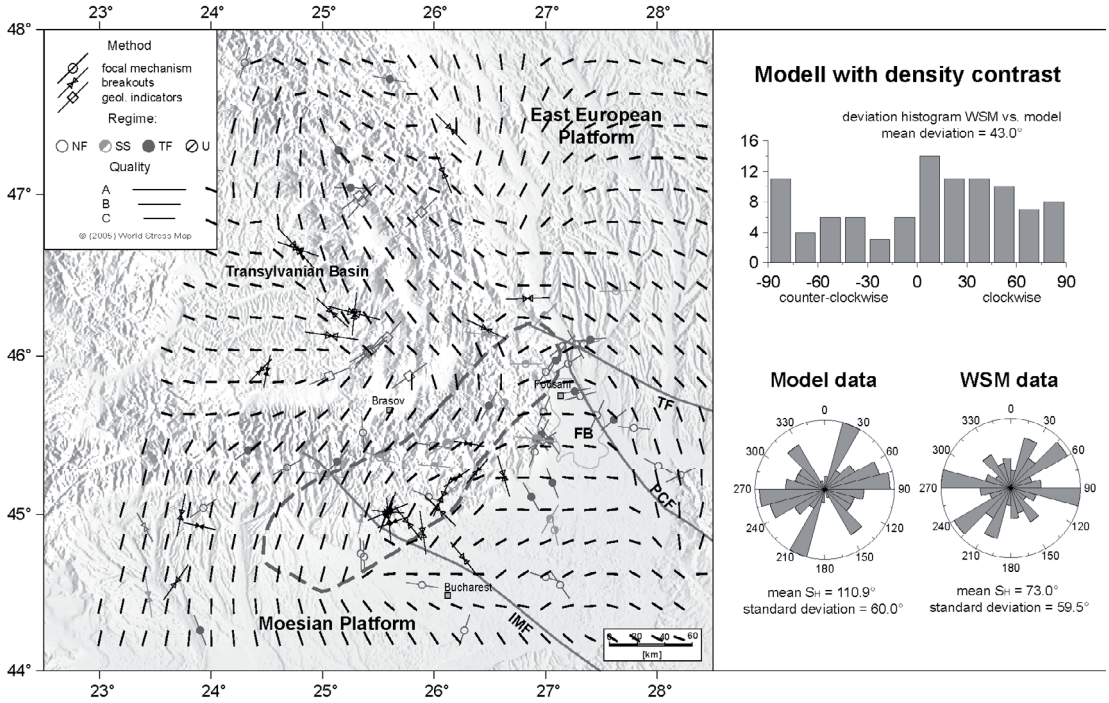


Figure 16: Same legend as in Fig. 14. High standard deviation between the modelled and the observed stress orientation indicates that the model resolution (density variations) is oversimplified and can not simulate the stress pattern.

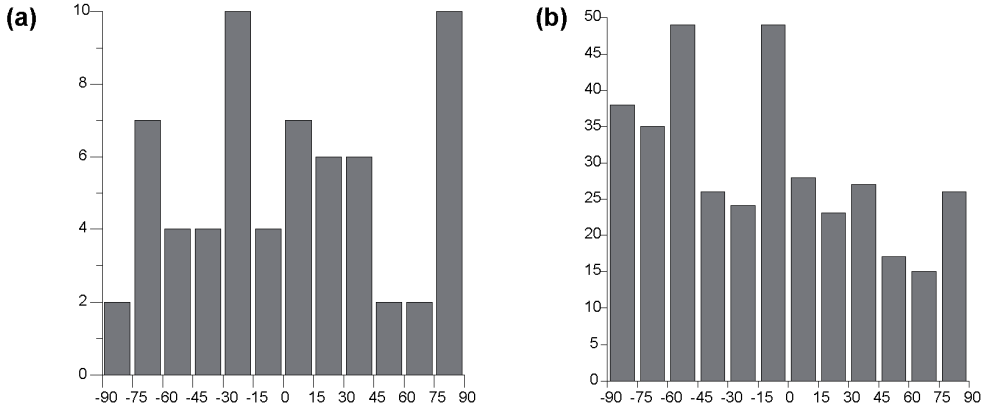


Figure 17: Distribution of the deviation in Romania: (a) Between the WSM data points and the nearest point in the 3D crustal model C (density contrast only, Fig. 16). (b) Between a smoothed stress field (r=100 km, n=1, l=12) of the WSM data set on a 0.2° grid and the results of the 3D crustal model. Note that there is no significant difference in clock-wise (negative values) and anti-clockwise (positive values) deviation distribution indicating that there is no systematic error.

Modelling of stress triggering of intermediate depth strong earthquakes

It is well established that stress changes induced by an earthquake in the Earth's crust can trigger subsequent events (e.g. STEIN ET AL. 1997). In the Vrancea region the five strong earthquakes with $M_w > 6.0$ that occurred between 1940 and 1990 are all located at intermediate depth in a small seismogenic volume. This volume is embedded in the high-velocity (Fig. 18a). This intermediate-depth seismicity is concentrated in the north-eastern upper part of the slab (see also Fig. 6) . The focal mechanism solutions of the individual events reveal that the tectonic regime is thrust faulting (Fig. 18a) indicating that the orientation of the principal extensional strain axes is oriented vertically.

The analysis of seismic energy release from 1977–2006 calculated from the Romanian earthquake catalogue from RomPlus identifies two depth sections where the seismic energy release is two orders of magnitude larger compared to the adjacent sections (Fig. 18b). Interestingly, the hypocentral depth of the strong earthquakes is alternating in time and space starting with the 1940 event in the lower section (Fig. 18b). The alternating hypocentral depth between a lower (120–150 km) and an upper (75–100 km) subvolume indicates that stress transfer might be a control of this earthquake sequence (Fig. 18b). In this work we test this hypothesis by means of the change in Coulomb Failure Stress ΔCFS.

We tested the aforementioned hypothesis by means of a 3D numerical model. From the model results we calculate the change in Coulomb Failure Stress ΔCFS (KING ET AL. 1994). In detail, we investigate whether a single event has caused enough ΔCFS on the rupture plane of its successor or if the accumulated ΔCFS of all previous events is needed. In contrast to previous ΔCFS studies for other regions we do not analyze the trigger potential on a map view, but resolve the ΔCFS on the rupture

planes of the subsequent earthquake. As our model results indicate that the triggering due to stress transfer could have happened, we also investigate whether the future strong event is more likely at greater depth as expected from the hypothesis of alternating hypocentral depth.

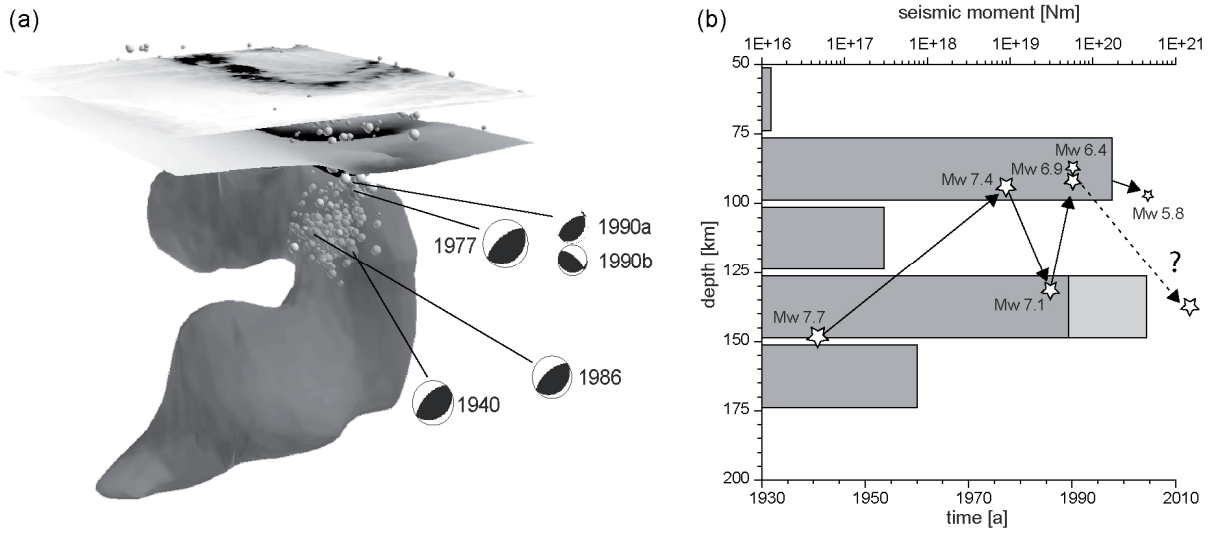


Figure 18: a) Same legend as in Fig. 3. b) Accumulation of seismic energy release from 1977–2006 (dark grey) and the 1940 event (light grey), Stars mark the location in depth and time of the five strong events.

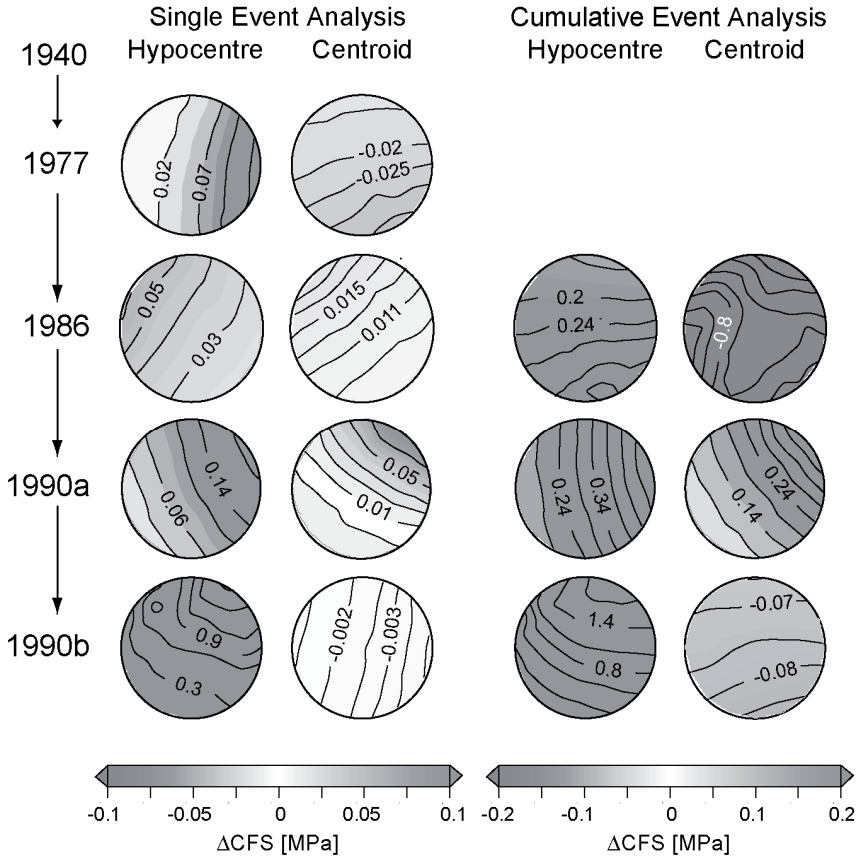


Figure 19.**:** Single analysis: ΔCFS is calculated for rupture plane of the subsequent event. Cumulative analysis: ΔCFS is calculated from all preceding events.

Our results displayed in Fig. 19 reveal that co-seismically induced ΔCFS from the sum of previous events is sufficient to trigger the succeeding event. When the sum of all co-seismically induced changes is calculated (cumulative event analysis) for the event of interest all events could have been triggered. For the single event analysis the mean stress increase on the succeeding rupture plane is between 0.037 and 0.6 MPa. The cumulative analysis reveals that the mean stress increase on the succeeding rupture plane is between 0.06 and 0.98 MPa. We conclude from our numerical experiment that the succession may be controlled by the co-seismically induced stress changes. Taking into account that the earthquake sequence shows an alternation of depth, the next strong event might occur at greater depth.

Postseismic relaxation processes from semi-analytical modelling

The cumulative contribution of postseismic deformation is qualitatively investigated and evaluated as a likely mechanism for the observed surface deformation pattern. The postseismic deformation response for prescribed earthquake sources is determined in a spherical earth geometry using the semi-analytical discretization method described by POLLITZ ET AL. (2003). The modelled volume, representing the present day lithospheric structure of Vrancea, is based on geometries derived from seismic tomography data (MARTIN ET AL. 2006), seismic refraction data (HAUSER ET AL. 2007), and petrological studies of mantle xenoliths.

In order test several modelling scenarios, in attached models the 3D perturbation is assumed to range in depth from 30 to 160 km, whilst in detached models it ranges from 70 to 160 km depth. These two models have been carried out to test the validity of the hypothesis that Vrancea is in a final stage of subducted lithosphere detachment due to thinning under influence of its own weight. In a concurrent set of models the 3D temperature structure up to 180 km depth taken from the seismic tomography is converted to viscosity using the wet olivine flow-law rheology. This set of temperature models was carried out to test the validity of the assumption that the area was formerly involved in active (oceanic) subduction. Prescribed earthquake parameters are generally based on ONCESCU AND BONJER (1997).

The modelling results indicate a long-wavelength pattern in uplift, oriented away from each rupture event. The calculated magnitudes of postseismic deformation to the GPS velocity field is less than 1 mm/a per event for most sites The maximum in postseismic deformation for the models occurs within 20 yrs after the event. Subsequently, postseismic deformation decreases one order of magnitude in the following years, resulting in approximately a 10^{th} percentile of the previous maxima. Both, the relatively low magnitude of the post-seismic deformation as well as the long-term pattern are not seen in the GPS data indicating that the observed spatially confined uplift and subsidence ratios contribute, but cannot be explained by visco-elastic relaxation of the lower crust and mantle.

5.2.1.3 Comparison with research outside the CRC

1.) There are two other regions where a limited seismogenic volumes at intermediate depth within a subduction zone occur: Bucaramanga, Colombia and Hindu Kush, Afghanistan. For both regions the knowledge of the cause for the stress concentrations is rather limited. The Bucaramanga nest is different from its tectonic setting as seismicity is probably due to the collision of two different subduction zones at intermediate depth. The Hindu Kush nest however is similar to the Vrancea region. The subducting slab is vertical and also shows at shallower depth aseismic gaps.

2.) The stress data compiled for Romania is unique as it shows that there are intra-plate areas where in-situ stresses are close to isotropic and that first- and second order sources from plate boundaries and topography are not the key control. These findings raise the question if there are other intra-plate continental regions. The WSM project will focus in future on third-order effects to be detected in other regions.

3.) Within the Emmy-Noether Research Group of Dr. Andrea Hampel in Bochum a very similar tool was anticipated in order to investigate the reactivation potential of formally largely buried faults, when erosion and sedimentation changes the sub-surface stress. To address this questions we collaborate on the further development of our tool CASQUS.

5.2.1.4 Open questions

1.) The CASQUS tool is unique, but its application for large areas is still a major challenge in terms of computing power.

2.) We could get an indication for the depth level of the next strong earthquake, but neither the time nor the magnitude of the next earthquake could be determined.

3.) On large time-scales the coupling of mantle processes with the 3D crust gave some unphysical results using ABAQUS in the model domain.

5.2.1.5 Reason for terminating the project

The project A6 ends due to the completion of the CRC 461.

5.2.1.6 Literature

Bada, G., S. Cloetingh, P. Gerner, and F. Horváth (1998): Sources of recent tectonic stress in the Pannonian region: inferences from finite element modelling. Geophys. J. Int., Vol. 134: 87 – 101.

Bertotti, G., L.C. Matenco, and S. Cloetingh (2003): Vertical movements in and around the south-east Carpathian foredeep: lithospheric memory and stress field control. Terra Nova, Vol. 15: 299 – 305.

Buiter, S.J.H., R. Govers, and M.J.R. Wortel (2002): Two-dimensional simulations of surface deformation caused by detached slabs. Tectonophysics, Vol. 354: 195 – 210.

Cloetingh, S., E. Burov, and A. Poliakov (1999): Lithoshperic folding: Primary response to compression? (from central Asia to Paris basin). Tectonics, Vol. 18: 1064 – 1083.

Cloetingh, S.A.P.L., E. Burov, L. Matenco, G. Toussaint, G. Bertotti, P.A.M. Andriessen, M.J.R. Wortel, and W. Spakman (2004): Thermo-mechanical controls on the mode of continental collision in the SE Carpathians (Romania): Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 218: 57 – 78.

Csontos, L. (1995): Tertiary tectonic evolution of the Intra-Carpathian area: a review. Acta Vulcanologica, Vol. 7: 1 – 13.

Freed, A.M., and J. Lin (2001): Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by viscoelastic stress transfer. Nature, Vol. 411: 180 – 183.

Friederich, A.M., B. Wernicke, N.A. Niemi, R.A. Bennett, and J.L. Davis (2003): Comparison of geodetic and geologic data from the Wasatch region, Utha, and implications for the spectral character of Earth deformation at periods of 10 to 10 million years. J. Geophys. Res., 108, 2199, doi.10.1029/2001JB000682.

Hauser, F., V. Raileanu, W. Fielitz, C. Dinu, M. Landes, A. Bala, and C. Prodehl (2007): Seismic crustal structure between the Transylvanian Basin and the Black Sea, Romaina. Tectonophysics, Vol. 430: 1 – 25.

Hearn, E.H. (2003): What can GPS data tell us about the dynamics of post-seismic deformation? Geophys. J. Int., Vol. 155: 753 – 777.

Heidbach, O., and Z. Ben-Avraham (2007): Stress evolution and seismic hazard of the Dead Sea fault system. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 257: 299 – 312.

Heidbach, O., K. Fuchs, B. Müller, J. Reinecker, B. Sperner, M. Tingay, and F. Wenzel (2007a): The World Stress Map-Release 2005, 1:46,000,000. Commission of the Geological Map of the World, Paris.

Heidbach, O., K. Fuchs, B. Müller, F. Wenzel, J. Reinecker, M. Tingay, and B. Sperner (2007b): The World Stress Map. Episodes, Vol. 30: 197 – 202.

Heidbach, O., P. Ledermann, D. Kurfeß, G. Peters, T. Buchmann, M. Negut, L. Matenco, B. Sperner, B. Müller, A. Nuckelt, and G. Schmitt (2007c): Attached or not attached: Slab dynamics beneath Vrancea, Romania. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, pp. 3 – 20.

Heidbach, O., J. Reinecker, M. Tingay, B. Müller, B. Sperner, K. Fuchs, and F. Wenzel (2007d): Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. Tectonics, 26, TC6014, doi:10.1029/2007TC002133.

Hergert, T., and O. Heidbach (2006): New insights in the mechanism of postseismic stress relaxation exemplified by the June 23rd 2001 Mw = 8.4 earthquake in southern Peru. Geophys. Res. Lett., 33, doi:1029/2005GL024585.

Ismail-Zadeh, A.T., V.I. Keilis-Borok, and A.A. Soloviev (1999): Numerical modelling of earthquake flow in the southeastern Carpathians (Vrancea): effect of a sinking slab. Physics of the Earth and Planetary Interiors, Vol. 111: 267 – 274.

Ismail-Zadeh, A., B. Müller, and G. Schubert (2005): Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data. Phys. Earth Planet. Int., Vol. 149: 81 – 98.

Ismail-Zadeh, A.T., B. Müller, and F. Wenzel (2005): Modelling of descending slab evolution beneath the SE-Carpathians: implications for seismicity. In: Perspectives in Modern Seismology, Vol. 105. Lecture Notes in Earth Sciences, edited by F. Wenzel. Berlin: Springer, pp. 205–226.

Jiricek, R. (1979): Tectonic development of the Carpathian arc in the Oligocene and Neogene. In: Tectonic profiles through the Western Carpathians, edited by M. Mahel, Bratislava: Geol. Inst. Dionyz Stur, pp. 205 – 214.

Kurfeß, D., and O. Heidbach (2007): Coupled 3D finite element modeling of surface processes and crustal deformation: A new technical approach and parameter studie. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, pp. 21 – 33.

Martin, M., F. Wenzel, and t.C.w. Group (2006): High-resolution teleseismic body wave tomography beneath SE-Romania – II. Imaging of a slab detachment scenario. Geophys. J. Int., Vol. 164: 579 – 595.

Matenco, L., G. Bertotti, K. Leever, S. Cloetingh, S.M. Schmid, M. Tarapoanca, and C. Dinu (2007): Large-scale deformation in a locked collisional boundary: Interplay between subsidence and uplift, intraplate stress, and inherited lithoshperic structure in the late stage of the SE Carpathians evolution. Tectonics, 26, doi:10.1029/2006TC001951.

Necea, D., W. Fielitz, and L. Matenco (2005): Late Pliocene-Quatenary large scale differential motions in the frontal part of the SE Carpathians: Insights from tectonic geomorphology. Tectonophysics, Vol. 410: 137 – 156.

Oncescu, M.C., and K.-P. Bonjer (1997): A note on the depth recurrence and strain release of large Vrancea earthquakes. Tectonophysics, Vol. 272: 291 – 302.

Pollitz, F.F. (2003): Post-seismic relaxation theroy on latterally heterogeneous viscoelastic model. Geophys. J. Int., Vol. 155: 57 – 78.

Reinecker, J., O. Heidbach, M. Tingay, B. Sperner, and B. Müller (2005): The 2005 release of the World Stress Map, (available online at www.world-stress-map.org).

Sonder, L.J. (1990): Effects of density contrasts on the orientation of stresses in the lithosphere: Relation to principal stress directions in the transverse ranges, California. Tectonics, Vol. 9: 761 – 771.

Sperner, B., D. Ioane, and R.J. Lillie (2004): Slab behaviour and its surface expression: new insights from gravity modelling in the SE-Carpathians. Tectonophysics, Vol. 382: 51 – 84.

Sperner, B., and C. team (2005): Monitoring of slab detachment in the SE-Carpathians, in Perspectives in Modern Seismology, Vol. 105, Lecture Notes. In: Earth Sciences, edited by F. Wenzel, pp. 187 – 202. Berlin: Springer.

Sperner, B., F. Lorenz, K. Bonjer, S. Hettel, B. Müller, and F. Wenzel (2001): Slab break-off - abrupt cut or gradual detachment? New insights form the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania): Terra Nova, Vol. 13: 172 – 179.

Sperner, B., L. Ratschbacher, and M. Nemcok (2002): Interplay between subduction retreat and lateral extrusion: Tectonics of the Western Carpathians. Tectonics, 21, doi:10.1029/2001TC90128.

Stampfli, G.M., and G.D. Borel (2002): A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 196: 17 – 33.

Stein, R.S., A.A. Barka, and J.H. Dietrich (1997): Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. Geophys. J. Int., Vol. 128: 594 – 604.

Tibi, R., D.A. Wiens, and I. H. (2003): Remote triggering of deep earthquakes in the 2002 Tonga sequences. Nature, Vol. 424: 921 – 925.

Tingay, M.R.P., B. Müller, J. Reinecker, and O. Heidbach (2006): State and Origin of the Present-day Stress Field in Sedimentary Basins: New Results from the World Stress Map Project. In: 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS): "50 years of Rock Mechanics – Landmarks and Future Challenges, pp. 14, Golden, Colorado.

van der Hoeven, A.G.A., V. Mocanu, W. Spakman, M. Nutto, A. Nuckelt, L. Matenco, L. Munteanu, C. Marcu, and B.A.C. Ambrosius (2005): Observation of present-day tectonic motions in the Southeastern Carpathians: Results of the ISES/CRC-461 GPS measurements, Earth and Planet. Sc. Lett., Vol. 239: 177 – 184.

Wenzel, F., U. Achauer, E. Enescu, E. Kissling, R. Russo, V. Mocanu, and G. Musacchio (1998): Detailed look at final stage of plate break-off is target of study in Romania. Eos Trans., Vol. 79: 589 – 594.

Wortel, M.J.R., and W. Spakman (1992): Structure and dynamics of subducted lithosphere in the Mediterranean region. Proc. Kon. Ned. Akad. v. Wetensch., Vol. 95/3: 325 – 347.

Wortel, M.J.R., and W. Spakman (2000): Subduction and Slap Detachment in the Mediterranean-Carpathian Region. Science, Vol. 290: 1910 – 1917.

5.2.2 List of publications resulting from the project since the last proposal

5.2.2.1 Peer-reviewed publications

a) in scientific jounals

Heidbach, O., J. Reinecker, M. Tingay, B. Müller, B. Sperner, K. Fuchs, and F. Wenzel (2007d): Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns highlighted in the World Stress Map database. Tectonics, 26, TC6014, doi:10.1029/2007TC002133, 2007.

Heidbach, O., and Z. Ben-Avraham (2007): Stress evolution and seismic hazard of the Dead Sea fault system. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 257: 299 – 312.

Heidbach, O. (2005): Velocity Field of the Aegean-Anatolian Region from 3D Finite Element Models. In: Perspectives in Modern Seismology, edited by F. Wenzel. Berlin: Springer, pp. 169 – 184.

Ismail-Zadeh, A., B. Müller, and G. Schubert (2005): Three-dimensional numerical modeling of contemporary mantle flow and tectonic stress beneath the earthquake-prone southeastern Carpathians based on integrated analysis of seismic, heat flow, and gravity data. Phys. Earth Planet. Int., Vol. 149 (1 – 2): 81 – 98.

Ismail-Zadeh, A.T., B. Müller, and F. Wenzel (2005): Modelling of descending slab evolution beneath the SE-Carpathians: implications for seismicity. In: Perspectives in Modern Seismology, edited by F. Wenzel. Berlin: Springer, pp. 205 – 226.

Sperner, B., and CRC 461 Team (2005): Monitoring of slab detachment in the SE-Carpathians. In: Perspectives in Modern Seismology, edited by F. Wenzel. Berlin: Springer, pp. 187 – 202.

b) at major scientific conferences

none

c) in monographs

none

5.2.2.2 Non peer-reviewed publications

a) in scientific jounals

none

b) at major scientific conferences

Heidbach, O., P. Ledermann, D. Kurfeß, G. Peters, T. Buchmann, M. Negut, L. Matenco, B. Sperner, B. Müller, A. Nuckelt, and G. Schmitt (2007c): Attached or not attached: Slab dynamics beneath Vrancea, Romania. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, pp. 3 – 20.

Kurfeß, D., and O. Heidbach (2007): Coupled 3D finite element modeling of surface processes and crustal deformation: A new technical approach and parameter studie. In: International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, pp. 21 – 33.

Kurfeß, D., and O. Heidbach (2007): Die Wechselwirkung zwischen Erosion und Tektonik: geowissenschaftliche Modelle mit ABAQUS und dessen Benutzerunterprogramm UMESHMOTION. In: 19. Deutschsprachige Abaqus-Benutzerkonferenz, pp. 1–12, Baden-Baden.

c) in monographs

none

5.2.2.3 Oral Presentations

Eckert, A. O.Heidbach, T.Hergert, T.Buchmann, G.Peters and B. Müller (2007): Karlsruhe recipe for an appropriate initial stress state in numerical geomechanical models – Part Two: Application to the Sea of Marmara. 2nd International GEOQUS workshop, Potsdam, Germany (invited talk).

Eckert, A. O.Heidbach, T.Hergert, T.Buchmann, G.Peters and B. Müller (2007): Karlsruhe recipe for an appropriate initial stress state in numerical geomechanical models – Part One: Theory. 2nd International GEOQUS workshop, Potsdam, Germany (invited talk).

Kurfeß, D., Heidbach, O. (2007): Modeling the feedback between surface processes and tectonics within ABAQUS: a process study. 2nd International GEOQUS workshop, Potsdam, Germany (invited talk).

Ledermann, P., Heidbach, O. (2007): 3D numerical modelling of the coupling between the crust and the high-velocity body (HVB) in the Vrancea area, Romania. 2nd International GEOQUS workshop, Potsdam, Germany.

Kurfeß, D., and O. Heidbach (2007): Coupled 3D finite element modeling of surface processes and crustal deformation: A new technical approach and parameter studie, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania.

Heidbach, O, Müller, B., Reinecker, J., Sperner, B., Buchmann, T. (2007): Plate boundary forces are not enough: Second- and third-order stress patterns in Europe from the World Stress Map database. 2nd International TOPO-Europe Workshop Rome, Italy.

Kurfeß, D., and O. Heidbach (2007): Die Wechselwirkung zwischen Erosion und Tektonik: geowissenschaftliche Modelle mit ABAQUS und dessen Benutzer-unterprogramm UMESHMOTION. 19. Deutschsprachige Abaqus-Benutzer-konferenz, Baden-Baden, Germany.

Ledermann, P.; Heidbach, O. (2007): Stress transfer modelling of the strong earthquake sequence at intermediate depths in the Vrancea area, Romania. 3rd EGU Gen. Ass., Wien, Austria.

Hergert, T.; Heidbach, O. (2007): 3D numerical model of the kinematics and dynamics of the Marmara Sea region for seismic hazard assessment. 3rd EGU Gen. Ass., Wien, Austria.

Kurfeß, D.; Heidbach, O. (2007): Coupled 3D finite element modeling of surface processes and crustal deformation: a new approach based on ABAQUS. 3rd EGU Gen. Ass., Wien, Austria.

Kurfeß, D.; Peters, G.; Buchmann, T. (2007): A new way of coupled 3D numerical modeling of surface processes and crustal deformation and evaluation of results using geomorphological data. 3rd EGU Gen. Ass., Wien.

Heidbach, O.; Ben-Avraham, Z. (2006): Stress evolution and seismic hazard of the Dead Sea fault system. 2nd EGU Gen. Ass., Wien, Austria.

Hergert, T.; Eckert, A.; Heidbach, O. (2006): Numerical stress field modeling of the Marmara Region. 2nd EGU Gen. Ass., Wien, Austria.

Kurfeß, D.; Heidbach, O. (2006): Finite element modeling of the interaction between fluvial transport and the dynamics of the lithosphere based on CASCADE and ABAQUS. 96th Annual Meeting and International Conference Potsdam of the Geologische Vereinigung, Potsdam, Germany.

Kurfeß, D., Heidbach, O. (2006): Modelling landscape evolution within ABAQUS: new user subroutines linking fluvial mass transport and the dynamics of the lithosphere. 1st International GEOQUS workshop, Bochum, Germany.

Ledermann, P., Heidbach, O. (2006): Modelling of Coulomb Failure Stress changes (ΔCFS) from subsequent strong earthquakes in the Vrancea area, Romania. 1st International GEOQUS workshop, Bochum, Germany.

Heidbach, O., Hergert, T., Becel, A., Hirn, A. (2006): 3D Finite Element model for the stress field evolution for the Marmara Sea region. 1st International GEOQUS workshop, Bochum, Germany.

Heidbach, O., Hergert, T., Dirkzwager, J., Eckert, A., Kurfeß, D., Ledermann, P. (2005): From GPS Observations to Stress Evolution Models. 1st International TOPO-Europe Workshop, Heidelberg, Germany.

5.3 Approval funds for the current funding period

The project was funded in the Collaborative Research Centre from 01/2005 to 12/2007.

Financial year	Funding for staff	Funding for direct costs	Funding for instrumentation	Total
Up to 2004	600.385 €	24.235 €	0	624.620 €
2005	120.000 €	500 €	0	120.500 €
2006	123.600 €	500 €	0	124.100 €
2007	123.600 €	500 €	0	124.100 €
Total	**967.585 €**	**25.735 €**	**0**	**993.320 €**

5.3.1 Staffing of the project

	Name, acad. title, position	Field of research	Department of the university or non-universitary institution	Employed by the SFB from (month/year) until (month/year)	Salary scale
Core support					
Research assistants (incl. student assistants)	Dr. Heidbach, O. Dr. Müller, B. Dr. Ismael Zadeh, A. Prof. em. Dr.Fuchs, K., Prof. Dr.Schmitt, G. Dr. Nuckelt, A. Dr. Negut, M. Dr. Pollitz, F. Prof. Dr. Dinu, C. Prof. Dr. Cloetingh, S. Prof. Dr. Stephenson, R. Dr. Matenco, L. Dr. Leever, K. Dr. Fischer, K. Dr. Weber, P.	Numerical modelling Stress analysis Numerical modeling Geophysics Geodesy Geodesy Stress analysis Numerical modelling Tectonophysics Geophysics Gravity modelling Geology/Geomorphology Numerical modelling Code development Software support	GEOK Heidelberg Academy GEOK GEOK GIK GIK PETROM, Bucarest USGS Menlo Park Uni Bukarest VU Amsterdam VU Amsterdam VU Amsterdam VU Amsterdam Uni Bochum Karlsruhe/Rechenzentrum	01/2002–12/2007 01/1996–12/2007 01/2001–12/2005 01/1996–12/2006 01/1996–12/2007 04/2005–12/2007 01/1997–12/2007 01/2002–12/2005 01/1996–12/2007 01/1996–12/2007 10/2006–12/2007 01/2002–12/2007 01/2005–06/2007 01/2005–12/2007 01/1999–12/2007	
Non-scientific assistants	Knopf, P. Nadolny, T.		GEOK GEOK	01/1996–12/2007 01/1996–12/2007	

Auxiliary support					
Research assistants (incl. student assistants)	Dr. Dirkzwager, J.	3D numerical modelling	GEOK	10/2002–04/2006	BAT IIa
	Dr. Sperner, B.	3D geologcial modelling	GEOK	01/1999–02/2005	BAT IIa
	Ledermann, P.	3D numerical modelling	GEOK	03/2005–12/2007	BAT IIa/2
	Crivat, A.	Gravity modelling	GEOK	03/2005–02/2006	BAT IIa/2
	Eckert, A.	Geomovie visualisation	GEOK	04/2005–10/2006 06/2007–11/2007	BAT IIa/2
	Kurfeß, D.	Code developement	GEOK	07/2005–12/2007	BAT IIa/2
	Buchmann, T.	3D numerical modelling	GEOK	08/2006–11/2007	BAT IIa/2
	Dr. Peters, G.	Geomorphological analysis	GEOK	08/2006–12/2007	BAT IIa/2
	Altmann, J.	GoCad modelling	GEOK	11/2006–11/2007	BAT IIa/2
	Hippel, A.	Stress data analysis	GEOK	07/2007–12/2007	BAT IIa/2
	Altmann, J.	GoCad data input format	GEOK	05/2005–12/2005 03/2006–08/2006	stud. HK
	Bach, M.	Slab data visualization	GEOK	07/2005–10/2005 03/2006–04/2006	stud. HK
	Haid, V.	Stress data analysis	GEOK	01/2005–05/2005 04/2006–08/2006 02/2007–04/2007	stud. HK
	Schumacher, C.-P.	Data conversion	GEOK	04/2005–09/2005	stud. HK
	Veile, I.	Focal mechanism solution	GEOK	05/2005–12/2005 04/2006–07/2006	stud. HK
	Schönemann, E.	Model input data	GEOK	11/2007–12/2007 04/2006–08/2006	stud. HK
	Thielmann, M.	Stress data analysis	GEOK	08/2007–12/2007 05/2006–07/2006 10/2006–12/2006	stud. HK
	Schönball, M.	Stress data analysis	GEOK	03/2007–08/2007	stud. HK
	Dorner, A.	Data visualization	GEOK	07/2007–10/2007	stud. HK
	Hippel, A.	Visualization tool	GEOK	02/2007–03/2007	stud. HK
Non-scientific ass.	–				

A7

Prognose der Bodenbewegung bei Starkbeben

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Prof. Dr. Friedemann Wenzel
Dr. Ellen Gottschämmer
Dr. Adrien Oth
Dr. Joachim Miksat

Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 General Information about the completed project A7

5.1.1 Title:

Strong Ground Motion Assessment

5.1.2 Research Areas:

Seismology

5.1.3 Principal investigator:

Professor Dr. Wenzel, Friedemann, 17.01.1951
Geophysikalisches Institut
Universität Karlsruhe
Telefon: 0721/ 608-4431
Telefax: 0721/ 71173
E-Mail: friedemann.wenzel@gpi.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Staff:

Dr. Ellen Gottschämmer
Dr. Joachim Miksat
Dr. Michael Martin
Dipl.-Geol. Eike-Marie Nolte
Dr. Adrien Oth

5.1.5 Romanian Partners:

Dr. Mircea Radulian, National Institute of Earth Physics, Bucharest
Prof. Dr. Dan Lungu, Technical University of Bucharest
Prof. Dr. Dan Lungu, INCERC

5.2 Project development report

5.2.1 Report

Abstract

An essential part of seismic hazard analysis is the establishment of attenuation functions that allow the computation of ground motion parameters. Attenuation functions for a specific region are usually, in the lack of a large database, either derived from only a few strong motion records, or even simply taken from a different region, that shows in the best case a similar geological and tectonic setting. This procedure leads to attenuation functions that can either over- or underestimate the ground motion parameters. A major issue of the project A7 was to optimize the computation of parameters which are used for stochastic forward modeling of ground motions by integrating not only a few strong motion records but also synthetic seismic records derived from modeling with the Empirical Green's Functions (EGF) method and a Finite Difference (FD) method. That way we take advantage of additional information we have about the region: our knowledge of seismic records of small events used as empirical Green's functions as well as our knowledge about the sub-surface structure that was derived from seismic refraction experiments (HAUSER ET AL. 2001 2007) and seismic tomography (MARTIN 2005 2006) and is needed as an input to FD-modeling.

Finite-Differences (FD) Modelling

Ground motions up to 4.5 Hz of the August 30th 1986 and October 27th 2004 earthquakes were simulated by using a 2D FD method (KARRENBACH 1995). The simulation results were compared with recorded seismograms and in the case of the 1986 earthquake also with observed intensities.

Site effects were implemented by applying frequency dependent amplification ratios to the seismograms simulated by FD modeling.

Modelling with Empirical Green's Functions (EGF)

The EGF method of IRIKURA (1983, 1986, 1999) was used to get more insight into the source parameters of the two moderate earthquakes of October 27th 2004 and May 14th 2005 as well as the large shocks which occurred on August 30th 1986 and March 4th 1977 (OTH ET AL. 2007a,c). Synthetic time series (acceleration, velocity and displacement) were computed for these four Vrancea earthquakes in a broadband frequency range (about 0.4 – 12 Hz) from smaller events using the EGF-method of Irikura and compared with observed records. As there is only one observation available for the 1977 event, instrumentally determined intensity was compared with the

observed macroseismic intensity (MSK) pattern. Minimizing the cost (misfit) between observations and simulations led to suitable source models for these events (strong motion generation area, SMGA, after MIYAKE ET AL. 2003). A genetic algorithm was used to find acceptable solutions.

The results from this study, besides new physical insights into the source mechanism of Vrancea earthquakes, provide the necessary information on the scaling characteristics of these earthquakes to generate a large catalogue of synthetic time series from scenario earthquakes. This database comprises more than 160 simulated events with moment magnitudes ranging between 5.5 and 8.0 at 43 K2 stations (GRECU ET AL. 2004) and fills the gap between the large amount of weak motion recordings acquired with the K2 network in recent years and the few strong motion records from past large Vrancea earthquakes by using the weak motion records to generate data-consistent simulations.

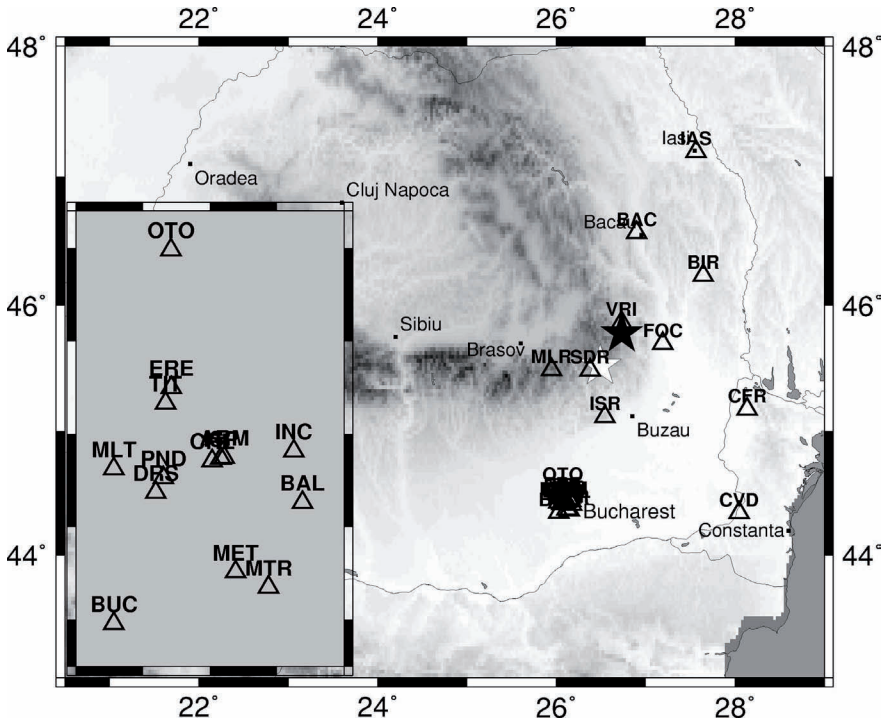


Figure 1: Distribution of strong motion stations in SE Romania with a zoomed view of the Bucharest area (gray inlay). The stars depict the epicenters of the 1986 (white) and 2004 (black) earthquakes.

Strong-Motion-Catalogue

In order to estimate realistic ground motion parameters, we included records of strong Vrancea earthquakes in the determination of those parameters (Fig. 1). On August 30, 1986, a M_W = 7.1 event occurred in the Vrancea region and was recorded at 20 stations in Romania. In 1990, two strong earthquakes took place in the region (May 30, 1990 – M_W=6.9, May 31, 1990 – M_W=6.4). On October 27, 2004 a M_W = 6.0 event occurred. This event was recorded at 37 stations. In our studies, we mainly considered records of the 1986 and 2004 strong earthquakes.

Least-Squares Inversion Technique (LSI)

In order to compute ground motion parameters, the three data-sets available are merged together in the frequency-domain. Therefore, Fourier amplitude spectra (FAS) of ground motion need to be computed. The ground motion parameters for which the inversion will be performed are then the parameters that define a FAS of an event of given magnitude, namely the corner frequency fc and parameters of damping as the quality factor Q or α, γ, κ. The FAS are inverted using a Least-Squares Inversion technique (LSI).

Generalized Inversion Technique (GIT)

As the stochastic simulation technique is based on a realistic description of the FAS of ground motion, the FAS of the data recorded from small and moderate Vrancea earthquakes by the K2-network as well as several recordings of three past strong Vrancea earthquakes (August 30, 1986 – M_W=7.1, May 30, 1990 – M_W=6.9, May 31, 1990 – M_W=6.4) were analyzed using the generalized inversion technique (GIT, e.g. CASTRO ET AL. 1990). The FAS were inverted to obtain their source spectra, the whole path attenuation characteristics and site amplification functions. 55 earthquakes and 43 stations were included in the inversion. The resulting spectral ground motion models, in combination with the scaling analysis performed in the framework of the source parameter study with EGF's, allow an effective description of the FAS from small to large Vrancea earthquakes over the Romanian territory and constitute the basis for stochastic ground motion simulations.

5.2.1.1 State of Knowledge at the Last Application

The Empirical Green's Functions Summation Method (EGF) was developed by HARTZELL (1987) and WU (1978) and is regarded as a powerful tool for site-dependent ground motion estimation. Empirical scaling relations or the estimation of a source model with realistic strong motion parameters are needed for the step from small earthquakes to large events. Composite-approaches (IRIKURA 1983) use scaling relations that assume a constant stress-drop. Therefore both, small and large earthquakes have to have magnitudes for which the scaling relations are valid. This is typically given if small earthquakes are two magnitudes smaller than the large events to be modelled.

Finite-Differences Methods (FD) are used extensively in the last years for varying scientific questions. OLSEN (1994, 2000) examined effects of sedimentary basins and showed that the 3D geological structure has a strong influence on strong ground motion. Damping has to be considered important and can for example be implied using correction functions. FRANKELL AND STEPHENSON (2000) modelled small earthquakes using a 3D FD method for the Seattle Fault Zone and reproduced successfully peak amplitudes and signal duration for the long-period range

(> 2 seconds). A hybrid method was, for the same region, applied by HARTZELL ET AL. (2002). The low-frequent part of the signal was simulated using Finite Differences, while the high-frequent part of the signal was simulated with a stochastic method A non-linear correction has to be applied in order to reduce large amplitudes.

Stochastic methods of ground-motion simulation are based on attenuation functions. Attenuation functions have been developed by several authors (e.g. BOORE ET AL. 1997, YOUNGS ET AL. 1997) for different regions of the world. In fair distance from the source, high-frequent ground motion can be described by the phase spectrum of a band-limited Gaussian noise of finite length and the characteristic ω^2 amplitude spectrum of the source. The code FINSIM (BERESNEV AND ATKINSON 1997, 1998) modifies this idea in a way that not only point sources but also ruptures of finite length can be considered.

5.2.1.2 Applied Methods, Results and Their Importance

Methods

The Finite-Differences Method

A 2D FD method (KARRENBACH 1995) was used in order to simulate wave propagation of the Vrancea strong earthquakes up to 4.5 Hz. The FD scheme is fourth order in space and second order in time. To simulate area-wide ground motion parameters of the August 30, 1986 and October 27, 2004 earthquakes, wave propagation was modeled for 20 different slices, which are rotated around the epicenter – hypocenter axis (Fig. 2).

As it is not possible to infer the correct 3D amplitudes and waveforms from 2D modeling, we developed a correction method (MIKSAT ET AL. 2008) that translates seismograms simulated in 2D into 3D seismograms.

The used subsurface structure of the crust is mainly based on two refraction seismic lines (HAUSER ET AL 2001 2007). Additional information comes from 3D refraction tomography (LANDES ET AL. 2004) and receiver function studies (DIEHL ET AL. 2005). Based on these information Martin et al. (2005) compiled a crustal model of the region. The mantle structure was derived by nonlinear teleseismic body wave tomography (MARTIN ET AL. 2005 2006). In order to explain the recorded seismograms, it was necessary to introduce scatterers into the known underground model. Unfortunately, there is no information on the scattering properties for Romania available. Therefore, the stochastic properties are based on HOCK ET AL. (2004). We apply correlation lengths of 2 km an RMS velocity perturbation of 5 % for the crust and 4 km and RMS velocity perturbation of 2 % for the mantel (Fig. 3).

The applied Q structure was adopted from SOKOLOV ET AL. (2004). Q is 150 $f^{0.80}$ for depths greater than 100 km, 400 $f^{0.90}$ between 40 and 100 km and 100 $f^{0.80}$ above

40 km. To take into account the site effects, the seismograms from the FD simulations were amplified by using frequency dependent amplification ratios derived by SOKOLOV AND BONJER (2006).

The model depth varies depending on the hypocenter depth from 98 km to 131 km. Horizontal extension is 350 km and the grid discretization is 140 m.

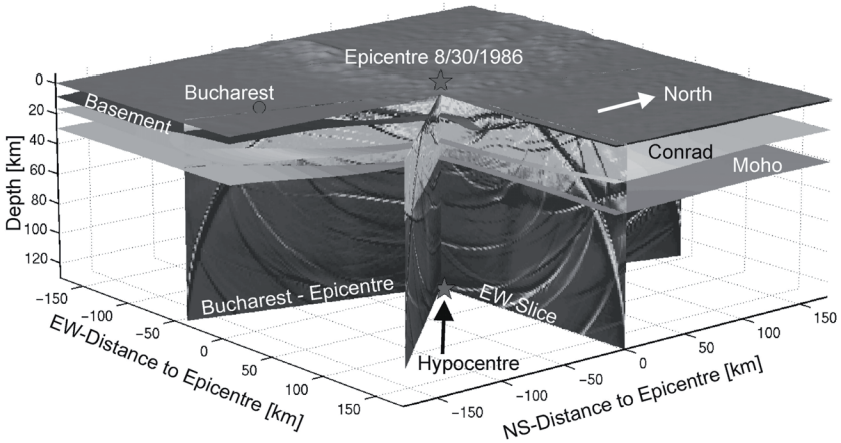


Figure 2: Wave propagation of the Vrancea earthquakes is modeled with a 2D FD method for different 2D slices through the underground structure. The slices are rotated around the epicenter-hypocenter axis. This 2.5D modeling procedure generates area-wide seismograms depending on the number of 2D slices. The figure shows the main crustal features, the epicenter and hypocenter of the 1986 August 30 earthquake and wave propagation for three 2D slices.

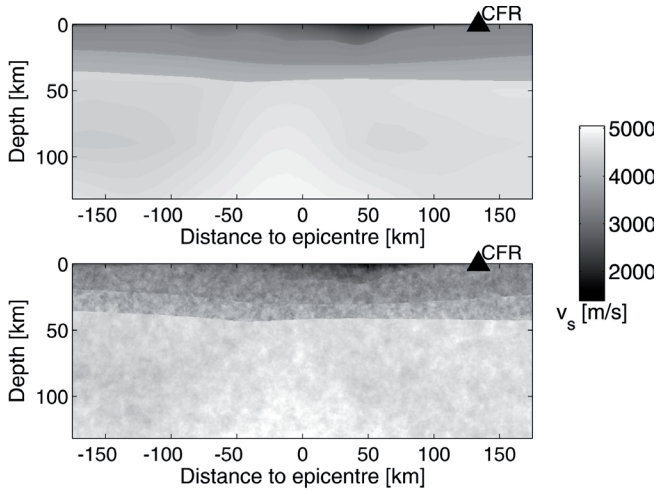


Figure 3: 2D slice through station CFR and the epicenter of the smooth model after Martin et al. (2005, 2006) and through the model with added stochastic velocity perturbations.

Source Parameters and Scaling of Vrancea Earthquakes with Empirical Green's Functions

As described by OTH ET AL. (2007a,c), the source characteristics have been investigated for two moderate and two large Vrancea earthquakes (March 4, 1977, M_W=7.4; August 30, 1986, M_W=7.1; October 27, 2004, M_W=5.8; May 14, 2005, M_W=5.2, TARGET events). The results were then utilized to calibrate the scaling relations needed for the generation of a catalogue of EGF simulations for hypothetical Vrancea earthquakes with magnitudes ranging between 5.5 and 8.0. This procedure ensures the best possible compatibility between this catalogue and the observations from past earthquakes.

Acceleration data from six EGF events (4.0 ≤ MW ≤ 5.0) were used to model the 1986, 2004 and 2005 TARGET earthquakes. The 2004 event was itself used as EGF in order to simulate the 1977 TARGET earthquake. The EGF earthquakes were chosen following the conditions that the focal mechanisms should be as similar as possible to the one of the TARGET and they should be located at approximately the same depth.

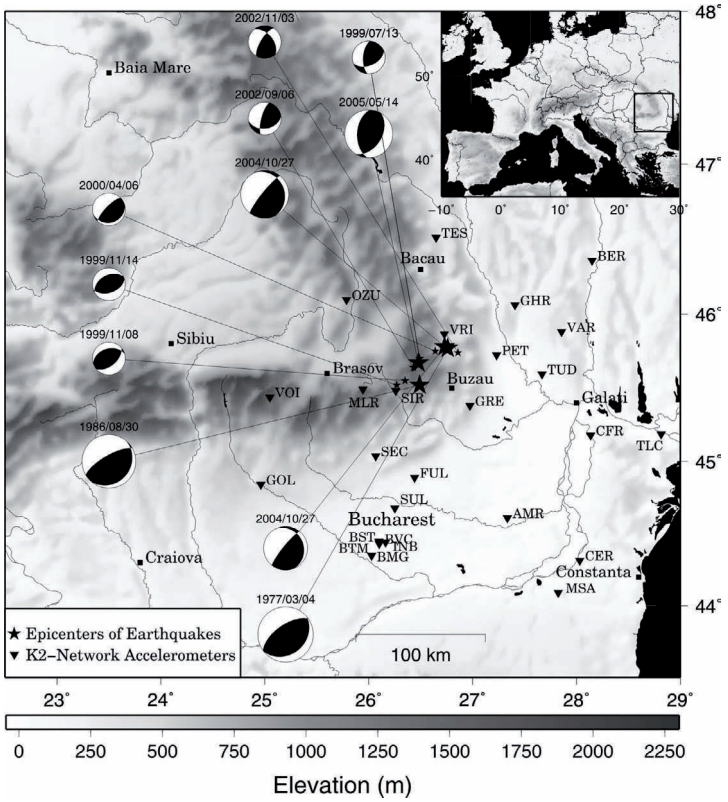


Figure 4: Topographic map of the Carpathian area. The Vrancea seismogenic zone is situated in the bend of the arc. The epicenters of the utilized earthquakes are marked by stars (big stars for the TARGET events) and the fault plane solutions of the events are also indicated (the corresponding EGF earthquakes are lined up in a column with the respective TARGET event). The K2 accelerometers which provided data for this study are depicted as inverse triangles.

Fig. 4 shows the epicenters and the locations of the stations. Additionally, the focal mechanisms of all earthquakes are displayed. Each analyzed TARGET earthquake is marked by a large star, and the focal mechanisms of the EGF event(s) associated with it are lined up in a column with the TARGET's focal mechanism. The fault plane solutions of the main shocks are taken from the Harvard CMT catalogue, whereas those of the EGF earthquakes are from the ROMPLUS catalogue (ONCESCU ET AL. 1999b). Concerning the 1977 earthquake, acceleration data from the October 2004 event were used as EGF data. For this earthquake, due to a lack of waveform data (only one recording of the 1977 earthquake in the city of Bucharest), a novel approach was adopted to derive a suitable source model, which consists in using macroseismic intensity to evaluate whether a given source model leads to reasonable simulations or not (OTH ET AL. 2007a,c).

Irikura's method is based on the self-similarity hypothesis, which in general assumes constant stress drop over a wide magnitude range. Detailed descriptions of the technique are given in IRIKURA (1983, 1986, 1999), MIYAKE ET AL. (2003) and OTH ET AL. (2007a). The source model on which the methodology is based is an extended area with homogeneous slip and rise time (e.g. KAMAE AND IRIKURA 1998; MIYAKE ET AL. 2003). A physical interpretation for this source model has been given recently by MIYAKE ET AL. (2003) (calling this source model the 'strong motion generation area', SMGA), who, following the analysis of twelve crustal earthquakes in Japan, came to the conclusion that the SMGA is equivalent to an asperity within a larger rupture area, where the background slip area shows practically no stress release.

The optimal values for the simulation parameters were derived using a genetic algorithm optimization procedure (OTH ET AL. 2007a). For the 1986, 2004 and 2005 earthquakes, the fit between the observed and synthesized acceleration envelope and displacement waveform was used as a criterion of fit. For the 1977 earthquake, simulations were computed using the 2004 event as EGF, intensity estimated from the FAS of these synthetic records using the technique of SOKOLOV (2002) and the residuals between so-modeled and observed macroseismic intensities minimized.

The procedure described led to source models for these four earthquakes which can explain the observed strong motion time histories and the macroseismic intensity pattern of past Vrancea earthquakes. The largest dataset ever used for such a kind of study in Romania has been analyzed.

Inversion Using the Least Squares (LSI) Method

The amplitude A(f) of Fourier spectra computed for the horizontal component of seismic data can be expressed as

$$A(F) = C \cdot S(f) \cdot D(f) \cdot P(f) \quad (1)$$

where C is a constant, S(f) is the source spectrum and D(f) and P(f) are spectral attenuation functions. We compute the natural logarithm of equation (1) and linearise the equation using Taylor's expansion receiving equation (6). It depends on 5 independent variables and reads like

$$G(fc, \kappa, \alpha, Q, \gamma) = G_0 + B \cdot \Delta fc + C \cdot \Delta\kappa + D \cdot \Delta\alpha + E \cdot \Delta Q + F \cdot \Delta\gamma \quad (2)$$

Here, G_0 is G(fc_0, κ_0, α_0, Q_0, γ_0), $\Delta x = (x-x_0)/x_0$ and fc_0, κ_0, α_0, Q_0, and γ_0 are the starting values for the inversion given below. Thus, the independent variables which are inverted for are the corner frequency fc, the high-frequency-filter κ, and the factors α, Q(f), and γ, that control the attenuation function D(f). B, C, D, E, and F are dependent on the frequency f and the hypocentral distance R. Furthermore they depend on the starting values for the inversion $fc_0 - \gamma_0$ which are compiled in Table 1.

Table 1: Starting values for least-squares inversion

fc_0 (Hz)	0.5
κ	0.04
α	0.01
Q	450
γ	1

A more detailed description is given in Appendix 1 (GOTTSCHÄMMER ET AL., 2006)

Inversion for Spectral Ground Motion Models with the Generalized Inversion Technique (GIT)

The stochastic simulation technique is based on an appropriate description of ground motion Fourier amplitude spectra (FAS) as a combination of source, path and site effects (BOORE 2003). These different contributions were separated using the generalized inversion technique (GIT) (e.g. CASTRO ET AL. 1990; PAROLAI ET AL. 2000, 2004; BINDI ET AL. 2006; Oth 2007). The method is applied in two steps: first, non-parametric, frequency-dependent attenuation functions, describing the decay of the spectral amplitude with distance, were derived. In the second step, the FAS were corrected for the effect of attenuation (with the functions derived in the first step) and the corrected spectra were then separated into their source and site contributions.

The equations describing both steps are given by:

$$step\,1: \log U(f, r_{ij}) = \log M_i(f) + \log A(f, r_{ij}) \quad (3)$$

$$step\,2: \log R_{ij}(f) = \log S_i(f) + \log Z_j(f), \quad (4)$$

where $U(f,r_{ij})$ denotes the observed FAS (of acceleration, horizontal or vertical component) at frequency f from source i recorded at site j (hypocentral distance r_{ij}), $M_i(f)$ is a scaling factor for source i, $A(f,r_{ij})$ the non-parametric attenuation function, $R_{ij}(f)=U(f,r_{ij})/A(f,r_{ij})$ are the data corrected for attenuation, $S_i(f)$ is the source term and $Z_j(f)$ the site amplification. These equations are solved separately at each considered frequency. More details on the method can be found in OTH (2007).

From the source spectra, estimates of the corner (angular) frequency ω_c (or stress drop, $\Delta\sigma$, as these can be linked to each other, BRUNE 1970, 1971) and seismic moment M_0 can be derived. The frequency-dependent quality factor $Q_S(f)$ is derived from the non-parametric attenuation functions (e.g. BINDI ET AL. 2006). Expressing the FAS using these parameters allows a simple computation of theoretical spectra and hence also the simulation using the stochastic method.

More than 850 records of 55 earthquakes (with magnitudes ranging between 4 and 7, the largest amount of data being restricted to the range M_W=4-5) at 43 K2 stations were used (Fig. 5). The FAS of the records were calculated and smoothed around 30 frequency points equidistant in log using the windowing function of KONNO AND OHMACHI (1998). The root-mean-square (rms) average of the two horizontal component spectra was finally obtained and analyzed (the vertical component was also investigated). The dataset, due to the particular geometry, shows several problematic aspects. First, as the sources are very clustered, there are few crossing ray paths from the sources to different stations. Second, due to the large depth of the events (70–200 km), the lowest hypocentral distance in the dataset ranges around 85 km. The distance range of the data (85–320 km) was subdivided into bins 10 km wide and the reference distance was set to R_0=90 km.

Inhomogeneities in the attenuation characteristics are not averaging out, as all rays from each source to a given station travel similar paths. The traditional approach of describing the whole-path attenuation using one distance-dependent function (at each frequency) for the entire dataset led to unphysical results (OTH 2007). The spectral amplitudes at high frequencies (above approximately 4 Hz) were consistently lower by almost one order of magnitude in region 2 as compared with region 1, an effect which is explainable by inhomogeneities in attenuation, as synthetic data tests revealed (OTH 2007). Therefore, the inversion for the attenuation functions had to be adapted to this special situation. For each of the two regions shown in Fig. 5, a separate attenuation function was derived. The two functions were simultaneously computed in one inversion scheme.

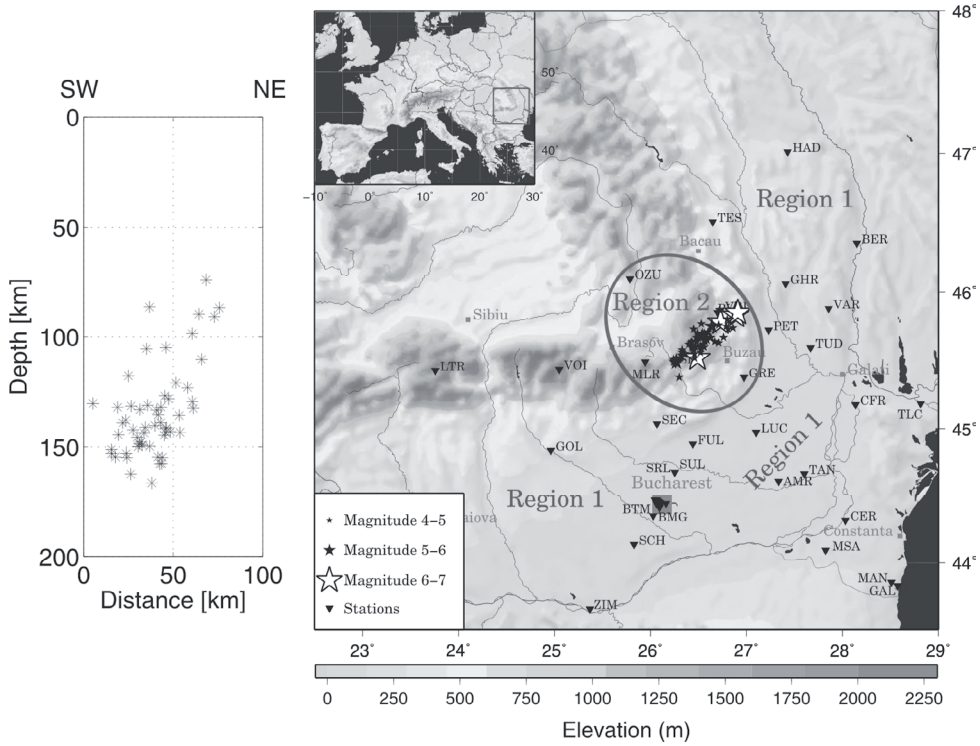


Figure 5: Earthquakes (stars) and stations (inverse triangles) used in the GIT inversion. On the left, a vertical SW-NE cross-section through the epicentral area shows the depth distribution of the analyzed events. The two regions into which the dataset is split for the determination of the attenuation characteristics are also shown.

Only attenuation effects at distances larger than R_0 can be evaluated. Therefore, even after correcting the data for the attenuation functions, the spectra $R_{ij}(f)$ are still affected by a cumulative attenuation effect over R_0. In the second inversion, separating source and site effects, this residual attenuation is projected into the source contribution, as the site amplification is constrained to be equal to one at the two rock stations MLR and SIR (this constraint is needed to remove the linear dependence between source and site spectra in the second step inversion). In order to remove this remaining attenuation, it is necessary to know at least the value of one source spectrum unaffected by this effect. From the scaling analysis with the empirical Green's functions method (evaluation of stress drop ratio C and scaling factor N from the spectral ratios, OTH ET AL. 2007a,c), the source spectrum of the October 27, 2004 (M_W=5.8) earthquake is known. Therefore, the residual attenuation over R_0 can be corrected from the inverted source spectra.

The results from this study, in combination with the source scaling characteristics derived with empirical Green's functions, provide a complete description of the effects of Vrancea earthquakes (source, path and site) and contribute to their better physical understanding.

Results

Finite-Differences Modeling: Simulation of the August 30, 1986 and October 27, 2004 Earthquakes

We simulated ground motions for the August 30, 1986 and October 27, 2004 earthquakes by combining FD simulation of wave propagation and the known site amplification characteristics of SE Romania (SOKOLOV AND BONJER 2006).

Ten stations, which are located within our model region, recorded the 1986 event. The random velocity fluctuations, which are introduced into the model, produce realistic wave form shapes, but depend strongly on the actual model of random fluctuations beneath the corresponding station. This means that simulation of wave propagation for a set of different random generated fluctuations may produce significantly different waveforms at specific positions. Consequently, it is more appropriate to look at the Fourier amplitude spectra (FAS), which are linked with macroseismic intensity (SOKOLOV 2002) and therefore with damage. We describe the quality of the modeling by comparing modeled and observed FAS. Fig. 6 shows the arithmetic mean of the FAS of the radial and transverse components. Additionally, the reference spectra for intensity VI to X after SOKOLOV (2002) are plotted. The modeled and observed spectra at BUC, CFR, CRL are in good comparison with the observed spectra, which means that the intensity deviation is clearly smaller than one intensity unit. At BAC the modeled spectrum shows slightly smaller amplitudes than the real spectrum. At BAL the modeled values are larger than the observed spectrum. At BAC and BAL the deviation is about one intensity unit. Good comparison is achieved at FOC for frequencies of about 0.5 and 1.5 Hz and for frequencies higher than 3.1 Hz. To give a quantitative measurement of the quality of the modeling, the misfit between observed and modeled spectra of 10 stations is calculated for five frequency ranges (0.11–0.23 Hz, 0.23–0.48 Hz, 0.48–1.02 Hz, 1.02–2.13 Hz, 2.13–4.48 Hz). The misfit for each frequency range is defined as the square residual SR between the logarithmic average observed and modeled spectral values $\log_{10}(S_{obs})$ and $\log_{10}(S_{mod})$ within each frequency range:

$$SR = (\log_{10}(S_{obs}) - \log_{10}(S_{mod}))^2.$$

Fig. 7 displays the residuals of all stations at the center frequencies of the considered frequency ranges and the average values for each frequency range. To get an impression of the quality of the modeling, also the SR that would correspond to a deviation of one intensity unit after SOKOLOV (2002) is shown in Fig 7. Next, the synthetic seismograms are translated into macroseismic intensities. This allows an area-wide comparison between modeling and observation and not only a point wise comparison at the location of seismic stations. The relation between FAS and intensities are given by SOKOLOV (2002).

As each intensity value is assigned to a representative frequency range, the minimum intensity which can be evaluated for frequencies up to 4.5 Hz is about VI.

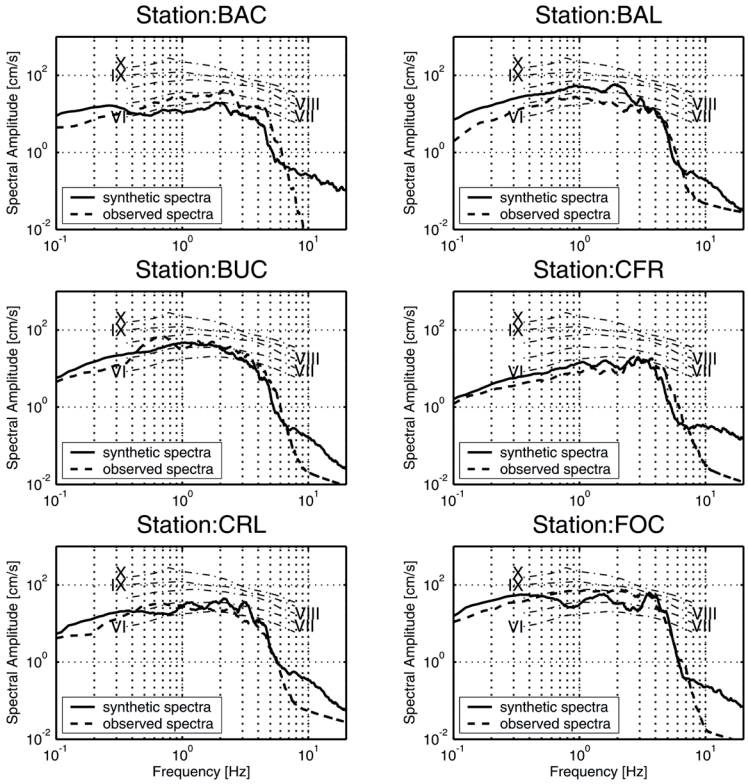


Figure 6: 2.5D modeling of the 1986 earthquake: Modeled and observed Fourier amplitude spectra (FAS) at BAC, BAL, BUC, CFR, CRL and FOC and reference spectra for macroseismic intensities VI to X after Sokolov (2002).

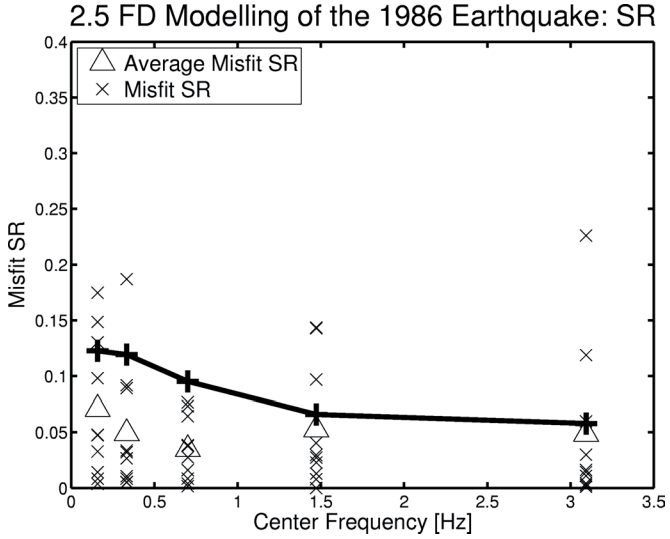


Figure 7: Misfit between the observed and modeled spectra of the 1986 earthquake. Misfit SR is plotted at the center frequencies. The triangles give the average value for each frequency range. The bold black lines correspond to a deviation of one intensity unit.

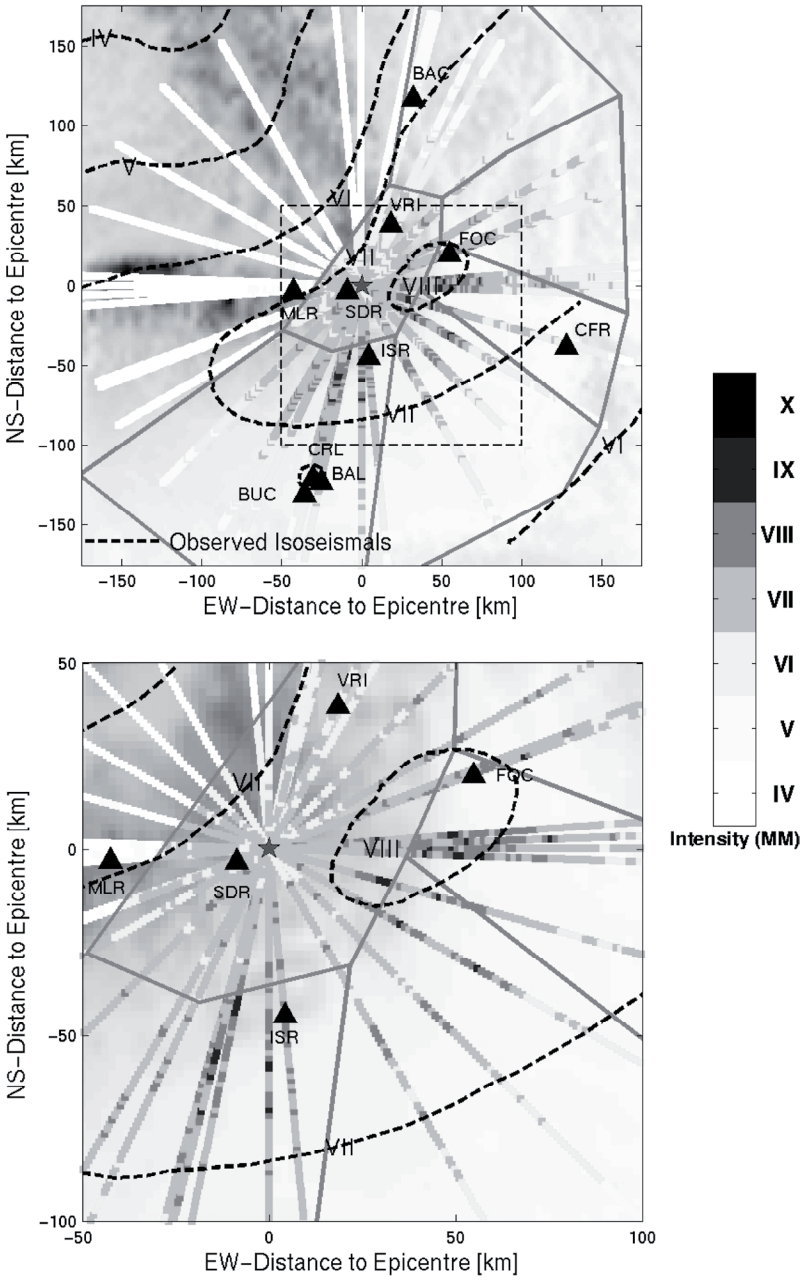


Figure 8: 2.5D modeling of the 1986 earthquake: The map shows the modeled macroseismic intensities for 20 profiles. The dashed lines indicate the observed isoseismal lines of the 1986 earthquake. A detailed view of the intensities within the dashed rectangle indicated in the top image is shown in the bottom image.

The resulting calculated and observed intensity distributions of the 1986 earthquake are shown in Fig. 8.

Next, we simulated ground motions for the 2004 earthquake. Twelve stations that are located within our model region recorded the event. Fig. 9 displays the misfit SR within the same frequency ranges as for the 1986 earthquake. The average SR values for each frequency range are lower than 0.11, which is about the same as in the modeling of the 1986 earthquake (see Fig. 7).

Only for stations SEC and FUL the misfit SR shows in more than one frequency range larger values than the maximum misfits for the 1986 earthquake. As the representative frequency range of the observed intensities of the 2004 earthquake are larger than the frequency range of the modeling, the SR that corresponds to one intensity value is not plotted in Fig. 9.

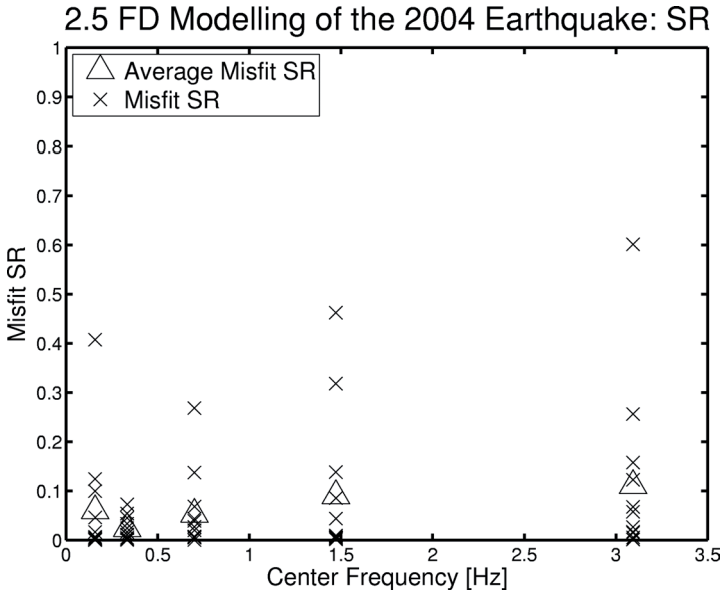


Figure 9: Misfit between the observed and modeled spectra of the 2004 earthquake. Misfit SR is plotted at the center frequencies. The triangles give the average value for each frequency range.

Source Parameters and Scaling of Vrancea Earthquakes with Empirical Green's Functions

As OTH ET AL. (2007a,c) show, the four analyzed Vrancea earthquakes can be well reproduced using the SMGA source models depicted schematically in Fig. 10 and listed in Table 2. The dimensions and rise times obtained during the inversion for the October 2004 and March 1977 events are remarkably small (around 2 km^2 for the former, 65–90 km^2 for the latter). For the August 1986 and May 2005 earthquakes, they are somewhat larger (approximately 160 km^2 for the former and 12 km^2 for the latter). The rise times are very small for all four analyzed Vrancea earthquakes, which directly leads to the conclusion that all of these events show a high particle velocity on the fault and a large static stress drop. From the spectral ratios between the mainshock and each respective EGF event, the stress drop ratio between them was derived and indicates roughly self-similar scaling (OTH ET AL. 2007a,c).

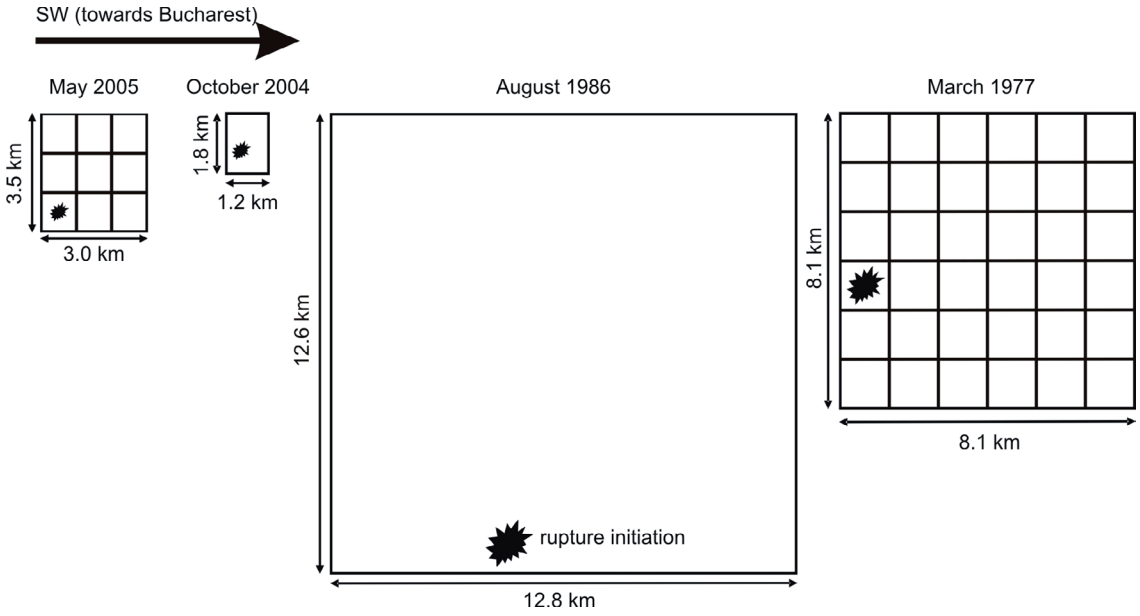


Figure 10: Sketches of the source models for the four Vrancea earthquakes analyzed. The relative dimensions are scaled correctly and the rupture imitation location is depicted by a star. Note the very similar size of the subfault of the March 1977 and the source model of the October 2004 events.

Table 2: Lowest misfit SMGA models resulting from 5 consecutive runs of the genetic algorithm for each target event with for the 2004, 1986 and 2005 earthquakes. The position of rupture initiation is given as normalized value in the interval [0 1] for the first two events, as these have been inverted using several EGF's, whereas it is given absolutely for last two (Oth et al. 2007a,c).

TARGET	v_R/v_S	L [km]	W [km]	T_r [s]	pos. along strike	pos. along dip
October 2004 (M_W=5.8)	0.9	1.16	1.78	0.11	0.3	0.7
August 1986 (M_W=7.1)	0.7	12.84	12.60	0.26	0.4	1.0
March 1977 (M_W=7.4, L:W=1:1)	0.9	8.13	8.13	0.96	1	4
May 2005 (M_W=5.2)	0.9	3.04	3.67	0.08	1	3

Regarding the 1977 earthquake, the lowest misfit SMGA model can explain the observed record at station Incerc (named INB in this study) very well, even though this record was not entering the inversion and hence constitutes an independent piece of information. Moreover, the SMGA size for the 2004 event is in good agreement with the subfault size of the 1977 best model.

Thus, these results are indeed consistent with each other. RADULIAN ET AL. (2007) determined similar dimensions for the 2004 event's asperity from the pulse width of the source time function after deconvolution of an empirical Green's function.

The March 1977 as well as the October 2004 earthquakes seem to show 2–3 times larger (static) stress drops than the August 1986 event. Furthermore, all the events analyzed seem to be similar from the dynamic point of view, as they depict almost identical particle velocities and thus, almost identical dynamic stress drops ranging around 1kbar (OTH ET AL. 2007a). These large particle velocities are responsible for the strong high-frequency radiation. The stress drops and particle velocities are about one order of magnitude larger than for crustal earthquakes. MIYAKE ET AL. (2003) showed that the SMGA is equivalent to an asperity of about 100 bar stress release for crustal earthquakes. The large stress drops and particle velocities should also be taken into consideration when assessing seismic hazard, as they imply a higher energy release than for typical crustal earthquakes.

This study provides both insights into the source physics of the intermediate-depth Vrancea earthquakes, which are inherently different from crustal events, and the scaling relations between small and large earthquakes needed in order to generate a catalogue of synthetic strong motion records of large Vrancea earthquakes.

Generation of a Catalogue of Hypothetical Strong Vrancea Earthquakes with the EGF method

Based on the findings described above (OTH ET AL. 2007a,c), a catalogue of EGF simulations was generated from the same database of small Vrancea earthquakes used for the determination of spectral ground motion models (Fig. 5). The final simulation database comprises 167 events with magnitudes ranging from 5.5 to 8.0.

In Irikura's technique, the fault plane of the large earthquake is constructed from N^2 subfaults of identical size, and N is determined by the following scaling laws (IRIKURA, 1999):

$$\frac{L}{l} = \frac{W}{w} = \frac{T_r}{t_r} = N \text{ and } \frac{\overline{D}}{\overline{d}} = CN \,, \tag{5}$$

where *l*, *w*, $\overline{d}$ and t_r denote the length, width, displacement and rise time of the EGF event and *L*, *W*, $\overline{D}$ and T_r are the same parameters for the large event. *C* is the stress drop ratio (dynamic and static) between the mainshock and EGF earthquake.

In terms of seismic moments M_0 (mainshock) and m_0 (EGF), this means:

$$N = \sqrt[3]{\frac{M_0}{C\, m_0}} \,. \tag{6}$$

As shown by OTH ET AL. (2007a,c), the stress drop ratio *C* ranges from 0.7 to 2. *N* was then derived from the seismic moments using the formula above. The scaling behavior of the other parameters was calibrated with the results from OTH ET AL. (2007a,c). The computed catalogue of synthetics considerably enlarges the available strong motion database from Vrancea earthquakes and is a useful tool in view of seismic hazard assessment.

Results from the Least Squares Inversion (LSI)

From the ground motions we compute Fourier amplitude spectra and invert for five unknown parameters fc, κ, α, Q, and γ. Tables 3 and 4 show results for an inversion computed for DS2 and DS3, respectively. The frequency content was restricted for all inversions to the range between 0.5 Hz and 4.5.

The decrease of the corner frequency fc with increasing magnitude is in good agreement with theoretical source spectra (e.g. STEIN AND WYSESSION 2003). However, our values for fc are higher than one would expect from the theoretical curves, especially our results for spectra computed with the 2D-FD-method. One possible explanation could be that the rupture time used in the FD-computations was possibly shorter than in reality.

Table 3: Inversion results DS2 (0.5–4.5 Hz)

Parameter	M_W = 5.9	M_W = 7.1
fc (Hz)	16.6	6.4
κ	0.09	0.16
α	0.01	0.01
Q	5.1e3	8.4e3
γ	5.1	2.4

Table 4: Inversion results DS3 (0.5–4.5 Hz)

Parameter	M_W = 5.5	M_W = 5.9	M_W = 6.0	M_W = 6.5	M_W = 7.0	M_W = 7.5
fc (Hz)	10.1	7.7	5.8	4.3	3.3	1.0
κ	0.01	0.01	0.02	0.04	0.04	0.05
α	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Q	6.3e3	4.4e3	4.0e3	3.5e3	3.2e3	1.0e3
γ	3.2	2.6	1.9	1.5	1.4	0.2

Also, large corner frequencies could arise from the fact that it could be due to the fact that the stress drops used in the forward modelling are rather high (e.g. 100 MPa for the 2D FD modelling) in accordance with literature (e.g. SOKOLOV ET AL., 2004).

The κ -value takes values of 0.09 (M_W = 5.9) and 0.16 (M_W = 7.1) for the FD-simulations and ranges from 0.01 (M_W = 5.5, M_W = 6.0) to 0.07 (M_W = 7.1) for the EGF-simulations. ATKINSON AND SILVA (1997) showed that the parameter should be considered as magnitude-dependent due to the nonlinear behaviour of the rock. For the Vrancea-region, SOKOLOV ET AL. (2004) suggest to use κ= 0.04 for small and intermediate earthquakes, and κ = 0.08 for large earthquakes. Thus, our inversion results are in good agreement with this suggestion and confirm it numerically.

Anelastic attenuation as described by eq. 4 comprises factor α. There is no obvious magnitude dependence of α.

The frequency-dependent damping factor Q shows average values between 1.0e3 and 8.4e3. It has be shown that Q decreases with increasing frequency leading to stronger damping for higher frequencies (GOTTSCHÄMMER ET AL. 2006).

γ decreases slightly with increasing magnitude, apart from the event M_W = 7.1. This indicates that ground motion from smaller events experiences higher damping due to geometrical spreading than ground motion from larger events.

Spectral Ground Motion Models from Weak and Strong Motion Data

Attenuation Characteristics

In order to investigate the attenuation characteristics beneath Vrancea, the first step of the two-step inversion scheme was applied to the spectral amplitudes at each of the 30 selected frequencies. However, the obtained attenuation functions showed a peculiar feature at frequencies higher than about 4 Hz, namely a strong bump (i.e. amplification with distance instead of attenuation), which takes its maximum value at a hypocentral distance of roughly 180 km (Fig. 11, left panel). The reasons for this bump were explored by synthetic data tests described in OTH (2007). The conclusion was that there must be a severe difference in whole-path attenuation properties for stations located in each of the two different regions depicted in Fig. 5. Region 1 comprises the foreland area, whereas region 2 denotes the epicentral area within the Carpathian mountains.

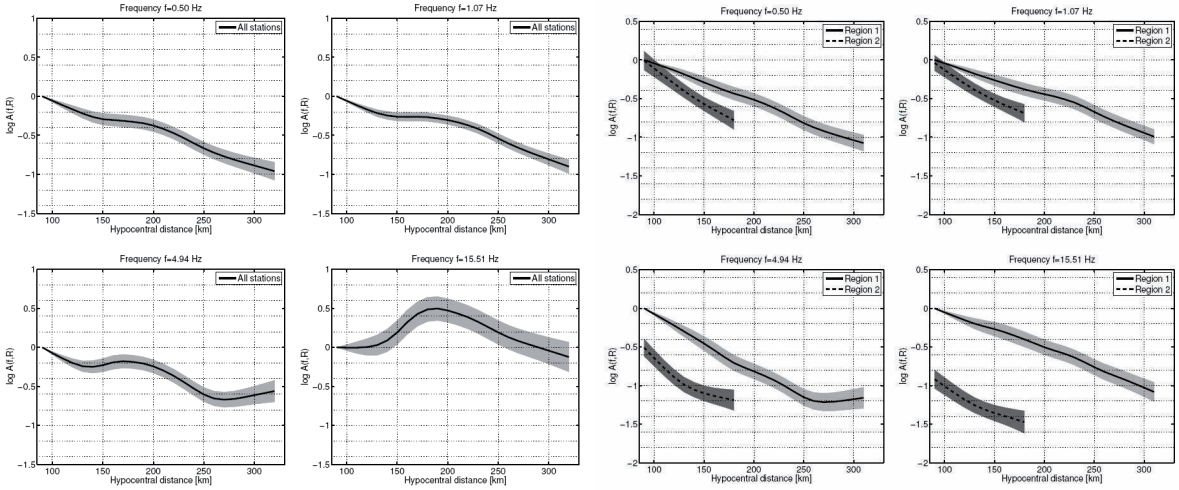


Figure 11: Left: attenuation functions (log A(f, R) versus hypocentral distance R) at four selected frequencies fitting one function to the entire dataset. Note the strong bump at high frequencies. Right: attenuation functions for region 1 (continuous line) and 2 (dashed line). Gray shaded area: ± one standard deviation.

In order to account for these lateral variations in attenuation, two separate attenuation functions were simultaneously inverted for both regions (Fig. 11, right panel). The origin of the function in region 1 at the reference distance R_0 was set to one (respectively zero in log), while the origin of the function in region 2 was free to move with respect to region 1. At low frequencies, the origin is roughly identical in both regions, whereas at high frequencies, a strong offset is visible (about one order of magnitude).

In order to determine the shear wave quality factor $Q_S(f)$, the obtained attenuation functions were normalized to one at distance R_0, corrected for body wave geometrical spreading ($G(R)=R_0/R$) and a straight line was fitted to log $A_{1,2}(f, R)$ plotted versus R (Fig. 12). Thus, only the slope of the functions was evaluated. The obtained $Q_S(f)$-values are shown in Fig. 13 (left panel) for both regions. They are similar: $Q(f)=114\ f^{0.96}$ for region 1 and $Q(f)=81\ f^{1.12}$ for region 2. The main difference resides in the offset of the origins, not in the slopes of the functions.

A possible explanation for the fact that, apparently, the slopes of the attenuation functions are similar is provided in Fig. 13 (right panel). All the earthquake hypocenters are approximately located almost directly vertically below the stations in region 2. Thus, in order to increase the distance in $A_2(f, R)$, the source depth has to be increased. The difference in travel path for two data points at different distances in region 2 are hence related to the path traveled from the deeper event's hypocenter up to the one of the shallower one. As schematically indicated in Fig. 13 (right panel), within the gray shaded area, all the rays travel more or less the same path.

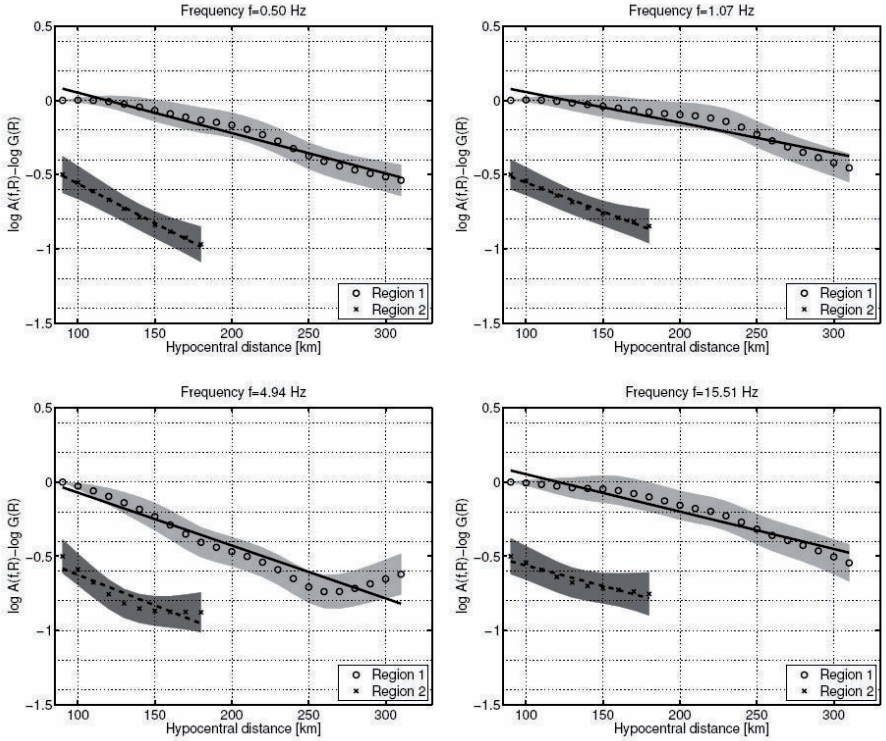


Figure 12: Attenuation functions corrected for geometrical spreading (log A(f,R)–log G(R) versus hypocentral distance R) and fitted straight line at four selected frequencies for region 1 (continuous line) and 2 (dashed line). Both functions are normalized to 0 (in logarithm) at the reference distance R0 (i.e. same origin), but offset with 0.5 in logarithm in these plots for viewing purposes.

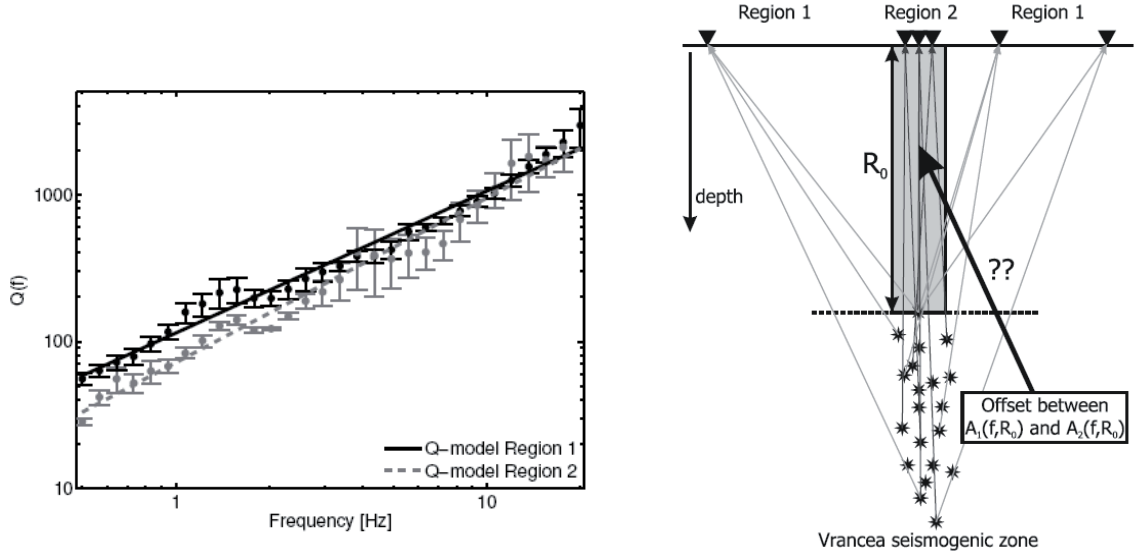


Figure 13: Left panel: derived Q(f) models for region 1 and 2. Right panel: Sketch depicting the ray paths from sources to stations (orientation roughly SW-NE). For the stations in region 2, the rays from different earthquakes all travel the same path through the gray shaded region, which is defined by the depth of the shallowest event in the dataset. Increasing the distance R in the attenuation function for region 2 means to look mainly at data from deeper earthquakes and therefore, only the hypocentral zone is 'sampled'. The offset between the origins of the two attenuation functions is related to a process occurring somewhere in the gray shaded zone.

In conclusion, $A_2(f, R)$ only 'samples' the lower part of the travel path, whereas the large offset observed between $A_1(f, R_0)$ and $A_2(f, R_0)$ is related to some strongly attenuating region somewhere in the gray shaded area, approximately between the shallowest event's hypocenter and the surface.

The seismic tomography results presented by MARTIN ET AL. (2006) and the outcome of the seismic refraction studies (HAUSER ET AL. 2001, 2007), both studies within the framework of the CRC 461, provide indications on the reasons for these strong lateral variations in seismic attenuation. The seismic refraction data (HAUSER ET AL. 2001) suggest the presence of a low-velocity zone at a depth of 47 to 55 km beneath the Vrancea region, which, as SPERNER AND THE CRC 461 TEAM (2005) note, coincides quite well with the observed seismic gap between 40 and 70 km depth already discussed by FUCHS ET AL. (1979). Here, the slab seems to be mechanically decoupled (or only weakly coupled) from the crust through a weak zone. This zone is commonly interpreted as the place where slab detachment currently takes place. This area of weak coupling could be an explanation for the lower spectral amplitudes in the vicinity of the epicentral area (region 2) and the offset between the attenuation functions for the two regions.

Site Amplification and Source Spectra

The spectra were corrected for the effect of attenuation by the functions $A_{1,2}(f, R)$ and inverted in order to retrieve site amplification and source spectra (second step). One constraint (either source or site) is needed in order to remove an undetermined degree of freedom (ANDREWS 1986). As described in OTH (2007), the average of the site amplification at the two rock stations MLR and SIR was constraint to be equal to one.

Some examples of the obtained site amplification functions are shown in Fig. 14. In general, the site functions show large amplification over a wide frequency band, with especially high values at higher frequencies (above about 2–3 Hz). The amplification increases generally with frequency (e.g. SEC, LUC or CER) and stays on a high level, also at frequencies larger than 10 Hz. The analysis was also performed using the vertical component (Z) of ground motion. Here, it is often observed that especially at these very high frequencies, the amplification rises strongly. The maximum amplification on the Z component is generally shifted to higher frequencies than on the horizontal (H) component.

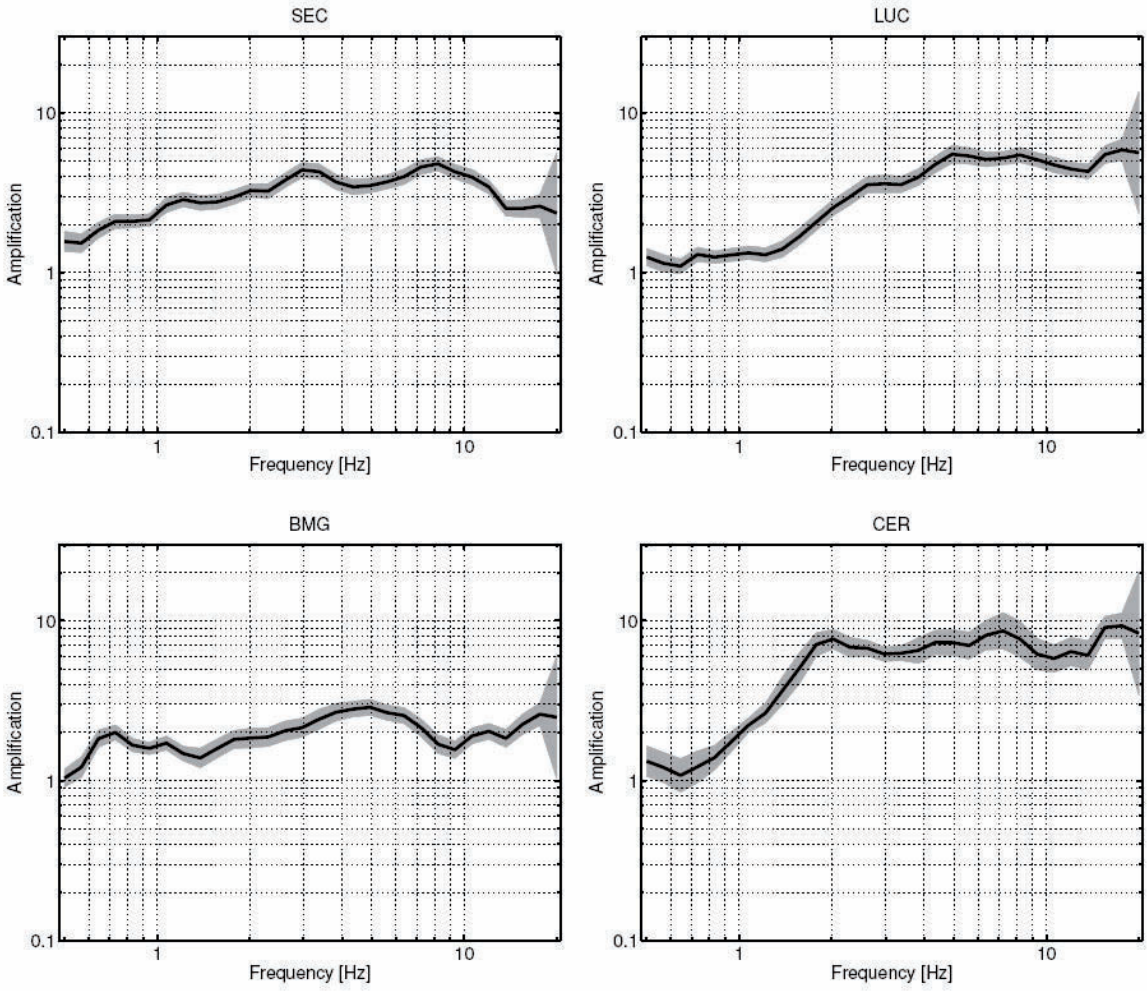


Figure 14: Examples of the obtained site amplification functions in region 1 (H component). Black line: mean of 200 bootstrap samples. Gray shaded area: mean ± one standard deviation.

Regarding the source spectra, an example for the obtained results is shown in Fig. 15 (left panel). The attenuation-corrected spectra still include a cumulative attenuation effect over the reference distance R_0 = 90 km. As the constraint used in the inversion is related to the site functions and does not include this attenuation effect, the latter one is moved into the source spectra.

For one of the events in the database, namely the moderate October 2004 event (M_W=5.8), the source spectrum (unaffected by attenuation) is known from the scaling analysis in the EGF study (OTH ET AL. 2007a,c). Therefore, the inverted source spectra can be corrected for this attenuation effect (OTH 2007). The corrected source spectra follow the ω^{-2}-model (BRUNE 1970, 1971) (Fig. 15, right panel) with high corner frequencies, indicating large stress release (in agreement with the EGF study).

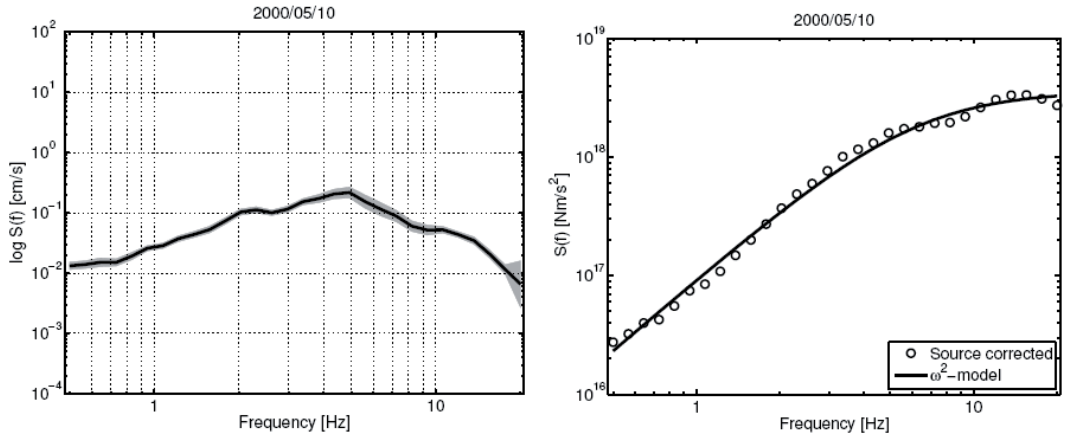


Figure 15: Example for the inverted source functions (left) and source functions corrected for attenuation over R0=90 km (right) for an event of magnitude MW=4.1. The obtained corrected source functions follow the ω–2-model (Brune 1970, 1971).

Fig. 16 shows the obtained corner frequencies plotted versus seismic moment (also determined from the spectra). As expected from the scaling analysis in OTH ET AL. (2007a,c), the scaling of the corner frequency approximately follows a self-similar trend, even though there are only few data points available with large seismic moments.

In summary, all the components of ground motion necessary for the description of the FAS (and hence for stochastic simulation) of Vrancea earthquakes have been discussed. The work presented constitutes a complete spectral model, starting from the source spectrum (where, together with the knowledge from the source study with empirical Green's functions, the corner frequency of any event with a given seismic moment can be computed) via the attenuation characteristics (where the quality factor $Q_S(f)$ has been determined) and ending with the obtained site amplification functions.

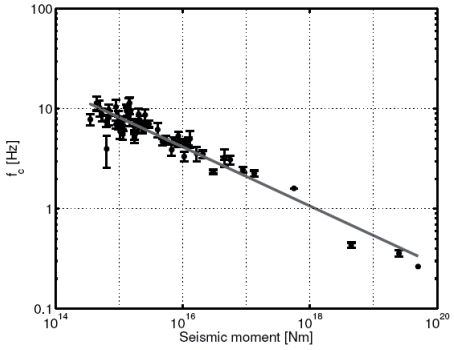


Figure 16: Corner frequencies of corrected source spectra versus seismic moment. The fitted straight line has a slope of –0.3, which is close to the expected value –1/3 in case of self-similarity.

5.2.1.3 Comparison with Research Outside the CRC

SUZUKI AND IWATA (2005) present SMGA parameters from a very similar study than the one performed here with empirical Green's functions for ten Japanese interplate earthquakes (with depths ranging between 30 and 50 km, which is somewhat shallower than the Vrancea events, but yet larger than for typical crustal earthquakes). These earthquakes show a very similar scaling behavior of the SMGA, although the scatter (especially in the rise time estimates) is also rather large (OTH ET AL. 2007c). Within the uncertainity ranges, the results obtained for the four Vrancea earthquakes can be regarded to be compatible with the ones of SUZUKI AND IWATA (2005). Thus, there is a line of evidence which leads to the conclusion that the scaling behavior for intermediate-depth earthquakes is rather different of the one for crustal earthquakes. The former ones show a much larger particle velocity and static stress drop, and these facts have to be taken into account when performing strong motion simulations and when assessing seismic hazard from this type of earthquakes.

The attenuation characteristics in the Carpathians have also been investigated by other authors. POPA ET AL. (2005), from a rather qualitative analysis of eight small magnitude Vrancea earthquakes which were recorded during the CALIXTO experiment in 1999 (e.g. MARTIN ET AL. 2006), come to the conclusion that in the Transylvanian basin (behind the mountain arc), the epicentral area and the Eastern Carpathians, the spectral amplitudes are lower by up to a factor of 100 compared to those in the foreland platform (region 1 in this work). They also find that the difference in attenuation is much stronger at higher frequencies than at lower ones and that it is most likely not attributable to source or site effects.

RUSSO ET AL. (2005) worked with data from the same network (the accelerometric K2-network). They used 65 small magnitude (mostly smaller than 4) earthquakes recorded in 1999. With several restrictive assumptions (the first one is that the site effect is equal for the S-wave window on the H component and P-wave window on the Z component, and the second one is that the source spectra for P- and S-waves are identical), they used the spectral ratio between the S-wave on the H components and the P-wave on the Z component to derive differential δt^* measurements. If a certain relation is assumed between Q_P and Q_S, an estimate of Q_S can be derived. Even though there may be some stations with a systematic error due to strong site effects, the problematic aspects mentioned above might average out if one looks at the entire dataset rather than a single station or single Q_S estimates. In summary, they find high attenuation (low Q_S) at stations VRI, SIR, OZU and MLR (which are all situated in region 2 defined here) and low attenuation in the foreland (region 1). The results of these two studies are in good agreement with those obtained here.

ONCESCU ET AL. (1999a) used a similar approach as presented here to separate source and site contributions from a (much smaller) dataset of strong (the four large

Vrancea events in 1977, 1986 and 1990) and weak motion (recorded from 1985–1990) spectra from Vrancea earthquakes. They determined a Q(f)-model for S-waves ($Q(f) = 109\ f^{0.81}$) by using the coda waves from two Vrancea earthquakes at station Incerc in Bucharest (derived with a very small amount of data, but relatively close to the results obtained for region 1 in this study) and corrected the spectra for attenuation and geometrical spreading before performing the inversion. As a site constraint, they used the transfer function calculated from geotechnical data at station Incerc. The different correction of attenuation and the different site constraint make a direct comparison of the results difficult. However, they observe for instance a very strong deamplification at station MLR at high frequencies (also deamplification at VRI), which is most likely due to the fact that their attenuation model is inappropriate for these sites. They did not find strong evidence for nonlinearity by comparing the site functions derived from weak and strong motion data. It is also worth noting that the transfer function which they computed at station Incerc shows a level of amplification quite similar to the amplification function obtained in this work at station INB.

5.2.1.4 Open Questions

The work plan as specified in the application document has been essentially carried out. 3D Modelling and EGF method show promising results, however modelling suffers from a fundamental difficulty as soon as high frequencies are concerned. The (unknown) scattering properties of the earth's mantle and crust dominate seismograms as soon as the observational distance amounts to many wavelengths – how many depends on the parameters that quantify scattering. As a result, the synthetics look always much simpler than the observations and waveform comparisons become difficult. The improvement of the structural model does not help. This raises the question of what can be modelled: The entire wavefield, e.g. the time series or the Fourier amplitude and phase spectrum or for instance the Fourier amplitude spectrum alone. The quantification of the scattering properties may be a possibility, but detracts from the main purpose of modelling. The conclusion is that

- either significant knowledge on deterministic structural properties of the material within which the waves propagate AND knowledge on the scattering features are required in order to match high-frequency waveforms, or
- hybrid solutions are utilized that combine low-frequency numerical modelling with high-frequency EGFs, or
- only parts of the wavefield (e.g. the Fourier amplitude spectrum) are modelled.

Answers to these questions are sought in a DFG funded project on wavefield modelling for the Taipei Basin in Taiwan.

The original idea of azimuth-depended joint inversion of all three data sets (observed accelerograms, EGF-synthesized accelerograms, FD-modelled accelerograms) did

not turn out very fruitful as the data sets are essentially disjoint, rather than overlapping and complementary. This, however, did not prevent us reaching the scientific goals of A7, as pointed out in the discussion of reported results. Nevertheless, our approach to a better understanding of observed accelerograms by using several methods – empirical analysis and stochastic modelling, Finite Difference modelling, EGF analysis – is most promising and will be used in future work.

We did not manage to work on point D4 of the work plan, where we wanted to include non-linear effects of soft sediments by empirical means. Reason for this is the lack of conclusive information on how much non-linearity is included in the few strong motion records that are available in Romania. The degree of non-linearity remains a matter of debate and is – at least in a way that allows to exploit it for empirical corrections – no acceptable database for the proposed work. Nevertheless, we believe that this remains an important issue as EGF up-scaling and numerical modelling usually suffer from this constraint. Thus this question remains on the research agenda of earthquake engineering in Karlsruhe, where we can exploit the proven co-operation between applied geology, soil mechanics, structural engineering, and geophysics in the future as well.

5.2.1.5 - A7 Reason for Terminating the Project

The project A7 ends due to the completion of the CRC 461.

5.2.1.5 - A7 Literature

Andrews, D. J. (1986): Objective Determination of Source Parameters and Similarity of Earthquakes of Different Size. In: Das, S., Boatwright, J., and Scholz, C. H., editors, Earthquake Source Mechanics. American Geophysical Monograph, Vol. 37: 259–267.

Atkinson, G.M., Silva, W. (1997): An empirical study of earthquake source spectra for California earthquakes. BSSA, Vol. 87:1, 97–113.

Beresnev, I.A. and Atkinson, G.M. (1997): Modeling finite-fault radiation from the w**n spectrum, BSSA, Vol. 87, 1: 67–84.

Beresnev, I.A. and Atkinson, G.A. (1998): FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. Seismol. Res. Lett., 69. 1: 27–32.

Bindi, D., Parolai, S., Grosser, H., Milkereit, C., Karakisa, S. (2006): Crustal Attenuation Characteristics in Northwestern Turkey in the Range from 1 to 10 Hz. Bull Seismol. Soc. Am., Vol. 96: 200–214.

Bonjer, K.-P., Oncescu, M.C., Driad, L., Rizescu, M. (1999): A Note on Empirical Site Responses in Bucharest, Romania. In Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O., (eds), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 149–162.

Boore, D.A., Joyner, W.B. and Fumal, T.E. (1997): Equations for estimating horizontal response spectra and peak acceleration from western North American earthquakes: A summary of recent work. Seismol. Res. Lett., Vol. 68, 1.

Boore, D.M. (2003): Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. Pure Appl. Geophys., Vol. 160: 635–676.

Brune, J.N. (1970): Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes. J. Geophys. Res., Vol. 75: 4997–5009.

Brune, J.N. (1971): Correction. J. Geophys. Res., 76, 5002.

Castro, R.R., Anderson, J.G., Singh, S.K. (1990): Site Response, Attenuation and Source Spectra of S Waves along the Guerrero, Mexico, Subduction Zone. *Bull.* Seismol. Soc. Am., Vol. 80: 1481–1503.

Diehl, T., Ritter, J.R.R., CALIXTO group (2005): The crustal structure beneath SE Romania from teleseismic receiver functions. Geophys.J.Int., Vol. 163(1):238–251.

Frankel, A., Stephenson, W. (2000): Three-dimensional simulation of ground motions in the Seattle region for earthquakes in the Seattle Fault Zone. BSSA., Vol. 90, 5: 1251–1267.

Fuchs, K., Bonjer, K.-P., Bock, G., Cornea, I., Radu, C., Enescu, D., Jianu, D., Nourescu, A., Merkler, G., Moldoveanu, T., Tudorache, G. (1979): The Romanian Earthquake of March 4, 1977: II. Aftershocks and Migration of Seismic Activity. Tectonophysics, Vol. 53: 225–247.

Gottschämmer, E., Oth, A., Miksat, J., Wenzel, F. (2006): Hybrid Modelling of Ground Motion. 1st ECEES, Geneva, Abstract Nr. 759.

Grecu, B., Sokolov, V., Bonjer, K.-P. (2004): Analysis of site response characteristics, in Romania using earthquake records obtained during the Calixto experiment. XXIX General Assembly of the European Seismological Commission, Potsdam, book of abstracts and papers.

Hartzell, S.H. (1978): Earthquake Aftershocks as Green's Functions. Geophys. Res. Lett., 5, 1.

Hartzell, St., Leeds, A., Frankel, A., Williams, R.A., Odum, J., Stephenson, W., Silva, W. (2002): Simulation of broadband ground motion including nonlinear soil effects for a magnitude 6.5 earthquake on the Seattle Fault, Seattle, Washington. BSSA, Vol. 92, 2: 831–853.

Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Bala, A., Prodehl, C., Polonic, G., Schulze, A. (2001): VRANCEA99 – The Crustal Stucture Beneath the SouthEastern Carpathians and the Moesian Platform from Seismic Refraction Profile in Romania. Tectonophysics, Vol. 340:233–256.

Hauser, F., Raileanu, V., Fielitz, W., Dinu, C., Landes, M., Bala, A., Prodehl, C. (2007): Seismic Crustal Structure Between the Transylvanian Basin and the Black Sea, Romania. Tectonophysics, Vol. 430:1–25.

Hock, S., Korn, M., Ritter, J.R.R., Rothert, E. (2004): Mapping random lithospheric heterogeneities in northern and central Europe. Geophys. J. Int., Vol. 157(1): 251–264.

Irikura, K. (1983): Semi-Empirical Estimation of Strong Ground Motions during Large Earthquakes. Bull. Dis. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., 33, Part 2, No. 298.

Irikura, K. (1986): Prediction of Strong Acceleration Motions Using Empirical Green's Functions. In: Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium.

Irikura, K. (1999): Techniques for the Simulation of Strong GroundMotion and Deterministic Seismic Hazard Analysis. In: Proceedings of the Advanced Study Course Seismotectonics and Microzonation Techniques in Earthquake Engineering: Integrated Training in Earthquake Risk Reduction Practices. Kefallinia.

Kamae, K., Irikura, K. (1998): Source Model of the 1995 Hygo-ken Nanbu Earthquake and Simulation of Near-Source Ground Motion. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 88: 400–412, Kefallinia.

Karrenbach, M. (1995): Elastic tensor wave fields. PhD thesis, Stanford University.

Konno, K., Ohmachi, T. (1998): Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 88: 228–241.

Landes, M., Fielitz, W., Hauser, F., Popa, M., CALIXTO Group (2004): 3-D upper crustal tomographic structure across the Vrancea seismic zone, Romania. Tectonophysics, Vol. 382:1–2, 85–102.

Martin, M., Ritter, J. R. R. and the CALIXTO working group (2005). High-resolution teleseismic body-wave tomography beneath SE Romania – I. Implications for three-dimensional versus one-dimensional crustal correction strategies with a new crustal velocity model. Geophys.J Int., Vol. 162: 448–460.

Martin, M., Wenzel, F., CALIXTO working group (2006): High-Resolution Teleseismic Body Wave Tomography Beneath SE-Romania (II): Imaging of a Slab Detachment Scenario. Geophys.J.Int., Vol. 164:579–595.

Miksat, J., Müller, T., Wenzel, F. (2008): Simulating 3D seismograms in 2.5D structures by combining 2D finite-difference modeling and ray tracing. Geophys. J. Int., in print.

Miksat, J., Wenzel, F., and Sokolov, V. (2005): Low Free-Field Accelerations of the 1999 Kocaeli Earthquake? Pure Appl. Geophys., Vol.162:857–874.

Miyake, H., Iwata, T., Irikura, K. (2003): Source Characterization for Broadband Ground-Motion Simulations: Kinematic Heterogeneous Source Model and Strong Motion Generation Area. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 93: 2531–2545.

Olsen, K.B. (1994): Simulation of three-dimensional wave propagation in the Salt Lake Basin. PhD thesis. University of Utah, Salt Lake City.

Olsen, K.B. (2000): Site amplification in the Los Angeles Basin from three-dimensional modeling of ground motion. BSSA, Vol. 90, 6B: 77–94.

Oncescu, M. C., Bonjer, K.-P., Rizescu, M. (1999a): Weak and Strong Ground Motion of Intermediate Depth Earthquakes from the Vrancea Region. In Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O., (eds), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 27–42.

Oncescu, M. C., Marza, V. I., Rizescu, M., Popa, M. (1999b): The Romanian Earthquake Catalogue Between 984–1997. In Wenzel, F., Lungu, D., and Novak, O., (eds), Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 43–45.

Oth, A., Wenzel, F., and Radulian, M. (2007a): Source Parameters of Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes from Empirical Green's Functions Modeling. Tectonophysics, Vol. 438:33–56.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2007b): Parameterization of a Composite Attenuation Relation for the Dead Sea Area Based On 3-D Modeling of Elastic Wave Propagation. Pure Appl. Geophys., Vol. 164:23–37.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2007c): Source scaling of intermediate-depth Vrancea earthquakes with empirical Green's functions. Proceedings, Int. Symposium ion Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest , 4–6 October 2007, Matrix Rom Press, 103–118.

Oth, A. (2007): Source Processes and Spectral Ground Motion Models of Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes. PhD thesis, Unversität Karlsruhe (TH), Germany.

Parolai, S., Bindi, D., Augliera, P. (2000): Application of the Generalized Inversion Technique (GIT) to a Microzonation Study: Numerical Simulations and Comparison with Different Site-Estimation Techniques. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 90: 286–297.

Parolai, S., Bindi, D., Baumbach, M., Grosser, H., Milkereit, C., Karakisa, S., Zünbül, S. (2004): Comparison of Different Site Response Estimation Techniques Using Aftershocks of the 1999 Izmit Earthquake. Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 94: 1096–1108.

Popa, M., Radulian, M., Grecu, B., Popescu, E., Placinta, A. O. (2005): Attenuation in South-Eastern Carpathians Area: Result of Upper Mantle Inhomogeneity. Tectonophysics, Vol. 410: 235–249.

Radulian, M., K-P Bonjer, E. Popescu, M. Popa, C. Ionescu and B. Grecu (2007): The October 27th, 2004 Vrancea (Romania) earthquake. ORFEUS newsletter, 7, No. 1.

Russo, R. M., Mocanu, V., Radulian, M., Popa, M., Bonjer, K.-P. (2005): Seismic Attenuation in the Carpathian Bend Zone and Surroundings. Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 237: 695–709.

Sokolov, V. Y. (2002): Seismic Intensity and Fourier Acceleration Spectra: Revised Relationships. Earthquake Spectra, Vol. 18:161–187.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Wenzel, F. (2004): Accounting for site effect in probabilistic assessment of seismic Hazard for Romania and Bucharest: A Case of Deep Seismicity in Vrancea Zone, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol. 24:929–947.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P. (2006): Modeling of distribution of ground motion parameters during strong Vrancea (Romania) Earthquakes. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, paper no. 363.

Sperner, B. and the CRC 461 Team (2005): Monitoring of Slab Detachment in the Carpathians. In Wenzel, F., (ed.), Perspectives in Modern Seismology. Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 105, Springer Verlag, Berlin, pp. 189–204.

Stein, S., Wysession, M. (2003): An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure, Blackwell Publishing.

Suzuki, W., Iwata, T. (2005): Source Characteristics of Interplate Earthquakes in Northeast Japan Inferred from the Analysis of Broadband Strong-Motion Records. Eos Trans. AGU*, 86(52),* Fall Meeting Suppl., Abstract S43A – 1040.

Wu, F. (1978): Prediction of Strong Groudn Motion using Small Earthquakes. In: Proc. of 2nd Int. Microzonation Conf., San Francisco, California, Vol. 2: 701–704.

Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva, W.J. and Humphrey, J.R. (1997): Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. Seismol. Res. Lett., Vol. 68,1: 58–73.

5.2.2 List of Publications Resulting from the Project since the Last Proposal

5.2.2.1 Peer-reviewed publications

a) in scientific journals

Miksat, J., Müller, T., Wenzel, F. (2008): Simulating 3D seismograms in 2.5D structures by combining 2D finite-difference modeling and ray tracing. Geophys. J. Int., in print.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2007a): Source Parameters of Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes from Empirical Green's Functions Modeling. Tectonophysics, Vol. 438: 33–56.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2007b): Parameterization of a Composite Attenuation Relation for the Dead Sea Area Based On 3-D Modeling of Elastic Wave Propagation. Pure Appl. Geophys., Vol. 164: 23–37.

Wenzel, F. & Marmureanu, G. (2007): Rapid earthquake information for Bucharest. Pure & Applied Geophysics, doi.org/10.1007/s00024-007-0198-3.

Weidle, C., Wenzel, F. Ismail-Zadeh, A. (2007): t*- an unsuitable parameter to characterize anelastic attenuation in the Eastern Carpathians. GJI, 170,3, 1139–1150, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007-03441.x.

Wenzel, F. (2006): Earthquake risk reduction – obstacles and opportunities, European Review, Vol. 14, 2: 221–231.

b) at major scientific conferences

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2007): Source Scaling for Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes With Empirical Green's Functions. Geophys. Res. Abs., 9, 01880.

Gottschämmer, E., Oth, A., Miksat, J., Wenzel, F. (2006): Hybrid Modelling of Ground Motion. 1st ECEES, Geneva, Abstract Nr. 759.

Miksat, J., Oth, A., Sokolov, V., Wenzel, F. (2006): Strong Ground Motion Modeling of the August 30, 1986 Vrancea (Romania) earthquake (M_W = 7.2). 1st ECEES, Geneva, Abstract 826.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2006): 3D Modeling of Elastic Wave Propagation in the Dead Sea Area. 26th IUGG Conference on Mathematical Geophysics, Sea of Galilee, Israel.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2006): A Source Parameter Study of the October 27th, 2004 Vrancea (Romania) earthquake from empirical Green's functions modeling. Geophys. Res. Abs., 8, 02863.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2006): Herdparameter des Vrancea (Rumänien) Bebens vom 27. Oktober 2004 (M=5.9) durch Modellierung mit empirischen Green'schen Funktionen, DGG Annual Meeting.

Wenzel, F., Schmitt, G., Gottschämmer, E., Sokolov, V., Sperner, B., Hannich, D., Böse, M., Markus, M., Lungu, D., Marmureanu, G. (2006): Earthquake Risk Research in Romania – 10 Years of Collaborative Efforts. 1st ECEES, Geneva, Abstract Nr. 1749.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2005): Design of a Composite Attenuation Relation for the Dead Sea Area Based on 3D Modeling of Elastic Wave Propagation. Eos Trans. AGU, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D – 1044.

c) in monographs

none

5.2.2.2 Non Peer-Reviewed Publications

a) in scientific journals

none

b) at major scientific conferences

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2007c): Source scaling of intermediate-depth Vrancea earthquakes with empirical Green's functions. Proceedings, Int. Symposium ion Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest , 4–6 October 2007, Matrix Rom Press, 103–118.

c) in monographs

Miksat, J. (2006): Earthquake Ground Motion Modelling from Crustal and Intermediate Depth Sources. PhD thesis, Unversität Karlsruhe (TH), Germany.

Oth, A. (2007): Source Processes and Spectral Ground Motion Models of Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes. PhD thesis, Unversität Karlsruhe (TH), Germany.

5.2.2.3 Oral Presentations

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2007): Source Scaling for Intermediate-Depth Vrancea (Romania) Earthquakes With Empirical Green's Functions. Geophys. Res. Abs., 9, 01880.

Gottschämmer, E., Oth, A., Miksat, J., Wenzel, F. (2006): Hybrid Modelling of Ground Motion. 1st ECEES, Geneva, Abstract Nr. 759.

Miksat, J., Oth, A., Sokolov, V., Wenzel, F. (2006): Strong Ground Motion Modeling of the August 30, 1986 Vrancea (Romania) earthquake (M_W = 7.2). 1st ECEES, Geneva, Abstract 826.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2006): 3D Modeling of Elastic Wave Propagation in the Dead Sea Area. 26th IUGG Conference on Mathematical Geophysics, Sea of Galilee, Israel.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2006): A Source Parameter Study of the October 27th, 2004 Vrancea (Romania) earthquake from empirical Green's functions modeling. Geophys. Res. Abs., 8, 02863.

Oth, A., Wenzel, F., Radulian, M. (2006): Herdparameter des Vrancea (Rumänien) Bebens vom 27. Oktober 2004 (M=5.9) durch Modellierung mit empirischen Green'schen Funktionen, DGG Annual Meeting.

Wenzel, F., Schmitt, G., Gottschämmer, E., Sokolov, V., Sperner, B., Hannich, D., Böse, M., Markus, M., Lungu, D., Marmureanu, G. (2006): Earthquake Risk Research in Romania – 10 Years of Collaborative Efforts. 1st ECEES, Geneva, Abstract Nr. 1749.

Oth, A., Wenzel, F., Wust-Bloch, H., Gottschämmer, E., Ben-Avraham, Z. (2005): Design of a Composite Attenuation Relation for the Dead Sea Area Based on 3D Modeling of Elastic Wave Propagation. Eos Trans. AGU, 86 (52), Fall Meet. Suppl., Abstract S51D – 1044.

5.3 Approval funds for the current funding period

The project was funded in the Collaborative Research Centre from January 2005 to December 2007.

Financial year	Funding for staff	Funding for direct costs	Funding for instrumentation	Total
Up to 2004	0	0	0	0
2005	96.600	500	0	97.100
2006	100.200	500	0	100.700
2007	70.800	500	0	71.300
Total	**267.600**	**1.500**	**0**	**269.100**

5.3.1 Staffing of the Project

	Name, acad. title, position	Field of research	Department of the university or non-universitary institution	Employed by the SFB from (month/year) until (month/year)	Salary scale
Core support					
Research assistants (incl. student assistants)	Wenzel, F., Prof. Dr. Weidle, C., Dr. Radulian, M., Dr. Lungu, D., Prof. Dr. Gudehus, G., Prof. Dr.	Geophysics Geophysics Geophysics Civil Engineering Soil Mechanics	GEOK GEOK NIEP Bukarest UTCB/INCERC IBF	07/1996–12/2007 06/2002–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 07/1999–12/2007	
Non-scientific assistants	Knopf, P., Dipl.Inf.(FH) Nadolny, T.		GEOK GEOK	01/2005–12/2007 01/2005–12/2007	
Auxiliary support					
Research assistants (incl. student assistants)	Miksat, J., Dr. Gottschämmer, E., Dr. Oth, A., Dr. Martin, M., Dr. Nolte, E.-M., Dipl.-Geol. Bartlakowski, J., Dipl.-Geophys.	Geophysics Geophysics Geophysics Geophysics Geophysics Geophysics	GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK GEOK	05/2002–01/2007 01/2005–12/2007 05/2005–12/2007 07/2000–03/2005 06/2007–12/2007 07/2006–12/2006[1]	0,5 E13 0,5 E13 0,5 E13 E13 0,5 E13 0,5 E13
Non-scientific assistants					

[1] vorher in B3

Teilprojekt B1

Dreidimensionale Plattenkinematik in Rumänien

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Prof. Dr.-Ing. Günter Schmitt [1]
Dr.-Ing. André Nuckelt [1]
Dipl.-Ing. Andreas Knöpfler [1]
Dr. Constantin Marcu [2]

[1] Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
[2] UTCB, Bukarest, Rumänien

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt B1

5.1.1 Titel: Dreidimensionale Plattenkinematik in Rumänien

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Geodäsie, Geodynamik

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Schmitt, Günter, 26.10.1944

Geodätisches Institut
Universität Karlsruhe (TH)
Englerstr. 7
76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-2304
Telefax: 0721/608-6552
E-Mail: schmitt@gik.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dr.-Ing. André Nuckelt
Dipl.-Ing. Andreas Knöpfler
Dr.-Ing. Michael Nutto

5.1.5 Rumänische Partner:

Dr. Constantin Marcu, Fakultät für Geodäsie, UTCB, Bukarest
Prof. Dr. Victor Mocanu, Universität Bukarest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das geodätische Teilprojekt B1 beschäftigt sich mit der Bestimmung dreidimensionaler Bewegungen und Deformationen der Erdkruste im mittleren und östlichen Bereich Rumäniens mit dem Zentrum in der Vrancea-Region durch wiederholte Messung des GPS-Überwachungsnetzes. Im Zeitraum der vierten und letzten Bewilligungsphase wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Das GPS-Überwachungsnetz ist beobachtet und eine komplette Neuauswertung sämtlicher Beobachtungsdaten durchgeführt worden.
- Im Jahr 2006 erfolgte unter Zusammenlegung der Ressourcen von SFB 461 und des Department of Earth Observation and Space Systems der TU Delft (im Rahmen des niederländischen Forschungsprogramms „Integrated Solid Earth Sciences“) eine gemeinsame Messung des Überwachungsnetzes.
- In den Jahren 2005 und 2007 wurde das Netz durch die niederländischen und rumänischen Kollegen mit technischer Unterstützung durch den SFB 461 gemessen.
- Die komplette Neuauswertung sämtlicher Beobachtungen erfolgte mit der Bernese GPS Software 5.0 mit state-of-the-art Prozessierungsstrategien.
- Um das Problem der Diskrepanzen in den Zeitreihen der Höhen-Koordinaten zu lösen, sind detaillierte Untersuchungen zur GPS-Antennenkalibrierung und zum Einfluss von Mehrwegsignalen durchgeführt worden.
- Für die seit 1999 vorliegenden Daten der vom BKG eingerichteten Permanentstation Bukarest (BUCU) wurden Zeitreihenanalysen durchgeführt.
- Im Rahmen von Einzelpunktanalysen erfolgte sowohl die Schätzung der Höhen-Offsets als auch die dreidimensionale koordinatenbezogene Deformationsanalyse in ellipsoidischen Koordinaten.
- Aus den Stationsbewegungen wird ein Geschwindigkeitsfeld generiert. Dabei werden B-Spline-Techniken eingesetzt, für die eine Implementierung der Varianzfortpflanzung erfolgte.
- Auf Basis des Geschwindigkeitsfeldes können Verformungen des Untersuchungsgebietes (d. h. Haupt- und Scherdehnungen) abgeleitet werden, ebenfalls mit implementiertem Varianzfortpflanzungsgesetz.

Die erhaltenen Resultate deuten auf eine Hebung im Bereich der Südostkarpaten und der Vrancea-Zone bei gleichzeitiger Absenkung des Transsilvanischen und Focsani-Beckens hin, die das geophysikalische Modell einer weichen Kopplung des abtauchenden Slabs bestätigt. Auch in der Lage sind Blockbewegungen zu erkennen.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Tektonisches Szenario der Südostkarpaten

Die tektonische Situation in Rumänien wird dargestellt durch drei große Einheiten, die Osteuropäische Plattform im Nordosten – in manchen Literaturstellen auch als Ukrainischer Schild bezeichnet – der Tisia-Dacia-Block im Zentrum des Landes und die Moesische Platte im Süden. Südlich des Donaudeltas zwischen der Osteuropäischen Plattform und der Moesischen Platte findet sich ein System von Störungszonen, im Norden gebildet durch die Trotus-Verwerfung und das Peceneaga-Camena-System und im Süden durch die Intramoesische Störung.

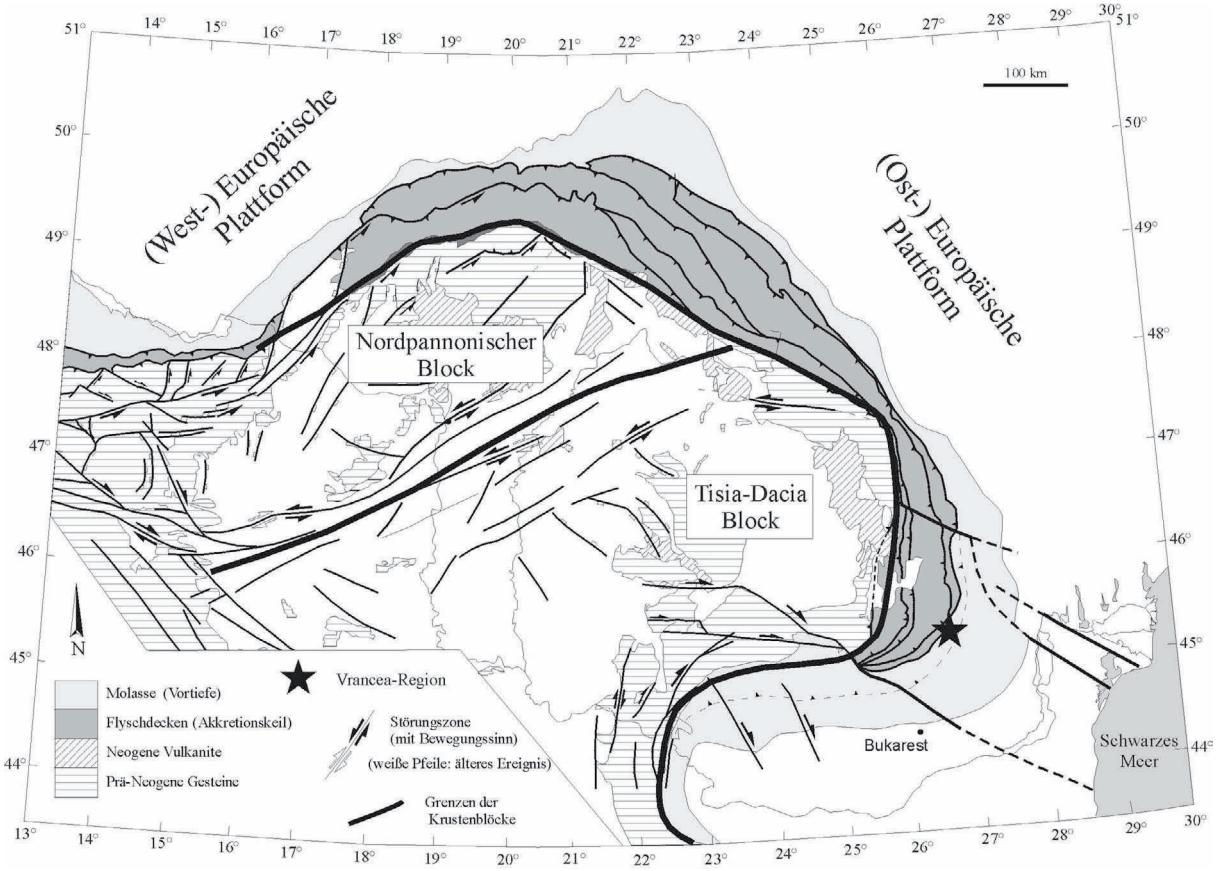


Abbildung 1: Neogene tektonische Karte der Karpatenregion mit geologischen Einheiten nach HORVATH (1993). Ergänzungen und graphische Darstellung: Sperner, B. (Teilprojekt A6).

Das geodynamische Modell des Karpatenbogens lässt sich durch die drei folgenden Komponenten charakterisieren:

- zurückschreitende ozeanische Subduktion im mittleren Miozän,
- kontinentale Kollision vor ca. 10 Ma mit nur geringer Krustenverdickung,
- Delamination des lithosphärischen Mantels.

Die Delamination in diesem Backarc-System ist offensichtlich bis auf einen Slab im südöstlichen Bogen, der Vrancea-Zone, abgeschlossen (WORTEL UND SPAKMAN 2000). Nach den Erkenntnissen der geowissenschaftlichen Teilprojekte des SFB 461 ist der Slab in nahezu vertikale Stellung versteilt. Aus verschiedensten Untersuchungen zur Verteilung von Erdbeben, Spannungen, Geschwindigkeiten etc. und entsprechenden numerischen Modellierungen resultiert die Modellvorstellung, dass der Slab in seinem südwestlichen, seismisch inaktiven Bereich bereits vollständig abgelöst jedoch in seinem nordöstlichen Teil, der eigentlichen, seismisch aktiven Vrancea-Zone noch mit der Lithosphäre verbunden ist (SPERNER ET AL. 2001, 2004, 2005). Diese als schwache Kopplung bezeichnete Verbindung konnte bereits durch geodätische Untersuchungen älterer Wiederholungsnivellements (PELZER ET AL. 1994) und aktuelle GPS-Messungen im Rahmen des SFB 461 (DINTER ET AL. 2001) in Form einer tendenziellen Hebung bestätigt werden.

Beobachtung und Auswertung des GPS-Stationsnetzes

Die Untersuchung geodynamischer Fragestellungen rezenter Krustenbewegungen mittels satellitengestützter Raumverfahren erfordert einen hochgenauen Referenzrahmen. Dieser wird durch das erdumfassende, aus nahezu 300 Permanentstationen bestehende Netz des International GNSS-Service (IGS) gewährleistet. Durch Kombination der GNSS-Beobachtungen mit anderen geodätischen Beobachtungsverfahren wie VLBI (Very Long Baseline Interferometry) und SLR (Satellite Laser Ranging) wird der internationale Referenzrahmen ITRF festgelegt.

Dieser hochgenaue, globale Referenzrahmen wird durch regionale GPS-Netze verdichtet, um verschiedene Untersuchungen durchzuführen. In Mittel- und Südosteuropa wurde im Rahmen des Central Europe Regional Geodynamic Project (CERGOP) das Central European GPS Geodynamic Reference Network (CEGRN) eingerichtet, das als ITRF-Verdichtung als Rahmennetz für regionale und lokale geodynamische Forschungsprojekte dient. Aus den Stationskoordinaten und den dazugehörigen Genauigkeiten (HEFTY 1998) wurden zweidimensionale Geschwindigkeitsfelder sowohl absolut (BECKER ET AL. 2001) als auch relativ zur europäischen Platte abgeleitet (BECKER ET AL. 2002).

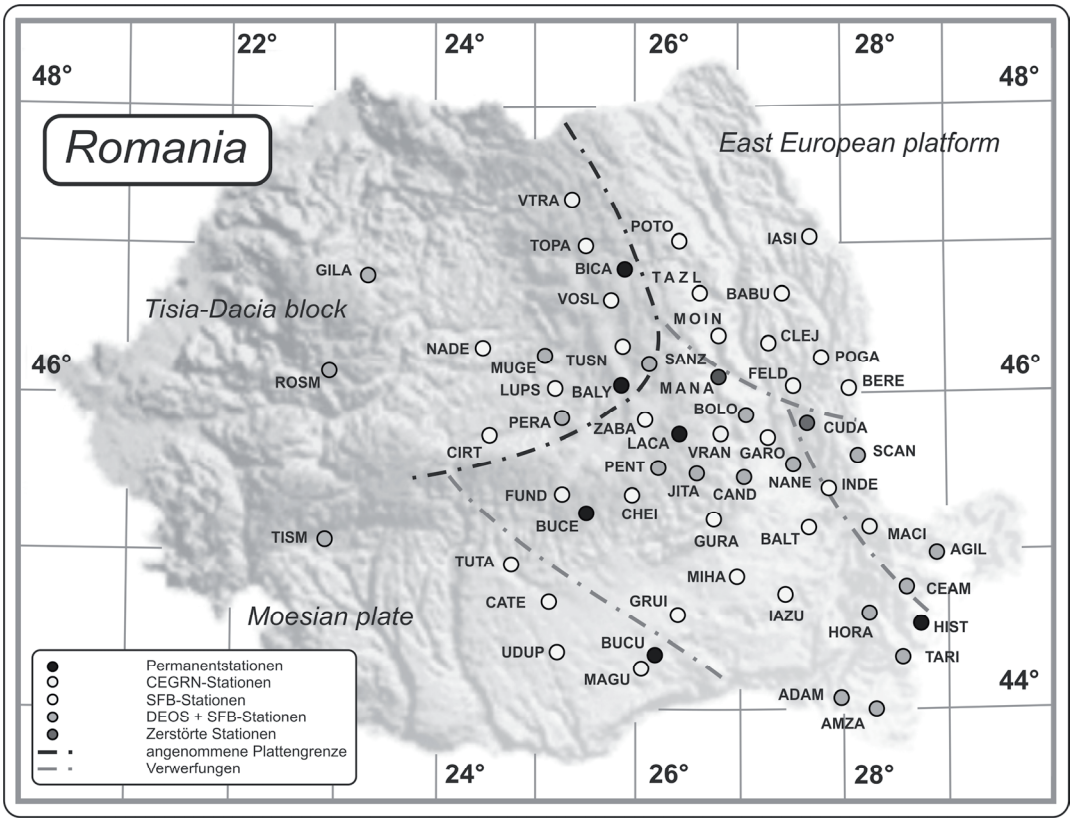


Abbildung 2: Stationen des GPS-Netzes in Rumänien.

Das CEGRN wurde wiederum im Rahmen des SFB 461 und in Zusammenarbeit mit dem Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) der TU Delft weiter verdichtet.

Bei der Prozessierung der GPS-Daten war die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten eines der entscheidenden Probleme. Die meisten Auswertestrategien basieren im Wesentlichen auf zwei Verfahren zur Lösung der Ambiguities unter Verwendung folgender Algorithmen: *Sigma-Dependent* (MAYER ET AL. 2000) und *Quasi-Ionosphere Free* (QIF), wobei letzterer bei der Prozessierung regionaler bzw. kontinentaler Netze zu besseren Ergebnissen führt (PANY ET AL. 2000).

Einen wesentlichen Störeinfluss bei GPS-Messungen in regionalen Netzen bilden Signalausbreitungseffekte im erdnahen Bereich. Der untere, elektrisch neutrale Bereich der Atmosphäre, die so genannte Neutrosphäre, beeinflusst entscheidend die Qualität der Höhenkomponente, deshalb kommt der Troposphärenmodellierung große Bedeutung zu, da sich hier die Störeinflüsse durch Differenzbildung nicht hinreichend reduzieren lassen. In der Bernese GPS Software stehen neben diversen Standardmodellen, z. B. von SAASTAMOINEN (1973) sowie ESSEN UND FROOME (1951), auch Mapping-Funktionen, z. B. von NIELL (1996) zur Verbesserung der Troposphärenmodellierung zur Verfügung. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Schätzung horizontaler Gradienten, um der azimutalen Variation troposphärischer

Störungen Rechnung zu tragen, was allerdings nur dann zu Verbesserungen führt, wenn GPS-Daten mit Elevationswinkeln ≤ 10˚ in die Auswertung einfließen.

Neben den genannten Modellierungsansätzen ist ein allgemeiner Trend hin zu zentral berechneten, globalen Korrekturmodellen zu erkennen. Das Astronomische Institut der Universität Bern stellt seit 1995 neben den präzisen Orbitlösungen und globalen Ionosphärenmodellen auch Troposphärenmodelle bereit. Diese fließen mit den Ergebnissen sechs weiterer IGS-Analysezentren in die Ermittlung der endgültigen IGS-Troposphärenmodelle zusammen.

Besondere Bedeutung kommt neben der Troposphäre auch dem Einfluss der Empfangsantenne zu. Wesentliches Problem ist dabei die Bestimmung der Lage des tatsächlichen Antennenphasenzentrums gegenüber dem geometrischen Zentrum (definiert durch den Antennenreferenzpunkt) der Antenne. Durch die Verfahren der Antennenkalibrierung kann das Empfangsverhalten der Antennen bestimmt und somit dieser Fehlereinfluss kompensiert werden. Hierbei lassen sich relative und absolute Verfahren unterscheiden. Das vom Institut für Erdmessung der Universität Hannover und der Firma Geo++ entwickelte Feldverfahren der absoluten Antennenkalibrierung (WÜBBENA 2000) ermöglicht die Bestimmung von Antennenoffsets und azimut- und elevationsabhängigen Korrekturwerten. Diese Werte beschreiben das tatsächliche Empfangsverhalten der Antenne (absolute Kalibrierwerte), sie sind unabhängig von einer Referenzantenne. Des Weiteren werden gültige Korrekturen für den gesamten Azimut- und Elevationsbereich berechnet. Mit dem relativen Verfahren können ebenfalls absolute Kalibrierwerte bestimmt werden (WANNINGER 2002), wenn für die Referenzantenne absolute Werte zur Verfügung stehen. Jedoch hat ein Vergleichstest für Kalibrierverfahren ergeben, dass es zweckmäßig ist, Kalibrierdaten einheitlicher Konsistenz zu verwenden, d. h. keine relativen und absoluten Kalibrierwerte zu kombinieren und sich möglichst auf die Kalibrierergebnisse einer Kalibrierstelle zu beschränken (MENGE 2003).

Ein weiterer dominanter Fehlereinfluss wird durch Mehrwegesignale verursacht. Durch Vergleichsmessungen mit verschiedenen Antennen auf der gleichen Station konnte nachgewiesen werden, dass die einzelnen Antennen unterschiedliche Mehrwegeempfindlichkeiten aufweisen (WANNINGER 2003). Der Austausch der Antenne auf einer Station kann deshalb zu einer Veränderung der Höhenkomponente im Bereich weniger cm führen. Die Mehrwegeeinflüsse können detektiert und lokalisiert werden. Dabei wird für die Einfallsrichtungen der Satellitensignale im Bereich zwischen 0° und 50° Elevation die Stärke der Mehrwegebelastung klassifiziert. Dadurch sind Qualitätsanalysen der Stationen möglich.

Deformations- und Strainanalyse

Für die lokale Untersuchung aktiver Störzonen kommen auf Grund der jeweiligen Netzgröße fast ausschließlich GPS-Messungen (KLOTZ ET AL. 1995) zur Anwendung. In vielen Anwendungen werden weiterhin Messungen in relativ engen Zeitfenstern durchgeführt und einer Deformationsanalyse zugeführt. In Abhängigkeit von Anforderungen sowie jeweils zur Verfügung stehender Infrastruktur und finanziellen Mitteln setzen sich immer mehr permanent betriebene GPS-Stationen durch, wie z.B. in der zweiten Phase von CERGOP. Kontinuierlich vorliegende Daten können Zeitreihenanalysen unterzogen werden, um das langfristige Bewegungsverhalten der Stationen eines Netzes besser als bei epochaler Betrachtung zu erfassen (HEUNECKE 1995). Es besteht die Möglichkeit, jahreszeitlich bedingte systematische Effekte oder ruckartige, seismisch verursachte Bewegungen vom langfristigen Trend abzuspalten und so einen besseren Einblick in den tatsächlichen Ablauf von Bewegungen zu erhalten. Bei vielen regionalen Untersuchungen, das Verhalten kleiner tektonischer Einheiten, großräumiger Störzonen oder von Verformungen innerhalb tektonischer Einheiten betreffend, ist es von Interesse, den allgemeinen Bewegungstrend der entsprechenden Großplatte abzuspalten, um zu den eigentlich interessierenden relativen Krustenbewegungen zu kommen (z. B. rumänisches Szenario innerhalb der Eurasischen Platte). Hier hilft die Integration von IGS-Stationen, für die Koordinaten und Geschwindigkeitsparameter vorliegen, in das regionale Netz, was im südosteuropäischen Raum zum Teil im Rahmen des CEGRN möglich ist.

Das in der Vergangenheit übliche und auch heute noch bei der Überwachung von speziellen Objekten (Gebäude, Rutschhängen, Dämmen etc.) angewendete statische Modell zur Deformationsanalyse, welches auf dem epochalen Vergleich der Kongruenz des Gesamtnetzes oder von Teilnetzen und auf der Überprüfung der Verschiebung einzelner Objektpunkte auf Signifikanz beruht (NKUITE 1998), ist bei der Analyse rezenter Krustenbewegungen nahezu vollständig von kinematischen Modellen ersetzt worden, die Geschwindigkeiten für Einzelpunkte oder Punktgruppen ansetzen (MÖNICKE 1996).

Auf Grundlage der epochalen Ergebnisse der GPS-Auswertung wurde eine Deformationsanalyse basierend auf einem dreidimensionalen kinematischen Ansatz berechnet. Folgendes funktionale Modell wird in der Software *DEFO-3D* verwendet:

$$\begin{pmatrix} B \\ L \\ h \end{pmatrix}_{i,t} + \begin{pmatrix} v_B \\ v_L \\ v_h \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} B \\ L \\ h \end{pmatrix}_{i,t_0} + \begin{pmatrix} \omega_B \\ \omega_L \\ \nu_h \end{pmatrix}_i (t - t_0) + \begin{pmatrix} dB(B,L,h,d) \\ dL(B,L,h,d) \\ dh(B,L,h,d) \end{pmatrix}_i + \begin{pmatrix} O_B \\ O_L \\ O_h \end{pmatrix} \qquad (1)$$

Zusätzlich können Exzentrumsbeobachtungen mittels GPS, Nivellements bzw. Streckenmessungen zwischen Hauptpunkt und Exzentrum berücksichtigt werden. Die dreidimensionale Deformationsanalyse basiert auf absoluten geographischen

Koordinaten (B, L) und ellipsoidischen Höhen (h). Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass getrennt nach den einzelnen Komponenten grobe Fehler aufgedeckt und eliminiert werden können. Das daraus entstehende numerisch kritische Ausgleichungsproblem wurde in der Dissertation *„Generalisierte Orthogonalzerlegungen in der Ausgleichungsrechnung“* (DINTER 2002) gelöst.

Die Strainanalyse basiert auf den Modellen der Kontinuumsmechanik. In Rawiel (2001) wurden bereits Grundlagen erarbeitet, um Deformationsmaße (relative Längen- und Winkeländerungen eines materiellen Körpers) eines Rutschhanges auf Basis epochaler (terrestrischer) Messungen zu berechnen, wobei der Kontinuumsübergang hier mit bivariaten Polynomen realisiert ist. Einen Ansatz zur Berechnung von Deformationen innerhalb einer Fläche auf Basis von GPS-Messungen bietet die Kombination aus Kontinuumsmechanik und Kollokation (STRAUB 1996), (PETER 2001), jedoch wird bei diesem Verfahren keine analytische Beschreibung ermittelt.

Ausgangsfragestellung

Ein Hauptziel des Teilprojektes B1 ist es, einen wesentlichen Beitrag zur Gefährdungsabschätzung der Vrancea-Region mittels Bestimmung von dreidimensionalen kinematischen Plattenbewegungen in Rumänien zu liefern. Durch Einsatzes der GPS-Technologie können Aussagen über rezente Plattenkinematik getroffen und somit ein besseres Verständnis der tektonischen Prozesse in Rumänien erhalten werden.

Schwerpunkt der Untersuchungen ist das dreidimensionale Deformationsverhalten in der Vrancea-Region mit besonderem Fokus auf die Analyse der Höhenkomponente, um Rückschlüsse auf die Art der Kopplung des subduzierenden Slabs mit der überlagernden Kruste zuzulassen, was von entscheidender Bedeutung für die Gefährdungsabschätzung in der Region ist. Durch die deutliche Verlängerung der Zeitspanne der GPS-Messungen im Überwachungsnetz wird gewährleistet, dass die Plattenbewegungen signifikant aufgedeckt werden. Somit wird das Bewegungsverhalten zuverlässig bestimmt, was einen wichtigen Beitrag zum geodynamischen Prozess liefert. Damit lassen sich die Ziele bzw. Aufgaben von B1 in Phase IV wie folgt formulieren:

1. Verbesserung und Optimierung der GPS-Auswertung, Untersuchung des stationsabhängigen Fehlerhaushaltes,
2. Etablierung eines Antennenkalibrierfeldes am Geodätischen Institut Karlsruhe zur Kalibrierung der GPS-Empfangsantennen,
3. Erfassung des dreidimensionalen Bewegungsablaufs im Überwachungsnetz und Ableitung von Geschwindigkeiten für alle Stationen im System geographischer Koordinaten und ellipsoidischer Höhen,

4. Übertragung des punktbezogenen zu einem kontinuierlichen Geschwindigkeitsfeld durch Anwendung spezieller Interpolationstechniken (z.B. Bézier-Splines),
5. Durchführung von Strainanalysen auf Grundlage der Kontinuumsmechanik unter Berücksichtigung der Genauigkeitsinformationen und Ableitung der Deformationsmaße (Nachweis von Plattenverformungen) aus den vorliegenden Geschwindigkeiten der diskreten Objektpunkte,
6. Trennung der rezenten tektonischen Bewegung von postseismischen Einflüssen der dominanten Starkbeben des letzten Jahrhunderts im Rahmen der Kooperation zwischen den Teilprojekt A6 und B1,
7. Detektierung von Plattengrenzen und Störzonen.

Um aus der Fülle des mittlerweile vorliegenden Datenmaterials Aussagen mit bestmöglicher Qualität zu extrahieren, wird eine komplette Neuauswertung insbesondere unter den Aspekten Troposphärenmodellierung und Antennenkalibrierung mit der neuen Version 5.0 der Bernese GPS Software (DACH ET AL. 2007) erfolgen. Besonders wichtig für den Qualitätsaspekt ist die zusätzliche Kontrolle der Ergebnisse durch eine völlig unabhängige Auswertung mit der GIPSY/OASIS Software an der TU Delft (VAN DER HOEVEN ET AL. 2004A, 2004B).

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Auswertung der GPS-Beobachtungen

In der vierten Projektphase wurde die neueste Version der Bernese GPS Software (Version 5.0) des Astronomischen Instituts der Universität Bern (DACH ET AL. 2007) eingesetzt. Ebenso wurde komplett von der menügesteuerten Auswertung auf die sog. „Bernese Processing Engine“ (BPE) übergegangen, mit welcher nach Einstellung der gewünschten Parameter eine automatisierte Prozessierung der GPS-Daten möglich ist. Somit wurde auch eine einfache Neuprozessierung sämtlicher vorliegenden Kampagnen seit Beginn des Projekts möglich.

Auswerteablauf

Essentiell bei der Auswertung einer Zeitreihe dieser Länge ist, alle auf einen geodätischen Bezugsrahmen bezogenen Daten (Orbits, Erdrotationsparameter, Koordinaten) in einen einheitlichen Rahmen zu bringen. Diese Daten sind immer auf den momentan gültigen „International Terrestrial Reference Frame“ (ITRF) (BOUCHER ET AL. 2004) bezogen. In unregelmäßigen Abständen wird der ITRF modifiziert und neu berechnet. Tabelle 1 gibt einen Überblick der Wechsel der ITRF-Rahmen der IGS-Produkte im Laufe des Projekts.

Tabelle 1: Wechsel der ITRF-Rahmen der IGS-Produkte

Datum	Wechsel von:	zu:
30.06.1996	ITRF93	ITRF94
01.03.1998	ITRF94	ITRF96
01.08.1999	ITRF96	ITRF97
02.12.2001	ITRF97	IGS00

Vor Beginn der Auswertung wurden alle erforderlichen Daten in ein einheitliches ITRF transformiert. Hierfür wurde das ITRF2000 zur Epoche 1997.0 ausgewählt. Ebenso wurden die Koordinaten der einbezogenen IGS-Stationen auf den aktuellen Messzeitpunkt vor- oder zurückgerechnet.

Der Ablauf der Prozessierung kann in vier Schritte aufgeteilt werden:

- Vorbereitung der Daten,
- Definition der Basislinien und Präprozessierung,
- Float-Lösung ,
- Lösung mit fixierten Phasenmehrdeutigkeiten.

Im ersten Schritt werden die vorliegenden Informationen von Erdrotation, Satellitenorbits und RINEX-Dateien (GURTNER 2001) der Stationen in ein softwarespezifisches Format gebracht. Zusätzlich werden verschiedene Überprüfungen vorgenommen.

Im zweiten Schritt werden zunächst die Basislinien zwischen den Stationen gebildet. In diesem Fall werden einfache Phasendifferenzen verwendet. Außerdem werden vorhandene cycle slips aufgedeckt und korrigiert, sowie ungepaarte Beobachtungen als unbrauchbar markiert. Der letzte Teil dieses Schrittes ist die Prüfung der Doppeldifferenzresiduen der Phase. Hierbei werden die Doppeldifferenzresiduen berechnet, nach Ausreißern durchsucht, die Ausreißer markiert und die endgültigen Residuen gebildet.

Ein Hauptteil ist die Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten. Hier wird zuerst eine Netzwerklösung mit Gleitkomma-Mehrdeutigkeiten berechnet, wobei die Koordinaten und geschätzten Troposphärenparameter gespeichert werden.

Im letzten Schritt werden die geschätzten Parameter des vorigen Schritts eingeführt und festgehalten um die Phasenmehrdeutigkeiten für L1 und L2 zu lösen. Schließlich wird eine Lösung mit festgehaltenen Phasenmehrdeutigkeiten prozessiert, wobei die zuvor bestimmten Phasenmehrdeutigkeiten verwendet werden.

Die einzelnen Auswertungsschritte stimmen im Prinzip mit der Datenprozessierung in mit der alten Version 4.2 der Berner GPS Software in den ersten drei Projektphasen

überein. Diese ist in den Zwischenberichten von Phase II und III detailliert beschrieben. Einziger gravierender Unterschied ist die Berechnung der Float-Lösung (Schritt 3), bei der in Version 5.0 das Modul ADDNEQ verwendet wird im Gegensatz zum Modul GPSEST in Version 4.2.

Bei der Auswertung der einzelnen Kampagnen ist auffällig, dass bei einigen Stationen nach einem Ausrüstungswechsel Sprünge in der Höhe aufgetreten sind. Die Ursache dafür müssen stationsabhängige Einflüsse bzw. Effekte sein. Am einflussreichsten sind dabei die Charakteristik der Empfangsantenne sowie die so genannten Mehrwege-Effekte, weshalb diesbezüglich detaillierte Untersuchungen durchgeführt wurden.

Antennenkalibrierung

Um den Sachverhalt der Empfangscharakteristik der GPS-Antennen näher zu untersuchen wurde auf dem Messdach des Geodätischen Instituts Karlsruhe ein Antennenkalibrierfeld etabliert, um individuelle Kalibrierwerte für die eingesetzten Antennen zu bestimmen und diese in die Auswertung einzuführen.

Zur Anwendung kam hierbei ein beschleunigtes, relatives Kalibrierverfahren, welches an der Technischen Universität Dresden entwickelt wurde (FREVERT ET AL. 2003). Bei diesem relativen Feldverfahren werden die Kalibrierwerte in Bezug zu einer Referenzantenne berechnet. Wenn für diese absolute Kalibrierwerte vorliegen, so lassen sich für die zu kalibrierenden Antennen ebenso absolute Werte bestimmen (WANNINGER 2002).

Detaillierte Ausführungen zu den Kalibrierungsarbeiten selbst sowie den notwendigen Vorabuntersuchungen zur Einrichtung des Kalibrierfeldes finden sich in (KNÖPFLER ET AL. 2007) und (DE LACERDA 2003).

Die Kalibrierung sämtlicher verwendeter Antennen war nicht möglich, nur wenige Eigentümer von eingesetzten GPS-Ausrüstungen konnten ihre Antennen für diese Untersuchungen zur Verfügung stellen.

Um den Einfluss der Antennenkalibrierwerte auf das Ergebnis der GPS-Auswertung, d. h. die Stationskoordinaten zu untersuchen, ist ein Teilnetz bestehend aus fünf Stationen gebildet worden. Mit den Beobachtungsdaten der Messkampagne 2004 erfolgte die GPS-Prozessierung mit verschiedenartigen Kalibrierwerten.

Ergebnis der Untersuchung ist, dass es trotz Implementierung bestmöglicher Kalibrierwerte nicht möglich ist, die Sprünge in der Höhenkoordinate einer Station zu eliminieren (KNÖPFLER ET AL. 2007). Datenanalysen von Permanentstationsnetzen führen zu den gleichen Resultaten (WANNINGER ET AL. 2006). Die Höhensprünge müssen andere Ursachen haben.

Untersuchung der Mehrwege-Effekte

Da mit der Kalibrierung und der Einführung der Kalibrierungsergebnisse in die Prozessierung der GPS-Daten nicht der gewünschte Erfolg der Eliminierung der Höhensprünge erzielt werden konnte, wurden Untersuchungen hinsichtlich des Mehrwegeverhaltens der Stationen vorgenommen. Hierbei wurde das Softwarepaket *WaSoft/Multipath* verwendet (WANNINGER 2003) (MAYER ET AL. 2004).

Dieses Softwarepaket wurde ursprünglich für die Untersuchung von Permanentstationen entwickelt, weshalb gewisse Anforderungen an die zu untersuchenden Stationen gestellt werden: Datenrate von mindestens 60 s, Stationsabstand möglichst weniger als 100 km, Länge der Datensätze mindestens 24 Stunden, cm-genaue Stationskoordinaten, Auswertung in Stationsgruppen von mindestens drei, besser vier bis sechs Stationen.

Aufgrund dieser einzuhaltenden Voraussetzungen, insbesondere des Stationsabstandes, konnte nicht für alle vorliegenden Kampagnen und alle Stationen eine Mehrweganalyse durchgeführt werden. Diese konnte erst ab der Kampagne 2003 realisiert werden, da erst ab diesem Zeitpunkt ein ausreichend dichtes Netz mit ausreichend vielen gleichzeitigen besetzten Stationen vorhanden war. Für die Prozessierung wurde immer ein möglichst kleines, aus mindestens vier Stationen bestehendes, Subnetz ausgewählt und in diesem eine Bestimmung der Mehrwege-situation vorgenommen.

Meist fallen die Ergebnisse der Mehrfachprozessierung einer Station in verschiedenen Subnetzen sehr ähnlich aus. In einzelnen Fällen treten starke Unterschiede auf, da jeweils unterschiedliche Stationen Teil des Subnetzes sind. Je nach Netzkonfiguration kann sich der Einfluss der Umgebungssituation auf das Empfangsverhalten der Antenne unterschiedlich auf das Ergebnis der Mehrweganalyse auswirken.

Aus diesen Untersuchungen lässt sich ableiten, dass bei manchen Stationen bei einem Höhensprung nach einem Ausrüstungswechsel auch ein deutlicher Unterschied im Mehrwegumfeld zu erkennen ist, bei anderen Stationen verändert sich das Mehrwegumfeld kaum und trotzdem tritt ein ähnlich großer Versatz in der Höhe auf. Das Untersuchungsergebnis lässt somit zwei Interpretationsmöglichkeiten zu: Entweder liefert die eingesetzte Software keine aussagekräftigen Ergebnisse oder die Sprünge in der Höhe lassen sich nicht in jedem Fall mit einem stark geänderten Mehrwegumfeld der Antenne erklären.

Zeitreihenanalyse der Permanentstation Bukarest (BUCU)

Die Deformationsanalyse der Stationen des SFB-Netzes in Rumänien beruht auf Messungen, die während mehrwöchiger Kampagnen erfasst wurden. Hierdurch können zwar langfristige Trends und Bewegungen detektiert werden, kurzfristige oder saisonale Punktbewegungen bleiben unerfasst. Solche Bewegungen können bspw. durch Temperaturunterschiede oder Änderungen im Grundwasserstand hervorgerufen werden. Zur Untersuchung dieses Sachverhalts wurde eine Zeitreihenanalyse der vom BKG permanent betriebenen Station Bukarest (Name im IGS-Netz: BUCU) durchgeführt (NUCKELT ET AL. 2006).

Die der Untersuchung zugrunde liegenden Daten erstrecken sich im Zeitraum zwischen dem Aufbau der Station im Jahr 1999 und September 2005. Zur Bestimmung der Koordinaten der Station BUCU wurde ein kleines, sternförmiges GPS-Netz mit Basislinienlängen zwischen 300 km und 900 km prozessiert, welches neben BUCU aus den IGS-Stationen GLSV (Kiew, Ukraine), GRAZ (Graz, Österreich), JOZE (Jozefoslaw, Polen), MATE (Matera, Italien), PENC (Penc, Ungarn) und SOFI (Sofia, Bulgarien) bestand. Die Koordinaten der umliegenden IGS-Stationen wurden fixiert und die Koordinaten der Station BUCU bestimmt.

Die Prozessierung der gesamten Zeitreihe erfolgte ebenfalls mit der Bernese GPS Software in der Version 5.0. Durch Rückrechnung der Koordinaten der einzelnen Tage auf eine Bezugsepoche (in diesem Fall 1997.0) konnte der eurasische Trend aus der Zeitreihe eliminiert werden.

Es konnten deutliche saisonale Effekte vor allem in der Höhenkomponente detektiert werden. Eine Fourier-Analyse der gesamten Zeitreihe ergab, dass sich die Variationen der Höhenkomponente durch Überlagerung von Signalen mit Perioden von einem, zwei und drei Jahren sowie 90 und 60 Tagen zusammensetzen. Die Ostkomponente wird von einer Periode von 40 Tagen dominiert, während bei der Nordkomponente Perioden von zwei Jahren und 60 Tagen dominieren.

Zur Untersuchung der großen saisonalen Bewegungen wurden Korrelationsstudien mit in der Nähe der Permanentstation BUCU gelegenen Grundwassermessstellen durchgeführt. Leider standen nur Datensätze zur Verfügung, die kürzer und lückenhafter als die GPS-Datensätze sind. Mit den vorhandenen Datensätzen können zwar hohe Korrelationen bestimmt werden, für eine genauere Untersuchung wären allerdings längere und vollständigere Zeitreihen notwendig.

Deformationsanalyse

Im Bereich Deformationsanalyse, d. h. zur Berechnung der Bewegungsraten der GPS-Stationen, wird das Programm *DEFO-3D* eingesetzt, welches auf dem kinematischen Modell gemäß Formel 1 basiert. Es werden Einzelpunktanalysen durchgeführt, um für jede Station die linearen Bewegungsraten zu schätzen und dabei dem Problem der Sprünge in den Zeitreihen der Höhenkoordinaten durch eine Offset-Schätzung habhaft zu werden. Detaillierte Angaben zu diesem in den ersten Phasen des SFB entwickelten Analyseverfahren finden sich im Zwischenbericht zur Phase III.

Generierung des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes

Um die Bewegungen des Untersuchungsgebietes detaillierter untersuchen zu können, wird ein kontinuierliches dreidimensionales Geschwindigkeitsfeld basierend auf den Bewegungsraten der GPS-Stationen erzeugt. Dabei wird die Methode der *Multilevel B-Spline Approximation* (LEE ET AL. 1997) angewandt, welche die Techniken der Freiformflächen mit denen der *Scattered Data Interpolation* kombiniert. Auf diese Approximationstechnik wurde zudem das Varianzfortpflanzungsgesetz angewandt, um Genauigkeitsinformationen in Form von Standardabweichungen für alle Ergebnisse zu berechnen.

Das Approximationsverfahren muss zwei Bedingungen genügen:

- Die Daten sollen durch eine bestanpassende Approximationsfläche angenähert werden und
- die Approximationsfläche muss zweimal stetig differenzierbar sein, damit Gradienten abgeleitet werden können, die für die Strainanalyse notwendig sind.

Die Multilevel B-Spline Approximation erfüllt beide Bedingungen.

Weitere Details zum Algorithmus sowie die Umsetzung der Varianzfortpflanzung sind in der Dissertation *“Dreidimensionale Plattenkinematik: Strainanalyse auf B-Spline Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone/Rumänien”* (NUCKELT 2007) nachzulesen.

Strainanalyse

Die Strainanalyse ist entsprechend der linearen Theorie der Kontinuumsmechanik umgesetzt. Die dafür notwendige kontinuierliche Beschreibung des Untersuchungsobjektes ist durch das dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld gegeben, welches durch die Multilevel B-Spline Approximation erzeugt wird. Das Verschiebungsgradiententensorfeld kann direkt aus den zweimal stetig differenzierbaren B-Spline-Flächen abgeleitet werden. Die Richtungsableitungen nach den Lagekomponenten ergeben sich sofort aus Berechnungsformeln der Spline-Fläche. Hingegen sind für Bestimmung des Vertikalgradienten folgende Problemstellungen zu betrachten:

- Die Standardmethoden der geodätischen Deformationsanalyse basieren in der Regel auf der Analyse wiederholt gemessener Punkte, wodurch lediglich die Beschreibung der Randfläche des deformierten Objektes, also der Erdoberfläche, erfolgt (WITTENBURG 1999),
- Mit geodätischen Standard-Messverfahren besteht keine Möglichkeit zur Bestimmung des Vertikalgradienten und somit verbleibt dieser als Unbekannte (WITTENBURG 2005),
- Geodätische Netze haben zudem in der Regel im Vergleich zu ihrer horizontalen eine geringe vertikale Ausdehnung, weshalb eine Berechnung vertikaler Gradienten wenig sinnvoll ist (KERSTING 1992).

Da nunmehr nur Beobachtungen an der Oberfläche vorliegen, somit keine vergleichbare Quantifizierungen des Bewegungsverhaltens im Inneren des Erdkörpers verfügbar sind, wird die Annahme getroffen, dass Punkte im Inneren mit den gleichen Lagekoordinaten wie der korrespondierende Oberflächenpunkt die selbe Bewegung wie dieser vollführen, und somit der vertikale Gradient zu null wird.

Alternativ kann die Strainanalyse auf die Ebene, also den 2-dimensionalen Fall, beschränkt werden (WELSCH 1982), (STRAUB 1996). Durch differentialgeometrische Ansätze, bei denen Flächendeformationen untersucht werden, die aus den Flächenkrümmungen abgeleitet werden (ALTINER 1996) und (DROBNIEWSKI 2005), können die Berechnungen ebenfalls auf die Oberfläche reduziert werden.

Die Deformations- und Rotationstensoren werden der linearen Theorie der Kontinuumsmechanik folgend aus dem Verschiebungsgradiententensorfeld abgeleitet sowie daraus die Haupt- und Scherdehnungen berechnet. Ebenso wie bei der Generierung des Geschwindigkeitsfeldes ist auch bei der Strainanalyse auf jeden einzelnen Berechnungsschritt das Varianzfortpflanzungsgesetz anzuwenden, um Genauigkeitsmaße zu bestimmen. Die Umsetzung der Varianzfortpflanzung, insbesondere auch für die Eigenwert- und Eigenvektorberechnung, sind ebenfalls in der Dissertation (NUCKELT 2007) erarbeitet.

Ergebnisse

Die in der Einzelpunktanalyse geschätzten linearen Geschwindigkeiten der Stationen des GPS-Überwachungsnetzes liegen im Bereich von 0-5 mm/a. Die Standardabweichungen liegen in der gleichen Größenordnung und sind in der Regel kleiner als die Geschwindigkeiten selbst. Die geschätzten Werte für die CEGRN-Stationen wurden mit Ergebnissen der CEGRN-Auswerte-Center (HEFTY 2005) validiert. Eine deutliche Diskrepanz zwischen den Ergebnissen ist dabei festzustellen.

In NUCKELT (2007) und SCHMITT ET AL. (2007) sind die Ergebnisse der Deformationsanalyse, das dreidimensionale Geschwindigkeitsfeld sowie die abgeleiteten Verformungen (Strainanalyse) ausführlich dargestellt und diskutiert.

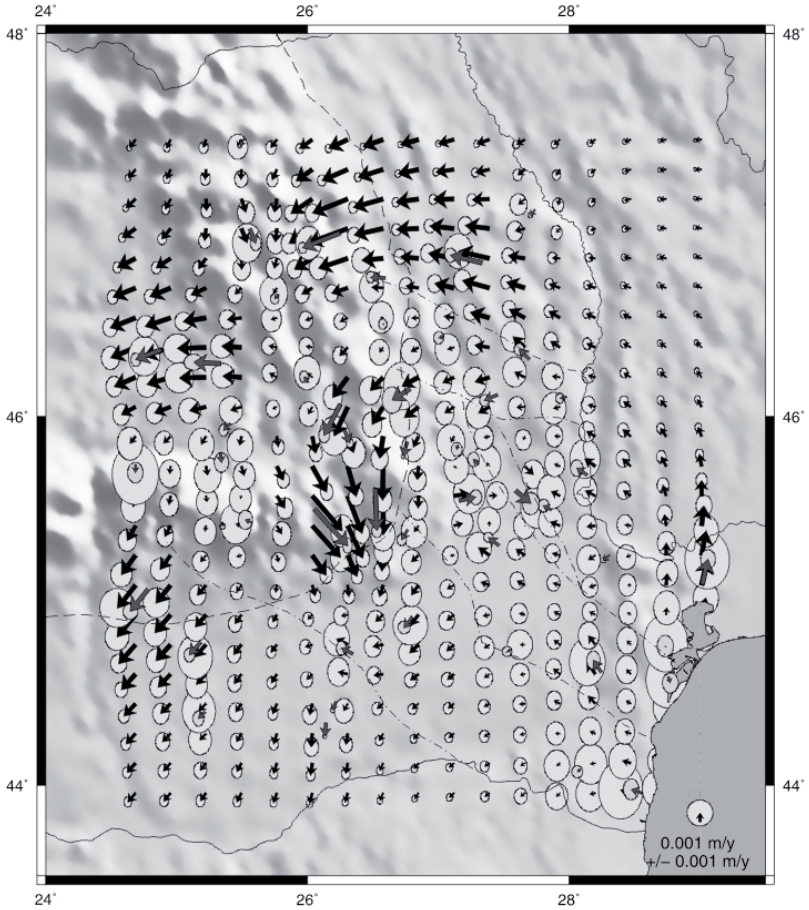


Abbildung 3: Horizontalgeschwindigkeiten mit Standardabweichungen.

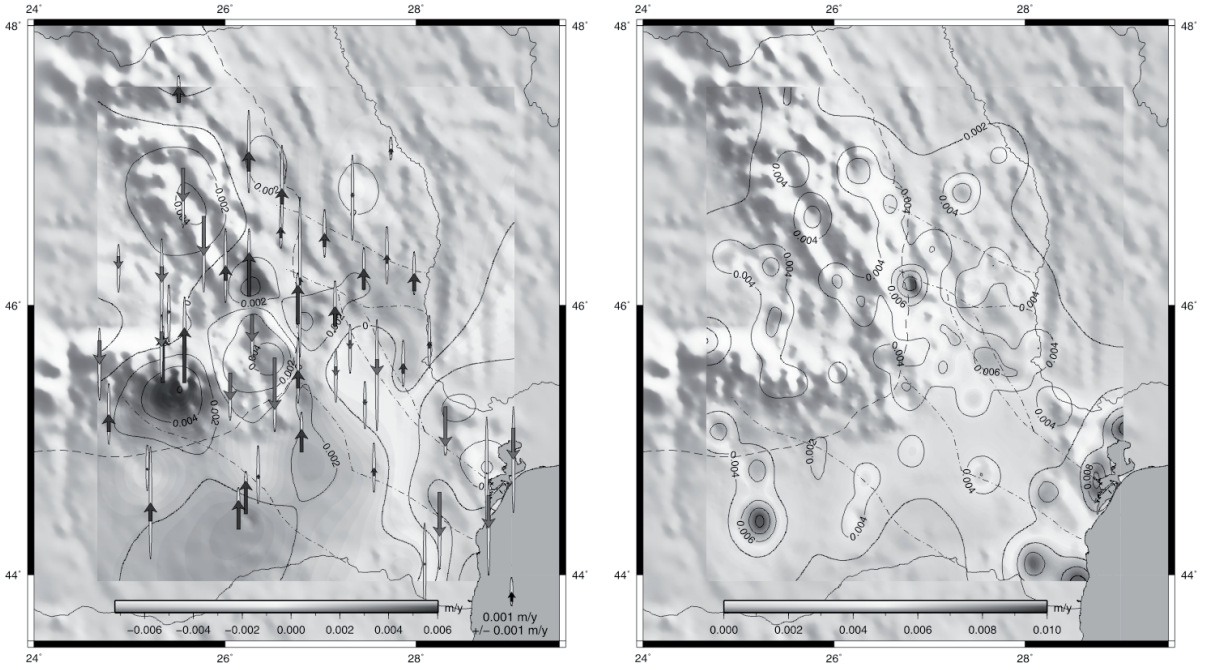


Abbildung 4: Vertikales Geschwindigkeitsfeld: Geschwindigkeiten (links), Standardabweichungen (rechts).

Als schlussendliche Aussagen über das Bewegungsverhalten des Untersuchungsgebietes (Abbildung 3 und Abbildung 4) können zusammengefasst werden:

- Die horizontalen Platten-/Blockbewegungen erreichen eine durchschnittliche Geschwindigkeit von ca. 2 mm/a und lokal sehr begrenzt eine maximale Geschwindigkeit von bis zu 5 mm/a (in der südöstlichen Spitze des Karpatenbogens),
- signifikant erscheint die Horizontalverschiebung der Moesischen Platte in südliche bis südwestliche Richtung mit 1–3 mm/Jahr,
- zwischen der Capidava-Ovidiu Verwerfung und der Peceneaga-Camena Verwerfung ist im östlichen Teil ein eindeutiger Trend in Richtung Nordwesten zu erkennen. Dies widerspricht jedoch geologischen Studien im Bereich der Intramoesischen Verwerfung (TARAPOANCA ET AL. 2003),
- der Bereich nördlich der Trotus Verwerfung sowie die Mitte des Transsylvanischen Beckens erfahren eine Westwärtsbewegung mit ca. 2–3 mm/a,
- für die Bereiche der Ost- und Südkarpaten sind deutliche Hebungen mit bis zu 6 mm/a festzustellen, ebenso für die Vrancea-Region (2 mm/a) und die Moesische Plattform,
- Bereiche deutlicher Absenkung sind das Transsylvanische Becken (ca. -3 mm/a), das Brasov-Becken (ca. -4 mm/a) und das Focsani-Becken (-2 mm/a) sowie der Bereich an der Schwarzmeerküste (-5 mm/a),

- diese Vertikalbewegungen stimmen sehr gut mit den geologischen Studien (TARAPOANCA ET AL. 2003), (BERTOTTI ET AL. 2003) überein.

Auf Basis des dreidimensionalen Geschwindigkeitsfeldes konnte die Strainanalyse durchgeführt werden, jedoch sind aufgrund der in Abschnitt 0 diskutierten Problematik lediglich die horizontalen Haupt- und Scherdehnungsänderungen analysierbar. Als wichtigste Aussagen bleibt festzuhalten:

- große Dehnungsänderungen werden für Bereiche detektiert, in denen sich die Geschwindigkeitsvektoren stark unterscheiden, z. B. sind für die Südostspitze des Karpatenbogens Kompressions- und Extensionsänderungen mit bis zu ca. 150 nStrain/Jahr festzustellen,
- im nördlichen Teil der Karpaten sowie nördlich der Bistrita-Verwerfung treten vorwiegend Kompressionen mit bis zu 100 nStrain/Jahr auf.

Für die Analyse der Plattengrenzen werden die Strainraten für Punkte bestimmt, die den Verlauf der Hauptverwerfungen wiedergeben. Es können dabei lediglich die Verformungen in der Horizontalen untersucht werden:

- Die größten Deformationsänderungen mit ca. 150 nStrain/Jahr werden für den nordwestlichen Teil der Peceneaga-Camena Verwerfung detektiert. Hier liegen zwei Bereiche starker Kompression und Extension senkrecht zur Verwerfungsrichtung in unmittelbarer Nachbarschaft,
- die westlichen Enden der Capidavia-Ovidiu Verwerfung und der Intramoesischen Verwerfung sind ebenfalls Bereiche, in denen Extensionen mit ca. 100 nStrain/Jahr auftreten,
- markante Scherdehnungsraten mit ca. 70–80 nStrain/Jahr in Verwerfungsrichtung sind für die Westhälfte der Bistrita und Trotus Verwerfung festzustellen.

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Hochgenaue Positionierung mit globalen Navigations-Satellitensystemen ist Forschungsgegenstand vieler Forschergruppen und Unternehmen. Die Problematik der Änderung der Stationskoordinaten bei Antennen- bzw. Ausrüstungswechsel ist dabei allgemein bekannt und gefürchtet. Als einziger praktikabler Lösungsansatz wird derzeit empfohlen, den Wechsel von GPS-Antenne/Empfänger sowohl auf Permanentstationen als auf Punkten bei epochalen Kampagnenmessungen zu vermeiden. Jedoch ist diese Vorgehensweise bei Messkampagnen der Größenordnung, wie sie im Teilprojekt B1 durchgeführt wurden, kaum realisierbar.

Der Einsatz von Spline-Techniken zur Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern kann als neuartig eingestuft werden, da in der Regel die Kollokation zur Anwendung kommt.

5.2.1.4 Offene Fragen

Auch am Ende des SFB 461 bleiben offene Fragen bzw. konnten bestehende Schwierigkeiten nicht zufrieden stellend gelöst werden.

Die größte Schwierigkeit waren und bleiben die sprunghaften Unterschiede in den Höhenkoordinaten der GPS-Stationen, hervorgerufen durch den Wechsel der Messausrüstungen. Da keine Möglichkeit gefunden werden konnte, diese Sprünge zu beseitigen bzw. mit bekannten Analysemethoden und -tools deren definitive Ursache zu ermitteln, bleibt dieses Problem als Aufgabe für zukünftige Forschungsprojekte bestehen.

Das satellitengestützte GPS-Verfahren bereitet eine weitere Schwierigkeit, indem Beobachtungen lediglich für die Erdoberfläche vorliegen. Somit bleiben dreidimensionale Strainanalyse problematisch, da keine Aussagen über das Bewegungsverhalten im Erdinneren getroffen werden können. Auch diese Problematik bietet zukünftig ausreichend Forschungsmaterial.

Auch die Frage der Detektierung der Plattengrenzen kann nicht zufrieden stellend beantwortet werden. Mit dem gegenwärtigen Überwachungsnetz sind derartige Fragestellungen nicht zu beantworten. Dieses wird nur möglich, wenn eine Vielzahl von Messpunkten in der Nähe der Plattengrenzen und Verwerfungen kontinuierlich beobachtet werden.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt B1 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Altiner, Y. (1996): Geometrische Modellierung innerer und äußerer Deformationen der Erdoberfläche. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Reihe C. Nr. 462. Verlag des Instituts für angewandte Geodäsie. Frankfurt am Main.

Becker, M., A. Caporali, M. Figurski, G. Grenerczy, A. Kenyeres, J. Hefty, M. Marjanovic, G. Stangl (2001): A Regional ITRF Densification by Blending Permanent and Campaign Data – The CEGRN Campaigns and the Central European Velocity Field. Proceedings IAG 2001 Scientific Assembly. 02.–07.09.2001. Budapest.

Becker, M., E. Cristea, M. Figurski, L. Gerhatova, G. Grenerczy, J. Hefty, A. Kenyeres, T. Liwosz, G. Stangl (2002): Central european intraplate velocities from CEGRN campaigns. Reports on Geodesy 1(61), Warschau: 83–89.

Boucher, C., Z. Altamimi, P. Sillard, M. Feissel-Vernier (2004): The ITRF2000. IERS Technical Note No. 31. http://www.iers.org/documents/publications/tn/tn31/tn31.pdf (viewed on 2006-05-03).

Dach R., U. Hugentobler, P. Fridez, M. Meindl (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. Astronomical Institute University of Berne (Switzerland).

Dinter, G. (2002): Generalisierte Orthogonalzerlegungen in der Ausgleichungsrechnung. Deutsche Geodätische Kommission. C-559. München.

De Lacerda, C. F. (2003): An Investigation on Multipath Effects in GPS Code and Phase Observations. Projeto Final. Geodätisches Institut Karlsruhe. unveröffentlicht.

Dinter, G., M. Nutto, G. Schmitt, U. Schmidt, D. Ghitau, C. Marcu (2001): Three Dimensional Deformation Analysis with Respect to Plate Kinematics in Romania. Reports on Geodesy 2(57), Warschau: 29–42.

Drobniewski, M. (2005): Integration geodätischer und geotechnischer Beobachtungen und Strukturinformationen für eine 3D-Strainanalyse. Freiberger Dissertationen On-line.

Essen, L., K. D. Froome (1951): The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24000 Mc/s. Proceedings of Physical Society, 64(B): 559–568.

Frevert, V., A. Nuckelt und D. Stöcker (2003): Beschleunigte Feldkalibrierung von GPS-Antennen. DGON-Symposium POSNAV 2003. Dresden 18./19.3.2003. Schriftenreihe des Geodätischen Instituts der TU Dresden, Heft 3: 353–359.

Gurtner, W. (2001): RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.10. http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Rinex2.html (viewed on 2006-05-03).

Hefty, J. (1998): Estimate of site velocities from CEGRN GPS campaigns referred to CERGOP Reference Frame. Reports on Geodesy 9 (39), Warschau: 67–79.

Hefty, J. (2005): Kinematics of Central European GPS Geodynamic Reference Network as Result of Epoch Campaigns During Nine Years. Reports on Geodesy 2(73), Warschau: 23–32.

Heunecke, O. (1995): Zur Identifikation und Verifikation von Deformationsprozessen mittels adaptiver Kalman-Filterung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover. Nr. 208. Hannover.

Hoeven, A.G.A. van der, B.A.C. Ambrosius, G. Schmitt, G. Dinter, V. Mocanu und W. Spakman (2004a): GPS Probes the Kinematics of the Vrancea Seismogenic Zone. EOS., vol. 85. Nr. 19.

Hoeven, A.G.A. van der, B.A.C. Ambrosius, G. Schmitt, G. Dinter, M. Nutto, V. Mocanu, W. Spakman, L. Munteanu und C. Marcu (2004b): The Surface Response to Sub-Surface Tectonic Processes in the South-Eastern Carpathians (Vrancea, Romania) by GPS: Introduction and First Results. Technophysics. Reviewed.

Horvath, F. (1993): Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian Basin. Tectonophysics, vol. 226: 333–357.

Kersting, N. (1992): Zur Analyse rezenter Krustenbewegungen bei Vorliegen seismotektonischer Dislokationen. Schriftenreihe des Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München Neubiberg, 42.

Klotz, J., Angermann; D. und J. Reinking (1995): Großräumige GPS-Netze zur Bestimmung der rezenten Kinematik der Erde. ZfV, vol. 120(9): 449–460.

Lee, S., G. Wolberg, S. Y, Shin (1997): Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics., 3. Nr. 3: 229–244.

Mayer, M., Lindner, K., Kutterer, H. und B. Heck (2000): Eine Strategie zur Ermittlung hochgenauer Koordinaten und Bewegungsraten im ITRF96 unter Verwendung der Berner GPS-Software Version 4.0. Deutsche Geodätische Kommission. B-310, München: 59–68.

Mayer, M., L. Wanninger, H.-G. Dick, H. Derenbach, B. Heck (2004): Mehrwegeeinflüsse auf den SAPOS-Stationen Baden-Württembergs. Poster auf der Geodätischen Woche 2004. Stuttgart.

Menge, F. (2003): Vergleichstest von Kalibrierverfahren-Analysen. Institut für Erdmessung. GPS-Workshop 21. Mai 2002. Hannover.

Mönicke , H.-J., (1996): Kinematische Meßmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung. Beiträge zum 39. DVW-Seminar am 19. und 20. Juni 1995 am IAGB der Universität Stuttgart. Stuttgart: Konrad Wittwer.

Niell, A.E. (1996): Global Mapping Functions for the Atmosperic Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research (101). B2: 3227–3246.

Nkuite, G. (1998): Ausgleichung mit singulärer Varianzkovarianzmatrix am Beispiel der geometrischen Deformationsanalyse. Deutsche Geodätische Kommission. C-501. München.

Pany, T., P. Pesec, G. Stangl (2000): The GPS Campaign CEGRN'99 – Outliers and Problems. Reports on Geodesy 6(52), Warschau: 93–102.

Pelzer, H., J. Neuner, V. Schwieger, T. Rus (1994): Detection of recent vertical crustal movements in the Carpathian arc by GPS. Proceedings Perelmuter Workshop on Dynamic Deformation Models 03.08.–01.09.1994. Haifa, Israel: 69–78.

Peter, Y. (2001): Present Day Crustal Dynamics in the Aegean Plate Boundary Zone inferred from continuous GPS Measurements. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Mitteilungen Nr. 71.

Rawiel, P. (2001): Dreidimensionale kinematische Modelle zur Analyse von Deformationen an Hängen. Deutsche Geodätische Kommission. C-533. München.

Saastamoinen, I. I. (1973): Contribution to the theory of atmospheric refraction. Bulletin Géodésique, vol. 107: 13–34.

Sperner, B., F. Lorenz, K. Bonjer, S. Hettel, B. Müller, F. Wenzel (2001): Slab break-off – abrupt cut or gradual detachment? New insights from the Vrancea Region (SE Carpathians, Romania). Terra Nova, vol. 13: 172–179.

Sperner, B., D. Ioane, R. J. Lillie (2004): Slab behaviour and its surface expression: New insights from gravity modelling in the SE-Carpathians. Eingereicht bei Tectonophysics.

Sperner, B. & the CRC 461 team (2005): Monitoring of slab detachment in the SE-Carpathians. In Wenzel, F. (Ed.): Challenges for Earth Sciences in the 21th Century. Berlin-Heidelberg: Springer, pp. 187–202.

Straub, C. (1996): Recent Crustal Deformation and Strain Accumulation in the Marmara Sea Region, N. W. Anatolia inferred from GPS Measurements. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Mitteilungen Nr. 58.

Tarapoanca, M.; G. Bertotti, L. Matenco, C. Dinu, S. Cloetingh (2003): Architecture of the Focsani depression: A 13 km deep basin in the Carpathians bend zone (Romania). Tectonics, vol. 22. No. 6.

Wanninger, L., C. Rost, G. Hartlieb, M. Köhr (2006): Zur Problematik des Antennenwechsels auf GNSS-Referenzstationen. Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv), vol. 131: 171–175.

Wanninger, L. (2003): Detailanalyse der Mehrwegeverhältnisse auf dem Dach einer GPS-Referenzstation. 5. GPS-Antennenworkshop. Frankfurt. 3. November 2003.

Wanninger, L. (2002): Möglichkeiten und Grenzen der relativen Antennenkalibrierung. ZfV 1/2002: 51–58.

Welsch, W. (1982): Zur Beschreibung homogenen Strains oder Einige Betrachtungen zur affinen Transformation. ZfV. 107, No. 5, 1982: 173–182.

Wittenburg, R. (1999): Zur geodätischen Beschreibung von Deformationsprozessen im 3D-Bereich. In: Krumm, F., Schwarze, V. S. (Eds.): Quo vadis geodesia ...? Festschrift for Erik W. Grafarend on the occasion of his 60th birthday. Schriftenreihe der Institute des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik. Technical Reports Department of Geodesy and GeoInformatics, pp. 515–523.

Wittenburg, R. (2005): Abschluss des DFG-Forschungsprojektes 3D-Strainanalyse (Probleme, Lösungen, Ergebnisse, Ausblick). In: Sroda, A., Wittenburg, R. (Eds.): 6. Geokinematischer Tag. Schriftenreihe des Instituts für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Wortel, M. J. R., W. Spakman (2000): Subduction and Slab Detachment in the Mediterranean-Carpathian Region. Science Reprint, vol. 290: 1910–1917.

Wübbena G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000): Automated absolute field calibration of GPS antennas in real-time. Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. ION GPS 2000.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

Nuckelt, A. (2006): Multilevel B-Spline Approximation zur Modellierung von Geschwindigkeitsfeldern, ZfV, Vol. 131, No. 4, 2006, pp. 207–215.

Hoeven, A.G.A. van der, V. Mocanu, W. Spakman, M. Nutto, A. Nuckelt, L. Matenco, L. Munteanu, C. Marcu , B.A.C. Ambrosius (2005): Observation of present-day tectonic motions in the Southeastern Carpathians: Results of the ISES/CRC 461 GPS-measurements. EPSL, vol. 239: 177–184.

b) auf wesentlichen Fachkongressen

keine

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Nuckelt, A.; M. Westerhaus, A. Knöpfler (2006): Time Series Analysis for the GPS Permanent Station Bucharest. Geophysical Research Abstracts. Vol. 8. 03773.

Nuckelt, A., M. Nutto, G. Schmitt, A. G. A. van der Hoeven, C. Marcu, V. Mocanu (2005): Status report of the CRC 461 subproject „three dimensional plate kinematics in Romania“. Geophysical Research Abstracts. Vol. 7. 00120.

c) in Monographien

Schmitt, G., A. Nuckelt, A. Knöpfler, C. Marcu (2007): Three Dimensional Plate Kinematics in Romania. Proceedings of International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation. Bucharest, Romania. Oct. 4–6, 2007

Nuckelt, A., (2007): Dreidimensionale Plattenkinematik: Strainanalyse auf B-Spline-Approximationsflächen am Beispiel der Vrancea-Zone/Rumänien. Universitätsverlag Karlsruhe. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, vol. 5.

Knöpfler, A., M. Mayer, A. Nuckelt, B. Heck, G. Schmitt (2007): Untersuchungen zum Einfluss von Antennenkalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze. Universitätsverlag Karlsruhe. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, vol. 1.

Nutto, M. (2006): Internetbasiertes Fachinformationssystem zur Plattenkinematik. Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Universitätsverlag Karlsruhe.

5.2.2.3 Vorträge

Nuckelt, A. (2007): Interpolating a velocity field using Multilevel B-splines, EGU General Assembly 2007. 15.–20.04.2007. Wien.

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1996 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	590.585 €	15.695 €	0	606.280 €
2005	117.600 €	500 €	0	118.100 €
2006	123.600 €	5.200 €	0	128.800 €
2007	117.600 €	500 €	0	118.100 €
Summe	**949.385 €**	**21.895 €**	**0**	**971.280 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Schmitt, G., Prof. Dr. 2. Heck, B., Prof. Dr. 3. Spitzmüller, K., Dr. 4. Wiesel, J., Dr.-Ing. 5. Illner, M., Dr.-Ing. 6. Mayer, M., Dr.-Ing. 7. Vetter, M., Dipl.-Ing.(FH) 8. Heidbach, O., Dr. 9. Mocanu, V., Dr. 10. Marcu, C., Dr. 11. Ambrosius, B.A.C., Prof. Ir. 12. Kottmeier, C., Prof. Dr.	Geodäsie Geodäsie Mathematik Geodäsie Geodäsie Geodäsie Geodäsie Geophysik Geophysik Geodäsie Geodäsie Meteorologie und Klimaforschung	GIK GIK MI–II IPF GIK GIK GIK GPI UTCB UTCB TU Delft IMK	07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 01/2002–12/2007 01/2002–12/2007 07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 01/2002–12/2007 01/2004–12/2007 01/2002–12/2007 07/1996–12/2007 01/2002–12/2007 01/2005–12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Nutto, M., Dr.-Ing. 2. Nuckelt, A., Dr.-Ing. 3. Knöpfler, A., Dipl.-Ing.	Geodäsie Geodäsie Geodäsie	GIK GIK GIK	01/2002–03/2005 04/2004–12/2007 04/2005–12/2007	BAT IIa BAT IIa BAT IIa
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt B3

Seismogenic Potential of the Vrancea Subduction Zone - Quantification of Source and Site Effects from Strong Earthquakes

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dr. Vladimir Sokolov
Dr. Maren Böse

Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 General information about the completed project B3

5.1.1 Title:

Seismogenic Potential of the Vrancea Subduction Zone – Quantification of Source- and Site-Effects from Strong Earthquakes

5.1.2 Research areas:

Seismology, seismicity

5.1.3 Principal investigator:

Professor Dr. Wenzel, Friedemann, 17.01.1951
Geophysikalisches Institut der Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstraße 16
76187 Karlsruhe
Tel.: 0721/ 608-4431
Fax: 0721/ 71173
E-Mail: friedemann.wenzel@gpi.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Staff:

Dr. Vladimir Sokolov
Dr. Maren Böse

5.1.5 Romanian partners:

Dr. G. Marmureanu, Dr. M. Radulian, Dr. M. Popa, National Institute of Earth Physics (NIEP), Bucharest
Professor D. Lungu, Technical University of Bucharest and INCERC, Bucharest
Professor C. Dinu, Faculty of Geology and Geophysics, Bucharest University, Bucharest

5.2 Project development report

5.2.1 Report

Abstract

Two key results have been obtained during the research, both of which bear high significance for earthquake safety of Romania. The first is the probabilistic hazard maps, which incorporate known facts of seismology, tectonics, and geology and which considers intermediate-depth (Vrancea) and shallow (crustal) seismicity. The second is the earthquake information system, which consists of the regional and urban shakemaps and the early warning system. The system integrates results of other subprojects (B3, B4, B6, and B7) and serves as input to the Disaster Management Tool (DMT).

Assessment of seismic hazard

Analysis of recent strong-motion data obtained in Romania and available information from historical earthquakes allows constructing the “azimuth-“ or “region-dependent” attenuation relationships for the territory in terms of peak ground acceleration (PGA) and velocity (PGV), acceleration response spectrum (RSA), and seismic intensity (SI, MSK or MMI scale) (SOKOLOV & BONJER 2006; SOKOLOV & WENZEL 2007). The technique used for the analysis is based on regional source scaling (SOKOLOV ET AL. 2005) and site effect models (SOKOLOV ET AL. 2004ab) and it has been also tested for other seismic regions of the world (SOKOLOV ET AL. 2006b; 2007a). The relationships, in contrast to the existing empirical ones (e.g. MARZA & PANTEA 1994; LUNGU ET AL. 1995, 1997), do not require the special procedures of conversion between the ground motion parameters.

The developed region-dependent attenuation relationships, together with the recent data and models describing seismicity and parameters of earthquake ground motion, were used in probabilistic assessment of seismic hazard for the Romanian territory (MOHINDRA ET AL. 2007; SOKOLOV ET AL. 2006, 2007). The results show that the hazard for Romania is determined, for small return period, mainly by the Vrancea intermediate-depth seismicity. However, when considering the small values of probability of being exceeded or large return periods, the influence of crustal events may be significant (more than VI–VII MSK, PGA up to 200–250 cm/s^2) for some areas located in the western and southern parts of Romania. For example, the intensity hazard is larger than MSK VII almost for the whole territory of Romania for return period 475 years.

ShakeMap

A shake map methodology has been established and tested for intermediate-depth Vrancea earthquakes. The technique is based on seismological information gathered in Romania during the last few years. The used database includes several hundred acceleration records from more than 120 small magnitude (M<5.5) earthquakes recorded in Romania in 1996–2004, several records obtained during five larger events with 6.0<=M<=7.4, and observed intensity maps from four strong events with M>=6.9. The approach is based on spectral models of seismic site effects at a large number of locations in SE-Romania. In contrast to the Californian TriNet Shakemaps (WALD ET AL. 1999), our methodology is applicable to regions with a small number of seismic observations.

Earthquake early warning

The accumulation of strong earthquakes with resembling source mechanisms in the Romanian Vrancea zone, SE Carpathians, allows designing a simple, cheep and robust earthquake early warning (EEW) system for Bucharest with leading times of about 25 seconds. A new method for EEW, called as PreSEIS (Pre-SEISmic shaking), has been developed and applied for the case of city of Istanbul. The method is based on two-layer feed-forward (TLFF) neural networks and it is applicable to a finite-fault case. It inverts time-dependent seismic attributes that are derived from ground motion observations at different sensors in a seismic network. PreSEIS estimates the most likely hypocenter location, moment magnitude, and rupture expansion of an earthquake in progress.

5.2.1.1 State of knowledge at the last application

Site-dependent seismic hazard assessment for Romania

Analysis of the macroseismic and instrumental data from the intermediate-depth Vrancea earthquakes revealed several peculiarities of earthquake effects (IVAN ET AL. 1998; MANDRESCU 1984; MANDRESCU & RADULIAN, 1999; MANDRESCU ET AL. 1988; MOLDOVAN ET AL. 2000; POPA ET AL. 2005). They may be summarized as follows: (a) The earthquakes affect very large areas with a predominant NE-SW orientation; (b) The local and regional geological conditions can control the amplitudes of earthquake ground motion to a larger degree than magnitude or distance. The strong ground motion parameters exhibit a large variability depending on site location.

The peculiar features of the Romanian seismicity and the distribution of earthquake ground motion parameters do not allow performing a proper selection of appropriate ground-motion model developed for the other regions. The relationships between ground motion parameters and earthquake characteristics in the Vrancea zone are

represented by the empirical azimuth-dependent attenuation equations for seismic intensity (e.g., IVAN ET AL. 1998; MARZA 1996; MARZA & PANTEA 1994) and maximum peak ground acceleration (LUNGU ET AL. 1995, 1997; MOLDOVAN ET AL. 2000).

The recent needs of earthquake engineering, seismic risk management and insurance practice require seismic hazard assessment in terms of different ground-motion parameters, which include seismic intensity, peak amplitudes, and response spectra. Construction of the uniform ground-motion model, which allows adequate representation of the features of seismic effect in Romania, was one of main goals of our study which is based on recent developments (BONJER ET AL. 1999; WIRTH ET AL. 2003; SOKOLOV ET AL. 2004b).

Despite of rapidly developing strong ground motion network, Romania may be considered as one of the region with a lack of instrumental strong-motion data. Thus, when developing attenuation relationships, there is a necessity to utilize all available information including macroseismic database collected during recent strong earthquakes.

The present seismic code of Romania (P100-1/2004) considers the earthquake hazards for return period (mean recurrence interval) of 100 years (40 % probability of being exceeded in 50-year exposure time). The assessment of seismic hazard should be revised in accordance to the recent requirements (e.g. LUNGU ET AL. 2006). As recommended in EUROCODE 8, two variants should be considered for ordinary constructions, namely: a probability of exceedance of 10% in 50 years (recurrence period of 475 years), and a probability of exceedance of 10% in 10 years (recurrence period of 95 years). Several studies have been carried out to evaluate the seismic hazard in Romania using the probabilistic approach. However, the studies are characterized by incomplete consideration of all sources of seismicity in Romania and they were performed only in terms of peak acceleration or intensity.

ShakeMap

Shake maps visualize the level and distribution of seismic ground shaking due to a real or a scenario earthquake. This information is essential for (a) the emergency response and loss estimation after strong earthquakes (if provided in (near) real-time), (b) the public information and education, (c) the earthquake engineering and seismological research, and (d) the planning and training of task forces and stakeholders using earthquake scenarios (WALD ET AL. 2005).

The spatial interpolation of measured ground motions is a key factor in the shake map methodologies. The well-known TriNet ShakeMaps that are generated on a routine basis for earthquakes in California (WALD ET AL. 1999), utilize geologically based frequency- and amplitude-dependent site corrections. This methodology relies on (1) a high density of ground motion sensors as backbone for the shake maps as well as for the rapid determination of earthquake source parameters (magnitude and

hypocenter location), and (2) the availability of site and/or basin amplification factors linked to geological subsurface characterizations. Because the second item is based on a large database of ground motion records, it requires a long history of strong motion instrumentation in regions, in which shake maps shall be established. The availability of strong ground motion records in Romania is insufficient to establish geology based amplification maps such as used in the TriNet ShakeMaps. The use of ground motion and site characteristics evaluated for other regions appears questionable for the Romanian case because of specifics of the intermediate-depth Vrancea seismicity and of the sedimentary structure of the largest part of the territory.

Early warning system

Earthquake early warning (EEW) systems serve as tools for co-seismic risk reduction. Basically, they make use of differences in the propagation speed of seismic and electromagnetic waves and issue warnings, if necessary, to potential users before strong shaking at these sites occurs. The maximal warning time of an EEW system is generally defined as the time span between the P-wave detection at the first triggered EEW sensor and the arrival of high-amplitude S- or surface waves at the user site. As these time periods usually are extremely short, EEW systems must recognize the severity of expected ground motions within a few seconds. Based on this information, suitable actions for the damage reduction can be triggered and executed.

EEW systems shall comply with primary two requirements: they have to be very fast and, at the same time, highly reliable. The two main types of EEW systems, namely: *regional* and *on-site* warning systems, which meet these claims in different manner (KANAMORI 2005). Regional warning systems, such as the one installed in Taiwan (WU & TENG 2002), use networks of seismic sensors with real-time capability to determine the source parameters of an earthquake. On-site warning systems, such as the Japanese UrEDAS (NAKAMURA 1989), the Californian ElarmS (ALLEN & KANAMORI 2003), or the Romanian EEW system (WENZEL ET AL. 1999), in contrast, are based on seismic observations at single sensors. This characteristic makes them much faster than the regional EEW systems. However, the on-site EEW systems are less robust than their regional counterparts.

5.2.1.2 Applied methods, results and their importance

Strong motion attenuation relationships

We used indirect approach (Fig. 1) for developing of regional attenuation relationships for Peak Ground Acceleration (PGA), Peak Ground Velocity (PGV), Response Spectra Amplitudes (RSA), and seismic intensity (MSK or MMI scale) for the Vrancea intermediate depth earthquakes and territory of Romania (SOKOLOV & WENZEL 2007). The relationships were developed on the basis of Fourier Amplitude Spectrum (FAS) source scaling and attenuation models (SOKOLOV ET AL. 2005), and generalized site amplification functions. The PGA, PGV, and RSA attenuation relationships were calculated using stochastic technique (BOORE 2003) from the site-dependent spectra. The seismic intensity attenuation models were evaluated using the recently developed relations between intensity and FAS (CHERNOV & SOKOLOV 1999; SOKOLOV 2002).

To consider the azimuth-dependent distribution of ground motion parameters from the Vrancea earthquakes, we divided the area that is covered by ground motion networks into six characteristic regions, bearing in mind both general geological and geomorphological conditions and azimuthal direction from the Vrancea zone. The generalized characteristics of the site (or region) amplification were evaluated by averaging of all data, which were obtained for stations located within the given region. The generalized amplification for the “region-independent” rock model was taken from our recent study (SOKOLOV ET AL. 2005).

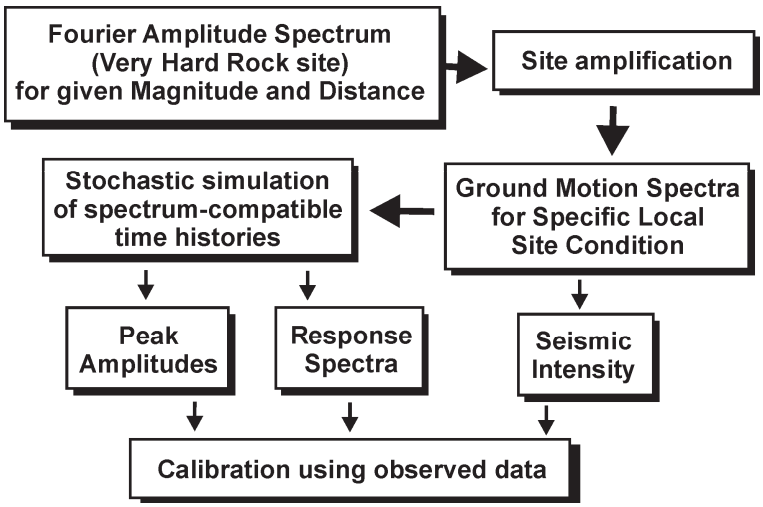


Figure 1: Scheme of evaluation of attenuation relationships based on Fourier amplitude spectra.

For the region of the Transylvanian basin, which is situated toward North-West from the Vrancea area (practically the inner side of the Carpathians Arc), the amount of

available earthquake records for the region is insufficient for site response analysis. Thus, following conclusions made by POPA ET AL. (2005) and RADULIAN ET AL. (2006), we constructed "artificial" function for the case applying additional filter, which substantially reduce level of high-frequency radiation. Finally eight characteristic regions are considered (e.g. SOKOLOV & WENZEL 2007).

The obtained source scaling and site amplification models were tested using the available macroseismic and strong-motion databases accumulated for Romania. The distribution of ground motion parameters were modeled for the large Vrancea earthquakes (SOKOLOV & BONJER 2006).

The attenuation relationships were developed in the following form for PGA (cm/s^2), PGV (cm/s), RSA (cm/s^2) at given frequency

$$\ln Y = a_1 + a_2 \ln M - \exp(a_3 + a_4 \ln H)R + a_5 H \pm \varepsilon \quad (1)$$

and for MSK intensity

$$\ln Y = a_1 + (a_2 + a_3 H)\ln M + (a_4 + a_5 \ln H)R + a_6 H \pm \varepsilon \quad (2)$$

where M is the moment magnitude; R is the epicentral distance, km; H is the focal depth, km; ε is the standard deviation (see SOKOLOV & WENZEL 2007, SOKOLOV ET AL. 2008a, for details). The coefficient $a_1 - a_6$ were evaluated separately for every considered region. The effect of different soil profiles may be easily introduced using the amplification factors to modify the ground motion parameters obtained after application of the generalized attenuation relationships. These relationships and the characteristics of site amplification were used when developing of "Early warning" and "Shakemap" methodology. The VHR spectral model (SOKOLOV ET AL. 2005) was applied for generation of time histories to be used in analysis of nonlinear soil response of various sites in Bucharest on the large Vrancea earthquakes (projects B4 "Non-linear Wave Phenomena in Soft Sediments" and B6 "Geotechnical and Seismic Microzoning of Bucharest".

Probabilistic assessment of seismic hazard

The developed region-dependent attenuation relationships, together with the recent data and models describing seismicity and parameters of earthquake ground motion, were used in probabilistic assessment of seismic hazard for the Romanian territory. Our previous works related to probabilistic seismic hazard estimation were conducted taking into account only the Vrancea earthquakes (SOKOLOV ET AL. 2004a, 2006A; ISMAIL-ZADEH ET AL. 2007). In this study we considered the intermediate-depth and crustal seismicity jointly and used the most recent knowledge on seismic hazard in Romania.

We apply the same technique that was used in our recent works and the detailed description of the technique may be found in the following sources (CHERNOV 1987; SOKOLOV 2000; SOKOLOV ET AL. 2004a). However, the technique has been changed to take into account new developments (e.g. possibility to consider different parameters of seismicity and different attenuation models for various seismic zones) and to introduce logic tree elements.

When possible, we used various available models of seismicity and ground motion attenuation, as alternative variants. The PSHA was performed using logic tree elements in terms of peak ground acceleration (PGA), response spectrum amplitudes (PSA) and seismic intensity (MSK or MM) for various return periods or probabilities of being exceeded during specified exposure time (SOKOLOV ET AL. 2007b,c).

For the Vrancea zone we selected the following alternative models for our calculations (Figure 2). **First**, three models of recurrence rate were considered, namely: (1) the magnitude-frequency relationship evaluated using the composite catalogue compiled recently by MOHINDRA ET AL. (2007) (model R1); (2) the relationships given by LUNGU ET AL. (1997) (model R2); (3) the relationship given by MUSSON (2000) (model R3). **Second**, two models of earthquake depth distribution were used for the Vrancea intermediate-depth seismicity, namely: (1) the model D1 considers uniform distribution through depth; (2) the model D2 implies distribution based on the observed catalogue. **Third**, two variants of attenuation relations were used, namely: (1) the region-dependent attenuation models described above (models PGA_V1, PGV_V1; MSK_V1, RSA_V1); (2) the attenuation relationships proposed by LUNGU ET AL. (1995, 1997) (model PGA_V2). We also constructed the correspondent model for macroseismic intensity using the LUNGU ET AL (1997).

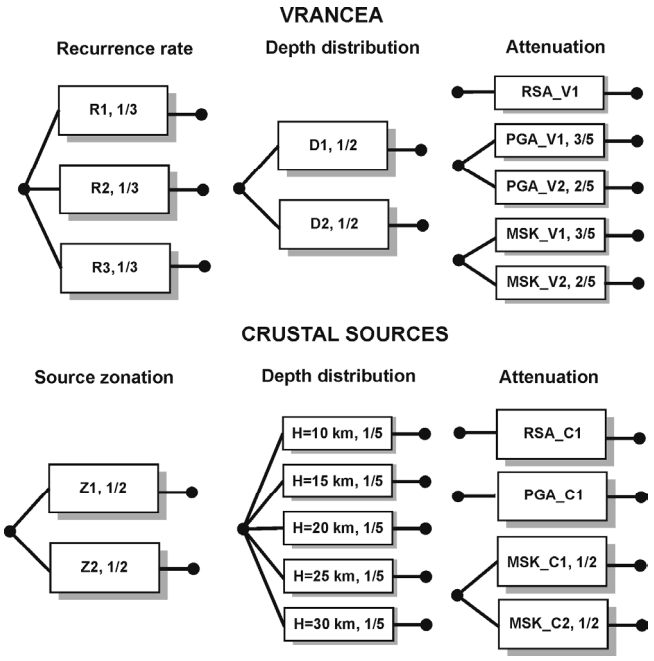


Figure 2: Logic tree branches with assigned weights. See text for description.

PGA relationships of empirical correlation between PGA values and MSK intensity (ENESCU 1977; BONJER ET AL. 2001) (model MSK_V2). Only one model was used for peak amplitudes of ground velocity and for Response Spectra (see section "Attenuation Relationships"), correspondingly, due to the absence of alternatives. For the crustal seismicity we selected two models of earthquake sources (models Z1 and Z2) and five variants of source depth (10 km–30 km) with the equal probability (weight). Macroseismic intensity is represented by two models, which allow the depth variation. The first one (model MSK_C1) contains three attenuation relations proposed by PANTEA & MOLDOVAN (2000), ZCIROS (1996) for different crustal zones in Romania, and GLAVCHEVA (1990) for Bulgaria. The second model (MSK_C2) was constructed based on four region-dependent models (PANTEA, 1994) for the crustal seismic zones located within Romania and one model for Bulgaria (GLAVCHEVA 1990). Only one model of attenuation relation for peak ground acceleration (model PGA_C1) and response spectra (model RSA_C1) was taken from AMBRASEYS ET AL. (1996) due to the absence of alternative relationships.

The results (Fig. 3) show that the hazard for Romania is determined, for small return period, mainly by the Vrancea intermediate-depth seismicity. However, when considering the small values of probability of being exceeded or large return periods, the influence of crustal events may be significant (more than VI–VII MSK, PGA up to 200–250 cm/s^2) for some areas located in the western and southern parts of Romania. For example, the intensity hazard is larger than MSK VII almost for the whole territory of Romania for return period 475 years.

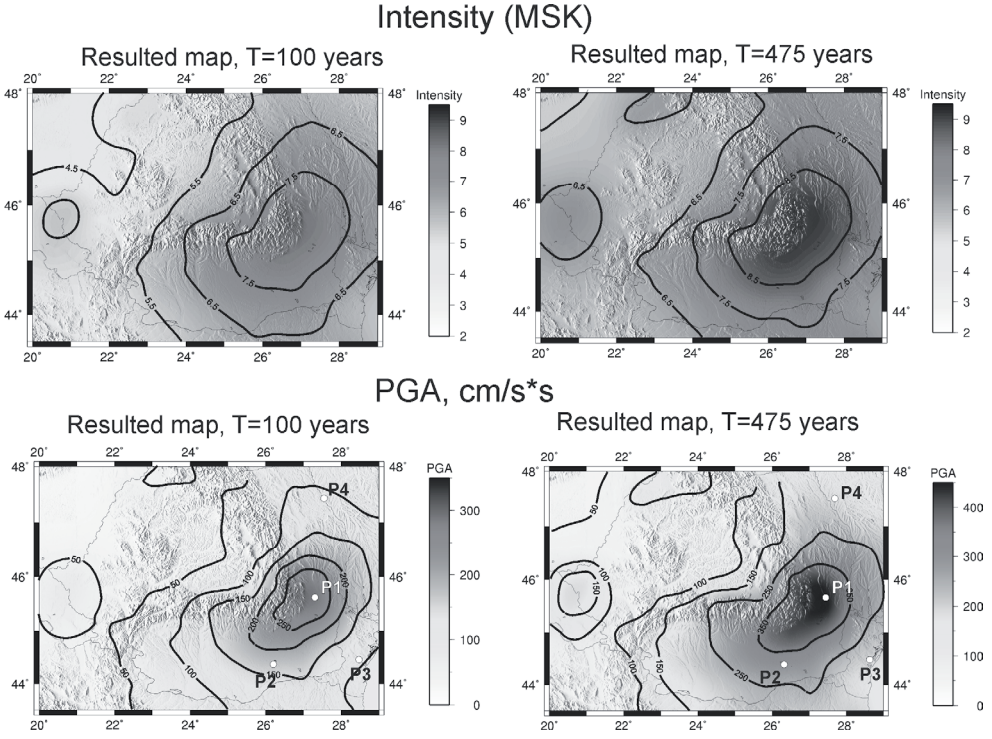


Figure 3: Probabilistic seismic hazard maps obtained after joint analysis of intermediate-depth and crustal seismicity. Gray symbols show location of particular points for which the Uniform Hazard Response spectra are plotted in Figure 4.

Fig. 4 shows 5%-damped Uniform Hazard Response Spectra (UHRS) calculated for particular points shown in Fig. 3. The normalized spectra were obtained as the UHRS amplitudes divided by the correspondent PGA-hazard values. The area of Moesian platform is characterized by relatively high amplitudes at the frequencies lower than 1.0–0.5 Hz. The phenomenon is particularly prominent when increasing return period.

Sensitivity analysis shows that uncertainties in input parameters affect on results of probabilistic seismic hazard assessment in a complicated manner depending on interrelation between characteristics of seismic zones (shape of the zone, seismic rate, maximum magnitude, depth distribution) and the type of ground motion descriptor (maximum amplitude, intensity, response spectra, etc), on relative location of the site and the zone, and on the chosen return period (probability of being exceeded). Therefore one should not consider only one value of ground motion parameter for specified return period but a probability distribution function bearing in mind possible variation of input parameters (see also BEAUVAL & SCOTTI 2004). On other hand, it is not possible to convert the results obtained for peak acceleration into intensity directly. In addition, for the case of complicated distribution of seismicity along the studied territory, the simple interpolation between a few widely distributed sites may give misleading results.

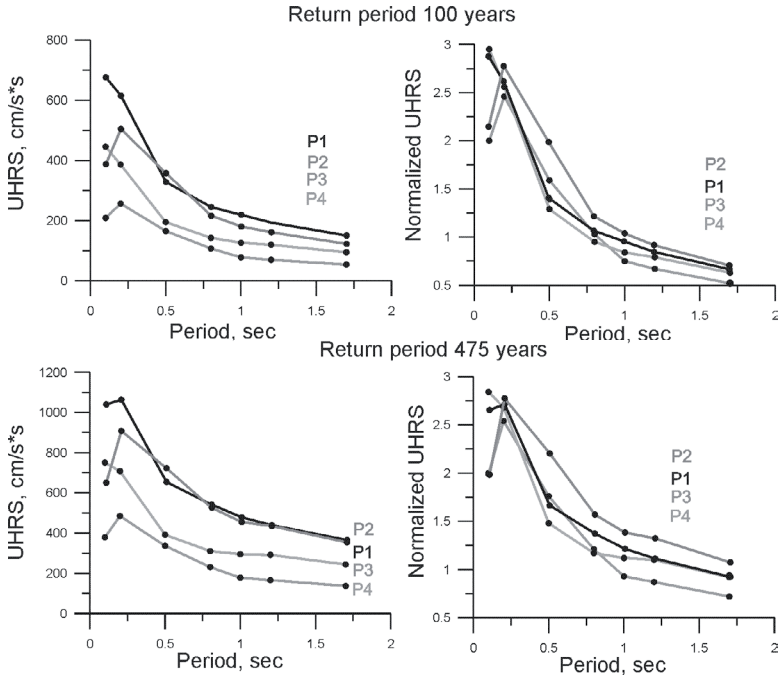


Figure 4: Uniform Hazard Response spectra calculated for the particular locations shown in Figure 3.

When analyzing the impact of particular input parameters, it can be concluded that for the case of intermediate-depth earthquakes the parameters of the source zone (magnitude-frequency distribution and depth distribution of earthquake sources) are the most important. The shape of source zones is crucial for shallow seismicity. The choice of minimum magnitude may be important when it is necessary to take into account high-amplitude high-frequency peak acceleration. Reduction of uncertainty associated with the attenuation models is also very important issue.

ShakeMap

Our shake map methodology for intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes basically equals to that used in the TriNet ShakeMaps (WALD ET AL. 1999). However, the major difference is that our technique is based on spectral models of site effects instead of geological maps combined with empirical amplification factors for different soil types. The main steps of our shake map procedure for a specified ground motion parameter *IM* are the following.

- Gathering of observed ground motions and extraction of the *IM* value,
- Determination of the moment magnitude *Mw* and the hypocenter location of the earthquake,
- Estimate of the *IM* value for hypothetical very hard rock (VHR) sites at so-called phantom stations using of empirical attenuation laws; the phantom stations are located on a regular grid of 0.25° spacing; sites within a 35 km radius around each recording K2 station are removed from the grid,
- Reduction of the *IM* values at the recording K2 stations to the VHR condition,
- Interpolation of the *IM* values at the phantom and recording K2 stations (reduced to the VHR) onto a fine rock grid of 0.01° spacing,
- Amplification of the IM values at each fine grid point through their multiplication with the respective amplification factor (the amplification map).

The shake map methodology needs the following: (1) empirical attenuation laws for VHR condition; (2) magnitude- and depth-dependent amplification maps relative to VHR condition; and (3) observational data at recording stations. The first and the second items are based on generalized spectral models of the seismic source, wave propagation and site effects (SOKOLOV ET AL. 2004b, 2005; SOKOLOV & WENZEL, 2007) which give the site-dependent Fourier amplitude spectrum (FAS) of seismic ground motion for the Vrancea earthquakes. The models allow generating time series of ground motions using the stochastic modelling procedure (BOORE 2003). The ground motion parameters *IM,* such as peak ground acceleration (*PGA*) or peak ground velocity (*PGV*), can be extracted from these time series. Instrumental Intensity *I* (MMI or MSK scale) can be estimated directly from the FAS as shown by CHERNOV AND SOKOLOV (1999), SOKOLOV (2002) and SOKOLOV AND WALD (2002).

We determined the parameters *IM* at different sites in SE-Romania. The desired amplification factor is obtained as the ratio of the parameter value at a given site relatively to the parameter value at a hypothetical VHR condition at the same distance. Using this procedure we calculated the amplification factors for different parameters, magnitudes and distances at 26 K2 stations (BONJER ET AL. 2001), at 32 stations temporally installed in SE-Romania during the seismic tomography experiment CALIXTO in 1999/2000, and for eight characteristics regions in SE-Romania (SOKOLOV & WENZEL 2007; see also section “Strong motion attenuation relationships”).

Fig. 5 compares the amplification factors versus magnitude and hypocentral distance for two characteristic regions taken as the examples. The Focsani region is characterized by high-amplitude high-frequency (more than 10 Hz) amplification, while the South-West region also exhibits relatively high-amplitude amplification in the intermediate-frequency range (3–10 Hz). The amplification is characterized by the intensity increment, which is defined as $\Delta I = I_S - I_{VHR}$, and by the amplitude ratio, which is defined as $RA = A_S / A_{VHR}$, where the indexes S and VHR denote the ground parameters evaluated for specific site and Very Hard Rock conditions correspondingly. The amplification factors essentially depend on relation between the predominant frequency of input seismic signal, which is a function of magnitude and distance, and frequency of maximum soil response. In general, the broad-band site amplification for the South-West region resulted in the higher values of amplification, which is especially prominent for PGV, as compared with the narrow-band high-frequency site amplification for the Focsani region.

As expected, the maximum values of the PGA amplification factor correspond to relatively small magnitudes, which produce high-frequency ground motion. However, the intensity amplification reveals the opposite picture – the highest amplification is observed for large earthquakes. The phenomenon relates to the peculiarities of the technique used for the intensity estimation in this study (SOKOLOV 2002; SOKOLOV & WALD 2002). The magnitude- and distance-dependent nature of amplification factor indirectly reflects the general feature of ground motion near the earthquake source, namely: the severity of ground motion expressed in terms of intensity scale is much higher at a soil site than at a rock site, while the peak amplitudes of ground acceleration may show an opposite picture.

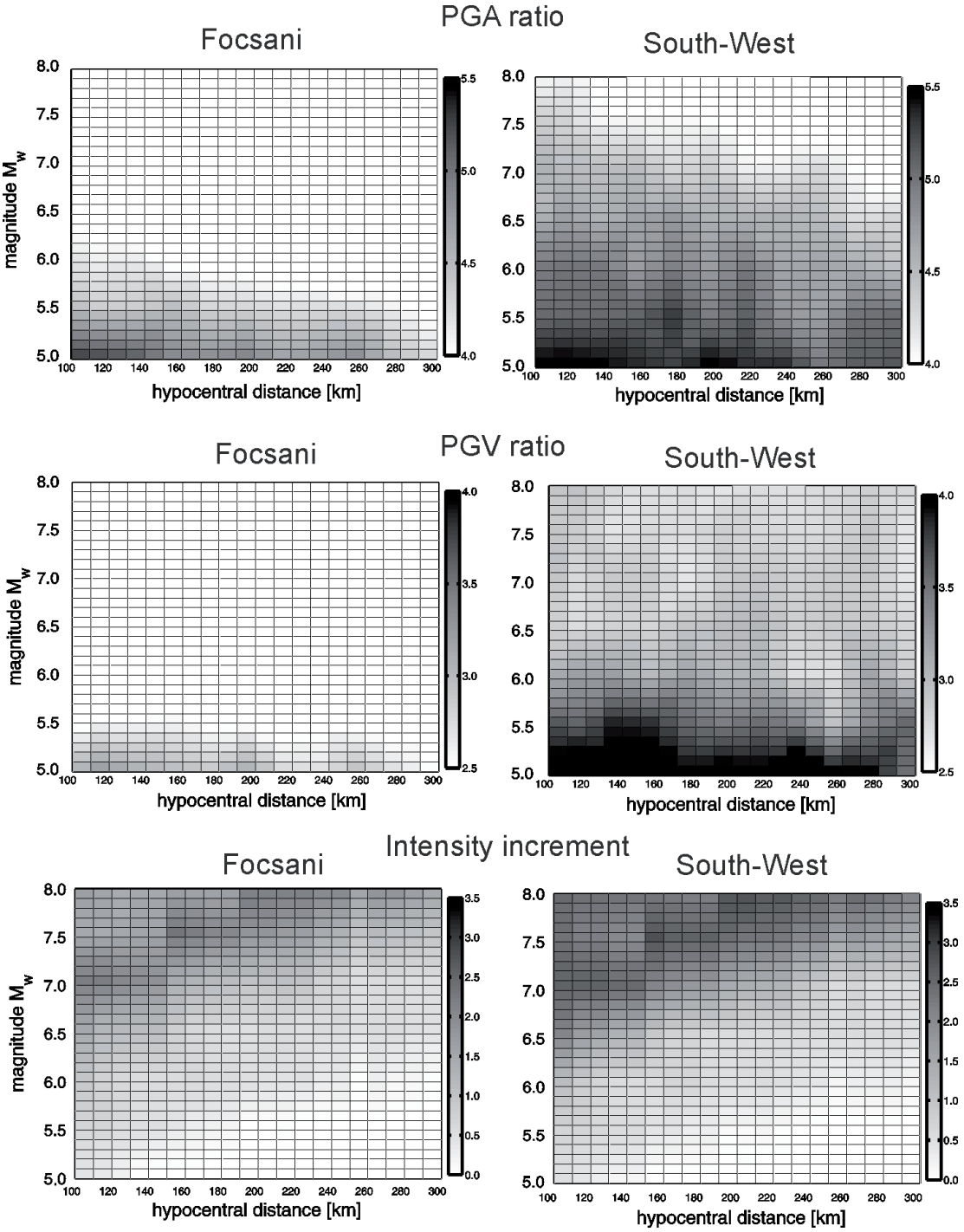


Figure 5: Amplification factors evaluated for two characteristics regions for various magnitudes and distances.

Figure 6 shows comparison between the observed macroseismic data for the Vrancea earthquake occurred on March 4, 1977 (M_w = 7.4; depth=95 km) and the computed shake maps for intensity *II*, peak ground acceleration (*PGA)*, and velocity (*PGV)*. Note that only one strong motion record had been obtained during the earthquake (st. INCERC).

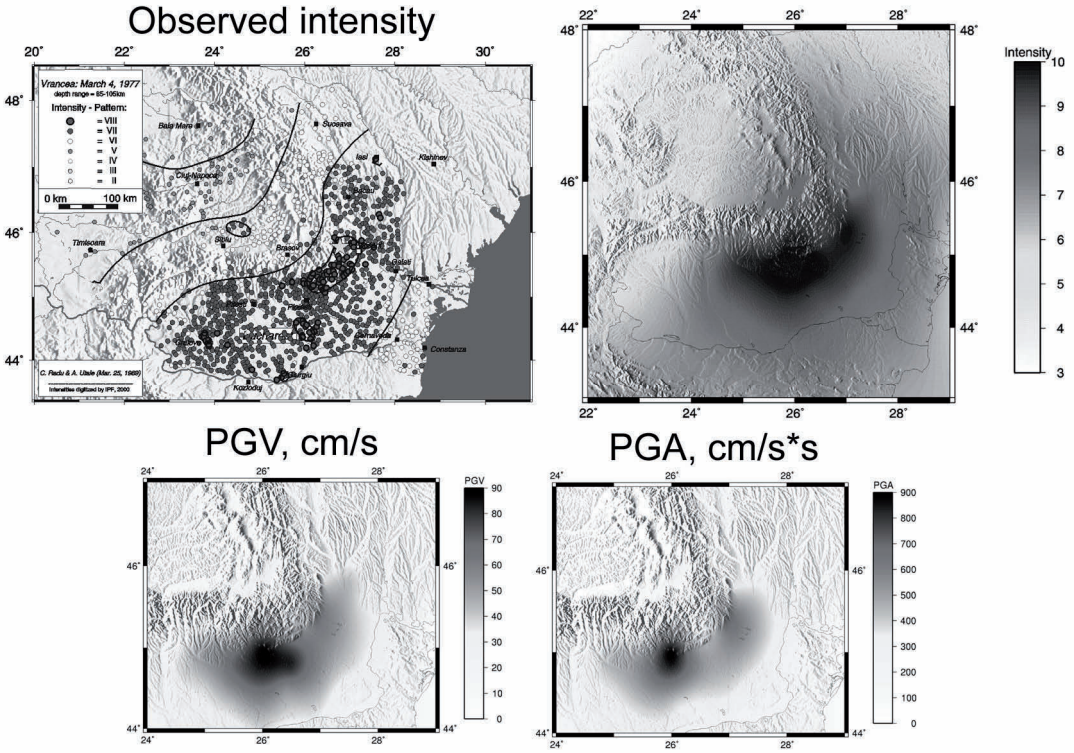


Figure 6: comparison between the observed macroseismic data for the Vrancea earthquake occurred on March 4, 1977 (M_w = 7.4; depth=95 km) and the computed shake maps.

Development of regional azimuth-dependent attenuation relationships allows using the direct calculation of ground motion parameters for phantom sites instead of the "VHR+site amplification" procedure (steps 3–6 in the scheme). However, the comparative analysis of the efficiency of these two techniques is necessary.

Early warning system

We have developed two methods for Earthquake Early Warning systems, namely: EEW for Bucharest (BÖSE ET AL. 2007), and EEW for Istanbul (BÖSE 2006; BÖSE ET AL. 2007). The EEW technique applied for Bucharest uses information from the faster travelling P-wave recorded at a single sensor in the epicentral area to estimate potential impacts of earthquakes on distant users. Average epicentral distances of 130 km towards the Romanian capital provide warning times of about 25 seconds for all intermediate-depth Vrancea events (Fig. 7). BÖSE ET AL. (2007) have established scaling relations for different ground motion parameters, including peak ground acceleration (*PGA*), spectral acceleration at different periods and at 5% damping ($PSA_{0.3s}$, $PSA_{1.0s}$, $PSA_{2.0s}$), and instrumental intensity (*I*). These laws are expressed by relations of form

$$\log IM = a + b \log P_{epi} \text{, and } \quad I = a + b \log P_{epi} . \qquad (3)$$

where P_{epi} is the maximum filtered P-wave amplitude of vertical acceleration (cm/s^2) at the epicentral station VRI, *IM* is the larger value (cm/s^2) of both horizontal components of acceleration at station INCERC (INC, later renamed RBA) in Bucharest. Instrumental intensity *I* (MMI or MSK scale) is determined from the Fourier amplitude spectrum (FAS) of acceleration applying an empirical method by SOKOLOV (2002). Coefficients *a* and *b* are determined by regression from a database containing 19 weak motion records ($3.7 \leq M_w \leq 5.3$) of the Romanian K2 strong motion network (BONJER ET AL. 2001); 2 strong motion records (1986 $M_w = 7.1$, 1990 $M_w = 6.9$, SMA-1), and 36 simulated acceleration records ($5.6 \leq M_w \leq 8.0$) obtained from Empirical Green's Functions (EGF) modelling after IRIKURA (1983) (within the project A7 of the CRC 461).

The second method for EEW, named PreSEIS (Pre-SEISmic shaking) and developed for Istanbul, takes advantage of both regional and on-site warning paradigms (BÖSE 2006). At regular time steps after the triggering of the first sensor, PreSEIS determines the most likely source parameters (hypocenter location, moment magnitude, and rupture expansion) of an earthquake in progress using the momentarily available information on ground shaking at different sensors in a seismic network. PreSEIS is based on Artificial Neural Networks (ANNs) that are used to recognize patterns of seismic attributes and associate them in a statistical sense with specific source parameters. BÖSE ET AL. (2008) demonstrate the PreSEIS approach by using the example of the Turkish mega-city Istanbul, which is exposed to a huge seismic risk.

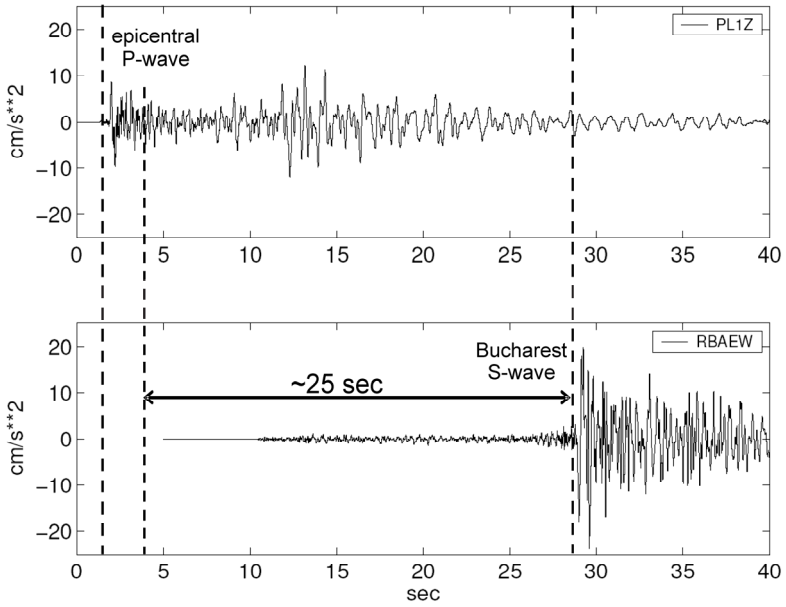


Figure 7: The maximum warning time for Bucharest is defined by the time span between the arrival of the direct P-wave at the detecting EEW sensor (here PLOSTINA) and the S-wave arrival in Bucharest (here INCERC). The expected warning time for Vrancea earthquakes is about 25 seconds.

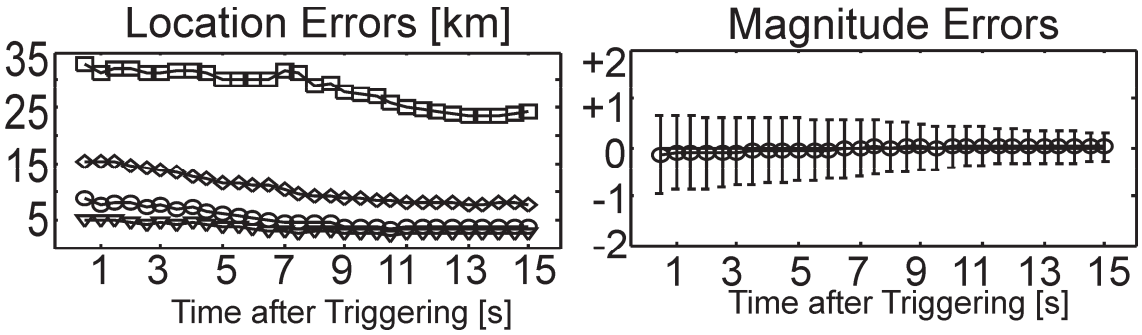


Figure 8: Location (left) and magnitude (right) errors for 280 simulated finite fault scenarios (4.5 ≤ Mw ≤ 7.5) in the Marmara Region (BÖSE ET AL. 2008). The hypocenter location errors are quantified through the 25th, 50th, 75th, and 95th percentiles of the error distributions. The magnitude errors are characterized by their mean and the standard deviation.

The Kandilli-Observatory of the Bogazici University in Istanbul, within the Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System (IERREWS), operates ten strong motion sensors with real-time communication links to two data centers in Istanbul (ERDIK ET AL. 2003). Warning times for Istanbul are expected to range between 5 s and 25 s only (BÖSE 2006).

Applying PreSEIS to 280 simulated finite fault scenarios (BERESNEV & ATKINSON, 1998) with (4.5 ≤ M_w ≤ 7.5) in the Marmara Region, BÖSE ET AL. (2007) showed that the uncertainties of the estimated source parameters decrease with time while the more information at the sensors becomes available. Fig. 8 (left) shows that 50% of the scenarios have location errors of less than 10 km after 0.5 seconds of triggering the first EEW sensor and less than 5 km after 15.0 seconds of triggering. The mean magnitude errors (Fig. 8 right) are about zero during the considered time interval. The standard deviation of these errors is about 0.8 units after 0.5 seconds of triggereing and about 0.3 units after 15.0 seconds of triggering. This observation reveals a general trade-off in EEW: the longer we wait, the better our predictions but the shorter the remaining warning times.

5.2.1.3 Comparison with research outside the CRC

The developed ground motion attenuation relationships, despite of their simplicity, reveal a good comparison with the observed data and clearly reflect the azimuth-dependent distribution of ground motion during the Vrancea earthquakes. The models, in contrast to the existing empirical ones (e.g. MARZA & PANTEA, 1994; LUNGU ET AL. 1995, 1997), allow (i) performing calculations in terms of various engineering parameters of ground motion without conversion between them; (ii) allow calculations for the whole territory of Romania; (iii) the local site effect may be easily introduced.

The recent works related to probabilistic seismic hazard assessment for Romania are characterized by several shortcomings. Some of them took into account only

large deep earthquakes (LUNGU ET AL. 1995, 1999; MANTYNIEMI ET AL. 2003) or shallow seismicity (MOLDOVAN ET AL. 2004, 2008). Among ground motion parameters, only peak ground acceleration (LUNGU ET AL. 1995, 1999; MUSSON 2000; MANTYNIEMI ET AL. 2003) or macroseismic intensity (ARDELEANU ET AL. 2005; MOLDOVAN ET AL. 2004, 2008) were considered. SOKOLOV ET AL. (2004a) performed the calculations for particular points (stations of the K2-network) and analysis presented by ISMAIL-ZADEH ET AL. (2007) covered the northern, eastern, and south-eastern parts of Romania.

The present analysis has been performed for the whole territory of Romania in terms of various engineering parameters of ground motion considering both intermediate-depth and crustal seismicity. For the first time, the logic tree approach has been used for this particular territory and the sensitivity analysis has been performed. The results allow analyzing of seismic loss and risk estimation for the territory (MOHINDRA ET AL. 2007; SOKOLOV ET AL. 2007c).

The developed Shakemap methodology for intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes utilizes all available seismological information collected in Romania during the past years. Besides the digital records from the K2-network, the data include the weak motion observations obtained during the seismic tomography experiment in 1999/2000, the sparse accelerometer database of the strong events (1986 and 1990), and intensity maps from four strong events (1944, 1977, 1986, 1990). The information does not contain detailed references to the geology of the subsurface. Nonetheless it allows modelling of the observed intensity and PGA patterns of the previous strong earthquakes of which only few accelerograms have been recorded. We demonstrate that the shakemaps are feasible even if the strong-motion observations exist since a few years only and if the option to “import” ground motion models and site characteristics from another region appears to be questionable.

In general, the on-site earthquake early warning (EEW) systems face a problem of high scatters in the estimated source parameters as a consequence of highly variable nature of these parameters and locations. The EEW system in Bucharest based on single station warning method is much more stable due to accumulation of database of strong earthquakes with resembling source mechanisms in the Romanian Vrancea zone (WENZEL ET AL. 1999; BÖSE ET AL. 2007).

The major challenge in the development of the EEW systems is the achievement of a robust performance at largest possible warning time. We have developed for the Istanbul area a new method for EEW called PreSEIS (Pre-SEISmic), which is as quick as methods that are based on single station observations (e.g. EEW system for Bucharest) and, at the same time, shows a higher robustness than most other approaches. The ongoing up-date of predictions with time allows PreSEIS to handle complex ruptures, in which the largest fault slips do not occur close to the point of rupture initiation.

5.2.1.4 Open questions

The constructed attenuation models do not consider some specific features of earthquake ground motion generation, such as effects of rupture directivity, influence of three-dimensional geological structures, and nonlinear site-response. Bearing in mind the large variability of ground motion parameters, it seems to be important, in addition to generalized “regional-dependent” relationships, to introduce also site-specific coefficients that take into consideration geological, geomorphological, and geotechnical characteristics of the sediments and their thickness. The coefficients may be easily introduced into the ground motion estimations. For the case of large magnitude earthquakes, it is necessary to take into account the source dimension and to apply a hybrid technique, which considers low- and high-frequency ranges separately.

The probabilistic assessment of seismic hazard was performed for points with 0.25°×0.25° spacing using the generalized attenuation relationships. Therefore, the problem of introducing of site effect for particular locations (e.g. within the city of Bucharest, see MANDRESCU ET AL. 2007) is still to be resolved. It has been shown also that, due to uncertainties related to the input parameters, we should consider a probability distribution function instead of only one value of ground motion parameter for specified return period. It requires knowledge about characteristics of the variation and a lot of hazard computations using, for example, Monte Carlo technique (e.g. CRAMER ET AL. 1996, 2002).

The developed shakemap procedure also requires consideration of geological and geotechnical characteristics especially for areas with a sparse concentration of strong motion stations. The magnitude- and distance-dependent nature of amplification coefficients (Fig. 5), which has been revealed on the basis of numerical simulation, should be tested using available empirical ground motion databases, which contains records obtained simultaneously at soil and rock conditions (e.g. Japanese KNet and KikNet networks). Also the comparative analysis of the efficiency of two techniques of shake map generation, namely: the “VHR+site amplification” and the “Generalized attenuation” procedures is necessary.

The Romanian Earthquake Early Warning system focuses on Vrancea events. For future operation, the system must include redundancy to make it insusceptible to small crustal events close to the sensors or to ambient noise that might cause false alerts. When developing the EEW system for Istanbul, the main objective was theoretical development and demonstration of a new approach to EEW technique rather than the design of a final tool that will be applicable to real data. The studies were based on simulated ground motion time series. In the future It is necessary to test and to extend the approach by using combined datasets of observational and simulated data from California and Japan.

5.2.1.5 Reason for terminating the project

The project B3 ends due to the completion of the CRC 461.

5.2.1.6 Literature

Allen, R., Kanamori, H. (2003): The potential for earthquake early warning in southern California. Science, Vol. 300, 786–789.

Ambraseys, N.N., Simpson, K.A., J.J. Bommer, J.J. (1996): Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 25: 371–400.

Beauval, C., Scotti, O. (2004): Quantifying Sensitivities of PSHA for France to earthquake catalog uncertainties, truncation of ground motion variability, and magnitude limits, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 94: 1579–1594.

Beresnev, I., Atkinson, G. (1998): FINSIM – a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time histories from finite faults. Seism. Res. Lett., Vol. 69(1): 27–32.

Böse, M. (2006): Entwicklung eines Erdbeben-Frühwarnsystems für Istanbul unter Verwendung Künstlicher Neuronaler Netze. Dissertation, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe, (http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=2006/physik/6).

Böse, M., Ionescu, C., Wenzel, F. (2007a): Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. Geophys. Res. Lett., 34, Doi: 10.1029/2007GL02396.

Böse, M., Erdik, M., Wenzel, F. (2007b): Earthquake Early Warning for the Istanbul area – Between regional and on-site warning strategies. In: Gaspari, P., Manfredi, G., Zschau, J. (eds.) Seismic Early Warning, Springer Verlag, 65–84, ISDN-13 978-3-540-72240-3.

Bonjer, K.P., Oncescu, M.C., Driad, L., Rizescu, M. (1999): A note on empirical site responses in Bucharest, Romania. In: F. Wenzel et al. (eds) Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 149–162.

Bonjer K.P., Sokolov, V., Wirth, W., Rizescu, M., Driad, L., Treml, M. (2001): The seismogenic potential of the Vrancea subduction zone – quantification of source- and site-effects of great events. in Collaborative Research Center (CRC) 461 “Strong Earthquakes: a Challenge for Geosciences and Civil Engineering”, report of 1999–2001, University of Karlsruhe, 259–293 (in German).

Boore, D.M. (2003): Simulation of ground motion using the stochastic method. PAGEOPH, Vol. 160: 635–676.

Chernov, Y.K. (1989): Strong ground motion and quantitative assessment of seismic hazard. Tashkent: Fan Publishing House (in Russian).

Chernov, Y.K., Sokolov, .Yu. (1999): Correlation of seismic intensity with Fourier acceleration spectra. Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy, Vol. 24(6): 522–528.

Cramer, C.H., Petersen, M.D., Reidle, M.S. (1996): A Monte Carlo approach in estimating uncertainty for a seismic hazard assessment of Los Angeles, Ventura, and Orange Counties, California, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86: 1681–1691.

Cramer, C.H., Wheeler, R.L., Mueller, C.S. (2002): Uncertainty analysis for seismic hazard in the Southern Illinois basin. Seism. Res. Letters, Vol. 73: 792–805.

Enescu, D. (1997): Ground movement acceleration-macroseismic intensity relations for Vrancea earthquakes. Considerations of the macroseismic maps of some of these earthquakes. St. cerc. GEOFIZICA., Vol. 35: 15–27.

Erdik, M., Fahjan, Y., Ozel, O., Alcik, H., Mert, A., Gul, M. (2003): Istanbul earthquake rapid response and the early warning system. Bulletin Earthquake Engineering, Vol. 1: 157–163.

Glavcheva, R. (1990): Parametrization of the isoseismals from Bulgarian earthquakes. Bulgarian Geoph. J., Vol. 16(4): 38–45 (in Bulgarian).

Hannich, D., Hötzl, H., Ehret, D., Huber, G., Danchiv, A., Bretotean, M. (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors. Proc. International Workshop on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4–6 October, 2007, 205–221.

Irikura, K. (1983): Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Vol. 33 (2): 63–104.

Ismail-Zadeh, A., Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P. (2007): Tectonic stress, Seismicity and Seismic Hazard in the South-Eastern Carpathians, Natural Hazards, Vol. 42 (3): 493–514.

Ivan, I.A., Enescu, B.D., Pantea, A. (1998): Input for seismic hazard assessment using Vrancea source region, Rom. Journ. Phys., Vol. 43: 619–636.

Kanamori, H. (2005): Real-time seismology and earthquake damage mitigation. Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences 33, 5.1–5.20.

Lungu, D, Demetriu S, Radu C, Coman O. (1995) Uniform hazard response spectra for Vrancea earthquakes in Romania. In: Duma (ed.) Proceedings 10th European Conf on Earthq Eng, Balkema Rotterdam, 365–370.

Lungu, D, Zaicenco, A., Cornea, T., Van Gelder, P. (1997): Seismic hazard: recurrence and attenuation of subcrustal (60–170km) earthquakes. Structural Safety and Reliability, Vol. 7: 1525–1532

Lungu, D., Demetriu, S., Aldea, A., Arion, C. (2006): Probabilistic seismic hazard assessment for Vrancea earthquakes and seismic action in the new seismic code of Romania. Proc. of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, September 3–8, 2006, Geneva, Switzerland, CD_ROM, paper 1003.

Mandrescu, N., Radulian, M., Marmureanu, G. (2007): Geological, geophysical and seismological criteria for local response evaluation in Bucharest urban area, Soil Dyn. Earthq. Engng., Vol. 27: 367–393.

Mantyniemi, P., Marza, V.I., Kijko, A., Retief, P. (2003): A new probabilistic seismic hazard analysis for the Vrancea (Romania) seismogenic zone. Natural Hazards, Vol. 29: 371–385.

Marza, V.I. (1996): Romania's Seismicity File: 1. Pre-Instrumental Data, Special Publications of the Geological Society of Greece, Vol. 6: 141–148

Marza, V.I., Pantea, A.I. (1994): Probabilistic estimation of seismic intensity attenuation for Vrancea (Romania) subcrustal sources. Macropoulos K, Suchadolc P (eds.) Proc. XXIV Gen. Assembly ESC, Athens, Greece, 19–24 September 1994, Vol. 3: 1752–1761.

Moldovan, I.A., Enescu, B.D., Ionescu, C. (2000): Predicting peak ground horizontal acceleration for Vrancea large earthquakes using attenuation relations for moderate shocks. Romanian Journal of Physics, Vol. 45 (9–10): 785–800.

Moldovan, I.A., Bazacliu, O., Popescu, E. (2004): Input parameters for the statistical seismic hazard assessment in central part of Romanian territory using crustal earthquakes. The XXIX General Assembly of the European Seismological Commission (ESC), September 12–17, 2004, Potsdam, Germany, http://www.esc.bgs.ac.uk/papers/ potsdam_2004/sca_4_bazacliu.pdf

Moldovan, I.A., Popescu, E., Radulian, M. (2006): Time, space and size distribution of earthquake for Fagaras seismogenic region (Romania). Proc. of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, September 3–8, 2006, Geneva, Switzerland, CD_ROM, paper 845.

Musson, R.M.W. (2000): Generalized seismic hazard maps for the Pannonian Basin using probabilistic methods. PAGEOPH, Vol. 157, 147–169.

Nakamura, Y. (1989): Earthquake alarm system for Japan Railways. Japanese Railway Engineering, Vol. 28(4), 3–7.

Pantea, A. (1994): Macroseismic intensity attenuation for crustal sources on Romanian territory and adjacent areas, Natural Hazards, Vol. 10, 65–72.

Pantea, A, Moldovan, I.A. (2000): Attenuation relationships using macroseismic intensity curves. Part I. Crustal earthquakes from Fagaras and adjacent zones. Romanian Journal of Physics, Vol. 45 (7–8).

Popa, M., Radulian, M., Grecu, B., Popescu, E., Placinta, A.O. (2005): Attenuation in Southeastern Carpathians area: Result of upper mantle inhomogeneity, Tectonophysics, Vol. 410: 235–249.

Radulian, M, Panza, G.F., Popa, M., Grecu, B. (2006): Seismic wave attenuation for Vrancea events revisited. Journal of Earthquake Engineering, Vol. 10: 411–427.

Sokolov, V.Yu. (2000): Hazard-consistent ground motions: generation on the basis of Uniform Hazard Fourier Spectra. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 90: 1010–1027.

Sokolov ,V.Yu. (2002): Seismic intensity and Fourier acceleration spectra: revised relationship. Earthquake Spectra, Vol. 18: 161–187.

Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P., Wenzel, F. (2004a): Accounting for site effect in probabilistic assessment of seismic hazard for Romania and Bucharest: a case of deep seismicity in Vrancea zone. Soil Dyn Earthq Engng, Vol. 24 (12): 927–947.

Sokolov, VYu, Bonjer, K.-P., Rizescu, M. (2004b): Assessment of site effect in Romania during intermediate depth Vrancea earthquakes using different techniques. In: Chen Y.T., Panza G.F., Wu Z.L. (eds) IUGG Special Volume: Earthquake Hazard, Risk, and Strong Ground Motion, Seismological Press Beijing, pp. 295–322.

Sokolov V.Yu., Bonjer, K.-P., Oncescu, M.C., Rizescu, M. (2005): Hard rock spectral models for inermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes. Bull Seism Soc Am, Vol. 95: 1749–1765.

Sokolov V.Yu., Bonjer, K.-P. (2006): Modelling of distribution of ground motion parameters during strong Vrancea (Romania) earthquakes, Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, CD-ROM, Paper 363.

Sokolov V.Yu., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Radulian, M., Grecu, B. (2006a): Site-dependent probabilistic seismic hazard assessment for Romania and Bucharest caused by deep seismicity in Vrancea zone. Proc. 100th Anniversary Earthquake Conference, April 18–22, San Francisco, USA, 2006, CD-ROM (Disc 1), Paper 332.

Sokolov V.Yu., Loh, C.H., Jean, W.Y. (2006b): Strong ground motion source scaling and attenuation models for earthquakes located in different source zones in Taiwan. Proc. of the 4th International Conference on Earthquake Engineering, 12–13 October 2006, Taipei, Taiwan, CD-ROM, Paper 03.

Sokolov V.Yu., Wenzel, F. (2007): Seismic hazard assessment for areas with a lack of empirical strong ground motion data: a case of Romania. Proc. of 3rd Indian-German Workshop on Seismic Safety of Structures, Risk Assessment and Disaster Mitigation, Mumbay, India, 12–14 March 2007, 1–10.

Sokolov V.Yu., Loh, C.H., Jean, W.Y. (2007a): Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Fourier spectral ratio for analysis of site effect on rock (NEHRP-class B) sites in Taiwan, Soil Dyn Earthq Engng Vol. 27(4): 314–323.

Sokolov V.Yu., Wenzel, F., Mohindra, R., Grecu, B., Radulian, M. (2007b): Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania Considering Intermediate-Depth (Vrancea) and Shallow (Crustal) Seismicity. Proc. International Workshop on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4–6 October, 2007, 132–147

Sokolov V.Yu., Mohindra, R., Wenzel, F., Francis, S., Pomonis, A. (2007c): Seismic risk estimation for deep and shallow seismicity: a case of Romania. Proc. 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Singapore, 5–7 December, 2007, paper 047.

Sokolov V.Yu., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Grecu, B., Radulian, M. (2008a): Attenuation relations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes based on Fourier Amplitude spectra, submitted to Bulletin of Earthquake Engineering

Sokolov V.Yu., Wenzel, F., Mohindra, R. (2008b): Probabilistic assessment of seismic hazard in Romania considering intermediate-depth (Vrancea) and shallow seismicity, submitted to Soil Dynamics and Earthquake Engineering.

Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T., Kanamori, H., Scrivner, C. Worden, C. (1999): TriNet ShakeMaps: Rapid generation of instrumental ground motion and intensity maps for earthquakes in southern California. Earthquake Spectra, Vol. 15:537–556.

Wald, D.J., Worden, B.C., Quitoriano, V., Pankow, K.L. (2005): ShakeMap Manual: Users Guide, Technical Manual, and Software Guide, USGS Techniques and Methods 12–A1, 128 pp.

Wenzel, F., Oncescu, M.C., Baur, M., Fiedrich, F. (1999): An early warning system for Bucharest. Seism. Res. Lett., Vol. 70 (2): 161–169.

Wirth, W, Wenzel, F., Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P. (2003): A uniform approach to urban seismic effect analysis. Soil Dyn. Earthq. Engng., Vol. 23: 735–758.

Wu, Y-M., Teng, T.-I. (2002). A virtual subnetwork approach to earthquake early warning. Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 92 (5), 2008–2018.

Zsiros, T. (1996): Macroseismic focal depth and intensity attenuation in the Carpathian region. Acta Geod. Geophys. Hung., Vol. 31 (1–2): 115–125.

5.2.2 List of publications resulting from the project since the last proposal

5.2.2.1 Peer-reviewed publications

a) in scientific journals

Böse. M., Ionescu, C., Wenzel, F. (2007): Earthquake early warning for Bucharest, Romania: Novel and revised scaling relations. Geophys. Res. Lett., 34, Doi: 10.1029/2007GL02396.

Böse, M., Wenzel, F., Erdik, M. (2008): PreSEIS: A Neural Network based Approach to Earthquake Early Warning for Finite Faults, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 98, No. 1, pp. 366–382; doi: 10.1785/012007002.

Böse, M., Sokolov, V., Wenzel, F., (2008): Shake Map Methodology for intermediate-depth Vrancea (Romania) Earthquakes, Earthquake Spectra, under review, Jan. 2008.

Ismail-Zadeh, A., Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P. (2007): Tectonic stress, Seismicity and Seismic Hazard in the South-Eastern Carpathians, Natural Hazards, Vol. 42 (3): 493–514.

Sokolov, V.Yu., Loh, C.H., Jean, W.Y. (2007): Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Fourier spectral ratio for analysis of site effect on rock (NEHRP-class B) sites in Taiwan, Soil Dyn Earthq Engng., Vol. 27 (4): 314–323.

Wenzel, F., Marmureanu, G. (2007): Earthquake Information Systems. Pure & Applied Geophysics Topical Issue 'Tsunami and its Hazard in Pacific and Indian Oceans', 164, 1–11, doi 10.1007/s00024-007-0198-3.

Wenzel, F., Marmureanu, G. (2007): Rapid earthquake information for Bucharest. Pure & Applied Geophysics, doi.org/10.1007/s00024-007-0198-3.

Bartlakowski, J., Wenzel, F., Radulian, M., Ritter, J., Wirth, W. (2006): Urban shakemap methodology for Bucharest. Geophysical Research Letters, 33, L14310, doi:10.1029/2006GL026283.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Grecu, B., Radulian, M. (2006): Attenuation relations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes based on Fourier amplitude spectra. Pure & Applied Geophysics.

Wenzel, F. (2006): Earthquake risk reduction – obstacles and opportunities, European Review, Vol. 14 (2), 221–231.

Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P., Oncescu, M.C., Rizescu, M. (2005): Hard rock spectral models for inermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes. Bull Seism Soc Am., Vol. 95: 1749–1765.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Grecu, B., Radulian, M. (2008): Ground-motion prediction equations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes. Bulletin of Earthquake Engineering. Vol. 6 (1). 10.1007/s10518-008-9065-6.

Sokolov V.Yu., Wenzel, F., Mohindra, R. (2008b): Probabilistic assessment of seismic hazard in Romania considering intermediate-depth (Vrancea) and shallow seismicity. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. In press.

Russo, R.M., Mocanu, V., Radulian, M., Popa, M., Bonjer, K.-P. (2005): Seismic attenuation in the Carpathian bend zone and surraoundings. Earth and Planetary Science Letters, Vol. 237: 695–709.

b) at major scientific conferences

Sokolov, V.Yu., Wenzel, F. (2007): Seismic hazard assessment for areas with a lack of empirical strong ground motion data: a case of Romania. Proc. of 3rd Indian-German Workshop on Seismic Safety of Structures, Risk Assessment and Disaster Mitigation, Mumbay, India, 12–14 March 2007, 1–10.

Sokolov, V.Yu., Mohindra, R., Wenzel, Francis, S., Pomonis, A. (2007): Seismic risk estimation for deep and shallow seismicity: a case of Romania. Proc. 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Singapore, 5–7 December, 2007, paper 047.

Bartlakowski, J., Wenzel, F., Radulian, M. Ritter, J., Wirth, W. (2006): Urban Shakemap Methodology for Bucharest, Proc. 66. Jahrestagung der DDG, Bremen, 6.–9. März.

Böse M., Erdik, M., Wenzel, F. (2006): Earthquake early warning for disaster mitigation, Proc. of the “International Disaster Reduction Conference IDRC”, Davos, Switzerland, August 27–September 1, 2006, pp. 78–80.

Böse, M., Erdik, M., Wenzel, F. (2005): Earthquake Early Warning – Real-time prediction of ground motion from the first seconds of seismic recordings. Proc. Volume of the Int. Conference on 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, pp. 185–187.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P. (2006): Modeling of distribution of ground motion parameters during strong Vrancea (Romania) Earthquakes. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 September, paper no. 363.

Sokolov, V.Yu., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Radulian, M., Grecu, B. (2006): Site-dependent probabilistic seismic hazard assessment for Romania and Bucharest caused by deep seismicity in Vrancea zone. Proc. 100th Anniversary Earthquake Conference, April 18–22, San Francisco, USA, 2006, CD-ROM (Disc 1), Paper 332.

Sokolov, V.Yu., Loh, C-H., Jean, W.Y. (2006): Strong ground motion source scaling and attenuation models for earthquakes located in different source zones in Taiwan. Proc. of the 4th International Conference on Earthquake Engineering, 12–13 October 2006, Taipei, Taiwan, CD-ROM, Paper 03.

Wenzel, F. (2006): Earthquake Information Systems, Proc. Volume ECMA-SEMA Conference on Future Challenges for Crisis Management in Europe, Stockholm, 3.–5. May.

Wenzel, F., Bendimerad, F. (2006): Earthquakes and Megacities, Int. Disaster Reduction Conference.

Wenzel, F., Schmitt, G., Sokolov, V., Sperner, B., Hannich, D., Böse, M. Markus, M., Lungu, D., Marmureanu, G. (2006):. Earthquake risk research in Romania – 10 years of collaborative efforts, Proc. of the “First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology (ECEES)”, Geneva, Switzerland, 3–8 Sept. 2006, 9 pp.

Wenzel, F., Bendimerad, F., Stempniewski, L. (2005): Risk Estimates and Risk Mitigation in Megacities. Proc. Volume of the Int. Conference on 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, pp. 160–163.

c) in monographs

Böse, M., Erdik, M., Wenzel, F. (2007): A new approach to earthquake early warning. In: P. Gasparini, G. Manfredi, J. Zschau (eds.): Earthquake Early Warning Systems. Berlin: Springer, pp. 65–83.

Böse, M., Erdik, M., Wenzel, F. (2007): Earthquake Early Warning for the Istanbul area – Between regional and on-site warning strategies. In: Gaspari, P., Manfredi, G., Zschau, J. (eds.) Seismic Early Warning. Berlin: Springer, pp. 65–84.

Böse, M., (2008): Earthquake Early Warning – Real-time Prediction of Ground Motion from the First Seconds of Seismic Recordings, in: The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited, Eds. LA Mendes-Victor; Carlos S. Oliveira; João Azevedo; António Ribeiro, Springer Verlag, in press.

Ionescu, C., Böse, M., Wenzel, F.. Marmureanu, A., Marmureanu, G. (2006): Early warning system for deep Vrancea (Romania) earthquakes. In: Earthquake Early Warning Systems, Eds. P. Gasparini, G. Manfredi, J. Zschau. Berlin: Springer, pp. 342–349.

Ionescu, C., Böse, M., Wenzel, F., Marmureanu, A., Grigore, A., Marmureanu, G. (2007): Early warning system for deep Vrancea (Romania) earthquakes. In: Gaspari, P., Manfredi, G., Zschau, J. (eds.) Seismic Early Warning. Berlin: Springer Verlag, pp. 343–349.

5.2.2.2 Non peer-reviewed publications

a) in scientific journals

Radulian, M., Bonjer, K.-P., Popescu, E., Popa, M., Ionescu, C., Grecu, B. (2006): The October 27th, 2004 Vrancea (Romania) earthquake. Orfeus Newsletters, 7, 1.

b) at major scientific conferences

Sokolov, V., Wenzel, F., Mohindra, R., Grecu, B., Radulian, M. (2007): Probabilistic seismic hazard assessment for Romania considering intermediate-depth (Vrancea) and shallow (crustal) seismicity. Proceedings, Int. Symposium ion Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest , 4–6 October 2007, Matrix Rom Press, 132–147.

c) in monographs

Böse. M. (2006): Entwicklung eines Erdbeben-Frühwarnsystems für Istanbul unter Verwendung künstlicher neuronaler Netze. Dissertation, Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe, (http://www.ubka.uni-karlsruhe.de/cgi-bin/psview?document=2006/physik/6).

Böse, M., Wenzel, F. (2007): Earthquake Early Warning Systems, Proceedings of the Workshop ITB – Universität Karlsruhe (TH) “Natural Risk Management and Geothermal Energy” in Bandung (Indonesia), March 2007.

5.2.2.3 Oral presentations

Böse, M., (2005): Development of a Neural Network based Approach for EEW in Istanbul, Turkey, Earthquake Early Warning Workshop organized by USGS, CISN, SCEC: Caltech, Pasadena (California). July 13–15 2005.

Böse, M., (2005): Earthquake Early Warning- Real-time prediction of seismic ground motion from the first seconds of seismic recordings, 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon (Portugal). November 1–4 2005.

Böse, M., (2006): Earthquake Early Warning for Disaster Mitigation, International Disaster Reduction Conference IDRC, Davos (Switzerland). August 27–September 1 2006.

Böse, M., (2007): Earthquake Early Warning Systems“, Workshop ITB – Universität Karlsruhe (TH) “Natural Risk Management and Geothermal Energy” in Bandung (Indonesia), 04.–08. March 2007.

Sokolov, V., Mohindra, R., Wenzel, F., Francis, S., Pomonis, A. (2007): Seismic risk estimation for deep and shallow seismicity: a case of Romania. 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering (8PCEE), Singapore, 5–7 December 2007.

Sokolov, V., Wenzel, F., Mohindra, R., Grecu, B., Radulian. M. (2007): Probabilistic Seismic Hazard Assessment for Romania Considering Intermediate-Depth (Vrancea) and Shallow (Crustal) Seismicity. International Workshop on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4–6 October, 2007.

Sokolov, V., Mohindra, R., Wenzel, F., Francis, S. (2007): Probabilistic seismic hazard assessment for Romania considering intermediate-depth (Vrancea) and shallow (crustal) seismicity. XXIV General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2007, Perugia, Italy, July 02–July 13, 2007.

Sokolov, V., Wenzel, F., Böse, M. (2007): Development of shakemap methodology based on Fourier amplitude spectra and its application for the case of Vrancea (Romania) earthquakes. XXIV General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2007, Perugia, Italy, July 02–July 13, 2007.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Grecu, B., Radulian, M. (2007): Azimuth-dependent attenuation relations for the intermediate depth Vrancea (Romania) earthquakes based on Fourier amplitude spectra. XXIV General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2007 Perugia, Italy, July 02–July 13, 2007.

Sokolov, V. Furumura, T. (2007): Analysis of two methods for instrumental intensity estimations using the database accumulated in Japan. XXIV General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics, IUGG 2007, Perugia, Italy July 02–July 13, 2007.

Sokolov V., Wenzel, F. (2007): Seismic hazard assessment for areas with a lack of empirical strong ground motion data: a case of Romania. 3rd Indian-German Workshop on Seismic Safety of Structures, Risk Assessment and Disaster Mitigation, Mumbay, India, 12–14 March 2007.

Sokolov, V., Loh, C.H., Jean, W.Y. (2006): Strong ground motion source scaling and attenuation models for earthquakes located in different source zones in Taiwan. 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, Taiwan, October 12–13, 2006.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P. (2006): Modeling of distribution of ground motion parameters during strong Vrancea (Romania) earthquakes. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 3–8, 2006.

Miksat, J., Oth, A., Sokolov, V., Wenzel, F. (2006): Strong ground motion modeling for the August 30, 1987 Vrancea (Romania) earthquake (MW=7.2). First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 3–8, 2006.

Sokolov, V., Loh C.-H., W.Y. Jean, W.Y. (2006): Application of H/V Fourier spectral ratio for analysis of site effect on rock sites in Taiwan. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, September 3–8, 2006.

Sokolov, V., Loh, C.H., Jean, W.Yu. (2006): Application of Horizontal-to-Vertical (H/V) Fourier spectral ratio for analysis of site effect on rock (Class B) sites in Taiwan. European Geosciences Union, 3rd General Assembly, Vienna, Austria, 3–8 April 2006.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Wenzel, F., Radulian, M., Grecu, B. (2006): Site-specific probabilistic seismic hazard assessment for Romania and Bucharest caused by deep seismicity in Vrancea zone. European Geosciences Union, 3rd General Assembly, Vienna, Austria, 3–8 April 2006.

Grecu, B., Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Popa M., Radulian, M. (2005): Site-specific analysis in Romania using small Vrancea earthquakes. European Geosciences Union, 2nd General Assembly, Vienna, Austria, 25–29 April 2005.

Ovcharenko, A., Sokolov, V., Wenzel, F. (2005): Numerical Models of Earth Crust Deformation and Seismicity: Development of New Alternative Techniques and Their Application for Evaluation of Parameters of Future Earthquakes. European Geosciences Union, 2nd General Assembly, Vienna, Austria, 25–29 April 2005.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P.. Wenzel, F. (2005): Attenuation Relations for Engineering Ground Motion Parameters and generalised Site Conditions in Romania based on Fourier Amplitude Spectra: intermediate-depth Vrancea Earthquakes. European Geosciences Union, 2nd General Assembly, Vienna, Austria, 25–29 April 2005.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Oncescu, M.C., Rizescu, M. (2005): Evaluation of Hard Rock Spectral Models for Intermediate Depth Vrancea (Romania) Earthquakes using the Horisontal-to-Vertical Fourier Spectral Ratios of Earthquake Records. European Geosciences Union, 2nd General Assembly, Vienna, Austria, 25–29 April 2005.

Sokolov, V., Bonjer, K.-P., Wenzel, F. (2005): Probabilistic site specific hazard assessment for Romania (deep seismicity) based on Fourier Amplitude Spectra. Workshop “Seismic Hazard in Romania: a probabilistic approach”, Bucharest, June 19–20, 2005.

5.3 Approval funds for the current funding period

The project was funded in the Collaborative Research Centre from July 1996 to December 2007.

Financial year	Funding for staff	Funding for direct costs	Funding for instrumentation	Total
Up to 2004	1.131.027 €	215.407 €	428.462 €	1.774.896 €
2005	100.200 €	12.100 €	0	112.300 €
2006	100.200 €	12.100 €	0	112.300 €
2007	100.200 €	500 €	0	100.700 €
Total	1.431.627 €	240.107 €	428.462 €	2.100.196 €

5.3.1 Staffing of the project

	Name, acad. title, position	Field of research	Department of the university or non-universitary institution	Employed by the SFB from (month/year) until (month/year)	Salary scale
Core support					
Research assistants (incl. student assistants)	Wenzel, F., Prof. Dr. Popa, M., Dr. Radulian, M., Dr. Gudehus, G., Prof. Dr. Rohn, J. Dr. Hötzl, H., Prof. Dr. Dinu, C., Prof. Dr. Lungu, D., Prof. Dr. Chernov, Yu., Prof. Dr.	Geophysics Geophysics Geophysics Soil Mechanics Geology Geology Geology Civil Engineering Seismology	GEOK NIEP-Bukarest NIEP-Bukarest IBF AGK AGK FGG-Bukarest UTCB, INCERC NCCEG Stavropol	07/1996–12/2007 01/2000–12/2007 01/2005–12/2007 07/1999–01/2007 07/1999–03/2006 01/2002–12/2007 01/2000–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007	
Non-scientific assistants	Knopf; P., Dipl.-Inf.(FH) Nadolny, T., EDV-Techn. Scherer, W., Dipl.-Ing.(FH)		GEOK GEOK GEOK	01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 07/1996–12/2007	
Auxiliary support					
Research assistants (incl. student assistants)	Sokolov, V., Dr. Böse, M., Dr. Bartlakowski, J., Dipl.-Geophys.	Geophysics Geophysics Geophysics	GEOK GEOK GEOK	09/2000–12/2007 07/2002–11/2007 01/2004–06/2006[1]	E13 0,5 E13 gepr. HK
Non-scientific assistants					

[1] bis 12/2006 in A7

Teilprojekt B4

Nichtlineare Wellenphänomene in feinst- und weichkörnigen Lockergesteinen

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dr.-Ing. Gerhard Huber
M.Sc. Carlos E. Grandas Tavera
Dipl.-Ing. Daniel Rebstock
Dipl.-Ing. Holger Wienbroer

Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt B4

5.1.1 Titel:

Nichtlineare Wellenphänomene in feinst- und weichkörnigen Lockergesteinen

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Bodendynamik, Bodenmechanik, Stoffgesetze für Böden, Ingenieurseismologie

5.1.3 Leiter:

o. Prof. em. Dr.-Ing. Dr. hc. Gudehus, Gerd, 23.07.1938 (bis 01/2007)

Dr.-Ing. Huber, Gerhard, 12.06.1953

Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH), Engler-Bunte-Ring 14, 76131 Karlsruhe

Telefon: 0721/ 608-3297; 0721/ 608-2226
Telefax: 0721/ 696096
E-Mail: gerd.gudehus@ibf.uni-karlsruhe.de
gerhard.huber@ibf.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dr.-Ing. Michael M. Bühler
M.Sc. Carlos E. Grandas Tavera
Dr.-Ing. Anna B. Libreros Bertini
Dipl.-Ing. Thomas Meier
Dipl.-Ing. Daniel Rebstock
Dipl.-Ing. Holger Wienbroer

5.1.5 Rumänische Partner:

Prof. D. Lungu, Technical University of Civil Engineering Bucharest, UTCB, und National Institute for Building Research (INCERC), Bucharest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Mit 1D- und 2D-Modellen wurde das nichtlineare Bodenverhalten bei erdbebenartiger und stationärer Erregung untersucht. Bei erdbebenartiger Anregung hängt die nichtlineare Bodenreaktion vor allem von der zeitlichen Abfolge großer Ausschläge ab. Für eine systematische Untersuchung des Bodenverhaltens und Nachrechnungen haben sich sinusförmige Anregungen sowohl für Versuche in der Shake-Box als auch bei numerischen Untersuchungen bewährt. Auch bei stationärer Anregung ist die Antwort, solange sich der Zustand des Bodens ändert, transient, um danach einen stationären Zustand zu erreichen. Langsame und schnelle Zustandsänderungen zeigen sich beispielsweise in transienten Schwingungsmoden, zeitlich veränderlicher Verstärkung der bezogenen Amplitude an der Oberfläche sowie Frequenzverdoppelung. Durch angepasste Versuchsparameter gelang es, langsam veränderliche Zustände von schnellen Zustandsänderungen zu unterscheiden. Die Versuche waren somit messtechnisch gut beobachtbar und bieten Daten für Nachrechnungen. Ein nichtlineares Modell zur 1D-Wellenpropagation wurde klassischen Modellen mit angepassten Steifigkeiten gegenübergestellt, um die Vorteile, Erfordernisse und Grenzen in der Anwendung aufzuzeigen, sowie die Anwendung auch für andere Teilprojekte zu vereinfachen. Bei der Boden-Gründung-Bauwerk-Interaktion auf verflüssigungsfähigem Untergrund wurde nicht nur eine konventionelle Pfahlgründung untersucht, sondern auch eine Flachgründung. Bei dieser führte die erdbebenbedingte Verflüssigung durch die ersten Schwingungen zur Abschirmung der nachfolgenden Schwingungen unterhalb des Flachfundaments.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Für die numerische Modellierung waren wesentliche Werkzeuge vorhanden. Experimentell hatten sich Grenzen der kleinen Shake-Box gezeigt: vor allem die Beschränkung auf Ausschwingversuche, die eingeschränkte Beobachtbarkeit infolge der geringen Abmessungen des Modells und in der Folge das sehr niedrige Spannungsniveau.

Die Ausgangsfragestellungen betrafen die Einflüsse von Parametern und Zustandsgrößen sowie die Anwendbarkeit und Einsatzgrenzen der nichtlinearen Modelle, um Antworten hinsichtlich dynamischer Bodenantwort einschließlich Verflüssigung und dynamischem Verhalten geotechnischer Bauwerke sowie der Interaktion Boden-Gründung-Bauwerk zu finden.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Experimentelle Untersuchungen (Shake-Box Versuche) und Anwendung des Stoffgesetzes (Parameterstudie zur 1D-Wellenausbreitung, Anwendung auf Bodenprofile in Bukarest, Simulation von Versuchen, Vergleich mit konventionellen Modellen, Boden-Gründung-Bauwerk-Interaktion) waren die wesentlichen Themen in diesem Zeitraum. Weiterverfolgt wurde daneben die Stabilität von natürlichen Böschungen (bis zum Einsatz der Rutschungen) mit einer neuen FE-Modellierung (WIENBROER UND CUDMANI 2007). Die Anwendbarkeit eines 1D-Modells für die nichtlineare Wellenausbreitung in anderen Teilprojekten des SFB konnte erfolgreich gezeigt werden. Darüber hinaus wird dieses Programm auch in einem Gemeinschaftsprojekt mit den rumänischen Partnern von ihnen weiter verwendet.

Shake-Box Versuche

Ziel der Shake-Box Versuche war es, die Bodenantwort bei unterschiedlichen Bodenzuständen und Anregungssignalen unter einem für eine Nachrechnung erforderlichen realistischen Spannungszustand durchzuführen, ohne dass Modellgesetze erforderlich sind. Diese messtechnisch vergleichsweise gut beobachtbaren Versuche sollten die Basisdaten für eine Überprüfung der Anwendungsgrenzen des Stoffgesetzes bzw. dessen Implementation liefern.

Die Anregung der prismatischen Bodensäule in der Shake-Box erfolgt über einen servo-hydraulisch angetriebenen Schütteltisch (1-achsige horizontale Bewegungsrichtung). Die Anregungssignale sind in weiten Grenzen einstellbar, von sinusförmigen bis zu erdbebenartigen Signalen. Die Bodensäule besitzt ein Grundfläche von 80cm (in Bewegungsrichtung) auf 60cm und drei unterschiedliche Höhen (0,7; 1,4 oder 2,1m) sind wählbar. Dies ergibt bei voller Höhe ein Volumen von ca. 1m³ und bei einer Probe aus mitteldichtem Sand eine Einbaumasse von ca. 1500kg. Die Bodenprobe wird von einer wasserdichten Gummimembrane umschlossen. Die eigentliche Shake-Box besteht, entsprechend der Höhe, aus 8, 16 oder 24 Aluminiumrahmen (auch Lamellen genannt), deren senkrecht zur Bewegungsrichtung angeordneten Seiten drehbar gelagert sind. Dieser Aufbau führt, im Unterschied zu üblichen Shake-Boxen mit festen Rahmenwänden, zu einer vergleichsweise glatten Randkontur und verringert damit das Problem lokal größerer Scherdeformationen zwischen den einzelnen Lamellen. Messgrößen sind horizontale Verschiebung jeder Lamelle (somit die Kontur der Bodensäule), der Porenwasserdruck in vier verschiedenen Höhen innerhalb der Probe und die Setzung der Probenoberfläche.

Versuche mit weichkörnigem Boden mit und ohne Einbauten wurden mit der Shake-Box mit 8 Lamellen durchgeführt, um die Zeit für die Konsolidierung zu reduzieren. Weiterhin wurde der Einfluss einer weichen Schicht über einer Sandschicht untersucht (BÜHLER 2006). Dabei trat selbst bei diesem weichkörnigen (bindigen) Boden unter Erdbebenanregung Verflüssigung auf. Bei Versuchen mit Einbauten

konnten sogar sich öffnende und schießende Fugen beobachtet werden. Wesentlich besser beobachtbar erwiesen sich sind jedoch Shake-Box Versuche mit voller Höhe (24 Lamellen und somit 24 Messpunkte für die Randkontur). Der hier vorgestellte Versuch wurde mit wassergesättigtem Sand (Quarzsandmischung mittlerer Korndurchmesser 0,6 mm, sog. Karlsruher Sand) durchgeführt. Die Probe wurde durch Einrieseln des Sands auf die konstant gehaltene Wasseroberfläche hergestellt. Mit diesem Verfahren konnte eine bezogene Lagerungsdichte zwischen 39 und 47% erreicht werden.

Im Unterschied zu einer erdbebenartigen Anregung sollte es bei sinusförmiger Anregung und mit den Versuchsabschnitten anwachsender Amplitude möglich sein, langsam veränderliche Zustandsänderungen zu erfassen, ohne dass wie im Falle der kleinen Shake-Box oder bei erdbebenartiger Anregung die Verflüssigung spontan einsetzt. Nachfolgend werden die Vorteile dieses Vorgehens an einem Versuch beispielhaft dargestellt. Der Versuch selbst besteht aus mehreren Abschnitten, wobei innerhalb des einzelnen Abschnitts die Amplitude der Anregung an der Basis u_0 die Frequenz f_0, und die Zahl der Zyklen N konstant blieben. Damit ergaben sich folgende Variationsmöglichkeiten: Veränderung von f_0, u_0, N oder Wiederholung mit gleichen Parametern. Erfassbar sind damit der Eintritt der Verflüssigung, die Rekonsolidierung und das Erreichen von stationären Zuständen. Abbildung 1 zeigt das Abklingverhalten der Setzungen (Versuchsabschnitte KA_704, 705, 706) bzw. das Erreichen von stationären Zuständen für den Porenwasserüberdrucks (KA_706) bei Wiederholung mit gleichen Parametern.

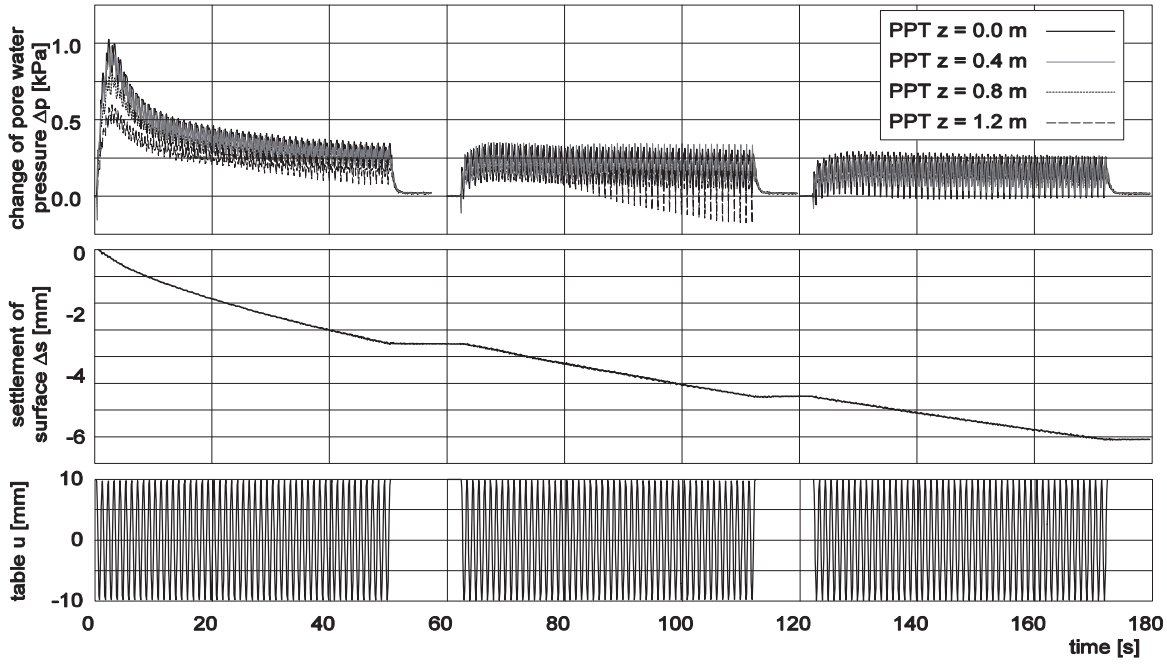


Abbildung 1: Setzungen, Porenwasserüberdruck und Tischauslenkung der Versuchsabschnitte (KA_704, 706 ,706, f_0=1Hz, u_0=10mm, N=50).

Die Setzungsrate und der gebildete Porenwasserüberdruck in Abbildung 1 nehmen allmählich ab. Es stellt sich somit infolge der Verdichtung zunächst eine Stabilisierung ein. Bei einer Steigerung der Amplitude u_0 im nächsten Abschnitt beginnt der beschriebene Vorgang erneut: Innerhalb der ersten Zyklen ist eine starke Zunahme der Setzungen, damit auch der Verdichtung, und des Porenwasserüberdrucks zu beobachten. Bei mehrfacher Wiederholung zeigt sich erneut das beschriebene Abklingverhalten. Aus der Setzungsmessung und der anfänglichen Gesamthöhe der Säule ergibt sich die aktuelle, jedoch über die Probe gemittelte Lagerungsdichte. Deshalb kann aus der Änderung der Lagerungsdichte und den gemessenen Porenwasserüberdrücken die effektive mittlere Spannung nur abgeschätzt werden.

Mit weiterer Zunahme der Amplitude kann sich die Bodensäule teilweise oder vollständig verflüssigen. Für den Zeitpunkt der Verflüssigung ist der Zustand der Probe (Lagerungsdichte) vor dem Test entscheidend. Bei den bisherigen Versuchen trat bislang meist nur teilweise Verflüssigung auf, was auf einen nicht ganz gleichmäßigen Einbau schließen lässt. Die erste Verflüssigung ist in Abbildung 2 (links) dargestellt. Bei einer Auslenkung von u_0=15mm ebenfalls bei f_0=1Hz stieg der Porenwasserüberdruck an, gleichzeitig nahmen die Setzungen zu. Nach etwa 12 Sekunden verflüssigte sich der obere Teil der Bodensäule. Dies ergibt sich aus der Auswertung der Porenwasserdrücke der oberen beiden Druckgeber. Abbildung 2 (rechts) zeigt den Anstieg des Porenwasserdrucks und damit verbunden die gleichzeitige Abnahme der effektiven Spannungen über der Höhe der Box. Im Bereich über 0,8m verschwindet die effektive Spannung, d.h. dieser Bereich ist verflüssigt.

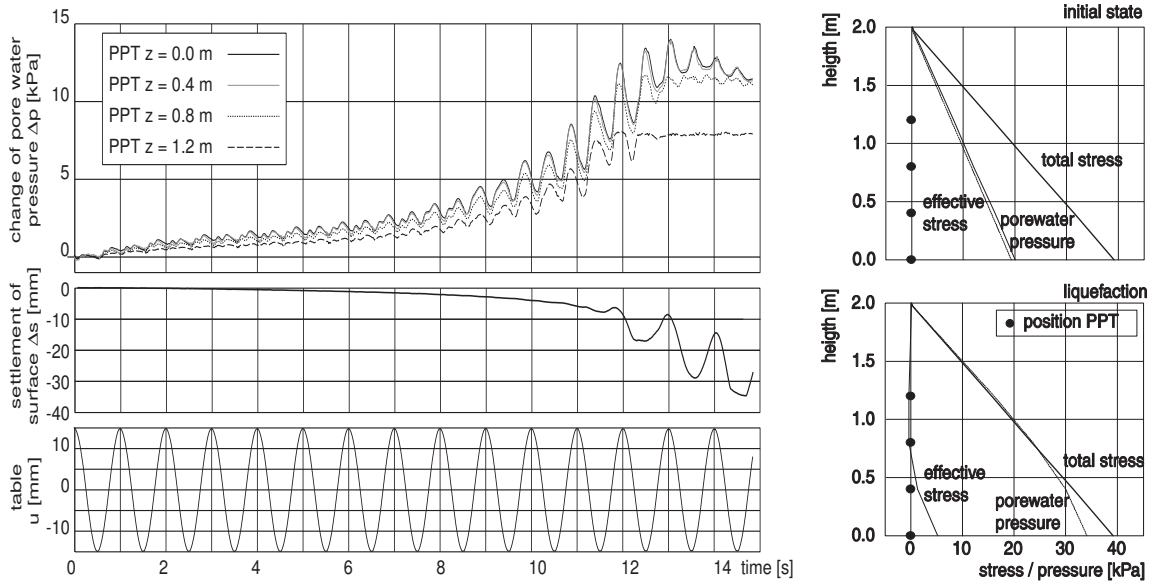


Abbildung 2: Verflüssigung im Versuchabschnitt KAS_707: Setzungen, Porenwasserüberdruck, Tischauslenkung (links), effektive Spannungen und Porenwasserdruck vor Versuch und während Verflüssigung (rechts) (f0=1Hz, u0=10mm, Zyklen 0–15).

Noch während des Versuchs baute sich der Porewasserüberdruck von unten nach oben hin ab. Mit zunehmenden effektiven Spannungen bildet sich das Korngerüst wieder aus. Nach 22 Sekunden ist der letzte Druckgeber erreicht, Abbildung 3. Anhand der gemessenen Kontur der Shake-Box können die Scherdeformationen abgeleitet werden. Dargestellt sind Zeitpunkte, in denen die Relativverschiebung zwischen Tisch und Kopf maximal waren. In den ersten 15 Sekunden nimmt die Scherverformung über die Boxhöhe gleichmäßig zu. Im Moment der Verflüssigung erreicht die Scherung mit 4,5% ihr Maximum in der Mitte der Box. Die fortschreitende Rekonsolidierung, ablesbar an der Abnahme des Porenwasserüberdrucks, kann anhand des nach oben wandernden Bereichs erhöhter Scherdehnung beobachtet werden. Diese verändert die Steifigkeit und somit auch die Wellenlänge und den Bewegungsmodus. Während der Verflüssigung des oberen Bereichs bewegt sich der Kopf der Säule entgegen der Anregung. Nach Abschluss der Rekonsoliderung wird die Scherdehnung wieder sehr klein; die Sandsäule führt näherungsweise nur noch eine Starrkörperbewegung aus.

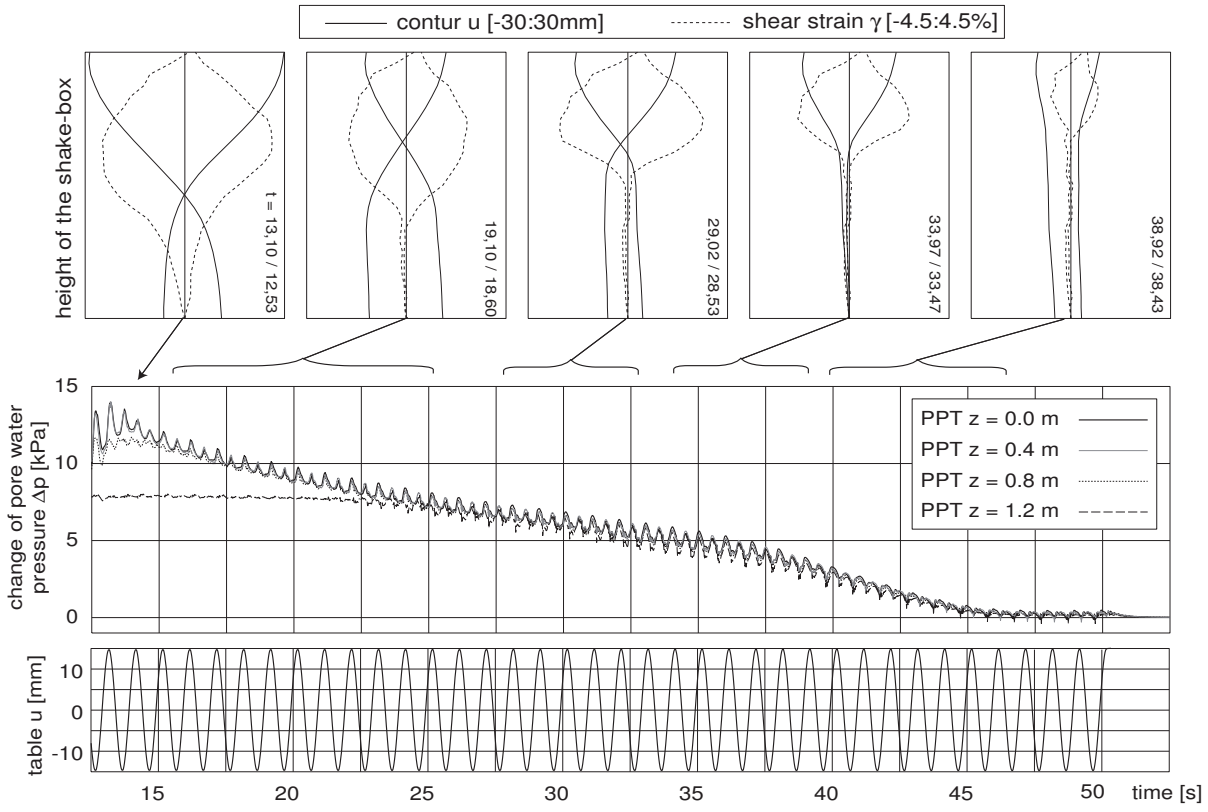


Abbildung 3: Rekonsolidierung im Versuchabschnitt KAS_707: Porenwasserüberdruck, Tischauslenkung sowie Kontur und Scherdehnungsverteilung über die Höhe für ausgewählte Zeitpunkte (f_0=1Hz, u_0=15mm, Zyklen 13–50).

Während der nächsten Zyklenpakete konnte eine durch die Setzung eingetretene Verdichtung der Säule beobachtet werden, die somit zu deren Stabilisierung führt. Erst nach einer erheblichen Steigerung der Amplitude konnte der noch lockerere untere Teil der Bodensäule auch verflüssigt werden. Damit war die Bodensäule weitgehend verdichtet und auch bei den weiteren Steigerungen der Anregungsamplitude konnten nur noch geringe Setzungen erreicht werden. Bei einem sehr dichten Zustand der Bodensäule kann ein Wechsel zwischen Kontraktanz und Dilatanz in Setzungs- und Porendruckmessung erkannt werden. Beide Signale zeigen Anteile der doppelten Frequenz der Anregungsfrequenz, Abbildung 4. In der Phase mit im Mittel dilatantem Verhalten hebt sich die Sandoberfläche und ein Porenwasserunterdruck stellt sich ein; an der Oberfläche zeigt sich ein Farbumschlag.

Das gewünschte langsam veränderliche Verhalten bei unterschiedlichen Bodenzuständen konnte erreicht und asymptotisches Verhalten nachgewiesen werden. Auch bei veränderter Anfangsdichte gleicht sich die Reaktion der Bodensäule bei verschiedenen Versuchen aber gleicher Abfolge der Anregung an.

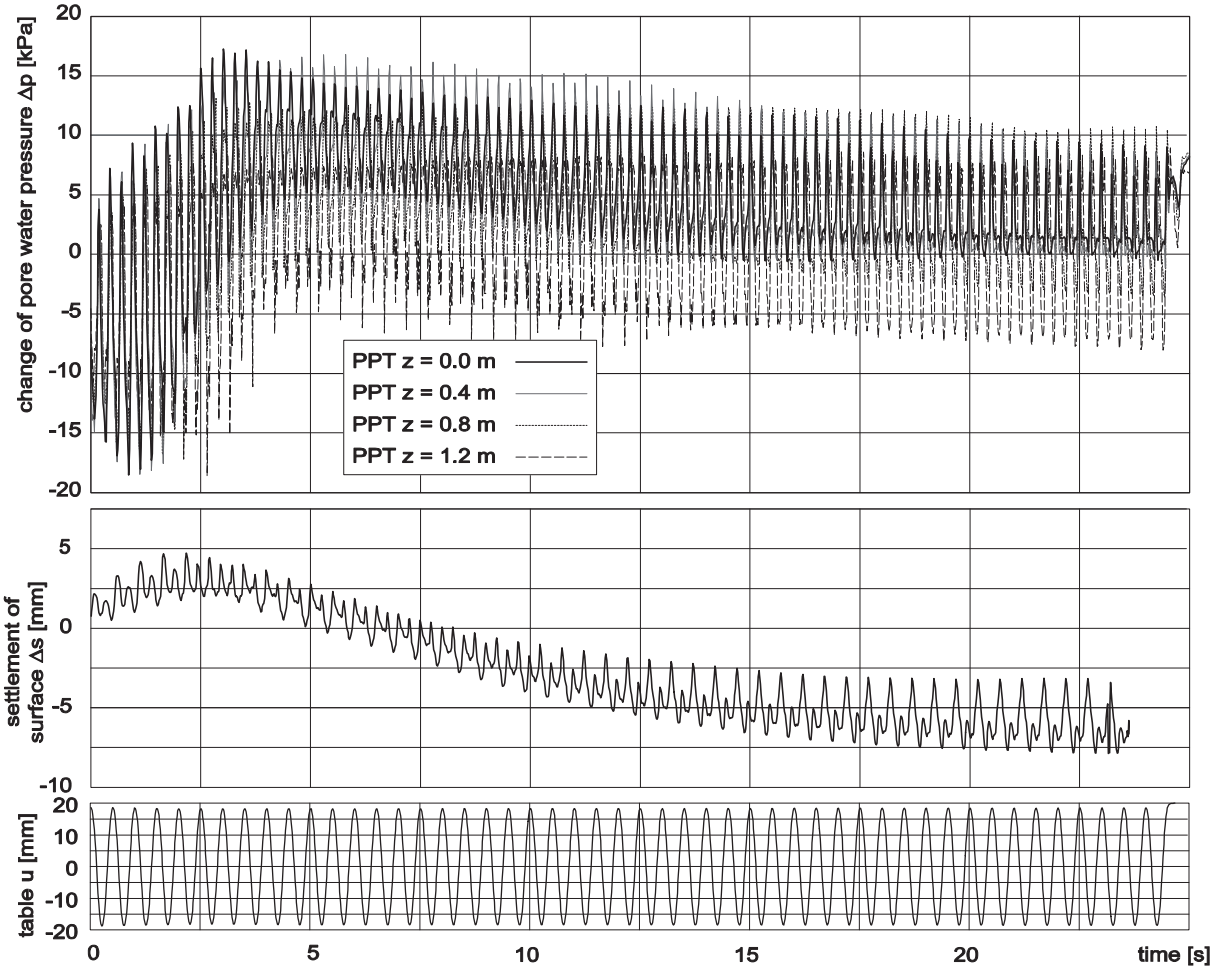


Abbildung 4: Auflockerung im Versuchabschnitt KAS_717 – Porenwasserüberdruck, Setzungen und Tischauslenkung (f_0=2Hz, u_0=18mm, N=25).

Hypoplastisches Stoffgesetz

Für eine realistische Abschätzung des Bodenverhaltens unter Erdbebeneinwirkung sind nichtlineare Stoffgesetzte erforderlich. Diese müssen Dichteänderung, Reduktion der Steifigkeit mit wachsender Amplitude und für gesättigte Böden Porenwasserdruckanstieg bis zur Verflüssigung abbilden können. Hier wurden das Hypoplastische Stoffgesetz (GUDEHUS 1996) für körnige Böden und das Visko-Hypoplastische Stoffgesetz (NIEMUNIS 2003) für bindige Böden mit weichen Partikeln eingesetzt. Diese bodenmechanischen Modelle sind geeignet um große plastische Verformungen des Korngerüstes zu beschreiben und beinhalten das "critical state concept" der Bodenmechanik. Im Gegensatz zu elastoplastischen Modellen wird in der Hypoplastizität zwischen Materialparametern und Zustandsgrößen unterschieden. Die Materialparameter beschreiben das Kompressionsverhalten des Korngerüstes (Granulathärte und Exponent bzw. Kompressions- und Schwellbeiwert), den kritischen Reibungswinkel und die Grenzporenzahlen (lockerste und dichteste Lagerung), bzw. einer Referenzporenzahl. Zusätzliche Exponenten kontrollieren den Dichteeinfluss auf den Reibungswinkel und Kompressibilität. Die Visko-Hypoplastizität enthält des Weiteren einen Zähigkeitsindex und eine Referenzrate zur Beschreibung der Zeitabhängigkeit. Steifigkeit und Scherfestigkeit hängen vom Zustand des Bodenelementes ab, die durch den Spannungszustand, Lagerungsdichte, Deformationsrate und -geschichte gegeben ist.

Die Erweiterung des Stoffgesetzes mit der Intergranularen Dehnung ist für Wechselbelastungen und kleine Deformationen erforderlich, um die Untersuchung von dynamischer Steifigkeit, Verflüssigungsneigung und zyklischer Mobilität zu ermöglichen. Die üblicherweise benutzten Parameter wie Schubmodul, Dämpfung und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ergeben sich und müssen nicht vorab angegeben werden. Das mechanische Verhalten von Böden wird durch die effektive Spannung bestimmt. Für gesättigten Boden wird die totale Spannung im Stoffgesetz in effektive Spannungen und den Porenwasserdruck aufgeteilt. Bei undrainierten Verhältnissen ergibt sich der Porenwasserdruck aus dem Kompressionsmodul des Wassers und der Volumendehnung eines repräsentativen Volumenelements. Ein Porenwasserdruckausgleich bei Konsolidierung erfordert eine mechanisch-hydraulisch gekoppelte Berechnung, die für den dynamischen Fall, d.h. während der Dauer des Bebens, mit Finiten Elementen bislang nicht implementiert ist.

Aus stationären Ergebnissen von zyklischen Scherversuchen kann für eine variierende Scherdehnung γ (bis zu 1%) der dynamische Schubmodul G und die äquivalente Dämpfung D für verschiedene Lagerungsdichten und mittlere Drücke berechnet werden (Abbildung 5). Der Abfall von G bei gleichzeitigem Anstieg von D für Scherdehnungsamplituden $\gamma > 10^{-4}$ bei Sand stimmt qualitativ mit dem Verhalten bei Resonanzsäulen-Versuchen überein; verglichen mit Resonanzsäulen-Versuchen zeigen sich Abfall bzw. Anstieg in den Berechnungen erst bei höheren Dehnungsamplituden.

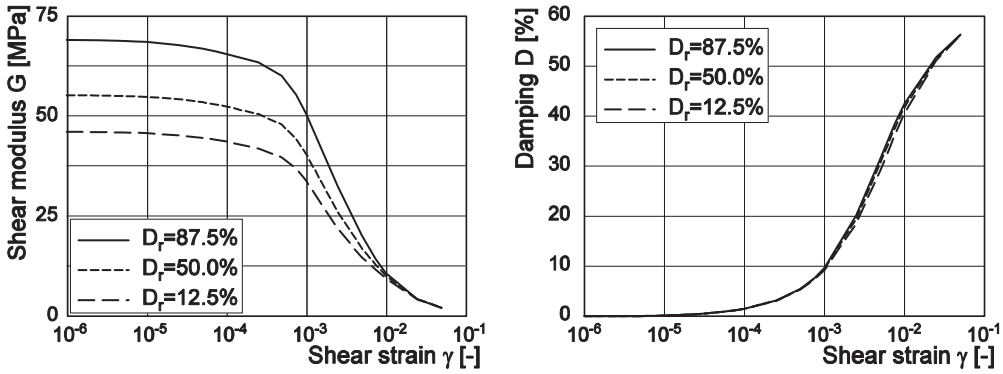


Abbildung 5: Berechneter Schubmodul G und Dämpfungsverhältnis D vs. Scherdehnungsamplitude γ für verschiedene relative Dichten und Stoffparameter für einen Quarzsand.

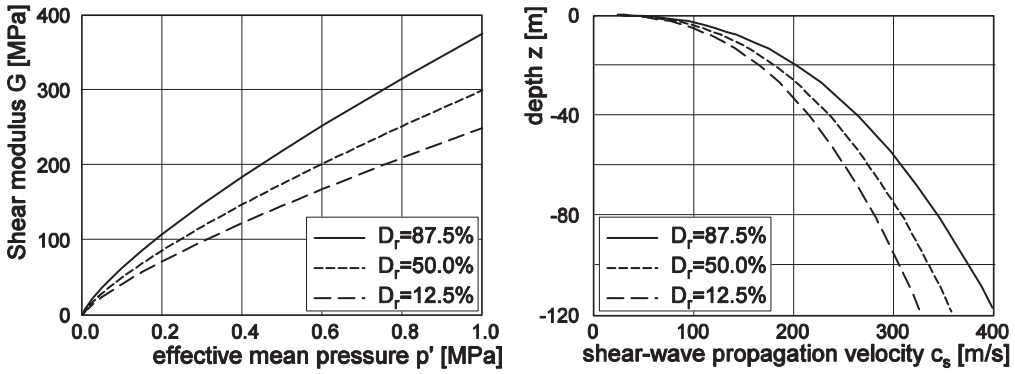


Abbildung 6: Berechneter Schubmodul G_0 vs. effektiven mittleren Druck p' für kleine Scherdehnungsamplituden γ (links) und Scherwellengeschwindigkeit vs. Tiefe (rechts) für verschiedene relative Dichten und Stoffparameter für einen Quarzsand.

Der Schubmodul G_0 für kleine Scherdehnungsamplituden hängt vom mittleren Druck p' ab (Abb. 6). Bei bekannter Dichte des gesättigten Bodens kann damit die Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe abgeschätzt werden.

1D-Wellenausbreitung: Variation von Eingangs- und Zustandsgrößen

Die nichtlinearen Effekte im Boden während der Wellenausbreitung wurden unter Freifeld-Bedingungen numerisch mit einer homogenen, gesättigten Bodensäule simuliert. Der Boden (hier Karlsruher Sand) wurde dazu mit einem hypoplastischen Stoffgesetz (NIEMUNIS 2003) modelliert. Die Dichte des Bodens nimmt dabei unter Eigengewicht mit der Tiefe zu. Eine zusätzliche Schichtung wurde hier nicht betrachtet, um die wesentlichen Mechanismen identifizieren zu können. Schichten könnten sogar eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse unmöglich machen. Die dynamischen Berechnungen werden mechanisch hydraulisch nicht gekoppelt durchgeführt; daher sind nur Aussagen bis zum Einsatz der Verflüssigung möglich. Der Porenwasserdruckabbau (Konsolidierung) ist dabei nicht möglich.

Als Anregung (Randbedingung) wurde wie bei den vorgestellten Shake-Box-Versuchen ein sinusförmiges Geschwindigkeitssignal verwendet, um transiente Änderungen des Bodenzustands (effektiven Spannungen und Lagerungsdichte) und des Porenwasserdrucks beobachten zu können. Im Gegensatz zu realen Erdbebensignalen mit einem breiten Frequenz- und Amplitudeninhalt erwies sich eine stationäre Anregung für systematische Untersuchungen als besser geeignet. In einer Parameterstudie wurden die Anregung (Amplitude v_0, Frequenz f_0 und Zyklenzahl N) und die Lagerungsdichte variiert, um das asymptotische Verhalten (Attraktoren) abhängig von Frequenz und Amplitude sowie die zeitlich veränderlichen Bewegungsmoden eindeutig identifizieren zu können. Die Amplifikation, der Quotient der Geschwindigkeitsamplituden an der Oberfläche und der Basisanregung v_0, wird als Maß verwendet. Abhängig von den Zustandsgrößen (Spannungszustand, Lagerungsdichte) trat an der Oberfläche eine Verstärkung (Amplifikation >1) bzw. Abminderung (Amplifikation <1) der Amplitude der Anregung auf.

Eine 30m hohe Säule in anfangs mitteldichter Lagerung wurde untersucht. Bei einer Anregung mit v_0 = 0,4m/s und f_0 = 2Hz wurde Verflüssigung nach etwa 15s erreicht, d.h. die Steifigkeit ist stark reduziert (Abb. 7). Damit nimmt die Geschwindigkeit an der Oberfläche stark ab. Nach einer anfänglichen Zunahme der Amplifikation nimmt diese nach ausreichend vielen Zyklen auf einen residualen Wert ab. Besonders bei schwächerer Anregung (v_0 = 0,05m/s) verändert sich der Zustand und somit die Steifigkeit vergleichsweise langsam, so dass eine allmähliche Änderung des Bewegungsmodes gut beobachtbar ist. In der Verschiebungskontur ist anfänglich ein λ/2-Mode sichtbar, der im weiteren Verlauf in höhere Moden wechselt (mit λ = Wellenlänge bei Eigenfrequenz der Säule), siehe Abbildung 8.

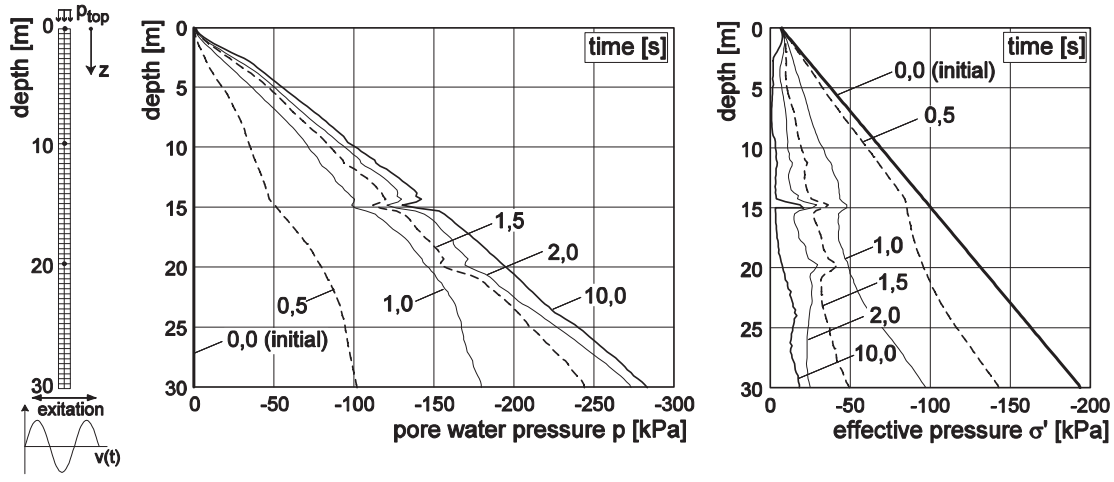


Abbildung 7: Entwicklung des Porenwasserdruck (links) und der effektiven Spannungen (rechts).

Durch die Variation der Anregungsfrequenz konnte die Eigenfrequenz von etwa 1,6Hz der untersuchten Bodensäule gefunden werden, bei der die Amplifikation während der ersten Zyklen maximal wurde (siehe Abb. 9). Bei sehr kleinen Frequenzen ergibt sich infolge der geringen Trägheitswirkungen eine Starrkörperbewegung (Amplifikation=1). Bei höheren Frequenzen erfolgt nach einer anfänglichen Verstärkung eine rasche Abnahme aufgrund der einsetzenden Verflüssigung des Bodens. Zudem zeigt sich, dass es bei kleineren Anregungsgeschwindigkeiten zu einer größeren Verstärkung kommt. Dies deckt sich mit Erfahrung der Erdbebeningenieure.

Der Einfluss der Lagerungsdichte ist in Abb. 9 (rechts) dargestellt. Die Amplifikation steigt mit zunehmender Lagerungsdichte an. Bei mitteldichtem Sand nimmt diese Verstärkung relativ schnell ab, während sie bei sehr dichtem Sand erhalten bleibt. Die zyklische Scherung führt bei locker bis mitteldichtem Anfangszustand nach wenigen Zyklen zu einer Verdichtung und somit zu einem Porenwasseranstieg. Bei dichtem Sand ergibt sich jedoch im Mittel ein Porenwasserunterdruck, da sich dieser nicht weiter verdichten kann. Dadurch bleibt die Verstärkung auch nach mehreren Zyklen erhalten.

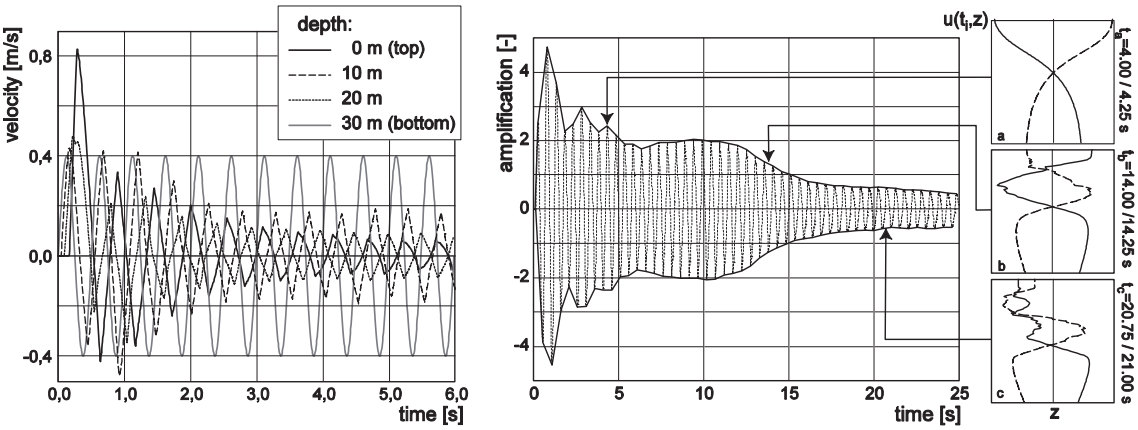


Abbildung 8: Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Tiefen v_0=0,4m/s (links); Amplifikation und Bewegungsmoden (a, b, c) v_0=0,05m/s (rechts).

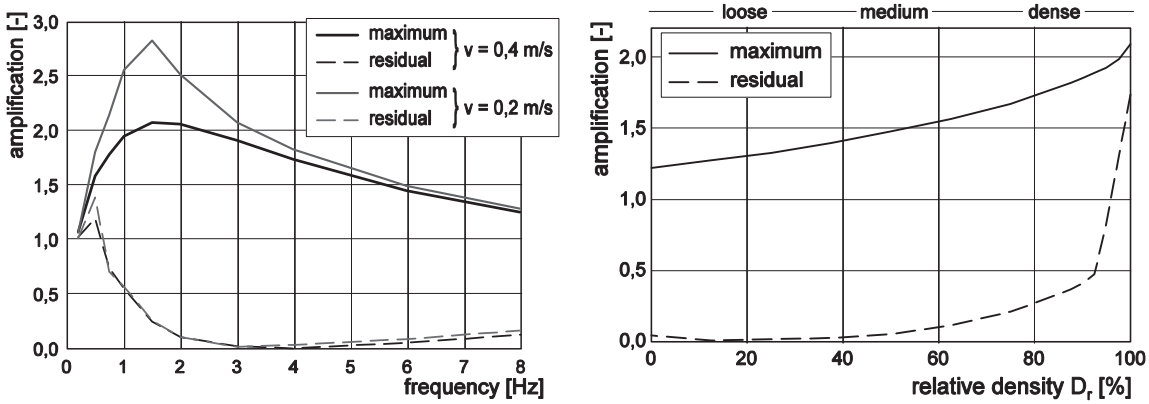


Abbildung 9: Variation der Anregungsfrequenz und -geschwindigkeit (links) und der Lagerungsdichte bei f_0 = 2Hz und v_0 = 0.4m/s (rechts).

1D-Wellenausbreitung: Vergleich elastischer und hypoplastischer Simulation

Ein 1-D Wellenausbreitungsmodell wird verwendet, um den Einfluss nichtlinearer Effekte auf die Bodenantwortanalyse im Unterschied zu einem linear-äquivalenten Modell, wie beispielsweise SHAKE (LYSMER ET AL. 1972), zu darzustellen. Das verwendete nichtlineare Finite-Differenzen-Modell (OSINOV 2003) basiert auf einem hypoplastischen bzw. visko-hypoplastischen Stoffgesetz (NIEMUNIS 2003) und wird auch in den Teilprojekten B6 und B7 verwendet, z.B. (EHRET ET AL. 2007). Betrachtet wurde ein vereinfachtes Bodenprofil aus vier Schichten (Abb. 10) abgeleitet aus dem realen Profil, Bazilescu Park in Bukarest. Die Stoffparameter wurden anhand von Laborversuchen bestimmt (GRANDAS ET AL. 2007) bzw. anhand der Granulometrie abgeschätzt (HERLE UND GUDEHUS 1999).

Zur Veranschaulichung des Einflusses des anfänglichen Bodenzustands wurden zwei Fälle simuliert. Die beiden granularen Schichten (Colentina und Mostistea Sandschichten, vgl. Abb. 10) wurden im Fall a als anfänglich locker und im Fall b als anfänglich dicht angenommen. Die Simulationen zeigen, dass keine Verflüssigung auftritt, wenn der ursprüngliche Zustand der granularen Schichten dicht ist (Fall b). Im Fall a tritt nach 10 Sekunden Verflüssigung in der Mostisteaschicht ein und es findet keine weitere Wellenausbreitung mehr statt, Abbildung 10.

Zum Vergleich wurden Berechnungen mit einem linear-äquivalenten Modell durchgeführt. Bei beiden Modellen nimmt die Amplifikation (Quotient der maximalen Geschwindigkeitsamplituden an der Oberfläche und an der Basis) mit wachsender Amplitude der Basisanregung ab.

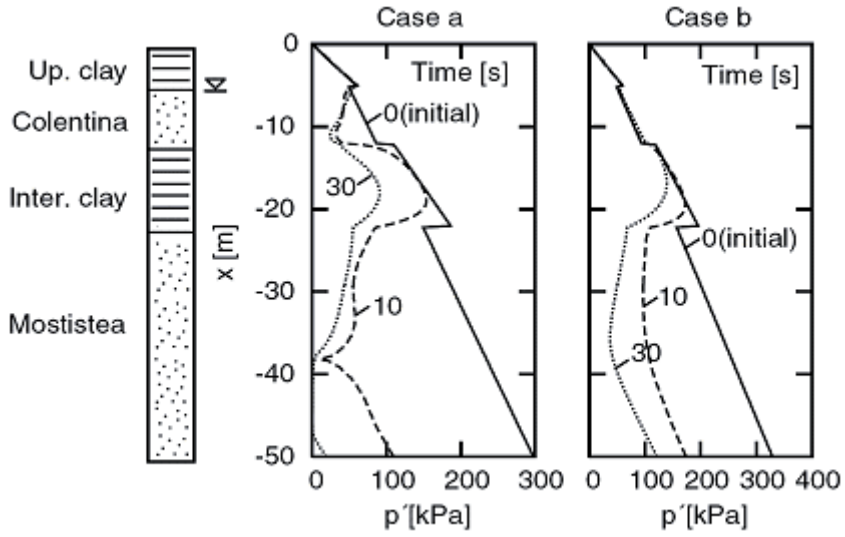


Abbildung 10: Bodenprofil Bazilescu Park und Berechnungsergebnisse – effektiver mittlerer Druck vs. Tiefe für anfänglich lockere Lagerung (Case a, links) und anfänglich dichte Lagerung (Case b, rechts) (GRANDAS ET AL. 2007).

In einigen Fällen erhält man mit dem nichtlinearen Modell höhere Geschwindigkeiten an der Oberfläche als mit dem linear-äquivalenten Modell (Abbildung 11). Das nichtlineare Modell zeigt die aus Messungen bekannte Verschiebung der Maxima zu niedrigen Frequenzen. Ein kurzer Vergleich der wichtigsten Merkmale der beiden Modelle ist in Tabelle 1 aufgeführt.

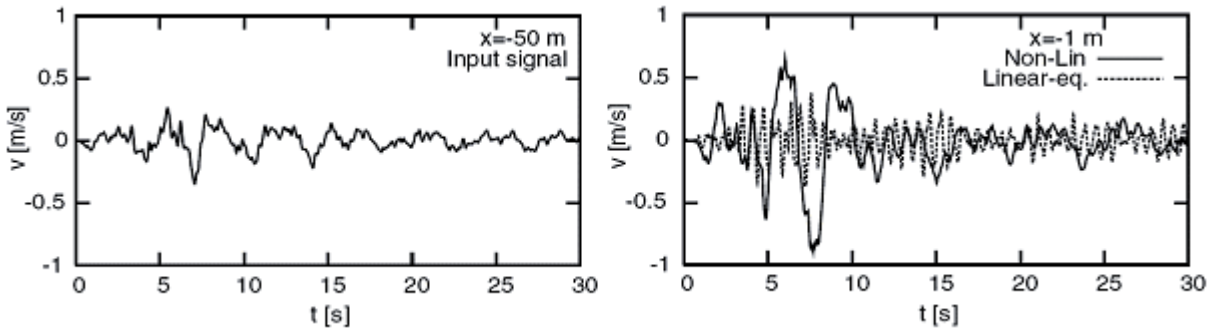


Abbildung 11: Synthetisches Geschwindigkeitssignal (Sokolov et al. 2000) als Anregung der Basis (-50 m) (links) und berechnetes Antwortsignal nahe der Oberfläche für das nichtlineare und das linear-äquivalente Modell (rechts) (Grandas et al. 2007).

Tabelle 1: Vergleich der wichtigsten Merkmale des linear-äquivalenten und nichtlinearen Modells (Osinov 2003).

	Linear-äquivalentes Modell	Nichtlineares Modell
Berechnungszeit	Mehrere Sekunden	Mehrere Minuten
Eingabeparameter, Zustandsgrößen	Schubmodul- und Dämpfungs-/Scherdehnungskurven, Scherwellengeschwindigkeit und Dichte	8 Parameter für kohäsionslose Materialien oder 7 für bindige Materialien, 5 intergranulare Dehnungsparameter, Anfangsspannungszustand, Anfangsporenzahl und Durchlässigkeit
Steifigkeitsabhängigkeit	Dehnungsamplitude	Dehnungsamplitude, Porenzahl, mittlerer effektiver Druck, Dehnungsrate, Dehnungsrichtung, Verformungsgeschichte
Simulation nichtlinearer Effekte	Geringere Verstärkung an der Oberfläche für stärkere Anregungssignale	Geringere Verstärkung an der Oberfläche und Verschiebung des Maxima zu niedrigen Frequenzen für stärkere Anregungssignale, Verflüssigung, Konsolidierung, Schichttrennung, Steifigkeitsabnahme durch Porenwasserdruckanstieg, Generierung von Druckwellen durch Scherwellen (Dilatanz/Kontraktanz)
Porenwasserströmung	Nicht enthalten	In vertikaler Richtung enthalten und mit Volumenänderung verbunden
Nur mit erhöhtem Aufwand zu erfassende Größen		Bestimmung des in-situ Zustandes (Spannung, Porenzahl), Bestimmung der intergranularen Dehnungsparameter

1D-Wellenausbreitung: Berechnung der Bodenantwort für das INCERC Profil in Bukarest

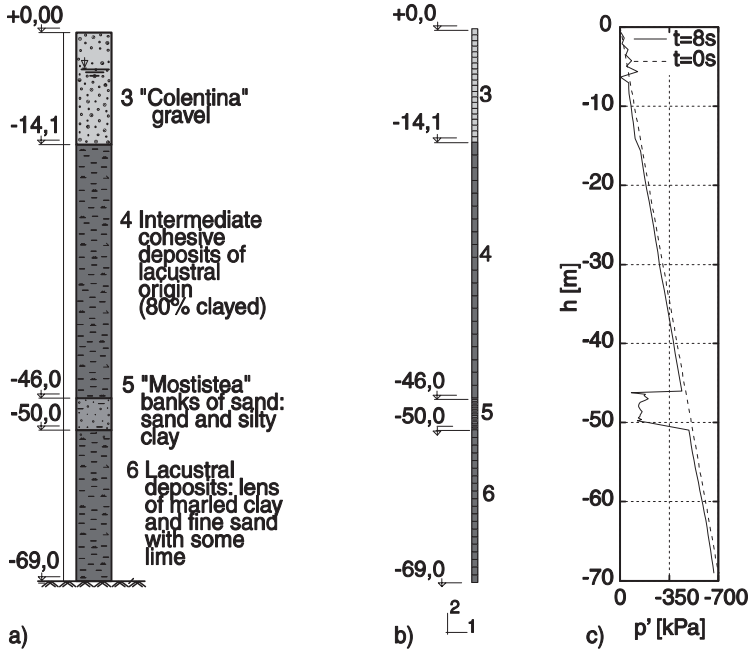


Abbildung 12: Profil INCERC in Bukarest (LUNGU 2003) (a), Modell (b) und Verteilung des mittleren Effektivdrucks p' (c) (LIBREROS 2006).

Für die Ermittlung der dynamischen Bodenantwort am Standort INCERC in Bukarest wurde dessen Bodenprofil zugrunde gelegt (Abb. 12a) und die Ergebnisse mit ABAQUS berechnet. Die lacustrinen Schichten (Schicht 4 und 6) wurden mit Hilfe eines viskohypoplastisches Materials modelliert, während der "Colentina" Kies (Schicht 3) und die "Mostistea" Sandbank (Schicht 5) als hypoplastisches Material modelliert wurden. Bei der Berechnung wurde die Basis sinusförmig mit einer Frequenz von f = 5Hz und einer Geschwindigkeitsamplitude von v = 8.0cm/s angeregt. Abbildung 12c zeigt die Verteilung des mittleren Effektivdrucks p' für 2 Zeiten (t = 0, t = 8s).

In einer Tiefe von ca. 48m nimmt der mittlere Effektivdruck von ca. 490kPa bei t = 0s auf ca. 150kPa. nach 8s ab. In der Sandschicht findet eine undränierte Scherung statt. Durch die Scherwellen ist das Korngerüst in Schicht 5 (nach 8s) nahe dem Zerfall. In Abbildung 13 sind die berechneten horizontalen (a) und vertikalen (b) Geschwindigkeiten und die Spektren für die horizontale (c) und vertikale (d) Richtung dargestellt. Man sieht (a), dass die Anregung an der Basis in horizontaler Richtung eine Bewegung an der Oberfläche ca. 0,5s später verursacht. Weniger als 2s lang bleibt die Amplitude und die Frequenz gleich der Anregung an der Basis. Danach nimmt die Amplitude auf ca. 1cm/s ab. Grund dafür ist die undränierte Schicht 5, die die Ausbreitung der Scherwelle nach oben (nach 8 s) weitergehend verhindert.

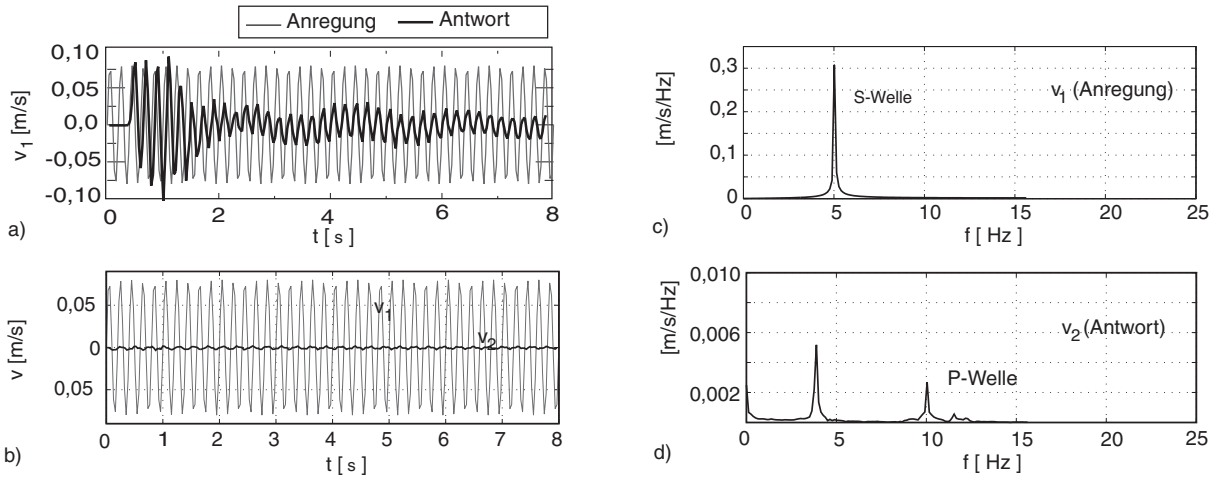


Abbildung 13: Berechnete horizontale (a) und vertikale (b) Geschwindigkeiten und ihre spektrale Analyse in horizontaler (c) und vertikaler (d) Richtung für das INCERC Profil. Anregung an der Basis, Antwort an der Oberfläche (LIBREROS 2006).

Die Scherwelle an der Basis als Anregung erzeugt eine P-Welle, die zur Oberfläche mit Geschwindigkeit der Druckwelle an die Oberfläche läuft und dort reflektiert wird (Abbildung 13b). Diese P-Welle mit einer im Vergleich zu der Scherwelle kleinen Amplitude weist die doppelte Frequenz (10Hz in Abbildung 13d) der Scherwelle (5Hz in Abbildung 13c) auf. Der andere Spektralanteil von etwa 4Hz gehört zu einer der Schichtdicke entsprechenden stehenden Welle.

2D-Wellenausbreitung: Nachrechnung der VELACS Versuche

Zentrifugenversuche sind eine weitere Möglichkeit reale Spannungsverhältnisse auf kleine Modelle abzubilden. Ergebnisse aus diesen Versuchen sollten sich daher für Nachrechnungen gut eignen. Daten aus dem VELACS-Projekt (Verification of Liquefaction Analysis by Centrifuge Studies) sind für eine Nachrechnung verfügbar. Im VELACS- Projekt wurden an einem Quarzsand (Nevada-Sand) Laborversuche zur Bodencharakterisierung und Shake-Box Versuche (Rigid und Laminar Box) in einer Zentrifuge durchgeführt. Bei den Versuchen wurden die Porenwasserdrücke, Verschiebungen und Beschleunigungen in verschiedenen Tiefen gemessen. Als Basisanregung wurden sowohl harmonische, als auch Erdbeben ähnliche Signale verwendet. Die verwendete Shake-Box besteht aus 40 über Rollen verschieblich gelagerten Aluminiumringen mit einer Gesamthöhe von 20 cm (Breite 46 cm, siehe Abbildung 14 links). Die Versuche wurden mit einem Maßstabsfaktor von n = 50, also bei 50 g, durchgeführt.

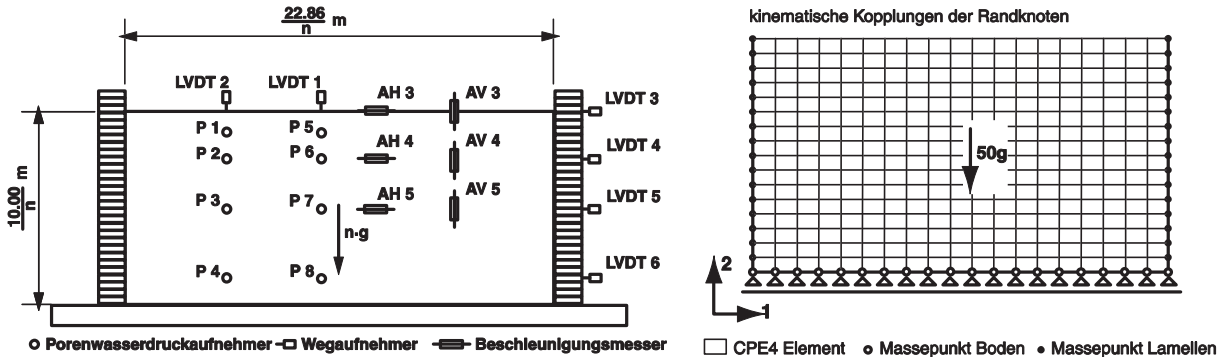


Abbildung 14: Experimentelles Modell (a) und FE-Netz (b) (SANDHÖFNER 2007)

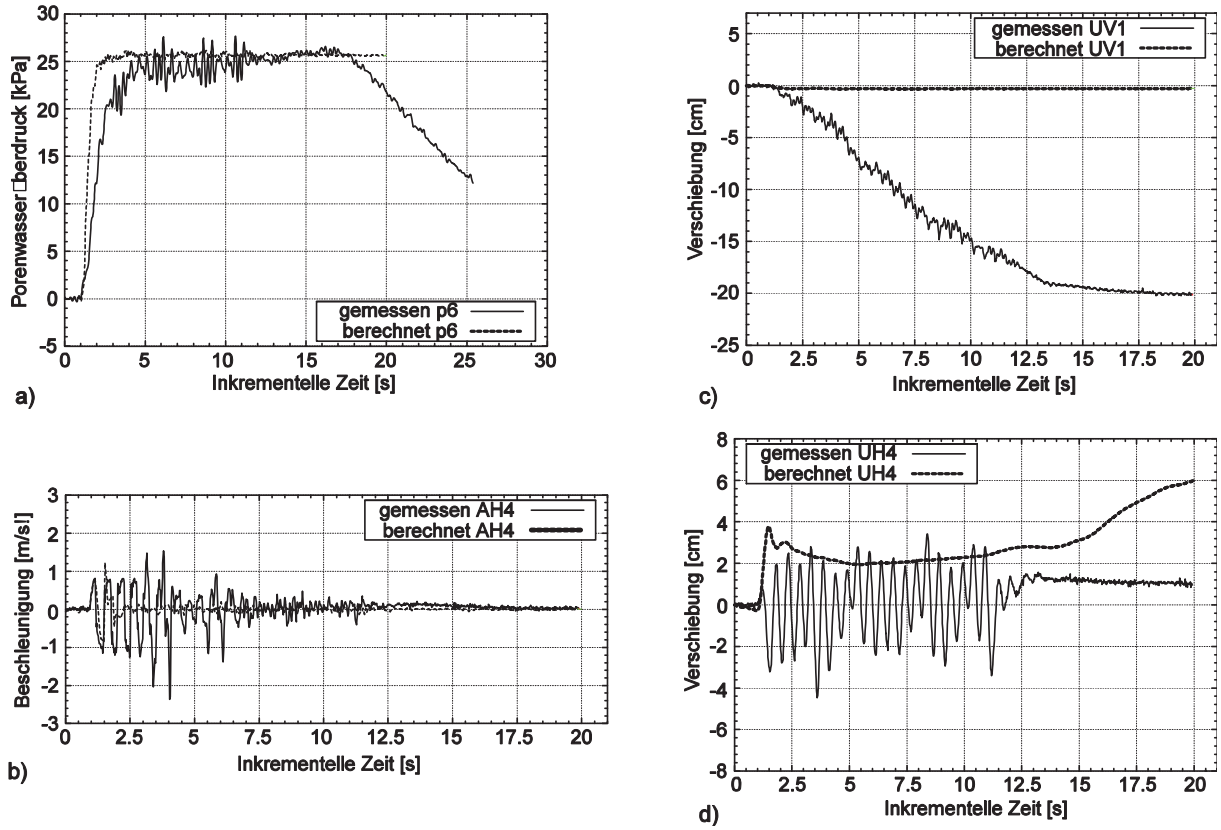


Abbildung 15: Porenwasserüberdruck P6 (a), horizontale Beschleunigung AH4 (b), vertikale Verschiebung LVDT1 (c) und horizontale Verschiebung LVDT4 (d) versus inkrementeller Zeit (SANDHÖFNER 2007).

Da die numerischen Berechnungen unter undrainierten Bedingungen durchgeführt wurden, kann ein Abbau der Porenwasserdrücke im Gegensatz zum Experiment nicht auftreten, Abbildung 15a. Dies zeigen auch die vertikalen Setzungen in Abbildung 15c, welche bei volumentreuen Bedingungen nicht auftreten können.

Die Berechnung zeigt einen zu schnellen Anstieg der Porenwasserüberdrücke, welche wiederum im Experiment durch Abbau von Porenwasserüberdruck aufgrund Dränage überlagert sind. Der Vergleich der Beschleunigungen zeigt zumindest in den ersten zwei Sekunden eine sehr gute Übereinstimmung, danach sind die

Beschleunigungsamplituden sehr gering (Abbildung 15b). Die horizontalen Verschiebungen der Lamellen in Abbildung 15d weichen ebenfalls nach zwei Sekunden von den Messergebnissen ab und zeigen keinerlei Oszillationen, da sich bei der Berechnung im unteren Drittel der Modells eine Trennschicht ausbildete, die die Scherwellen abfing. Eine gute Übereinstimmung der Simulationen wurde somit nur solange erreicht, wie im Experiment annähernd undränierte Verhältnisse herrschen.

Seismische Boden-Gründung-Bauwerk-Interaktion

Um ein realistisches Modell einer dynamischen Boden-Gründung-Bauwerk-Interaktion auf weichem, verflüssigungsfähigen Boden zu erhalten, müssen die wesentlichen Aspekte des Bodenverhaltens, die in den vorangegangen Abschnitte vorgestellt wurden, berücksichtigt werden. Die Berechnungen selbst werden undränierte Bedingungen angenommen. Die verwendeten Modelle sind in Abbildung 16 dargestellt. Als Untergrund wurde der geschichtete Bodenaufbau von Treasure Island, San Francisco Bay (SEED ET AL. 1991) angenommen. Die Basisanregung erfolgte mittels einer Beschleunigungsaufnahme des Loma Prieta Erdbebens von 1989, aufgenommen auf Yerba Buena Island. Die Flachgründung besteht aus einer Stahlbetonplatte (Dicke 0,5m), die in der sandigen Auffüllung 2m unter dem Grundwasserspiegel gründet. Die Pfähle (Durchmesser 1m bzw. 0,5m für die Pfahlgruppe) sind in die tiefere schluffige Sandschicht eingebettet. Beide kohäsionslosen Schichten wurden hypoplastisch modelliert (NIEMUNIS 2003). Das dreistöckige Gebäude wurde aus Stahlbetonrahmen mit Verstärkungsrippen modelliert (CUDMANI UND CUDMANI 2004).

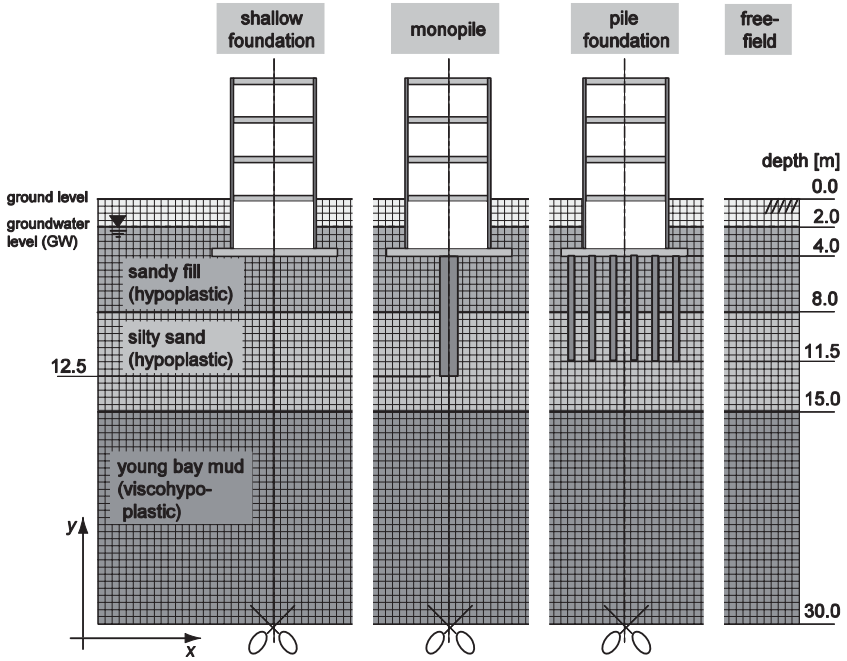


Abbildung 16: Verwendete FE-Modelle einer Flachgründung, einer Einzelpfahlgründung und der Pfahlgründung (BÜHLER 2006).

Abbildung 17 links zeigt die Entwicklung der mittleren vertikalen Verschiebung der untersuchten Gründungsarten und für Freifeldbedingungen. Unter undränierten Bedingungen ergibt sich eine maximale Setzung von ungefähr 65 mm für die Flachgründung. Eine Reduktion der Setzungen kann durch eine Tiefgründung erreicht werden, hier ergeben sich Reduktionen der maximalen Setzung von 30% für die Einzelpfahlgründung und 70% für die Pfahlgründung. Die Berechnungen zeigen, dass die meisten Setzungsanteile während der ersten 10 Sekunden des Erdbebens, der Phase mit den stärksten Ausschlägen, auftreten. Abbildung 17 rechts zeigt die Verkippung für die verschiedenen Gründungsarten.

Im Fall der Einzelpfahlgründung werden durch die dynamische Belastung der Pfähle große Kippmomente auf das Bauwerk übertragen und die Struktur kippt stärker hin und her. Dies läst sich durch die Verwendung einer Pfahlgruppe verbessern, da hier die Kräfte aus Momenten über die Pfähle wieder in tiefere, tragfähigere Bereiche übertragen werden. Bei beiden Tiefgründungen nehmen die Verkippungen im laufe der Simulation wieder ab, dass heißt das Gebäude kommt annähernd wieder in eine vertikale Position zurück. Das Gegenteil geschieht bei der Flachgründung, hier nimmt die Verkippung ständig zu, allerdings werden geringere Kräfte aus den Momenten auf das Gebäude übertragen.

Abbildung 18 zeigt Zonen verschwindenden effektiven Drucks 10 Sekunden nach Beginn des Erdbebens. Unter Freifeldbedingungen entsteht zunächst im Bereich des Grundwasserspiegels eine verflüssigte Zone, die sich nach unten ausbreitet bis die Schicht verflüssigt ist. Im Fall der Flachgründung (Abbildung 18b) entsteht unter dem Fundament ein dünner, verflüssigter Bereich in dem keine Scherwellenausbreitung mehr möglich ist; der darüber liegende Bereich ist weitgehend abgeschirmt. Der Boden auf beiden Seiten der Flachgründung ist nicht verflüssigt und das Gebäude wird dadurch stabilisiert. Bei der Einzelpfahlgründung verflüssigt bis auf einen kleinen Bereich unter dem Fundament die ganze Schicht, zusätzlich werden auch noch tiefere Bereiche verflüssigt. Dieser Effekt ist bei der Pfahlgruppe noch ausgeprägter; der Bereich zwischen den Pfählen wird nicht verflüssigt.

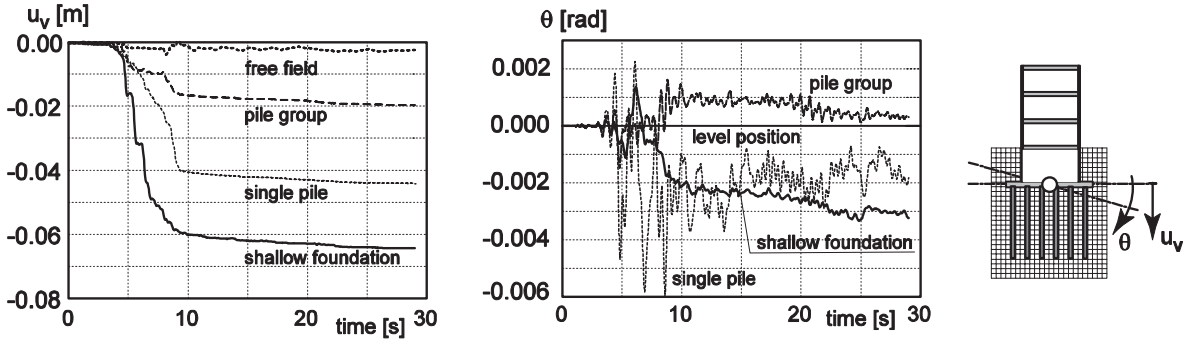


Abbildung 17: Entwicklung der vertikalen Verschiebungen (links) und der Verkippung (rechts) der drei Gründungsarten (BÜHLER 2006).

Die Flachgründung erscheint hinsichtlich der Abschirmung infolge Verflüssigung eine vorteilhaftere Variante zu sein; gleichzeitig erfährt sie die größten Verschiebungen und Verkippungen.

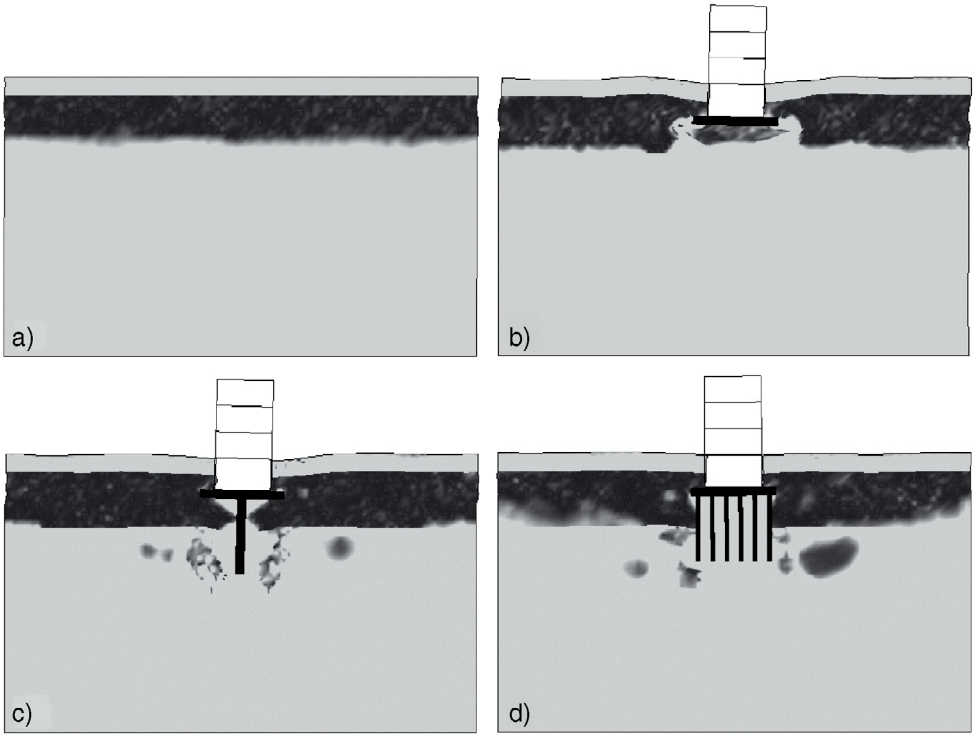


Abbildung 18: Zonen mit verschwindendem effektiven Druck (schwarz zeigt Verflüssigung) für das Freifeld (a), die Flachgründung (b), die Einzelpfahlgründung (c) und die Pfahlgründung (d) (BÜHLER 2006).

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Eine andere Art der Modellierung des gesättigten Bodens wird von Iai (IAI UND TOBITA 2006) angewandt. Die Simulationen zeigen bei sinusförmiger Anregung in den Geschwindigkeitssignalen wie in den hier vorgestellten Modellrechnungen ebenfalls scharfe Knicke und ein Beschleunigungssignal mit nadelförmigen Pulsen. Dies ergibt sich im Fall der Hypoplastizität aus der starken Steifigkeitsänderung bei Umkehr der Deformationsrichtung. Die sich aus den Modellrechnungen ergebenden Verläufe passen zu Ergebnissen zyklischer Triaxialversuche; bei Erdbeben wurden solche Schwingungsformen jedoch nicht gemessen.

5.2.1.4 Offene Fragen

1. Die Wellenausbreitung mit 1D-Modellen gibt die Effekte wie Abschirmung infolge Verflüssigung sehr betont wieder (HUBER ET AL. 2007) und berücksichtigt entstehende oder in den Anregungssignalen enthaltene Anteile aus Reflexion nicht oder nicht richtig.

2. Bei geschichtetem Boden mit einer verdichtungsfähigen Sandschicht zwischen zwei bindigen Schichten ist eine mögliche Trennung von Sand und Wasser unter undränierten Bedingungen möglich. Dies wurde in Versuchen gezeigt (KOKUSHO 2000, HUBER ET AL. 2007). Die infolge Verdichtung entstehende Wasserschicht kann dann über Kanäle zu sog. Sand Boils an der Oberfläche führen, wie beispielsweise von Ishihara (ISHIHARA UND PERLEA 1984) für Bukarest beschrieben. Mit den verwendeten Modellen kann dieses Phänomen nicht beschrieben werden.

3. Auch die Nachrechnung der Shake-Box-Versuche mit Sand kann mit der vorliegenden FE-Formulierung ohne hydraulisch mechanische Kopplung nicht erfolgreich sein, da Porendruckaufbau und Konsolidierung nicht zeitlich nacheinander sondern gleichzeitig ablaufen. Im Finiten-Differenzen-Modell ist diese Kopplung schon ansatzweise berücksichtigt.

4. Bei den Shake-Box Versuchen ist die Dichte zeitlich, aber örtlich nur im Mittel bekannt. Mit dem Einsatz der TDR-Methode (Time Domain Reflectrometry) sollte die örtliche Auflösung entlang der Höhenachse erfassbar sein. Die bisherigen Messungen brachten aber nicht die gewünschten Dichteverteilungen.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt B4 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Gudehus, G. (1996): A comprehensive constitutive equation for granular materials. Soils and Foundations, Bd. 36(1): 1–12.

Herle, I., G. Gudehus (1999): Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. Mechanics of cohesive-frictional materials, Bd. 4: 461–486.

Ishihara, K., V. Perlea, (1984): Liquefaction-associated ground damage during the Vrancea earthquake of March 4, 1977. Soils and Foundations, Bd. 24(1): 90–112.

Iai, S., T. Tobita (2006): Soil non-linearity and effects on seismic site response. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30. August–1. September 2006, Bd. 1: 21–46.

Kokusho, T. (2000): Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread. J. Geotech. Engrg. ASCE, Bd. 125(10): 817–826.

Lungu, D. A. (2003): Near-surface geology Aldea und dynamic properties of soil layers in Bucharest: Hazard and Risk Mitigation. In: F. Wenzel et al. (Hrsg.): Varncea Earthquakes: Tectonics, Kluwer Academic Publisher, Germany.

Lysmer, J., H. B. Seed, P. B., Schnabel (1972): Shake: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Technical Report UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Niemunis, A. (2003): Extended Hypoplastic Models for Soils. Hab., Schriftenreihe des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum, Heft 34.

Osinov, V. (2003): A numerical model for the site response analysis and liquefaction of soil during earthquakes. Geomechanical Measurements and Modelling, S. 475–481.

Seed, H.B., S.E. Dickenson, I.M. Idriss (1991): Principal geotechnical aspects of the loma prieta earthquake. Soils and Foundations, Bd. 31(1), S. 1–26.

Sokolov, V.Y, C.H. Loh, K.L. Wen (2000): Empirical model for estimation Fourier amplitude spectra of ground acceleration in Taiwan region. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Bd. 29(3), S. 339–357.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Rebstock, D., H. Wienbroer, G. Huber (2007): Nonlinear soil behaviour under stationary and transient excitation. In: Pitilakis, editor. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, 25.–28. June 2007, Paper 1559.

Wienbroer, H., R. O. Cudmani (2007): Numerical investigation of a catastrophic landslide during the El Salvador January 2001 earthquake. In: Pitilakis, editor. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece, 25.–28. June 2007, Paper 1562.

Rebstock, D., H. Wienbroer, G. Huber, M. M. Bühler (2006): Fundamental mechanisms and requirements for a seismic soil-foundation-structure interaction approach. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 30. August–1. September 2006, Vol 1, S. 233–242.

Bühler, M. M., H. Wienbroer, D. Rebstock (2006): A full seismic soil-foundation-structure interaction approach. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3.–8. September 2006, Paper 421.

Buehler, M. M., R. O. Cudmani (2005): Numerical investigation of the seismic behaviour of structures on soft and liquefiable soils considering the nonlinear soil-foundation-structure interaction. In: Proceedings of the International Conference on the 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, 1.–4. November 2005, S. 386–393.

Buehler, M. M. (2005): Disaster prevention and natural hazards mitigation in earthquake engineering design using seismic soil-foundation-structure interaction analysis. In: Proceedings of the IYGEC 2005, International Young Geotechnical Engineer's Conference, Osaka, Japan, 13.–15. September 2005.

Boominathan, A., R. Chandaka, M. M. Buehler, G. Gudehus (2004): Study on performance of pile walls using laminar shake box. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE04), Vancouver, B.C., Canada, 1.–6. August 2004, Paper 2790.

Buehler, M. M., R. O. Cudmani, G. Gudehus (2004): Experimental and numerical investigation of the behaviour of piles in soft soils under monotonic and alternating loading. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE04), Vancouver, B.C., Canada, 1.–6. August 2004, Paper 2964.

Cudmani, R.O., R. Cudmani (2004): Numerical study of the soil-structure interaction during strong earthquakes. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering (13WCEE04), Vancouver, B.C., Canada, 1.–6. August 2004, Paper 2959.

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Ehret, D., D. Hannich, G. Huber, C. Grandas, V. Ciugudean (2007): Numerical modelling of site effects incooperating nonlinearity and ground water level changes. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.–6. Oktober 2007, S. 263–268.

Grandas, C., G. Huber, D. Hannich, D. Ehret, H. Hötzel, J. Ritter (2007): Field investigations and site response analysis for Bucharest. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.-6. Oktober 2007, S. 253–258.

Hannich, D., H. Hoetzl, D. Ehret, G. Huber, A. Danchiv, M. Bretotean (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.–6. Oktober 2007, S. 205–221.

Huber, G., D. Hannich, D. Lungo (2007): Soil Conditions and Site Effects. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.–6. Oktober 2007, S. 181–189.

Rebstock, D., H. Wienbroer, G. Huber (2007): Nonlinear Wave Propagation in Soil. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.–6. Oktober 2007, S. 259–262.

Wienbroer, H., D. Rebstock, G. Huber (2007): Shake-Box Tests. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 4.–6. Oktober 2007, S. 226–239.

c) in Monographien

Bühler, M. M. (2006): Experimental and numerical investigation of soil-foundation-structure interaction during monotonic, alternating and dynamic loading. Diss., Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 166.

Heinichen, C. (2006):Experimentelle Untersuchungen des Verhaltens von Pfählen in hartkörnigen und weichen Böden während eines Erdbebens. Diplomarbeit am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH).

Libreros Bertini, A. B. (2006): Hypo- und viskohypoplastische Modellierung von Kriech- und Rutschbewegungen, besonders infolge Starkbeben. Diss., Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe (TH), Heft 165.

Sandhöfner, S. (2007): FE-Simulation von n-g-Modellversuchen zur Untersuchung des Bodenverhaltens und der Boden-Bauwerk-Interaktion mit wassergesättigten Böden unter Erdbebenbeanspruchung. Diplomarbeit am Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe (TH).

5.2.2.3 Vorträge

keine

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1996 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	562.192 €	52.970 €	23.008 €	638.170 €
2005	67.200 €	4.400 €	0	71.600 €
2006	70.800 €	2.800 €	0	73.600 €
2007	70.800 €	0	0	70.800 €
Summe	**770.992 €**	**60.170 €**	**23.008 €**	**854.170 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Gudehus, G., o.Prof. em. Dr.-Ing. Dr. hc. Huber, G., Dr.-Ing.	Bodenmechanik Bodendynamik	IBF IBF	01/1999 bis 01/2007 01/1996 bis 12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Jentsch, M. Schwab, F., Dipl.-Ing.(FH) Kuketz, D. Hill, R.		IBF IBF IBF IBF	01/1999 bis 12/2007 01/2004 bis 07/2005 01/2004 bis 12/2007 01/2005 bis 04/2007	
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Bühler, M.M., Dr.-Ing. Grandas Tavera, C.E., M.Sc. Libreros Bertini, A.B., Dr.-Ing Meier, T., Dipl.-Ing. Rebstock, D., Dipl.-Ing. Wienbroer, H., Dipl.-Ing.	Numerik Bodenmechanik Numerik Bodenmechanik Numerik Grund-/ Massivbau Numerik Bodenmechanik Numerik Bodenmechanik Bodenmechanik/ Versuchst.	IBF IBF IBF IBF IBF IBF	01/1999 bis 12/2005 10/2006 bis 12/2007 01/2002 bis 09/2005 01/2004 bis 07/2007 10/2005 bis 12/2007 10/2005 bis 12/2007	Alle Mit-arbeiter hatten Misch-finanzier-ungen
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt B6

Geotechnische und seismische Mikrozonierung von Bukarest

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dipl.-Geol. Dominik Ehret [1]
Prof. Dr. Heinz Hötzl [2]

[1] Geologisches Institut, Abteilung Ingenieurgeologie, Universität Karlsruhe (TH)
[2] Geologisches Institut, Abteilung Hydrogeologie, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt B6

5.1.1 Titel:

Geotechnische und seismische Mikrozonierung von Bukarest

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Geologie, GIS, Bodendynamik

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr. Hötzl, Heinz, 29.08.1941 *(seit 01.04.2006)*
Dr. Rohn, Joachim, 10.02.1959 *(bis 31.03.2006)*
Geologisches Institut – Abteilung Hydrogeologie, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe
Telefon: 0721/608-3098
Telefax: 0721/606279
E-Mail: heinz.hoetzl@agk.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Geol. Dominik Ehret
Geologisches Institut – Abteilung Ingenieurgeologie, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 76128 Karlsruhe

5.1.5 Rumänische Partner:

Dr. Andrei Bala, NIEP, Bukarest
Dr. Stefan Florin Balan, NIEP, Bukarest
Dr. Viorica Ciugudean, S. C. Metroul S. A., Bukarest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das Teilprojekt B6 untersuchte potentielle Auswirkungen von Vrancea-Erdbeben auf das Stadtgebiet Bukarests aus ingenieurgeologischer Sicht. Hierfür wurde zum größten Teil bewusst auf bereits in der Vergangenheit in Bukarest ermittelte geotechnische Parameter zurückgegriffen. Ergänzt wurden diese Daten jedoch durch weitere, gezielt ausgewählte und im Laufe der letzten beiden Förderperioden im Rahmen des SFB 461 durchgeführte Messungen. Diese Bodenparameter bildeten die Datengrundlage für die Durchführung von nicht-linearen Modellierungen, die auf dem (visko-)hypoplastischen Stoffgesetz beruhen. Hierbei wurde für unterschiedliche synthetische Erdbeben, die Vrancea-Erdbeben entsprechen, die Bodenantwort für ein Punktraster innerhalb Bukarests berechnet. Die Modellierungsergebnisse wurden mit einem Geografischen Informationssystem (GIS) interpoliert und kartenmäßig dargestellt. Weiterhin wurde in enger Zusammenarbeit mit Teilprojekt B7 der Einfluss des Grundwasserstands (bzw. von Grundwasserstandsänderungen) auf die Bodenantwort untersucht.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Im Zusammenhang mit der Analyse der Erdbebengefährdung Rumäniens spielt die Ermittlung lokaler Standorteffekte sowie die Erstellung von Mikrozonierungskarten gefährdeter Gebiete bereits seit Mitte des 20. Jahrhunderts eine bedeutende Rolle (z. B. GHICA 1953; MÂNDRESCU 1972, 1973). Hierbei stellte sich heraus, dass die geotechnischen, bodendynamischen und hydrogeologischen Eigenschaften großen Einfluss haben. Informationen über diese wichtigen Eigenschaften können jedoch nur punktuell direkt ermittelt werden. Deshalb war zu eruieren, wie diese unterschiedlichen Einflussgrößen zusammenwirken und ob durch ein numerisches Modell dies quantifiziert und für eine flächenhafte Bewertung nutzbar gemacht werden kann.

Geologischer Aufbau des Untergrunds von Bukarest

Aufbau und Zusammensetzung des geologischen Untergrunds von Bukarest sind geprägt durch die Ausbildung des großen Karpaten-Vorlandbeckens und dessen synorogenetischer Verfüllung mit klastischen Sedimenten. Über dem präkambrischen Basement befinden sich mächtige paläozoische und mesozoische Sedimentformationen (MÂNDRESCU & RADULIAN 1999). Im Raum Bukarest nimmt die Mächtigkeit der tertiären und quartären sedimentären Ablagerungen innerhalb des klastischen Keils von Norden nach Süden ab. Über den im Gesamten etwa 1.000 m mächtigen tertiären Flachwassersedimenten wurden fluviatile und äolische quartäre Sedimente abgelagert (LITEANU 1951; CIUGUDEAN & MARTINOF 2000). Die Basis dieser unverfestigten bzw. lediglich gering verfestigten Ablagerungen befindet sich etwa 230–400 m unter der Geländeoberfläche. Im gesamten Stadtgebiet von Bukarest bilden anthropogene Auffüllungen mit einer Mächtigkeit bis etwa 10 m eine sehr inhomogene Deckschicht (LUNGU et al. 1999).

Von den genannten geologischen Formationen haben die oberflächennahen unverfestigten quartären Sedimente sowie die weit verbreiteten anthropogenen Auffüllungen einen fundamentalen Einfluss auf die innerhalb des Stadtgebiets stark variierenden Standorteffekte bei Erdbeben.

Die quartären Lockergesteine im Raum Bukarest stellen eine inhomogene Wechselfolge fein- und grobkörniger klastischer Sedimente dar und lassen sich insgesamt sieben Einheiten zuordnen, die sich anhand charakteristischer lithologischer, geotechnischer, hydrogeologischer und bodendynamischer Eigenschaften unterscheiden (LUNGU et al. 1999).

Die Mächtigkeit dieser Einheiten ist lokal starken Schwankungen unterworfen. Auch die Tiefenlage der Schichtgrenzen variiert lateral innerhalb geringer Distanzen beträchtlich. Aufgrund des sich in der Vergangenheit häufig ändernden Verlaufs der Flüsse – und somit ebenfalls der Ablagerungsbedingungen – sind sowohl lateral als auch vertikal auf kleinem Raum lithologische Variationen zu beobachten (CIUGUDEAN & MARTINOF 2000).

Das Vorkommen gering durchlässiger tonig-schluffiger Schichten führt zur hydraulischen Trennung der besser durchlässigen sandig-kiesigen Sedimente und ermöglicht die Ausbildung von drei regional gespannten Hauptgrundwasserleitern im Untergrund von Bukarest, die von oben nach unten als Colentina-, Mostistea- und Fratesti-Aquifer bezeichnet werden.

Standorteffekte und Mikrozonierung

Auf den im lokalen Vergleich starken Variationen unterworfenen Frequenzinhalt, die maximale Amplitude sowie die Dauer von Erdbebenwellen, den nach Kramer (1996) für die Wechselwirkung mit Bauwerken wichtigsten Einflussgrößen, haben sowohl die Herdcharakteristik (Magnitude, Bruchmechanismus und Abstrahlcharakteristik) als auch der Übertragungsweg (Dämpfung sowie Reflexionen und Refraktionen an Schichtgrenzen mit bedeutendem Impedanzkontrast) sowie die lokalen Verhältnisse großen Einfluss (MOLDOVEANU & PANZA 1999). Die letztgenannten lokalen Einflüsse werden als Standorteffekte bezeichnet und durch die inhomogene Beschaffenheit des oberflächennahen geologischen Untergrunds sowie gegebenenfalls durch die topografischen Verhältnisse verursacht (STUDER & KOLLER 1997). Größten Einfluss auf die Verstärkung seismischer Wellen hat die mittlere Scherwellengeschwindigkeit der oberflächennahen Lockersedimente (JOYNER & FUMAL 1985; MAYER-ROSA et al. 1997). Einfluss auf die lokalen Variationen haben auch die hydrogeologischen Verhältnisse durch die Abhängigkeit der Scherwellengeschwindigkeit vom Grad der Wassersättigung, bei Vorkommen von wassergesättigten nicht-kohäsiven Schichten in geringer Tiefe (etwa bis maximal 10 m) aber ganz besonders durch den Vorgang der Bodenisotropisierung (Bodenverflüssigung).

Verglichen mit der räumlichen Ausdehnung des Stadtgebiets (etwa 15 km Durchmesser) ist die Hypozentraldistanz zwischen der Vrancea-Region und der Stadt Bukarest (130–180 km) etwa eine Größenordnung höher, so dass Variationen der Abstrahlcharakteristik und Effekte längs des Wellenweges vernachlässigbar sind (WENZEL et al. 2000). Dies bedeutet, man postuliert, dass das Bewegungsverhalten bei einem Erdbeben unterhalb des Stadtgebiets an der Grenze zwischen Fest- und Lockergestein überall äquivalent ist und unterschiedliche Bodenbewegungen an der Geländeoberfläche nur durch variierende Standorteffekte hervorgerufen werden.

Eine Mikrozonierung dient dazu, die in einem ersten Schritt erfassten lokalen geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Untergrundes anschließend direkt in die zu erwartende Verstärkung oder Abschwächung der Erdbebenerschütterungen umzusetzen. Die Resultate solcher Mikrozonierungsstudien werden in detaillierten standortbezogenen Gefährdungskarten dargestellt und erlauben die gezielte Dimensionierung der Bauwerke hinsichtlich der zu erwartenden Erdbebeneinwirkungen und die Überprüfung bestehender Gebäude auf ihre potentielle Gefährdung bzw. auf mögliche Ertüchtigungsmaßnahmen.

Zur Quantifizierung von Standorteffekten wurden in der Vergangenheit verschiedene Verfahren entwickelt, denen drei unterschiedliche Ansätze zugrunde liegen (MAYER-ROSA et al. 1997; STUDER & KOLLER 1997):

- Existieren für ein Gebiet bereits gute Intensitätskarten, kann empirisch eine Korrelation zwischen Anomalien der seismischen Intensität und den Untergrundeigenschaften hergestellt werden. Im Umkehrschluss kann dann für Gebiete mit ähnlichen geologischen Bedingungen, für die bislang keine Intensitätsaufzeichnungen vorliegen, bei Kenntnis des Untergrundaufbaus die seismische Intensität prognostiziert werden.
- NOGOSHI & IGARASHI (1971) stellten eine Methode vor (die von NAKAMURA (1989) modifiziert wurde), mit der Standorteffekte experimentell bestimmt werden können. Im Untersuchungsgebiet wird hierzu an möglichst vielen Punkten die natürlich – in Form von Mikrobeben – vorkommende und/oder künstlich (als anthropogen erzeugte Erschütterungen) hervorgerufene Bodenunruhe ermittelt. Für jeden Messpunkt wird das spektrale Verhältnis zwischen dem horizontalen und dem vertikalen Fourier-Spektrum gebildet. Die zur maximalen Amplitude gehörende Frequenz entspricht einer Hauptresonanzfrequenz am jeweiligen Standort. Durch Interpolation dieser Frequenzen zwischen den einzelnen Messpunkten gewinnt man eine Isofrequenzkarte (MENEROUD 1999). Diese häufig angewandte Methode (z. B. ANSAL et al. 2001; DUVAL et al. 2001) lässt sich für ein großes Gebiet jedoch nur bedingt anwenden, da ein intensiver instrumenteller und personeller Aufwand zur Gewinnung der Daten von Nöten ist.
- Für Gebiete, bei denen eine hohe Informationsdichte über den Untergrundaufbau vorhanden ist (z. B. durch ein dichtes Netz von Bohrungen), können die Standorteffekte unter Verwendung der wichtigsten Bodenparameter (Mächtigkeit, Lage der Schichtgrenzen, Dichte, Scherwellengeschwindigkeit) numerisch modelliert werden. Die Modellierung erfolgt in der Regel eindimensional. Meist wird hierfür eine äquivalent lineare Methode angewandt (z. B. CID et al. 2001; TEVES-COSTA et al. 2001), in jüngster Zeit werden jedoch zunehmend auch nicht-lineare Aspekte berücksichtigt (LOUKACHEV et al. 2002; CUDMANI et al. 2003).

Das Prinzip einer linearen Analyse des Bewegungsverhaltens an der Erdoberfläche besteht darin, dass man für jeden Punkt eine Transferfunktion als Funktion der Lockergesteinseigenschaften bestimmt, die einem seismischen Inputsignal des Festgesteinsuntergrunds ein zugehöriges Outputsignal an der Oberfläche zuordnet. Man nimmt hierbei an, dass die Eigenschaften des Untergrunds während einer dynamischen Beanspruchung konstant bleiben. Falls geeignete Eingabesignale an der Lockergesteinsbasis nicht direkt gemessen werden können (aufgrund fehlender Messeinrichtungen, z. B. in Folge zu großer Lockergesteinsmächtigkeit), kann man

aus den an der Oberfläche real gemessenen Bodenbewegungen mittels der Transferfunktion die Bewegung an der Lockergesteinsbasis berechnen und als Grundlage für die Ermittlung der Ausgabesignale verwendet. Diese Berechnung eines synthetischen Inputsignals wird als Dekonvolution bezeichnet (KRAMER 1996).

Bei einer nicht-linearen Analyse werden zeitabhängige Änderungen der Untergrundparameter berücksichtigt, die sich bei Erdbeben besonders in wassergesättigten, oberflächennahen Sanden durch Bodenisotropisierung bemerkbar machen können. Eine durch dynamische Belastungen induzierte Kompression führt in den oftmals von gering durchlässigen Sedimenten hydraulisch abgedichteten Sanden zu einem Anstieg des Porenwasserdrucks und somit zu einer Reduktion der effektiven Spannungen und zum Verlust der Scherfestigkeit innerhalb der locker gelagerten, sandigen Ablagerungen (KRAMER 1996; STUDER & KOLLER 1997).

Bei den meisten bisher durchgeführten Mikrozonierungsstudien befindet sich die für die numerische Modellierung wichtige Grenze zwischen Locker- und Festgestein in einer Tiefe von maximal 100–200 m, oftmals deutlich weniger. Die zur Berechung der Transferfunktion notwendigen Parameter aller Lockergesteinsschichten lassen sich hier mit Hilfe der gewichteten Schichtmächtigkeiten ermitteln.

Im Raum Bukarest tritt dagegen durch eine nur allmählich mit der Tiefe zunehmende Verfestigung und Diagenese der abgelagerten Sedimente kein deutlicher Impedanzkontrast zwischen Locker- und Festgestein auf. Erschwerend tritt hinzu, dass von den ältesten quartären sowie den gesamten tertiären Formationen keine geotechnischen Daten zur Berechnung vorliegen.

Weiterhin befinden sich in Oberflächennähe zwei sandreiche geologische Einheiten, die potentiell anfällig für Verflüssigungsprozesse sind: Mostistea-Sandbank sowie Colentina-Kieskomplex. Ein erhöhtes Gefährdungspotential weisen Bereiche mit geringem Grundwasserflurabstand, wie beispielsweise die Flussauen der beiden Flüsse Colentina und Dimbovita, auf.

Für die Stadt Bukarest wurden in den letzten 50 Jahren mehrere Ansätze zur Mikrozonierung unternommen. Die verschiedenen Ansätze von Ghica (1953), CIOCÂRDEL et al. (1964) und MÂNDRESCU (1972) weisen eine signifikante Diskrepanz zwischen den prognostizierten seismischen Intensitäten und den nach dem Starkbeben 1977 beobachteten Schäden auf (MÂNDRESCU & RADULIAN 1999; MOLDOVEANU et al. 2004). Nach diesem Erdbeben wurde eine Mikrozonierungskarte erstellt, bei der die anhand der beobachteten Intensitäten abgeschätzten maximalen Bodenbeschleunigungen dargestellt wurden. Da der Zerstörungsgrad der Bauwerke jedoch auch durch den Gebäudetyp und das Alter der Bausubstanz beeinflusst wird, ist die Aussagekraft dieser Mikrozonierung etwas fraglich (MÂNDRESCU & RADULIAN 1999).

Die in jüngster Zeit durchgeführten zweidimensionalen hybriden Modellierungen zur Mikrozonierung bestehend aus einer Kombination von Modalsummation- und Finite-Differenzen-Technik (MOLDOVEANU et al. 2000; MOLDOVEANU & PANZA 2001; CIOFLAN et al. 2004), basieren auf ein bis drei geologischen Profilschnitten mit geraden, leicht geneigten Schichtgrenzen. Aufgrund des stark vereinfachten geologischen Untergrunds ist die Auflösung dieser Modellierungen sehr gering und somit für die Ausweisung von „Mikro"-zonen nicht geeignet.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Das Hauptziel dieses Teilprojekts bestand darin, die bei Vrancea-Starkbeben auftretenden Standorteffekte für das Stadtgebiet Bukarests durch numerische Berechnungen zu bestimmen. Grundlage hierfür war das in den vorangegangenen Förderphasen erstellte, auf über 1400 Erkundungsbohrungen basierende dreidimensionale geologische Modell der im Stadtgebiet ausgebildeten quartären Schichten.

In dieser letzten Phase wurden zuerst alle Laborergebnisse früherer geotechnischer Versuche, die im Zusammenhang mit der Durchführung der Erkundungsbohrungen überwiegend von der S. C. Metroul S. A. bestimmt wurden, ausgewertet und den jeweiligen quartären Schichten zugeordnet. Darüber hinaus wurden an 10 ausgewählten Standorten im Stadtgebiet Bukarests für die oberflächennahen Schichten die Scherwellengeschwindigkeit und andere charakteristische geotechnische Kennwerte durch In-situ-Messungen bestimmt.

Auf Grundlage dieser geologischen und geotechnischen Informationen wurden nicht-lineare numerische Berechnungen für das Stadtzentrum Bukarests durchgeführt. Hierfür wurde eine auf dem visko-hypoplastischen Stoffgesetz basierende Software verwendet. Untersucht wurde hierbei auch besonders, welchen Einfluss der Grundwasserspiegel bzw. Grundwasserspiegelschwankungen auf die Standorteffekte aufweist. Hierzu wurde sowohl auf das geologische als auch auf das hydrogeologische Modell von Bukarest zurückgegriffen.

Die numerischen Berechnungen wurden für ein regelmäßiges Punktraster durchgeführt. Die Auslesung der in die Berechnungen einfließenden Daten und die weitere Bearbeitung der Berechnungsergebnisse erfolgte mit ArcGIS.

Messungen zur Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit und weiterer geotechnischer Parameter

In enger Zusammenarbeit mit den Teilprojekten B7 und B4 wurden im August 2005 an 10 Standorten in Bukarest In-situ-Messungen hauptsächlich zur Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit im oberflächennahen Bereich bis in 35 m Tiefe durchgeführt. Die Lage der Messpunkte (siehe Abb. 1) wurde so gewählt, dass die Messpunkte (1) ein möglichst breites geologisches und hydrogeologisches Spektrum abgedeckt wird (d. h. Messpunkte sowohl in den Flussauen von Colentina und Dimbovita als auch auf den angrenzenden Terassenflächen), (2) (fast) alle Standorte mit VSP-Messungen aus der vorherigen Projektphase abgedeckt werden und (3) logistisch ohne unvertretbar großen Aufwand erreichbar sind.

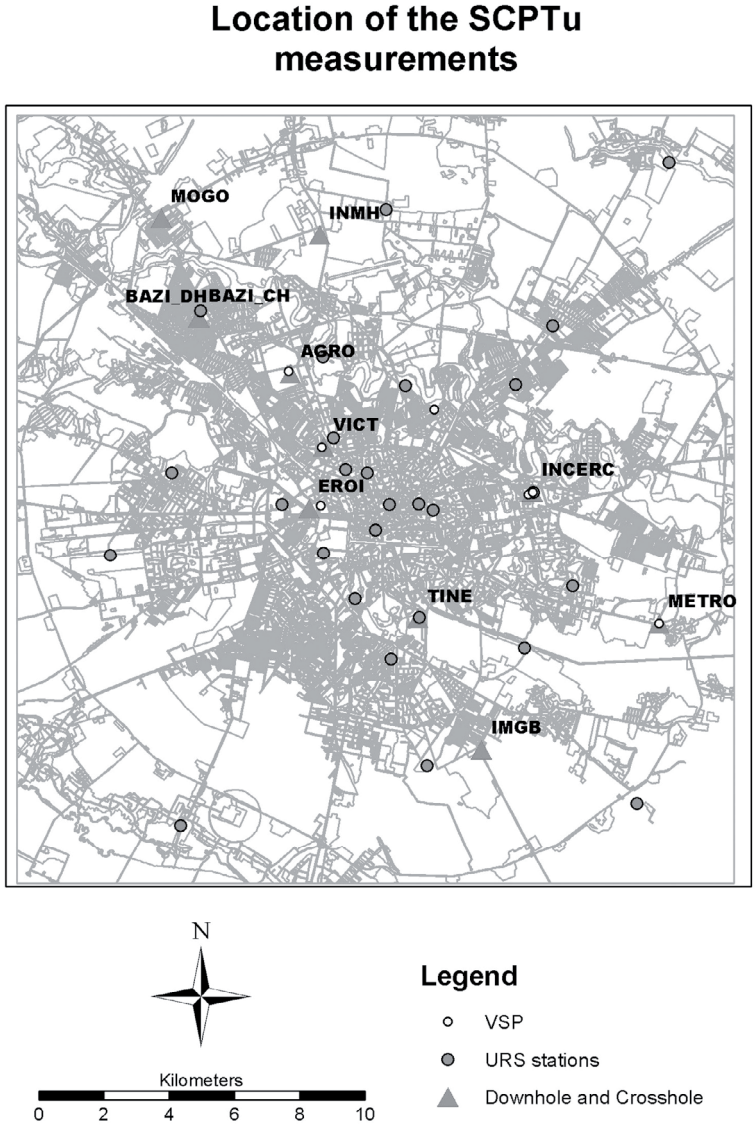


Abbildung 1: Lage der im August 2005 in Bukarest durchgeführten Down- und Crosshole-Messungen.

An allen 10 Standorten wurden Downhole-Messungen in 1–2 m-Intervallen bis in etwa 25–30 m Tiefe durchgeführt. Zur Messung wurde eine seismische Drucksondierung eingesetzt. Hierbei wurde eine kombinierte Seismik- und Porenwasserdrucksonde eingesetzt, die – neben der Bestimmung von Mantelreibung und Spitzenwiderstand – zusätzlich eine kontinuierliche Bestimmung des Porenwasserdrucks und somit eine genaue Bestimmung der Lithologie ermöglichte.

Ergänzt wurden diese Messungen durch Crosshole- sowie durch Refraktionsseismik-Messungen an den beiden Standorten Tineretului („Tine“, vgl. Abbildung 1; in der Dimbovita-Aue gelegen) und Agronomia („Agro“, vgl. Abbildung 1, auf der Zwischenterrasse (Zwischenplateau) gelegen).

Eine detaillierte Beschreibung der Messungen sowie der gewonnenen Ergebnisse befindet sich im Bericht des Teilprojekt B7.

Verknüpfung des geologischen mit dem hydrogeologischem Modell zur Erstellung eines prognosefähigen Grundwasserströmungsmodells

In der zu Ende gegangenen Projektphase wurde das geologische Modell von Bukarest durch weitere Bohrungen ergänzt. Hierdurch konnte die stratigrafische Zuordnung einzelner Schichtglieder in den benachbarten Bohrungen weiter verfeinert werden. Zum Ausbau des hydrogeologischen Modells im Teilprojekt B7 und zur Erarbeitung eines Grundwasserströmungsmodells mit FEFLOW wurden alle relevanten hydrogeologischen Daten – Verbreitung, Mächtigkeit und Raumhöhe der drei Hauptgrundwasserleiter (Colentina-, Mostistea- und Fratesti-Grundwasserleiter) und –nichtleiter – aus dem geologischen Modell mit ArcGIS ausgelesen. Dies erfolgte in einem ersten Schritt punktuell für die 217 Piezometerstandorte und anschließend auch für den gesamten Raum Bukarest auf Basis von Rasterdaten mit 10 m Kantenlänge.

Auf dieser Datengrundlage wurde im Teilprojekt B7 ein Grundwasserströmungsmodell für den Colentina-Grundwasserleiter erarbeitet, das es erlaubt, saisonale und langfristige Grundwasserspiegelschwankungen aber auch extreme Niederschlagsereignisse zu berücksichtigen (siehe Bericht von Teilprojekt B7). Mit diesem Grundwasserströmungsmodell wurden verschiedene Szenarien mit unterschiedlichsten Grundwasserständen (Grundwasserhochstand im Sommer, Grundwasserniedrigstand im Winter) errechnet und diese Informationen als Rasterdaten (Rastergröße 10 m * 10 m) wieder in ArcGIS übertragen und als Information abgespeichert.

Nicht-lineare Modellierungen

Bevor mit den nicht-linearen Modellierungen begonnen wurde, wurden zuerst alle bereits vorhandenen Daten aus früheren geotechnischen Laborversuchen, die im Zusammenhang mit der Durchführung geotechnischer Erkundungsbohrungen in Bukarest bestimmt wurden, zusammengetragen, ausgewertet und den jeweiligen quartären Schichten zugeordnet. Insgesamt konnten so Daten von etwa 4250 Laborversuchen, die an mehr als 2300 Proben von über 100 Standorten durchgeführt wurden, berücksichtigt werden.

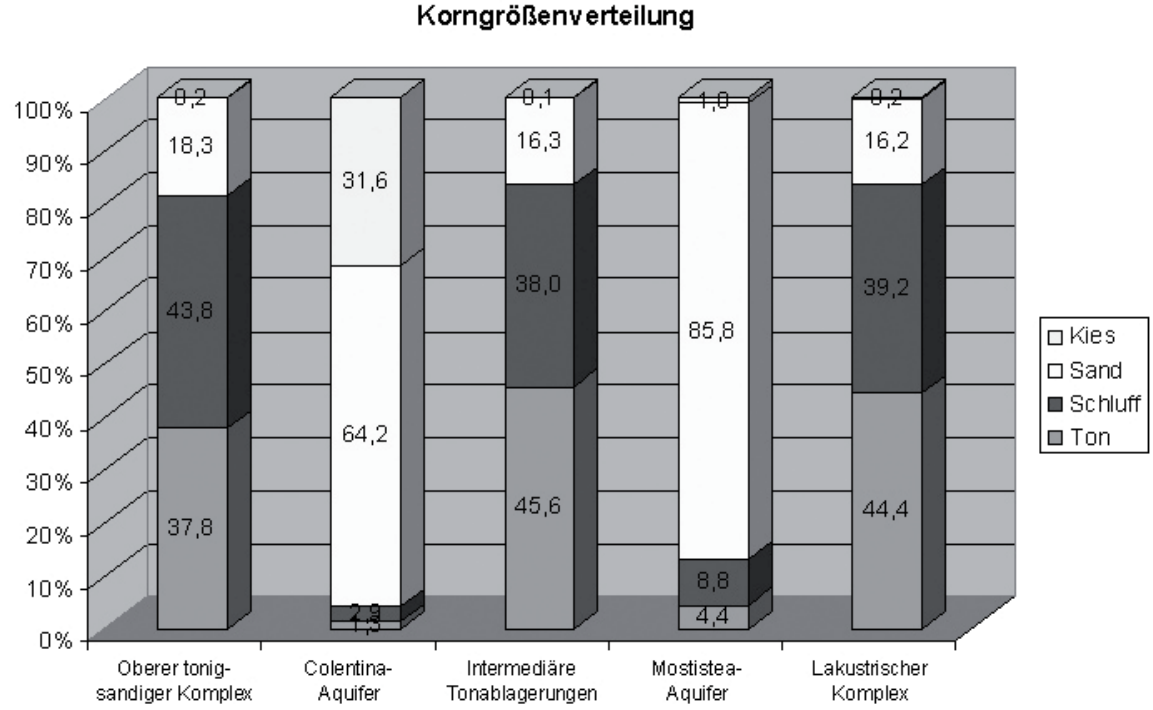


Abbildung 2: Korngrößenverteilung der obersten 5 in Bukarest vorkommenden quartären Schichten.

Tabelle 1: Mittlere Teufe, mittlerer Korndurchmesser (d_{50}) und Ungleichförmigkeitszahl (C_u) der obersten 5 in Bukarest vorkommenden quartären Schichten.

	Mittlere Teufe [m]	**d_{50} [mm]**	**$C_u = d_{60} / d_{10}$ [-]**	**Porenzahl [-]**	**S_r [-]**
Oberer tonig-sandiger Komplex	4,9	0,020	11,8	0,63	0,91
Colentina-Aquifer	8,4	2,227	15,7	0,67	0,64
Intermediäre Tonablagerungen	18,6	0,017	10,3	0,65	0,95
Mostistea-Aquifer	29,1	0,313	10,9	0,72	0,95
Lakustrischer Komplex	45,9	0,017	10,2	0,63	0,96

Abbildung 2 und Tabelle 1 zeigen wichtige Ergebnisse zur Charakterisierung der Korngrößenverteilung der obersten 5 in Bukarest vorkommenden Schichten. Deutlich erkennbar ist die Wechsellagerung von fein- und grobkörnigen Schichten (vgl. Abbildung 2). Die beiden obersten Grundwasserleiter – Colentina- (deutlich ungleichförmiges Sand-Kies-Gemisch) und Mostistea-Aquifer (ungleichförmiger Sand) – sind über- und unterlagert von feinkörnigen Ton-Schluff-Gemischen.

Weitere, für die nicht-linearen Berechnungen der Bodenantwort erforderlichen Parameter wie Sättigungszahl, Reibungswinkel und Durchlässigkeit sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2: Sättigungszahl (S_r), Korndichte, Reibungswinkel und Durchlässigkeit der obersten 5 in Bukarest vorkommenden quartären Schichten [n. b. = nicht bestimmt].

	S_r [-]	**Korndichte [g/cm³]**	**Reibungs-winkel [°]**	**Durchlässigkeit [m/s]**
Oberer tonig-sandiger Komplex	0,91	2,73	20,4	$7{,}7 * 10^{-6}$
Colentina-Aquifer	0,64	2,71	28,0	$1{,}5 * 10^{-3}$
Intermediäre Tonablagerungen	0,95	2,74	19,0	n. b.
Mostistea-Aquifer	0,95	n. b.	27,2	$3{,}7 * 10^{-4}$
Lakustrischer Komplex	0,96	2,75	20,8	$1{,}7 * 10^{-8}$

Nachdem die grundlegenden Vorarbeiten zur Bestimmung der Scherwellengeschwindigkeit und weiterer charakteristischer Parameter beendet waren, konnte mit den nicht-linearen Modellierungen begonnen werden. Zur Anwendung kam hierfür das von Teilprojekt B4 entwickelte numerische Programm dyn24s entwickelt von Osinov (2003a und 2003b) zur Analyse seismisch induzierter Untergrundbewegungen, das auf einem eindimensionalen Randwertproblem für horizontal geschichteten Untergrund basiert und die Berechnung dynamischer Kennwerte (Dislokation, Geschwindigkeit, Beschleunigung) sowie der effektiven Spannung in Abhängigkeit von der Tiefe und der seit Beginn der Bewegung vergangenen Zeit ermöglicht. Zu Grunde liegt diesem numerischen Modell das (visko-)hypoplastische Stoffgesetz.

Hypoplastisches und visko-hypoplastisches Stoffgesetz erfordern 8 bzw. 7 grundlegende Parameter und 5 weitere Parameter, die das zyklische Verhalten beschreiben. Die meisten dieser erforderlichen geologischen und geotechnischen Parameter und Zustandsgrößen (wie Schichtmächtigkeit, Porenzahl, Permeabilität, natürlicher Reibungswinkel) konnten aus den selbst bestimmten Ergebnissen und den zusammengetragenen Daten übernommen werden. Andere Parameter ließen sich jedoch nur aus den granulometrischen Eigenschaften der quartären Schichten nach HERLE & GUDEHUS (1999) ableiten. Genauere Parameter werden jedoch in wenigen Monaten aus einem deutsch-rumänischen Science for Peace Projekt der NATO zur Verfügung stehen.

Die für die nicht-linearen Berechnungen verwendeten (visko-)hypoplastischen und intergranularen Parameter der oberen 5 quartären Schichten sind in Tabelle 3, Tabelle 4 und Tabelle 5 dargestellt.

Für die Modellierung wurde im Innenstadtbereich ein Punktraster mit 300 m Kantenlänge festgelegt, für das die eindimensionale nicht-lineare Modellierung erfolgte. Für diese Punkte wurden die geologischen, geotechnischen und hydrogeologischen Parameter aus dem digitalen Untergrundmodell ausgelesen.

Die Berechnung des dynamischen Verhaltens erfolgte für Zeitreihen einer horizontalen Bewegung an der Basis des Modells (Basis des Lakustrischen Komplexes). Da für diese Tiefe keine Erdbebenregistrierungen vorliegen, wurden für die Modellierung synthetische Signale zu Grunde gelegt. Hierfür wurden verschiedene von Teilprojekt B3 generierte Zeitreihen von mittelstarken bis starken Vrancea-Erdbeben der Momentmagnitude 6, 7 und 8 verwendet.

Tabelle 3: Verwendete viskohypoplastische Parameter: e_{100} = Referenzporenzahl bei 100 kPa, λ = Koeffizient der Belastung, K = Koeffizient der Entlastung, β_r = Anpassungsparameter, I_v = Plastizitätsindex, D_r = Referenzverformungsrate und Φ_c = kritischer Reibungswinkel.

	e_{100} [-]	λ [-]	K [-]	β_r [-]	I_v [-]	D_r [-]	Φ_c [°]
Oberer tonig-sandiger Komplex	0,77	0,07	0,03	0,95	0,030	$1 * 10^{-7}$	20,4
Intermediäre Tonablagerungen	0,70	0,03	0,017	0,95	0,033	$1 * 10^{-7}$	19,0
Lakustrischer Komplex	0,70	0,03	0,017	0,95	0,033	$1 * 10^{-7}$	20,8

Tabelle 4: Verwendete hypoplastische Parameter: h_S = Granulathärte, n = Exponent, e_{d0} = Porenzahl bei dichtester Lagerung, e_{c0} = Porenzahl im kritischen Zustand, e_{i0} = Porenzahl bei lockerster isotroper Lagerung, α = Exponent, der den Einfluss der Dichte auf den Peakreibungswinkel bestimmt, β = Exponent, der den Druckeinfluss beschreibt und Φ_c = kritischer Reibungswinkel.

	h_s [MPa]	n [-]	e_{d0} [-]	e_{c0} [-]	e_{i0} [-]	α [-]	β [-]	Φ_c [°]
Colentina-Aquifer	2600	0,20	0,52	0,93	1,07	0,17	1,0	35,1
Mostistea-Aquifer	1600	0,19	0,56	0,97	1,12	0,25	1,0	34,9

Tabelle 5: Verwendete intergranulare Verformungsparameter: m_T = skalarer Multiplikator, m_R = skalarer Multiplikator, R_{max} = elastischer Bereich der Verformung, β_x = Exponent für den intergranularen Verformungstensor und χ = Exponent für den intergranularen Verformungstensor.

	m_T [-]	m_R [-]	R_{max} [-]	β_x [-]	χ [-]
Oberer tonig-sandiger Komplex	2,0	5,0	$1 * 10^{-4}$	0,03	10
Colentina-Aquifer	5,0	5,0	$1 * 10^{-4}$	0,05	1
Intermediäre Tonablagerungen	2,0	5,0	$1 * 10^{-4}$	0,03	3
Mostistea-Aquifer	2,0	5,0	$1 * 10^{-4}$	0,05	1
Lakustrischer Komplex	2,0	5,0	$1 * 10^{-4}$	0,03	3

Die Ausgabe des Programms dyn24s besteht aus Geschwindigkeits-Zeitreihen der drei Raumkomponenten an der Erdoberfläche aber auch in beliebig wählbaren Tiefen. Durch Ableitung nach der Zeit wurden hieraus die Beschleunigungs-Zeitreihen und hieraus wiederum das Spektrum berechnet. Somit lassen sich die für eine ingenieurtechnische Charakterisierung der Bodenbewegung wichtigen Kennwerte wie horizontale Spitzenbodenbeschleunigung (PGA), dominante Periode (bzw. dominante Frequenz) und spektrale Beschleunigung für unterschiedliche Perioden bzw. Frequenzen ermitteln.

Für jeden Rasterpunkt wurden mehrere Modellierungen durchgeführt. Bestimmt wurden relevante Kennwerte des dynamischen Verhaltens an der Erdoberfläche wie z. B. maximale Beschleunigung, maximale Amplitude und die dazugehörige dominante Periode der Bewegung an der Oberfläche (jeweils für horizontale als auch vertikale Komponenten). Die Resultate der Modellierung aller Punkte wurden anschließend in das GIS übertragen. Durch Interpolation der für die einzelnen Punkte vorliegenden Ergebnisse ließen sich verschiedene thematische Karten erstellen.

Für die folgende Beschreibung der Modellierungsergebnisse wurde ein Vrancea-Erdbeben der Momentmagnitude 8 ausgewählt. Dies entspricht dem stärksten Erdbeben, das in Rumänien auftreten kann.

In Abbildung 3 ist die horizontale Spitzenbeschleunigung für den Innenstadtbereich von Bukarest dargestellt. Deutlich erkennbar sind die beträchtlichen Unterschiede auf kleinem Raum. Besonders große Beschleunigungswerte (das Maximum beträgt 8,3 m/s²) treten in einem kleineren begrenzten Raum im Süden des SFB-Testgebiets im Bereich der Universität Bukarest aber auch am östlichen Rand des Untersuchungsgebiets auf. Vergleichsweise geringe Spitzenbeschleunigungen (das Minimum beträgt 3,5 m/s²) dominieren jedoch den zentralen, nördlichen und westlichen Teil des Untersuchungsgebiets.

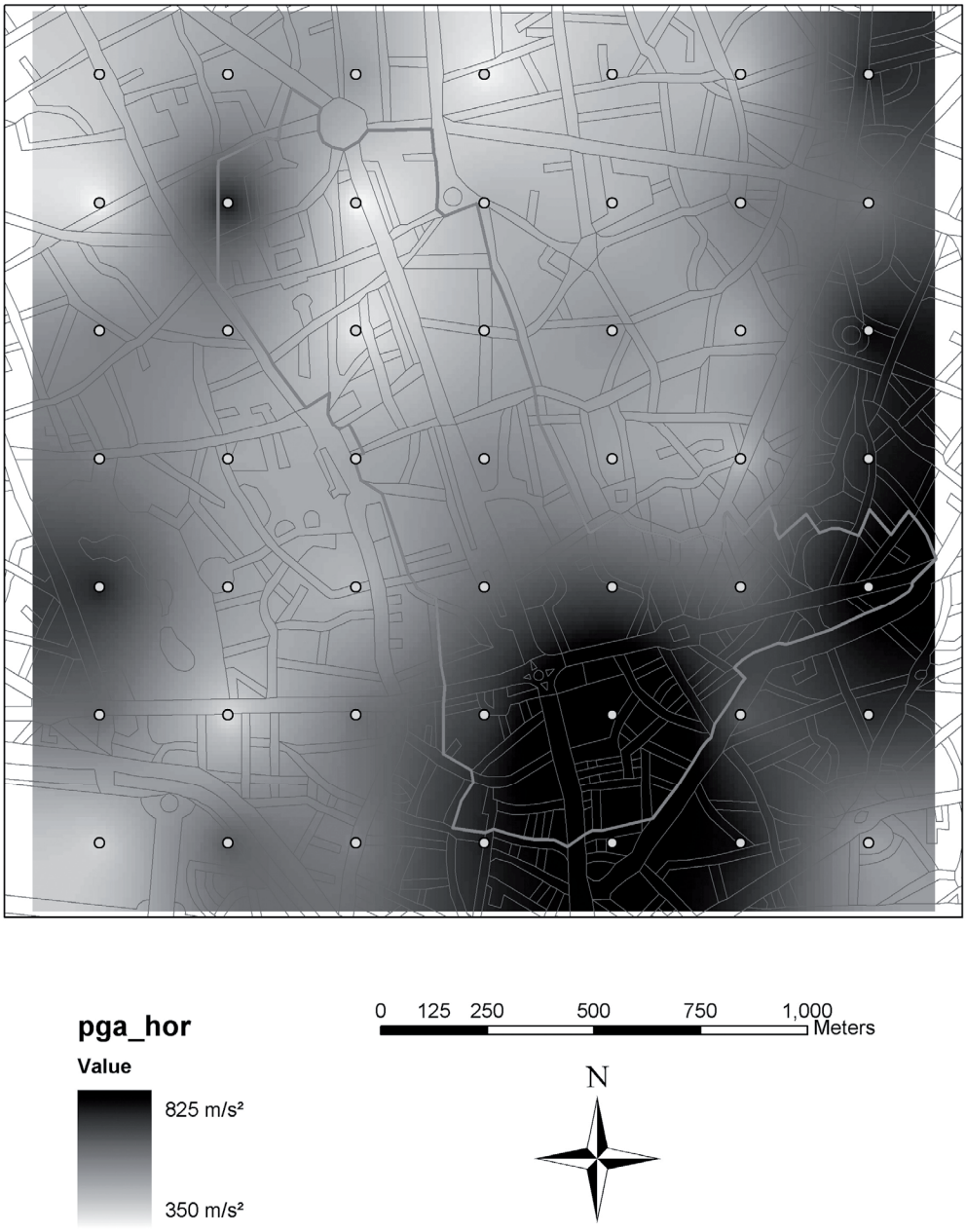


Abbildung 3: Horizontale Spitzenbeschleunigung (PGA) für den Innenstadtbereich von Bukarest für ein Vrancea-Erdbeben der Momentmagnitude 8. Dargestellt sind auch die Rasterpunkte, für die die Modellierung durchgeführt wurde, sowie das SFB-Testgebiet.

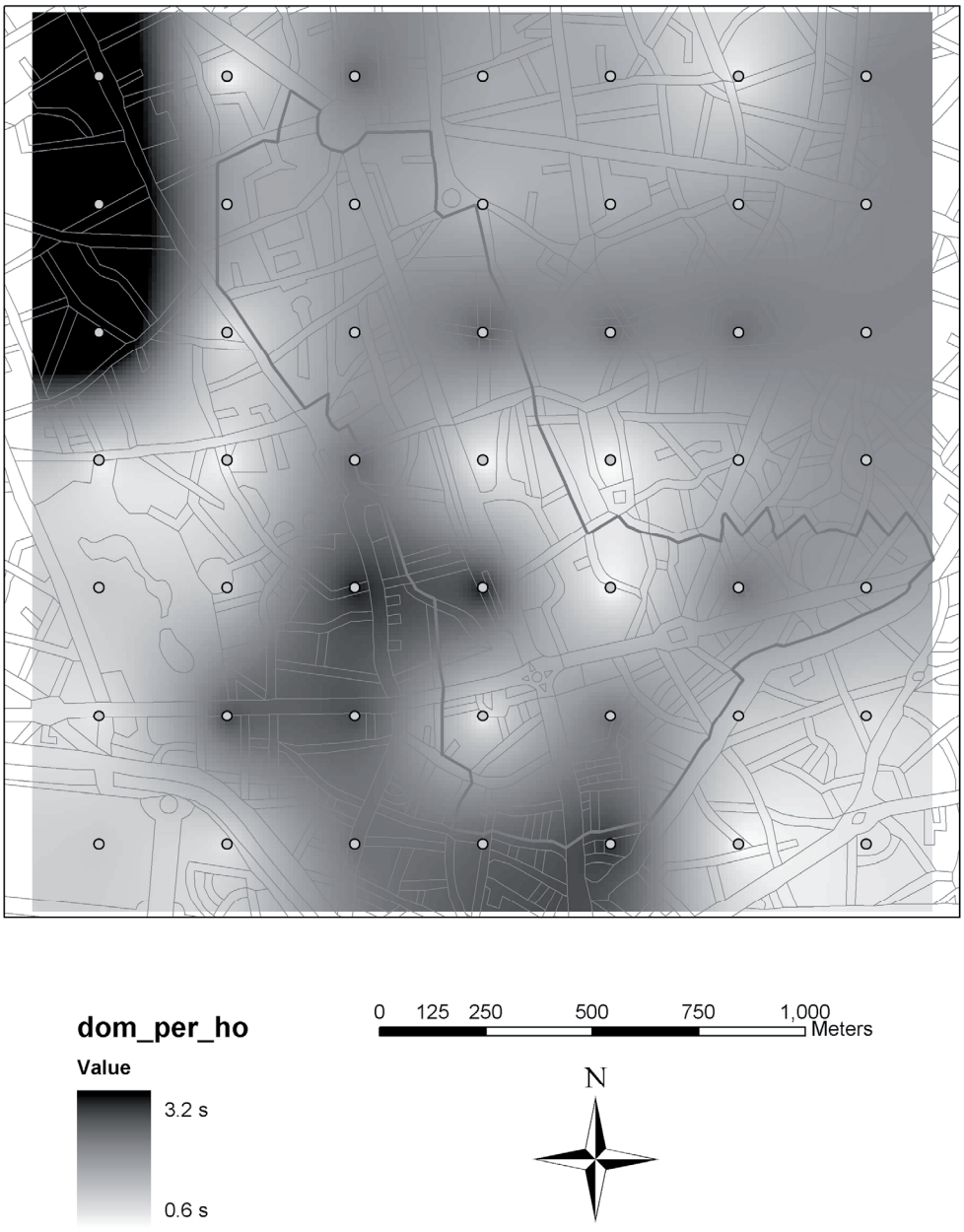


Abbildung 4: Dominante Periode (horizontal) für den Innenstadtbereich von Bukarest für ein Vrancea-Erdbeben der Momentmagnitude 8. Dargestellt sind auch die Rasterpunkte, für die die Modellierung durchgeführt wurde, sowie das SFB-Testgebiet.

Das Auftreten der großen Beschleunigungswerte korreliert gut mit der Mächtigkeit des Mostistea-Sand-Grundwasserleiters (Schicht 4). Dort, wo diese Schicht eine geringe Mächtigkeit aufweist treten die höchsten Beschleunigungen auf und umgekehrt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass es bei einer starken Basisanregung in dem wassergesättigten und gespannten Mostistea-Grundwasserleiter zu einem Porenwasserdruck-Aufbau und zu einer Reduktion der effektiven Spannungen kommt. Bei größerer Mächtigkeit des Mostistea-

Grundwasserleiters verhindert diese kurzfristige Verflüssigung eine weitere Ausbreitung der Scherwellen und schirmt somit die darüber liegenden Schichten ab. Dieser Effekt ist auch beschrieben in den Proceedings zum Internationalen Abschlusssymposium in Bukarest (EHRET et al. 2007). Die beiden dort exemplarisch ausgewählten und beschriebenen Standorte (Piata Victoria und Agronomia) unterscheiden sich vor allem in der Mächtigkeit des Mostistea-Grundwasserleiters. An der Piata Victoria, wo dieser Grundwasserleiter sehr geringmächtig ausgeprägt ist, ist die Beschleunigung deutlich höher als am Standort Agronomia.

Neben der horizontalen Spitzenbeschleunigung ist vor allem auch die dominante Periode (d. h. der Spektralbereich mit den größten Beschleunigungen) von großem Interesse. Stimmt die dominante Periode mit der Eigenperiode der Gebäude überein, kann es zur Resonanzeffekten kommen. In Abbildung 4 ist die dominante Periode (der horizontalen Komponenten) für den Innenstadtbereich von Bukarest dargestellt. Auch hier fallen deutliche Unterschiede (bis zum Faktor 5) auf kleinem Raum auf.

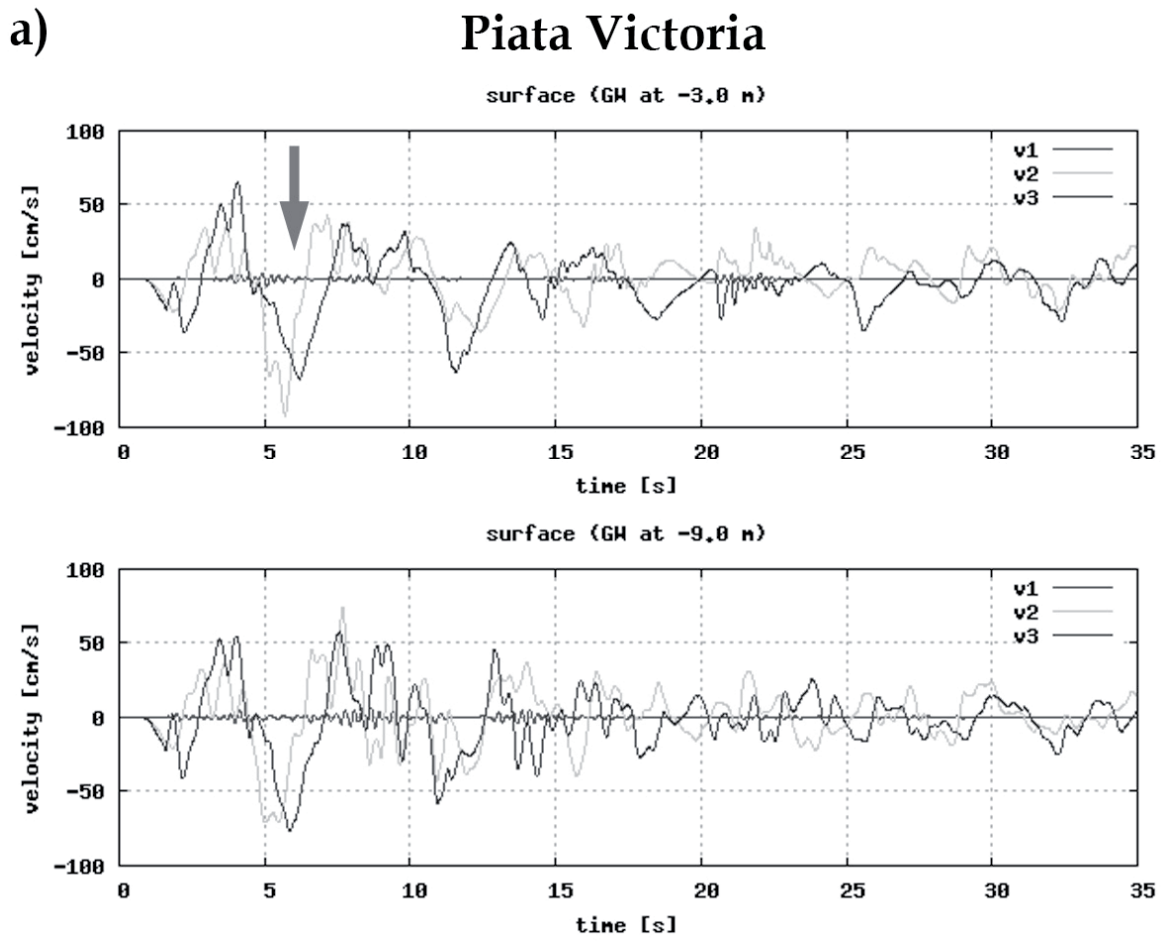


Abbildung 5: Bodenantwort (Geschwindigkeits-Zeitverlauf) am Standort Piata Victoria für ein synthetisches Vrancea-Erdbeben der Momentmagnitude 8 bei geringem bzw. großem Grundwasserflurabstand (3 m unter GOK (oben) bzw. 9 m unter GOK (unten)).

Die dominante Periode schwankt zwischen 0,6 s und 3,2 s. Große dominante Perioden treten vor allem im Nordwesten, aber auch im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets auf. Hier sind vor allem Hochhäuser (Gebäude mit mehr als 10 Stockwerken) betroffen. Im übrigen Untersuchungsgebiet dominieren Werte zwischen 0,6 s und 1,5 s, so dass hier besonders mittelhohe Gebäude mit 5 bis etwa 12 Stockwerken stärker gefährdet sind.

Der Einfluss des Grundwasserstands (im Colentina-Grundwasserleiter) auf die Ausbreitung von seismischen Wellen wurde in Zusammenarbeit mit Teilprojekt B7 ebenfalls gründlich untersucht. Abbildung 5 zeigt die Bodenantwort am Standort Piata Victoria für ein Vrancea-Starkbeben der Momentmagnitude 8 sowohl bei geringem als auch bei großem Grundwasserflurabstand. Deutlich erkennbar ist, dass bei geringem Grundwasserflurabstand, d. h. bei kompletter Wasserfüllung des Grundwasserleiters, ab etwa 6 Sekunden nach Beginn eine Dämpfung der Erdbebenwellen durch eine Bodenisotropisierung auftritt während bei großem Grundwasserflurabstand keine Bodenisotropisierung und somit auch keine Abschirmung der Erdbebenwellen auftritt. Weitere Details können den Proceedings zum Internationalen Abschlusssymposium in Bukarest (EHRET et al. 2007) entnommen werden.

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Die im Teilprojekt B6 durchführten Forschungsarbeiten und deren Ergebnisse wurden in der zu Ende gegangenen Förderperiode auf mehreren Fachtagungen, -konferenzen und –symposien dem Fachpublikum präsentiert. Besondere Aufmerksamkeit erzielten die Ergebnisse der nicht-linearen Modellierungen mit unterschiedlichen Grundwasserständen. Dies wurde international bislang noch sehr wenig beachtet und kann auch durch andere Methoden zur Mikrozonierung (z. B. geophysikalische Messungen) nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Weltweit gibt es viele Untersuchungen zur Mikrozonierung von gefährdeten (Groß-) Städten. Hierbei wurden bislang jedoch überwiegend geophysikalische Messungen, beispielsweise zur Bestimmung des Microtremors und anschließender H-/V-Berechnung, durchgeführt (mit den oben beschriebenen Nachteilen). Weiterhin weit verbreitet sind eindimensionale linear-elastische numerische Modellierungen. Diese weisen jedoch das Problem auf, dass sie nicht-lineare Effekte (wie z. B. auch das Auftreten von Bodenisotropisierungen) nicht geeignet modellieren können.

Die im Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs durchgeführten Arbeiten nehmen deshalb eine Sonderstellung ein und bilden die Basis für weitere Mikrozonierungsstudien durch nicht-lineare Modellierungen.

5.2.1.4 Offene Fragen

Die wesentlichen zu Beginn der letzten Förderperiode noch offenen Fragen konnten im Laufe der letzten 3 Jahre zufrieden stellend beantwortet werden. Allerdings ergaben sich Verzögerungen im Ablauf, da einige für die nicht-lineare Modellierung erforderlichen Parameter aufgrund von Kapazitätsengpässen im Bodendynamik-Labor erst im Laufe des Jahres 2007 bestimmt werden konnten. Deshalb wurde der Einfluss der Grundwasserstandsänderungen auch bislang nur exemplarisch und noch nicht flächendeckend für verschiedene Erdbebenmagnituden durchgeführt. Die gewählte Methode wurde hierfür jedoch als sehr geeignet angesehen, so dass weitere, vertiefendere Berechnungen nun jederzeit auf der vorhandenen Datenbasis durchgeführt werden können.

Aus Zeitmangel wurde darüber hinaus auch beschlossen, auf den Einsatz Neuronaler Netze zur Bestimmung der Standorteffekte zu verzichten um stattdessen mehr Zeit für die nicht-linearen Modellierungen zu haben. Dennoch wird diese Methode weiterhin als sehr viel versprechend angesehen. Sie kann im Anschluss im Rahmen einer eigenständigen Doktorarbeit angewandt und mit den bisherigen Ergebnissen verglichen werden.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt B6 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Ansal, A. M., R. Iyisan, H. Güllü (2001): Microtremor Measurements for the Microzonation of Dinar. Pure appl. geophys., Bd. 158 (12): 2525 – 2541, Basel.

Cid, J., T. Susagna, X. Goula, L. Chavarria, S. Figueras, J. Fleta, A. Casas, A. Roca (2001): Seismic Zonation of Barcelona Based on Numerical Simulation of Site Effects. Pure appl. geophys., Bd. 158 (12): 2559 – 2577, Basel.

Ciocârdel, R., E. Ţiţaru, A. Cişmigiu (1964): Seismische Mikrozonierung der Stadt Bukarest. Arh. IGP, Bukarest [auf Rumänisch].

Cioflan, C. O., B. F. Apostol, C. L. Moldoveanu, G. F. Panza, Gh. Marmureanu (2004): Deterministic Approach for the Seismic Microzonation of Bucharest. Pure appl. Geophys., Bd. 161 (5 – 6): 1149 – 1164, Basel.

Ciugudean, V., G. Martinof (2000): Conditii geologice, geomorfologice si hidrogeologice soecifice arealului Municipiului Bucuresti. Interner Bericht, S. C. METROUL S. A., Bukarest.

Cudmani, R. O., V. A. Osinov, M. M. Bühler, G. Gudehus (2003): A model for the evaluation of liquefaction susceptibility in layered soils due to earthquakes. The 12th Panamerican Conference on SMGE, Cambridge.

Duval, A.-M., S. Vidal, J.-P. Méneroud, A. Singer, F. de Santis, C. Ramos, G. Romero, R. Rodriguez, A. Pernia, N. Reyes, C. Griman (2001): Caracas, Venezuela, Site Effect Determination with Microtremors. Pure appl. geophys., Bd. 158 (12): 2513 – 2523, Basel.

Ghica, Şt. (1953): Geologische Mikrozonierung von Bukarest. Arh. Dep. Geol., MMPG, Bukarest [auf Rumänisch].

Herle, I. & G. Gudehus (1999): Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. Mechanics of cohesive-frictional materials, Bd. 4: 461 – 486.

Joyner, W. B., T. E. Fumal (1985): Predictive mapping of earthquake ground motion. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1360: 203 – 220.

Kramer, S. L. (1996): Geotechnical Earthquake Engineering. 652 S., Upper Saddle River.

Liteanu, G. (1951): Geologie der Stadt Bukarest. Technische Untersuchungen, Serie E, Hydrogeologie Nr. 1 [auf Rumänisch].

Loukachev, I., N. Pralle, G. Gudehus (2002): Dilatancy induced P-waves as evidence for non-linear soil behaviour. Bull. of the Seismological Soc. of America, Bd. 92 (2): 854 – 862.

Lungu, D., A. Aldea, T. Moldoveanu, V. Ciugudean, M. Stefanica (1999): Near-Surface geology and dynamical properties of soil layers in Bucharest. In: Wenzel, F., D. Lungu, O. Novak (Hrsg.): Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, S. 137 – 148, Dordrecht.

Mândrescu, N. (1972): Experimental researches on seismic microzoning. St. Cerc. Geol. Geogr. Geofiz., Geofiz., Bd. 10 (1): 103 – 116, Bukarest [auf Rumänisch].

Mândrescu, N. (1973): Microzonation of a populated area by analysis of seismic damage and instrumental data. Revue Roum. Géol., Géophys. et Géogr., Bd. 17 (1): 93 – 102, Bukarest.

Mândrescu, N., M. Radulian (1999): Seismic Microzoning of Bucharest (Romania): A critical review. – In: Wenzel, F., D. Lungu, O. Novak (Hrsg.): Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, S. 109 – 122, Dordrecht.

Mayer-Rosa, D., E. Rüttener, D. Fäh, C. Schindler, Ch. Beer, J.-J. Wagner, C. Frischknecht (1997): Erdbebengefährdung und Mikrozonierung in der Schweiz: Beitrag zur Erforschung des Erdbebenrisikos in Abhängigkeit vom geologischen Untergrund. Schlussbericht NFP 31, 91 S., Zürich.

Meneroud, J.-P. (1999): Seismic Microzonation of Site effects. In: Wenzel, F., D. Lungu, O. Novak (Hrsg.): Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, S. 77 – 84, Dordrecht.

Moldoveanu, C. L., G. F. Panza (1999): Modelling, for microzonation purposes, of the seismic ground motion in Bucharest, due to the Vrancea earthquake of May, 30,1990. In: Wenzel, F., D. Lungu, O. Novak (Hrsg.): Vrancea Earthquakes: Tectonics, Hazard and Risk Mitigation, S. 85 – 97; Dordrecht.

Moldoveanu, C. L., Gh. Marmureanu, G. F. Panza, F. Vaccari (2000): Estimation of Site Effects in Bucharest Caused by the May 30-31, 1990, Vrancea Seismic Events. Pure appl. Geophys., Bd. 157 (1): 249 – 267, Basel.

Moldoveanu, C. L., G. F. Panza (2001): Vrancea Source Influence on Local Seismic Response in Bucharest. Pure appl. Geophys., Bd. 158 (12), 2407 – 2429, Basel.

Moldoveanu, C. L., M. Radulian, Gh. Marmureanu, G. F. Panza (2004): Microzonation of Bucharest: State-of-the-Art. Pure appl. Geophys., Bd. 161 (5-6): 1125 – 1147, Basel.

Nakamura, Y. (1989): A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface Using Microtremors on the Ground Surface. Quart. Rep. Railway Tech. Res. Inst., Bd. 30 (1): 25 – 33.

Nogoshi, M., T. Igarashi (1971): On the Amplitude Characteristics of Microtremor (Part 2). J. Seismol. Soc. Japan, Bd. 24: 26 – 40.

Osinov, V. (2003a): Cyclic shearing and liquefaction of soil under irregular lading: an incremental model for the dynamic earthquake-induced deformation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Bd. 23: 535 – 548.

Osinov, V. (2003b): A numerical model for the site response analysis and liquefaction of soil during earthquakes. Geomechanical Measurement and Modelling, S. 475 – 481.

Studer, J. A., M. G. Koller (1997): Bodendynamik – Grundlagen, Kennziffern, Probleme. 262 S., Berlin.

Teves-Costa, P., I. M. Almeida, P. L. Silva (2001): Microzonation of Lisbon: 1-D Theoretical Approach. Pure appl. geophys., Bd. 158 (12): 2579 – 2596, Basel.

Wenzel, F., V. Ciugudean, W. Wirth, R. Pascu, K.-P. Bonjer, T. Moldoveanu, A. Kienzle (2000): Options for Rapid Ground Motion Assessment in Bucharest. Geoph. Res. Abstr. Vol 3, EGS, NH5.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

Kienzle, A., D. Hannich, W. Wirth, D. Ehret, J. Rohn, V. Ciugudean, K. Czurda (2006): A GIS-based study of earthquake hazard as a tool for the microzonation of Bucharest. Engineering Geology, Bd. 87: 13 – 32.

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Ehret, D., D. Hannich, J. Rohn, C. Grandas, G. Huber (2007): Seismic microzonation for earthquake hazard forecast - Numerical modelling of site effects incorporating non-linearity and groundwater level changes. International Conference on Geological Engineering, Wuhan, China, 6 S.

Ehret, D., D. Hannich, S. Schmitt, G. Huber (2007): Numerical modelling of site effects - Influences of groundwater level changes. 1st IASME/WSEAS Int. Conf. on Geology and Seismology, Portoroz, Slovenia, S. 233 – 237.

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Ehret, D., D. Hannich, G. Huber, C. Grandas, V. Ciugudean (2007): Numerical modelling of site effects incorporation non-linearity and groundwater level changes. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, S. 263 – 268.

Ehret, D., S. Schmitt, D. Hannich, V. Osinov (2007): Non-linear Modelling for Estimating Site Effects in Bucharest, Romania. Geoph. Res. Abstr., Bd. 9., 2 S.

Bala, A., B. Grecu, D. Hannich, D. Ehret, V. Raileanu (2007): Methods to assess the site effects based on in situ measurements in Bucharest city. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 248 – 252.

Grandas, C., G. Huber, D. Hannich, D. Ehret, H. Hötzl, J. Ritter (2007): Field investigations and site response analysis for Bucharest. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 253 – 258.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, G. Huber, A. Danchiv, M. Bretotean (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 205 – 221.

Ehret, D., G. Huber, D. Hannich, V. Osinov (2006): Seismic Microzonation of Bucharest - Numerical Modelling of Site Effects. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, S. 333.

Ehret, D., G. Huber, D. Hannich, V. Osinov (2006): Numerical modelling of site effects for Bucharest. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, 1 S.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, G. Huber, M. Bretotean, A. Danchiv, V. Ciugudean (2006): The Impact of Hydrogeology on Earthquake Ground Motion in Soft Soils. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, S. 332 – 333.

Hannich, D., G. Huber, D. Ehret, H. Hötzl, S. Balan, A. Bala, M. Bretotean, V. Ciugudean (2006): SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981 – 992.

Hannich, D., G. Huber, D. Ehret, H. Hötzl, S. Balan, A. Bala, M. Bretotean, V. Ciugudean (2007): SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania. Thirty Years from the Romania Earthquake of March 4, 1977, Bucharest, Romania, 12 S.

Ehret, D., A. Kienzle, D. Hannich, J. Rohn, V. Ciugudean (2005): Seismic Microzonation of Bucharest based on non-linear Modelling. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 369 – 371.

Ehret, D., D. Hannich, W. Wirth, J. Rohn, V. Ciugudean, F. Zamifirescu (2005): Seismic Microzonation based on geotechnical Parameters - Estimation of Site Effects in Bucharest (Romania). Geoph. Res. Abstr., Bd. 7, 2 S.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, M. Bretotean, A. Danchiv, V. Ciugudean (2005): The impact of hydrogeology on the earthquake ground motion in soft soils. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 358 – 361.

Rohn, J., D. Ehret, A. Kienzle (2005): A geological subsurface-model for Bucharest as basis for linear modeling of site effects. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 372 – 373.

c) in Monographien

Schmitt, S. (2006): Numerische Modellierung der Standorteffekte für das Stadtgebiet von Bukarest unter Berücksichtigung nicht-linearer Effekte mit einem 1D-NLWAVE-Programm (nach Osinov) und ArcGIS. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe (TH), 105 S.

Kretzer, C. (2006): Numerische Modellierung der Bodenantwort für das Stadtgebiet von Bukarest mit ProShake und ArcGIS/ArcView. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Angewandte Geologie, Universität Karlsruhe (TH), 54 S.

5.2.2.3 Vorträge

International Conference on Geological Engineering, Wuhan, China (2007): Seismic microzonation for earthquake hazard forecast - Numerical modelling of site effects incorporating non-linearity and groundwater level changes, *Vortragender D. Ehret.*

1st IASME/WSEAS Int. Conf. on Geology and Seismology, Portoroz, Slovenia (2007): Numerical modelling of site effects - Influences of groundwater level changes, *Vortragender D. Ehret.*

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1999 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	328.497 €	12.425 €	0	340.922 €
2005	39.600 €	2.000 €	0	41.600 €
2006	41.400 €	2.000 €	0	43.400 €
2007	41.400 €	2.000 €	0	43.400 €
Summe	**450.897 €**	**18.425 €**	**0**	**469.322 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Rohn, J., Prof. Dr.	Ingenieurgeologie	AGK; seit 04/2006 Univ. Erlangen	07/1999 – 12/2007	
	2. Czurda, K., Prof. Dr.	Ingenieurgeologie	AGK	07/1999 – 12/2007	
	3. Hötzl, H., Prof. Dr.	Hydrogeologie	AGK	07/1999 – 12/2007	
	4. Wenzel, F., Prof. Dr.	Geophysik	GEOK	07/1999 – 12/2007	
	5. Ritter, J., Dr.	Geophysik	GEOK	01/2005 – 12/2007	
	6. Gudehus, G., Prof. Dr.	Bodenmechanik	IBF	01/2002 – 12/2007	
	7. Huber, G., Dr.	Bodenmechanik	IBF	01/2005 – 12/2007	
	8. Zamifirescu, F., Prof. Dr.	Ingenieurgeologie	Univ. Bukarest	07/1999 – 12/2007	
	9. Ciugudean, V., Dr.	Ingenieurgeologie	S. C. METROUL S. A.	07/1999 – 12/2007	
	10. Popa, I., Prof. Dr.	Ingenieurgeologie	INCERC	01/2002 – 12/2007	
	11. Radulian, M., Dr.	Geophysik	NIEP	01/2005 – 12/2007	
	12. Wiesel, J., Dr.	GIS	IPF	01/2002 – 12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	13. Weisbrich, W., Dipl.-Ing. (FH)		IPF	01/2005 – 12/2007	

Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	14. Ehret, D., Dipl.-Geol.	Ingenieurgeologie	AGK	10/2003 – 12/2007	BAT IIA
	15. Göppert, N., Dipl.-Geol.	Hydrogeologie	AGK	05/2007 – 09/2007	TV-L 13
	15. Simon, M.	Ingenieurgeologie	AGK	01/2005 – 08/2005	stud. HK
	16. Werle, A.	Ingenieurgeologie	AGK	04/2004 – 11/2005	stud. HK
	17. Zipfel, S.	Ingenieurgeologie	AGK	04/2005 – 11/2005	stud. HK
	18. Müller, M.	Ingenieurgeologie	AGK	05/2005 – 01/2006	stud. HK
	19. Grühbaum, C.	Ingenieurgeologie	AGK	11/2005 – 04/2006	stud. HK
	20. Rumpler, N.	Ingenieurgeologie	AGK	11/2005 – 11/2006	stud. HK
	21. Schmitt, S.	Ingenieurgeologie	AGK	08/2006 – 11/2006	stud. HK
	22. Pektor, D.	Ingenieurgeologie	AGK	09/2006 – 11/2006	stud. HK
	23. Lang, S.	Ingenieurgeologie	AGK	10/2006 – 11/2006	stud. HK
	24. Brunsch, A.	Ingenieurgeologie	AGK	04/2007 – 12/2007	stud. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt B7

Hyrogeologie und Standorteffekte bei Erdbeben in Bukarest

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dr. Dieter Hannich
Prof. Dr. Heinz Hötzl

Geologisches Institut, Abt. Hydrogeologie, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum Teilprojekt B7

5.1.1 Titel:

Hyrogeologie und Standorteffekte bei Erdbeben in Bukarest

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Hydrogeologie, Bodendynamik, Geotechnik, Porenwasserdruck, Verflüssigungspotenzial

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr. Hötzl, Heinz, 29.08.1941

Dr. Rohn, Joachim, 10.02.1959 (*bis 31.03.2006; ab 01.04.2006 Berufung als Prof. an die Universität Erlangen*)

Geologisches Institut, Abteilung Hydrogeologie, Universität Karlsruhe, Kaiserstrasse 12, 76128 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-3096 (HH)
Telefax: 0721/606279
E-Mail: heinz.hoetzl@agk.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dr. Dieter Hannich

5.1.5 B7 Rumänische Partner

Dr. Mihai Bretotean, National Institute of Hydrology and Water Management, Bucharest
Prof. Dr. Alexandru Danchiv, University of Bucharest, Faculty of Geology and Geophysics, Section Hydrogeology, Bucharest
Dipl.-Eng. Viorica Ciugudean, S.C. METROUL S.A., Bucharest
Dr. Gheorghe Marmureanu, Director, National Institute of Earth Physics, Bucharest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Die Notwendigkeit des Hinzuziehens des Einflusses der hydrogeologischen Gegebenheiten auf Standorteffekte während Starkbeben wurde im Laufe des Fortschreitens der Forschungsarbeiten erkannt und ab der Antragsphase 2002-2004 im Rahmen des Teilprojektes B7 angesiedelt. Somit war dieses Teilprojekt an den letzten zwei Antragsphasen beteiligt. In der ersten Antragsphase (2002-2004) wurden insbesondere vorbereitende Arbeiten, wie Geländeinstrumentierungen und Erfassung von existierenden Grundwasserstandsmessdaten, durchgeführt. Geländemessungen (VSP, CPT, flächendeckende Grundwasserstandserfassung, Porenwasserdruckmessungen), die Systematisierung existierender Grundwasserstandsdaten sowie die Auswertung erster Porenwasserdruckmessungen wurden durchgeführt. In der letzten Antragsphase wurde das prognosefähige Grundwasserströmungsmodell erarbeitet und die Seismic Cone Penetration Tests durchgeführt, welche die notwendigen Daten für die Wahrscheinlichkeitsberechnungen über das Auftreten von Verflüssigung in den oberflächennahen Sandschichten in Bukarest lieferten. Dies ermöglichte auch - zum ersten Mal für Bukarest – die Erarbeitung und Anfertigung von Verflüssigungsrisikokarten. Parallel wurden nichtlineare numerische Modellierungen an einzelnen Standorten in Zusammenarbeit mit B4 und B6 durchgeführt. Beide Verfahren ermöglichen das Überprüfen des Einflusses unterschiedlicher Grundwasserstände auf das Verflüssigungspotenzial.

Das Teilprojekt B7 war im SFB gut verankert. Die Arbeiten erfolgten jeweils in enger Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten, insbesondere mit B3, B4, B6 und B1.

In der letzten Antragsphase des SFBs wurden im Rahmen dieses Teilprojektes weiterhin die hydrogeologischen Gegebenheiten als Einflussquelle auf Standorteffekte in Bukarest untersucht. Der Einfluss der hydrogeologischen Bedingungen auf das seismische Verhalten des geologischen Untergrundes wurde unter diversen Gesichtspunkten erforscht:

- Grundwasserstands- und Druckwasserspiegelschwankungen in oberflächennahen Sand- und Kiesschichten von Bukarest wurden erfasst und analysiert, um das maximale Ausmaß dieser Schwankungen in Bukarest sowohl während saisonaler als auch während extremer Niederschlagsevents zu erfassen. Die 2004 durchgeführten flächendeckenden Stichtagsmessungen stellen den Ausgangspunkt für das numerische Grundwassermodell dar. Das Grundwassermodell wurde über das Modellierungsprogramm FEFLOW® für den *Colentina-*

Aquifer erarbeitet. Das erstellte Grundwassermodell ermöglicht das Abfragen an bestimmten Standorten und zu bestimmten Zeitpunkten von saisonal bedingten Grundwasserständen sowie von Grundwasserständen nach extremen Niederschlagsevents.

- Der Einfluss von schwankenden Grundwasserständen in Sand- bzw. Kiesschichten auf Änderung der Scherwellengeschwindigkeit von Sandschichten in trockenem und gesättigtem Zustand wurde durch die 2005 durchgeführten Seismic Cone Penetration Tests (SCPTU) untersucht.
- Der Einfluss von schwankenden Grundwasserständen auf das Verflüssigungspotenzial in Sand- bzw. Kiesschichten in Bukarest wurde sowohl über empirische Methoden unter Verwendung von SCPTU-Daten, als auch über nichtlineare numerische Modellierungen untersucht. Eine Risikoanalyse des möglichen Auftretens von Verflüssigungen in den oberflächennahen Sandschichten von Bukarest während eines Vrancea-Starkbeben auf Gebäude an der Erdoberfläche wurde erstellt. Dazu wurden spezielle dafür geeignete Kennziffern (Indices) unter Verwendung der SCPTU-Daten berechnet und zur Erstellung von interpolierten Karten eingesetzt. Derartige flächendeckende Risikokarten wurden erstmalig für Bukarest erstellt.
- Die in-situ Messungen der Erd- und Porenwasserdruckentwicklung zur Erfassung der Auswirkungen während eines Vrancea-Erdbeben wurden fortgesetzt und durch zwei weitere eingebaute Sensoren auf dem NIEP-Gelände erweitert. Über die letzten zwei eingebauten Drucksensoren werden kontinuierliche Messdaten erhalten und nicht, wie bei den anderen vier, nur während Erdbebenevents. Bis jetzt konnte nur während des 6-er Vrancea-Beben vom 27.10.2004 ein leichter Porenwasserdruckanstieg bei einem der Drucksensoren im *Tineretului Park* festgestellt werden. Bei schwächerer Beben (Magnituden unter 5,0) konnte kein Porenwasserdruckanstieg festgestellt werden, was aber auch nicht erwartet wurde.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Wie bei der letzten Antragstellung erwähnt, ist der Einfluss hydrogeologischer Gegebenheiten auf Standorteffekte sowie auf das Verflüssigungspotenzial in der Fachliteratur ein bisher relativ wenig beachtetes und wenn, nur vereinfacht angesprochenes Thema. So wurden die hydrogeologischen Einflussmöglichkeiten weitgehend nur auf die An- oder Abwesenheit von Grundwasser und die Lage des Grundwasserspiegels reduziert, wobei letzterer hauptsächlich als statischer Parameter betrachtet wurde.

Der Kenntnisstand zum Beginn dieser letzten Antragsphase wurde aus folgenden neuen Gesichtspunkten aus betrachtet:

- Der Grundwasserstand als dynamische hydrogeologische Zustandsvariable,
- Einflüsse der schwankenden Grundwasserstände auf das seismische Bodenverhalten,
- Anstieg des Porenwasserdrucks während Erdbeben als Auslöser beim Triggerungsmechanismus von Bodenverflüssigungen.

Bei allen diesen Themenbereichen war der Kenntnisstand praktisch im Anfangsstadium und insbesondere aus Sicht der geologischen, hydrogeologischen sowie seismischen Rahmenbedingungen von Bukarest unbekannt und unerforscht. In der vorangegangenen Antragsphase (2002-2004) wurden vorrangig vorbereitende Arbeiten im Gelände durchgeführt, welche erste bis dahin fehlende Daten erbrachten. Eine flächendeckende Grundwasserstandserhebung in Bukarest, das Installieren von neuen, kontinuierlich messenden Grundwasserstandsmessstellen, von Porenwasserdruckmessstellen und das Durchführen von Scherwellengeschwindigkeitsmessungen durch Vertical Seismic Profiling (VSP) in Bohrlöchern, waren erste Initiativen, um den Datensatz für die weitergehenden Auswertungen auf den neuesten Stand zu bringen.

In der letzten Antragsphase (2005-2007) wurden einerseits weiterhin ergänzende Messeinrichtungen, z. B. weitere Grundwasserstandsmessstellen und Porenwasserdruckmessstellen, im Gelände in Bukarest eingebaut, andererseits wurde eine neue Messkampagne organisiert, um fehlende Scherwellengeschwindigkeiten im oberflächennahen Bereich mittels Seismic Cone Penetration Tests (SCPTu) zu bestimmen. Die SCPTu-Messungen wurden in diesem Teilprojekt angesiedelt, waren jedoch auch im Interesse der Teilprojekte B4 und B6 und wurden auch in Zusammenarbeit mit den beiden anderen Teilprojekten durchgeführt. Die so erhaltenen Datensätze ermöglichten damit in der letzten Antragsphase die eigentlichen Forschungsziele umzusetzen:

- Erstellung eines Grundwasserströmungsmodells für den Raum Bukarest, das in der Lage ist zukünftige Grundwasserstände vorherzusagen. Einbindung der aktualisierten flächendeckenden Grundwasserstandsdaten und signifikanter hydrogeologischer Daten mit ArcGIS in ein vorhandenes geologisches Untergrundmodell der Stadt Bukarest (zusammen mit B6).
- Untersuchung der Auswirkungen der Grundwasserstandsschwankungen auf die ortsabhängige dynamische Bodenantwort und des Verflüssigungspotentials der Sand- und Kiesschichten in Bukarest.
- Auswertung und Interpretation der Erd- und Porenwasserdruckregistrierungen während zukünftiger Erdbeben. Untersuchung der Abhängigkeit des Auftretens von Porenwasserüberdruck in den oberflächennahen Grundwasserleitern von der Magnitude, dem Frequenzinhalt und der Dauer der Vrancea-Beben sowie in-situ Beurteilung des Verflüssigungspotentials unter den lokalen hydrogeologischen und geotechnischen Gegebenheiten.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Für die Beantwortung der oben genannten Hauptausgangsfragestellungen wurden eine Reihe von speziellen Messungen, Methoden und Verfahren angewandt. Diese werden für die einzelnen Fragestellungen weiter unten aufgezählt:

- Wie groß sind die Grundwasserstandsschwankungen, die in den Aquiferen von Bukarest zu erwarten sind?
    - Ableitung von standortspezifischen saisonalen Schwankungen und Langzeit-Trends in Bukarest bedingt durch natürliche und/oder anthropogene Einflüsse.
    - Erarbeitung eines Grundwasserströmungsmodells, ausgehend von den 2004 durchgeführten flächendeckenden Stichtagsmessungen der Grundwasserstände in dem oberflächennahen *Colentina*-Aquifer.
- Wie kann der Einfluss der schwankenden Grundwasserstände auf die seismische Bodenbewegung quantifiziert werden?
    - Seismic Cone Penetration Tests (SCPTu) an 10 Standorten in Bukarest zur Bestimmung repräsentativer v_s-Werte für die oberflächennahen quartären Schichten sowie zur Beurteilung des Einflusses von Wassergehaltsvariationen in den oberflächennahen Sand- und Kiesschichten (das „u“ in SCPTu steht für Porenwasserdruckmessung).
    - Lineare und nichtlineare Modellierung von Bohrprofilen mit unterschiedlichen geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten.

- Welchen Einfluss haben schwankende Grundwasserstände auf das Verflüssigungspotenzial?
    - Anwendung von empirischen Berechnungsverfahren an SCPTu-Standorten mit Annahme von unterschiedlichen Grundwasserständen.
    - Nicht-lineare Modellierung von Bohrprofilen mit unterschiedlichen Grundwasserständen im oberflächennahen *Colentina*-Aquifer, zusammen mit B6, durch das in B4 entwickelte Verfahren.
- Wie kann das Verflüssigungspotential in Bukarest abgeschätzt werden?
    - Anwendung empirischer Berechnungsverfahren basierend auf SCPTu-Daten an punktuellen Standorten und anschließende Interpolation zur flächendeckenden Zonierung des Verflüssigungspotenzials.
    - In-situ Porenwasserdruck- und Erddruck-Registrierungen in den oberflächennahen Sand- und Kiesschichten in Bukarest.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen und deren Bewertung werden in der Reihenfolge der Fragestellungen nachfolgend beschrieben.

Prognosefähiges Grundwasserströmungsmodell für den *Colentina*-Aquifer in Bukarest.

Dem oberflächennahen *Colentina*-Aquifer wird die Hauptrolle beim Auftreten von Verflüssigungen bei Starkbeben zugewiesen. Der Tiefenbereich der obersten Schichtgrenze von 5-15 m, Mächtigkeiten von 3-20 m und geringe Flurabstände des Grundwassers, sind neben anderen Bedingungen wichtige Voraussetzungen für eine verflüssigungsfähige Sandschicht.

Die durchschnittliche Korngrößenverteilungskurve der *Colentina* Sande und Kiese liegt ebenfalls im Bereich verflüssigungsgefährdeter Böden (ISHIHARA & PERLEA 1984, PERLEA & PERLEA 1984). Eine nähere Beschreibung gibt es in dem Beitrag HANNICH ET AL. 2006: „SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania“ (Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981-992).

Die im Januar 2004 in Kooperation mit den rumänischen Partnern (Nationales Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft und METROUL S.A. aus Bukarest) simultan gemessenen Grundwasserstandsdaten in insgesamt 217 Piezometerbohrungen stellen den Ausgangspunkt für das Grundwasserströmungsmodell (Abb. 1) mit dem Finite-Elemente-Programm FEFLOW ® dar (HANNICH & DANCHIV 2007).

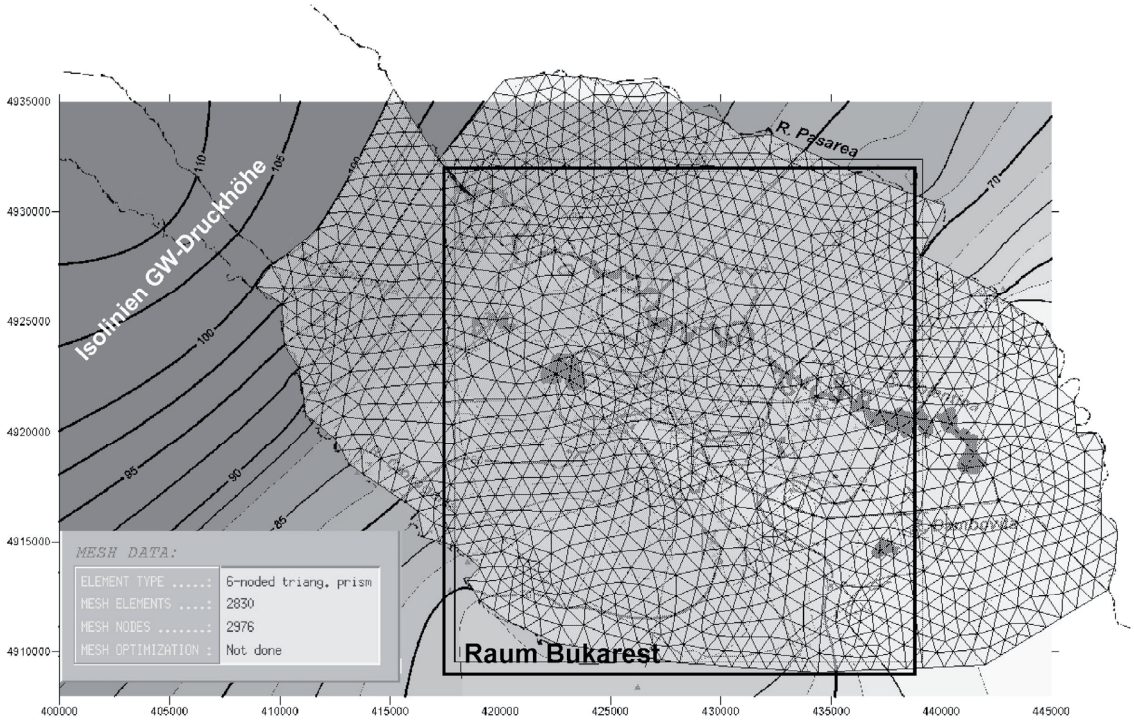


Abbildung 1: Das Netz von 2830 Elementen, auf dem das FE-Grundwasserströmungsmodells (FEFLOW ®) für den *Colentina*-Aquifer im Raum Bukarest basiert.

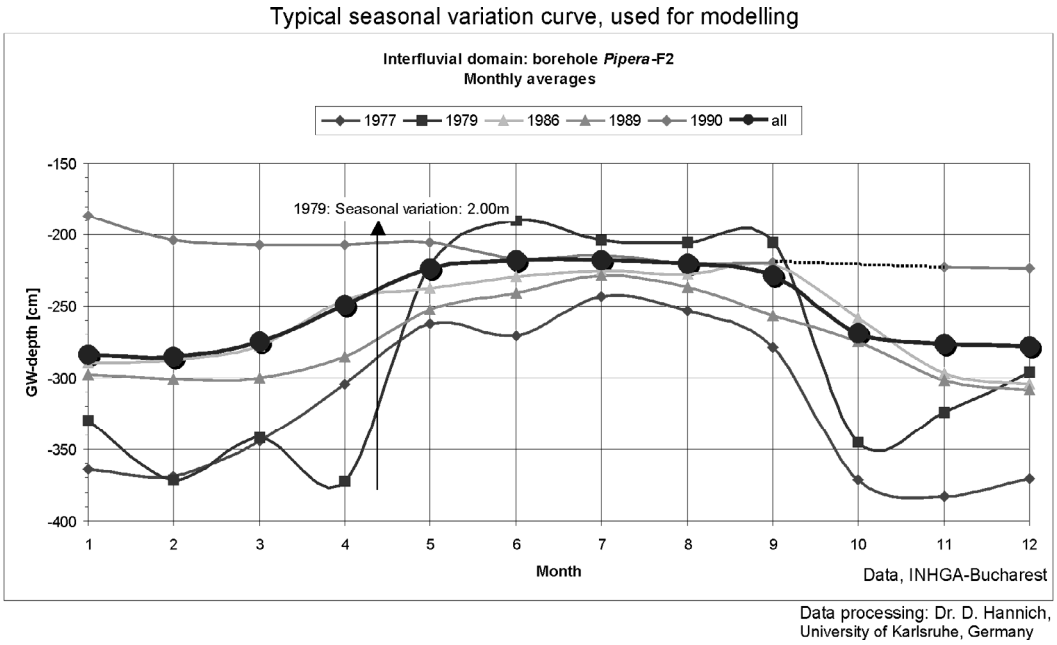


Abbildung 2: Monatsdurchschnittswerte typischer saisonaler Grundwasserstandsdaten für Bukarest aus existierenden Messdaten über 30 Jahre.

Als Modellierungsgrundlage dienten Monatsdurchschnittswerte (ermittelt aus über 30-jährigen Messreihen saisonaler Grundwasserstandsdaten an einzelnen Messstellen; BRETOTEAN 2003) in Abb. 2, sowie Grundwasserstandsschwankungen während extremer Niederschlagsevents registriert im September 2005 (Abb. 3), wurden im Modell benutzt.

Ausgehend von den gemessenen Grundwasserstandsschwankungen und in Abwesenheit von Flux-Beobachtungen wird im Modell erstrebt die Grundwasserneubildung aus den Schwankungen der Druckhöhe abzuleiten. Das bedeutet, dass die gesamte ankommende Wassermenge sogleich gespeichert wird und alle anderen Terms des Wasserbudgets vernachlässigt werden. Für den Bukarester Raum wurden nach einigen Tests mit FEFLOW für das nördliche und das südliche Plateau ein Wert für die GW-Anreicherung von 1,1 mm/Tag angenommen und für den Zwischenflussbereich (die zwischen den Flüssen Colentina und Dambovita gelegenen niedere Terasse) von 1,5 mm/Tag. Der höhere Wert für den zentralen Zwischenflussbereich ist durch den anthropogenen Zufluss aus undichten Abwässer- und Trinkwasserrohren in der Innenstadt begründet. Über das Verhältnis hydraulische Leitfähigkeit / GW-Neubildung werden dann die voraussichtlichen Grundwasserstände an bestimmten Beobachtungsstandorten (Abb. 4) zu zukünftigen Zeitpunkten und speziellen hydrologischen Randbedingungen erhalten. Eine Abschätzung der hydraulischen Leitfähigkeit wurde durch Inversion über das PEST-Modul von FEFLOW erzielt. Für die Kalibrierung des Modells wurde über einen Iterationsprozess nach Konvergenz der Ergebnisse im Raum Bukarest 24 Teilzonen mit konstanter Leitfähigkeit abgeleitet. Aufgrund dieses Ergebnisses können Grundwasserstandsschwankungen mit Abweichungen von maximal 0,8 m zwischen gemessenem und errechnetem Wert bestimmt werden.

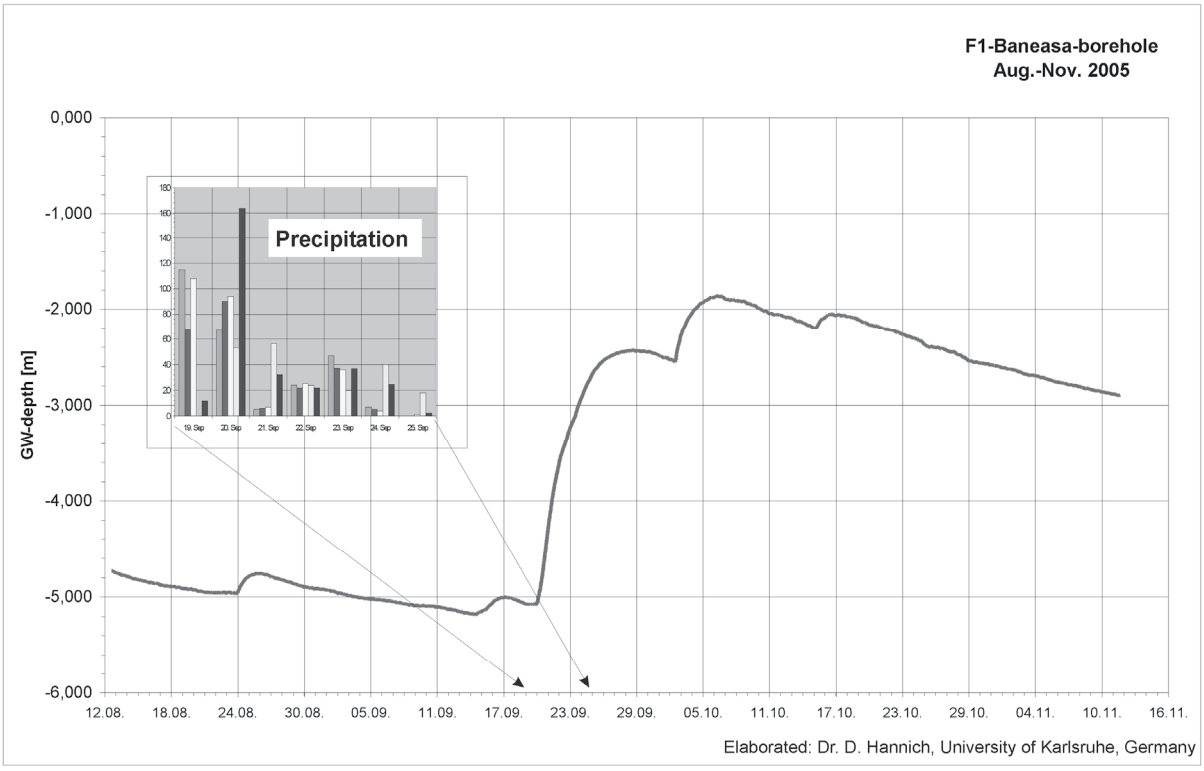


Abbildung. 3: Gemessene Grundwasserstandsschwankungen während extremer Niederschlagsereignissen im Herbst 2005 in Bukarest.

Die Ergebnisse der GW-Modellierung werden für den Fall saisonaler Schwankungen und für den Fall extremer Niederschlagsereignisse dargestellt. Im Fall saisonaler Schwankungen wird im FEFLOW-Programm die Variante „stationäre Strömung“ (steady state flow), bei extremen Niederschlagsereignissen wurde die Variante „instationäre Strömung“ (transient flow) angewandt.

In Abbildung 5 sind die über das Modell errechneten voraussichtlichen Grundwasserstände an den einzelnen 12 Standorten für ein volles Jahr dargestellt. Es ist zu erkennen, dass über das Modell an den einzelnen Standorten unterschiedlich große Schwankungen, abhängig von der lokalen hydraulischen Leitfähigkeit und der unterschiedlichen Grundwasserneubildung errechnet wurden.

In Abbildung 6 sind der voraussichtliche Anstieg und das nachträgliche mehr-oder-wenig langsame Absinken der Grundwasserstände an den 12 Beobachtungsstandorten bei extremen Niederschlagsereignissen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Anstieg des Grundwassers an den einzelnen Standorten unterschiedlich hoch ist, abhängig insbesondere von der lokalen hydraulischen Leitfähigkeit.

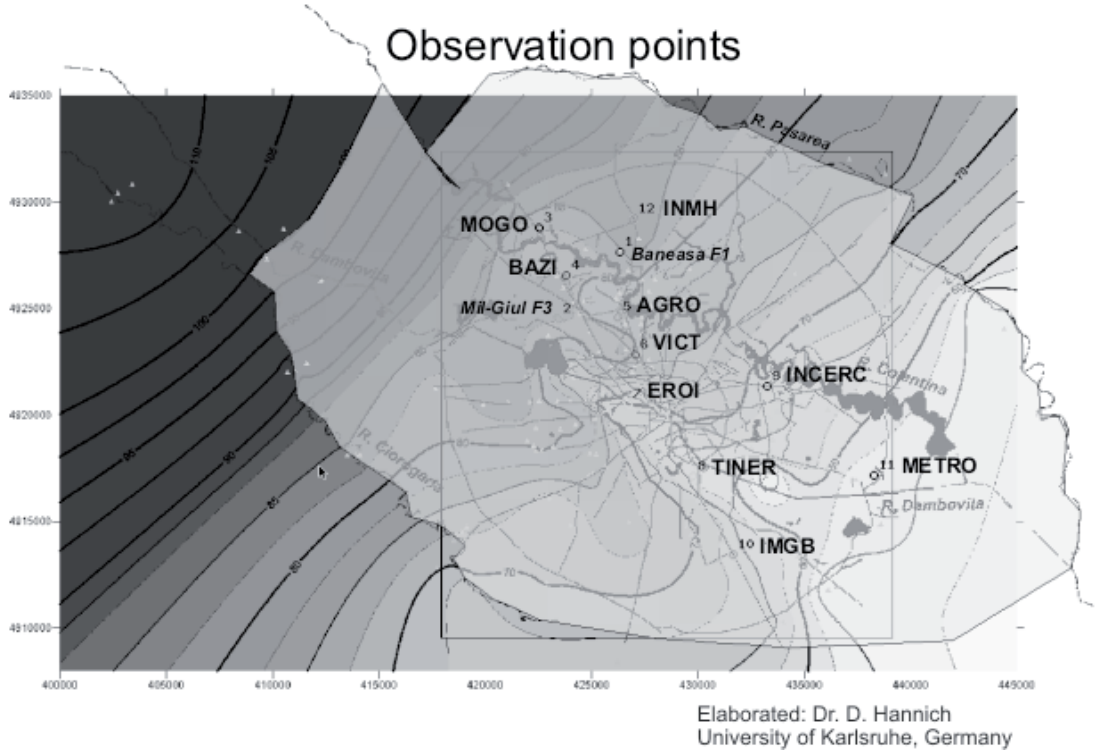


Abbildung. 4: In das GW-Modell eingebaute Beobachtungsstandorte, an welchen Verflüssigungspotenzialberechnungen und Modellierungen mit Einbeziehung zukünftiger Grundwasserstände durchgeführt werden.

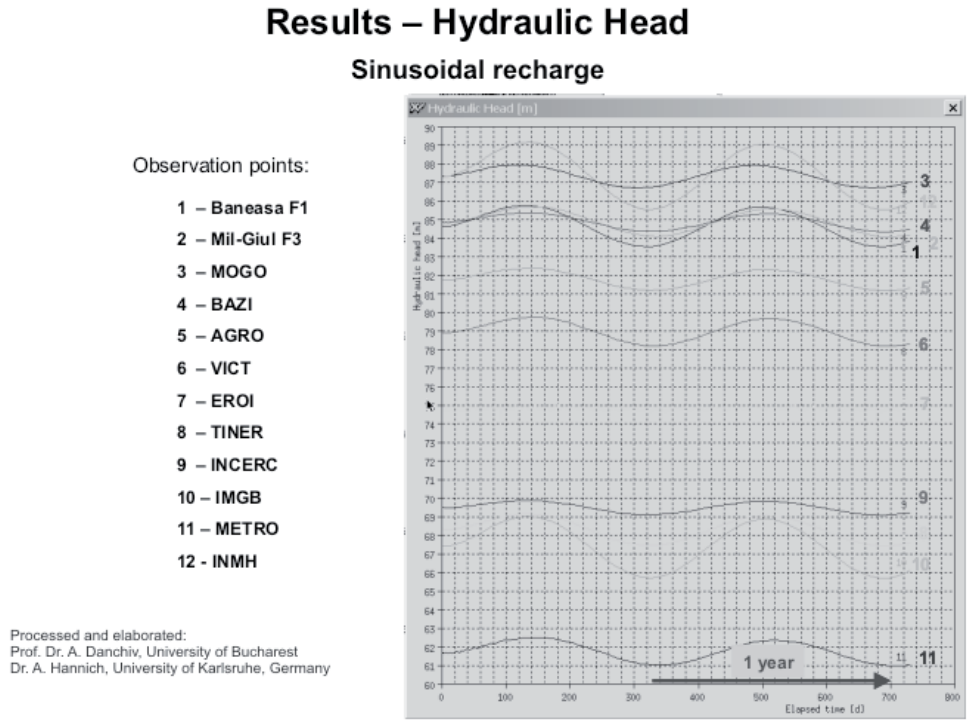


Abbildung 5: Modellierungsergebnisse saisonaler GW-Schwankungen an 12 Standorten

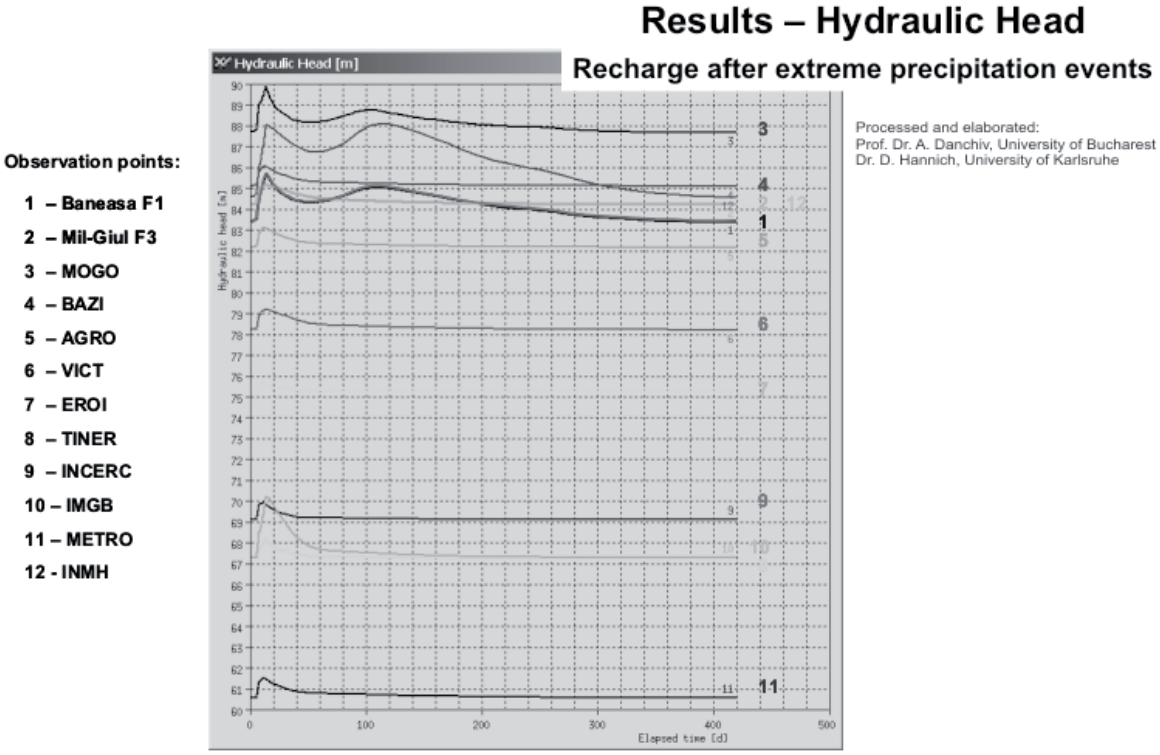


Abbildung 6: Modellierungsergebnisse von GW-Schwankungen an 12 Standorten bei extremen Niederschlagsereignissen.

SCPTu-Techniken zur oberflächennahen Bodencharakterisierung

In der letzten Antragsphase 2005-2007 wurden Seismic Cone Penetration Tests (SCPTu) in Bukarest durchgeführt, um für den oberflächennahen Bereich (Tiefen 0-35 m) fehlende Daten über Scherwellengeschwindigkeiten zu ermitteln. Gleichzeitig sollen wichtige geotechnische Daten über den Spitzenwiderstand und die Mantelreibung erhalten werden, welche über empirische Verfahren die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Bodenverflüssigungen ermöglichen sollen. Im Sommer 2005 wurden an 10 ausgewählten Standorten in Bukarest (Abb. 7) SCPTu-Messungen durchgeführt.

Das Prinzip der Messungen sowie die mathematischen Grundlagen und Formeln, die zur Auswertung der CPT-Daten benötigt werden, sind in dem Beitrag HANNICH ET AL. 2006: „SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania“ (Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981-992) beinhaltet. Hier werden nur die wichtigsten Ergebnisse der so bestimmten Scherwellengeschwindigkeiten und die Ergebnisse bezüglich der Verflüssigungswahrscheinlichkeit in Bukarest beschrieben.

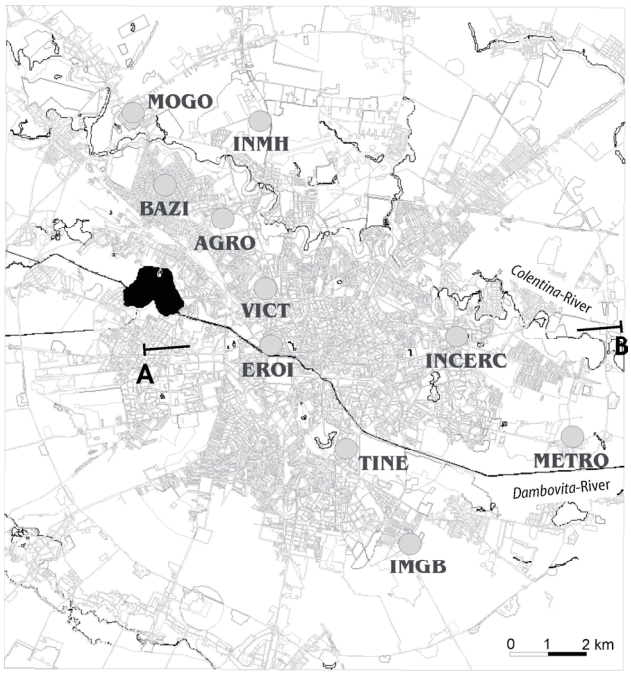


Abbildung 7: Die Lage der SCPTu-Standorte in Bukarest

Die detailliert bestimmten Scherwellengeschwindigkeiten (für jeden Tiefenmeter eine Messung) wurden den einzelnen quartären Schichten (nummeriert von 1 bis 7, LITEANU 1951, CIUGUDEAN & MARTINOF 2000) zugeordnet und gemittelt. Die so erhaltenen Mittelwerte sind in beiliegender Tabelle präsentiert:

Tabelle 1: Mittelwerte der Scherwellengeschwindigkeiten, bestimmt über SCPTu

Layer Nr. / Location	BAZI	AGRO	VICT	INCERC	IMGB	INMH	METRO	MOGO	TINER	EROI	AVERAGE	
1. Backfill	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	
2. Upper Clay Layer	291	332	282	295	223	236	296	272	167	230	278	198
3. Colentina Aquifer (sand+ gravel)	195	296	252	311	275	--	292	244	256	209	266	233
4. Intermediate Clay Layer	295	320	303	320	--	283	261	294	361	253	300	
5. Mostistea Aquifer (fine to medium sand)	308	--	--	--	--	434	320	363	--	301	345	
6. Lacustrine Layer	307	--	--	--	--	--	355	--	--	336	333	

Die CPT-Ausgangsdaten – der Spitzenwiderstand und die Mantelreibung- werden hauptsächlich für die Berechnung der Verflüssigungswahrscheinlichkeit und des Verflüssigungspotenzials über empirische Verfahren benutzt.

Der Einfluss von Grundwasserschwankungen auf die dynamische Bodenantwort und das Verflüssigungspotenzial

Der Einfluss von Grundwasserschwankungen auf Änderungen der Scherwellengeschwindigkeit konnte nur in kleinem Maß durch die SCPTu-Daten dokumentiert werden. Es konnte an einigen Standorten mit ungespanntem Grundwasser, wie z. B. bei VICT, METRO und AGRO unterhalb des Grundwasserniveaus, im ersten Tiefenmeterbereich, um ca. 20% erhöhte v_s-Werte festgestellt werden (Abb. 8).

Die Verflüssigungswahrscheinlichkeit wurde für jeden der SCPTu-Standorte aufgrund der CPT-Daten (Spitzenwiderstand und Mantelreibung) nach empirischen Verfahren berechnet. Die empirischen Verfahren greifen zurück auf die von SEED & IDRISS (1971) entwickelten Methode, basierend auf Stress-Berechnungen und zwar als Verhältnis zwischen Cyclic Stress Ratio (CSR) und Cyclic Resistance Ratio (CRR). Die Berechnung von CSR blieb unverändert seit 1971, jedoch für die Be-

rechnung von CRR wurden in den letzten 20 Jahren eine Reihe von Verfahren entwickelt (CHEN ET AL. 2000, IWASAKI ET AL. 1982, JUANG ET AL. 2003, LEE ET AL. 2003, OLSEN 1997, ROBERTSON & WRIDE 1998, SONMEZ 2003, SONMEZ & GOKCEOGLU 2005, YAN & LUM 2003, YAN ET AL. 2003). In B7 wurde das Verfahren von OLSEN (1997) angewandt, da angenommen wurde, dass es für die in Bukarest vorhandenen Daten und Bedingungen am geeignetsten ist. Die Beschreibung des Verfahrens, die mathematischen Grundlagen und Formeln sind in dem Beitrag HANNICH ET AL. 2006: „SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania“ (Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981-992) aufgeführt.

Die Berechnungen der Verflüssigungswahrscheinlichkeit wurden für das 1977-er *Vrancea*-Beben durchgeführt wobei für die einzelnen Standorte lokale Werte der maximalen Beschleunigung (PGA) eingesetzt wurden. Die verwendeten PGA-Werte wurden für die einzelnen Standorte nach einer Methode von SOKOLOV & BONJER (2006) abgeleitet.

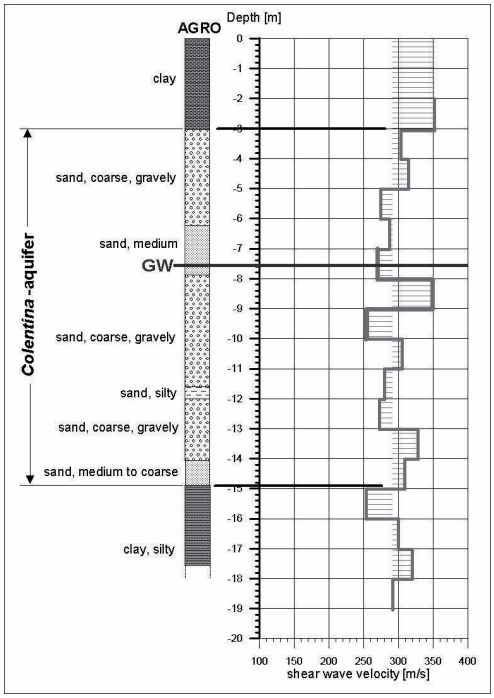


Abbildung 8: SCPTu-Scherwellengeschwindigkeitsmessung am Standort AGRO. Dargestellt sind nur die Scherwellengeschwindigkeitswerte innerhalb der Colentina-Sandschicht: ein erhöhter Wert gleich unterhalb des Grundwasserniveaus zum Zeitpunkt der Messungen ist erkennbar.

Als Beispiel einer Wahrscheinlichkeitsberechnung für Bodenverflüssigung wird hier die Berechnung für den Standort BAZI (*Bazilescu Park*) für das 1977-Beben präsentiert (Abb. 9). Es kann festgestellt werden, dass in zwei Tiefenbereichen die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Verflüssigung höher als 35% liegt und teilweise 100% erreicht. Der Wert 35% ist der Grenzwert unter welchem das Auftreten von Verflüssigung unwahrscheinlich ist bzw. ausgeschlossen werden kann.

Es wurden Berechnungen mit unterschiedlichen Grundwasserständen durchgeführt, die den Einfluss der Grundwasserschwankungen auf das Auftreten von Verflüssigung dokumentieren. In Abb. 9 werden die Berechnungen für zwei unterschiedliche Grundwasserstände präsentiert, dem GW-Stand zur Zeit der SCPTu-Messungen (helle Kurve) und einem erhöhten GW-Stand (dunkle Kurve). Es kann erkannt werden, dass bei höherem GW-Stand die Verflüssigungswahrscheinlichkeit deutlich höher ist und auch im tieferen Bereich deutlich über dem Grenzwert von 35% liegt. Es wurde auch der Einfluss von erhöhten PGA-Werten, d. h. von größeren Magnituden, auf eine erhöhte Verflüssigungswahrscheinlichkeit dokumentiert (siehe Details in HANNICH ET AL. 2007: Abschlusssymposium in Bukarest).

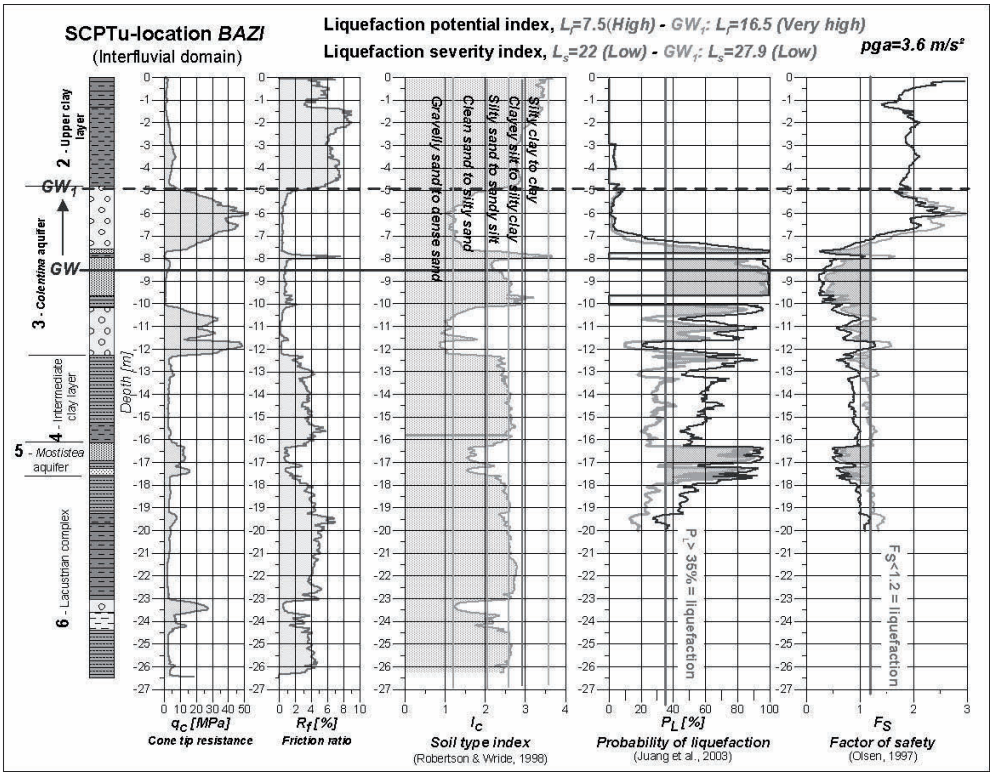


Abbildung 9: Berechnung der Verflüssigungswahrscheinlichkeit, des Sicherheitsfaktors und des Bodenart-Index am Standort *BAZI*, basierend auf CPT-Daten, für zwei unterschiedliche Grundwasserstände: zum Zeitpunkt der SCPTu-Messungen (helle Kurve) und bei einem erhöhten Grundwasserstand (dunkle Kurve).

Nichtlineare 1D-Modellierungen der Bodenantwort bei Starkbeben wurden über die Bohrprofile an einzelnen Standorten unternommen. Dabei wurde das in B4 von OSINOV (2003) entwickelte 1D-Modellierungsprogramm angewandt. Es basiert auf dem visko-hypoplastischem Stoffgesetz und benötigt eine Reihe von Zustandsgrößen und Bodenparametern für die einzelnen Bodenschichten. Zustandsgrößen, wie Porenzahl (void ratio), Wassergehalt, Wassersättigungsgrad oder Parameter wie Dichte der Sandkörner, Reibungswinkel, u.a. können nur über spezielle geotechnische Laboruntersuchungen an ungestörten Bodenproben oder gleich nach dem Herausholen der Bodenprobe aus der Bohrung erhalten werden. Da derartige Größen und Parameter nicht zur Verfügung standen bzw. erst in nächster Zeit über ein NATO-Science-for-Peace-Projekt bestimmt werden, konnten bis zu diesem Zeitpunkt, zusammen mit B4 und B6, nur erste Modellierungsversuche mit Größen und Parametern ähnlicher Böden unternommen werden.

Der Einfluss von unterschiedlichen Grundwasserständen konnte über diese nichtlinearen Modellierungen jedoch klar unter Beweis gestellt werden. In Abbildung 10 wird als Beispiel die nichtlineare Modellierung des Bohrprofils von INCERC für unterschiedliche Grundwasserstände im *Colentina*-Aquifer gezeigt.

Die nichtlinearen Modellierungen zeigen durch den zeitlichen Ablauf der Druckkurven, das Eintreten von Verflüssigung, wenn der Druck innerhalb der Sandschichten auf Null absinkt. Es ist zu erkennen, dass es bei GW-Niedrigstand in der Colentina-Schicht (Abb. 10 oben) zu keiner Verflüssigung kommt, während bei GW-Hochstand (Abb. 10 unten) der Druck nach einiger Zeit auf Null sinkt und es zur Verflüssigung kommt.

Durch diese Modellierungen kann auch gezeigt werden, dass es bei einem früheren Eintreten der Verflüssigung in der tiefer-liegenden Sandschicht („Mostistea“) zu positiven Folgen an der Erdoberfläche kommen kann: die Schwerwellen können durch die tiefer liegende, verflüssigte Sandschicht wegen freiem Grundwasser nicht mehr zur Erdoberfläche gelangen. Dieser auftretende Isolationseffekt für die Erdoberfläche kann Einrichtungen/Gebäude vor zerstörerischen, durch Scherwellen hervorgerufenen Effekten und daraus resultierenden Schäden schützen.

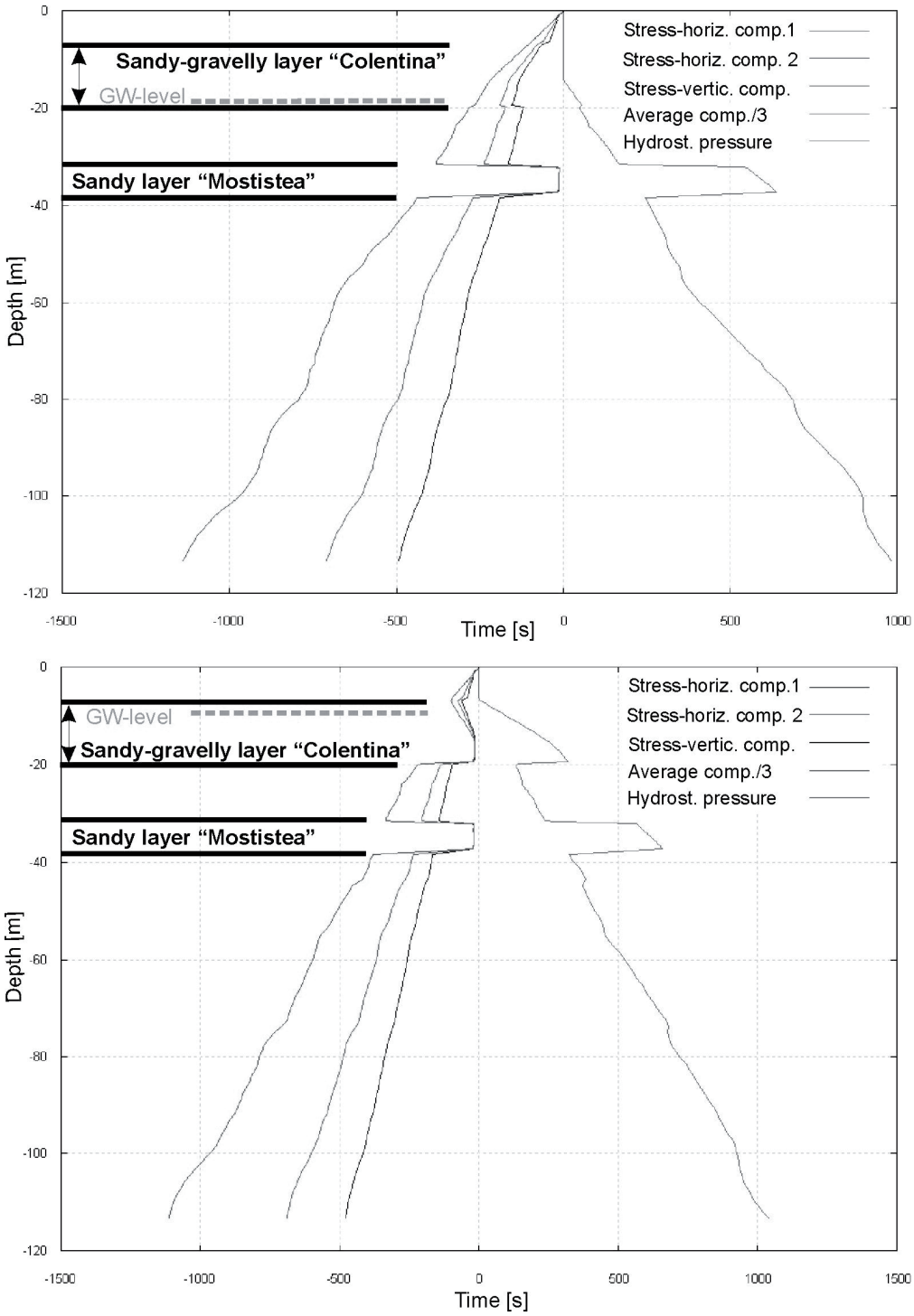


Abbildung 10: Nichtlineare Modellierung (OSINOV 2003) für den Standort INCERC, bei GW-Hochstand und GW-Tiefstand in der „Colentina"-Sand-Kiesschicht.

Das Verflüssigungspotenzial in Bukarest

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit, dass eine Bodenschicht während eines Starkbebens verflüssigt, kann noch keine Aussagen über den Effekt der Verflüssigung und die Ausmaße der Verflüssigungsphänomene an der Erdoberfläche bringen. Dazu ist es notwendig zusätzliche Berechnungen durchzuführen, bei denen die Mächtigkeit und die Tiefe der verflüssigten Schichten berücksichtigt werden. Es werden der Verflüssigungspotenzial-Index (Liquefaction potential index, L_i) und der Verflüssigungsrisiko-Index (Liquefaction severity index, L_s) berechnet (IWASAKI ET AL. 1982, LEE ET AL. 2003, SONMEZ 2003, SONMEZ & GOKCEOGLU 2005) und über festgelegte Grenzwerte (SONMEZ 2003) wird die Kategorie bzw. Klasse der Verflüssigungserscheinungen an der Erdoberfläche von „sehr leicht“ (very low) bis „sehr hoch“ (very high) abgeschätzt. Desgleichen kann auch über empirisch festgelegte Grenzwerte das Ausmaß der zu erwartenden Verflüssigungsphänomene, von leichten Setzungen, von Sandauswürfen, sogenannten „sandboils“, bis hin zu Rissen und großen Setzungen, abgeschätzt werden.

Für Bukarest wurden zum ersten Mal Verflüssigungsrisikokarten erstellt und zwar für das 1977-er Beben und für eine Wiederkehrperiode (return period) von 475 Jahren. Beide Karten, sowie die Erstellungsprozedur mit den mathematischen Grundlagen wurden im Rahmen des Abschlusssymposiums in Bukarest im Oktober 2007 vorgestellt (siehe Details in HANNICH ET AL., 2007: Abschlusssymposium in Bukarest). In Abbildung 11 wird die Karte für die Wiederkehrperiode von 475 Jahren präsentiert. Es ist zu erkennen, dass das höchste Verflüssigungspotenzial, d.h. der größte *Liquefaction potential index*, $L_i>8$, in der Dambovita Flussaue berechnet wurde. Das entspricht der Kategorie „High“ (nach SONMEZ 2003) und der höchste berechnete Wert von $L_i=13,23$ im Tineretului Park würde zu „kleinen bis moderaten Verschiebungen, wie sogenannten „sand-boils“ und Setzungen“ führen.

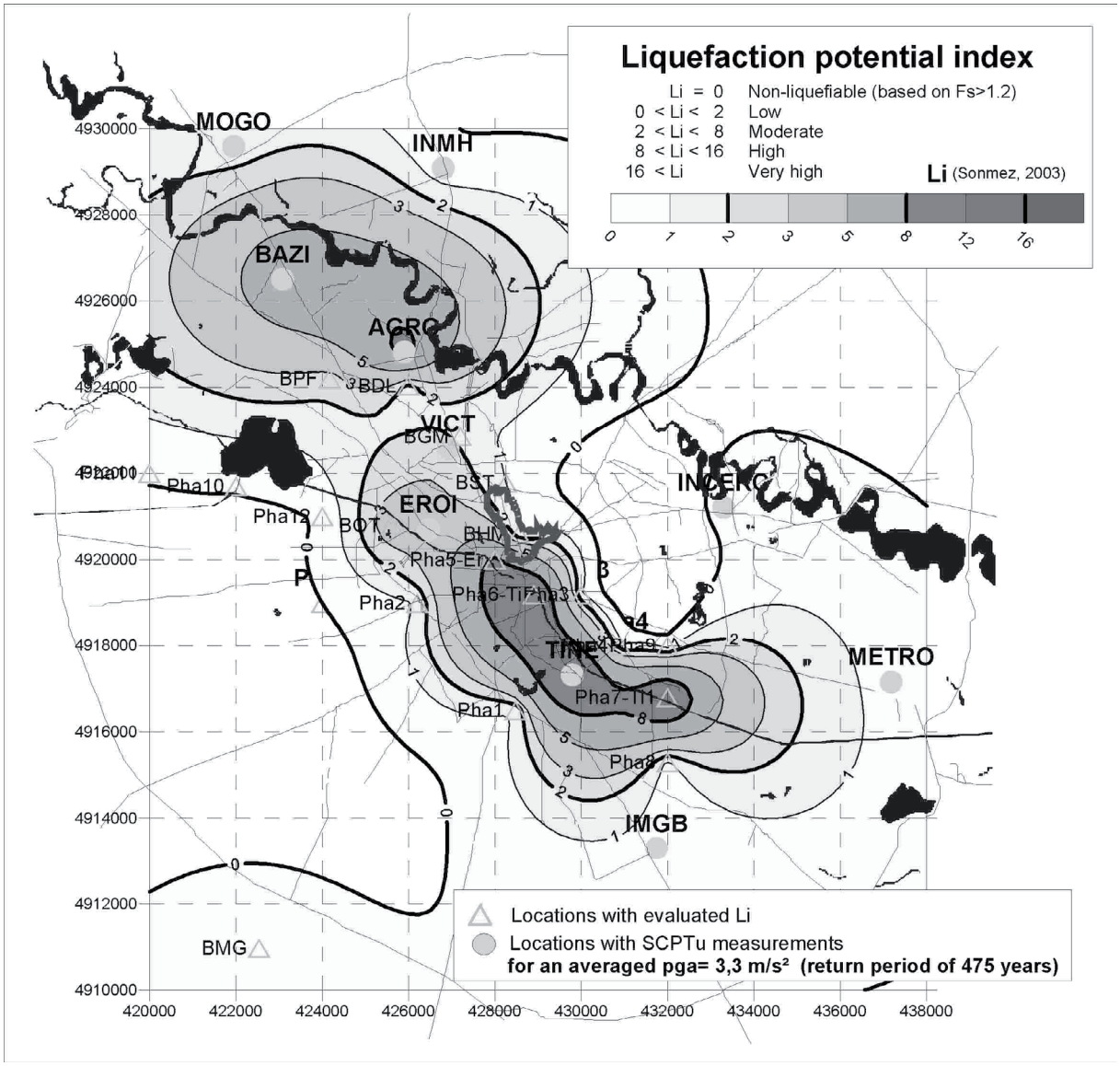


Abb. 11: Verflüssigungsrisikokarte für Bukarest für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren (return period 475 years)

Porenwasserdruckmessungen in Bukarest

Auch wenn bekannt ist, dass eine Sandschicht verflüssigungsgefährdet ist, heißt das noch nicht, dass sie auch während eines bestimmten Beben verflüssigen wird. Das Beben muss stark genug sein (als Magnitude, Frequenzinhalt und Dauer), um den Verflüssigungsmechanismus auszulösen bzw. zu triggern. Das Auftreten von Porenwasserüberdruck in Sandschichten während eines Erdbebens ist die Hauptursache beim Auslösen einer Verflüssigung. Um Änderungen des Porenwasserdruckes in verflüssigungsgefährdeten Sandschichten zu beobachten werden in-situ Messungen durchgeführt, indem Porenwasserdruckgeber in diese Sandschichten eingebaut werden. Diese Operation ist sehr schwierig und wurde erstmalig in Kalifornien von

YOUD & HOLZER, 1994 in *Wildlife Site* durchgeführt, wo Verflüssigungsphänomene bei vorherigen Beben beobachtet wurden.

In Bukarest wurden ab 2003 zusammen mit B3 und B4 an drei Standorten (INCERC, Tineretului Park und NIEP) Porenwasserdruckgeber in die *Colentina* Sandschicht eingebaut. Die Druckgeber benötigen eine konstante, elektronisch stabilisierte Stromquelle und wurden an die Datalogger von K2-Stationen angekoppelt. Über die K2-Station wurde Beginn und Dauer der Porenwasserdruckmessung gesteuert. Nur am NIEP-Standort konnten die Porenwasserdruckmessungen 2005 als kontinuierliche Messung eingerichtet werden. Für den Einbau der Druckgeber in Bukarest wurde zusammen mit B3 und B4 und einer Bohrfirma aus Bukarest (ISPIF) eine spezielle Methode entwickelt, durch welche diese komplexe Operation durchgeführt werden konnte. Diese Einbaumethode, wie überhaupt diese Auswertung von Porenwasserdrücken ist neu und wird unseres Wissens nirgends in Europa in Zusammenhang mit Erdbeben durchgeführt.

Seit 2003, dem Beginn der Porenwasserdruckmessungen in Bukarest, konnte nur während dem Vrancea-Beben vom 27.10.2004 mit der Magnitude 6 bei einem der Druckgeber (F2) im *Tineretului Park* ein leichter Porenwasserdruckanstieg festgestellt werden, der aber nur 6 Sekunden anhielt (siehe Details in HANNICH ET AL., 2007: Abschlusssymposium in Bukarest). Die Magnitude und die Dauer dieses 6-er Bebens war nicht genügend groß/lang, um einen weiteren Porenwasserdruckanstieg zu bewirken. Bis zum Ende dieser letzten Antragsphase gab es keine Beben mit Magnituden größer als 5. Somit konnten keine Analysen bezüglich des Einflusses von Magnitude, Frequenzinhalt und Dauer des Bebens durchgeführt werden, da keine stärkeren Beben auftraten, um entsprechende Porenwasserdruck-Veränderungen registrieren zu können.

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Kontakte, Diskussionen und Meinungsaustausche während wesentlichen Fachkongressen mit anderen Wissenschaftlern führten zu einer besseren Einstufung unserer eigenen Forschungen und gleichzeitig zum direkten Zugriff auf rezente Arbeiten und Mitteilungen, welche oft noch nicht als Publikationen erschienen sind. Diesbezüglich wäre die Arbeit von LEW & HUDSON (2006) zu erwähnen, die auf der Konferenz „100th Anniversary Earthquake Conference“ in San Francisco, 18-22 April, 2006 vorgestellt wurde und nur im Proceedings CD-ROM enthalten ist. In dieser Arbeit wird auf die Wichtigkeit der genauen Kenntnis der Grundwasserstände in einer Region, insbesondere in Stadtgebieten, in Zusammenhang mit einer richtigen Einstufung des Verflüssigungspotenzials und des „Seismic Hazards Mapping“, hingewiesen. Gleichzeitig müssen historische Hoch- und Niedrigstände des Grundwassers bekannt sein, um das Verflüssigungsrisiko korrekt zu beurteilen. Einer der Autoren, Martin Hudson, interessierte sich für unsere Arbeiten bezüglich der Berücksichtigung der Hydrogeo-

logie und der Grundwasserstände bei der Analyse von Verflüssigungsrisiko und der Erstellung von „Liquefaction hazard maps“.

Einen anderen interessanten Kontakt gab es auf dem „AGU Fall Meeting“ im Dezember 2007 in San Francisco mit Thomas Holzer, einem der Initiatoren von Porenwasserdruckmessungen während Erdbeben in Kalifornien. Er zeigte Interesse an unserer Arbeit bezüglich Verflüssigungsrisiko und Porenwasserdruckmessungen in Rumänien. Er erwähnte sein 2006 erschienenes Paper (HOLZER ET AL. 2006) bezüglich des Erstellens einer real-time „LiqueMap“ über das Internet, mit der Verteilung der Verflüssigungswahrscheinlichkeit in der betroffenen Region gleich nach einem Erdbeben. Gleichzeitig erwähnte er, dass nach seinen letzten Beobachtungen nicht nur S-Wellen, sondern auch Oberflächenwellen nach einem Erdbeben den Porenwasserdruckanstieg bewirken können.

Eine weitere rezente Arbeit von JUANG ET AL. (2006) schlägt eine Methode „FORM“ vor, in welcher die Verflüssigungswahrscheinlichkeit aufgrund eines Modells abgeleitet wird, das über Neuronale Netze erstellt wurde.

5.2.1.4 Offene Fragen

Die Hauptziele dieses Teilprojektes konnten erreicht werden, wenn auch für eine Gesamtbewertung ergänzende Messungen während Starkbeben erforderlich sind. So konnten einige der Hauptfragen jedoch nicht vollständig oder hundertprozentig befriedigend beantwortet werden, einerseits aus Zeitmangel und andererseits wegen ungenügend verfügbarer Daten.

Das erarbeitete Grundwasserströmungsmodell ist funktionsfähig und ermöglicht die Beantwortung eines Hauptproblems, Grundwasserstände für zukünftige Zeitpunkte und an bestimmten Standorten in Bukarest prognostizieren zu können. Das Modell basiert jedoch noch auf einem groben Datenraster und sollte weiter verfeinert werden. Insbesondere sind zusätzliche, genauere Daten über anthropogene Einflüsse im Innenstadtbereich und zusätzliche kontinuierliche Grundwasserstandsmessdaten im Stadtbereich erforderlich. Es stellt jedoch einen klaren Fortschritt für die rumänischen Partner dar, da es bis jetzt kein Grundwasserströmungsmodell für den *Colentina*-Aquifer gab.

Die Frage des Einflusses unterschiedlicher Grundwasserstände und somit unterschiedlicher Wassersättigungsgrade innerhalb der Sandschichten auf die Scherwellengeschwindigkeit, konnte durch die durchgeführten SCPTu-Messungen nicht vollständig beantwortet werden. Laboruntersuchungen durch „Resonant Column“ Versuche könnten zusätzliche Daten dazu liefern.

Die Frage des Einflusses von Magnitude, Frequenzinhalt und Dauer der Vrancea-Beben auf Porenwasserdruckänderungen in der *Colentina*-Sand-und-Kiesschicht konnte nicht untersucht werden, da es während der letzten zwei Antragsphasen kein Starkbeben gab.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt B7 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Bretotean, M., 2003: Phreatic level variations in Bucharest between 1973-2003, Internal Report, National Institute for Meteorology and Hydrology, Bucharest, 2001 (in Romanian).

Chen, C.J., C.H. Juang, 2000: Calibration of SPT- and CPT-based liquefaction evaluation methods. In: Mayne, P.W., Hryciw, R. (Eds.) Innovations and Applications in Geotechnical Site Characterization. Geotechnical Special Publication, vol. 97. ASCE, Reston, VA, S. 49 – 64.

Ciugudean, V. & D. Martinof, 2000: Geological, geomorphological and hydrogeological conditions in the city area of Bucharest, Internal Report S.C. Metroul S.A., Bucharest.

Hannich, D. & A. Danchiv, 2007: A hydrogeologic groundwater flow model for Bucharest and its connection with site effects at earthquakes, Scientific Communications at the University of Karlsruhe, AGK, June 2007.

Holzer, T.L., J.L. Blair, T.E. Noce, M.J. Bennet, 2006: LIQUEMAP: a real-time post-earthquake map of liquefaction probability. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, CA, Paper No. 89.

Ishihara, K. & V. Perlea, 1984: Liquefaction-associated ground damage during the Vrancea earthquake of March 4, 1977, Soils and Foundations, Bd. 24, No. 1, S. 90 – 112.

Iwasaki, T., T. Arakawa, K. Tokida, 1982: Simplified procedures for assessing soil liquefaction during earthquakes. Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, UK, S. 925 – 939.

Juang, C.H., H. Yuan, D.H. Lee, P.S. Lin, 2003: Simplified CPT-based method for evaluating liquefaction potential of soils. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 129 (1), S. 66 – 80.

Juang, C. H., S. Y. Fang, E. H. Khor, 2006 : First-order reliability method for probabilistic liquefaction triggering analysis using CPT. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE 132 (3), S. 337 – 350.

Lee, D.-H., C.-S. Ku, H. Yuan, 2003: A study of the liquefaction risk potential at Yuanlin, Taiwan, Engineering Geology, Bd. 71,S. 97 – 117.

Liteanu, G., 1951: Geology of the city of Bucharest. Technical Studies, Series E, Hydrogeology, Bucuresti, No.1, (in Romanian).

Olsen, R.S. (1997): Cyclic liquefaction based on the cone penetration test. In: Youd, T.L. and Idriss, I.M. (Eds.), Proceedings of the NCEER Workshop of Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, State University of New York at Buffalo, Buffalo, NY, 225 – 276.

Osinov, V. (2003): A numerical model for the site response analysis and liquefaction of soil during earthquakes. Geomechanical Measurement and Modelling, S. 475 - 481.Perlea, V. & M. Perlea, 1984: Dynamic stability of sandy layers (in Romanian Language). Editura Tehnica, Bucuresti, Romania.

Robertson, P. & C. Wride, 1998: Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 35, No. 3, S. 442 – 459.

Seed, H.B. & I.M. Idriss, 1971: Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, Journal of Geotechn. Engin. Division, ASCE, Vol. 97, No. 9, S. 1249 – 1273.

Sokolov, V. & K.-P. Bonjer, 2006: Modeling of distribution of ground motion parameters during strong Vrancea (Romania) earthquakes, Proceedings of First Europ. Conf. on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, paper 363.

Sonmez, H., 2003: Modification to the liquefaction potential index and liquefaction susceptibility mapping for a liquefaction-prone area (Inegol-Turkey), Environmental Geology, 44 (7), S. 862 – 871.

Sonmez, H. & C. Gokceoglu, 2005: A liquefaction severity index suggested for engineering practice, Environmental Geology, 48, S. 81 – 91.

Studer, J.A. & M.G. Koller, 1997: Bodendynamik, Springer Verlag Berlin, Heidelberg.

Yan, L. & K. Lum, 2003: Liquefaction assessment of gravely soils for dam safety evaluation, ICOLD Congress, Montreal.

Yuan, H., S.H. Yang, R.D. Andrus, C.H. Juang, 2003: Liquefaction-induced ground failure: a study of the Chi-Chi earthquake cases, Engineering Geology 17, S. 141 – 155.

Youd, T.L., Th. L. Holzer, 1994: Piezometer performance at Wildlife liquefaction site, California. Journal of Geotechnical Enginerring, 120(6), p. 975 – 995.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

Kienzle, A., D. Hannich, W. Wirth, D. Ehret, J. Rohn, V. Ciugudean, K. Czurda (2006): A GIS-based study of earthquake hazard as a tool for the microzonation of Bucharest. Engineering Geology, Bd. 87, S. 13 – 32.

Hannich, D., Hötzl, H., and Cudmani, R., 2006: Einfluss des Grundwassers auf die Schadenswirkung von Erdbeben – ein Überblick. *Grundwasser*, Bd. 11, No. 4, S. 286 – 294.

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Ehret, D., D. Hannich, J. Rohn, C. Grandas, G. Huber (2007): Seismic microzonation for earthquake hazard forecast – Numerical modelling of site effects incorporating non-linearity and groundwater level changes. International Conference on Geological Engineering, Wuhan, China, 6 S.

Ehret, D., D. Hannich, S. Schmitt, G. Huber (2007): Numerical modelling of site effects – Influences of groundwater level changes. 1st IASME/WSEAS Int. Conf. on Geology and Seismology, Portoroz, Slovenia, S. 233 – 237.

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Hannich, D., Ehret, D., Hoetzl, H., Grandas, C., Huber, G. and Bala, A. (2007): Site response and liquefaction risk analysis for Bucharest, Romania. Proceedings, AGU-Fall Meeting, December 10-14, 2007, San Francisco, California.

Hannich, D., Hoetzl, H., Ehret, D., Huber, G., Danchiv, A. and Bretotean, M. (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors, Proceedings, EGU-Vienna, April 15-20, 2007.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, G. Huber, A. Danchiv, M. Bretotean (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 205 – 221.

Hannich, D., G. Huber, D. Ehret, H. Hötzl, S. Balan, A. Bala, M. Bretotean, V. Ciugudean (2007): SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania. Thirty Years from the Romania Earthquake of March 4, 1977, Bucharest, Romania.

Ehret, D., D. Hannich, G. Huber, C. Grandas, V. Ciugudean (2007): Numerical modelling of site effects incorporation non-linearity and groundwater level changes. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, S. 263 – 268.

Ehret, D., S. Schmitt, D. Hannich, V. Osinov (2007): Non-linear Modelling for Estimating Site Effects in Bucharest, Romania. Geoph. Res. Abstr., Bd. 9.

Bala, A., B. Grecu, D. Hannich, D. Ehret, V. Raileanu (2007): Methods to assess the site effects based on in situ measurements in Bucharest city. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 248 – 252.

Grandas, C., G. Huber, D. Hannich, D. Ehret, H. Hötzl, J. Ritter (2007): Field investigations and site response analysis for Bucharest. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 253 – 258.

Huber, G., D. Hannich, D. Lungu (2007): Soil conditions and site effects. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 181 – 189.

Bala, A., S. F. Balan, J. R. R. Ritter, D. Hannich, G. Huber, J. Rohn (2007): Seismic site effects based on in situ borehole measurements in Bucharest, Romania. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 190 – 204.

Balan, S. F., A., Bala, J. R. R. Ritter, D. Hannich, G. Huber, J. Rohn (2007): Geotechnical laboratory tests for the microzonation of Bucharest. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, S. 244 – 247.

Hannich, D., Ehret, D., Huber, G., Hoetzl, H., Balan, S., Bala, A., Bretotean, M. and Ciugudean, V. (2006): New site-dependent dynamic characteristics for shallow porous aquifers in Bucharest, Romania, using SCPTU-techniques. Proceedings, EGU-2006, Wien, 2-7 April 2006.

Hannich, D., Hoetzl, H., Ehret, D., Huber, G., Danchiv, A., Ciugudean, V., and Bretotean, M. (2006): Liquefaction potential influenced by site- and time-variable groundwater level. Proceedings, 100th Anniversary Earthquake Conference, April 18-22, 2006, San Francisco, California.

Ehret, D., G. Huber, D. Hannich, V. Osinov (2006): Seismic Microzonation of Bucharest - Numerical Modelling of Site Effects. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, S. 333.

Ehret, D., G. Huber, D. Hannich, V. Osinov (2006): Numerical modelling of site effects for Bucharest. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France.

Ehret, D., A. Kienzle, D. Hannich, J. Rohn, V. Ciugudean (2005): Seismic Microzonation of Bucharest based on non-linear Modelling. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 369 – 371.

Ehret, D., D. Hannich, W. Wirth, J. Rohn, V. Ciugudean, F. Zamifirescu (2005): Seismic Microzonation based on geotechnical Parameters - Estimation of Site Effects in Bucharest (Romania). Geoph. Res. Abstr., Bd. 7, 2 S.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, G. Huber, M. Bretotean, A. Danchiv, V. Ciugudean (2006): The Impact of Hydrogeology on Earthquake Ground Motion in Soft Soils. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, S. 332 – 333.

Hannich, D., G. Huber, D. Ehret, H. Hötzl, S. Balan, A. Bala, M. Bretotean, V. Ciugudean (2006): SCPTu-techniques used for shallow geologic/hydrogeologic site characterization in Bucharest, Romania. Third International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble, France, Bd. 1, S. 981 – 992.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, M. Bretotean, A. Danchiv, V. Ciugudean (2005): The impact of hydrogeology on the earthquake ground motion in soft soils. 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, Lisbon, Portugal, S. 358 – 361.

Hannich, D., Hötzl, H., Ehret, D., Bretotean, M., Danchiv, A., and Ciugudean, V. (2005): The impact of hydrogeology on earthquake ground motion in soft soils. Proceedings, Intern. Conference 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake, S. 358 – 361.

Wenzel, F., G. Schmitt, V. Sokolov, B, Sperner, D. Hannich, M. Böse, M. Markus, D. Lungu, G. Marmureanu (2006): Earthquake risk research in Romania – 10 years of collaborative efforts. First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, S. 333.

c) in Monographien

keine

5.2.2.3 Vorträge

Hannich, D., Hoetzl, H., Ehret, D., Huber, G., Danchiv, A. and Bretotean, M. (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors, EGU-Vienna, April 15-20, 2007.

Hannich, D., H. Hötzl, D. Ehret, G. Huber, A. Danchiv, M. Bretotean (2007): Liquefaction probability in Bucharest and influencing factors, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, Oct. 2007, S. 205 – 221.

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von Januar 2005 bis Dezember 2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	206.400 €	20.810 €	0	227.210 €
2005	70.800 €	76.900 €	0	147.700 €
2006	70.800 €	1.000 €	0	71.800 €
2007	70.800 €	700 €	0	71.500 €
Summe	**418.800 €**	**99.410 €**	**0**	**518.210 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Hötzl, H., Prof. Dr. 2. Bretotean, M., Dr. 3. Danchiv, A, Prof. Dr. 4. Ehret, D., Dipl.-Geol. 5. Huber, G., Dr. 6. Zamfirescu, F., Prof. Dr. 7. Bonjer, K., Dr. 8. Ciugudean, V., Dipl.-Ing.	Hydrogeologie Hydrogeologie Hydrogeologie Ingenieurgeologie Bodenmechanik Hydrogeologie Geophysik Ingenieurgeologie/Hydrog.	GEOL INHGA-Bukarest Uni-Bukarest GEOL IBF Uni Bukarest GEOK METROUL-Bukarest	01/2002 -12/2007 01/2002 -12/2007 01/2002 -12/2007 01/2002 -12/2007 01/2005 -12/2007 01/2002 -12/2007 01/1996 -12/2006 01/1999 -12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Hannich, D., Dr. Fürle, J. Meixner, J.	Hydrogeophysik Hydrogeologie Hydrogeologie	Geologisches Institut Geologisches Institut Geologisches Institut	01/1999 - 12/2007 12/2004 - 04/2007 05/2006 - 03/2007	BAT IIa stud. HK stud. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt C3

Planung und Durchführung von Hilfsmaßnahmen:

Modellbildung und Simulation

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Prof. Dr. Fritz Gehbauer
Dipl.-Ing. Hagen Engelmann
Dipl.-Ing. Michael Markus
Dipl.-Ing. Theodoros Zikas

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt C3

5.1.1 Titel:

Planung und Durchführung von Hilfsmaßnahmen:
Modellbildung und Simulation

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Baubetrieb, Projektmanagement, Katastrophenmanagement

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr. Gehbauer, Fritz, 13.05.1945
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
Universität Karlsruhe (TH)
Am Fasanengarten, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 - (0)721 - 6082647
Telefax: +49 - (0)721 - 695245
E-Mail: gehbauer@tmb.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Hagen Engelmann
Dipl.-Ing. Michael Markus
Dipl.-Ing. Theodoros Zikas

5.1.5 Rumänische Partner:

Prof. Dr.-Ing. Ion Popa, Universitatea Ecologică (Ökologische Universität), Bukarest, Rumänien
BG Constantin Zamfir, Inspectoratul General pentru Situații de Urgență (Generalinspektorat für Notfallsituationen), Bukarest, Rumänien
Prof. Lungu, Dan - Technical University of Civil Engineering (UTCB), Bukarest, Rumänien
Dr. Craifaleanu, Iolanda - National Institute for Building Research (INCERC), Bukarest, Rumänien

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das Teilprojekt C3 beschäftigt sich mit dem Einsatz von Computersystemen im Katastropheneinsatz sowie der Simulation und Schadensabschätzung von Erdbebenereignissen. In der aktuellen Antragsperiode wurden die Arbeiten bezüglich Unterstützungssystemen für den Katastropheneinsatz abgeschlossen und ein neues Modell zur Bewertung von Verstärkungsmaßnahmen entwickelt. Dabei wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- Koordination der SFB-Aktivitäten bei der Erstellung des geplanten Disaster Management Tools (DMT) und Test des DMT bei einer Katastrophenschutzübung mit dem rumänischen Zivilschutz,
- Weiterentwicklung des Schadensprognosemodells EQSIM und Erweiterung um eine Komponente zur Beurteilung von Kosten und Nutzen von Verstärkungsmaßnahmen,
- Entwicklung einer geeigneten Mensch-Maschine-Schnittstelle zur Anbindung der Softwareagenten Ressourcenoptimierung in ein integriertes Entscheidungsunterstützungssystem für Katastrophenstäbe.

Das Disaster Management Tool ist ein Computer gestütztes System, das durchgängig von der Schadensabschätzung, Schadenserfassung, Entscheidungsunterstützung bis hin zur Kommunikation und Darstellung von Ergebnissen die gesamte Informationskette ganzheitlich abbildet, die im Katastrophenmanagement nach Erdbeben benötigt wird. Es besteht aus Komponenten der ingenieurwissenschaftlichen Teilprojekte. Die Koordination der Beiträge der verschiedenen Teilprojekte, die Konzeption und Implementierung der Systemarchitektur sowie die Vorbereitung der Stabsübung lagen in der Verantwortung von Teilprojekt C3. Die Architektur wurde in der aktuellen Antragsphase zu einem modularen System mit einer auf XML basierenden Kommunikationsschnittstelle weiterentwickelt. Die Großübung ATLAS 2007 wurde in Bukarest im Oktober 2007 in Zusammenarbeit mit dem Genaral-Inspektorat für Notfallsituationen und allen üblicherweise im Katastrophenfall involvierten Organisationen ausgerichtet, um das DMT und seine Komponenten zu erproben und zu validieren. Die Übung war in eine Stabs- und eine Feldübung aufgeteilt. Die Funktionalität des DMT wurde unter realistischen Bedingungen demonstriert.

Das in das DMT integrierte Schadensprognosemodells EQSIM, verwendet die Ergebnisse aus den anderen Projekten des Sonderforschungsbereiches. In der bisherigen Version von EQSIM konnten Schadensszenarien für das Testgebiet des Son-

derforschungsbereiches im Zentrum von Bukarest berechnet werden. In dieser Antragsphase wurde die Software um eine Komponente zur Beurteilung der Kosten und Nutzen von Verstärkungsmaßnahmen erweitert. Dazu wurde eine Kostendatenbank aufgebaut und verschieden Methoden zur Berechnung implementiert. Zusätzlich wurde die Steuerung und Visualisierung in Google Earth eingebunden und die Übertragbarkeit auf neue Gebiete untersucht.

Die im Rahmen des Teilprojekts C3 entwickelt Softwareagenten zur Optimierung des Ressourceneinsatzes konnten bereits autonome Entscheidungen in einer simulierten Umwelt treffen. Dieses Einsatzgebiet wurde zu einem Entscheidungsunterstützungssystem für reale Einsätze erweitert. Die Kommunikation der Agenten wurde dazu auf das neue XML Meldungsformat des DMT umgestellt, wodurch die Agenten Nachrichten sowohl von realen wie auch simulierten Einsatzkräften verarbeiten können. Die Informationsverarbeitung der Agenten wurde unter anderem um eine Inferenzmaschine ergänzt, wodurch eine differenziertere Verarbeitung von Informationen möglich ist. Die von den Agenten getroffenen Entscheidungen bzw. Hilfestellung werden um natürlichsprachliche Erläuterungen und Bewertungen ergänzt, die in der integrierten Benutzerschnittstelle des DMT dargestellt werden.

Weiterhin wurde die Simulationskomponente des DMT so erweitert, dass sie zum Einen als Schulungssystem für Katastrophenstäbe eingesetzt werden kann und zum Anderen als Bestandteil der Entscheidungsunterstützung dient.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Die effiziente Bewältigung von Erdbebenkatastrophen stellt große Anforderungen an alle beteiligten Akteure. Dabei sind die ersten drei Tage eines Einsatzes, die für die Rettung von Menschenleben von großer Bedeutung sind, auch heute noch von fehlender Organisation und chaotischen Verhältnissen geprägt (COMFORT 2000). Grund hierfür sind vor allem Mängel in Bereichen der Information, Koordination und Kommunikation. Zudem fehlen häufig geeignete Schadensprognosemodelle, die unmittelbar nach einem Erdbebenereignis erste Abschätzungen über das Schadensausmaß erlauben. Computergestützte Systeme könnten hier Helfer entlasten und die Entscheidungsfindung im Einsatz sowie in der Katastrophenplanung unterstützen. Allerdings handelt es sich bei den bisher verfügbaren Systemen hauptsächlich um reine Informationssysteme, die verfügbaren Informationen aufbereiten und visualisieren sowie Dokumentation bereitstellen. Ganzheitliche Systeme, die sowohl von Feldkräften als auch vom Katastrophenstab genutzt werden und alle verfügbaren Informationen bündeln, existieren praktisch nicht. Daher ist es dringend erforderlich, die theoretischen Grundlagen zur Schaffung effektiver Katastrophenmanagementsysteme, deren Entwicklung weltweit gefordert wird, zu erforschen und zu erarbeiten. Das Teilprojekt C3 beschäftigt sich mit dieser Thematik schon seit mehreren Jahren. Der

Forschungsschwerpunkt liegt dabei (1) in der Entwicklung geeigneter Schadensprognosewerkzeuge, (2) in der Erstellung eines Systems zur Entscheidungsunterstützung basierend auf Ansätzen der Künstlichen Intelligenz und Simulationstechnik sowie (3) in der Konzeption eines ganzheitlichen Computersystems für Planung und Einsatz. In der vierten Antragsphase waren im Rahmen des Teilprojekts folgende Ziele zu erreichen:

- Erweiterung des Schadensprognosetools EQSIM,
- Weiterentwicklung der vorhandene Systemkomponenten zur Entscheidungsunterstützung und die Entwicklung einer Interaktionsschnittstelle für Anwendern im Katastrophenstab,
- Koordination der SFB-Aktivitäten bei der Erstellung und Erprobung des Disaster Management Tools (DMT), welches ein ganzheitliches Werkzeug für Katastrophenplanung, -einsatz und -training darstellt.

Das Schadensprognose-Tool EQSIM berechnet auf Basis der Kapazitäts-Spektrum-Methode Schadensszenarien zu Gebäude- und Personenschäden für Einzelgebäude in dem im SFB verwendeten Testgebiet von Bukarest, bestehend aus ca. 1305 bewohnten Gebäuden. EQSIM arbeitet auf Basis einer Client-Server-Architektur, wobei ein Server die Berechnungen durchführt und Clients zur Visualisierung dienen. Die Ergebnisse einer Schadensberechnung werden mit Hilfe einer GIS-Oberfläche, die im Rahmen der letzten Antragsphase im Teilprojekt C6 entwickelt wurde, thematisch dargestellt. EQSIM ist in die GIS-Oberfläche des Disaster Management Tool (DMT) integriert und nutzt ebenfalls die gemeinsame DMT-Datenbank. Außerdem sind die Ergebnisse andere Teilprojekte des Sonderforschungsbereiches, wie z.B. Bodenbeschleunigung am Standort, Kapazitätsspektren zum Gebäudeverhalten oder Abklingfunktionen, eingebunden. Die berechneten Schadensszenarien durch EQSIM erlauben eine Beurteilung der gewählten Eingangsparameter und dienen zusätzlich als Eingangsgröße für die Entscheidungsunterstützungskomponenten des DMT.

In dieser Antragphase sollte EQSIM um eine Komponente zur Analyse der Kosten und Nutzen von Verstärkungsmaßnahmen erweitert werden. Dabei war das Ziel, die bereits vorhandenen Methoden zu verwenden und so abzustimmen, dass das Gebäudeverhalten mit nachträglicher Verstärkung durch die Simulationssoftware berechnet und zusätzlich durch Kosten bewertet werden können. Die Schadensvermeidung durch eine Berechnung vor und nach einer Verstärkung bildet den Nutzen dieser Maßnahme für das spezifische Szenario. Mit Hilfe der monetären Bewertung eines Schadens vor und nach einer Maßnahme kann eine Kosten-Nutzen-Betrachtung erfolgen. Da bisher die Simulationssoftware für ein größeres Gebiet ausgelegt ist, sollte auch die Betrachtung der Kosten und Nutzen der Gebäudeverstärkung für ein Gebiet mit einer hohen Anzahl an unterschiedlichen Gebäuden mit einem hohen Detaillierungsgrad möglich sein. Darüber hinaus sollte die Übertragbarkeit von EQSIM auf andere erdbebengefährdete Gebiete am Beispiel Istanbul überprüft werden.

Das Katastrophenmanagementsystem für die Optimierung der Ressourcenverteilung wurde bereits in der vorherigen Antragsphase entwickelt. Das System besteht aus einer Simulationskomponente, die die Arbeiten während der Rettungs- und Bergungsphase simuliert und einer Entscheidungskomponente, die den Ressourceneinsatz effizient steuert. Die Simulation berücksichtigt dabei auch dynamischen Sekundärkatastrophen wie Feuer. Ein Brandausbreitungsmodell ermöglicht, die Simulation eines realistischen Verlaufs einer Brandausbreitung unter Berücksichtigung von Löschmaßnahmen. Die Entscheidungskomponente ordnet die vorhandenen Ressourcen den Einsatzgebieten so zu, dass der Gesamtschaden minimiert wird. Da die Entscheidungskomponenten bisher autonom in einer simulierten Umwelt agieren, galt es in der aktuellen Antragsphase diese so weiterzuentwickeln, dass sie den Mitgliedern eines Katastrophenstabes während realer Katastrophen Entscheidungsunterstützung liefern können.

Im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion von Agenten für das Katastrophenmanagement ist bisher wenig Forschungstätigkeit vorhanden. Die wohl wichtigsten Forschungsansätze auf dem Gebiet des Einsatzes von Softwareagenten für das Katastrophenmanagement nach Erdbeben werden durch die Initiative Robocup Rescue geliefert. Hier agieren autonome Softwareagenten in einer simulierten Katastrophenwelt, um die Rettungseinsätze zu steuern. Obwohl es in der Vision von Robocup Rescue vorgesehen ist, dass Schnittstellen zu Einsatzkräften und Katastrophenstab entwickelt werden (TADOKORO 2000), wurden derartige Ansätze bisher nicht verwirklicht. Aktuelle Bestrebungen sind dahingehend ausgerichtet, das Simulationssystem zu verfeiern und Agenten zu entwickeln, die zu Beginn über keine Basisinformationen über das Testgebiet verfügen. Auch andere Modellansätze, die Softwareagenten für das Katastrophenmanagement von Überschwemmungen (MOLINA UND BLASCO 2003), Waldbränden (JABER ET AL. 2001) oder humanitärer Hilfsaktionen (MAAMAR ET AL. 2003) einsetzen, vernachlässigen den Aspekt der Nutzerschnittstelle. In anderen Bereichen wird versucht, Agenten mit solchen Schnittstellen zum Endnutzer zu versehen. Dies umfasst beispielsweise agentenbasierte Terminplanung (CHALUPSKY ET AL. 2001; MYERS 2001, MARTIN ET AL. 2003) oder Routenplanung im militärischen Bereich (PAYNE ET AL. 2000). All diese Systeme beschränken sich allerdings darauf, Softwareagenten zur Informationssammlung und für die eigenständige Durchführung klar definierter Aufgaben zu nutzen. Gerade bei Entscheidungen im Bereich des Katastrophenmanagements ist es allerdings notwendig, dass der Stab aktiv Entscheidungsvorschläge erhält und diese auch begründet werden, z.B. indem Nutzer die vorgeschlagene Handlung nicht akzeptieren über mögliche Konsequenzen informiert werden).

Im Bereich der Schnittstellen zu den Einsatzkräften im Feld gibt es gab es zum Beginn des Antragszeitraums verstärkt Bestrebungen, die Kommunikation im Bereich Katastrophenmanagement zu so zu standardisieren, dass die Nachrichteninhalte automatisch in Computerprogrammen verarbeitet werden können. Einen effizienteren Ansatz liefern hier die Codierung mittels der eXtended Markup Language (XML) (ECKSTEIN 2004). So befindet sich das Common Alerting Protocol (CAP) im Aufbau, in dem relevante Informationen in objektähnlicher Struktur mit Hilfe von XML ausgetauscht werden (BOTERELL 2004). Geplantes Einsatzgebiet ist hier allerdings hauptsächlich das Verschicken standardisierter Meldungen für Alarm und Frühwarnsysteme. CAP ist daher in dieser Form für den Katastropheneinsatz nicht nutzbar. (IEEE 2000) beschreibt einen Standard, der Nachrichten für Notfalleinsätze in unterschiedlichen Bereichen wie Verkehrsunfälle, Unfälle mit Gefahrgütern und Einsätzen bzgl. der öffentlichen Sicherheit standardisiert. Es wird dabei in Statusmeldungen, Meldungen bezüglich des Ereignisses und Meldungen zum Management der Einsatzzentralen unterschieden. An einer XML-Codierung der Meldungen nach diesem Standard wird zurzeit gearbeitet. Allerdings wird hier verstärkt auf die Einbeziehung natürlichsprachliche Aussagen Wert gelegt, die eine automatisierte Auswertung durch Computerprogramme zur Einsatzunterstützung erschweren.

Ganzheitliche Computersysteme, die sowohl in der Katastrophenplanung, bei Übungen und im Katastropheneinsatz genutzt werden können, existierten bei noch nicht, obwohl der Bedarf solcher integrierter Systeme seit einiger Zeit bekannt ist (MCAFEE 1999; COMFORT 2002). Die Anzahl der Stand-Alone-Tools, die jeweils in den unterschiedlichen Bereichen eingesetzt werden, hat sich inzwischen stark erhöht, ihr Einsatzgebiet ist allerdings aufgrund eines fehlenden Gesamtkonzeptes stark limitiert (JAIN AND MCLEAN 2003). Das Entscheidungsunterstützungs-Werkzeug WaveLet wird momentan für das Katastrophenmanagement nach Starkbeben entwickelt (CHEN YONG ET AL. 2001). Es verfolgt einen ähnlichen Ansatz, in dem Schadensabschätzung und Handlungsvorschläge kombiniert werden. Allerdings basieren die Berechnungen nicht auf Informationen über Einzelgebäude sondern nur über Stadtbezirke und die Kommunikationskomponente ist wenig ausgeprägt. Dies erschwert die Einbindung in Katastrophenmanagement-Prozesse. Eine Analyse der Fraunhofer Gesellschaft, die verfügbare Systeme analysierte, kam ebenfalls zu dem Ergebnis, dass vor allem in den Bereichen der Integration und Verknüpfung heterogener Informationen, bei Kommunikationssystemen sowie bei der Datenaktualisierung nach einer Katastrophe noch erheblicher Handlungsbedarf besteht (FRAUNHOFER 2002). Das Disaster Management Tool, das im Rahmen dieses Sonderforschungsbereichs entwickelt wurde, bietet für diese Problematik einen integrierten Lösungsansatz an, indem es unterschiedliche Simulations-, Planungs- und Kommunikationskompo-nenten miteinander koppelt. Informationen für Katastrophenplanung und –einsatz werden in einer zentralen Datenbank vorgehalten und während eines Einsatzes ständig aktualisiert.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Im Folgenden werden die Methoden und Ergebnisse für die unterschiedlichen Themenkomplexe beschrieben, die im Rahmen des Teilprojekts C3 untersucht wurden. Im Einzelnen handelt es sich hierbei um die

- Erstellung einer Kosten-Nutzen-Komponente für EQSIM,
- eine Weiterentwicklung der Entscheidungskomponenten zu einem Entscheidungsunterstützungssystem für Katastrophenstäbe nach Erdbeben,
- die Fertigstellung des Disaster Management Tools DMT.

Erstellung einer Kosten-Nutzen-Komponente für EQSIM

Um unverhältnismäßige Kosten bei der seismischen Ertüchtigung zu vermeiden, werden geeignete Analyse- und Prognosemethoden benötigt, die eine Investition und dessen Auswirkung auf zukünftige Erdbebenereignisse abschätzen. Während bei der Prognose von Gebäudeschäden durch seismische Beanspruchung viele Schadensmodelle existieren, berücksichtigen diese oft nicht die ökonomischen Entscheidungskriterien und deren Auswirkungen im Erdbebeningenieurswesen. Sollen öffentliche Ressourcen für Ertüchtigungsprogramme verwendet werden, so kann die Kosten-Nutzen-Analyse als klassisches Instrument zur Bewertung öffentlicher Maßnahmen herangezogen werden. Öffentliche Projekte sollen durch eine optimale Ressourcenallokation zu einer größtmöglichen gesellschaftlichen Nutzensteigerung führen (MÜHLENKAMP 1994). Die Kosten-Nutzen-Analyse gehört zu den Methoden der dynamischen Wirtschaftlichkeitsrechnung für komplexe Situationen. Alle relevanten Kosten und Nutzen eines Projektes werden in Geldeinheiten quantifiziert und auf einen gemeinsamen Zeitpunkt bezogen.

Im ersten Schritt müssen die sozioökonomischen Variablen eines Projektes bestimmt und abgeschätzt werden, ob die sozialen und wirtschaftlichen Ziele durch das Ertüchtigungsvorhaben erreicht werden. Vor allem sind die wichtigen direkten und indirekten sozialen und wirtschaftlichen Auswirkungen auf Betroffene und Gesellschaft zu analysieren. Zu den direkten Auswirkungen eines Erdbebenereignisses zählen Schäden an der Gebäudestruktur und dem Inventar, zu den indirekten Kennzahlen einer Gesellschaft beispielsweise die Veränderung der Arbeitslosigkeit oder Steuerausfälle. Die Nutzvariablen können aus ökologischer, physischer, humaner, sozialer und ökonomischen Sicht betrachtet werden.

Für jedes Projekt sollten bei der anschließenden Durchführbarkeits- und Optionsanalyse mindestens zwei Alternativen für die Höhe des Ertüchtigungsgrades in Betracht gezogen werden: Alternative 1) „Status quo“ als Referenzkonzept und 2) z.B. Zielertüchtigungsgrad „Lebenssicherheit“ für ein wiederkehrendes Referenzerdbeben.

Zusätzlich bieten sich weitere Alternativen an, wie z.B. „Funktion erhalten“, bei denen der Betrieb während und nach einem Erdbebenereignis gewährleistet werden soll. Die Wahl des Ertüchtigungsverfahrens bestimmt sich anhand einer Abstimmung zwischen Tragwiderstand und Duktilität für das spezifische Gebäude. Eine reine Verstärkung und damit Erhöhung des Tragwiderstandes führt in der Regel zu einer erhöhten Steifigkeit und eine Verminderung der Duktilität, was sich ungünstig auf das Erdbebenverhalten auswirken kann. Die anschließende Berechnung der finanziellen und wirtschaftlichen Kennzahlen basiert auf dem Vergleich von Untätigkeitsszenario mit den gewählten Projektalternativen.

Das Schadensprognose-Tool EQSIM wurde um eine Berechnung der Kosten und Nutzen von Gebäudeverstärkungen für einen Gebäudebestand auf Basis der Kapazitäts-Spektrum-Methode erweitert. Die Kernelemente der Erweiterung bestehen aus einer Kostendatenbank mit über 2000 Projekten, der Berechnung des Gebäude- und Personenschadens auf Basis unterschiedlicher Kurven zum Gebäudeverhalten mit und ohne Verstärkung sowie der monetären Bewertung der Schäden und deren direkten monetären Auswirkungen. Zudem wurde die Benutzeroberfläche überarbeitet sowie die Bedienung und Visualisierung in Google Earth integriert.

Zur Abschätzung der Kosten einer Ertüchtigung wurde eine Kostendatenbank, hauptsächlich basierend auf den erhobenen Daten aus FEMA (1995), aufgebaut die über 2000 Kostendatensätze umfasst (ZIKAS 2007). Die Unterteilung der Daten erfolgt nach Gebäudeklasse, Schutzziel, Brutto-Grundfläche, Erstellungsjahr, seismischer Zone und Kosten in Euro für das Jahr 2002. Eine Abschätzung der Kosten für geplante Ertüchtigungsmaßnahmen erfolgt auf Basis der Kostendatenbank, dem festgelegtem Schutzziel durch den Benutzer und den spezifischen Gebäudeinformationen Höhe, Grundfläche und Gebäudeklasse aus der Gebäudedatenbank. Dabei werden Mittelwert sowie das untere und obere Quartil gebildet und in den Ergebnistabellen der Szenario-Berechnung gespeichert.

Die Abschätzung des Gebäudeverhaltens infolge von seismischer Beanspruchung erfolgt in EQSIM mittels der Kapazitäts-Spektrum-Methode (FIEDRICH ET AL. 2002). Die Methode und Vorgehensweise ist an der HAZUS-Methodologie (NIBS 1997) angelehnt und wurde an die entsprechenden Randbedingungen in Rumänien angepasst. Neue Kapazitätskurven für die Gebäudeklassen C in Rumänien wurden in dieser Antragsphase integriert, um genauere Schadensbilder zu erhalten. Für die Berechnung des Schadens nach einer Gebäudeertüchtigung sind für jede Gebäudeklasse in der Datenbank neue Kapazitätskurven für unterschiedlichen Grade enthalten. Sie wurden anhand der Kurven aus (SMYTH ET AL. 2004) an die rumänischen Bedingungen mit Hilfe einer Abschätzung durch Monte Carlo Simulation angepasst. Über den Client kann der Benutzer den gewünschten Ertüchtigungsgrad auswählen und die Berechnung erfolgt für diesen Fall. Zudem lässt sich die Berechnung für eine bestimmte Nutzungsart einschränken. Eine Übersicht über die EQSIM Architektur gibt Abbildung 1.

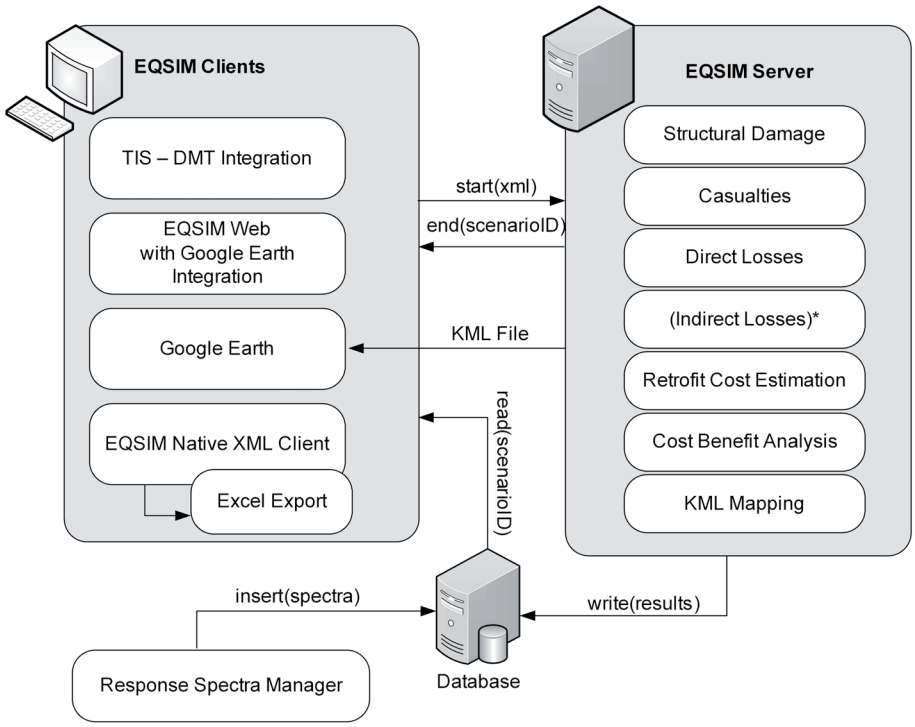


Abbildung 1: Übersicht über die EQSIM Architektur und Module.

Die strukturellen Schäden am Gebäude müssen für eine Kosten-Nutzen-Analyse monetär bewertet werden. Die Simulationssoftware berechnet die Reparaturkosten und die Kosten für einen kompletten Wiederaufbau nach einem kompletten Schaden. Zusätzlich werden die Kosten durch die Nutzungsunterbrechung eines Gebäudes in der spezifischen Nutzungsklasse berechnet. Jeder Schadensklasse ist ein prozentualer Anteil des Gebäudeneuwertes zu einer Gebäudeklasse und Nutzungsart zugeordnet. Für den Schadenszustand „Einsturz“ und „Vollständig“ werden die kompletten Kosten für den Wiederaufbau des Gebäudes angesetzt. Die Kosten im Schadenszustand „Leicht“ werden mit 1% und der Schaden „Mittel“ mit 20% des Gebäudeneuwertes berechnet. Die kompletten Kosten für ein Schadensszenario können so, über die Summe gruppiert, nach Gebäudeklasse oder Nutzungsart dargestellt werden.

Neben den Reparatur- und Wiederaufbaukosten werden die Kosten für Beschädigung der Inneneinrichtung, Umsiedlungskosten, Einkommensverluste und Mietverluste abgeschätzt. Die Vorgehensweise richtet sich nach der HAZUS-Methodologie und die Ergebnisse sind für jedes Szenario in der Datenbank abgelegt.

Ein Hauptgrund für die Ertüchtigung von Wohngebäuden, vor allem im analysierten Testgebiet von Bukarest, ist die Vermeidung zukünftiger Opfer bei starken seismischen Ereignissen. Dabei spielen die vorhandenen und begrenzten finanziellen Mittel und deren effektiver Einsatz bei der Entscheidung für eine nachträgliche Ertüchtigung und Priorisierung eine wichtige Rolle. Durch die Kosten-Nutzen-Betrachtung kann ein Projekt auf seine Vorteilhaftigkeit untersucht werden. Dabei ist die finanziel-

le Opferbewertung ein ausschlaggebender Eingabewert. Gleichzeitig ist dieser Wert aber mit den größten Unsicherheiten verbunden. In vielen Bereichen werden die Sicherheitskosten für zusätzliche Schutzmaßnahmen abgeschätzt, z.B. sind Käufer von Automobilen bereit,einen erhöhten Betrag für ihre Sicherheit auszugeben. Die Höchstgrenze stellt die maximale Zahlungsbereitschaft für die Sicherheitsmaßnahmen dar und wird mit Willingness to Pay (WTP) bezeichnet. Sie ist abhängig von der Risikowahrnehmung und den möglichen Auswirkungen. Für Rumänien existieren bisher keine Erhebungen über die maximale Zahlungsbereitschaft zur Vermeidung von Erdbebenschäden und der Bereitschaft in Schutzmaßnahmen zu investieren. Nach (BOARDMAN 2001) wird ein Bereich von 2,5 und 4,0 Millionen Dollar (Werte für das Jahr 1999) für die USA angegeben. Dieser Bereich wurde im Verhältnis zum durchschnittlichen Einkommen für Rumänien abgeschätzt und als Eingangsparameter für die finanzielle Bewertung der Opfer angesetzt. EQSIM multipliziert den Mittelwert mit dem deterministischen Wert der Opferberechnung.

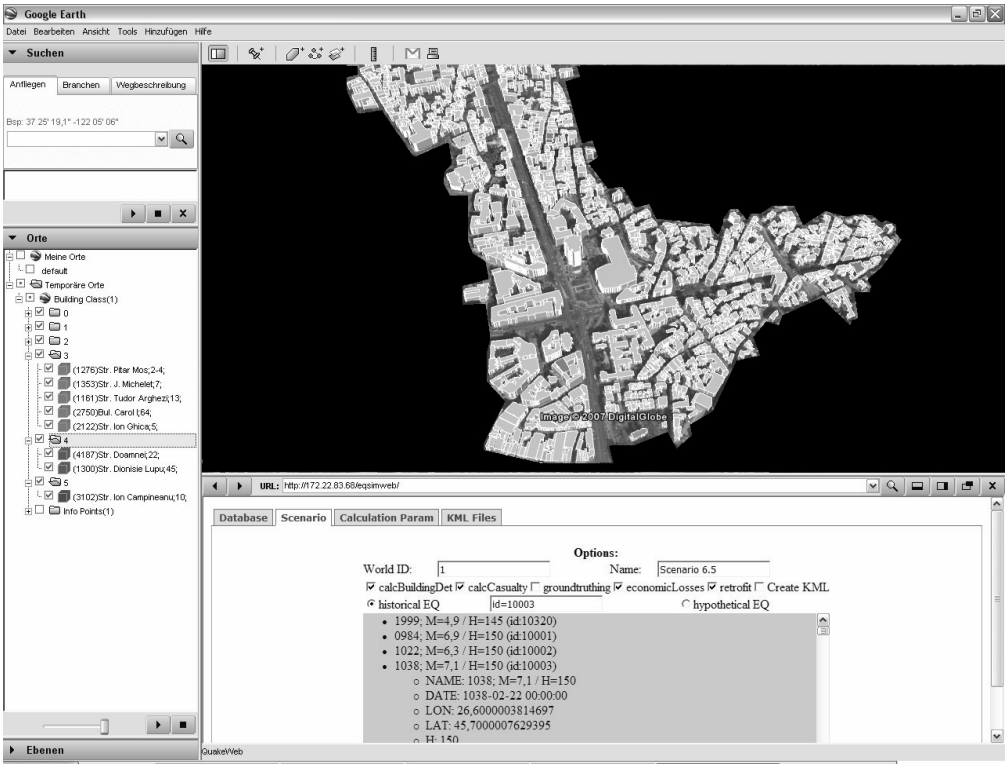


Abbildung 2: Bildschirmausschnitt einer EQSIM-Berechnung in Google.

Eine wesentliche Weiterentwicklung zur Vorbereitung von weiteren Forschungsansätzen bildet die Integration von EQSIM in Google Earth (siehe Abbildung 2). Die Überführung der Clientfunktionalität in Web2.0-Technologie und die Anbindung an ein frei verfügbares und populäres Programm wie Google Earth ermöglichen eine leichte Verbreitung und eine einfache Übertragbarkeit auf neue Gebiete. Der neue webbasierte Client lässt sich in Google Earth aufrufen und steuern. Nachdem die Einstellungen für eine Simulation vorgenommen wurden, schickt der Client eine XML-Datei an den EQSIM-Server, der die Berechnung durchführt. Nach der eigentlichen

Berechnung werden die Ergebnisse in einer thematischen Karte für Google Earth aufbereitet und können über den Web-basierten Client wieder aufgerufen werden. Die Farbcodierung der einzelnen Karten wird in der Datenbank festgelegt.

Zudem wurde der native EQSIM-Client aus der vorherigen Antragsphase um eine Microsoft Excel Exportfunktionalität erweitert. So können die gesamten Ergebnistabellen einer Berechnung, durch die Angabe einer einzelnen Szenario-ID oder einem Bereich, exportiert werden.

EQSIM lässt sich in der neuen Version sowohl mit Oracle bis zur Version 10g als auch mit der Open-Source Datenbank MySQL Version 5.0 verwenden. MySQL kann auf allen gängigen Plattformen eingesetzt werden, bietet eine gute Performance und ist sehr flexibel. Zudem fallen für den wissenschaftlichen Betrieb von MySQL keine Lizenzkosten an. Die neue Anbindung ist bei Folgeprojekten, bei denen der Server nicht mehr an der Universität Karlsruhe steht, wegen den niedrigen Betriebskosten besonders interessant. So lässt sich durch die neue Datenbankanbindung die Funktionalität von EQSIM auch vollständig auf einem Notebook demonstrieren.

Die Übertragbarkeit, Anwendung und Weiterentwicklung von EQSIM wurde in Istanbul mit Prof. Mustafa Erdik, Leiter des Departments für Erdbeben-Ingenieurswesen an der Bogazici University, diskutiert. Das System wurde live demonstriert und fand bei allen Beteiligten sehr guten Anklang. Angedacht ist, die Software für einen Bezirk in Istanbul anzuwenden, bei dem bereits eine gute Datengrundlage vorhanden ist.

Das Entscheidungsunterstützungssystem

Überblick

Die umfangreichen Schäden aufgrund von Erdbeben und die daraus resultierende Situation stellen außergewöhnliche Anforderungen an Einsatzkräfte wie auch Entscheidungsträger, auf die sie oft nur unzureichend vorbereitet sind. Ein großes Problem bereitet Katastrophenstäben die Verfügbarkeit bzw. Verarbeitung von Informationen. Direkt nach einem Erdbeben sind wenige und/oder unsichere Informationen verfügbar, während die Stabsmitglieder im Verlauf der Katastrophe von einer Informationsflut überrollt werden. Um eine möglichst optimale Bewältigung zu ermöglichen, sollte eine Vorbereitung auf, wie auch eine aktive Unterstützung während der Katastrophe verfügbar sein. Im Rahmen des Disaster Management Tools (DMT) wurde das Modul DMT-EOC[1] mit eben dieser Zielsetzung für Entscheidungsträger im Katastrophenstab entwickelt. Es besteht aus dem Schulungssystem EOC-TRAINER sowie einer Entscheidungsunterstützungskomponente dem EOC-ADVISOR.

[1] EOC ist die Abkürzung für Emergency Operation Center

Die Softwareagenten des EOC-ADVISOR wurden teilweise in der vorherigen Antragsphase entwickelt. Dort allerdings um eine optimale Zuordnung bei einem gegebenen Ressourcenszenario in einer simulierten Umwelt zu liefern. Damit der EOC-ADVISOR auf reale Katastrophen anwendbar ist, müssen seine Agenten fähig sein, Informationen aus der realen Umwelt zu verarbeiten und in ihrer Entscheidungen neue, bisher nicht berücksichtigte oder durch den Rechner nicht erfassbare Informationen, einfließen lassen. Außerdem ist eine Schnittestelle zu menschlichen Entscheidungsträgern notwendig, die Ratschläge des Computers dem Benutzer verständlich darstellt. Die bereits existierende Simulation der Katastrophenumwelt und der in ihr agierenden Rettungsressourcen wird ebenfalls zur Entscheidungsunterstützung herangezogen.

Systemarchitektur

Wie später erläutert erhielt die Systemarchitektur des DMT in der aktuellen Antragsphase eine modulare Ausrichtung. Außerdem wurde die Nutzbarkeit der Entscheidungskomponenten des DMT-EOC von einer simulierten Umwelt auf reale Einsätze erweitert. Dazu waren Änderungen und Erweiterung in der Anbindung der Einzelkomponente und damit der gesamten Systemarchitektur nötig.

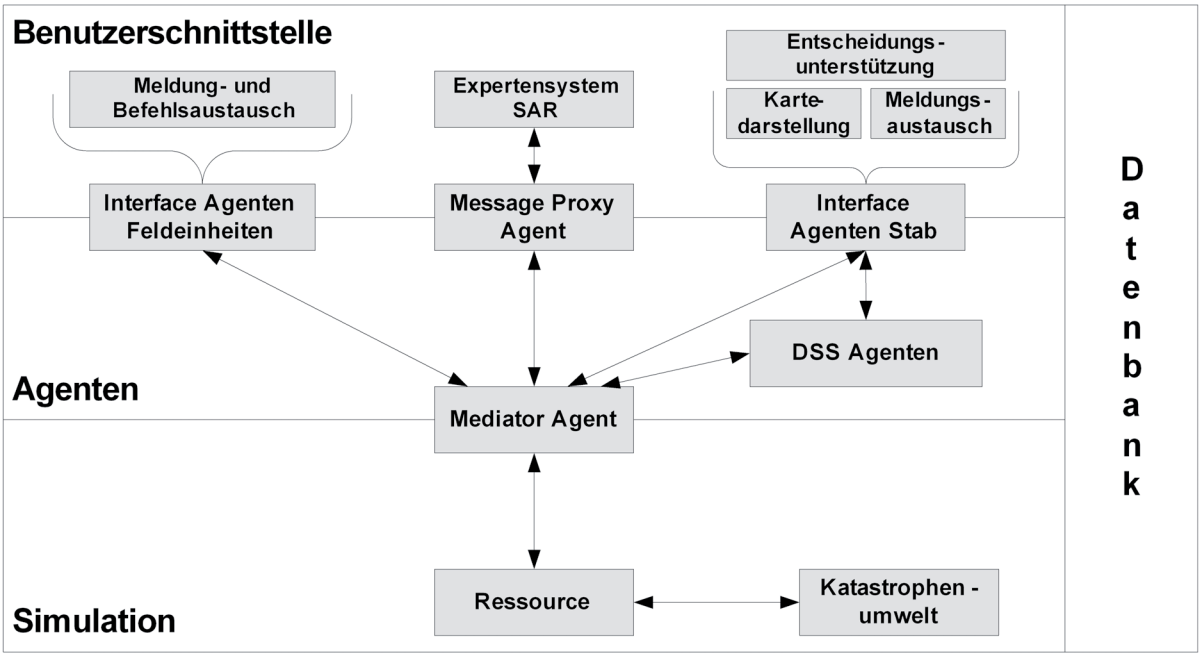


Abbildung 3: Systemarchitektur des DMT.

Der ursprüngliche Ansatz nutzt die High Level Architecture (HLA), einen IEEE Standard für verteilte Simulation (DMSO, 2001), für den Informationsaustausch zwischen simulierter Umwelt und den übrigen Komponenten. Die Entscheidungsunterstützung ist und war als Multi-Agenten System (MAS) implementiert (WOOLDRIDGE 2001).

Da die HLA für verteilte Simulation konzipiert wurde, erwies sie sich als weniger geeignet für reale Katastrophen, unter anderem weil die Integration externe Komponenten nur aufwendig zu realisieren ist. Als Basisarchitektur für das System diente stattdessen ein Multi-Agenten System (MAS) nach der offenen FIPA Agent Management Specification (FIPA 2004). Die Systemarchitektur ist in Abbildung 3 dargestellt und gliedert sich in drei Ebenen:

- **Simulation:** Die Simulation der Katastrophenumwelt nach einem Erdbeben und der in ihr agierenden Ressourcen basierend auf HLA. Nachrichten und Beobachtungen von sowie Befehle an Ressourcen werden durch einen *Mediator Agent* zwischen Simulation und MAS ausgetauscht. Zusätzlich kontrolliert der Mediator die Simulation und ermöglicht das Starten mehrerer unterschiedlicher Simulationsläufe. Dies ermöglicht den Einsatz der Simulation zur Schulung und Entscheidungsunterstützung.
- **Agenten:** Für die Stabsstellen von Feuerwehr, Such- und Rettungskräfte sowie Ambulanzen stehen Agenten für die Entscheidungsunterstützung zur Verfügung. Diese erhalten ihre Informationen über den Katastrophenverlauf durch Nachrichten von realen oder im Trainingsfall simulierten Feldkräften und geben über den Interface Agenten Ratschläge bzw. Entscheidungshilfen an den jeweiligen Anwender weiter.
- **Benutzerschnittstellen:** Der Interface Agent nutzt das TIS aus Teilprojekt C6, um neben den allgemeinen Lageinformationen Ratschläge der Entscheidungsunterstützungsagenten darzustellen. Ein weiteres Interface steht zum Versenden von Nachrichten durch Feldkräfte zur Verfügung, um den Nachrichtenaustausch mit realem Personal im Feld zu testen. Für den Austausch mit externen Komponenten, wie dem Expertensystem aus Teilprojekt C7, wurde ein *Message Proxy* entwickelt. Dieser leitet XML Nachrichten von externen Quellen an die Komponenten im MAS weiter.

Für eine ausführliche Darstellung der Systemarchitektur siehe ENGELMANN (2006).

Entscheidungsprozesse in Katastrophenstäben

Um Entscheidungsträger effektiv unterstützen zu können ist es nötig, den dahinter stehenden kognitiven Prozess zu verstehen. Darauf aufbauend können Ideen für die Unterstützung oder Optimierung dieses Prozesses entwickelt werden. Wirft man einen Blick auf die verschiedenen Ansätze, menschliche Entscheidungsprozesse zu beschreiben, lässt sich grob zwischen analytischen und naturalistischen Modellen unterscheiden. Bei analytischen Modellen werden Fakten zu einer Problemstellung möglichst detailliert bestimmt, um darauf aufbauend eine oder mehr Lösungen zu entwickeln.

Bei naturalistischen Ansätzen sind Erfahrungen und Intuition die Entscheidungsgrundlage. Das Recognition-Primed Decision (RPD) Modell von Gary Klein (KLEIN 1997) kann dieser Gruppe zugeordnet werden.

Das RPD Modell basiert auf der Analyse von Entscheidungsprozessen bei Feldeinsätzen von Feuerwehrmännern und wurde aber bereits in unterschiedlichste Bereiche übertragen (KLEIN 1997). Die Situation in einem Katastrophenstab ist zwar nur begrenzt mit der im Feld vergleichbar, trotzdem erzeugen die Verantwortung für viele Menschenleben und der Zeitdruck einen ähnlichen Stress. Dabei sind Entscheidungsträger im Katastrophenstab fast immer ehemalige Feldkräfte und entscheiden daher, wenn auch unbewusst, anhand eines naturalistischen Prozesses. Befragungen von Personen aus dem Katastrophenstab in Deutschland wie Rumänien haben diese Annahmen bestätigt. Daher diente RPD als Referenzmodell bei der Konzeption der Entscheidungsunterstützung im DMT-ADVISOR.

Das RPD Modell basiert auf der Erkenntnis, dass Experten Entscheidungen nicht in zeitintensiven Analysen sondern aufgrund von Erfahrung und Intuition fällen. Meist wird eine Situation anhand ihrer Fakten klassifiziert, mit bekannten Situationen verglichen und bei Übereinstimmung der bereits bekannte Lösungsweg eingeschlagen. Ist die Übereinstimmung mit bekannten Situationen unzureichend, erfolgt eine Anpassung der Lösung anhand einer ähnlichen, bereits bekannten Problemstellung. Abbildung 4 zeigt den Entscheidungsprozesses nach dem RPD Modell sowie seine Unterstützung im DMT.

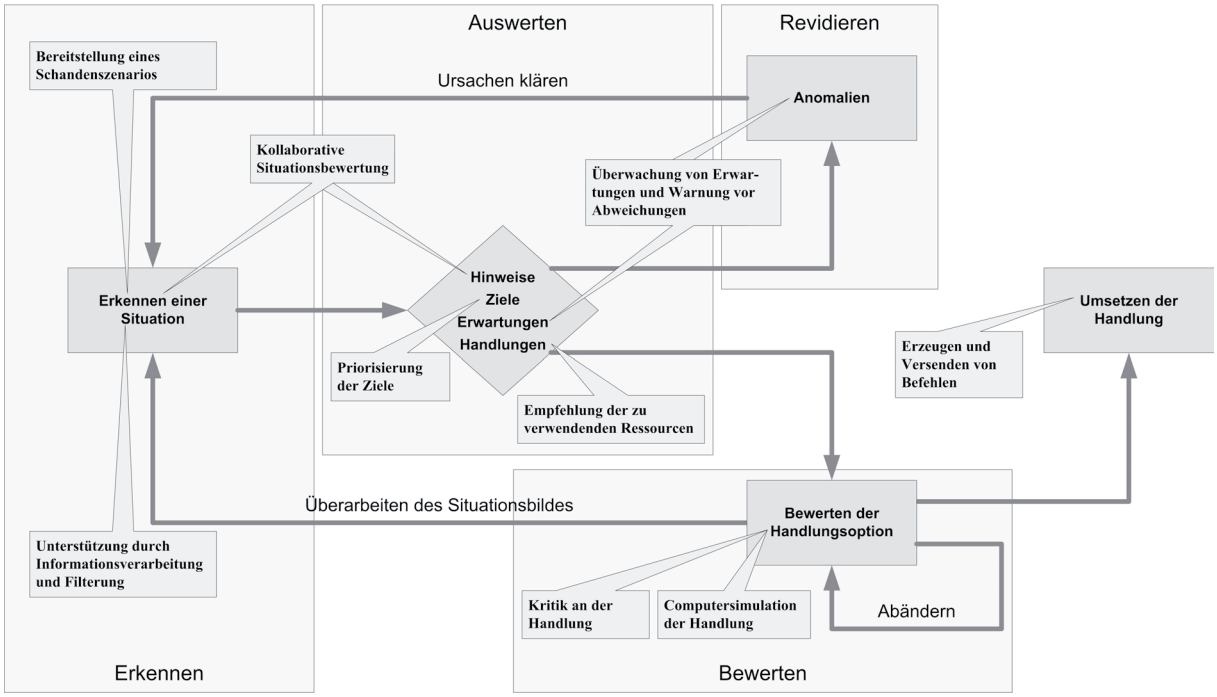


Abbildung 4: Das RPD Modell und seine Unterstützung im DMT.

Das Modell lässt sich in 4 Phasen gliedern:

1. **Erkennen:** Zunächst sichtet der Entscheidungsträger die vorhandenen Fakten und versucht eine bekannte Situation wiederzuerkennen. Dabei kann EQSIM bei unzureichender Informationslage, wie zu Beginn der Katastrophe, mit einem Schadenszenario behilflich sein. Später, wenn die eingehenden Meldungen überhand nehmen, ist das TIS bei durch Darstellung und Filterung behilflich. Der EOC-ADVISOR stellt zusätzlich eine Schnittstelle zur kollaborativen Risikobewertung der Situation zur Verfügung.
2. **Auswerten**: Fakten und die Risikobewertungen ergeben die Hinweise zur Lage. Der EOC-ADVISOR nutzt diese Hinweise für Hilfestellungen bei der Ressourcen Allokation, indem er Vorschläge für die Priorisierung der Einsatzgebiete und der dort einzusetzenden Ressourcen macht.
3. **Revidieren**: Ein Ergebnis der Auswertung sind Erwartungen über den weiteren Verlauf einer Situation aufgrund der gewählten Handlungen. Der EOC-ADVISOR überwacht daher die Lage und warnt falls diese sich unvorhergesehen verändert, wie z.B. durch ein Feuer welches sich trotz zugeteilter Löschmannschaften ausbreitet. Ist eine solche Abweichung der Erwartungen erkannt, wird der Entscheidungsträger informiert und zu einer Neubewertung aufgefordert.
4. **Bewerten**: Bevor der Entscheidungsträger Handlungen durchführt, bewertet er sie. Dazu nutzt er normalerweise eine mentale Simulation. Der DMT-ADVISOR hilft bei diesem Schritt durch die Computersimulation möglicher Folgen von Handlungsalternativen. Zusätzlich analysiert das System die getroffenen Entscheidungen anhand einer Regelbasis, um potentielle Probleme aufzuzeigen.

Nachdem die Entscheidung für Handlungen getroffen wurde, müssen diese umgesetzt werden. Das System bietet dazu das automatische Erzeugen und Verschicken der notwendigen Befehle an Feldeinheiten. Der folgende Abschnitt erläutert die Agenten zur Entscheidungsunterstützung. Für weitere Details über die Nutzung der RPD Modells bei der Entscheidungsfindung siehe ENGELMANN (2007).

Entscheidungsunterstützung

Der DMT-ADVISOR ist ein Multi-Agenten System (WOOLDRIDGE 2001) welches das Belief-Desire-Intension (BDI) Konzept mit einer Inferenz Maschine kombiniert. Der BDI Ansatz wurde stark von Bratman (BRATMAN 1987) beeinflusst. Ein BDI-Agent ist ein selbstständig agierendes Programm, welches vorgegebene Ziele (Desires) verfolgt, indem es auf Basis von Fakten aus seiner Umwelt ein Bild der aktuellen Situation entwickelt (Beliefs) und passend zur wahrgenommenen Situation seine Aktionen (Intentions) zum erreichen der Ziele wählt. Dies wird kombiniert mit einer Inferenzmaschine wie sie z.B. auch in Expertensystemen zum Einsatz kommt (JACKSON 1999).

Hierbei wird Expertenwissen in Form in einer Regelbasis abgelegt, aus der mit Hilfe von Vorwärtsverkettung (forward chaining), aus aktuellen Fakten neue Erkenntnisse über die Situation gewonnen werden. Die Regeln und Pläne der Agenten basieren auf der Analyse von Notfallplänen, Standart Operation Procedures (SOP) sowie Expertengesprächen aus Deutschland und Rumänien wie auch der Auswertung international versendeter Fragebögen.

Als ein entscheidendes Problem für die Agenten erwies sich die Harmonisierung der Situationswahrnehmung zwischen Mensch und Maschine. Auf der einen Seite bewertet der Computer eine von ihm voll erfassbare Situation nach vorgegebenen rationalen Kriterien. Sind diese Kriterien in Übereinstimmung mit dem Entscheidungsträger gewählt, wird der Agent eine für den Menschen nachvollziehbare und emotional unbelastete Entscheidung treffen. Allerdings stellte sich während der Systementwicklung heraus, dass es schwer ist, alle während einer Katastrophe auftretenden Fakten durch den Rechner zu interpretieren. Dies gilt besonders, wenn sie als natürlichsprachlicher Text vorliegen.

Es musste eine für Mensch und Maschine verständliche Darstellungsform der Situationsbewertung gefunden werden. Dazu kommt eine im deutschen Zivilschutz entwickelte (KNORR 2000) Risikomatrix zum Einsatz. Abbildung 5 zeigt sie in der Abwandlung, wie sie im DMT-ADVISOR zum Einsatz kommt. Die Bewertung erfolgt als kollaborativer Prozess zwischen Mensch und Maschine. Nachrichten mit Informationen über ein potentiell neues oder bereits bekanntes Einsatzgebiet werden zunächst vom Agenten soweit wie möglich ausgewertet und seine Bewertungen in die Matrix eingetragen. Diese Matrix wird zusammen mit der zugehörigen Nachricht dem Menschen für eine Revision bzw. Ergänzung übergeben.

Risikograde

n/a	no	low	med	high	very high

Risiko für	Risikoquellen: Feuer	Chemikalien	Strahlung	Elektrizität	Panik	Explosion	Ausbreitung	Atemgifte	Gebäudeeinsturz	Verletzung / Krankheit
Personen	low	n/a	no	no	low	med	high	n/a	low	low
Einsatzkräfte	med	n/a	no	no	low	med	low	n/a	med	low
Umwelt	low	n/a	no			med	low	n/a		
Ausrüstung	low	n/a	no	no		med	low		med	
Tiere	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
Materielle Werte	high	n/a	no	no		med	very high		med	

Abbildung 5: Risikomatrix zur kollaborativen Situationsbewertung.

Die resultierende Risikobewertung hat einen starken Einfluss auf die Entscheidungen und Hinweise des Agenten für den Anwender (ENGELMANN 2007). Zusätzlich zu der Kollaboration zwischen Mensch und Maschine wurde im DMT-ADVISOR die Möglichkeit vorgesehen, die Risikomatrix zwischen Mitgliedern des Katastrophenstabes auszutauschen, was die gemeinsame Situationswahrnehmung unterstützt.

Basierend auf der Situationswahrnehmung sowie vom System berechenbaren Faktoren, wie z.B. der Ausbreitungswahrscheinlichkeit eines Feuers oder der Erreichbarkeit eines Verletzten durch eine Ambulanz, unterstützt der Agent den Entscheidungsträger bei der Auswertung der Situation und Bestimmung der zu ergreifenden Maßnahmen. Im folgenden Abschnitt wird die in Abbildung 6 aufgezeigte Arbeitsweise des Systems exemplarisch dargestellt, für weitere Details siehe ENGELMANN (2007A).

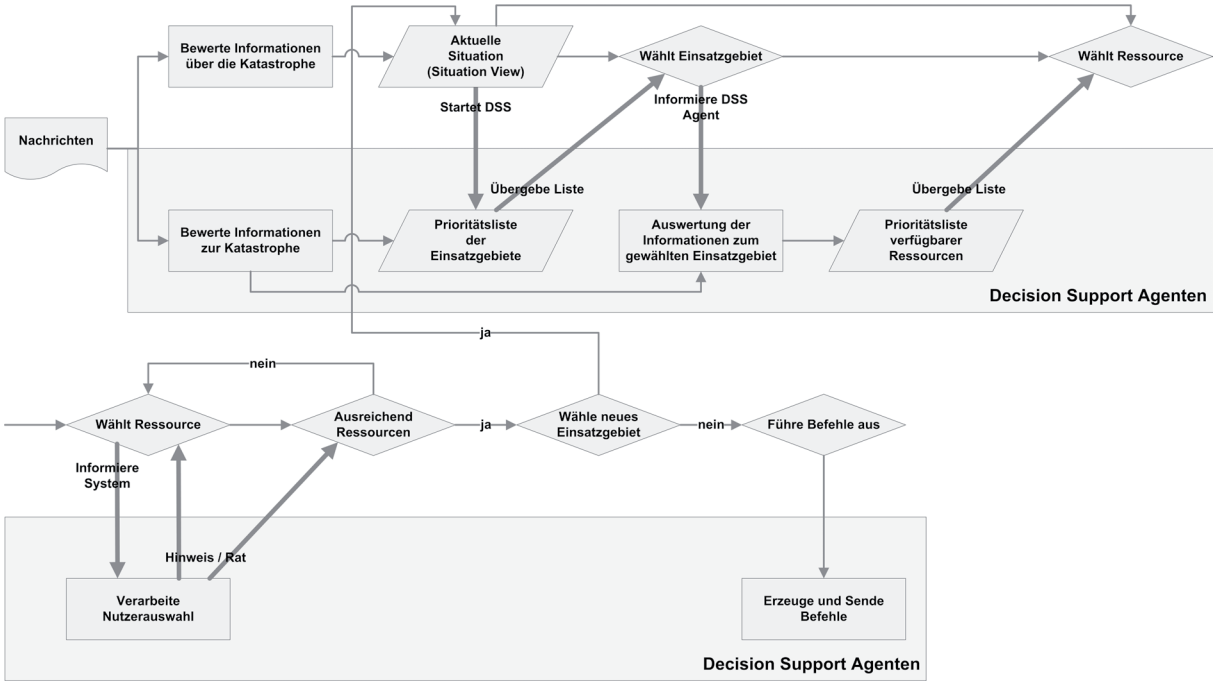


Abbildung 6: Unterstützung des Auswertungsprozesses.

Die Entscheidungsunterstützung für die Zuordnung von Rettungsressourcen orientiert sich wie bereits Erwähnt am RPD-Modell. Auf Anfrage des Nutzers wird ihm eine Liste mit den vom System priorisierten Einsatzgebieten zur Verfügung gestellt. Diese Liste ist in drei Stufen aufgeteilt, den Gebäuden mit hoher, mittlerer und niedriger Priorität. Die Ordnung innerhalb der Stufen ist zufällig und ohne jegliche numerische Bewertung. Abhängig vom Anwendertyp vermeidet diese Darstellung den Eindruck der Bevormundung bzw. ein unreflektiertes Übernehmen von Vorschlägen. Hat sich der Anwender für ein Gebiet entschieden, wird für dieses eine wie zuvor bei den Gebäuden gegliederte Liste mit empfohlenen Ressourcen dargestellt, aus der er selbstständig seine Auswahl trifft. Bei jeder gewählten Ressource macht das System auf potentielle Probleme oder Risiken aufmerksam, wie z.B. das Zuordnen einer Einheit ohne spezielle Atemschutzausrüstung zu einem Brand mit starker Rauchentwicklung.

Wurden die gewünschten Einheiten für einen Einsatzort ausgewählt, wird mit dem nächsten fortgefahren. Hat der Anwender seine Ressourcenzuordnung beendet, kann er eine Simulation möglicher Auswirkungen seiner Entscheidungen auf Basis der bekannten Lage im Katastrophengebiet durchführen. Verläuft diese zu seiner Zufriedenheit, verschickt das System selbstständig die notwendigen Befehle an die gewählten Einheiten.

Zur Informationsverarbeitung und Aufbereitung nutzt der DMT-ADVISOR unterschiedlichste Werkzeuge sowie eine Kombination verschiedenster Verfahren. Abbildung 7 gibt einen schematischen Überblick. So erfolgt die Situationsbewertung anhand einer Regelbasis, die damit das Beliefset für den BDI Prozess bereitstellt, der bei der Priorisierung wiederum auf Heuristiken zurückgreift. Die detaillierte Darstellung der verwendeten Methoden und Techniken würde den Umfang des Berichtes sprengen und wird in einer Veröffentlichung zu einem späteren Zeitpunkt dargestellt.

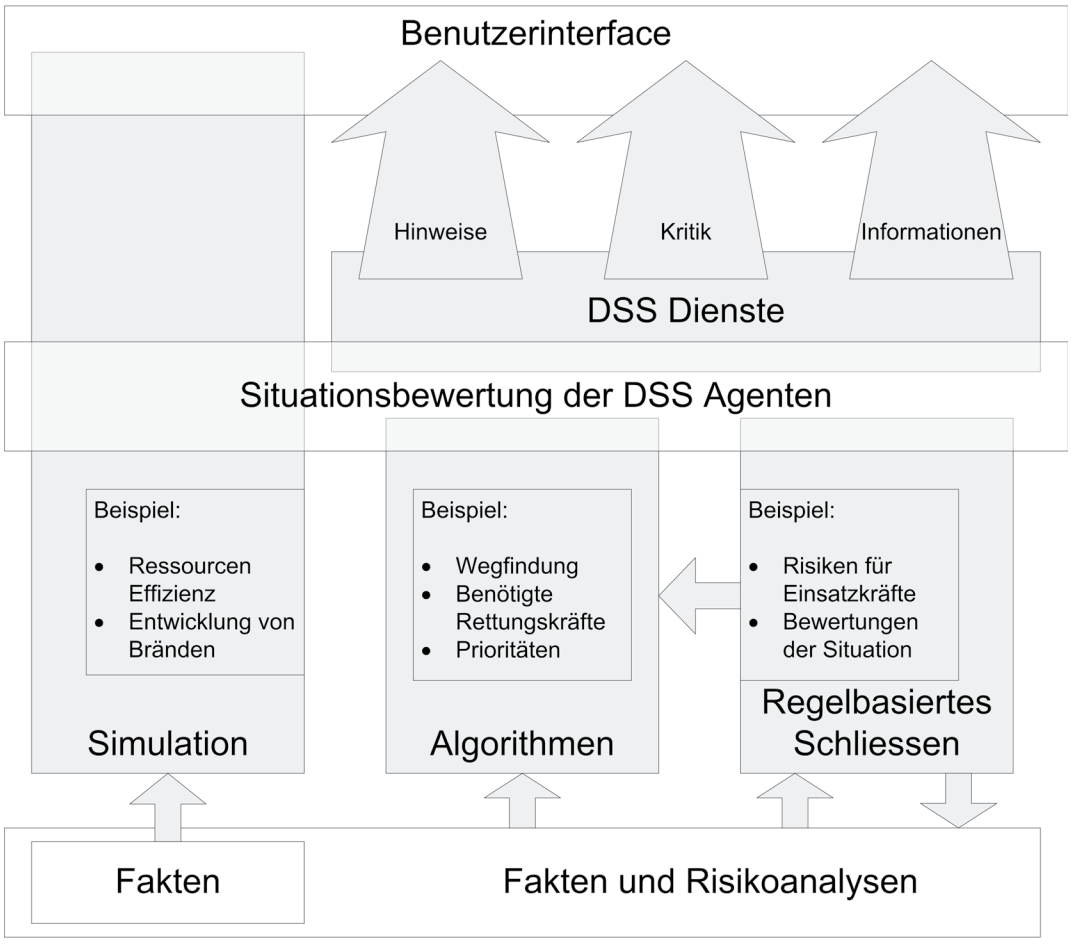


Abbildung 7: Informationsverarbeitung im DMT-ADVISOR.

Fertigstellung des Disaster Management Tools

Das Disaster Management Tools (DMT) ist ein Werkzeug, das unterschiedliche Benutzergruppen wie z.B. die Stadtverwaltung, den Katastrophenstab oder Feldkräfte in den verschiedenen Phasen des Katastrophenzyklus bei ihrer Arbeit unterstützt. Dabei stellt das DMT eine Plattform dar, um die Funktionalität der Komponenten miteinander zu kombinieren, wobei abhängig von der Aufgabe und der Benutzergruppe verschiedene Komponenten zum Einsatz kommen. Aus der Verbindung einzelner Lösungen zu einem gemeinsamen System ergeben sich Synergien, die die Funktionalität jeder Komponente erweitern, wodurch ein Gesamtsystem mit umfassenderen Möglichkeiten geschaffen wird. Die Komponenten des DMT lassen sich in drei Gruppen einteilen: (1) Simulation, (2) Planungs- und Entscheidungsunterstützung sowie (3) Kommunikation und Visualisierung (siehe Abbildung 8).

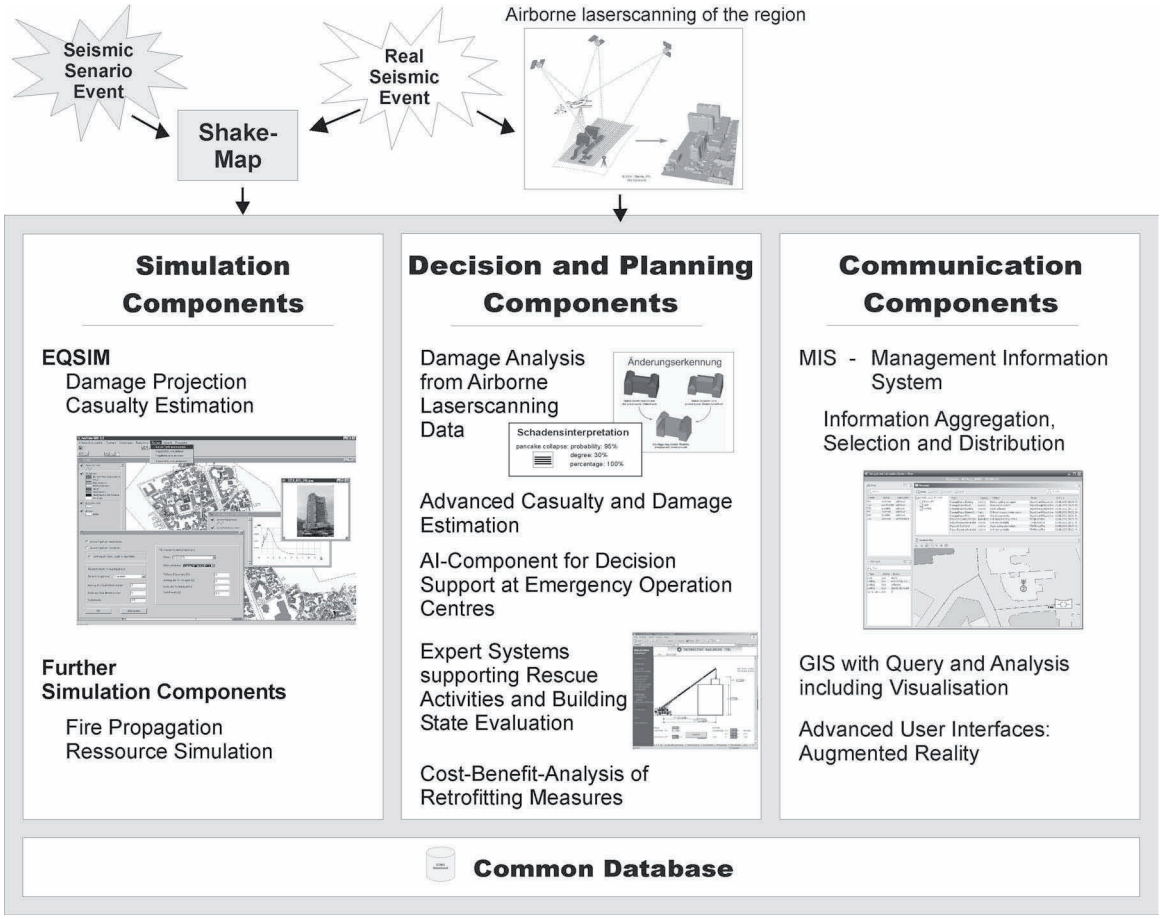


Abbildung 8: Konzeption des Disaster Management Tools.

Das Disaster Management Tool vereint die Ergebnisse der ingenieurwissenschaftlichen Teilprojekte und macht diese in einem Gesamtsystem nutzbar. Die Konzeption des Gesamtsystems fand bereits in der vorangegangenen Antragsphase statt, in der jetzigen Phase wurden die Teilkomponenten integriert. Für die Schadensanalyse aus Befliegungsdaten wurden die Schnittstellen und Meldungsformate definiert.

Alle DMT Komponenten greifen auf die zentrale Datenbank zu. Das System wurde bei der Stabs- und Feldübung mit rumänischen Katastrophenschutzorganisationen Atlas 2007 in Bukarest im Oktober 2007 erprobt. Personal des Katastrophenstabes nutzte das Schadensprognosetool EQSIM um aufgrund des simulierten Katastrophenszenarios Entscheidungen zu fällen. Dabei wurden Teile der Katastrophenumwelt simuliert. Die Nutzerschnittstelle für Kommunikation und Darstellung der Informationen auf der Karte wurde von Teilprojekt C6 realisiert. Bei der Feldübung nutzten die Teilnehmer das Expertensystem zur Entscheidungsunterstützung bei der Befreiung verschütteter Personen. Somit ist mit dem DMT die Katastrophenvorbeugung und -vorbereitung durch die Simulation von Katastrophenereignissen und deren Bewältigung gefolgt von einer Schwachstellenanalyse sowie durch Training mit Hilfe simulierter Katastrophenereignisse möglich.

Unterstützungssysteme für Katastrophen scheitern in der Praxis unter anderem an fehlerhaften Funktionen, schlecht gewarteter Software und fehlender Erfahrung bzw. Akzeptanz bei den Anwendern. Bei der Entwicklung des DMT wurde geprüft, wie dies vermieden werden kann. Das System wurde modular ausgelegt, um Skalier- und Erweiterbarkeit zu gewährleisten. Zwar resultiert daraus ein geringfügig höherer Entwicklungsaufwand, im Hinblick auf eine produktiv eingesetzte Software bieten sich aber große Vorteile: Letztendlich erzeugt nur der regelmäßige Einsatz eines Systems ein Interesse an seiner Wartung und Weiterentwicklung, was seine Einsatzfähigkeit sicherstellt. Auch ist eine höhere Akzeptanz und ein besserer Schulungsgrad der Anwender bei einem System für Training und Einsatz zu erwarten. Aufwand und Kosten für Wartung und Weiterentwicklung eines einheitlichen Systems sind geringer anzusetzen als für zwei verschiedene Systeme.

Als Ergebnis können die einzelnen Komponenten flexible eingesetzt werden. So kann das TIS entwickelt im Teilprojekt C6 bei einem realen Einsatz, der Schulung, wie auch dem normalen Tagesgeschäft genutzt werden, indem Teilkomponenten des DMT wie Entscheidungsunterstützung oder Simulation an- oder abgekoppelt werden. Um den Systemaufbau modular zu gestalten war neben der Umstellung der Basisarchitektur ein einheitliches Format für den Informationsaustausch notwenig.

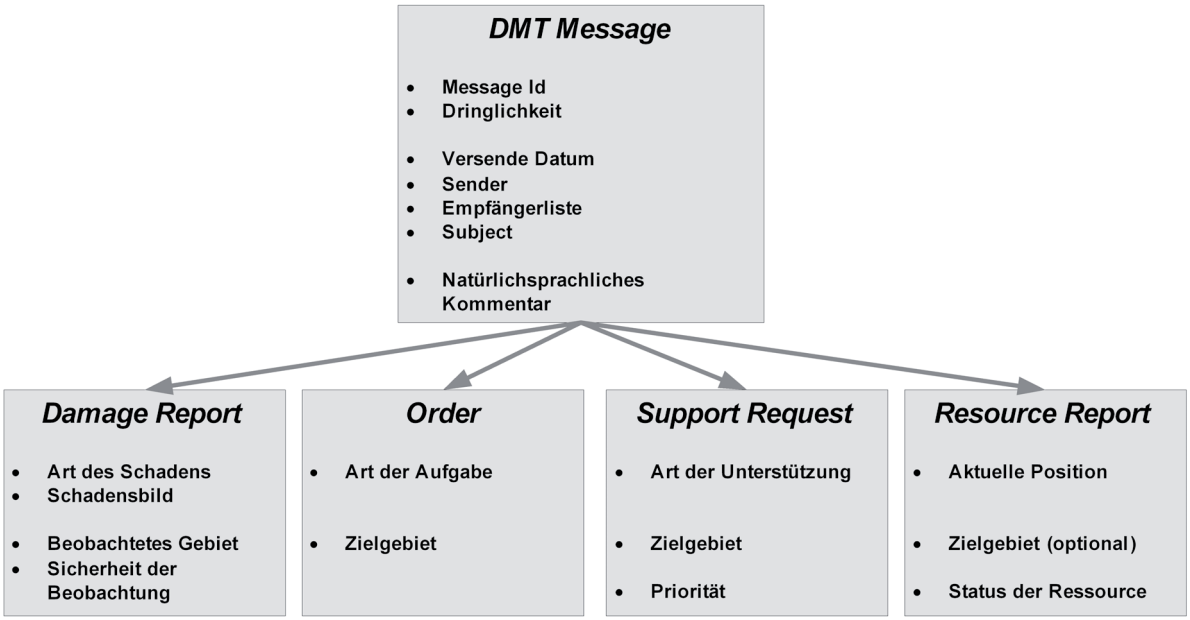


Abbildung 9: Struktur des DMT Message Nachrichtenformats.

Für den Computerbasierten Informationsaustausch während Notfall- und Katastrophensituationen sind bereits mehrere XML basierte Standards spezifiziert bzw. in der Entwicklung. Um die Anbindung des DMT an andere Systeme zu erleichtern, wurde auf Basis dieser Standards ein Kommunikationsprotokoll in XML entworfen. Besonderer Wert wurde auf die Interpretierbarkeit der enthaltenen Informationen durch den Computer gelegt. Daher ist nur ein Feld für natürlichsprachliche Kommentare vorgesehen, alle weiteren Informationen werden durch XML-Elemente mit einem definierten Wertebereich repräsentiert. Das als XML-Schema spezifizierte Format gliedert sich in vier Nachrichtentypen:

- **Damage Report:** Schadensmeldung aus dem Katastrophengebiet bezüglich Gebäuden, Personen oder Infrastruktur,
- **Order:** Befehle an Feldeinheiten,
- **Ressource Report:** Statusmeldungen von Feldeinheiten über den Fortschritt ihrer Aufgaben oder die Veränderungen ihrer Lage vor Ort,
- **Support:** Anfragen um Unterstützungsleistung von Mitgliedern im Katastrophenstab an andere Personen im Stab oder auf anderen Organisationsebenen (z.B. Anforderungen von Ambulanzen für Verletzte).

Abbildung 9 zeigt die vereinfachte Struktur des Nachrichtenformates und die Inhalte der verschiedenen Nachrichtentypen. DMT-Message ist der Basistyp, von dem alle anderen Nachrichtentypen ihre allgemeinen Attribute erben.

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Im folgenden Abschnitt wird kurz auf den aktuellen Stand der Forschung aus den wichtigsten das Projekt C3 betreffenden Gebieten eingegangen. Hierbei handelt es sich um:

- Kosten-Nutzen-Analysen von Verstärkungsmaßnahmen
- Nutzer- und Kommunikationsschnittstellen für agentenbasierte Systeme im Bereich Katastrophenmanagement
- Disaster Management Tool (DMT)

Da die knappen finanziellen Ressourcen, die für schadensmindernde Maßnahmen zur Verfügung stehen, möglichst effizient eingesetzt werden sollen, wird in jüngster Zeit verstärkt der Einsatz von Kosten-Nutzen-Analysen empfohlen (MECHLER 2002; MOGA 2002). Erste Richtlinien zur Kosten-Nutzen-Analyse für Verstärkungsmaßnahmen an Gebäuden werden in FEMA (1992 UND 1995) beschrieben. Allerdings handelt es sich hierbei lediglich um grobe Richtlinien, die den Einbauprozess nur ungenügend berücksichtigen. Detailliertere Kosten-Nutzen-Analysen werden bisher hauptsächlich für Einzelgebäude oder Gebäude für kritischen Einrichtungen wie beispielsweise Krankenhäuser oder Lifelines durchgeführt (KUNREUTHER ET AL. 2001; SOHN ET AL. 2003). Analysen für größere Gebiete oder ganze Städte setzen zumeist sehr stark vereinfachende Annahmen bezüglich der eingesetzten Verstärkungsmaßnahmen, der damit verbundenen Kosten und des verbesserten Gebäudeverhaltens voraus (SELIGSON ET AL. 1998; WINTERFELD ET AL. 2000). Die bisher genannten Ansätze benutzen allerdings keine aktuellen Methodologien zur Schadensberechnung, die direkt die Einwirkung der Erdbebenwellen auf Gebäude berücksichtigen. HAZUS (NIBS 1999), das wohl einflussreichste Programm zur Abschätzung von Erdbebenschäden, führt seine Schadensprognosen auf Basis eines solchen Ansatzes durch. In seiner aktuell verfügbaren Version ist es allerdings nur zur Berechnung von Schadensprognose und nicht zur Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen geeignet. (SMYTH ET AL. 2004) führen auf den Berechnungsprinzipien der HAZUS-Methodologie eine Kosten-Nutzen-Analyse für Verstärkungsmaßnahmen an Wohngebäuden in Istanbul durch. Hierbei werden die Gebäudeschäden und Personenopfer mit und ohne Verstärkungsmaßnahmen abgeschätzt und diese werden in einem probabilistischen Ansatz den Kosten der Verstärkungsmaßnahmen gegenüber gestellt. Die im Teilprojekt C3 entwickelte Kosten-Nutzen-Komponente von EQSIM wählt einen vergleichbaren Weg, allerdings sind hier – im Gegensatz zu der Istanbul-Studie – Kosten-Nutzen-Analysen sowohl für Einzelgebäude als auch großflächige Gebiete möglich. Zudem wird eine detaillierte Kostenbetrachtung auf Basis von Leistungskatalogen durchgeführt.

Bezüglich der Schnittstellen zu den Einsatzkräften im Feld wie auch der Kommunikation zwischen Katastrophenstäben gibt es seit einiger Zeit verstärkt Bestrebungen, die digitale Kommunikation im Bereich Katastrophenmanagement zu standardisieren. Einen effizienten Ansatz liefert hier die Codierung mittels der eXtended Markup Language (XML), durch die objektähnliche Strukturen in einem Textformat ausgetauscht werden können (ECKSTEIN 2004). Auf Basis von XML existieren Standardisierungsbestrebungen durch das MESA Projekt (www.projectmesa.org) und das OASIS Emergency Management Technical Committee (www.oasis-open.org). Von OASIS wurde das Common Alerting Protocol (CAP) spezifiziert, anhand dessen standardisierte Meldungen für Alarm und Frühwarnsysteme ausgetauscht werden (BOTERELL 2004). Einen Überbau für XML basierten Informationsaustausch wird durch das Emergency Data Exchange Language (EDXL) Distribution Element spezifiziert (JONES ET AL. 2006). Die Emergency Data Exchange Language Resource Messaging (EDXL-RM) dient darauf aufbauend zur Informationskodierung (JONES ET AL. 2007). Im MESA Projekt wird mit MayDayML ebenfalls eine Spezifikation für den Informationsaustausch während Notfalleinsätzen entwickelt (MESA 2006). Bei allen hier vorgestellten Formaten sind natürlichsprachliche Aussagen ein bedeutender Informationsträger, was eine automatisierte Auswertung durch Computerprogramme zur Einsatzunterstützung erschwert. Insofern stellte das DMT-Message Format eine logische Erweiterung der oben genannten Standards dar.

Betrachtet man den Bereich der Mensch-Agenten-Interaktion im Katastrophenmanagement so ist dort noch immer wenig Forschungstätigkeit. Allerdings gibt es seit Beginn der Antragphase weitere Ansätze Multi-Agenten Systeme im Bereich des Katastrophenmanagements einzusetzen. Dabei unterstützen die Agenten bei der kollaborativen Entscheidungsfindung (FAN 2005) wobei als Modell für die Entscheidungsfindung auf RPD zurückgegriffen wird. Ansätze BDI-Agenten, ähnlich denen im DMT-ADVISOR, zu nutzen gibt es ebenfalls (BUDFORD 2006). Allerdings sind diese Arbeiten noch konzeptionell. Weiter fortgeschritten ist allerdings die Nutzung von Multi-Agenten Systemen und darauf basierenden Simulationen beim Verhalten von Personen bei Katastrophensituation (MYSORE 2006) und während der Evakuierung (SANTOS 2004). Keines der Systeme sieht allerdings konkrete Entscheidungsvorschläge oder Handlungsbewertungen für die Mitglieder eines Katastrophestabes vor.

Auch bei der Entwicklung von integrierten Computersystemen für die Katastrophenbewältigung und –planung sowie die Übung gibt es neue Ansätze. Die Nutzung von Multi-Agent Systemen zur Simulation der Auswirkungen einer Erdbebenkatastrophen, unter Berücksichtigung von Sekundärschäden wie z.B. Feuer und dem gleichzeitigen einbeziehen von Rettungsressourcen, wurde in einem japanischen System integriert (TAKEUCHI 2003). Die Idee der Kombination einer simulierten Umgebung zur Überprüfen von Systemen für reale Katastrophenbewältigungsmaßnahmen ist auch vorhanden (MASSAGUER 2006). Wie bereits in JAIN AND MCLEAN (2003) erwähnt, sind einige Systeme vorhanden oder in der Entwicklung allerdings ist ihr Einsatz

durch ein fehlendes Gesamtkonzept stark limitiert. Diesem Problem trägt die Idee einer gemeinsamen Architektur für Systeme zur Analyse von Katastrophenszenarien Rechnung (JAIN AND MCLEAN 2006). Ein integriertes System für Bewältigung, Planung und Übung, wie es das DMT darstellt, existiert allerdings noch nicht.

5.2.1.4 Offene Fragen

Mit der Beendigung des Sonderforschungsbereiches stellt sich die Frage, wie das DMT und dessen bestehende Werkzeuge weiterentwickelt bzw. praktisch nutzbar gemacht werden können. Die Architektur bietet, gerade durch die Nutzung des XML Nachrichtenformates und des modularen Ansatzes, eine sehr gute Ausgangsbasis, die Systemfunktionen öffentlich zur Verfügung zu stellen. Eine Weiterentwicklung hin zu einer Service Oriented Architecture (SOA) erscheint dabei aussichtsreich.

Betrachtet man die Module zur Simulation und Entscheidungsunterstützung, wären weitere Testes mit deutschen Katastrophenschutzkräften wünschenswert. Diese könnten weitere interessante Ansatzpunkte für eine Verbesserung oder Weiterentwicklung liefern. Im Hinblick auf eine Weiterentwicklung sollte auch die Übertragbarkeit der gewonnen Erkenntnisse auf andere Katastrophen und Großschadenslagen geprüft werden.

EQSIM ist in seiner Form und seinem Umfang einzigartig und bietet eine Vielzahl von Ansatzpunkten für Weiterentwicklungen. Wegen der bereits guten Datenbasis aus dem Testgebiet im Zentrum von Bukarest sind weitere Projekte in Rumänien, wie Ausweitung auf ein größeres Gebiet in Bukarest, vorstellbar. Auf Basis einer interaktiven Oberfläche mit Google Earth wäre eine Untersuchung im Zusammenhang mit einer Online-Community (ZIKAS ET AL, 2006) und den Bewohnern vor Ort interessant. Durch entsprechende Eingabemöglichkeiten könnten Bewohner ihre individuellen Daten eingeben und eigene Simulationen starten. Eine Ausweitung des System auf weitere Gebiete wie Istanbul ist vorstellbar, wobei sich auch dort die benötigten Daten über eine interaktive Erhebung bei den Bewohner ermitteln lassen würde. Mit einer Art „EQ-Wikipedia“ könnten so Geophysiker und Ingenieure sowie die betroffenen Personen auf einer Plattform zusammenarbeiten und die Risikowahrnehmung der Bevölkerung verbessern.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt C3 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Boardman, A., Greenberg, D., Vining, A., and Weimer, D. (2001): Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice (2nd Edition), Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, USA.

Boterell, A. (2004): Common Alerting Protocol, v. 1.1, OASIS Standard CAP-V1.1, October 2005, (http://www.oasis-open.org/committees/download.php/15135/emergency-CAPv1.1-Corrected_DOM.pdf).

Bratman, M.E. (1987): Intention, Plans, and Practical Reason, Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.

Budford, J., G. Jakobson, et al. (2006): D-AESOP: A Situation-AWARE BDI Agent System for Disaster Situation Management. Proceedings In AAMAS Workshop on Agent Technology for Disaster Management, Japan.

Chalupsky, H., Gil, Y. Knoblock, C.A., Lerman, K. Oh, J., Pynadath, D.V. Russ, T.A., Tambe, M. (2001): Electric Elves: Applying Agent Technology to Support Human Organizations. In International Conference on Innovative Applications of AI (IAAI'01).

Chen Yong, Chen Q.F., Frolova N., Larionov V. ,Nikolaev A., Pejcoch J., Suchshev S. , A.N. Ugarov (2001): Decision Support Tool for Disaster Management in the Case of Strong Earthquakes. In ADRC International Paper, No.1, August-2001.

Coburn, A., R. Spence (2002) Earthquake Protection. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd.

Comfort, L. (2002) Information Technology and efficiency in disaster response: The Bhuj, Gujarat Earthquake of 26 January 2001. Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Bucharest, Romania.

Comfort, L.K. (2000): Information Technology and Efficiency in Disaster Response: The Marmara,Turkey Earthquake, 17 August 1999, Quick Response Report 130, Natural Hazard Center, Boulder, Colorado.

Defense Modeling and Simulation Office (DMSO) (2001): High Level Architecture Run Time Infrastructure RTI 1.3-Next Generation Programmers Guide, Version 4, U.S. Department of Defense DMSO.

Eckstein, R. (2004): XML und Datenmodellierung: XML Schema und RDF zur Modellierung von Daten und Metadaten einsetzen. DPunkt-Verlag, Heidelberg.

Fan, X., S. Sun, et al. (2005): On shared situation awareness for supporting human decision-making teams. 2005 AAAI Spring Symposium on AI Technologies for Homeland Security.

FEMA - Federal Emergency Management Agency (1992): A Benefit-Cost Model for Seismic Rehabilitation of Buildings. Earth-quake Hazard Reduction Series 63, FEMA Rep. 227 und 228.

FEMA - Federal Emergency Management Agency (1995): Typical Costs for Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. Earthquake Hazard Reduction Series 39, FEMA Rep. 156 und 157, Second Edition.

Foundation for Intelligent Physical Agents (FIPA) (2004) URL: http://www.fipa.org.

Fraunhofer (2002): Marktanalyse Katastrophen- und Notfallmanagementsysteme, Hrsg: Fraunhofer ITWM, IGD, CRCG, IITB, UMSICHT. Kaiserslautern.

IEEE (2000): IEEE Standard for Common Incident Management Message Sets for Use by Emergency Management Centers. IEEE-Std 1512-2000, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Jaber, A., F. Guarnieri, J. L. Wybo (2001). Intelligent software agents for forest fire prevention and fighting, Safety Science, Vol. 39, No. 1: 3 – 18.

Jackson, P. (1999): Introduction to Expert Systems, Addison Wesley, Harlow, England.

Jain, S. and McLean, C.R. (2003): Modeling and Simulation for Emergency Response: Workshop Report, Standard and Tools.

Jain, S. and C. R. McLean (2006). "An Integrating Framework for Modeling and Simulation for Incident Management." Journal of Homeland Security and Emergency Management 3(1).

Jones, E. et al (2007): Emergency Data Exchange Language Resource Messaging (EDXL-RM) 1.0, Committee Draft, 20 February 2007, (http://docs.oasis-open.org/emergency/edxl-rm/v1.0/cd01/EDXL-RM-SPEC-V1.0.pdf).

Jones, E. et al (2006): Emergency Data Exchange Language (EDXL) Distribution Element, v. 1.0, OASIS Standard EDXL-DE v1.0, 1 May 2006, (http://docs.oasis-open.org/emergency/edxl-de/v1.0/EDXL-DE_Spec_v1.0.pdf).

Knorr, K.-H. (2000): Die Gefahren der Einsatzstelle, 7. Edition, Kohlhammer Verlag, Stuttgart, Germany.

Kunreuther, H., Cyr, C., Grossi, P. und Tao, W. (2001) : Using Cost-Benefit Analysis to Evaluate Mitigation – Measures for Lifelines. Risk Management and Decision Process Center, , Wharton, Working Paper 01-14-HK.

Maamar, Z., N. Sahli, B. Moulin, P. Labbé. (2002). A software agent-based collaborative approach for humanitarian-assistance scenarios, Information and Security, Vol. 8, No. 2: 135 – 155.

Martin, C., Schreckenghost, D., Bonasso, P., Kortenkamp, D., Milam, T. und Thronesbery, C. (2003): Distributed Collaboration Among Humans and Software Control Agents. In: Proceedings of the Workshop on Humans and Multi-Agent Systems Melbourne, Australia. July 14-18, 2003.

McAfee, S. (1999). Designing Applications to Integrate GIS, Emergency Management Systems, and Field Observations for Earthquake Response. In: Proceedings of the 6th Japan-United States Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction, Kobe, Japan, 12.-14. Januar 1999, pp. 160-163.

Mechler, R. (2002): Natural Disaster Risk and Cost –Benefit Analysis. In Proceedings of the Conference “The Future of Disaster Risk: Building Safer Cities”, Washington D.C., December 4-6.

MESA (2006): MayDayML – Emergency Data Exchange Standard, The Basics, MESA TS 70.004-1 V2.0.0, April 2006, (http://www.projectmesa.org/ftp/Drafts/SSG-SA/SA0070004-1v311/SA007004-1_MayDayMLpart1v200%20MayDayML-TheBasics.doc).

Moga, J. (2002): Disaster Mitigation Planning: The Growth of Local Partnership for Disaster Reduction. In Regional Workshop on Best Practices in Disaster Mitigation – Lessons Learned from the Asian Urban Disaster Mitigation Program and other Initiatives, 24-26 September, 2002, Bali, Indonesia.

Molina, M., Blasco, G. (2003): A multi-agent system for emergency decision support, In: Lecture notes in computer science, Vol. 2690, Berlin und Heidelberg: Springer, pp. 43-51.

Mühlenkamp, H. (1994): Kosten-Nutzen-Analyse, München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag

Myers, K.L., Morley, D.N. (2001): Directing Agent Communities: An Initial Framework. In Proceedings of the IJCAI-01 Workshop: Autonomy, Delegation, and Control: Interacting with Autonomous Agents.

Mysore, V., G. Narzisi, et al. (2006). Emergency Response Planning for a Potential Sarin Gas Attack in Manhattan using Agent-based Models. Agent Technology for Disaster Management '06 Hakodate. Hakodate, Japan.

National Institute of Building Sciences (NIBS) (2001): Earthquake Loss Estimation Methodology,Technical Manual, Washington D.C., USA.

Payne, T., Sycara, K., Lewis, M., Lenox, T.L. und Hahn, S.K. (2000): Varying the User Interaction within Multi-Agent Systems. In: Proceedings of the 4th International Conference on Autonomous Agents, Barcelon, Spain, 412 – 418.

Rohn, E. (2007): A Survey of Schema Standards and Portals for Emergency Management and Collaboration. In Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management ISCRAM 2007 (Eds. B. Van de Walle, P. Burghardt and C. Nieuwenhuis), 2007, pp. 263 – 269.

Santos, G. and B. Aguirre (2004): A Critical Review of Emergency Evacuation Simulation Models. Proceedings of Building Occupant Movement during Fire Emergencies.

Seligson, H.A.; Blais, N.C.; Eguchi, R.T.; Flores, P.J. and E. Bortugno (1998): Regional Benefit-Cost Analysis for Earthquake Hazard Mitigation: Application to the Northridge Earthquake, In: Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Earthquake Engineering. Seattle, 21 May – 4 June 1998.

Smyth, A.; Altay, G.; Deodatis, G.; Erdik, M.; Franco, G.; Gülkan, P.; Kunreuther, K.; Lus, H.; Mete, E.; Seeber, N. und Yüzügüllü, Ö. (2004): Probabilistic Benefit-Cost Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey. Earthquake Spectra, Vol. 20, 171-203

Smyth, A.W., G. Altay, G. Deodatis, M.Erdik, G. Franco, P. Gülkan, H. Kunreuther (2004): Probabilistic Cost-Benefit Analysis for Earthquake Damage Mitigation: Evaluating Measures for Apartment Houses in Turkey. EERI Earthquake Spectra, Vol. 20: 171–203.

Sohn, J., Kim, T.J., Hewings, G.J.D., Lee, J.S., Jang, S.-G. (2003): Retrofit Priority of Transport Network Links under an Earthquake. Journal of Urban Planning and Development, Vol. 129, No. 4, 195-210.

Tadokoro, S., Kitano, H., Takahashi, T., Noda, I., Matsubara, H., Shinjoh, A., Koto, T., Takeuchi, I., Takahashi, H., Matsuno, F., Hatayama, M., Tayama, M., Matsui, T., Kaneda, T., Chiba, R., Takeuchi, K., Nobe, J., Noguchi, K., Kuwata, Y. and The RoboCup-Rescue Technical Committee (2000): The RoboCup-Rescue Project: An Approach of AI and Robotics to the Emergency Response Problem in Disaster, 4th International Conference on Multi Agent Systems, RoboCup-Rescue Workshop, 2000 (ICMAS 2000).

Takeuchi, I., S. Kakumoto, et al. (2003): Towards an integrated earthquake disaster simulation system. First International Workshop on Synthetic Simulation and Robotics to Mitigate Earthquake Disaster.

Veloso, M. (2000): RoboCup-99: Robot Soccer World Cup III, Lecture notes in computer science 1856, Berlin und Heidelberg: Springer.

Winterfeld, D., Roselund, N. und Kitsuse, A. (2000): Framing Earthquake Retrofitting Decisions: The Case of Hillside Homes in Los Angeles, Pacific Earthquake Engi-neering Research Center, PEER 2000/03.

Wooldridge, M.J. (2001):Introduction to Multiagent Systems, John Wiley & Sons, Inc. New York, NY, USA.INSARAG (Hrsg.) (2003) INSARAG Algeria earthquake lessons learnt meeting. ‘Chairman summary, 9.-10.09.2003 in Geneva, Switzerland.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Zikas, T. and Gehbauer, F. (2007): Investment decisions under uncertainty for retrofitting programs in urban areas. 2nd International Conference on Urban Disaster Reduction; Taipei, 27-29 November 2007.

Gehbauer, F., Markus, M., Engelmann, H., Popa, I., Schweier, C., Rehor, M., Werder, S. (2007): The Disaster Management Tool (DMT), in Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania, pp. 421 – 431.

Zikas, T., Gehbauer, F. (2007): Decision process and optimization rules for seismic retrofit programs, in Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania, pp. 472 – 484.

Engelmann, H. (2007a): DMT-EOC - An integrated approach for training and decision support of EOC members, in Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania, pp. 432 – 445.

Schweier, C., Engelmann, H., Gehbauer F., Markus, M., Zikas, T. (2007): Forschungsarbeiten zum Risiko- und Katastrophenmanagement, Senitz, S. (Hrsg.) Verständnis, Vorsorge und Bewältigung von Naturkatastrophen, Abschlusssymposium 2007 des Graduiertenkollegs “Naturkatastrophen”, Universitätsverlag Karlsruhe, Germany.

Engelmann, H. und Fiedrich, F. (2007): Decision Support for the Members of an Emergency Operation Centre after an Earthquake, Van de Walle, B., Burghardt P. and Nieuwenhuis, K. (Eds.) Proceedings of the 4th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management, 13-16 May 2007, Delft, the Netherlands, VUBPress, Brussels, Belgium, S. 317 – 326.

Engelmann, H., Fiedrich, F., Markus, M. and Zikas, T. (2006): An Architecture for Decision Support and Training in Emergency Operations Centers, Proceedings “100th Anniversary Earthquake Conference – Managing Risk in Earthquake Country”, Paper No. 1369, San Francisco, USA.

Markus, M., Engelmann, H., Gehbauer, F., Leebmann, J., Schweier, C. (2006): The Disaster Management Tool – Concept and application experiences, Proceedings “100th Anniversary Earthquake Conference – Managing Risk in Earthquake Country”, Paper No. 1253, San Francisco, USA.

Zikas, T., Engelmann, H. and Fiedrich, F. (2006): A Concept for an Open-Source Software Project for Earthquake Risk Management, Proceedings “100th Anniversary Earthquake Conference – Managing Risk in Earthquake Country”, Paper No. 1450, San Francisco, USA.

Markus, M., Fiedrich, F., Gehbauer, F., Engelmann, H., Leebmann, J., Schweier, C., Steinle, E. (2005): The Disaster Management Tool – Concept and First Training Experiences, Proceedings of the Conference “250th Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake”, Lisbon, Portugal.

Fiedrich, F., Leebmann, J., Markus, M., Schweier, C. (2004): EQSIM: A New Damage Estimation Tool for Disaster Preparedness and Response, Malzahn, D. and Plapp, T. (Eds.). Proceedings of the International Conference “Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction”, Logos Verlag Berlin, Germany.

Markus, M., Fiedrich, F., Leebmann, J., Schweier, C., Steinle, E. (2004): Concept for an Integrated Disaster Management Tool for Disaster Mitigation and Response, Malzahn, D. and Plapp, T. (Eds.). Proceedings of the International Conference “Disasters and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction”, Logos Verlag Berlin, Germany.

Wenzel, F., Bonjer, K.-P., Fiedrich, F., Lungu, D., Marmureanu, G., Wirth, W., Böse, M. (2004): Real-time earthquake information systems, In: Malzahn, D. & Plapp, T. (eds). Disaster and Society - From Hazard Assessment to Risk Reduction, Logos Verlag Berlin, Germany, 199 – 206.

Fiedrich, F., Gehbauer F., Leebmann J., Lungu D., Markus M.; Schweier, C. (2002): EQSIM: A new approach to damage estimation, Lungu, D., Wenzel, F., Mouroux, P., Tojo, I. (Eds.): Proceedings of the International Conference “Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction”, Independent Film, Bucuresti, Romania.

c) in Monographien

Gehbauer, F. und Fiedrich, F. (2005): Modelle für ein effizientes Katastrophenmanagement am Beispiel von Erdbeben, in: Projekte erfolgreich managen (Hrsg. Schelle, H.; Reschke, H.; Schnopp, R. und Schub, A.), Juni 2005, Kapitel 7.3.8, S. 1 – 58.

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Markus, M., Engelmann, H., Gehbauer, F., Schweier, C., Rehor, M., Werder, S. (2006): Concepts of the Interdisciplinary Disaster Management Tool and Application Experiences, in: Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, 27.08.-01.09.2006 Davos, Switzerland, Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf and Davos, Switzerland, Vol. 2: 346 – 349.

c) in Monographien

keine

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1996 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	725.514 €	36.558 €	0	762.072 €
2005	129.600 €	1.800 €	0	131.400 €
2006	129.600 €	1.800 €	0	131.400 €
2007	129.600 €	1.700 €	0	131.300 €
Summe	**1.114.314 €**	**41.858 €**	**0**	**1.156.172 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Gehbauer, F., Prof. Dr. Stempniewski, L., Prof. Dr. Bähr, H.-P., Prof. Dr. Czurda, K., Prof. Dr. Wenzel, F., Prof. Dr. Brein, D., Dr. Popa, I., Prof. Dr. Lungu, D., Prof. Dr.	Baubetrieb Massivbau Photogrammetrie, GIS Geologie Geophysik Brandschutz Baubetrieb Erdbebeningenieurwesen	TMB IfMB IPF GEOL GEOK FFB Universitatea Ecologica UTCB, INCERC	07/1996–12/2007 06/2000–12/2007 07/1996–12/2007 01/1999–12/2007 07/1996–12/2007 01/2002–12/2007 07/1996–12/2007 01/2000–12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Hauth, J., Elektroniker Geanta, S., Col. Botirca, R., Dipl.-Ing.		TMB GIES /General Inspectorate for Emergency Operations (GIES)	1/2002–12/2007 1/2001–12/2007 1/2000–12/2007	
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Engelmann, H., Dipl.-Ing. Markus, M., Dipl.-Ing. Zikas, T., Dipl.-Ing. Alexander Buttau Bi, T. Devi, V. Braun, D. Yang, Y. Conchi, S.	Informatik Baubetrieb Baubetrieb Informatik Informatik Elektrotechnik Informatik Informatik Maschinenbau	TMB TMB TMB Hochschule Karlsruhe Universität Karlsruhe (TH) Universität Karlsruhe (TH) Universität Karlsruhe (TH) Universität Karlsruhe (TH) Universität Karlsruhe (TH)	01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2005 01/2005–12/2005 02/2006–06/2005 02/2006–12/2007 06/2006–11/2007 12/2006–12/2007	0,75 BAT IIa 0,5 BAT IIa 0,75 BAT IIa stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt C5

Bildanalyse in Geowissenschaften

und bei Ingenieurmaßnahmen

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Miriam Rehor
Hans-Peter Bähr
Thomas Vögtle

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt C5

5.1.1 Titel:

Bildanalyse in Geowissenschaften und bei Ingenieurmaßnahmen

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Photogrammetrie, Digitale Bildverarbeitung

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Bähr, Hans-Peter, 07.11.1942
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe
Telefon: 0721/608-2314 bzw. -2315
Telefax: 0721/608-8450
E-Mail: hans-peter.baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Miriam Rehor

5.1.5 Rumänische Partner:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Florea Zăvoianu
Facultatea de Geodezie, Laboratorul de Fotogrammetrie si Teledetectie
Universitatea Tehnică de Construcții Bucuresti

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das Ziel des Teilprojekts C5 ist es, Verfahren zu entwickeln, die es erlauben, möglichst schnell nach einem Starkbeben einen umfassenden Überblick über die Schadenssituation an Gebäuden in städtischen Gebieten zu erhalten. Durch die Ergebnisse dieser Schadensanalyse sollen Führungs- und Rettungskräfte bei der Bewältigung der Katastrophen unterstützt werden. Daher lag der Schwerpunkt der vierten Antragsphase auf der Entwicklung von Verfahren zur Klassifizierung von Gebäudeschäden. Als Datengrundlage wurden flugzeuggetragene Laserscannerdaten gewählt. Am Ende der dritten Phase wurden zwei Laserscannerbefliegungen des Übungsdorfs Epeisses durchgeführt, einem Trainingsgelände der Schweizer Katastrophenhilfe. Auf diesem Gelände befinden sich mehrere ungeschädigte Gebäude sowie Gebäude, die unterschiedliche Schädigungen aufweisen. Die Entwicklung der Verfahren zur Schadensinterpretation konnte somit anhand von realen Daten erfolgen.

Bevor mit der Klassifizierung der Gebäudeschäden begonnen werden konnte, musste zunächst untersucht werden, wie geschädigte Gebäudestrukturen am besten geometrisch modelliert werden können. Dabei stellte sich sehr schnell heraus, dass das Verfahren, das in den vorhergehenden Phasen für die automatische Modellierung ungeschädigter Gebäude entwickelt wurde, nicht verwendet werden kann, da es auf der vollständigen Approximation der Gebäude durch ebene Flächen beruht. Daher wurde eine neue Methode entwickelt, bei der die zerstörten Teile der Gebäude durch Dreiecksvermaschungen modelliert werden. Die Klassifizierung der Gebäudeschäden basiert auf der Überlagerung und dem Vergleich von 3D-Modellen der Gebäude vor und nach der Katastrophe. Da von dem Trainingsgelände nur Daten des zerstörten Zustands vorlagen, musste zunächst der unzerstörte Zustand der Gebäude aus Bauplänen und Fotos rekonstruiert werden. Anschließend wurde eine Klassifizierungsmethode entwickelt, die auf unscharfer Logik (fuzzy logic) basiert. Die Schadensbilder, zwischen denen während der Klassifizierung unterschieden wird, entsprechen denen, die in dem im Rahmen des SFB entworfenen Schadenskatalog zusammengestellt sind.

Um die Verfahren an zusätzlichen Daten testen zu können, wurde während der dritten Phase eine Software entwickelt, mit der Laserscannerbefliegungen auf der Basis von CAD-Modellen simuliert werden können. In dieser Phase wurden CAD-Modelle von Gebäuden mit und ohne Schädigungen, die vom Teilprojekt C7 zur

Verfügung gestellt wurden, so aufbereitet, dass dieses Simulationsprogramm darauf angewandt werden kann.

Ergänzend zu diesen Arbeiten wurde eine Messkampagne zum Übungsdorf Epeisses durchgeführt, wobei terrestrische Laserscannerdaten einiger geschädigter Gebäude erfasst wurden. Diese Daten sollen mit den flugzeuggetragen erfassten Daten fusioniert werden und somit zur Verbesserung der entwickelten Verfahren beitragen, da durch die neue Aufnahmeplattform eine andere Blickrichtung auf die Trümmerstrukturen erfolgt.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Als Vorarbeit für die in dieser Phase im Mittelpunkt stehende Schadensinterpretation wurde untersucht, wie Änderungen, die in städtischen Gebieten auftreten, mit Hilfe von Laserscannerdaten detektiert werden können. Dabei ergab sich, dass nicht alle Veränderungen, die in einem multitemporalen Laserscannerdatensatz enthalten sind, relevant im Sinne einer realen Gebäudeveränderung sind. Es treten vielmehr auch sensorbedingte sowie temporale Änderungen auf. Für die Unterteilung der realen Änderungen an Gebäuden in Neubauten, Aufbauten, Rückbauten und Abrisse wurde ein objektorientiertes Verfahren entwickelt (vgl. Berichtsband für die Jahre 2002-2004, STEINLE 2005). Es war geplant, die so detektierten Änderungen anschließend im Rahmen der Schadensinterpretation genauer zu analysieren und sie den im Schadenskatalog festgelegten Schadenstypen zuzuweisen.

Außerdem wurden am Ende der dritten Phase zwei Laserscannerbefliegungen unseres Testgebiets „Epeisses“ durchgeführt. Die erste der beiden Befliegungen fand am 17. Juni 2004 statt, die zweite am 1. November 2004 und nicht - wie im Bericht zur dritten Phase angenommen - am 12. Juli. Bei dem Gebiet, das in der Nähe von Genf liegt, handelt es sich um ein ca. $500\,\mathrm{m} \times 800\,\mathrm{m}$ großes Trainingsgelände der Schweizer Katastrophenhilfe, auf dem sich sowohl ungeschädigte Gebäude befinden als auch Gebäude mit unterschiedlichen Schädigungen und Schadenstypen. In Abbildung 1 sind einige der zerstörten Gebäude zu sehen. Auf diesem Gelände werden Rettungs- und Bergungsmaßnahmen eingeübt. Durch die beiden Befliegungen lagen nun Daten real geschädigter Gebäude vor. Dies bringt den großen Vorteil mit sich, dass die Entwicklung der Verfahren zur Schadensklassifizierung anstelle mit simulierten Daten – wie ursprünglich geplant – nun mit realen Daten erfolgen kann. Aufgrund des Mangels an multitemporalen Laserscannerdaten von Gebieten mit erdbebenbedingten Schäden konnten andere Verfahren, die zwar theoretisch für die Schadensanalyse nach Katastrophen empfohlen werden (z. B. MURAKAMI ET AL. 1998, VU ET AL. 2004), bis zu diesem Zeitpunkt niemals an realen Daten getestet werden.

Abbildung 1: Zerstörte Gebäude auf dem Übungsgelände.

Im Rahmen des Teilprojekts C5 bestand daher nun die einzigartige Möglichkeit, auch praktisch nachzuweisen, dass Laserscannerdaten für die Erfassung und Analyse der Schadenssituation nach Erdbeben sehr gut geeignet sind.

Da zu Beginn der dritten Phase noch nicht absehbar war, dass diese Daten erfasst werden können, wurde ein Programm zur Simulation von Laserscannerdaten basierend auf CAD-Modellen entwickelt. Damit ist es möglich, Laserscannerdaten sowohl von ungeschädigten als auch von geschädigten Gebäuden zu erzeugen und zwar für alle relevanten Schadenstypen. Mit Hilfe dieser Software sollte somit auch in der vierten Phase die Datenbasis noch zusätzlich erweitert werden.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Im Folgenden wird erläutert, welche Ergebnisse in der Abschlussphase des Projekts erzielt werden konnten und welche Methoden dafür verwendet wurden. Die Gliederung orientiert sich an den im Antrag zur vierten Phase definierten Zielen.

1. Auswertung der Befliegung des Übungsgeländes des Schweizer Katastrophenschutzes bezüglich der Erstellung von Gebäudemodellen geschädigter Bausubstanz

Die Grundlage für die Entwicklung und den Test von Verfahren zur Schadensinterpretation ist die Schaffung einer umfassenden Datenbasis. Am Ende der dritten Antragsphase konnten, wie bereits erwähnt, im Zuge zweier Befliegungen Laserscannerdaten des Übungsdorfs Epeisses erfasst werden. Die Ergebnisse der Befliegungen konnten im Bericht zur dritten Phase nicht beschrieben werden, da die erste Befliegung bei Abgabe gerade erst durchgeführt worden war und für die zweite noch nicht einmal ein genauer Termin feststand. Daher werden die Gegebenheiten bei der Aufnahme hier kurz erläutert.

Während sich bei der ersten Befliegung keine Personen oder zusätzlichen Störobjekte auf dem Gelände befanden, wurde während der zweiten Befliegung eine Katastrophenschutzübung durchgeführt. Daher waren zu dieser Zeit Personen, Fahrzeuge sowie zusätzliche Trümmerstrukturen auf dem Gelände. Außerdem war der Brandkanal bei dieser Übung in Betrieb.

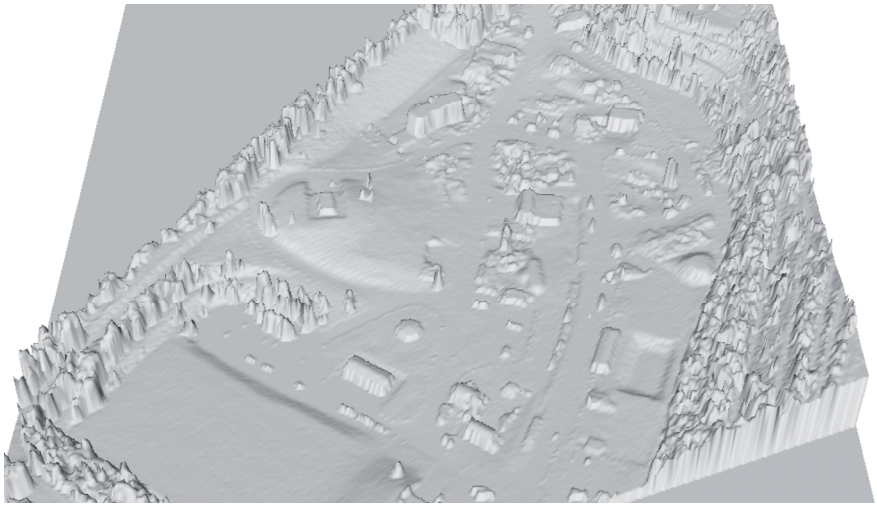


Abbildung 2: 3D-Darstellung des Last-Echo-DOM des Übungsgeländes der Schweizer Katastrophenhilfe.

Somit kann anhand der Daten auch untersucht werden, welchen Einfluss Rauch auf Laserscannerdaten und daraus abgeleitete 3D-Modelle hat. Die Eigenschaften der von der Firma TopoSys erfassten Daten sind z. B. in REHOR & BÄHR (2007) und TARSHA-KURDI ET AL. (2007b) beschrieben. Außerdem werden in REHOR & BÄHR (2007) bzw. in REHOR (2007a, b) die durchgeführten Vorverarbeitungsschritte erläutert. Abbildung 2 zeigt eine 3D-Ansicht der Last-Echo-Daten, die bei der Befliegung im Juni 2004 aufgenommen wurden.

Die Schadensinterpretation basiert auf dem Vergleich von 3D-Modellen der Gebäude vor und nach dem Eintritt der Katastrophe. Da von dem Übungsgelände nur Daten der Bauwerke im zerstörten Zustand vorlagen, musste der unzerstörte Zustand der Gebäude rekonstruiert werden. Außerdem musste untersucht werden, ob die geschädigten Gebäudeteile mit dem in der dritten Phase vorgeschlagenen Verfahren geometrisch modelliert werden können. Beide Arbeitsschritte werden im Folgenden beschrieben.

a) Simulation des unzerstörten Zustands der Gebäude auf dem Testgebiet

Für eines der Gebäude auf dem Übungsgelände konnten Konstruktionspläne von den Verantwortlichen beschafft werden. Mit Hilfe der in diesen Plänen angegebenen Maße konnte das Modell dieses Gebäudes im unzerstörten Zustand rekonstruiert werden.

Für die restlichen Gebäude lagen bedauerlicherweise keine Baupläne vor. Daher wurden diese Gebäude aus den Spektralaufnahmen rekonstruiert, die während der Laserscannerbefliegungen erfasst wurden, und aus terrestrisch aufgenommen Fotografien, die das Teilprojekt C7 zur Verfügung gestellt hat. Sowohl auf den terrestrischen Fotografien als auch auf den Luftbildern ist allerdings nur der zerstörte Gebäudezustand dokumentiert.

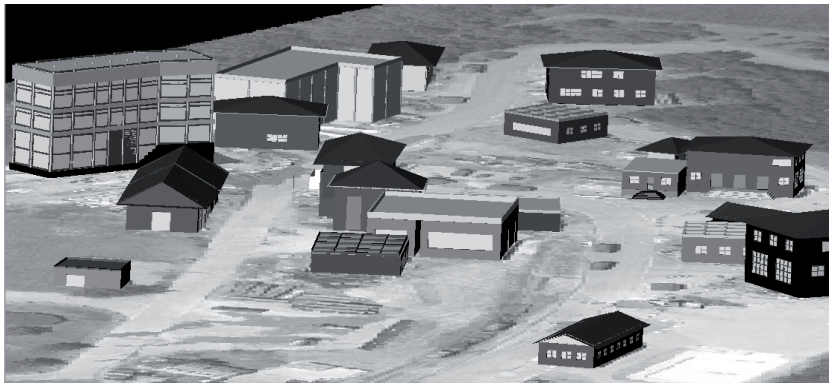


Abbildung 3: Ansicht der CAD-Modelle der rekonstruierten Gebäude (Ausschnitt).

Es konnten daher lediglich die Gebäudegrenzen sowie die Stockwerkanzahl aus den Bilddaten abgeleitet werden. Somit gelang es, relativ realistische Gebäudemodelle zu erzeugen. Abbildung 3 zeigt einige CAD-Modelle der rekonstruierten Gebäude in Überlagerung mit dem RGB-Bild, das im Zuge der Befliegung im Juni 2004 aufgenommen wurde.

b) Untersuchung der geometrischen Modellierung zerstörter Gebäudestrukturen und Optimierung der Verfahren

In den vorhergehenden Phasen des Projekts wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem 3D-Modelle intakter Gebäude aus Laserscannerdaten abgeleitet werden können (STEINLE 2005). Das Ziel bei der Entwicklung dieses Verfahrens war, dass die Modellierung weitgehend automatisch abläuft. Bis zum Beginn der vierten Phase wurde dieses Ziel noch nicht vollständig erreicht. Es war immer noch ein gewisses Maß an Interaktion nötig, um konsistente Gebäudemodelle zu erhalten. Daher wurden in der vierten Phase zunächst einige Optimierungen und Erweiterungen an diesem Verfahren vorgenommen bevor es auf die Daten mit den geschädigten Gebäuden angewandt wurde. Dies geschah im Hinblick auf die Untersuchung, inwieweit dieses Verfahren auch für die Modellierung geschädigter Objektstrukturen eingesetzt werden kann. Das in Abbildung 4 dargestellte Schema zeigt den Ablauf der Gebäudemodellierung. Teile, die in vorhergehenden Phasen entwickelt wurden und unverändert bestehen blieben, sind darin in Weiß gekennzeichnet. Diese sind in STEINLE (2005) ausführlich beschrieben. Modifizierte Teile sind in Abbildung 4 in Dunkelgrau und neu entwickelte Teile in Hellgrau dargestellt. Beide werden in REHOR (2006) und REHOR & BÄHR (2006) detailliert erläutert.

Das Modellierungsverfahren basiert auf der Annahme, dass Gebäude durch ebene Flächen approximiert werden können. In einem ersten Schritt werden daher zunächst ebene Flächen, welche die Dachflächen repräsentieren, mit einem speziell entwickelten Flächenwachstumsverfahren aus den Laserscannerdaten (2.5D-Rasterdaten) extrahiert (STEINLE 2005).

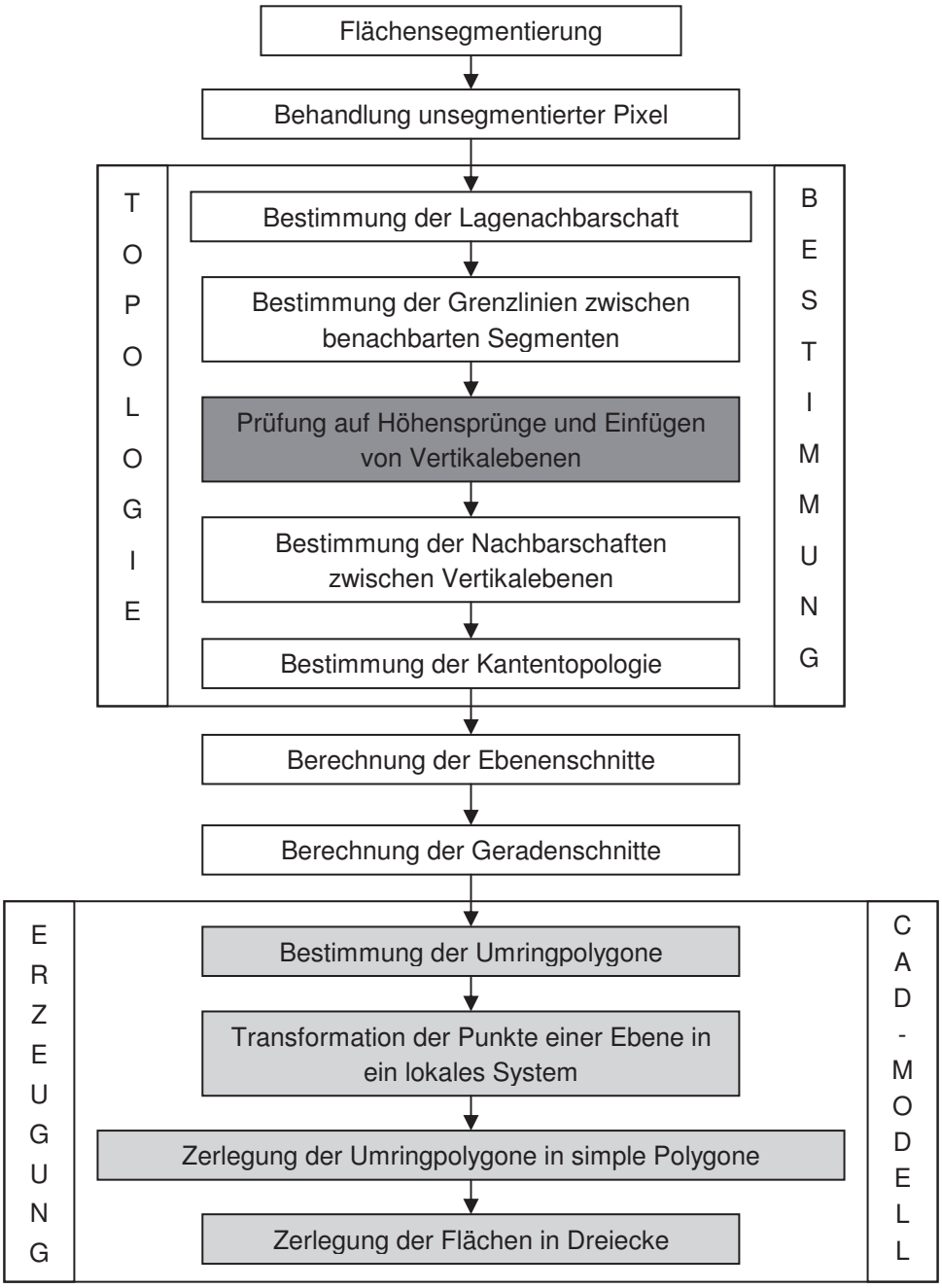


Abbildung 4: Ablauf der Gebäudemodellierung; weiß: unveränderte Teile, dunkelgrau: modifizierte Teile, hellgrau: neu entwickelte Teile.

Diese Flächen müssen eine vorgegebene Mindestgröße aufweisen (z. B. 3×3 Pixel). Bei dieser Flächensegmentierung werden nicht notwendigerweise alle Pixel einem Flächensegment zugeordnet, da in gewissen Bereichen die Modellannahme, dass Gebäude vollständig durch ebene Flächen angenähert werden können, nicht erfüllt ist. Dies ist z. B. dann der Fall, wenn sich Kleinstrukturen, wie Schornsteine oder Gauben, auf Gebäudedächern befinden oder Objekte, wie Bäume oder Baukräne, über Gebäudedächer ragen. Ein Beispiel dafür ist in STEINLE (2005) dargestellt. Um die auf diese Weise hervorgerufenen Lücken in den Dachflächen zu schließen und konsistente Modelle zu erhalten, stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

Bei der ersten werden die unsegmentierten Stellen durch Dilatation überbrückt. Dies führt allerdings zu einer starken Generalisierung. Daher wurde bereits im Bericht zur dritten Phase eine andere Vorgehensweise vorgeschlagen, bei der solche Bereiche durch kleinere Flächen angenähert werden (vgl. STEINLE 2005). Bei diesen kleineren Flächen handelt es sich z. B. um ein oder zwei Pixel große Segmente, die durch horizontale Ebenen dargestellt werden. Da bei geschädigten Gebäuden aufgrund der zu erwartenden Komplexität der Strukturen eine vollständige Approximation durch Ebenen ebenfalls nicht möglich ist, wurde diese Methode auch auf die Daten des Übungsgeländes angewandt. So sollte untersucht werden, ob mit ihr auch die Geometrien solcher Gebäude modelliert werden können. Dabei stellte sich schnell heraus, dass das Verfahren für die Modellierung geschädigter Gebäudestrukturen nicht in vollem Umfang geeignet ist, da vor allem in Bereichen, in denen z. B. Trümmerkegel auftreten, sehr viele kleine Flächen extrahiert werden (vgl. 2.). Bei der Bestimmung der Nachbarschaften kommt es dann nicht nur zu einer erheblichen Erhöhung der Rechenzeit, sondern auch zu einer extremen Aufweitung der Kombinatorik, da auch sehr viele Vertikalebenen zur Konsistenthaltung der Modelle eingeführt werden müssen.

c) Untersuchung der Auswirkung von Rauch auf Laserscannerdaten

Da der Rauchkanal auf dem Übungsgelände während der zweiten Befliegung in Betrieb war, konnte – wie bereits erwähnt – untersucht werden, welchen Einfluss Rauch auf Laserscannerdaten hat. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel dafür. Darin ist zu erkennen, dass der Rauch auf die Last-Echo-Daten keine Auswirkungen hat während er in den First-Echo-Daten deutlich erkannt werden kann. Diese Eigenschaft bringt einen großen Vorteil für den Einsatz von Laserscanning im Katastrophenfall mit sich. Aufgrund der Eigenschaft, dass der Laserpuls den Rauch zumindest teilweise durchdringt, können somit auch bei den häufig zu beobachtenden Bränden nach Starkbeben mit entsprechender Rauchbildung Laserscannerdaten erfasst werden.

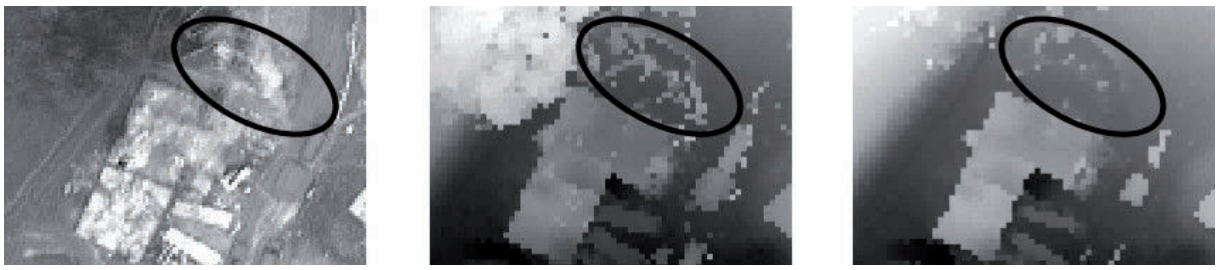


Abbildung 5: links: Luftbild mit Rauch (markiert); Mitte: First-Echo-DOM, in dem der Rauch deutlich sichtbar ist; rechts: Last-Echo-DOM, auf das der Rauch keine Auswirkung hat.

2. Optimierung der geometrischen Modellierung stark geschädigter Gebäude

Dieser Arbeitspunkt hängt eng mit der Auswertung der Befliegungsdaten unseres Testgebiets in der Schweiz bzgl. der Gebäudemodellierung geschädigter Strukturen zusammen (vgl. 1.). Nachdem die Untersuchungen ergeben hatten, dass mit dem vorhandenen Verfahren für die Gebäudemodellierung keine zufriedenstellenden Ergebnisse für die meisten dieser geschädigten Gebäude erzielt werden können, wurde ein neues Verfahren entwickelt, mit dem 3D-Modelle der eingestürzten Gebäude erzeugt werden können (REHOR 2006, BÄHR & REHOR 2006). Da bei der Klassifizierung der Gebäudeschäden Eigenschaften wie beispielsweise die Änderung der Größe und Neigung der Dachebenen eine wichtige Rolle spielen (vgl. 3.), wird bei diesem Verfahren ebenfalls mit der Extraktion ebener Flächen aus den Laserscannerdaten begonnen. Dies ist auch deshalb wichtig, da in einem von einer Katastrophe betroffenen Gebiet nicht notwendigerweise alle Gebäude zerstört sind und für die intakten Gebäude mit dem verwendeten Verfahren ebenfalls sinnvolle Modelle erzeugt werden müssen. Die Flächensegmentierung läuft identisch zu der Segmentierung bei ungeschädigten Gebäuden ab, wobei wieder nur Flächen größer als die vorgegebene Mindestgröße zugelassen sind. Pixel, die keiner solchen Fläche zugewiesen werden können, bleiben zunächst unsegmentiert. Aus den Randpunkten der extrahierten Flächen und den unsegmentierten Punkten wird anschließend mit Hilfe einer ebenen Delaunay-Triangulation ein TIN (Triangulated Irregular Network) erzeugt, wobei die Ergebnisse der Flächensegmentierung berücksichtigt werden. Die entstandenen Dreiecke werden anschließend klassifiziert bevor eine erneute Flächensegmentierung durchgeführt wird, mit der lange, schmale, ebene Flächen detektiert werden. Im Anschluss daran müssen die Dreiecke des TIN erneut klassifiziert werden bevor die Ausgabe des 3D-Modells erfolgen kann. Eine ausführliche Beschreibung der Modellierungsmethode findet sich in REHOR (2006) bzw. in BÄHR & REHOR (2006).

3. Konzeption und Realisierung der Verfahren zur Schadensinterpretation

Auf der Klassifizierung der unterschiedlichen Schadenstypen lag der Schwerpunkt der Entwicklungen in der vierten Projektphase. Dies ist der entscheidende Schritt in der Gesamtkonzeption unseres Ansatzes zur schnellen, großflächigen Erfassung von Gebäudeschäden. Das Ziel der Schadensinterpretation ist es, signifikante Änderungen an Gebäudegeometrien festzustellen und diese Änderungen anschließend vorgegebenen Schadensklassen zuzuweisen. Die Schadenstypen, zwischen denen im Rahmen des Klassifizierungsprozesses unterschieden werden soll, entsprechen dabei den Schadensbildern des Schadenskatalogs, der in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C7 entwickelt wurde (SCHWEIER & MARKUS 2006). Abbildung 6 zeigt eine Übersicht über diese Schadensbilder.

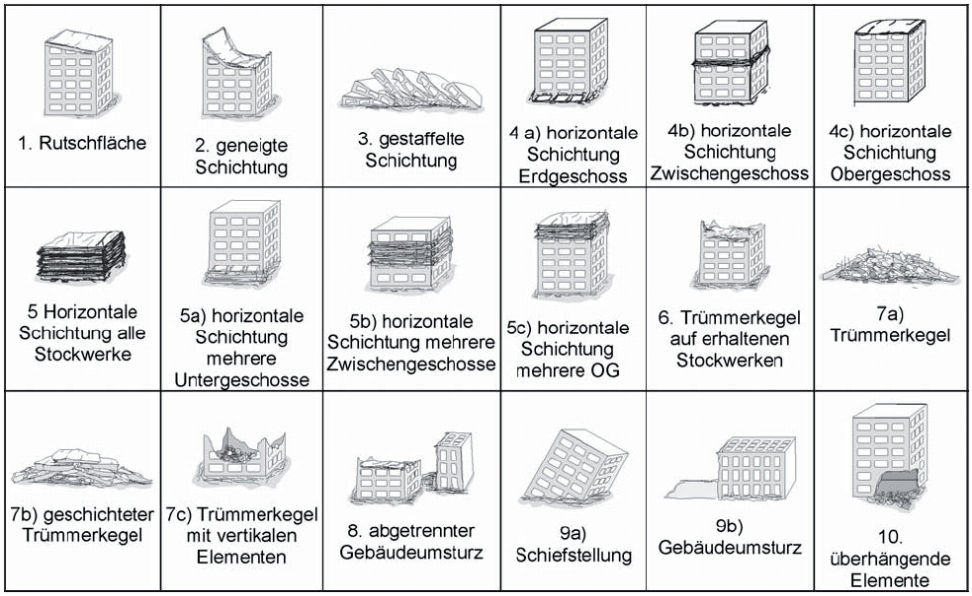


Abbildung 6: Zusammenstellung der Schadensbilder des Schadenskatalogs (aus: GEHBAUER ET AL. 2003).

Zunächst musste aus der Vielzahl möglicher Klassifizierungsverfahren eines ausgewählt und analysiert werden, das speziell für die Klassifizierung von Gebäudeschäden geeignet erschien. Die Ergebnisse der Untersuchung mehrerer Ansätze werden im Folgenden erläutert. Anschließend wird die Vorgehensweise mit der letztendlich gewählten Klassifizierungsmethode beschrieben.

a) Auswahl eines geeigneten Klassifizierungsverfahrens

Bei den Verfahren, die als potenziell geeignet eingeschätzt wurden, handelt es sich um die *Maximum-Likelihood-Klassifizierung*, um *neuronale Netze* sowie um die Klassifizierung mit Hilfe von *unscharfer Logik* (*fuzzy logic*).

Sowohl bei der klassischen *Maximum-Likelihood-Klassifizierung* als auch bei der Klassifizierung mit *neuronalen Netzen* handelt es sich um lernende Systeme. Bei diesen impliziten Verfahren wird das Wissen während der Klassifizierung eingeführt (BÄHR, 2005b). Daher wird eine genügend große Anzahl an Trainingsbeispielen für jede Klasse benötigt, um die Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen bzw. die Gewichte und Schwellwerte des Netzes zuverlässig zu bestimmen (z. B. DUDA ET AL. 2001). Da im Rahmen dieses Projekts nur für eine sehr begrenzte Anzahl von geschädigten Gebäuden Laserscannerdaten vorliegen und eine große Anzahl an Klassen unterschieden werden soll, erscheinen diese beiden Klassifizierungsmethoden somit für die Schadensinterpretation als weniger geeignet, zumindest aber als nicht optimal.

In der von ZADEH (1965) eingeführten *unscharfen Logik* gehört ein Element nicht – wie in der klassischen Bool'schen Logik – entweder einer Klasse an oder nicht, sondern es kann zu einem gewissen Grad zu einer Klasse gehören. Bei der Klassifizierung mit Hilfe von *unscharfer Logik* müssen zunächst explizit

Zugehörigkeitsfunktionen für die einzelnen Merkmale und Klassen definiert werden, mit denen der Grad der Zugehörigkeit eines Objekts mit einem diskreten Merkmalswert zu einer Klasse bestimmt werden kann. Für die Definition dieser Zugehörigkeitsfunktionen ist Expertenwissen nötig. Daher eignet sich diese Methode besonders für die Schadensinterpretation, da anstelle von Trainingsdatensätzen das a priori Wissen über die einzelnen Schadenstypen eingebracht werden kann. Dieses Wissen über die Schadensbilder ist im Schadenskatalog zusammengestellt. Er enthält neben der Beschreibung der einzelnen Schadenstypen auch qualitative und quantitative Angaben zu ihren geometrischen Eigenschaften. Ein weiterer Vorteil der Klassifizierung mit unscharfer Logik ist die Möglichkeit, Unschärfen zu modellieren. Unschärfen treten bei der Klassifizierung an mehreren Stellen auf. So sind zum einen die Merkmale, die in die Klassifizierung eingehen, mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Zum anderen kann ein Gebäude nicht immer nur einem einzigen Schadensbild zugewiesen werden. Teilweise kommen auch Kombinationen aus mehreren Schadensbildern an einem Gebäude vor, wie z. B. eine *horizontale Schichtung* mit *Schiefstellung*. Oder es tritt der Fall auf, dass der Schadenstyp nicht eindeutig festgelegt ist und sich unterschiedliche Experten z. B. für verschiedene Schadensbilder entscheiden würden.

b) Klassifizierung mit Hilfe von unscharfer Logik

Der Vergleich von 3D-Gebäudemodellen vor dem Erdbeben mit Modellen aus Laserscannerdaten, die nach dem Beben erfasst werden, bildet – wie bereits erwähnt – die Grundlage für die Schadensinterpretation (REHOR 2007a, b). In einem ersten Schritt werden daher die ebenen Dachflächen der Referenzgebäude mit den ebenen Flächen überlagert, die aus den nach dem Erdbeben erfassten Laserscannerdaten extrahiert werden. Auf diese Weise werden neue Segmente gebildet. Für jedes dieser Segmente werden die Merkmale *Volumenreduktion*, *Höhenreduktion*, *Neigungsänderung* und *Größe* bestimmt. Mit Hilfe dieser Merkmale werden die Segmente anschließend im Rahmen einer auf unscharfer Logik basierenden Klassifizierung den unterschiedlichen Schadenstypen zugewiesen.

Während der Flächensegmentierung werden nicht notwendigerweise alle Pixel ebenen Flächen zugewiesen. Momentan werden diese unsegmentierten Pixel, die zu keiner dieser Flächen passen, separat analysiert indem für jedes die Differenz zwischen seiner Höhe in den Referenz- und seiner Höhe in den Schadensdaten berechnet wird und diese Differenz mit einem Schwellwert verglichen wird.

Es ist außerdem zu beachten, dass gegenwärtig nur Änderungen innerhalb der Gebäudegrundrisse der Referenzmodelle analysiert werden. Änderungen außerhalb dieser Grundflächen bleiben unberücksichtigt.

Detaillierte Beschreibungen der Klassifizierungsmethode finden sich in REHOR (2007a, b) und REHOR & BÄHR (2007) weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden soll.

4. Untersuchung der Verfahren zur Schadensinterpretation anhand der Daten der Befliegungen des Testgebietes Epeisses (Schweiz) sowie der erweiterten Datenbasis

Die Ergebnisse, die erzielt werden, wenn die Schadensklassifizierung auf die Daten des Übungsgeländes Epeisses angewandt wird, werden in REHOR (2007a, b) und REHOR & BÄHR (2007) detailliert präsentiert. Sie sind voll zufriedenstellend wobei es auch noch viele Verbesserungsmöglichkeiten gibt. Auf die zusätzlichen Daten der erweiterten Datenbasis (vgl. 6.) wurde das Verfahren ebenfalls angewandt. Auch die so erzielten Ergebnisse sind zufriedenstellend. Für ein Gebäude sind sie in REHOR (2007a) bereits veröffentlicht. Für die weiteren Gebäude werden sie voraussichtlich im Jahr 2008 publiziert werden.

5. Definition der Schnittstelle zum Disaster Management Tool

Die Ergebnisse der Schadensinterpretation bilden eine Haupteingabe in das Disaster Management Tool (DMT) (vgl. GEHBAUER ET AL. 2007; MARKUS ET AL. 2005, 2006). Sie werden darin insbesondere als Grundlage für die Opferabschätzung benötigt, die im Teilprojekt C7 bearbeitet wird. Als Schnittstelle wurde daher in Kooperation mit den Teilprojekten C6 und C7 ein XML-Schema (XSD) für den Austausch der Daten definiert. Für jeden der bei der Klassifizierung extrahierten Teile eines geschädigten Gebäudes wird eine XML-Nachricht an das DMT geschickt, die die folgenden Parameter enthält:

- ID der Nachricht,
- Sendezeit,
- Sender der Nachricht (Information, von wem die Nachricht verschickt wird),
- Empfänger der Nachricht (in diesem Fall das System),
- Angaben zu dem Objekt, das in der Nachricht genauer beschrieben wird (in diesem Fall handelt es sich um ein Objekt vom Typ *building* mit der ID des Gebäudes (*ID_BUILDING)*),
- weitere Parameter, die in einer Nachricht angegeben werden müssen, aber vom System automatisch generiert werden,
- ID des Gebäudeteils, der beschrieben wird (diese ID (*buildingPart*) enthält auch die ID des Gebäudes, zu dem der Gebäudeteil gehört, d. h. *buildingPart = [ID_BUILDING]_XX*, mit *XX = 01, 02, …*),
- Anzahl der Gebäudeteile, die zu dem Gebäude gehören,
- Bezeichnung des Schadensbildes (Zeichenkette),

- ID des Schadensbildes (vgl. Schadenskatalog, Abbildung 6)

  00: uncollapsed
  10: inclined plane
  20: multi layer collapse
  30: outspread multi layer collapse
  40: pancake collapse – one storey
  41: pancake collapse – one storey - ground floor
  42: pancake collapse – one middle storey
  43: pancake collapse – one storey - top storey
  50: pancake collapse – several storeys
  51: pancake collapse – several lower storeys
  52: pancake collapse – several middle storeys
  53: pancake collapse – several upper storeys
  54: pancake collapse – all storeys
  60: heap of debris on uncollapsed storeys
  71: heap of debris
  72: heap of debris with planes
  73: heap of debris with vertical elements
  80: overturn collapse – separated
  91: inclination
  92: overturn collapse
  100: overhanging elements,

- Wahrscheinlichkeit für das Schadensbild,
- Volumen vor der Schädigung innerhalb der ursprünglichen Grundfläche [m^3],
- Volumen vor der Schädigung außerhalb der ursprünglichen Grundfläche [m^3] (z. B. Treppen oder Vegetation),
- Volumen nach der Schädigung innerhalb der ursprünglichen Grundfläche [m^3],
- Volumen nach der Schädigung außerhalb der ursprünglichen Grundfläche [m^3],
- Fläche, die innerhalb der ursprünglichen Grundfläche liegt [m^2],
- Fläche, die außerhalb der ursprünglichen Grundfläche liegt [m^2],
- Geometrie der Grundfläche des Gebäudeteils als Polygon,
- Geometrie der Grundfläche, die außerhalb der ursprünglichen Grundfläche liegt, als Polygon.

Diese Informationen werden in der zentralen Datenbank des DMT gespeichert und stehen somit für die anderen Komponenten zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Außerdem wäre es möglich, die Schäden in der Lagekarte zwei- oder dreidimensional darzustellen. Die Visualisierung ist momentan allerdings noch nicht realisiert.

Bei der Definition der Schnittstelle wurde berücksichtigt, dass an einem Gebäude mehrere Schadensbilder auftreten können. Ein Gebäude wird daher in Gebäudeteile zerlegt, d. h. in Bereiche mit unterschiedlichen Schadensbildern. Die Anzahl der Gebäudeteile, in die das Gebäude aufgeteilt wird, ergibt sich erst bei der Auswertung der Schadensdaten und kann nicht a priori festgelegt werden.

Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass das jeweilige Geschoss, welches bei einer *horizontalen Schichtung (eines Geschosses)* eingestürzt ist, aus flugzeuggetragenen Daten nicht bestimmt werden kann. Daher wurde das Schadensbild *40: pancake collapse – one storey* eingeführt. Es wurde allerdings auch die Möglichkeit offen gelassen, genauer zu spezifizieren, welches Stockwerk kollabiert ist, sofern dies mit einer anderen Methode als dem flugzeuggetragenen Laserscanning festgestellt wird (z. B. durch Integration terrestrischer Daten, siehe 9. a). Bei der *horizontalen Schichtung mehrerer Stockwerke* (*pancake collapse – several storeys*) verhält es sich analog.

Außerdem wird der Fall berücksichtigt, dass ein Gebäude nach der Schädigung auch Flächen außerhalb der ursprünglichen Grundfläche einnehmen kann. Momentan wird bei der Klassifizierung die Situation außerhalb der Grundfläche zwar noch nicht berücksichtigt, es bleibt so aber die Möglichkeit erhalten, diese Information zu einem späteren Zeitpunkt zu integrieren. Daher werden die Volumina vor und nach der Schädigung getrennt für Bereiche innerhalb und außerhalb der ursprünglichen Grundfläche angegeben. Das Volumen außerhalb wird auch beim Referenzzeitpunkt berücksichtigt, da es sein kann, dass sich am bzw. neben einem Gebäude Treppen oder Vegetation befinden. Wird in solchen Fällen nur das Volumen nach der Schädigung betrachtet, so kann eine Volumenzunahme vorgetäuscht werden, die überhaupt nicht vorhanden ist. Es ist allerdings auch zu beachten, dass das Volumen außerhalb der Grundfläche nicht immer aus den Referenzdaten bestimmt werden kann. Ebenso wie das Volumen wird auch die Grundfläche des Gebäudeteils in zwei Bereiche zerlegt, von denen der eine innerhalb und der andere außerhalb der ursprünglichen Grundfläche liegt. Sowohl das Volumen als auch die Grundfläche des Gebäudeteils außerhalb der ursprünglichen Grundfläche können gegenwärtig noch nicht angegeben werden.

Die Wahrscheinlichkeit für das Schadensbild wird während der momentanen Klassifizierung noch nicht bestimmt. Dennoch wurde das Schema so definiert, dass die Angabe dieser Wahrscheinlichkeit, wenn sie vorhanden sein wird, ohne Probleme möglich ist.

6. Fortführung des Aufbaus einer umfassenden Datenbasis zur Entwicklung und Überprüfung der Schadensinterpretation

Eine umfassende Datenbasis ist die essentielle Grundlage für die Entwicklung und Überprüfung der Verfahren für die Schadensdetektion und -klassifizierung. Daher wurde bereits in der dritten Projektphase ein Programm entwickelt, mit Hilfe dessen Laserscannerbefliegungen bzw. flugzeuggetragene Laserscannerdaten basierend auf CAD-Modellen simuliert werden können. Dieses Programm wurde im Laufe der vierten Projektphase nochmals überarbeitet und insbesondere in Hinblick auf die Rechenzeit verbessert. Außerdem wurden während der dritten Projektphase CAD-Modelle von Gebäuden vor und nach einem Erdbeben vom Teilprojekt (TP) C7 konstruiert (vgl. Arbeitsbericht des TP C7 im Berichtsband für die Jahre 2002-2004, SCHWEIER ET AL. 2004) und dem TP C5 zur Erweiterung der Datenbasis zur Verfügung gestellt. Diese Modelle mussten zunächst so aufbereitet werden, dass das Simulationsprogramm darauf angewandt werden konnte. Dieser Schritt war nötig, da in den vom TP C7 zur Verfügung gestellten Modellen zum Teil Volumenkörper verwendet wurden, um die Gebäude- und Trümmerstrukturen zu modellieren. Da das Simulationsprogramm aber als Eingabe CAD-Modelle mit Körpern benötigt, die durch ebene Flächen begrenzt sind, mussten alle Volumenkörper manuell in 3D-Flächen umgewandelt werden. Anschließend konnten dann Laserscanner-befliegungen dieser Gebäude simuliert werden (REHOR 2007a). Ein Beispiel für ein Gebäude, für das auf diese Weise Laserscannerdaten erzeugt wurden, ist in Abbildung 7 dargestellt.

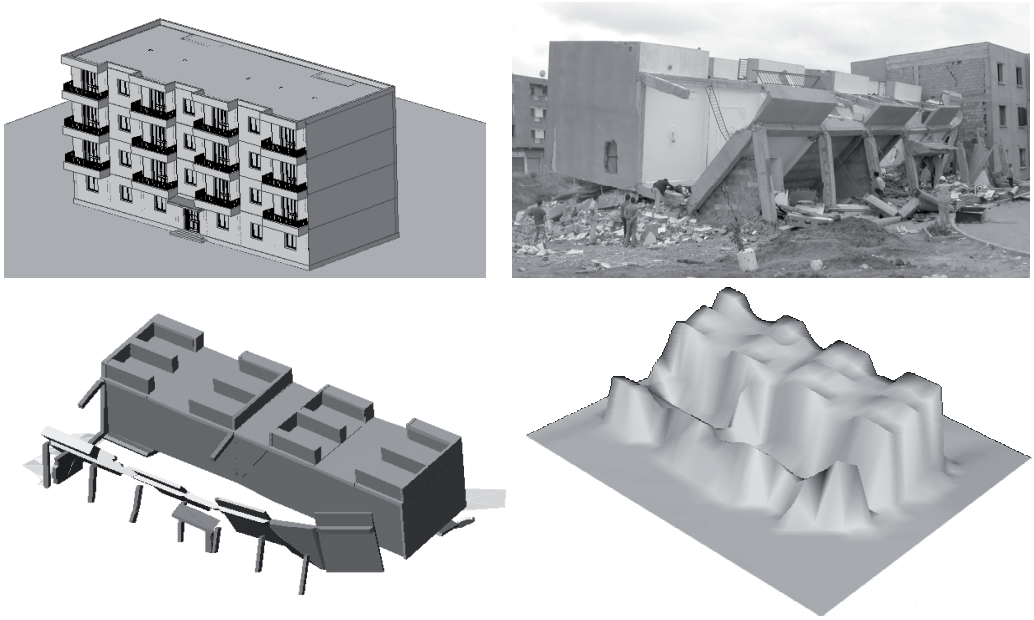


Abbildung 7: links oben: Rekonstruiertes CAD-Gebäudemodell im unzerstörten Zustand; rechts oben: Fotografie des zerstörten Gebäudes (aufgenommen von M. Markus); links unten: CAD-Modell des zerstörten Gebäudes; rechts unten: 3D-Ansicht des durch Simulation erzeugten Laserscanner-DOM des zerstörten Gebäudes.

7. Rückkopplung mit dem Schadenskatalog

Der Schadenskatalog bildet die Grundlage für die Klassifizierung der Gebäudeschäden. In ihm ist das gesamte a priori Wissen enthalten, das für die Klassifizierung verwendet wird. Er spielt daher – wie in 3. beschrieben – eine entscheidende Rolle bei der Definition der Zugehörigkeitsfunktionen. Obwohl im Laufe der Entwicklung und des Tests der Verfahren zur Schadensklassifizierung intensiv mit dem Schadenskatalog gearbeitet wurde, waren keine größeren Veränderungen an den Definitionen notwendig.

Die einzige Änderung ist die Einführung einer *horizontalen Schichtung eines Geschosses*, bei der es keine Rolle spielt, welches Stockwerk kollabiert ist (REHOR 2007b), und einer *horizontalen Schichtung mehrerer Geschosse*, bei der ebenfalls nicht festgelegt ist, welche Stockwerke eingestürzt sind. Die unterschiedlichen Arten von Trümmerkegeln wurden zunächst ebenfalls zusammengefasst, da sie bei ausschließlicher Nutzung von flugzeuggetragenen Laserscannerdaten nicht ausreichend unterschieden werden können. In weiteren Forschungen soll allerdings noch untersucht werden, inwieweit durch die Integration von terrestrisch erfassten und spektralen Daten eine Unterscheidung der Trümmerstrukturen sowie der unterschiedlichen Arten von horizontalen Schichtungen erreicht werden kann (vgl. 9. a; REHOR 2007b).

8. Abschließende Bewertung der Änderungsdetektion

Im Antrag zur vierten Projektphase wurde angenommen, dass die Schadensklassifizierung auf den im Rahmen der Änderungserkennung extrahierten Bereichen und Merkmalen aufbaut. Bei dieser wurde – aufgrund des Mangels an Daten real geschädigter Gebäude – allerdings nur pixelbasiert analysiert, ob ein Gebäude abgerissen oder zurückgebaut wurde, ob es unverändert blieb oder ob es sich um einen Neubau oder einen Aufbau handelt. Es wurden somit nur aggregierte Globalaussagen getroffen, die nicht sehr detailliert waren. Bei der Entwicklung der Verfahren zur Schadensinterpretation an realen Trümmerstrukturen wurde nun zu einer detaillierten Analyse übergegangen, bei der Vektormodelle, die aus den Laserscannerdaten nach der Katastrophe abgeleitet werden, mit Referenzmodellen verglichen werden. Als Ausgangspunkt für diese differenzierteren Untersuchungen wurden daher die Grundrisse der Gebäude gewählt, die im Referenzdatensatz enthalten sind. Dies bedeutet, dass auf die Durchführung der Änderungsdetektion vor der Schadensklassifizierung verzichtet werden kann. Daher wurden auch keine Modifikationen an den Methoden zur Änderungsdetektion vorgenommen.

Die Integration der Erkenntnisse aus den Genauigkeitsuntersuchungen, die während der dritten Projektphase durchgeführt wurden, wurde noch nicht umgesetzt. Bei den Untersuchungen hatte sich ergeben, dass durch die Fusion von aus First-Echo-Daten abgeleiteten Modellen mit Modellen, die aus Last-Echo-Daten generiert

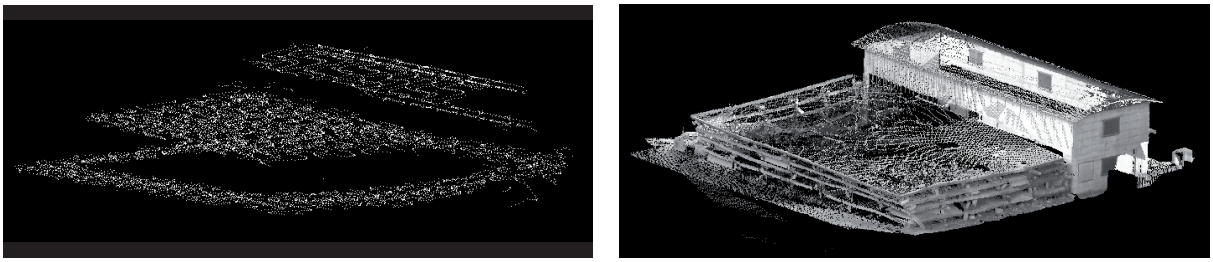
wurden, die systembedingten systematischen Vergrößerungen bzw. Verkleinerungen erheblich verringert werden können (VÖGTLE & STEINLE 2005).

9. Ergänzende Arbeiten

a) Durchführung einer Messkampagne im Übungsdorf Epeisses zur Aufnahme von terrestrischen Laserscannerdaten geschädigter Gebäudestrukturen

Im März 2007 ergab sich die Möglichkeit – in Kooperation mit dem *Institut National des Sciences Appliquées* (*INSA*) *de Strasbourg* – eine terrestrische Messkampagne auf dem Übungsgelände der Schweizer Katastrophenhilfe durchzuführen, für das auch zwei flugzeuggetragene Laserscannerdatensätze verfügbar sind (siehe 1.). Dabei wurden terrestrische Laserscannerdaten von mehreren zerstörten Gebäuden mit dem Laserscanner Trimble GX erfasst. Zum Zeitpunkt der Antragstellung für die vierte Phase konnte diese Möglichkeit noch nicht abgesehen werden.

Durch die Fusion der neu aufgenommen terrestrischen Laserscannerdaten mit den flugzeuggetragenen Daten ist ggf. eine Erhöhung der Anzahl der erfassbaren Schadenstypen wie auch der Klassifizierungsrate möglich, da bei terrestrischen Daten eine andere Beobachtungsrichtung vorliegt als bei flugzeuggetragenen. Somit können mehr Schadensbilder mit einem höheren Detaillierungsgrad bestimmt werden als zuvor. Es kann so z. B. festgestellt werden, welches Geschoss bei einer *horizontalen Schichtung* eingestürzt ist oder ob *überhängende Elemente* vorliegen. Dies veranschaulicht auch Abbildung 8. Abbildung 8 (a) zeigt die bei der Befliegung im Juni aufgenommene Last-Echo-Punktwolke eines Gebäudes mit einer *horizontalen Schichtung aller Geschosse* (vgl. auch Abbildung 1). Es sind darauf nur die Dachstrukturen erkennbar. In Abbildung 8 (b), in der die terrestrisch erfasste Punktwolke visualisiert ist, fällt hingegen auf, dass kaum Messpunkte auf den Dachflächen liegen. Dafür ist die Struktur der Schichtung klar ersichtlich. Durch die Fusion der flugzeuggetragenen und der terrestrischen Daten kann somit sowohl die Dach- als auch die Schichtungsstruktur klar erkannt werden.



(a) (b)

Abbildung 8: (a) 3D-Darstellung der Originalpunktwolke der flugzeuggetragenen Laserscannerdaten eines Gebäudes mit horizontaler Schichtung aller Geschosse, (b) Terrestrisch aufgenommene Punktwolke des Gebäudes.

Bei der Auswahl der aufgenommenen Gebäude wurde darauf geachtet, dass sie unterschiedliche Schadenstypen aufweisen. Außerdem musste berücksichtigt werden, dass die Gebäude auf dem Übungsgelände ständig verändert werden, um neue Erfahrungen von durchgeführten Rettungseinsätzen einzubringen und die Trainingsbedingungen daran anzupassen. Es konnten somit nur Gebäude für die Aufnahme in Frage kommen, die seit Juni 2004 nicht verändert worden waren, da sonst keine Untersuchungen zur Fusion der flugzeuggetragenen und der terrestrischen Laserscannerdaten erfolgen könnten. So wurde eine *horizontale Schichtung mehrerer Geschosse* (Abbildung 8 (b)), eine *Rutschfläche*, eine *horizontale Schichtung mehrerer Geschosse in Kombination mit einer Schiefstellung* sowie ein *geschichteter Trümmerkegel* erfasst.

Die Gebäude wurden jeweils von mehreren Standpunkten aus aufgenommen. Die Registrierung der einzelnen Scans erfolgte über Zieltafeln, die auf den Standpunkten aufgestellt wurden. Um die Punktwolken zu georeferenzieren, wurden die Standpunkte mit differentiellem GPS eingemessen.

Die Auswertung der terrestrischen Laserscannerdaten, ihre Fusion mit den flugzeuggetragenen Daten sowie die Erweiterung der bisherigen Analyseverfahren sind Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten. Momentan liegen aus Zeitgründen außer der manuellen Überlagerung der terrestrischen mit den flugzeuggetragenen Daten noch keine weiteren Ergebnisse vor.

b) Extraktion ungeschädigter und geschädigter Gebäude aus flugzeuggetragenen Laserscannerdaten

Im Rahmen der Kooperation mit dem INSA Strasbourg wurde untersucht, ob geschädigte Gebäude mit einem Verfahren, das ursprünglich für die Extraktion ungeschädigter Gebäude entwickelt wurde, detektiert werden können (TARSHA-KURDI ET AL. 2007b). Hierfür wurde ein am INSA entwickelter Algorithmus (vgl. TARSHA-KURDI ET AL. 2006, 2007a) auf die Laserscannerdaten des Testgebiets Epeisses angewandt. Da dieser Algorithmus zunächst für die alleinige Verwendung von First-Echo-Daten entwickelt worden war, wurde er für den Einsatz von First- und Last-Echo-Daten erweitert. Für die einzelnen Gebäude auf dem Gelände wurde analysiert, ob sie mit dem ursprünglichen bzw. dem erweiterten Algorithmus detektiert werden können und falls dies nicht der Fall ist, warum sie nicht erkannt werden.

Die Untersuchungen zeigten, dass mit den beiden getesteten Methoden nur Gebäude erkannt werden können, die eine gewisse Mindestgröße sowie eine vorgegebene Mindesthöhe überschreiten. Eine weitere Bedingung ist, dass Dächer durch ebene Flächen approximiert werden können, die nicht steiler sind als ein festgelegter Schwellwert. Für geschädigte Gebäude bedeutet dies, dass die Dachstruktur erhalten sein muss. Somit können nur Gebäude detektiert werden, an denen Schadensbilder wie *horizontale Schichtungen* oder *Rutschflächen* auftreten.

Trümmerkegel oder *gestaffelte Schichtungen* können hingegen erwartungsgemäß nicht als Gebäude identifiziert werden. Auch von den Gebäuden, die keine Schädigungen aufweisen, wurden nicht alle extrahiert, da ihre Grundfläche teilweise geringer ist als der vorgegebene Grenzwert.

Insgesamt ergaben die Untersuchungen, dass für Gebäude, die mit einer der beiden Methoden erkannt werden können, Schadensbilder wie unterschiedliche Arten von *Trümmerkegeln* oder *gestaffelte Schichtungen* ausgeschlossen werden können.

Mit dem am IPF im Rahmen des Graduiertenkollegs „Naturkatastrophen“ entwickelten Verfahren zur Klassifizierung von Laserscannerdaten (TÓVÁRI 2006, TÓVÁRI & VÖGTLE 2004) können die Klassen *Gelände*, *Gebäude* und *Vegetation* unterschieden werden. Aufgrund der Verwendung von mehr Merkmalen für die Klassifizierung können damit vermutlich ähnliche – wenn nicht bessere – Ergebnisse erzielt werden. Daher wurde der in Kooperation mit dem INSA untersuchte Ansatz nicht weiter verfolgt. Außerdem können auch mit den Methoden zur Klassifizierung von Gebäudeschäden, die im Teilprojekt C5 inzwischen entwickelt wurden, deutlich bessere Ergebnisse erreicht werden.

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Die Zahl der Arbeiten auf dem Gebiet der Schadensdetektion nach Katastrophen, die auf Fernerkundungsdaten basieren, nimmt immer mehr zu. Dies zeigt deutlich, welch hohe Aktualität und Brisanz dieses Thema besitzt. Dies wurde auch auf den Konferenzen und Workshops, auf denen die Ergebnisse des Teilprojekts C5 während der vierten Phase vorgestellt wurden, immer wieder betont (z. B. Symposium of ISPRS Commission III Photogrammetric Computer Vision PCV’06, Bonn, Deutschland, 20. - 22. September 2006; ISPRS Hannover Workshop 2007 High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Deutschland, 29. Mai - 01. Juni 2007; ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finnland, 12. - 14. September 2007).

Der Vergleich der Forschungen im Teilprojekt C5 mit Forschungen außerhalb des SFBs zeigt deutliche Unterschiede in mehreren Punkten. So werden die Verfahren in C5 anhand von Laserscannerdaten real geschädigter Gebäude entwickelt. Andere Ansätze verwenden hingegen zum Teil hochaufgelöste Satellitenbilder (GUSELLA ET AL. 2005, CHESNEL ET AL. 2007, SIDAR ET AL. 2004) oder Luftbilder (SUMER & TURKER 2006) und verzichten somit auf die Einbeziehung der wichtigen Höheninformation. Daher können mit diesen Verfahren Gebäude mit bestimmten Schäden nur schlecht oder überhaupt nicht identifiziert werden (z. B. *horizontale Schichtungen*).

Dies führt dazu, dass in einigen Ansätzen vorgeschlagen wird, flugzeuggetragene Laserscannerdaten als Grundlage zu verwenden (MURAKAMI ET AL. 1998, VU ET AL. 2004). Aufgrund des Mangels an Laserscannerdaten von Gebieten, die durch Erdbeben betroffen waren, wurde sowohl das Verfahren von MURAKAMI ET AL. (1998)

als auch das von VU ET AL. (2004) bisher nur für die Änderungserkennung in urbanen Gebieten entwickelt und noch nicht an Daten mit realen Schädigungen getestet. Darüber hinaus erfolgt bei diesen Verfahren nur eine geringe Differenzierung zwischen unterschiedlichen Schadenstypen.

Um die Höheninformation mit zu berücksichtigen, werden bei den Verfahren von TURKER & CETINKAYA (2005) bzw. REZAEIAN & GRÜN (2007) digitale Oberflächenmodelle aus Stereoluftbildern generiert. Diese beiden Methoden nutzen neben den abgeleiteten DOMs auch die spektrale Information aus diesen Luftbildern für die Erkennung von Schädigungen. Da Stereoluftbildpaare nach den Beben von Izmit (Türkei, 1999) und Bam (Iran, 2003) aufgenommen wurden, konnten diese Ansätze bereits an Daten mit realen Schäden untersucht werden. Der Nachteil bei der Verwendung von DOMs, die aus diesen Stereoluftbildern abgeleitet werden, ist die Höhengenauigkeit, die mit einem RMS-Fehler von ca. 1-2 m in der Höhenkomponente (TURKER & CETINKAYA, 2005, REZAEIAN & GRÜN, 2007) ungefähr um den Faktor 10 schlechter ist als bei DOMs, die mit Hilfe von Laserscanning erfasst werden.

Abgesehen von den genannten Methoden gibt es noch eine Reihe von Verfahren, die auf Radardaten basieren (z. B. MATSUOKA & YAMAZAKI 2000, 2005; STRAMONDO ET AL. 2007). Da bei diesen allerdings keine gebäudescharfe Analyse der Schädigungen durchgeführt sondern nur der Schadensgrad größerer Gebäudeblocks bestimmt wird, soll auf diese hier nicht weiter eingegangen werden.

Die Anzahl und Art der Klassen, zwischen denen bei der Schadensklassifizierung unterschieden wird, stellt ein weiteres Unterscheidungskriterium dar. Während bei den Arbeiten in C5 sehr detailliert zwischen den Schadensbildern des Schadenskatalogs differenziert wird (d. h. geschädigte Gebäude können momentan neun verschiedenen Schadensklassen zugewiesen werden), unterscheiden die anderen Ansätze oft nur zwischen *zerstörten* und *unzerstörten* Gebäuden (TURKER & CETINKAYA 2005, GUSELLA ET AL. 2005, SUMER & TURKER 2006). Wird eine weitere Unterteilung der Schädigungen vorgenommen, so erfolgt dies entweder auf der Basis der European Macroseismic Scale (EMS) (GRÜNTHAL 1998), wie bei CHESNEL ET AL. (2007), oder es wird nur zwischen nicht *eingestürzten*, *teilweise eingestürzten* und *komplett eingestürzten* Gebäuden unterschieden (REZAEIAN & GRÜN 2007). In der EMS werden fünf Schadensgrade differenziert (Grad 1: geringfügiger bis leichter Schaden, Grad 2: mäßige Schäden, Grad 3: beträchtliche bis starke Schäden, Grad 4: sehr starke Schäden, Grad 5: Zerstörung). Da das Unterscheidungskriterium für die Schadensgrade 1 und 2 in der Anzahl und Stärke der Risse in den Wänden liegt, kann mit Hilfe von flugzeuggetragenen Daten nur schwer oder überhaupt nicht zwischen diesen beiden Schadensgraden und intakten Gebäuden (Grad 0) unterschieden werden. Daher unterscheiden CHESNEL ET AL. (2007) vier verschiedene Schadensklassen (Grad 0-2, Grad 3, Grad 4, Grad 5), wobei Schadensgrad 3 ebenfalls nur unsicher bestimmt werden kann. Somit wird bei

keinem anderen Verfahren so detailliert zwischen einer derart großen Anzahl unterschiedlicher Schadenstypen differenziert wie im Teilprojekt C5.

Ein weiterer Vorteil des von C5 entwickelten Ansatzes ist, dass unterschiedliche Gebäudeteile unterschiedlich klassifiziert werden können (vgl. 3. b, 4., 5.). Dies ist bei allen anderen genannten Verfahren nicht der Fall. Bei diesen kann ein Gebäude als Ganzes immer nur einem Schadenstyp zugewiesen werden. Auch in diesem Punkt grenzt sich die von C5 entwickelte Methode somit von den außerhalb des SFBs entwickelten Ansätzen ab und liefert detailliertere Informationen, durch die die Planung von Rettungseinsätzen besser unterstützt und die Opferabschätzung weiter verbessert werden kann.

Während des Symposiums der Kommission III der Internationalen Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung (ISPRS) *Photogrammetric Computer Vision PCV'06* im September 2006 in Bonn wurde mehrfach die Frage gestellt, warum mit Rasterdaten und nicht mit der originalen Punktwolke gearbeitet wird. Die Erklärung dafür liegt in der geringeren Datenmenge und der gut definierten Nachbarschaft von Rasterdaten, die eine einfachere Speicherverwaltung und damit auch einen einfacheren Zugriff auf die Daten mit sich bringt. Außerdem sind in Rasterdaten Störungen und Ausreißer der Originaldaten zum Großteil beseitigt. Dies bringt allerdings auch eine gewisse Einschränkung mit sich, da bei einer hohen Punktdichte die Detailwiedergabe zurückgeht. Prinzipiell kann der Ansatz jedoch ohne weiteres auch auf Punktwolken übertragen werden – unter entsprechender Einbuße bezüglich Rechenaufwand und -zeit, einem Aspekt, der gerade bei dieser Anwendung mit einer möglichst schnellen Datenanalyse nach einer Katastrophe nicht vernachlässigt werden darf.

Sowohl auf dem ISPRS Workshop *High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*, der vom 29. Mai - 01. Juni 2007 in Hannover stattfand, als auch während Gesprächen mit Dr.-Ing. B. Bayram von der Technischen Yildiz Universität in Istanbul, Türkei, der von Anfang Juni bis Ende Juli 2007 als Gastwissenschaftler am IPF in Karlsruhe tätig war, trat die Frage auf, warum auf die Integration (multi-) spektraler Information in die Analyse verzichtet wird. Diese Idee war im Antrag zur dritten Projektphase bereits formuliert worden, wurde damals allerdings aus zeitlichen Gründen und aufgrund der Verbesserung der Laserscannersensoren und der Algorithmen in der Priorität zunächst zurückgestellt, da dadurch auch ohne zusätzlich eingebundene Spektralinformation bereits gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Die Reaktionen zeigen allerdings, dass dieser Punkt noch immer aktuell ist und daher im Rahmen weiterführender Forschungen wieder aufgegriffen werden soll. Dabei soll untersucht werden, wie diese Zusatzdaten am besten in den existierenden Ansatz integriert werden können und inwieweit ihre Verwendung zu einer Verbesserung der Klassifizierungsergebnisse beitragen kann.

Auch die Gäste des SFB waren zum Teil sehr interessiert an den Arbeiten im Teilprojekt C5. Dr. R. Eguchi (ImageCat, Inc.) diskutierte z. B. vor allem die Modellierung der Unsicherheiten bei der Schadensklassifizierung und die Ableitung der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Gebäude tatsächlich das Schadensbild aufweist, das bei der Klassifizierung bestimmt wurde. Dies zeigt, dass in diesem Bereich unbedingt weitere Untersuchungen durchgeführt werden müssen.

5.2.1.4 Offene Fragen

Obwohl die erzielten Ergebnisse sehr ermutigend sind, bleiben dennoch einige Fragen ungeklärt. So wurden – wie bereits erwähnt – die Unsicherheiten, die während der Gebäudemodellierung und der Schadensklassifizierung auftreten, bisher noch nicht erfasst. Dieser Punkt muss unbedingt noch ergänzt werden, um eine Aussage über die Qualität der Klassifizierung und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhalten.

Außerdem bleibt während der Klassifizierung die Situation außerhalb der ursprünglichen Grundfläche unberücksichtigt. Dies hat zur Folge, dass bestimmte Schadensbilder nur unzuverlässig oder überhaupt nicht bestimmt werden können. Um dies zu verhindern, sollte die Schadensanalyse daher auf einen gewissen Bereich (Pufferzone) um das ursprüngliche Gebäude herum ausgedehnt werden.

Des Weiteren sollten die Beziehungen zwischen benachbarten Segmenten und ggf. der Klasse mit dem zweithöchsten Zugehörigkeitsgrad in den Entscheidungsprozess der Klassifizierung mit einbezogen werden. Darüber hinaus könnte eine weitere Verbesserung erzielt werden, wenn bestimmte, häufig auftretende Kombinationen von Schadensbildern eingeführt würden. Um solche Kombinationen handelt es sich z. B. bei einer *horizontalen Schichtung* in Verbindung mit einer *Schiefstellung* oder bei einer *horizontalen Schichtung* kombiniert mit einem *Trümmerkegel auf erhaltenen Stockwerken*.

Ein weiterer Punkt, der bisher nur unbefriedigend gelöst wurde, ist das Vorgehen in Bereichen mit vielen Elementen, die keinen größeren ebenen Flächen zugeordnet werden können. Für diese Pixel wird momentan nur die Höhenänderung zwischen den beiden Zeitpunkten vor und nach der Katastrophe analysiert. Die Nachbarschaft zwischen solchen Pixeln wird allerdings nicht berücksichtigt. Es wäre daher sinnvoll, diese zunächst zu Clustern zusammenzufassen und anschließend als Objekte zu klassifizieren. Auf diese Weise könnten z. B. Schadenstypen wie die verschiedenen Arten von *Trümmerkegeln* unterschieden werden.

Ferner sollte noch geklärt werden, ob die Integration von (Multi-)Spektraldaten, die z. B. während der Befliegungen des Testgebiets Epeisses mit einem Zeilenscanner erfasst wurden, eine Verbesserung der Schadensinterpretation bewirken kann. Durch die höhere geometrische Auflösung der multispektralen Daten im Vergleich zu den flugzeuggetragenen Laserscannerdaten können kleine Strukturen besser

erkannt werden, was ebenfalls zu einer besseren Unterscheidung der verschiedenen Arten von *Trümmerkegeln* beitragen kann. Die Laserintensität selbst kann hierzu möglicherweise ebenfalls einen Beitrag leisten.

Auch die Auswirkung der Fusion der (inzwischen verfügbaren) terrestrischen und flugzeuggetragenen Daten auf die Klassifizierungsergebnisse ist bislang noch offen. Die neue Aufnahmeposition, die eine andere Blickrichtung auf die Schädigungen ermöglicht, kann z. B. dazu beitragen, bei einem *pancake collapse* genauer zu bestimmen, welches Geschoss von der Schichtung betroffen ist. Auch der Schadenstyp *überhängende Elemente* könnte somit erkannt werden.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt C5 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Chesnel, A.-L., R. Binet, L. Wald (2007):Quantitative Assessment Of Building Damage In Urban Area Using Very High Resolution Images. In: Urban Remote Sensing Joint Event 2007, Paris, France, 5 Seiten.

Duda, R. O., P. E. Hart, D. G. Stork (2001): Pattern Classification. 2. Auflage. New-York: A Wiley-Interscience Publication.

Gehbauer, F., M. Markus, F. Fiedrich, S. Gentes, C. Schweier (2003): Forschungsarbeiten zur technischen und organisatorischen Bewältigung von Katastrophen mit Gebäudeschäden. Bauingenieur, Vol. 78, Juli/August 2003: S. 369–378.

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

Gusella, L., B. J. Adams, G. Bitelli, C. K. Huyck, A. Mognol (2005): Object-oriented Image Understanding and Post-earthquake Damage Assessment for the 2003 Bam, Iran, Earthquake. Earthquake Spectra, Vol. 21, No. S1: 225–238.

Matsuoka, M., F. Yamazaki (2000): Use of interferometric satellite SAR for earthquake damage detection. In: Proceedings of 6th International Conference on Seismic Zonation, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA.

Matsuoka, M., F. Yamazaki (2005): Building Damage Mapping of the 2003 Bam, Iran, Earthquake Using Envisat/ASAR Intensity Imagery. Earthquake Spectra Vol. 21, No. S1: 285–294.

Murakami, H., K. Nakagawa, T. Shibata, E. Iwanami (1998): Potential of an airborne laser scanner system for change detection of urban features and orthoimage development. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Stuttgart, Germany, Vol. 32, Part 4, S. 422–427.

Rezaeian, M., A. Grün (2007): Automatic classification of collapsed buildings using object and image space features. In: Li, J., S. Zlatanova, A. Fabbri (Hrsg.) (2007): Geomatics Solutions for Disaster Management, Lecture Notes in Geoinformatics and Cartography. Berlin: Springer. 444 Seiten: S. 135–148.

Schweier, C., M. Markus, E. Steinle (2004): Simulation of earthquake caused building damages for the development of fast reconnaissance techniques. Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 4, No. 2: 285–293.

Schweier, C., M. Markus (2006): Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment. Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, No. 2: 177–192.

Sidar, Y., B. Bayram, C. Helvaci, H. Bayraktar (2004): Research of the change of the buildings before and after earthquake by using airborne photographs. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B7, S. 639–641.

Stramondo, S., C. Bignami, N. Pierdicca, M. Chini (2007): SAR and optical remote sensing for urban damage detection and mapping: case studies. In: Urban Remote Sensing Joint Event 2007, Paris, France, 6 Seiten.

Sumer, E., M. Turker (2006): An integrated earthquake damage detection system. In: Proceedings of the 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Salzburg, Austria.

Tarsha-Kurdi, F., T. Landes, P. Grussenmeyer, E. Smigiel (2006): New approach for automatic detection of buildings in airborne laser scanner data using first echo only. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bonn, Germany, Vol. 36, Part 3, S. 25–30.

Tarsha-Kurdi, F., T. Landes, P. Grussenmeyer, (2007a): Joint combination of point cloud and DSM for 3D building reconstruction using airborne laser scanner data. In: Urban Remote Sensing Joint Event 2007, Paris, France, 7 Seiten.

Tóvári, D., T. Vögtle (2004): Classification methods for 3D objects in laserscanning data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Turkey, Vol. 35, Part B3.

Tóvári, D. (2006): Segmentation Based Classification of Airborne Laser Scanner Data. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/3278 (Stand November 2007).

Turker, M., B. Cetinkaya (2005): Automatic detection of earthquake-damaged buildings using DEMs created from pre- and post-event stereo aerial photographs. International Journal of Remote Sensing, Vol. 26, No. 4: 823-832.

Vu, T. T., M. Matsuoka, F. Yamazaki (2004): Employment of LIDAR for Disaster Assessment. In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Remote Sensing for Post-Disaster Response, Newport Beach, California, USA.

Zadeh, L. A. (1965): Fuzzy Sets. Information and Control, Vol. 8: 338–353.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

Rehor, M. (2007a): Classification of building damage based on laser scanning data. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 20, No. 2: 54–63.

Vögtle, T., E. Steinle (2005): Fusion of 3D building models derived from first and last pulse laserscanning data. Information Fusion, Elsevier, Vol. 6, Issue 4: 275–281.

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Rehor, M. (2007b): Classification of building damages based on laser scanning data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Espoo, Finland, Vol. 36, Part 3/W52, S. 326–331.

Rehor, M., H.-P. Bähr (2006): Segmentation of damaged buildings from laser scanning data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bonn, Germany, Vol. 36, Part 3, S. 67–72.

Bähr, H.-P. (2005a): New Media in Realistic Disaster Scenarios. In: Proceedings of the International Conference "250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake", 1.-4. November 2005, Lisbon, Portugal, S. 193–197.

Markus, M., F. Fiedrich, F. Gehbauer, H. Engelmann, J. Leebman, C. Schweier, E. Steinle (2005): The Disaster Management Tool - Concept and First Training Experiences. In: Proceedings of the International Conference "250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake", 1.-4. November 2005, Lisbon, Portugal, S. 178–184.

Schweier, C., M. Markus, E. Steinle, U. Weidner (2005): Casualty Scenarios Based on Laserscanning Data. In: Proceedings of the International Conference "250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake", 1.-4. November 2005, Lisbon, Portugal, S. 234–240.

Vögtle, T., E. Steinle, D. Tóvári (2005): Airborne Laserscanning Data for Determination of Suitable Areas for Photovoltaics. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Enschede, The Netherlands, Vol. 36, Part 3/W19, S. 215–220.

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Gehbauer, F., M. Markus, H. Engelmann, I. Popa, C. Schweier, M. Rehor, S. Werder (2007): The Disaster Management Tool. In: SFB 461 (Hrsg.) (2007): Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania, 493 Seiten: S. 421–431.

Rehor, M., H.-P. Bähr (2007): Detection and analysis of building damage caused by earthquakes using laser scanning data. In: SFB 461 (Hrsg.) (2007): Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania. 493 Seiten: S. 457–471.

Tarsha-Kurdi, F., M. Rehor, T. Landes, P. Grussenmeyer, H.-P. Bähr (2007b): Extension of an automatic building extraction technique to airborne laser scanner data containing damaged buildings. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Hannover, Germany, Vol. 36, Part 1/W51, CD-ROM.

Bähr, H.-P., M. Rehor (2006): Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement. In: Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF 2006, September 2006, Berlin, Deutschland, CD-ROM.

Markus, M., H. Engelmann, F. Gehbauer, C. Schweier, M. Rehor, S. Werder (2006): Concepts of the Interdisciplinary Disaster Management Tool and Application Experiences. In: Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, August 2006, Davos, Switzerland.

Bähr, H.-P., D. Lemp, U. Weidner (2005): Hyperspectral Meets Laserscanning: Image Analysis of Roof Surfaces. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Hannover, Deutschland, Vol. 36, Part 1/W3, CD-ROM.

c) in Monographien

Rehor, M. (2006): Modellierung ungeschädigter und geschädigter Gebäudestrukturen auf der Grundlage flugzeuggetragener Laserscannerdaten. Diplomarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH) (unveröff.).

Steinle, E. (2005): Gebäudemodellierung und -änderungserkennung aus multitemporalen Laserscanningdaten. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 594, Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, München, http://129.187.165.2/typo3_dgk/docs/c-594.pdf (Stand November 2007).

Bähr, H.-P. (2005b): Ein Gerüst der Bildanalyse. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 81–105.

Vögtle, T., E. Steinle (2005): Flugzeuggetragenes Laserscanning. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 29–45.

Vögtle, T., E. Steinle, D. Tóvári (2005): Analyse flugzeuggetragener Laserscannerdaten. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 135–182.

5.2.2.3 Vorträge

Rehor, M.: Detection and analysis of building damage caused by earthquakes using laser scanning data. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bucharest, Romania (05.10.2007).

Rehor, M.: Classification of building damage based on laser scanning data. ISPRS Workshop Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, Finland (13.09.2007).

Bähr, H.-P.: Bildanalyse zur Unterstützung beim Katastrophenmanagement. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung DGPF, Berlin, Deutschland (13.09.2006).

Bähr, H.-P.: Hyperspectral Meets Laserscanning: Image Analysis of Roof Surfaces. ISPRS Workshop High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany (19.05.2005).

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1996 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	527.802 €	70.509 €	17.895 €	616.206 €
2005	82.800 €	4.500 €		87.300 €
2006	77.700 €	4.000 €		81.700 €
2007	70.800 €	4.000 €		74.800 €
Summe	**759.102 €**	**83.009 €**	**17.895 €**	**860.006 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Bähr, H.-P., Prof. Dr.-Ing. 2. Zăvoianu, F., Dr.-Ing, M. d. Conf. 3. Vögtle, T., Dr.-Ing., AOR 4. Wiesel, J., Dr.-Ing., Akad. Dir. 5. Weidner, U., Dr.-Ing. 6. Bayram, B., Dr.-Ing. 7. Loch, C., Prof. Dr. 8. Mélykúti, G., Prof. Dr.-Ing. 9. Silva Centeno, J.A., Prof. Dr.-Ing. 10. Landes, T., Dr.-Ing., M. d. Conf.	Bildanalyse, sem. Model. Photogrammetrie Bildanalyse, sem. Model. GIS, EDV-Management Fernerkundung Terrest. Laserscanning Photogrammetrie Photogrammetrie Photogrammetrie, Laserscanning Terrest. und flugzeuggetr. Laserscanning, Fernerkundung	IPF UTC Bukarest IPF IPF IPF YTU Istanbul UFSC Florianópolis BMGE Budapest UFPR Curitiba (Brasilien) INSA Strasbourg	07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 01/2003–06/2005 04/2006–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 01/2005–12/2007 09/2006–12/2007	
nichtwissen-schaftl. Mitarbeiter	11. Birkel, H.		IPF	07/1996–12/2007	

Ergänzungsausstattung					
	12. Steinle, E., Dr.-Ing.	Bildanalyse, sem. Model.	IPF	01/1998–06/2005	BAT IIa
	13. Weidner, U., Dr.-Ing.	Bildanalyse, sem. Model.	IPF	07/2005–03/2006	BAT IIa
	14. Rehor, M., Dipl.-Ing.	Bildanalyse, sem. Model.	IPF	04/2006–12/2007	E13Ü
	15. Idrissi, A.	Informatik, Softwareentwicklung	IPF	04/2005–09/2005	stud. HK
	16. Tóvári, D.	Bildanalyse, GIS	IPF	04/2005–11/2005	wi. HK
	17. Kommenda, L.	Bildanalyse, GIS	IPF	10/2005–12/2005 05/2006–10/2006 02/2007	stud. HK
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	18. Lott, J.-H.	CAD	IPF	10/2005–12/2005	stud. HK
	19. Brüstle, S.	CAD	IPF	11/2005–12/2005	stud. HK
	20. Rehor, M.	Bildanalyse,	IPF	01/2006–02/2006	stud. HK
	21. Rentschler, A.	Ergebnispräsentation	IPF	01/2006–05/2006	stud. HK
	22. Hu, G.	Informatik, Softwareentwicklung	IPF	09/2006–12/2006	stud. HK
	23. Muhler, M.	Softwareentwicklung	IPF	10/2006–12/2006	stud. HK
	24. Teutsch, C.	CAD	IPF	10/2006–12/2006	stud. HK
	25. Weyer, C.	CAD	IPF	11/2006–12/2006	stud. HK
	26. Schuffert, S.	CAD	IPF	11/2006–12/2007	stud. HK
	27. Wöllner, J.	Bildanalyse, GIS	IPF	03/2007	stud. HK
	28. Mink, M.	Vermessung GIS, Datensimulation	IPF	11/2007–12/2007	stud. HK
nichtwissen-schaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt C6

Wissensrepräsentation für Katastrophenmanagement in einem technischen Informationssystem (TIS)

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Stefan Werder
Hans-Peter Bähr

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt C6

5.1.1 Titel:

Wissensrepräsentation für das Katastrophenmanagement in einem technischen Informationssystem (TIS)

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Photogrammetrie, Geoinformationssysteme

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Bähr, Hans-Peter, 07.11.1942
Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Universität Karlsruhe (TH)
Kaiserstraße 12
76128 Karlsruhe
Telefon: 0721/608-2314 bzw. -2315
Telefax: 0721/608-8450
E-Mail: hans-peter.baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Stefan Werder

5.1.5 Rumänische Partner:

Univ. Prof. Dr.-Ing. Florea Zăvoianu
Facultatea de Geodezie, Laboratorul de Fotogrammetrie si Teledetectie
Universitatea Tehnică de Construcții Bucuresti

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Die letzte Antragsphase des Teilprojektes C6 gliederte sich in zwei Arbeitsabschnitte. Im ersten Abschnitt, der bis Ende 2005 dauerte, wurden die Forschungen auf dem Gebiet der Augmented Reality mit der Promotion von Johannes Leebmann abgeschlossen. Die Arbeiten ermöglichen die Erstellung von dreidimensionalen Skizzen, z. B. von Trümmerstrukturen oder Rettungswegen, direkt vor Ort. Um dies zu ermöglichen werden die Skizzen auf mehreren Standpunkten in das von einer Kamera aufgenommene Bild eingezeichnet und dann von einem automatischen System in dreidimensionale Geometrien konvertiert.

Im zweiten Arbeitsabschnitt, der die letzten zwei Jahre der Förderperiode umfasste, bildete die Entwicklung des technischen Informationssystems (TIS) die Hauptaufgabe des Teilprojektes C6. Das TIS musste komplett neu entwickelt werden, da aufgrund der Verschiebung des Forschungsschwerpunktes auf das Gebiet der Augmented Reality die Entwicklung des TIS nicht mehr mit der Entwicklung der anderen am Disaster Management Tool (DMT) beteiligten Teilprojekte Schritt gehalten hatte. Dieses restriktive, aber zwingend notwendige, Vorgehen ermöglichte zudem die komplette Neugestaltung der Benutzeroberfläche im Hinblick auf eine intuitivere Bedienung, die Änderung von Schnittstellen zu den anderen DMT-Teilprojekten sowie die Integration bisher unberücksichtigter Aspekte. Zu diesen Aspekten zählen insbesondere die Repräsentation bzw. Abbildung von detailliertem Wissen über die Organisationsstruktur im Katastrophenmanagement sowie über den Informationsfluss während einer Katastrophe. Die Anbindung an die Praxis wurde dabei durch die Kooperation und den Austausch mit den Projektpartnern des rumänischen Zivilschutzes sowie deutschen Katastrophenschutzorganisationen gesichert.

Als weiteres Forschungsthema wurde im zweiten Arbeitsabschnitt die Übertragbarkeit des militärischen Prototyps SOKRATES auf die zivile Domäne des Katastrophenschutzes untersucht. Ausgehend von Freitextmeldungen über eigene und fremde Truppenbewegungen erstellt das SOKRATES-System automatisiert aktuelle Lagekarten über die Position von eigenen und fremden Verbänden. Das Ziel im Katastrophenmanagement ist es dahingegen, ein aktuelles Lagebild über die Schadenssituation aus einer großen Anzahl an Freitextmeldungen von Einheiten vor Ort sowie Passanten zu erhalten. Neben der technischen Analyse von SOKRATES wurde in Zusammenarbeit mit dem DFG-Bündelprojekt „Abstraktion graphisch und verbal repräsentierter Geoinformation“ eine detaillierte Ontologie für den Kata-

strophenschutz erstellt sowie die Grundlage für die Entwicklung eines eigenständigen Prototyps mit dem Namen SENECA für den Einsatz im Katastrophenmanagement geschaffen. Dieser wird voraussichtlich im genannten Bündelprojekt am IPF in den folgenden zwei Jahren weiter entwickelt.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Der Finanzierungsantrag der für diesen Bericht relevanten Antragsphase umreißt vier Fragestellungen, die alle eine geeignete Repräsentation von Wissen für die Domäne des Katastrophenmanagements zum Ziel haben (vgl. LEEBMANN & BÄHR 2004):

1. Planungsmethodik

   Die Planung im Katastrophenmanagement erfolgt durch mehrere Personen, deren sogenannte Teilpläne voneinander abhängen und nur gemeinsam zum gewünschten Erfolg führen. Die Synchronisierung dieser Pläne zur Berücksichtigung der Divergenzen zwischen Planung und Ausführung sowie angenommener und tatsächlicher Lage erfolgt durch Lagebesprechungen. Ziel einer „verteilten Führung“ ist es, dass die aktuellen Einzelplanungen den verantwortlichen Mitgliedern des Führungsstabes automatisch zur Verfügung gestellt werden.

   Bei der formalen Repräsentation bilden die zwei Vorgänge „generalisieren“ und „abstrahieren“ eine wichtige Basis um die Komplexität zu reduzieren. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass Pläne oft kein fest definiertes Ende haben, sondern z. B. durch Veränderungen der Lage gegebenenfalls obsolet werden oder überarbeitet werden müssen.

   Der bis zur Antragstellung entwickelte Prototyp des TIS trennte zwischen dem Austausch über einen gemeinsamen Objekt-Datenbestand sowie dem Informationsaustausch durch Nachrichten zwischen Anwendungen (LEEBMANN & KIEMA 2001).

   Die Erwartung an eine weitere Informationsverdichtung insbesondere durch Berücksichtigung von Abstraktion und räumlich-zeitlicher Konzepte bestand darin, dass fehlende Informationen oder Konflikte in der Planung erkannt werden sollten.

2. Abfragen

   Die Informationsflut im Katastrophenmanagement kann nur durch geeignete Filterung sowie Möglichkeiten zur Selektion von einem Benutzer bewältigt werden. Da viele Informationen nicht strukturiert sondern stattdessen als unstrukturierter Freitext vorliegen, besteht das Ziel darin in Freitexten

relevante Informationen automatisch zu identifizieren und anschließend zu strukturieren.

Bis zur Antragstellung war die Abfrage von Objekten aus der gemeinsamen Datenbank des DMT sowohl unter räumlichen als auch unter zeitlichen Aspekten möglich. Da die Benutzung der Datenbankabfragesprachen für Laien in der Regel zu kompliziert ist wurden vordefinierte Abfragen mit räumlichen und zeitlichen Selektionskriterien erstellt und im System integriert.

Von der Entwicklung einer eigenen Informationsextraktion auf Basis des SOKRATES-Prototyps wurde eine gesteigerte Informationsdichte durch eine zusätzliche Auswertung der Freitextanteile erwartet. Diese sollte unter Hinzunahme des Kontexts weitere Auswertungen möglich machen.

3. Simulator-Kopplung

Die rechnergestützte Simulation von Katastrophen und eingesetzten Ressourcen zu deren Bekämpfung sowie deren gegenseitige Abhängigkeit und zeitliche Entwicklung ermöglicht die Schaffung einer realistischen Trainingsumgebung. Dazu muss das TIS mit der Simulationsumgebung des Teilprojektes C3 gekoppelt werden.

Bis zur Antragsstellung erfolgten die Implementierung des Informationsaustausches von einfachen Informationen zur Simulation sowie die Integration der EQSIM-Anbindung in die Oberfläche des TIS.

Von einer engeren Kopplung des TIS zur Simulation wurde erwartet, dass die Trainingsumgebung realistischer und damit objektiver wird.

4. Augmented Reality System

Die Modellierung neuer 3D-Inhalte durch die Verwendung eines Augmented Reality Systems muss für den Einsatz im Katastrophenmanagement die Erstellung von echten Freiformen unterstützen, um z. B. auch Trümmerstrukturen modellieren zu können. Außerdem stellt sich die Frage in wie weit durch die Verwendung einer stark beschränkten Spracheingabemenge die Modellierung von Geometrien unterstützt werden kann.

Bis zur Antragsstellung wurden umfangreiche Untersuchungen zur Genauigkeit von Kalibrierungsmethoden durchgeführt, die eine wichtige Grundlage für die Beurteilung der Genauigkeit des Gesamtsystems bilden. Darauf aufbauend wurde eine polygonbasierte Methode entwickelt um die Modellierung von 3D-Inhalten zu ermöglichen.

Von dem Einsatz einer Sprachkomponente wurde eine einfachere Bedienbarkeit des Systems erwartet. Außerdem wurde durch den Einsatz neuerer Hardwarekomponenten eine Verbesserung der Bedienung des Augmented Reality Systems erwartet.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Der Abschluss der Forschungen zum Augmented Reality System bildete die Promotion von Johannes Leebmann (LEEBMANN 2005) und damit auch das Resultat des ersten Arbeitsabschnittes. Da die Ergebnisse ausführlich in der Promotionsschrift dargelegt sind werden sie in diesem Projektbericht nicht weiter ausgeführt.

Die verbleibenden Fragestellungen wurden in zwei Arbeitsgebiete unterteilt. Das erste Arbeitsgebiet widmete sich der Neuentwicklung des technischen Informationssystems und das zweite Arbeitsgebiet der Untersuchung zur Adaptierbarkeit des SOKRATES-Prototyps. Einer Zusammenführung der beiden Arbeitsgebiete standen ein zu hoher Arbeitsaufwand und eine zu unterschiedliche Ausrichtung gegenüber. Nach einer ausführlichen Analyse von SOKRATES stand fest, dass der Prototyp nicht über die Produktreife verfügte um direkt in das TIS und damit das DMT integriert werden zu können. Insbesondere zeigte sich, dass die Adaption der Informationsextraktion sehr arbeitsaufwändig ist und deren Kopplung an die nachfolgenden Prozessschritte im SOKRATES-Prototyp nicht konsequent umgesetzt ist.

Die Neuentwicklung des technischen Informationssystems bildete die Hauptaufgabe des zweiten Arbeitsabschnittes der Förderperiode. Sie wurde notwendig, da der vom Teilprojekt C6 entwickelte Prototyp nicht mehr den Anforderungen an die Integration in das DMT genügte. Die wichtigsten Defizite waren dabei wie folgt:

- Unzureichende Ankopplung des TIS an die Simulation

  Die Datenstruktur sowohl statischer als auch dynamischer Informationen unterschied sich signifikant zwischen dem TIS und der Simulation, was den Informationsaustausch unnötig erschwerte. Die Schnittstelle zwischen den beiden Teilsystemen des DMT war nur als Prototyp implementiert und auf dem Stand des Jahres 2004 eingefroren. Der Informationsaustausch innerhalb der Simulation wurde jedoch seitdem grundlegend überarbeitet und auf ein XML-Format umgestellt.

- Schlechte Performanz im Mehrbenutzerbetrieb

  Während der ATLAS 2004 Stabsübung zeigte das TIS erhebliche Defizite in der Lastverteilung insbesondere im Zusammenspiel mit der Simulation. Dies begründete sich vor allem darauf, dass dynamische Informationen von allen Nutzern aus der Datenbank abgefragt wurden. Bei mehreren hundert Nachrichten von der Simulation in kürzester Zeit beanspruchten die Datenbankabfragen der einzelnen Teilsysteme des TIS zu viele Ressourcen und beeinträchtigten damit negativ die Performanz des TIS.

- Mangelnde Absprache und Strukturierung der gemeinsamen Datenbasis des DMT

  Die einzelnen Teilprojekte des DMT entwickelten teilweise ihre Systeme, unter anderem historisch bedingt, unabhängig voneinander. Die gemeinsame Datenbank des DMT spiegelte dabei nicht mehr den aktuellen Entwicklungsstand der einzelnen Teilprojekte wieder. Zudem waren die gemeinsamen Informationsquellen sowie die Schnittstellen des DMT nicht ausreichend dokumentiert und spezifiziert.

- Planungsmethodik

  Zur Implementierung der Planungsmethodik wurde eine Open-Source Anwendung für Projektplanungen (GanttProject) in das TIS integriert. Die Integration war jedoch bei Beginn des zweiten Arbeitsabschnittes nicht abgeschlossen. Außerdem zeigte sich in ausführlichen Tests, dass die verwendete Anwendung nicht die notwendige Stabilität für die Integration in das TIS aufwies. Dies spiegelte sich in teilweise reproduzierbaren und teilweise unvorhersehbaren Abstürzen der Projektplanungskomponente wieder.

Da die Neuentwicklung des TIS aufgrund der bevorstehenden ATLAS 2007 Stabsübung in der letzten Antragsphase absolute Priorität hatte, wurden die Forschungen zum SOKRATES-Prototyp davon unabhängig durchgeführt, um die Komplexität nicht unnötig zu steigern und um negative Seiteneffekte konsequent zu vermeiden.

Nachfolgend werden die wesentlichen Aspekte der Neuentwicklung des TIS – das Management Information System (MIS) – sowie die Adaption des SOKRATES-Systems – das SENECA-System – kurz vorgestellt.

TIS – Management Information System (MIS)

Das Management Information System (MIS) ist das Ergebnis der Neuentwicklung des technischen Informationssystems für das DMT. Es ist in der Programmiersprache JAVA geschrieben und verwendet als weitere Komponenten Hibernate für den Datenbankzugriff, JAXB für den Zugriff auf XML basierte Informationen und ESRI MapObjects für die Kartendarstellung. Das MIS wurde von Grund auf neu entwickelt, d. h. es wurden keine Komponenten des bereits bestehenden Systems übernommen, da diese unzureichend strukturiert und dokumentiert waren. Das System ist in den Veröffentlichungen des Abschlusssymposiums beschrieben (WERDER 2007, GEHBAUER ET AL. 2007). Deshalb wird im Folgenden nur auf Zusammenhänge, technische Details und nicht veröffentlichte Aspekte eingegangen.

Die Anbindung des MIS an die Ergebnisse von EQSIM erfolgt durch die Darstellung der Schadenswahrscheinlichkeiten für Gebäude in drei Stufen (hoch, mittel, niedrig) als Teil der Kartendarstellung. Da das MIS vor allem von Mitgliedern eines Führungsstabes verwendet wird und dabei alle Mitglieder die gleichen Ergebnisse für die Schadenswahrscheinlichkeiten benötigen um gemeinsame Entscheidungen treffen

zu können, wird bei allen Instanzen des MIS jeweils das gleiche EQSIM-Szenario angezeigt. Die Berechnung des Szenarios erfolgt dabei außerhalb des MIS, da dies erstens die Benutzung vereinfacht und zweitens notwendige Änderungen bezüglich des Datenaustauschs an EQSIM nicht zeitnah vom verantwortlichen Teilprojekt durchgeführt wurden. Trotzdem konnte von C6 durch die Erstellung eines 3D-Modells des Testgebietes von Bukarest ein wichtiger Beitrag zur Entwicklung von EQSIM geleistet werden. Dieses 3D-Modell, welches für die Anzeige in Google Earth erstellt wurde, bildet nun die Basis für die fortschrittlichste Visualisierungsmethode von EQSIM (vgl. ZIKAS 2007).

Die Anbindung des MIS an die anderen Teilprojekte bzw. Teilbereiche des DMT erfolgt neben der gemeinsamen Datenbank vor allem auch durch den gemeinsam spezifizierten DMT Information Exchange Standard (DMT-IXS). Auf Basis des bereits entwickelten Formats zum Informationsaustausch in der Simulation des DMT wurde von C6 in Zusammenarbeit mit C3 das Format aktualisiert und ausgebaut. Dabei wurden bestehende Standards des Informationsaustausches im Katastrophenmanagement berücksichtigt und wichtige Aspekte integriert (vgl. GEHBAUER ET AL. 2007). Erst diese gemeinsame Spezifikation erlaubt den reibungslosen Informationsaustausch zwischen Simulation und MIS, da beide Systeme die gleichen Daten und damit Informationen generieren und auch verarbeiten können. Das MIS verwendet das DMT-IXS als Datenformat für den Nachrichtenaustausch und damit für den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Instanzen des MIS. Über eine von C6 entwickelte Kopplung werden die Informationen auch mit der Simulation ausgetauscht (vgl. WERDER 2007). Durch die detaillierte und strukturierte Modellierung des DMT-IXS konnten zudem die weiteren Informationen der Teilprojekte C3 (Expertensystem), C5 und C7 auch in den Standard integriert werden. Nicht alle Informationen des DMT-IXS werden dabei im MIS dargestellt, teilweise weil sie nicht relevant für die Aufgabe des MIS sind und teilweise weil die Datenlage nicht übereinstimmt (Testgebiet von C5 liegt in der Schweiz, Testgebiet von C6 in Bukarest). Das DMT-IXS bildet dabei das Fundament für den Austausch dynamischer Daten im DMT und kann damit als einer der zentralen Erfolge der letzten Antragsphase und als Beweis für die gute Zusammenarbeit der einzelnen Teilprojekte gesehen werden.

Die statischen Daten des DMT, z. B. detaillierte Informationen zu den einzelnen Gebäuden des Testgebietes, sind in der gemeinsamen Datenbank abgelegt. Außerdem werden dort auch einige dynamische Daten abgelegt. Zu Beginn des zweiten Arbeitsabschnittes war diese Datenbank in einem nicht gepflegten Zustand, der aber durch Abstimmung innerhalb der Teilprojekte des DMT wieder behoben werden konnte. Dabei wurden die Beziehungen zwischen den einzelnen Daten bzw. Tabellen überarbeitet und neue Informationen in die Datenbankstruktur eingefügt. Der Teilbereich der Datenbank der die Daten von C6 repräsentiert wurde analog zur Neuentwicklung des MIS auch komplett überarbeitet und mit den Daten der anderen Teilprojekte verknüpft. Außerdem wurde auf Drängen von C6 die Dokumentation der

Datenbank durchgeführt bzw. in die gemeinsame Instanz eingepflegt. Zudem wurden die vorhandenen Daten aktualisiert. Die Überarbeitung der vom rumänischen Zivilschutz angegebenen Ressourcen für die Abschlussübung ATLAS 2007 stellte dabei den größten Aktualisierungsaufwand dar.

Da bei der Neuentwicklung des MIS die schlechte Performanz im Mehrbenutzerbetrieb konsequent von Anfang an vermieden werden sollte, werden dynamische Information allein über das DMT-IXS ausgetauscht und nicht von allen Teilsystemen aus der Datenbank gelesen. Mit diesem Ansatz konnte eine erhebliche Leistungs- und vor allem Stabilitätssteigerung erreicht werden. Die statischen Daten, z. B. die Informationen über Gebäude und verfügbare Ressourcen, werden einmalig beim Start aus der Datenbank geladen bzw. nur in sehr geringem Umfang dynamisch nachgeladen.

Die Oberfläche des MIS wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise im „analogen“ Katastrophenmanagement gestaltet und dabei besondere Aufmerksamkeit auf eine einfache und strukturierte Bedienung gelegt. Dies ist besonders wichtig für den Einsatz in Führungsstäben, da diese in der Regel selten zusammen treten und die EDV-Expertise der Personen sehr unterschiedlich und damit oft auch nur gering ist. Die intuitiv zu bedienende Oberfläche des MIS ist in der folgenden Abbildung 1 dargestellt.

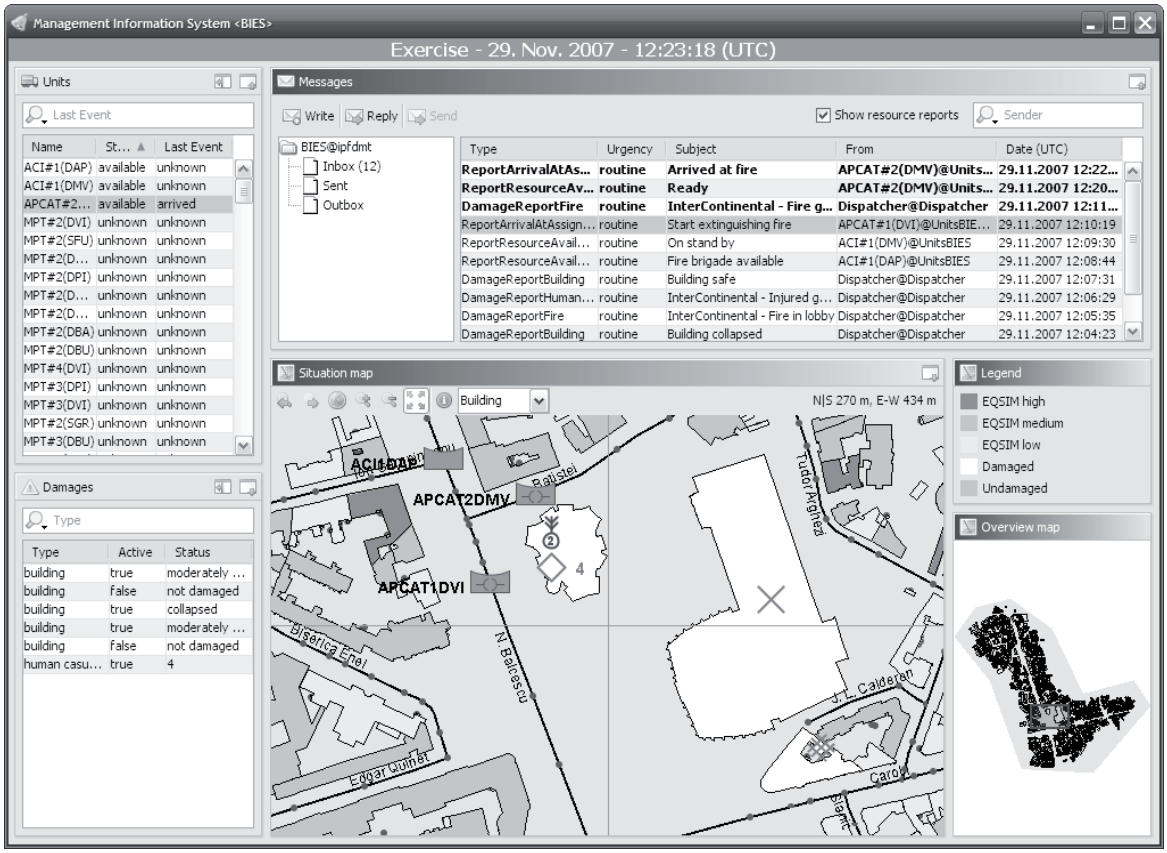


Abbildung 1: Oberfläche des Management Information Systems (MIS).

Die Aufteilung des Systems orientiert sich dabei sehr an der Vorgehensweise im „analogen“ Katastrophenmanagement, wobei die Anzeige und Erstellung von Nachrichten (Rahmen „Messages“) eng an der Funktionsweise eines Email-Programms angelehnt ist. Damit erreicht das MIS einen hohen Wiedererkennungseffekt im Vergleich zu anderen von den Personen im Führungsstab häufig verwendeten Programmen. Während der Vorgänger des MIS die zentralen Informationen noch auf mehrere Tab-Reiter und Fenster verteilte sind diese beim MIS alle direkt sichtbar und stehen damit für die Entscheidungsunterstützung schneller zur Verfügung. Das System verfügt zudem über eine durchgehend englisch gehaltene Oberfläche und ist damit international einsetzbar.

Das MIS ist eine konsequente Weiterentwicklung des „analogen“ Katastrophenmanagements, wie es meist noch in Deutschland auf Landkreis/Stadtkreis-Ebene und darunter praktiziert wird. Auf Bundesebene und Länderebene sind bereits EDV-gestützte Systeme im Einsatz (siehe auch 0). Durch die Teilnahme an einer Stabsübung der zentralen Ausbildungsstätte des Bundes, der Akademie für Krisenmanagement, Notfallvorsorge und Zivilschutz (AKNZ) des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) konnte ein vertiefter Einblick in das übliche analoge Verfahren gewonnen werden. Der Führungsstab kommt dabei in einem Raum zusammen (siehe Abbildung 2). Dort werden die Informationen zur aktuellen Lage auf einer von allen Mitgliedern einsehbaren Wandtafel dargestellt. Diese werden von einem Mitglied des Führungsstabes (Bereich S2) ständig aktuell gehalten und die Kräfteübersicht durch Informationen über Gesamtstärken der eingesetzten Kräfte (Bereich S1) ergänzt. Die Wandtafel wird zudem bei gemeinsamen Lagebesprechungen verwendet. Die Lagekarte wird zusätzlich für gemeinsame raumbezogene Festlegung eingesetzt, z. B. für die Lokalisierung von Bereitstellungsräumen, Evakuierungsgebieten oder Hubschrauberlandeplätzen.

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt die Lagekarte während einer Übung der AKNZ. Dort sind nur die Schadensstellen mit orange-farbigen Dreiecken symbolisiert sowie die Lage zentraler Einrichtungen dokumentiert. Im MIS sind dahingegen auf Wunsch der rumänischen Partner auch die Positionen aller Einheiten sowie die detaillierten Schadenstypen in der Karte sichtbar (Rahmen „Situation map“). Durch die Darstellung in einem Geoinformationssystem (GIS) ist eine solch detaillierte Übersicht einfacher umzusetzen als wenn die Informationen analog und damit manuell nachgeführt werden müssen.

Abbildung 2: Raum für den Führungsstab bei der AKNZ.

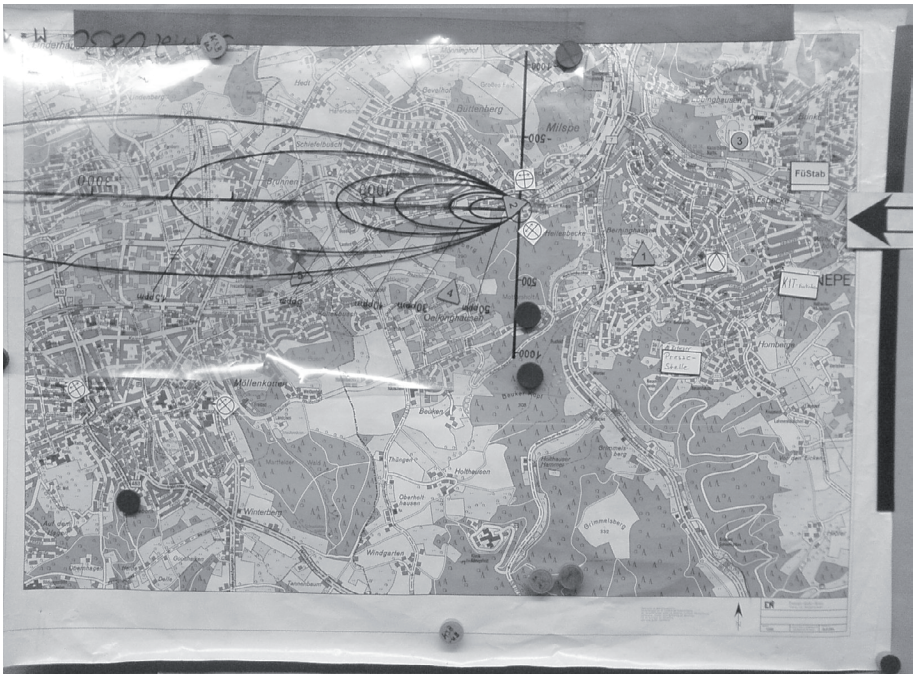


Abbildung 3: Lagekarte bei einer Übung der AKNZ.

Für jede Schadensstelle wird im analogen Fall eine Übersicht der Schäden und eingesetzten Kräfte geführt, die in regelmäßigen Abständen aktualisiert wird (siehe Abbildung 4). Im MIS wird diese Übersicht in mehrfacher Hinsicht repräsentiert. Erstens ist eine ständig aktuell gehaltene Liste aller verfügbaren bzw. untergeordneten Ressourcen vorhanden (Rahmen „Units“), die den Status und das letzte Ereignis anzeigt.

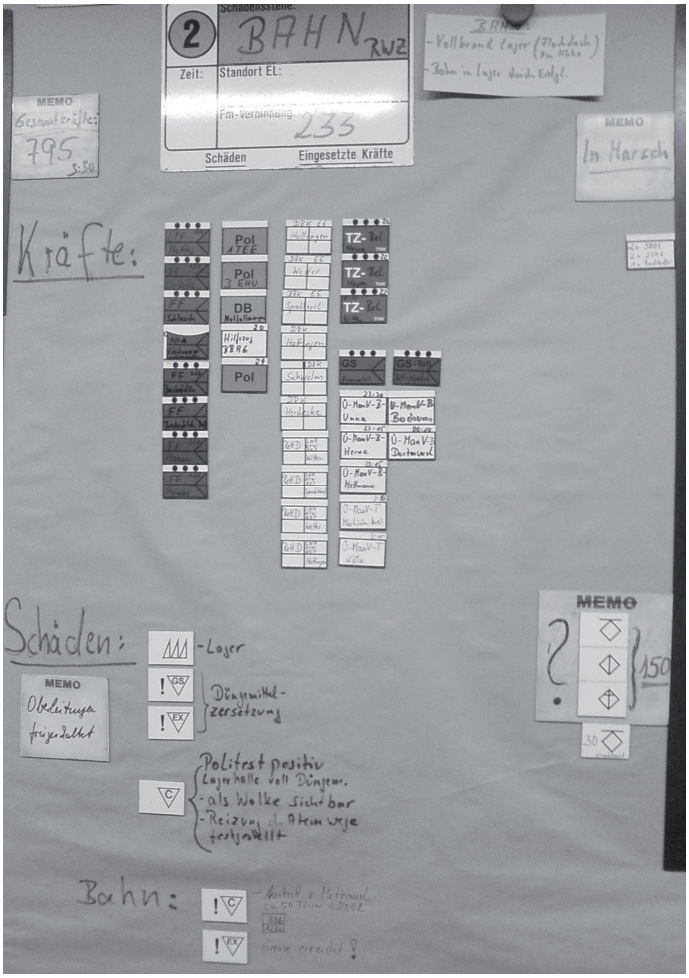


Abbildung 4: Lageübersicht bei einer Übung der AKNZ.

Zweitens ist eine Liste aller Schäden (Rahmen „Damages“) verfügbar, die Schäden in die drei Kategorien Gebäudeschaden (Feuer, Einsturz), Verletzte und Straßenblockaden einteilt und den aktuellen Status anzeigt, wie beispielweise die Gesamtanzahl der Verletzten.

Neu am MIS ist neben der wichtigen Berücksichtigung der Organisationsstruktur und des Nachrichtenflusses (vgl. WERDER 2007) auch die intelligente automatische Auswertung von strukturierten Meldungen sowie die Zusammenführung und gemeinsame Darstellung von Informationen. Die große Anzahl an Nachrichten über die lange Zeit der Katastrophenbewältigung zu managen ist eine bedeutsame Aufgabe, die analog schwierig zu handhaben ist, da Informationen mühsam aus dem Stapel aller eingegangen Nachrichten herausgesucht werden müssen. Digitale Nachrichten können hingegen automatisch ausgewertet, durchsucht und zusammengefasst werden. Die Struktur einer Nachricht und damit auch die Oberfläche für das Lesen einer Nachricht im MIS zeigt Abbildung 5 am Beispiel eines Reports über ein Feuer. Das betroffene Gebäude kann dabei entweder über eine Adresssuche oder durch Selektion in der Karte in einem Dialogfenster gesetzt werden. Die Abbildung 6 zeigt die Informationen über eine Einheit.

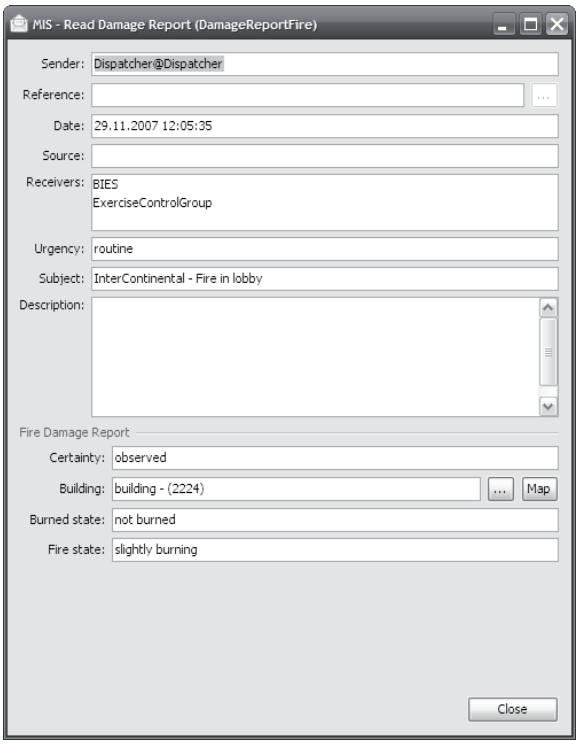


Abbildung 5: Report über ein Feuer.

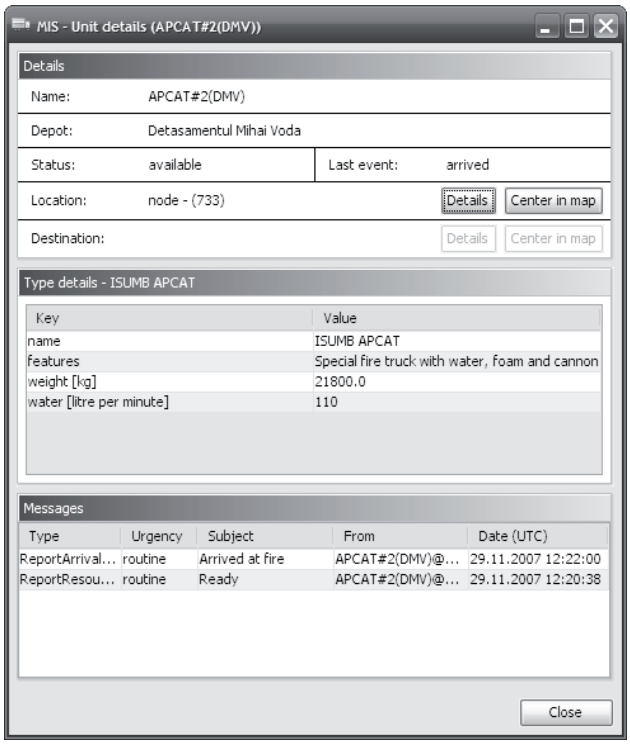


Abbildung 6: Details zu einer Einheit.

Die statischen Informationen wie Name, Depot und Details zum Typ werden beim Start des MIS aus der gemeinsamen Datenbank des DMT gelesen. Alle Nachrichten die eine Einheit betreffen werden im Posteingang im Rahmen „Messages“ und zusätzlich bei der jeweiligen Einheit gespeichert (gleichnamiger Rahmen „Messages“). Dadurch können aus der Flut von Nachrichten genau diejenigen Nachrichten heraus gefiltert werden, welche von einer bestimmten Einheit gesendet oder an eine bestimmte Einheit gegeben wurden. Die Nachrichten enthalten die Informationen, z. B. über die aktuelle Position, und werden vom MIS automatisch ausgewertet. Beispiele in Abbildung 6 für diese dynamischen Informationen sind der Status, das letzte Ereignis („Last event“), die Position („Location“) und das Ziel („Destination“) der Einheit. Die geobezogenen Informationen können jeweils auf der Lagekarte angezeigt werden, z. B. die aktuelle Position jeder Einheit.

Eine weitere Zusammenführung der Informationen erfolgt auf der Ebene des Geobezuges. Im MIS bilden Gebäude, Straßenknoten und Straßenkanten die relevanten Einheiten für den Geobezug. So können z. B. zu einem Gebäude alle relevanten Informationen angezeigt werden (siehe Abbildung 7). Die statischen Daten wie die Adresse, Fläche, Stockwerksinformationen etc. werden wie bei den Einheiten aus der Datenbank gelesen (Rahmen „Area details“). Die dynamischen Daten bilden die aktuell zugeordneten Einheiten zu einem Gebäude (Rahmen „Units“) und die aktuell vorhandenen Schäden eines Gebäudes (Rahmen „Damages“) die analog zur Hauptoberfläche des MIS automatisch aus den Nachrichten ausgewertet werden.

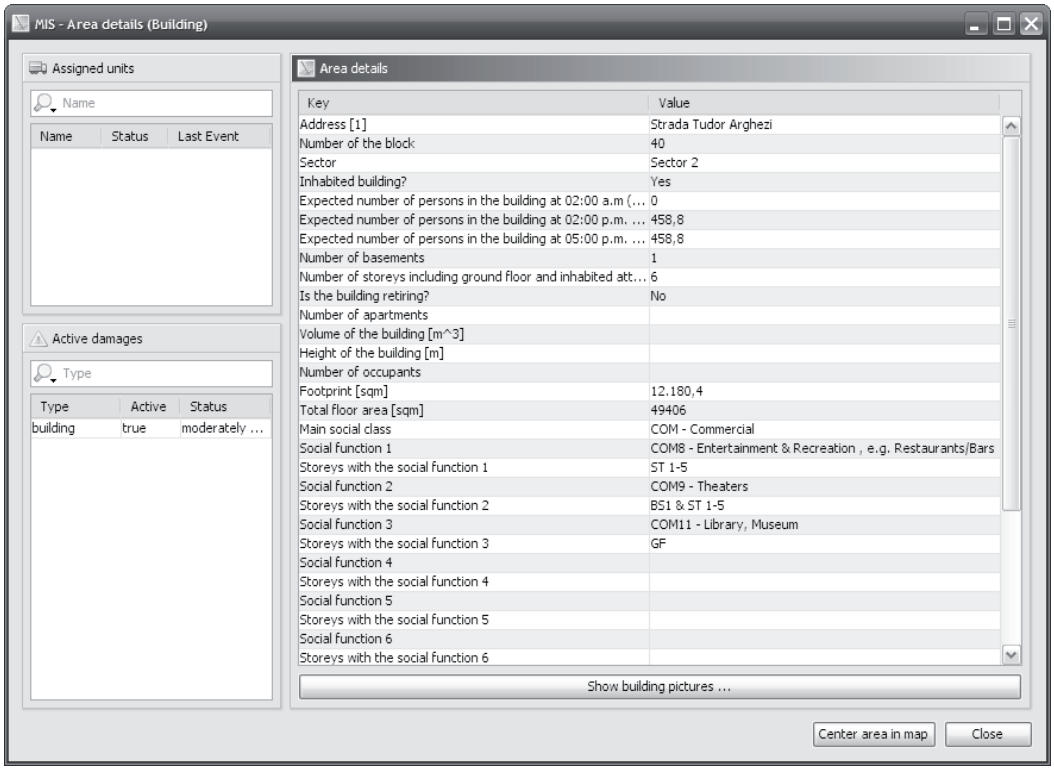


Abbildung 7: Details zu einer Fläche, in diesem Fall zu einem Gebäude.

Die automatische Auswertung des Nachrichteninhaltes, die Zusammenführung von Informationen, die einfache Suche nach Informationen und insbesondere natürlich auch die Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten des DMT machen das MIS zu einem interessanten Übungssystem für das Katastrophenmanagement. Außerdem bildet das MIS eine gute Grundlage für ein Produktivsystem für den Einsatz in Führungsstäben aber auch für Einheiten vor Ort. Das MIS kann also von allen am Katastrophenmanagement beteiligten Kräften zur Information, Kommunikation und Entscheidungsunterstützung eingesetzt werden (vgl. auch GEHBAUER ET AL. 2007).

Abschließend einige Anmerkungen zu den im Vergleich zur Ausgangsfragestellung nicht behandelten oder berücksichtigten Aspekten. Die Planungsmethodik wurde aus zwei Gründen nicht wie angedacht berücksichtigt. Erstens weil das aus den vorhergehenden Antragsphasen vorliegende TIS dazu eine Softwarekomponente verwendete die nicht stabil lief und auch keine Alternativen zur einfachen Ankopplung an das System vorhanden waren. Zweitens, und das ist der wesentliche Grund, weil die Planung in aller Regel im Katastrophenmanagement nicht so weit in die Zukunft erfolgt. Die Entscheidungen und Handlungen sind in ihrer Natur sehr dynamisch und können daher meist nicht detailliert mit einem festen Beginn und einem definierten Ende geplant werden. Die Nachführung aller definierten Aufgaben wäre zu zeitintensiv und würde von der eigentlichen Aufgabe, nämlich der Bekämpfung der Ausmaße der Katastrophe, zu sehr ablenken. Ein System für Führungsstäbe muss deshalb seine dynamische Arbeitsweise unterstützen und nicht durch strenger definierte Zeitplanungen, wie aus einfacher definierten Domänen

bekannt (Verwaltung von Terminen mehrerer Personen), eingeschränkt werden. Im MIS ist deshalb ein dynamischer Ansatz umgesetzt, der den einzelnen Teilnehmern jederzeit eine Übersicht über den aktuellen Status von Einheiten und Schäden gibt und außerdem über den Nachrichteneingang der zeitliche Verlauf verfolgt werden kann.

Die Abstraktion wird im MIS nicht direkt unterstützt, da diese über die Führungsebenen im Katastrophenmanagement bereits abgebildet wird. In der deutschen Organisationsstruktur sind die einzelnen Einheiten in der Regel einer Technischen Einsatzleitung (TEL) untergeordnet und mehrere TEL wiederum einem Führungsstab (vgl. SKK 1999). Der Führungsstab benötigt dann in der Lagekarte nur noch die Anzeige der Schadensstellen (vgl. Abbildung 3). Da das MIS jedoch für den rumänischen Zivilschutz und für die ATLAS 2007 Übung entwickelt wurde sind dort deren Anforderungen umgesetzt. Diese enthalten eine lagegenaue Darstellung einzelner Einheiten sowie die Darstellung von Schäden entsprechend ihrem Geobezug. Die Organisationsstruktur ist im MIS automatisch umgesetzt, d. h. dass in der Regel die gesamtverantwortliche Person alle Nachrichten als Kopie erhält und damit die Gesamtübersicht über die aktuelle Lage erhält (vgl. WERDER 2007).

Die geplante Informationsextraktion wurde nicht umgesetzt, da die Erstellung einer Informationsextraktionskomponente zu großen Aufwand bedeutet hätte. Dafür muss zuerst ein System von dem Erstellenden erlernt werden (z. B. SMES oder GATE) und anschließend auf Basis umfangreicher Daten definiert und trainiert werden. Die Projektpartner von der Forschungsgesellschaft für Angewandte Naturwissenschaften (FGAN) schätzten den Arbeitsaufwand für eine solche Komponente auf etwa ein Mannjahr ein. Da C6 mit der Neuentwicklung des TIS, dem MIS, und der Analyse und Adaption des SOKRATES-Systems bereits ausgelastet war, wurde demzufolge auf die Erstellung einer Informationsextraktionskomponente verzichtet. Weitere Gründe die gegen die Erstellung sprechen ist die geringe Verknüpfung der Kernaufgaben und Kernkompetenzen der Geoinformatik mit den computerlinguistischen Problemstellungen der Informationsextraktion.

SOKRATES - SENECA

Die Analyse des SOKRATES-Systems und die darauf aufbauende Entwicklung eines eigenen Systems für das Katastrophenmanagement mit dem Namen SENECA erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem DFG-Bündelprojekt „Abstraktion graphisch und verbal repräsentierter Geoinformation“, das auch am IPF bearbeitet wird.

Zuerst wurde die prinzipielle Eignung des SOKRATES-Systems untersucht und Überlegungen bezüglich der Berücksichtigung von Unsicherheiten sowohl im Datenmodell als auch in der Visualisierung durchgeführt (vgl. WERDER ET AL. 2006). Da sich das SOKRATES-System als gute Basis für eine Entwicklung für das Katastrophenmanagement erwies, wurde anschließend ein umfangreiches Daten-

modell für das Katastrophenmanagement erstellt (vgl. WERDER ET. AL 2007, LUCAS ET AL. 2007 A, LUCAS ET AL. 2007 B). Dieses sogenannte Disaster Management Data Model (DM²) wurde auf Grundlage des militärischen Standards zur Interoperabilität von Führungssystemen der NATO-Partner (Command and Control Information Exchange Model C2IEDM) und anderer Standards des Katastrophenmanagements erstellt. Bei der Erstellung des DM² wurden zudem die Entwicklungen im DMT-IXS berücksichtigt.

Auf Basis des SOKRATES-Systems wurde schließlich das SENECA-System entworfen. Erste Prozessschritte des Systems wurden bereits prototypisch umgesetzt. In Abbildung 8 ist die Eingabemaske für eine Ereignismeldung in SENECA dargestellt. Dabei können relative Ortsbezeichnungen wie „hinter“, „neben“ oder „zwischen“ zur Lokalisierung eines Ereignisses wie z. B. eines Feuers, angegeben werden. Das SENECA-System wird voraussichtlich vom DFG-Bündelprojekt fortgeführt.

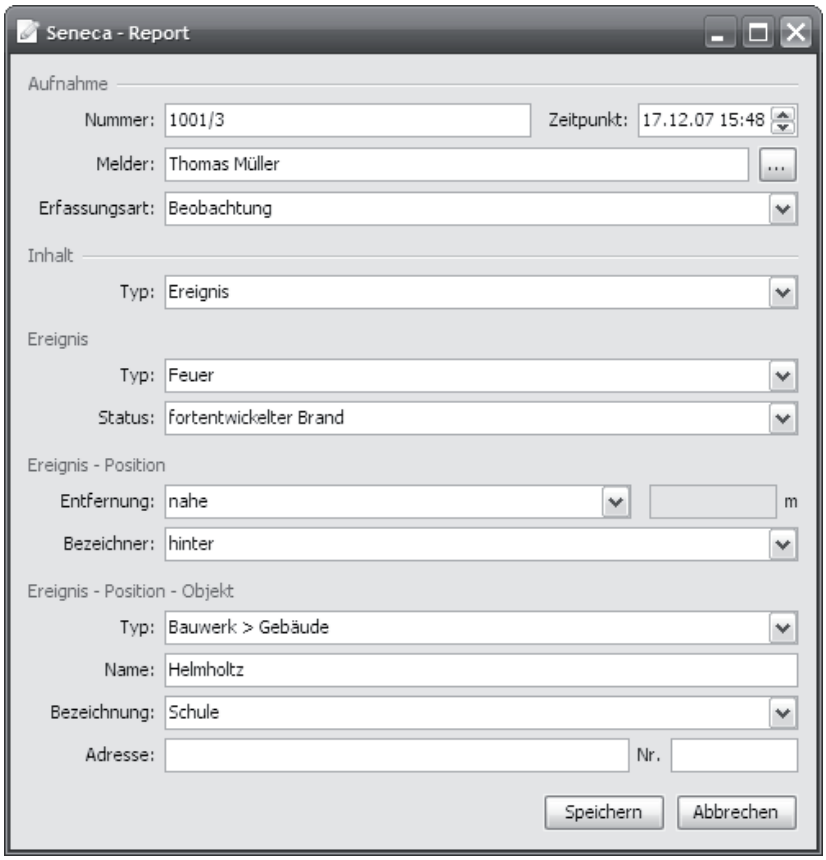


Abbildung 8: Report in Seneca.

Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Wie die Verwendung des Laserscanning im Teilprojekt C5, so war auch die Entwicklung von Augmented Reality Systemen in Teilprojekt C6 zu Beginn des Sonderforschungsbereiches nicht voraussehbar. Aufgrund ausdrücklicher Ermunterung durch die Gutachter wurden in C6 etwa zur Hälfte der Laufzeit des SFB die Möglichkeiten des Outdoor Augmented Reality fürs Katastrophenmanagement analysiert. Dazu entstand ein Low-Cost-System, dessen Besonderheit sein Einsatz im Gelände ist, also nicht in der gesicherten Umgebung eines Labors.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten näher ausgeführt, liefen die Entwicklungen im AR-Bereich zu Lasten des TIS, eine Entwicklung, welche in der Endphase des SFB wieder korrigiert werden konnte.

Augmented Reality im Gelände hat eine große Zukunft vor sich und dies insbesondere im Zusammenhang mit Katastrophenmanagement. Am IPF sind dazu außerhalb des SFB drei Dissertationen entstanden. Auch am Geoforschungszentrum Potsdam ist man auf die Arbeiten am IPF in Karlsruhe aufmerksam geworden, zitiert und propagiert die Entwicklung von AR-Systemen in den Geowissenschaften ganz allgemein, z. B. im Zusammenhang mit dem Geotechnologienprogramm.

Die größte Schwachstelle bei den AR-Systemen sind die Hardwarekomponenten der IMU und daher war es nicht möglich, produktreife Prototypen zu entwickeln. Die IMUs werden jedoch immer genauer, verlässlicher und auch erschwinglicher, so dass zu erwarten steht, dass mit AR im Gelände in Kürze eine ganz neue Analysemethode für die Geowissenschaften bereit steht.

Forschungen auf dem Gebiet der Informationssysteme für das Katastrophenmanagement werden sowohl im universitären als auch im privatwirtschaftlichen Umfeld durchgeführt. Dabei werden sehr unterschiedliche Aspekte in den einzelnen Systemen hervorgehoben. Ein Aspekt ist dabei die Zusammenarbeit in virtuellen Führungsstäben. Dabei sind die Mitglieder des Führungsstabes räumlich verteilt, kommunizieren untereinander und treffen gemeinsame Entscheidungen. Dies unterstützen unter anderem Systeme, welche die aktuelle Position des Mauszeigers an andere Teilnehmer übermitteln oder das gemeinsame Zeichnen bzw. Markieren in der Lagekarte ermöglichen (vgl. CHANG & LI 2007). Andere Aspekte die zurzeit untersucht werden sind der Einsatz von Web-Technologien, wobei sowohl verteilte Dienste als auch Web-Mapping-Komponenten analysiert werden. Im privatwirtschaftlichen Umfeld existieren einige kommerzielle Softwareprodukte für den Einsatz im Katastrophenmanagement, wie z. B. das bundesweite eingesetzte System deNIS II^{plus} der ProDV AG (BBK 2006). Diese verfügen wie im analogen Katastrophenmanagement über eine Ressourcen- und Schadensübersicht sowie eine Lagekarte. Außerdem können Nachrichten ausgetauscht werden, wobei diese oft wie

bei deNIS II^{plus} nur einfache Freitextmeldungen für den Inhalt erlauben. Dieser Inhalt muss dann manuell ausgewertet und in die Lagekarte übertragen werden.

Im Vergleich zu den anderen derzeit verfügbaren Informationssystemen für das Katastrophenmanagement bildet das Management Information System (MIS) in mehrerer Hinsicht eine Ausnahme. Insbesondere die Integration in das DMT und damit ein umfangreiches Leistungsspektrum charakterisieren das MIS. Weitere Merkmale sind die Integration der Organisationsstruktur und des Nachrichtenflusses im Katastrophenmanagement sowie der strukturierte Informationsaustausch und die automatische Zusammenfassung wichtiger Informationen. Das MIS ist zudem für ein System dieser Komplexität intuitiv zu bedienen und hat eine übersichtliche Oberfläche, die es auch nicht EDV-Experten ermöglicht das System zu bedienen, auch unter den erschwerten Bedingungen wie erhöhter Stressbelastung während einer Katastrophe.

Das MIS wurde bei der ATLAS 2007 Übung in Rumänien eingesetzt. Dort wurden während der Übung einige Verbesserungspotentiale offengelegt, die im Anschluss an die Übung größtenteils umgesetzt werden konnten. Da das MIS trotz seiner strukturierten Entwicklung immer noch ein Prototyp ist, konnte es nicht allen Anforderungen an den Produktiveinsatz im Katastrophenmanagement erfüllen. Nichts desto trotz wurde das MIS von den rumänischen Partnern als umfangreiches und vielversprechendes Produkt wahrgenommen, das bereits nahe dem Produktiveinsatz ist. Von den politisch verantwortlichen rumänischen Partnern wurde zudem die Absicht bekundet, das MIS und Teile des DMT für den Einsatz in Gesamt-Bukarest zu untersuchen. Eine Übung mit deutschen Partnern konnte leider nicht mehr in der laufenden Antragsphase durchgeführt werden. Es wird jedoch voraussichtlich 2008 eine Übung mit Einsatz des MIS bei der AKNZ erfolgen. Auch wurde von Partnern des FGAN, also von Seiten der militärischen Forschung, Interesse am MIS bekundet. Dem MIS wurden dabei im Vergleich zu derzeit erhältlichen Führungssystemen des Militärs eine ansprechende Oberfläche, eine umfangreiche Funktionalität und eine hohe Professionalität zugesprochen.

Arbeiten im Umfeld der Auswertung von Freitextmeldungen werden in WERDER ET. AL (2006) diskutiert. Für Teilaspekte der Prozesskette ausgehend von den Freitextmeldungen bis zur Karte existieren Lösungen von anderen Forschungsgruppen und Disziplinen. Eine komplette Umsetzung der Prozesskette insbesondere im Hinblick auf Fragestellungen des Katastrophenmanagements existiert jedoch nach aktuellem Kenntnisstand nicht. Die Präsentation der Forschungsergebnisse führte zu lebhaften Diskussionen auf den Konferenzen auf denen C6 vertreten war. Begründet ist dies insbesondere in der Nutzung von Freitext als Datenquelle für die Aktualisierung von Geoinformationen. Es zeigte sich zudem, dass die Vorgehensweise und Datenlage im Katastrophenmanagement international sehr unterschiedlich ist. Deshalb besteht ein Homogenisierungsbedarf um national übergreifende Katastrophen erfolgreich managen zu können.

5.2.1.3 Offene Fragen

Offene Fragen bezüglich des Management Information Systems betreffen vor allem eine Entwicklung im Hinblick auf die Produktreife. Dazu sind weitere Tests und Anpassungen bezüglich einer Echtzeitfähigkeit notwendig, die jedoch nicht zu den Forschungsaufgaben des Teilprojektes gehörten. Außerdem ist eine Untersuchung der Übertragbarkeit auf die Gegebenheiten des deutschen Katastrophenschutzes von Interesse. Insbesondere die Organisationsstruktur sowie der Nachrichtenfluss unterscheiden sich zwischen dem rumänischen und deutschen Zivilschutz und müssen deshalb angepasst werden. Das MIS ist jedoch in seiner Grundstruktur sehr flexibel entworfen worden, deshalb dürfte eine solche Anpassung mit überschaubarem Aufwand möglich sein.

Offene Fragen bezüglich der Adaption des SOKRATES-Systems beziehungsweise der Übertragung der Prozesskette für die Anwendung im Katastrophenmanagement gibt es viele. Diese werden voraussichtlich in der Verlängerung des DFG-Forschungsprojektes „Abstraktion graphisch und verbal repräsentierter Geoinformation“ behandelt.

In der Planungsphase des SFB Anfang der 90er Jahre und bei Beginn im Jahre 1996 war noch nicht absehbar, dass das Thema „Katastrophen“ eine solche zentrale Bedeutung für die Menschen einnehmen würde wie es heute der Fall ist. „Klimakatastrophe“ und „Terrorismus“ waren noch nicht mit der heutigen Bedeutung belegt. Aus diesem Grunde mag man es als Glücksfall bezeichnen, dass sich eine starke Gruppe in Karlsruhe aus Geowissenschaftlern und Ingenieuren zusammengefunden hat, um das Thema „Katastrophen“ im Rahmen eines SFB mit der Thematik „Starkbeben“ wissenschaftlich zu bearbeiten.

Dabei sind weit reichende Erkenntnisse gewonnen worden. Abgesehen von denen, die in den Berichten niedergelegt wurden, ist es vor allem die Einsicht, dass die Zeitdauer bis zur Entwicklung gültiger Nachweise und mehr noch bis zu produktreifen Systemen erheblich länger ist als ursprünglich veranschlagt. Auch müssen die Programme so angelegt sein, dass auch veränderte Szenarien bei der Systementwicklung einerseits (Beispiel Laserscanning, Augmented Reality) und bei Nachfrage durch die Gesellschaft andererseits berücksichtigt werden können. Des Weiteren wurde die Überzeugung gefestigt, dass große Herausforderungen wie Katastrophenforschung interdisziplinäres Arbeiten erfordern, im vorliegenden Fall realisiert durch die engen Verbindungen zwischen Geowissenschaft und Bauingenieurwesen. Schließlich kann die These vertreten werden, dass Sonderforschungsbereiche an Universitäten ideale Plattformen sind zur Entwicklung einer Gemeinschaft von Forschenden: Professoren, Doktoranden und Studenten. Sie bilden eine äußerst fruchtbare Community, welche in dieser Form an Großforschungseinrichtungen nicht existiert und ein Alleinstellungsmerkmal der Universität darstellt.

5.2.1.4 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt C6 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.5 Literatur

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK) (2006): BBK deNIS II. http://www.bbk.bund.de/cln_007/nn_402322/DE/02__Themen/05__Krisen management/01__deNIS/02__deNISII/deNISII__node.html (letzter Zugriff 10. 12.2007)

Chang, E., S. Li (2007): Collaboration-enabled GIS Tools for Emergency Operation Centre. In: Li, J., S. Zlatanova, A. Fabbri (Hrsg.) (2007): Geomatics Solutions for Disaster Management. Heidelberg und Berlin: Springer.

Leebmann, J., H.-P. Bähr (2004): Wissensrepräsentation für das Katastrophen-management in einem technischen Informationssystem (TIS). In: SFB 461 (Hrsg.) (2004): Finanzierungsantrag für die Jahre 2005 – 2007, S. 507 – 545.

Leebmann, J., J.B.K. Kiema (2001): Spatio-Temporal Knowledge Representation and Analysis for Earthquake Disaster Management. In: Workshop on Challenges in Geospatial Analysis, Integration and Visualization, Athen, USA.

Ständige Konferenz für Katastrophenvorsorge und Katastrophenschutz (SKK) (1999): Führung und Leitung im Einsatz, Vorschlag einer Dienstvorschrift DV 100. http://www.katastrophenvorsorge.de/pub/publications/DV100-SKK.pdf (letzter Zugriff 10. 12. 2007)

Zikas, T., F. Gehbauer (2007): Decision Process and Optimization Rules for Seismic Retrofit Programs. In: SFB 461 (Hrsg.) (2007): Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bukarest, Rumänien, S. 472 – 484.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Lucas, C., S. Werder, H.-P. Bähr, M. Frey (2007 b): Wissensrepräsentation für das Katastrophenmanagement. In: Koschke, R., O. Herzog, K.-H. Rödiger, M. Ronthaler (Hrsg) (2007): GI-Edition, Lecture Notes in Informatics, INFORMATIK 2007, Informatik trifft Logistik. Bd. 1: 180 – 184.

Lucas, C., S. Werder, H.-P. Bähr (2007 a): Information Mining for Disaster Management. In: PIA07. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Bd. XXXVI, Teil 3 / W49A: 75 – 80.

Markus, M., F. Fiedrich, F. Gehbauer, H. Engelmann, J. Leebman, C. Schweier, E. Steinle (2005): The Disaster Management Tool – Concept and First Training Experiences. In: Proceedings of the International Conference „250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake“, Lissabon, Portugal, S. 178 – 184.

c) in Monographien

keine

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Werder, S. (2007): Knowledge representation for disaster management. In: SFB 461 (Hrsg.) (2007): Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bukarest, Rumänien, S. 446 – 456.

Gehbauer, F., M. Markus, H. Engelmann, I. Popa, C. Schweier, M. Rehor, S. Werder (2007): The Disaster Management Tool. In: SFB 461 (Hrsg.) (2007): Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bukarest, Rumänien, S. 421 – 431.

Werder, S., C. Lucas, H.-P. Bähr (2007): Information Extraction from Messages in Disaster Management. In: Proceedings of the Joint CIG / ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management, Toronto, Kanada.

Werder, S., M. Müller, M. Müller, C. Kämpf (2006): Integrating Message Information into Disaster Management Maps: Transferability of a System of the Military Domain. In: Proceedings of the ISPRS Commission IV Symposium on Geospatial Databases for Sustainable Development, Goa, Indien.

Markus, M., H. Engelmann, F. Gehbauer, C. Schweier, M. Rehor, S. Werder (2006): Concepts of the Interdisciplinary Disaster Management Tool and Application Experiences. In: Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, Davos, Schweiz.

c) in Monographien

Staub, G. M. (2006): Navigation mit mobilen Augmented Reality Systemen im Gelände. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/2586 (Stand März 2008).

Leebmann, J. (2006): Dreidimensionale Skizzen in erweiterter Realität. Dissertation am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Karlsruhe (TH). Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe. http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/documents/2584 (Stand März 2008).

Bähr, H.-P. (2005): Sprache, ein Datentyp der Bildanalyse. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bilderverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 211 – 228.

Wursthorn, S., A. H. Coelho, J. Leebmann, G. Staub (2005): Erweiterte Realität. In: Bähr, H.-P., T. Vögtle (Hrsg.) (2005): Digitale Bildverarbeitung – Anwendungen in Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS, 4. völlig neu bearbeitete Auflage, Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 325 Seiten: S. 46-79.

5.2.2.3 Vorträge

Werder, S. (5.10.2007): Knowledge Representation for Disaster Management. International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Bukarest, Rumänien.

Werder, S. (24.5.2007): Information Extraction from Messages in Disaster Management. Joint CIG / ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management, Toronto, Kanada.

Werder, S. (29.9.2006): Integrating Message Information into Disaster Management Maps: Transferability of a System of the Military Domain. ISPRS Commission IV Symposium on Geospatial Databases for Sustainable Development, Goa, Indien.

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1999 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	384.129 €	22.495 €	18.407 €	425.031 €
2005	70.800 €	2.500 €	0	73.300 €
2006	70.800 €	2.500 €	0	73.300 €
2007	70.800 €	2.500 €	0	73.300 €
Summe	**596.529 €**	**29.995 €**	**18.407 €**	**644.931 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Bähr, H.-P., Prof. Dr.-Ing. 2. Wiesel, J., Dr.-Ing., Akad. Dir. 3. Vögtle, T., Dr.-Ing., Akad. OR 4. Gehbauer, F., Univ.-Prof. 5. Zăvoianu, F., Dr.-Ing, M. d. Conf. 6. Schade, U., PD Dr. 7. Hecking, M., Dr. 8. Alexander, T., Dr. 9. Wursthorn, S., Dipl.-Ing.	GIS/Photogrammetrie Photogrammetrie GIS Baubetrieb GIS/Photogrammetrie Ontologie Informationsextraktion Augmented Reality Augmented Reality	IPF IPF IPF TMB UTC Bukarest FGAN-FKIE FGAN-FKIE FGAN-FKIE IPF	07/1999–12/2007 07/1999–12/2007 07/1999–12/2007 07/1999–12/2007 07/1999–12/2007 01/2004–12/2007 01/2004–12/2007 01/2004–12/2007 01/2001–12/2007	
nichtwissen-schaftl. Mitarbeiter	10. Birkel, H.		IPF	07/1999–12/2007	

Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	11. Leebmann, J., Dr.-Ing. 12. Werder, S., Dipl.-Ing. 13. Mandadi, S. S. R. 14. Gliesch, A. 15. Wang, L. 16. Dimitrov, G. K. 17. Petrova, K. 18. Kabir, R. 19. Wang, L. 20. Weyer, C. 21. Reinbold, K. 22. Schuffert, S.	GIS/Photogrammetrie GIS Informatik, Softwareentwicklung Geomatik Informatik, Softwareentwicklung Informatik, Softwareentwicklung Kartographie, Softwareentwicklung Informatik, Softwareentwicklung Informatik, Softwareentwicklung GIS GIS GIS	IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF IPF	07/1999–11/2005 01/2006–12/2007 01/2005–03/2005 03/2005–12/2005 08/2005–12/2005 09/2005–12/2006 02/2007–09/2007 10/2005–12/2005 02/2006–10/2006 02/2006–04/2006 08/2006–10/2006 11/2007–12/2007 11/2007–12/2007	BAT II a E13u stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK stud. HK
nichtwissen-schaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt C7

Grundlagen neuer Technologien und Verfahrenstechniken für Rettungs-, Bergungs- und Wiederaufbaumaßnahmen

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Prof. Dr.-Ing. Fritz Gehbauer
Dipl.-Ing. Christine Schweier
Dipl.-Ing. Michael Markus

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt C7

5.1.1 Titel:

Grundlagen neuer Technologien und Verfahrenstechniken für Rettungs-, Bergungs- und Wiederaufbaumaßnahmen

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Baubetrieb, Projektmanagement, Katastrophenmanagement

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr. Gehbauer, Fritz, 13.05.1945
Institut für Technologie und Management im Baubetrieb
Universität Karlsruhe (TH)
Am Fasanengarten, 76131 Karlsruhe
Telefon: +49 - (0)721 - 6082647
Telefax: +49 - (0)721 - 695245
E-Mail: gehbauer@tmb.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Christine Schweier
Dipl.-Ing. Michael Markus

5.1.5 Rumänische Partner

Prof. Dr.-Ing. Ion Popa, Universitatea Ecologică (Ökologische Universität), Bukarest, Rumänien
BG Constantin Zamfir, Inspectoratul General pentru Situații de Urgență (Generalinspektorat für Notfallsituationen), Bukarest, Rumänien

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das Teilprojekt C7 beschäftigt sich mit der Erforschung von Technologien und Verfahrenstechniken zur Unterstützung der Rettungs- und Wiederaufbauarbeiten. Die drei übergreifenden Ziele in der für das Teilprojekt dritten Antragsphase von 2005 bis 2007 waren:

- Erstellung eines mobil nutzbaren Experten- und Informationssystems mit störungstoleranter Anbindung an die zentrale Datenbank des DMT. Parallele Verwendbarkeit durch mehrere Anwender, die an einem Fall arbeiten. Anpassung des bestehenden Experten- und Informationssystems für die Rettungsphase an das mobile System.
- Erforschung organisatorischer Methoden zur schnellen großflächigen Durchführung von Gebäudeevaluierungsmaßnahmen nach Erdebeben. Berücksichtigung der Optimierungsmöglichkeiten, die eine in das Katastrophenmanagement integrierte Betrachtungsweise bietet. Erstellung eines Experten- und Informationssystems für die Unterstützung der Gebäudezustandsevaluierung nach Erdebeben.
- Einbindung der beiden Expertensysteme in das Disaster Management Tool (DMT).

Das in der letzten Antragsphase entwickelte Experten- und Informationssystem für Rettungsarbeiten wurde dahingehend weiterentwickelt, dass eine mobile Verwendung durch mehrere Nutzer möglich ist. Der Nutzer kann mit einem Notebook oder einem PDA über WLAN auf einen Server zugreifen, auf dem das Experten- und Informationssystem betrieben wird. Dieser Server hält eine lokale Version der Datenbank vor und greift ebenso auf die zentrale DMT Infrastruktur und dessen Datenbank zu. Je nach Anwendungsfall ist auch der Betrieb als Einzelplatzversion möglich. Durch die Integration in das DMT kann auf die aktualisierten Gebäudeinformationen der gemeinsamen Datenbank zugegriffen werden und Meldungen entsprechend des mit Teilsprojekt C3 und C6 definierten Meldungsstandards weiter gegeben werden. Das System wurde auf der abschließenden Übung Atlas 2007 unter realen Bedingungen erfolgreich erprobt.

Basierend auf die Erfahrungen bei der Entwicklung des Experten- und Informationssystem für Rettungsarbeiten wurde ein Experten- und Informationssystem für die Unterstützung der Gebäudeinspektoren nach Erdbeben entwickelt. Dazu wurden die Grundlagen erforscht, um Ingenieure und Architekten

mit unterschiedlichem Erfahrungstand in Beurteilung seismisch induzierter Schäden bei einer schnellen und verlässlichen Beurteilung von Gebäudeschäden hinsichtlich weiterer Nutzbarkeit in einem großen Schadensgebiet zu unterstützen.

Die entwickelte Gebäudezustandsevaluierungsmethode wurde in einem Experten- und Informationssystem umgesetzt und an die Datenbank des DMT angebunden. Dies erlaubt den Inspektoren vor Ort die Nutzung vor und während der Katastrophe gesammelter Information und Daten und erleichtert somit die schnelle und verlässliche Beurteilung von Gebäuden. Durch die Übermittlung der Beurteilungsergebnisse an den Katastrophenstab, hat dieser jederzeit einen aktuellen Überblick über den Stand der Arbeiten im Feld und kann die Evaluierung besser koordinieren, vor allem im Falle von Nachbeben, wenn erneute Beurteilungen von Gebäuden notwendig werden. Dadurch wird die Zustandevaluierung von Gebäuden nicht als einzelner sondern in die gesamte Katastrophenmanagementkette integrierter Prozess betrachtet. Dies stellt eine wesentliche Verbesserung gegenüber herkömmlichen Methoden dar.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Experten- und Informationssystem für Rettungsarbeiten

Rettungsarbeiten, technische Hilfsmaßnahmen und die Begutachtung von geschädigten Gebäuden erfordern einen erfahrenen Anwender mit Kenntnis über die Lage am Einsatzort, die durch aufwändige Erkundungsmaßnahmen ermittelt wird. Bei Katastrophen fehlen jedoch gerade Spezialisten mit ausreichenden Kenntnissen über die lokalen Gegebenheiten.

Für den Erfolg der Rettungsarbeiten ist z.B. das Wissen über die Nutzung eines Gebäudes, die Anzahl der Anwesenden zum Zeitpunkt des Einsturzes, die Anzahl der Stockwerke und die Bauweise notwendig. Diese Informationen lassen sich nur schwer und zeitraubend anhand einer Trümmerstruktur ermitteln und sind bei Katastrophen weder durch Zeugenbefragungen noch von lokalen Organisationen verfügbar. Ebenso müssen die Beobachtungen, die im Einsatz gesammelt werden über eine zentrale Stelle dem Katastrophenstab und weiteren Einsatzkräften zu Verfügung gestellt werden. Allgemein wird nach Erdbebenkatastrophen beobachtet, dass mangelnder Informationsaustausch zwischen zentralen Informationspools (z.B. Stadtbauamt, Einwohnermeldeamt), Einsatz planenden und Einsatz ausführenden Stellen die Wirkung von Hilfsmaßnahmen stark beeinträchtigt, wie aus den Auswertungen der Maßnahmen von Gujarat/Indien (COMFORT 2003), Boumerdes/Algerien (INSARAG 2003), Izmit/Türkei (BISHOP 1999) ersichtlich ist.

Auch bei neuesten Einsatzleitsystemen erfolgt die Informationsübermittlung zwischen Einsatzleitstelle und Einsatzfahrzeug in den meisten Fällen über Sprechfunk. Graphische Informationen liegen zwar in der Leitstelle vor, können jedoch nicht

übertragen werden. Als Informationen vom Einsatzort werden bislang nur GPS Positionen oder Patienteninformationen übermittelt. Erste Lösungen mit Rechnerunterstützung am Einsatzort sind bereits für spezialisierte Anwendungen wie die Berechnung von Stofffreisetzungen und -ausbreitungen vorhanden (z.B. Compas von Brenk Softwaresysteme (MATZ ET AL. 2002)) oder allgemeine Gefahrstoffdatenbanken wie keudel-av (LANGE 2000)). Diese Systeme sind dann in einem Leitstellenfahrzeug installiert und arbeiten ohne Einbindung in andere Einsatzleitsysteme. Systeme, die direkt an die Arbeitsstelle mitgebracht werden, die für Katastrophenbewältigung einfach und robust verwendbar sind und Informationsaustausch mit einem Leitstellenrechner durchführen, fehlen bislang.

Daraus ergibt sich die Fragestellung, in wie weit ein rechnerunterstütztes Beratungssystem bei Rettungseinsätzen nach Gebäudeeinsturz Nutzen bringen kann. Dies gilt insbesondere im Falle von gebäudeübergreifenden Katastrophen, die einen Mangel an spezialisiertem Personal und einen erhöhten Bedarf an Informationsaustausch und Koordination mit sich bringen.

Experten- und Informationssystem für Gebäudezustandsevaluierung

Eine der vorrangigen Ziele in der Phase der Wiederherstellungs- bzw. Instandsetzungsmaßnahmen ist die Erfassung der Schäden, vor allem von Gebäuden, die eine Hauptgruppe der von Schäden betroffenen Einrichtungen bilden. Eine frühe und zügige Evaluierung der Gebäudezustände ist aus mehreren Gründen besonders dringlich und wichtig. Primär ist die Sicherheit der Gebäude zu ermitteln um die Nutzung unsicherer Gebäuden zu verhindern (ATC 1989). Darüber hinaus dient die Ermittlung der Schäden als Planungsgrundlage für das weitere Vorgehen des Katastrophenmanagements, wie z.B. für die Ermittlung des Bedarfs an kurz- und mittelfristigen Notunterkünften. Aber eine schnelle Zustandevaluierung der Gebäude ist auch zur Reduzierung psychologischer Belastungen für die Bevölkerung sehr entscheidend; so werden Unsicherheiten vermieden und die Motivation der Bevölkerung zum Wiederaufbau erhalten. (COBURN & SPENCE 2002).

Das Hauptproblem bei der Beurteilung der Schadenszustände von Gebäuden nach Erdbeben ist, dass für die Vielzahl zu begutachtender Gebäude die Anzahl von Ingenieuren die für die Beurteilung seismisch induzierter Schäden ausgebildet sind und Erfahrung in diesem Bereich mitbringen zu gering ist. Die Notwendigkeit die Ingenieure auf diese Aufgabe vorzubereiten und bei ihrer Arbeit zu unterstützen wurde schon zu Anfang der Antragsphase in vielen Artikeln und Berichten bestätigt (z.B. ATC 1989; OSTERAAS ET. AL. 2000).

Es existierten auch bereits einige Modelle zur Beurteilung von Gebäudezuständen nach Erdbeben. Die vorhandenen Modelle zielen hauptsächlich darauf ab, durch organisatorische Optimierung der Evaluierungsablaufs und fachlich-technische Unterstützung für die Inspektoren die knappen Ressourcen an geeignetem Personal möglichst optimal zu nutzen und die Ergebnisse der Evaluierung verlässlich und

vergleichbar zu machen. Eine der umfassendsten Methoden ist hierbei im ATC 20 Report: „Procedures for postearthquake safety evaluation of buildings“ (ATC 1989) vorgestellt, der nach den Erfahrungen des Northridge Erdbebens verbessert und erweitert wurde (ATC 1995). Der darin vorgeschlagene Evaluierungsprozess wird durch Formularvorlagen für die Gebäudebeurteilung und spezifischem Fachwissen für die Inspektoren zur Bestimmung der Gebäudezustände ergänzt. Die ATC hat auch eine Anwendung ihrer Methode für mobile Plattformen entwickelt. Diese ist aber lediglich eine elektronische Variante der entwickelten Formulare, mit der zusätzlichen Möglichkeit die Daten an einen Hauptserver zu übermitteln und die Plakate zur Kennzeichnung der Gebäude auszudrucken (ATC 2003).

Die ATC bietet hauptsächlich baufachliche Unterstützung für die Inspektoren d.h. Hilfestellung bei der Einschätzung, welche Schäden zu welcher Zustandsbeurteilung führen sollten. Da die Einbindung in die gesamte Katastrophenmanagementkette fehlt, bietet es nicht die Möglichkeit z.B. Gebäudebestandsdaten, Ergebnisse von Schadensabschätzungsberechnungen und in der Rettungsphase gesammelte Daten bei der Beurteilung der Gebäude zu nutzen. Dies würde nicht nur zur schnelleren, und verlässlicheren Beurteilungen führen, sondern auch die Sicherheit der eingesetzten Kräfte erhöhen, da z.B. Information über bekannte Gefahren den Inspektoren vorliegen würden. Darüber hinaus werden von ATC die Möglichkeiten, die das digitale Medium im Vergleich zum Papierformular bietet um die Anwender, d.h. die Inspektoren zu unterstützten und zu leiten, kaum genutzt.

Es wurde zur Anfang der Antragsphase auch festgestellt, dass die Anwendung mobiler Plattformen und weiterer Technologien, wie Geoinformations- oder Datenbanksysteme grundsätzlich die Chance bieten, die Methoden und Vorgehensweisen bei der Beurteilung von Gebäudezuständen zu optimieren. So wurde z.B. bei der Zustandevaluierung von Gebäuden in Südisland 2000 durch die Nutzung mobiler Plattformen bei der Datensammlung im Feld und die Anwendung von Geoinformationssystemen zur Auswertung der Daten die Zustandsermittlung der Gebäude beschleunigt, mit positiven Effekten für den gesamten Katastrophenmanagementprozess (JÓNASSON ET. AL., 2002). Dabei wurde auch festgestellt, dass solche Verfahren von den Praktikern angenommen werden.

Ausgehend von diesem Kenntnisstand waren die Aufgabenstellungen in diesem Bereich:

- Die Erforschung organisatorischer Methoden zur schnellen großflächigen Durchführung von Gebäudeevaluierungsmaßnahmen nach Erdebeben unter Berücksichtigung der Optimierungsmöglichkeiten, die eine in das Katastrophenmanagement integrierte Betrachtungsweise bietet.
- Die Umsetzung der entwickelten Methode für ein Experten- und Informationssystem, das die Inspektoren vor Ort bei der Beurteilung der Gebäudezustände unterstützen soll.

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

5.2.1.2.1 Erfassung von Rettungseinsätzen, Trümmerstrukturen und Gebäudeevaluierungsmaßnahmen

Datensammlung zu Rettungseinsätzen und Trümmerstrukturen

Die in den vorherigen Antragsphasen zusammengestellte Datenbasis über Rettungseinsätze und Trümmerstrukturen wurde in der aktuellen Forschungsperiode durch weitere Datensammlungen erweitert. Die Daten wurden verwendet:

- zur Weiterentwicklung der Wissensbasis des Expertensystems für Rettungsarbeiten,
- zur Weiterentwicklung des Schadenskatalogs,
- bei der Weiterentwicklung des Opferabschätzungsmodells,
- bei der Erstellung von 3D Modellen von Trümmerstrukturen, die für die Zusammenarbeit mit C5 erforderlich sind.

Wie in den vorherigen Antragsphasen wurden detaillierte Informationen über Rettungseinsätze mit genutzten Geräten und Verfahren zum Vordringen zu den Verschütteten, Zeitbedarf zur Befreiung der Personen, Schweregrad der Verletzungen, Schadensursachen, Konstruktionstyp des Gebäudes, Art der Trümmerstruktur, Grundrissen und weiteren technischen Details zusammengetragen. Die Informationen einschließlich Fotografien von aktuellen Ereignissen wurden in der Presse, im Internet, aber hauptsächlich direkt bei den Rettungsorganisationen international recherchiert. Die bereits in der ersten Antragsphase entwickelte Methode der Datensammlung nach Gebäudeeinstürzen mittels Fragebögen und der Auswertung der Daten mit Datenbanksystemen wurde fortgeführt.

Der Fragebogen zum Verlauf der Rettungseinsätze liegt momentan in vier Sprachen vor: deutsch, englisch, rumänisch und türkisch. Nach Gebäudeeinstürzen wurden zuerst die beteiligten Rettungsorganisationen recherchiert und kontaktiert. Bei Bereitschaft wurde der Fragebogen zugesandt.

Ein herausragendes Ereignis in dieser Antragsphase war der Einsturz der Eislaufhalle in Bad Reichenhall am 2. Januar 2006. Hier erhielten wir detaillierte Beschreibungen und Fotomaterial direkt von den am Einsatz beteiligten Baufachberatern. Es wurden Erfahrungen mit neuen Verfahren zur Gebäudesicherung, Umgang mit Schnee an der Einsatzstelle und mit fortlaufender Vermessung der Einsatzstelle gesammelt.

Die gesammelten Daten wurden mithilfe einer Datenbank verwaltet, die aktuell rund 460 Datensätze enthält (vgl. Abbildung 1). Die Auswertung dieser Datensätze fand in der aktuellen Antragsphase besonders bei der Generierung von Handlungsvorschlägen durch das Expertensystem Verwendung.

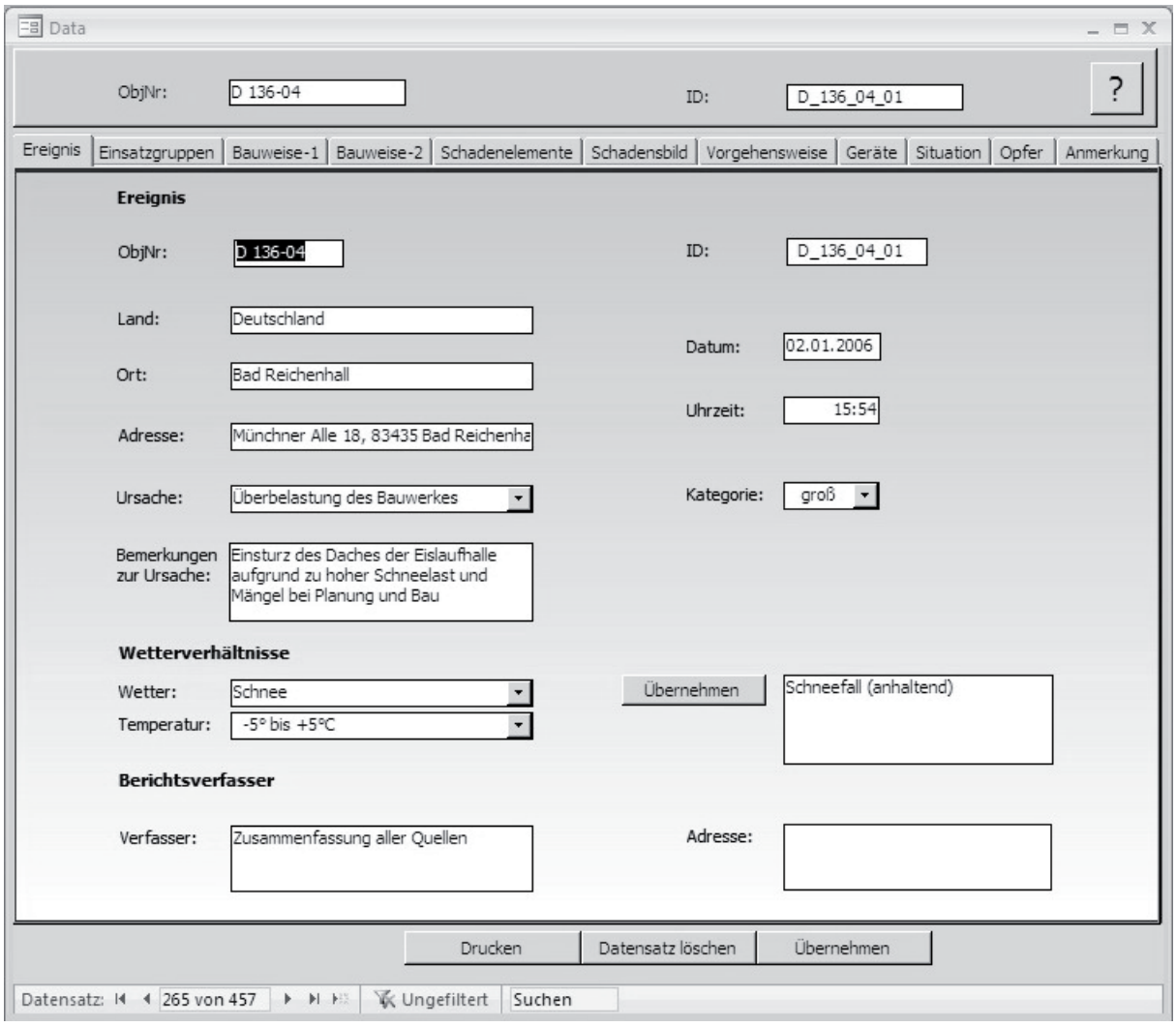


Abbildung 1: Screenshot Rettungseinsätze Datenbank.

Datensammlung Gebäudezustandsevaluierung

Um die aktuell praktizierten Vorgehensweisen bei der Zustandsevaluierung von Gebäuden zu ermitteln, wurden zuerst im Rahmen einer Diplomarbeit (JUNG, 2006) die in verschiedenen erdbebengefährdeten Ländern vorhandenen Modelle zur Zustandsevaluierung von Gebäuden zusammengetragen und ausgewertet. Betrachtet wurden die Modelle aus USA, Japan, Italien und Griechenland. Von besonderem Interesse war, ob die Zustandsevaluierung von Gebäuden im Vorfeld der Erdbeben schon geplant wurde, auf welche Weise die Datensammlung organisiert und koordiniert wurde, welche Methoden dazu genutzt wurden, welche Hilfsmittel verwendet wurden, wie die Ausbildung des eingesetzten Personals war und welche Erfahrungen gemacht wurden, sowohl von den Verantwortlichen als auch von den Personen im Feld. Darüber hinaus wurden Methoden untersucht, die zwar keine eigenständigen geschlossen Modelle darstellen, aber Ideen beinhalten, die zur Verbesserung der Organisation und Durchführung der Evaluierungsarbeiten führen können.

Weitere wertvolle Daten und Informationen wurden bei einem Treffen mit den Verantwortlichen des Bauamtes in Bukarest (Inspectoratul de Stat in Constructii al Municipiului Bucuresti) gesammelt. Dabei erhielten wir das unveröffentlichte Handbuch zur Vorgehensweise bei der Zustandsbeurteilung von Gebäuden nach Erdbeben in Rumänien (CRAINIC ET AL., 1999) sowie viele weitere Informationen, z.B. über den aktuellen Stand an ausgebildetem Personal in Rumänien und persönliche Einschätzungen der Verantwortlichen über zu erwartende Schwierigkeiten im Ernstfall.

Fachleute, die als Inspektoren tätig geworden sind nach dem Hochwasser in Sachsen 2003, wurden nach Ihren Erfahrung, Wünschen und Verbesserungsvorschlägen befragt. Sie konnten wertvolle Hinweise liefern was bei der Planung schon vorgesehen werden sollte, wo die Schwierigkeiten bei der Umsetzung der vorhandenen Pläne lagen, welche Instrumente hilfreich gewesen wären und auch bei der Frage was ein Softwaretool zur Unterstützung der Inspektoren enthalten sollte.

5.2.1.2.2 Analyse der Trümmerstrukturen eingestürzter Gebäude

3D Modellierung eingestürzter Gebäude

Für die Entwicklung von Verfahren zur Schadenserkennung und -interpretation aus digitalen Oberflächenmodellen im Teilprojekt C5 wurden räumliche Modellpaare eingestürzter Gebäude mit deren (unzerstörtem) Ausgangszustand bereits in der vorherigen Antragsphase zur Verfügung gestellt. Die dreidimensionale Nachbildung erfasster Trümmerstrukturen und die Rekonstruktion der dazugehörigen ursprünglichen Gebäudezustände wurden fortgesetzt, um möglichst viele verschiedene Schadenformen und Bauweisen zu analysieren. Sie waren notwendig für die Weiterentwicklung der Schadenserkennung und -interpretation im TP C5. Die räumlichen Modelle aufgenommener Gebäudeeinstürze wurden darüber hinaus für den Schadenskatalog verwendet.

Von den detailliert erfassten Trümmerstrukturen aus dem Schadensgebiet in Boumerdes und Umgebung in Algerien nach dem Erdbeben im Jahr 2003 wurden 3D Modelle erstellt und ihre ursprünglichen Gebäudezustände im Modell rekonstruiert. Es wurden zusätzlich zu der in der letzten Antragsphase erstellten Modelle drei weitere räumliche Modelle von verschiedenen ausgewählten Gebäudeeinstürzen und deren Ausgangszustände ermittelt. Die Auswahl erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt C5. Die Beschreibung des Verfahrens erfolgte bereits im Berichtsband der letzten Antragsphase. In Abbildung 2 ist eines der erstellten Modelle abgebildet. Die Modelle wurden dem Teilprojekt C5 zur Verfügung gestellt.

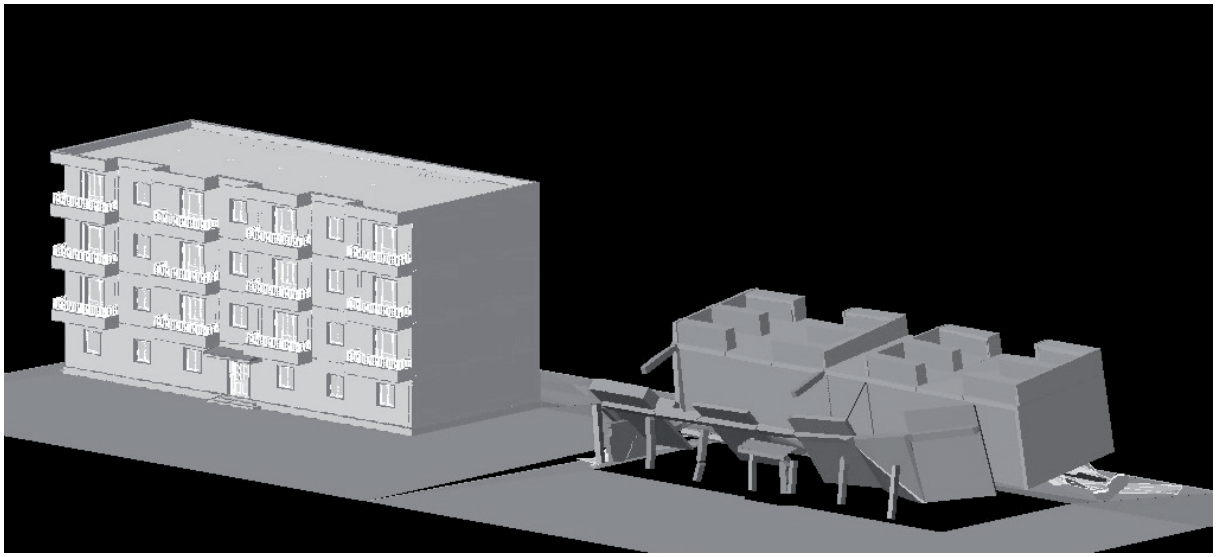


Abbildung 2: 3D Modell eines Gebäudes, das in Algerien, 2003 eingestürzt ist, im zerstörten und unzerstörtem Zustand.

Weiterführung Schadenskatalog

Die in der letzten Antragsphase erstellte Schadenskatalogdatenbank wurde um weitere Daten über Trümmerstrukturen mit dem Ziel erweitert, die typische Ausprägung geometrischer Merkmale bei den einzelnen Schadensbildern genauer zu bestimmen und somit den Schadenskatalog weiterzuentwickeln. Das war für die Kooperation mit C5 erforderlich, da die geometrischen Parameter zur Detektion der Schadensbilder aus digitalen Oberflächenmodellen dienen. Darüber hinaus wurde die Schadenskatalogdatenbank bei der Weiterentwicklung der geometriebasierte Opferabschätzungsmodellierung verwendet.

Es wurden insbesondere die in 2003 in Algerien gesammelten, sehr hochwertigen Daten in die Schadenskatalogdatenbank aufgenommen. Aktuell enthält die Datenbank (vgl. Abbildung 3) die geometrische Beschreibung von 155 Gebäuden und rund 1850 Bilder dieser Strukturen.

Die Darstellung des Schadenskatalogs erfolgt in Form einer MS Access Datenbank. In einer Gesamtübersicht können damit alle untersuchten Gebäude, sortiert nach Schadensereignissen, mit den entsprechenden Schädigungen und ausgewerteten geometrischen Detailpunkten abgerufen werden. Hyperlinks zu den dazugehörigen Fotografien veranschaulichen die Auswertungsergebnisse. Zusätzlich stehen mehrere Abfragen zur Verfügung, die bei der Auswertung des Bildmaterials einen unterstützenden Charakter haben.

Die Auswertungsergebnisse wurden C5 zur Verfügung gestellt.

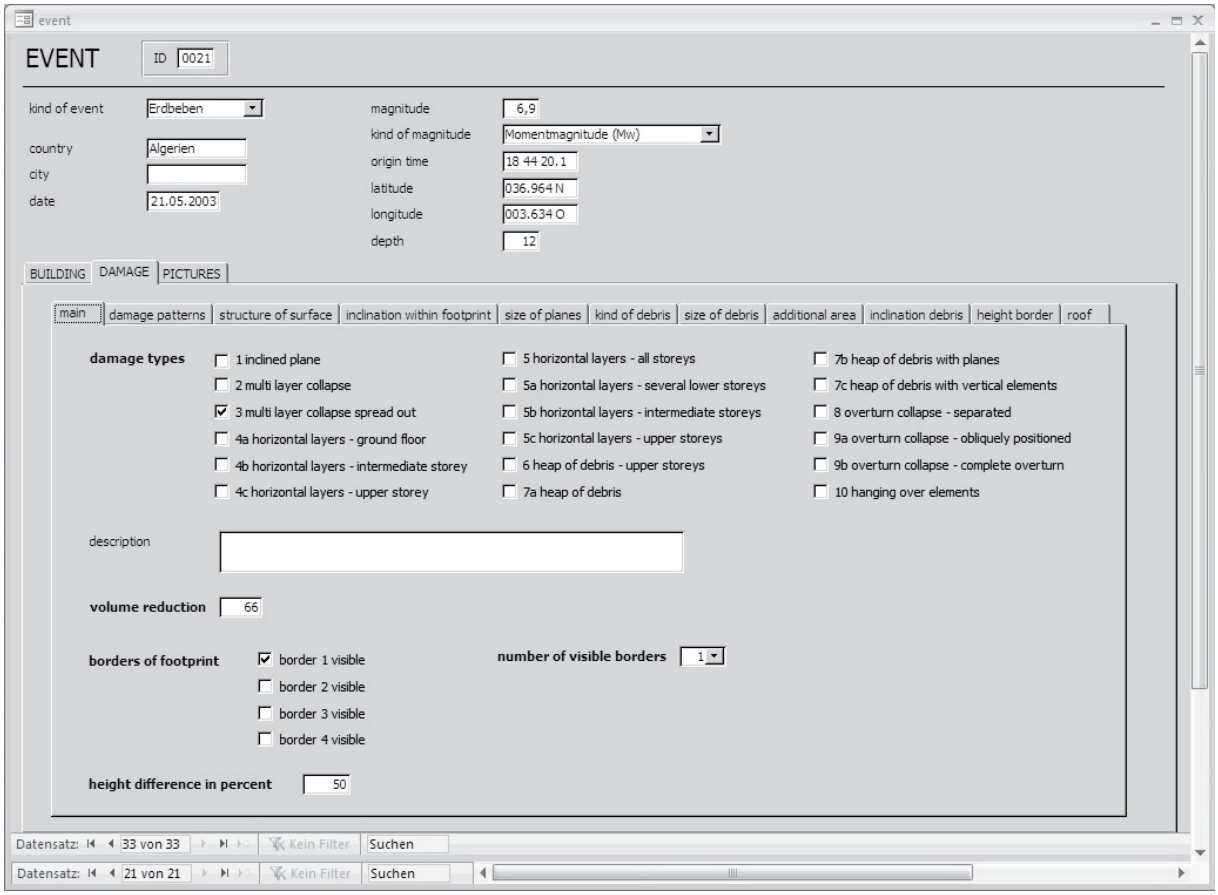


Abbildung 3: Screenshot des Schadenskatalogs.

5.2.1.2.3 Experten- und Informationssystem für Rettungskräfte

Das Experten- und Informationssystem für Rettungseinsätze lag bereits am Ende der letzen Antragsphase funktionsfähig vor. Wesentliche Ergänzungen in dieser Antragsphase waren noch die Übersetzung der Wissensbasis und der Informationsseiten ins Englische, die Anbindung and das Disaster Management Tool und die Anpassung auf die Verwendung in einem Funk gestützten Netzwerk. Im Verlauf der Datensammlung hinzugekommene Erfahrungen und Informationen wurden in die Wissensbasis und die Informationsseiten integriert.

Als Nutzer des Systems kommen Berater an der Einsatzstelle bei Gebäudeeinstürzen in Frage. Dafür wurde die Rolle des Baufachberaters definiert, der sowohl Grundkenntnisse in Gebäudestatik, Bauweisen und Baustoffen hat, als auch als Mitarbeiter des Technischen Hilfswerks, einer Feuerwehr oder anderer Hilfsorganisationen über Erfahrung in der Abwicklung von Rettungseinsätzen verfügt. Da dieses Konzept sich in der Praxis durchsetzte, wurde die Funktion in die vfdb-Richtlinie (vfdb 2005) aufgenommen, an der auch von Seiten des Institutes mitgearbeitet wurde.

Die Anbindung an das Disaster Management Tool erfolgte auf zwei Ebenen. Zum einen wurde das bestehende Expertensystem, welches als Shell-System unabhängig von der Wissensbasis ist (BAUMEISTER 2004), um ein Modul zur Datenbankanbindung ergänzt. Dieses Modul ist ebenso unabhängig von der Wissensbasis und der vorhandenen Datenbank des DMT, so dass es ohne Änderung für andere Anwendungen genutzt werden kann. Es wurde bereits der Universität Würzburg, Lehrstuhl für Informatik VI zur Verfügung gestellt. Im vorliegenden Fall wird der Nutzer, ein technischer Berater oder Baufachberater an der Einsatzstelle, Gebäudeinformationen sowie Nutzungs- und Bewohnerinformationen an der Einsatzstelle abrufen. Weiß er die genaue Adresse des eingestürzten Gebäudes nicht, kann er in einer Suchanfrage Fotos und Informationen der in Frage kommenden Gebäude anzeigen lassen und das Gebäude auswählen. Danach werden die Daten von der DMT-Datenbank ins System übertragen und können im Verlauf der Eingabe modifiziert werden.

Die weitere Anbindung erfolgt über Meldungen, die im gemeinsam von Teilprojekt C3 und C6 entwickelten xml-Standard für Meldungen weitergegeben werden. Diese Meldungen enthalten die Ergebnisse der Nutzereingabe und werden so direkt für das Emergency Operations Centre (siehe Bericht C3) verfügbar.

Die Evaluation des Systems erfolgte in zwei Schritten:

Im ersten Schritt wurden zwei Übungsszenarien entwickelt, die auf einem Gebäudeeinsturz nach einer Gasexplosion in Düsseldorf, Krahestraße 8, im Jahr 1997 und auf dem Bombenanschlag auf das Murrah Building in Oklahoma City 1995 basieren. Experten der Feuerwehren und des Technischen Hilfswerks (THW) nutzten das Expertensystem und verglichen die Ergebnisse des Systems mit den eigenen Handlungsvorschlägen. Die daraus sich ergebenden Verbesserungsvorschläge wurden in den Expertengruppen diskutiert und darauf aufbauend die Wissensbasis des Experten- und Informationssystems erweitert und angepasst.

Im zweiten Schritt wurden auf realistischen Übungen Baufachberater mit Notebooks mit dem Experten- und Informationssystem ausgestattet. Sie begleiteten den Einsatz und gaben die benötigten Daten ein. Die systemgenerierten Vorschläge verglichen sie dann mit den bereits ergriffenen Maßnahmen und diskutierten danach nur die Ihnen sinnvoll erscheinenden Ergebnisse mit ihrem Einsatzleiter. Die Übungen wurden in Bukarest 2004 in Kooperation mit dem Civil Protection Command of Romania und 2007 mit dem General Inspectorate for Emergency Situations unter dem Namen ATLAS 2004 und ATLAS 2007 durchgeführt. Im ersten Fall wurde an einem Szenario auf einem Übungsgelände gearbeitet, 2007 wurde ein Kühlhallenkomplex mit Büroanbauten, der sich im Abriss befand, mit Hilfe eines Abbruchbaggers modifiziert, Opferdarsteller und Puppen eingebracht und so eine sehr realistisch Übungssituation geschaffen.

Abbildung 4: Herstellung des Übungsszenarios (links) und Situation bei der Übung.

Alle in Bukarest in so einem Fall üblichen Organisationen wie Feuerwehren, das Rote Kreuz, medizinische Hilfsorganisationen, Gas-, Wasser- und Stromversorger und Baufirmen mit Radladern und Autokränen waren jeweils an den Übungen beteiligt (siehe Abbildung 4).

Da bei beiden Übungen sehr erfahrene und umsichtige Einsatzleiter arbeiteten, deckten sich viele der systemgenerierten Handlungsvorschläge mit den Entscheidungen der Einsatzleiter. Dies bestätigt die Richtigkeit der Wissensbasis. Jedoch waren etwa 20 Prozent der Handlungsvorschläge neu für den Einsatzleiter und wurden auch zum größten Teil so umgesetzt. Die Baufachberater wurden befragt und bestätigten nach der Übung ATLAS 2007 auch die Verwendbarkeit und den Nutzen des Systems. Insbesondere unter realen Bedingungen mit weniger erfahrenen Einsatzleitern wird der Nutzen sogar entsprechend größer sein.

5.2.1.2.4 Experten- und Informationssystem für die Evaluierung von Gebäudezuständen nach Erdbeben

Basierend auf den im Kapitel 5.2.1.1 dargestellten Kenntnisstand und der in Kapitel 5.2.1.2.1 beschriebenen Datensammlung waren die Ziele in diesem Bereich:

- Die Erforschung organisatorischer Methoden zur schnellen großflächigen Durchführung von Gebäudeevaluierungsmaßnahmen nach Erdebeben unter Berücksichtigung der Optimierungsmöglichkeiten, die eine in das Katastrophenmanagement integrierte Betrachtungsweise bietet.
- Die Umsetzung der entwickelten Methode für ein Experten- und Informationssystem, das die Inspektoren vor Ort bei der Beurteilung der Gebäudezustände unterstützen soll.

Auf der Grundlage der untersuchten Modelle zur Zustandsbeurteilung erdbebengeschädigter Gebäude in verschiedenen Ländern sowie der zusätzlich gesammelten Daten und Informationen aus den verschiedenen Quellen wurde eine verbesserte Vorgehensweise zur Beurteilung der Gebäudezustände nach Erdbeben

zusammengestellt, die die zusätzlichen Vorteile, die sich durch die Verwendung des Disastermanagement Tools ergeben, nutzt . Diese sind einerseits die Nutzung der Informationen aus der DMT Datenbank, hauptsächlich der Bestandsdaten und der während der Katastrophenbewältigung gesammelten Informationen sowie die Überwachung und Steuerung der Evaluierungsarbeiten mithilfe der Beuteilungsergebnisse von den im Feld eingesetzten Expertensystemen.

Bei der Organisation und Durchführung der Evaluierungsarbeiten sollten vier Phasen unterschieden werden: die Planungs-, die Organisations-, die Evaluierungs- und die Wiederaufbauphase.

In der Planungsphase vor dem Erdbeben sollten die Notfallpläne erstellt werden mit der Festlegung sämtlicher Zuständigkeiten. In diese Phase fällt auch die Rekrutierung der Inspektoren, deren Schulung am Expertensystem und deren ständige Weiterbildung durch regelmäßig durchzuführende Übungen. In dieser Phase sollten auch die Gebäudedaten zusammengetragen und in die DMT Datenbank abgelegt werden, die für die Mitarbeiter im Stab für die Organisation der Evaluierungsarbeiten sowie für die Inspektoren im Feld notwendig sind. Diese Datenbasis muss dann im weiteren Verlauf bis zum Eintritt des Ernstfalles aktuell gehalten werden. In der DMT Datenbank sollten abgelegt werden: Kartenmaterial des betreffenden Gebietes, Bestandsdaten und Baupläne der Gebäude, evtl. im Vorfeld durchgeführte Evaluierungen und deren Ergebnisse sowie die Festlegung wichtiger Einrichtungen, die bei der Beurteilung bevorzugt zu behandeln sind. Weiterhin sollten in der Planungsphase die Beurteilungskriterien für die verschiedenen Bauweisen ausgearbeitet werden, die Bestandteil des Expertensystems sind. Diese müssen den örtlichen Bauweisen angepasst sein. In diesem Zusammenhang würde auch die Entwicklung eines Schadensbeurteilungskatalogs als Ergänzung des Expertensystems sinnvoll sein. Dieser Katalog sollte typische Schäden beschreiben und mit Bildern und Skizzen verdeutlichen, das typische Vorkommen, typische Begleitschäden, Schwierigkeiten beim Erkennen und weitere Informationen beinhalten, die zur Erkennung und richtigen Einschätzung des Schadens im Bezug auf die Gesamtsicherheit des Gebäudes führen.

In der zweiten, der Organisationsphase, die vom Eintritt des Ernstfalls bis ca. zum dritten Tag nach einem Erdbeben andauert gilt es sich einen Überblick über die Situation zu verschaffen und die Evaluierungsarbeiten vorzubereiten. In dieser Phase muss der Notfallplan umgesetzt, der Stab der die Organisation ausführt, zusammengerufen und die Beurteilungsarbeiten vorbereitet werden. Bei dieser Vorbereitung sollten die Informationen aus der DMT Datenbank, die während den ersten Tagen anfallen, ausgewertet werden, insbesondere auch die Ergebnisse der Laserscanningbefliegungen. Sinnvoll ist auch die Auswertung von Satellitendaten und die Durchführung einer so genannten ‚Windshield-Survey', bei der die gesamte Stadt mit dem Auto erkundet wird um die am schlimmsten betroffenen Gebiete zu

identifizieren. In der Organisationsphase sollten auch die vorgesehenen Inspektoren einberufen und die Teams gebildet werden. Auf der Grundlage der gesammelten Informationen können dann die zu beurteilende Gebiete für die einzelnen Teams zugeteilt werden. Die im Vorfeld identifizierten wichtigen Einrichtungen, wie z.B. Krankenhäuser müssen schon in dieser Phase untersucht werden, da ihre Sicherheit für eine guten Ablauf der Katastrophenbewältigung essenziell ist.

Etwa am dritten Tag nach einer Katastrophe beginnt schließlich die Phase der flächendeckenden Zustandsevaluierung erdbebengeschädigter Gebäude. Die Evaluierung der Gebäude sollte, wie in vielen Modellen schon so vorhanden, mit einem dreistufigen System durchgeführt werden. Die erste Stufe ist eine „Schnelle Evaluierung“, bei der die Gebäude durch eine relativ kurze Überprüfung entweder als ‚Sicher’, ‚Unsicher’ oder als ‚Fraglich’ eingestuft werden. Letztere werden danach bei einer „Detaillierten Inspektion“ begutachtet. Sollten im Anschluss an die detaillierte Inspektion weiterhin Zweifel am Status des Bauwerks herrschen, ist eine technische Untersuchung zu beantragen. Im Anschluss an Nachbeben ist der komplette Ablauf der Zustandsevaluierung zu wiederholen. Das Ziel der vorgeschlagenen Beurteilungstechniken ist die Feststellung der Gebäudesicherheit zur kurzfristigen Nutzung. Auch möglicherweise vorgeschlagene Reparaturmaßnahmen erhöhen nicht zwangsläufig die Sicherheit der Bauwerke für einen langfristigen Gebrauch. Daher ist mit Beginn der Wiederaufbauphase in weiterführenden Untersuchungen zu klären, in welchem Ausmaß die Schäden sich auf den langfristigen Nutzen der Bauwerke auswirken. Ob während der schnellen und der detaillierten Inspektion eine Abschätzung des wirtschaftlichen Schadens vorgenommen wird, ist eine Entscheidung der jeweiligen Behörde bzw. der politischen Entscheidungsträger. Prinzipiell spricht jedoch nichts dagegen, diesen Punkt bei den Evaluierungsarbeiten ebenfalls zu berücksichtigen und damit beispielsweise einen Anhaltspunkt für die Erteilung von staatlichen Zuschüssen für Reparaturmaßnahmen oder den Wiederaufbau zu liefern.

Die Kennzeichnung der Gebäude bezüglich ihrer Sicherheit erfolgt jeweils im Anschluss an eine Evaluierung und wird von den Inspektorenteams mit Plakaten und Sprühfarbe vorgenommen. Es existieren drei Varianten: ‚Überprüft’ (grün), ‚Eingeschränkte Nutzung’ (gelb) und ‚Unsicher’ (rot). Die Plakate sollten in der jeweiligen Landessprache sowie einer zweiten, in der Gegend weit verbreiteten Sprache beschriftet werden. Das Ausfüllen der digitalisierten Plakate, vor allem der zur ‚Eingeschränkten Nutzung’, erfolgt vor Ort auf dem PDA, ehe sie in der entsprechenden Farbe mit einem tragbaren Druckgerät ausgedruckt und an allen Ein- und Ausgängen angebracht werden. Durch den Verzicht auf ein handschriftliches Vermerken von unsicheren Bereichen des Gebäudes ist durch die maschinelle Schrift die Lesbarkeit gewährleistet. Durch eine Punktmarkierung in der entsprechenden Sprühfarbe an der Gebäudewand neben den Plakaten wird das unbefugte Entfernen derselben sichtbar.

Die letzte Phase ist die Wiederaufbauphase, die frühestens zwei Wochen nach dem Erdbeben beginnt und u. U. Jahre andauern kann. In dieser Phase sollten die Gebäude für eine langfristige Nutzung instand gesetzt oder evtl. abgerissen werden.

Nähere Details zu der Vorgehensweise bei der Gebäudezustandsevaluierung sind in der Diplomarbeit von M. Jung (JUNG 2006) zu finden.

Das entwickelte Experten- und Informationssystem für die Gebäudezustandsevaluierung ist für die ersten zwei Stufen, für die schnelle und die detaillierte Inspektion vorgesehen. Das System sollte auf mobilen Rechner den Inspektoren vor Ort zur Verfügung stehen. Ein wesentlicher Aspekt ist der Datenaustausch mit einem zentralen Server zur lokalen Nutzung von Einsatzplänen, Checklisten, Gebäudeinformationen sowie aktuellen Informationen bei der Entscheidungsfindung. Das Ziel dabei war die Beurteilung von Gebäudezuständen zu beschleunigen, die Ergebnisse verlässlicher zu machen und die im Laufe der Forschungsarbeiten ermittelten Anforderungen sowohl der Verantwortlichen, wie die der örtliche Behörden als auch des Personals vor Ort zu entsprechen. Insbesondere die Vorteile die sich durch die Anbindung des Expertensystems an das DMT ergeben, waren zu realisieren. Dies sind unter anderem kontextabhängige und bedarfsgerechte Informationsbereitstellung aus vorangegangenen Phasen des Katastrophenmanagements, Strukturierung der Informationen und Optimierung der Darstellungsart.

Die Oberfläche besteht am Anfang der Beurteilung aus drei Bereichen: dem Experten- und Informationssystem an sich, einer GIS karte und einem Bereich in dem Photos des Gebäudes dargestellt werden können. (siehe Abbildung 5).

Die Beurteilung wird in den nachfolgend aufgeführten Schritten durchgeführt:

- Die Auswahl des zu beurteilenden Gebäudes kann entweder über die Karte oder über eine Suchfunktion nach der ID Nummer des Gebäudes oder der Adresse erfolgen.
- Das ausgewählte Gebäude wird dann auf der Karte hervorgehoben und sein aktueller Beurteilungszustand wird angezeigt. Das Gebäude kann unbeurteilt sein, beurteilt bei der schnellen oder bei der detaillierten Inspektion mit den entsprechenden Beurteilungsergebnissen. Vorhandene Photos des betreffenden Gebäudes werden auch angezeigt. Diese Maßnahmen helfen den Inspektoren ihre Gebäude schneller und verlässlicher zu identifizieren und so die Verwechselung von Gebäuden zu vermeiden. Das ist insbesondere in gewachsenen, verwinkelten urbanen Gebieten von Vorteil. Außerdem werden auf diese Weise Mehrfachbeurteilungen vermieden. Hilfreich ist dieses System auch bei Nachbeben, denn die eventuell bereits vorgenommenen Beurteilungen sind den Inspektoren zugänglich und es ist trotzdem ersichtlich, welche Gebäude vom Katastrophenstab dazu bestimmt wurden, neu beurteilt zu werden.

- Wurde das zu beurteilende Gebäude identifiziert, wird die Gebäudeklasse, welches die Bauart des Gebäudes beschreibt, angezeigt. Der Nutzer hat die Möglichkeit diese zu akzeptieren oder die Gebäudeklasse mithilfe des bereitgestellten Formulars im Expertensystem neu zu bestimmen.
- Auf Basis der ermittelten Gebäudeklasse kann das entsprechende Beurteilungsformular für die „Schnelle Inspektion“ gewählt werden. Es gibt für jede Bauweise (Stahlbeton, Mauerwerk, Stahl und Holz) unterschiedliche digitale Formulare, die ausgefüllt werden müssen und den Inspektor dabei zur jeweiligen Einstufung der Gebäude führen.
- Nach Öffnen des entsprechenden Formulars muss der Inspektor seinen Namen, seine Institution sowie die Organisation, die ihn für die Inspektion autorisiert hat angeben. Dann werden vorhandene Daten und Informationen zu dem gewählten Gebäude angezeigt. Diese sind auf jeden Fall Bestandsdaten der Gebäude, wie Bauweise, Stockwerksanzahl, Nutzung, Anzahl der Appartements, usw. die im Vorfeld der Katastrophe gesammelt wurden und falls vorhanden, Informationen aus vorangegangenen Phasen des Katastrophenmanagements. Diese können Informationen über Brände, Evakuierungen, gerissene Leitungen etc. sein. Die Bestandsdaten der Gebäude können übernommen oder falls erforderlich geändert werden.
- Die Gebäudeevaluierung an sich wird im nächsten Schritt durchgeführt. Das Expertensystem leitet den Benutzer mit Fragen und evtl. Folgefragen und unterstützt ihn bei der Einschätzung von gefundenen Schäden hinsichtlich der Zustandsbeurteilung des Gesamtgebäudes und führt ihn auf diese Weise zu dem Beurteilungsergebnis. Bei der Beantwortung der Fragen kann er, falls erforderlich, auf Bestandsdaten und während der Rettungsphase gesammelte Informationen des Gebäudes oder auf hinterlegte Baupläne zurückgreifen. Er kann sich auch kontextabhängig Hilfen in Form von Informationsseiten oder Checklisten für die jeweilige Frage einblenden. Auf diese Weise wird das vorhandene technische Wissen dem Nutzer zugeschnitten auf seine Bedürfnisse angeboten. Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit Skizzen anzufertigen und abzuspeichern.
- Am Ende wird eine Zusammenfassung der Antworten dargestellt. Die Antworten sind farblich markiert (rot, gelb oder grün). Die verschiedenen Farben zeigen ob die einzelnen Antworten als gefährlich für den Gesamtzustand des Gebäudes zu betrachten sind oder nicht. Auf Grundlage dieser Antworten wird eine Empfehlung für die Einstufung der Gebäude berechnet. Die verschiedenen Einstufungen können sein: „Überprüft“ (d.h. sicher), „Eingeschränkte Nutzung“ (d.h. eine detaillierte Beurteilung ist erforderlich) oder “Unsicher”. Der Inspektor hat die Möglichkeit diese Beurteilung zu akzeptieren oder das Gebäude anders einzustufen.

- Nach Eingabe zusätzlicher Kommentare, die auf der Plakette erscheinen sollen, können die Plaketten mit dem Beurteilungsergebnis ausgedruckt und in der Nähe aller Eingänge des Gebäudes angebracht werden.

Die Vorgehensweise bei der detaillierten Inspektion ist ähnlich. Die Unterschiede sind, dass die Ergebnisse der schnellen Inspektion bei dem Beurteilungsprozess auch zugänglich sind und dass die Methode zur detaillierten Inspektion mehr Berechnungskomponenten enthält.

Durch diese Vorgehensweise kann die Beurteilung der Gebäude beschleunigt und die Verlässlichkeit der Ergebnisse erhöht werden. Durch die Unterstützung des Systems wird es auch möglich, Kräfte für die Evaluierung von Gebäuden einzusetzen, die nicht ganz so viel Erfahrung in Beurteilung seismisch induzierter Schäden haben. Durch die Nutzung des Experten- und Informationssystems im Vorfeld, bei der Ausbildung und Schulung dieser Kräfte, können sie für ein Teil der Evaluierungsarbeiten eingeteilt werden.

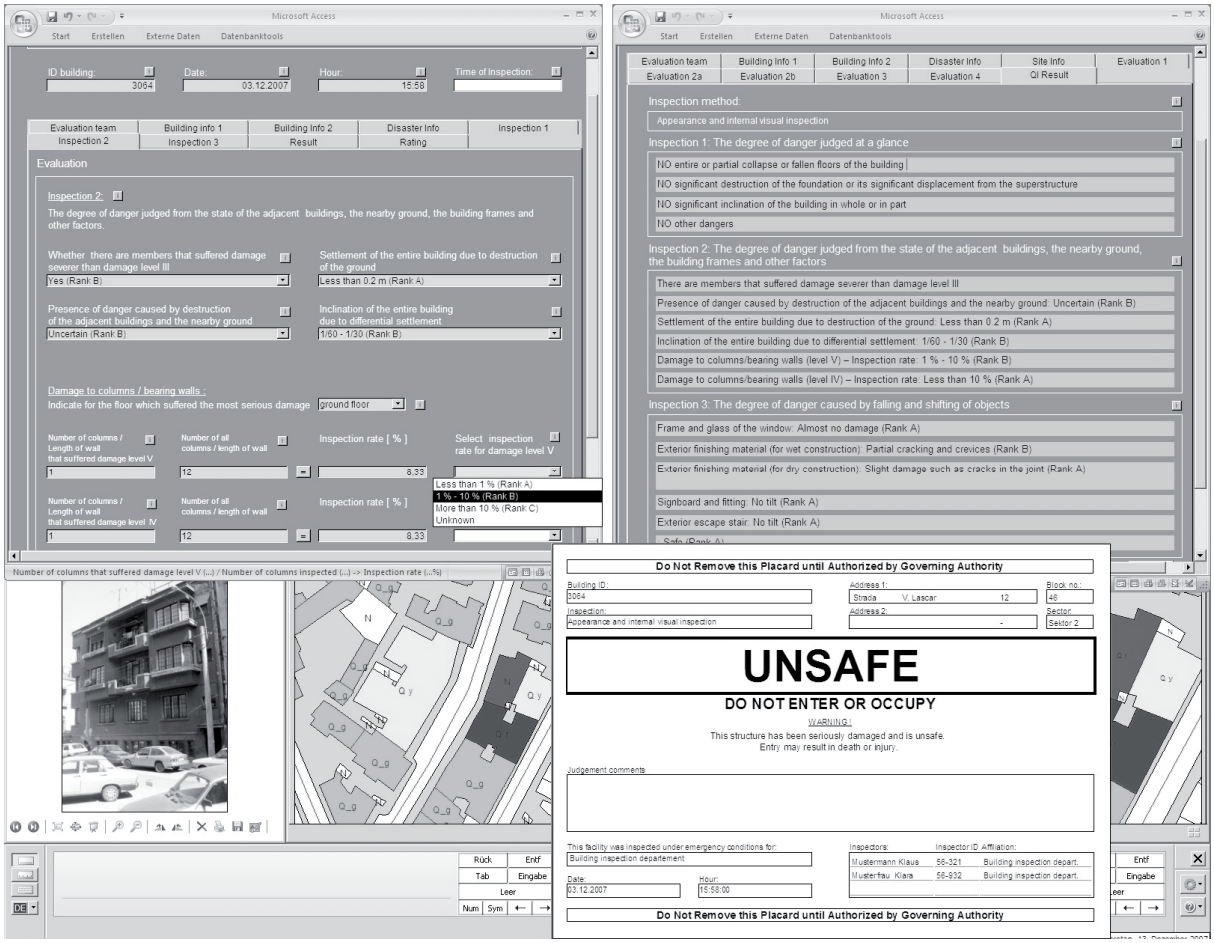


Abbildung 5: Eingabeoberfläche des Experten- und Informationssystems für die Gebäudezustandsevaluierung.

Wenn die Beurteilung eines Gebäudes abgeschlossen ist, werden die Ergebnisse an das DMT übermittelt. So ist der Stand der Arbeiten jederzeit dem Katastrophenstab und auch den anderen Teams ersichtlich. Das bietet außer der Möglichkeit die

Arbeiten ständig zu überwachen und evtl. einzugreifen um Änderungen vorzunehmen, auch die Möglichkeit nachfolgenden Handlungsbedarf, wie z.B. notwendige Evakuierungen zu erkennen.

Zum Schluss sollte bemerkt werden, dass solche Systeme im Ernstfall nur dass sinnvoll eingesetzt werden können, wenn die Nutzer vertraut mit ihnen sind. Das heißt es ist essenziell, dieses System so oft wie möglich anzuwenden, wenigstens bei der Schulung der Inspektoren und bei Katastrophenschutzübungen.

Das Experten- and Informationssystem wurde auf der Abschlusskonferenz des Sonderforschungsbereichs in Bukarest im Oktober 2007 einigen Experten vorgeführt, die den Nutzen des Systems bestätigten.

Mehr Details können der Veröffentlichung „Schweier, C. & Markus, M.: Operation Support and Training by Expert and Information Systems for technical SAR Measures and Buildings' State Evaluation" entnommen werden, die bei der Zeitschrift „Natural Hazards and Earth System Sciences" eingereicht wurde und voraussichtlich in der ersten Hälfte des Jahres 2008 erscheinen wird.

5.2.1.2.5 Beitrag zum Disaster Management-Tool

Die Anbindung an das Disaster Management Tool erfolgt, wie in den vorangegangenen Abschnitten bereits beschrieben, durch Zugriff auf die Datenbank und durch Generieren und Weitergeben von Meldungen. Dafür wurden in dem Antragszeitraum die Datenbankstruktur und der xml-Meldungsstandard im Wesentlichen durch die Teilprojekte C3 und C6 erstellt. Von C7 wurden die projektspezifischen Anforderungen definiert und in die Entwicklung eingebracht.

5.2.1.2.6 Weitere Technologien für den Rettungseinsatz

Zusätzlich zu der Erprobung des Experten- und Informationssystems wurde auf der Übung ATLAS 2007 auch ein Messdummy eingesetzt, um die Belastungen, die sich während der und durch die Rettungsarbeiten ergeben, zu verfolgen (siehe Abbildung 6). Durch Drucksensoren wurden die Belastungen auf Kopf, Rumpf und Gliedmaße ermittelt und durch speziell entwickelte Staubsammler mit optischen Sensoren die Belastung durch Staub und feinkörniges Material, das zu Ersticken führen kann. Die Daten wurden während der ganzen Übung aus der mit dem Dummy mit Kabel verbundenen Technikbox per Funk übertragen und mit einem Rechner aufgezeichnet. Während der Übung wurden keine erhöhten Belastungen gemessen, die Eignung für solche Messungen stellte der Dummy aber unter Beweis.

Abbildung 6: „Rettung“ des Dummies (links) Dummy mit Technikbox (rechts).

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Im Bereich Einsatzunterstützung wurde in der Universität Paderborn an dem Forschungsprojekt SAFeR gearbeitet (Finger et al. 2005), bei dem ein mobiles Informationssystem für Feuerwehren entwickelt wird, mit dem im Einsatz Taktik-Hinweise zu Gefahren und Vorgehensweisen, Sondereinsatzmittel und technischen Informationen bereitgestellt werden. Es handelt sich dabei aber um eine allein stehende Anwendung, die nicht in ein übergreifendes System wie das DMT eingebunden ist.

Eine vergleichbare Anwendung für die Beurteilung der Gebäudezustände wie im SFB entwickelt, ist unseres Wissens nach während der letzten Antragsphase außerhalb des SFBs nicht entwickelt worden. Es gab allerdings einige Neuerungen von der Applied Technology Council. Ihre Anwendung für mobile Plattformen für die Beurteilung der Gebäudezustände, die bereits zur Anfang der Antragsphase vorhanden war, ist technisch weiterentwickelt worden. Außerdem wurde von der ATC zu diesem Themengebiet eine zweite und erweiterte Ausgabe des Field Manuals veröffentlicht mit dem Titel ATC 20-1: Postearthquake Safety Evaluation of Buildings.

Auf der „100th Anniversary Earthquake Conference“ in San Francisco, 2006 wurde das Thema der Gebäudezustandsevaluierung auch behandelt. Dabei wurden auch die Möglichkeiten von IT-Werkzeugen in diesem Bereich diskutiert und ihre wachsende Rolle bestätigt. Das dort in den Diskussionen vorgestellte Konzept eines Expertensystems für Gebäudezustandsevaluierung im Rahmen des Disaster Management Tools wurde mehrheitlich als sinnvolle Entwicklung angesehen.

Zum Ende des Sonderforschungsbereichs wurde das Experten- and Informationssystem für die Gebäudezustandsevaluierung auf der Abschlusskonferenz des Sonderforschungsbereichs in Bukarest im Oktober 2007 einigen Experten vorgeführt, die den Nutzen des Systems bestätigten.

5.2.1.4 Offene Fragen

Das Experten- und Informationssystem für Rettungsarbeiten wurde von allen auf der Übung beteiligten als sehr sinnvolle Unterstützung eingestuft. Da Rettungskräfte immer häufiger sehr komplexe Aufgaben durchzuführen haben, die ein hohes Maß an Kompetenz erfordern, wie z.B. Ausbreitung von giftigen Substanzen in der Luft, Bewältigung von Flutkatastrophen, Befreien von Personen aus modernen Fahrzeugen mit Airbags und verstärkter Karosserie, könnte das System auf diese Bereiche ausgedehnt werden, um während eines Einsatzes schnell und gezielt die benötigten Informationen zu erhalten.

Das Experten- und Informationssystem für die Gebäudezustandsevaluierung ist in seiner jetzigen Form eine Machbarkeitsstudie, ein Prototyp mit den wichtigsten Kernfunktionalitäten aber kein marktreifes Produkt. In Diskussionen mit Experten hat sich allerdings herausgestellt, dass es ein großes Interesse an einem voll ausgereiften und funktionsfähigen System bestehen würde. Besonders interessant wäre natürlich die Weiterentwicklung im Rahmen des DMTs, aber auch eine eigenständige Realisierung wäre denkbar. Darüber hinaus hat sich im Laufe der Arbeiten gezeigt, dass ein Schadensbeurteilungskatalog wie im Kapitel 5.2.1.2.4 beschrieben eine sinnvolle Ergänzung zum Experten- und Informationssystem darstellen würde.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt C7 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Applied Technology Council (ATC) (Hrsg.) (1989): Procedures for postearthquake safety evaluation of buildings, ATC 20. Redwood City, California, USA.

Applied Technology Council (ATC) (Hrsg.) (1995): Addendum to the ATC 20 postearthquake building safety evaluation procedures, ATC 20-2. Redwood City, California, USA.

Applied Technology Council (ATC) (Hrsg.) (2003): Mobile postearthquake building safety evaluation data acquisition system (Version 1.0), User Manual, ATC 20i. Redwood City, California, USA.

Baumeister J. (2004): Agile Development of Diagnostic Knowledge Systems. DISKI 284, Amsterdam, the Netherlands: IOS Press.

Bishop, J. (1999) Rapid Study Report on the International Search and Rescue Response to the Izmit Earthquake, Turkey, August 1999. In: Meeting of International Search and Rescue Team Leaders on lessons learnt and follow up to the 1999 Turkey and Taiwan earthquakes, Neuhausen, Germany, 9-12 December 1999. Appendix 1. Geneva: United Nations Publication.

Coburn, A., R. Spence (2002): Earthquake Protection. Second Edition. Chichester, England: John Wiley & Sons.

Comfort, L. (2002): Information Technology and efficiency in disaster response: The Bhuj, Gujarat Earthquake of 26 January 2001. Proceedings of the International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction. Bucharest, Romania.

Crainic, L., Bălan, C., Popescu, A.-M., Stan F. (1999): Manual privind investigarea de urgenta post-seism si stabilirea solutiilor cadru de interventie imediata pentru punerea in siguranta provizorie a constructiilor avariate, Buletinul Constructiilor Vol.2, Institutul de proiectare, cercetare si tehnica de calcul in constructii, Bucuresti, Romania (unpublished).

Finger, M.; Lee, B.-S.; Harnasch, R. (2005) Hilfe für Feuerwehr – Integrierte Kommunikationssysteme im Forschungsprojekt SAFeR. In: Gefährliche Ladung, Ausgabe 1/2005, S. 28-30, K.O. Storck & Co. Verlag und Druckerei GmbH, Hamburg

INSARAG (Hrsg.) (2003): INSARAG Algeria earthquake lessons learnt meeting. Chairman summary, 9.-10.09.2003 in Geneva, Switzerland. Geneva: United Nations Publication.

Jónsson, S., V. Hildibrandsdóttir, J.A. Reynisson, B.M. Sveinsson, R. Sigbjörnsson (2002) Application of GIS in on-line assessment and analysis of earthquake-induced damage. 12th European Conference on Earthquake Engineering, September, 2002. Paper ref. 273.

Jung, M. (2006) Entwicklung eines Modells zur Organisation und Durchführung der Zustandsbeurteilung von Gebäuden nach Erdbeben. Diplomarbeit am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Universität Karlsruhe (TH). Unveröffenticht.

Lange, C. (2000) Informationssystem für gefährliche Stoffe und Güter, Vorstellung der Gefahrstoff-Datenbank keudel-av. Brandschutz. Deutsche Feuerwehr Zeitung 1: 18 – 22.

Matz, Schillings, Rechenbach (2002) Task Force für die Schnellanalytik bei großen Chemieunfällen und Bränden in Zivilschutzforschung, Bd. 49, Bundesverwaltungsamt, Zentralstelle für Zivilschutz, Bonn.

Osteraas, D. J.; M. L. Shusto, M. B. McDonald (2000) Engineering involvement in post-Northridge damage assessment and repair of wood-frame dwellings. Twelfth World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand. Paper ID 2593.

vfdb Richtlinie 03-01: 2005-03 (2005) Hinweise für Maßnahmen der Feuerwehr und anderer Hilfskräfte nach Gebäudeeinstürzen. Köln: VDS-Verlag.

Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.1.7 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

Schweier, C. and Markus, M. (2006): Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment, Bulletin of Earthquake Engineering, Vol. 4, Nr.2: 177 – 192.

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Gehbauer, F., Markus, M., Engelmann, H., Popa, I., Schweier, C., Rehor, M., Werder, S. (2007): The Disaster Management Tool (DMT) in Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania, S. 421 – 431.

Schweier, C. (2007): Geometry based estimation of trapped victims after earthquakes, in Proceedings of the International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, Oct. 4-6, 2007, Bucharest, Romania, S. 485 – 493.

Schweier, C., Engelmann, H., Gehbauer F., Markus, M., Zikas, T. (2007): Forschungsarbeiten zum Risiko- und Katastrophenmanagement. In: Senitz, S. (Hrsg.): Verständnis, Vorsorge und Bewältigung von Naturkatastrophen. Abschlusssymposium 2007 des Graduiertenkollegs “Naturkatastrophen”, Karlsruhe: Universitätsverlag.

Markus M., Engelmann H., Gehbauer, F., Leebmann J., Schweier C. (2006): The Disaster Management Tool – Concept and application experiences, Proceedings “100th Anniversary Earthquake Conference – Managing Risk in Earthquake Country”. Paper No. 1253, San Francisco, USA.

Schweier C. and Markus M. (2006): Geometry based estimation of casualties and of the demand for search and rescue resources, Proceedings “100th Anniversary Earthquake Conference – Managing Risk in Earthquake Country”, Paper No. 1327, San Francisco, USA.

Markus, M., Fiedrich, F., Gehbauer, F., Engelmann, H., Leebmann, J., Schweier, C., Steinle, E. (2005): The Disaster Management Tool – Concept and First Training Experiences, Proceedings of the Conference “250th Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake”, Lisbon, Portugal.

Schweier, C., Markus, M., Steinle, E., Weidner, U. (2005): Casualty scenarios based on laserscanning data, Proceedings of the Conference “250th Anniversary of 1755 Lisbon Earthquake”, Lisbon, Portugal.

Fiedrich, F., Leebmann, J., Markus, M., Schweier, C. (2004): EQSIM: A New Damage Estimation Tool for Disaster Preparedness and Response. In: Malzahn, D. and Plapp, T. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference “Disasters and Society – From Hazard Assessment to Risk Reduction”. Berlin: Logos.

Markus, M., Fiedrich, F., Leebmann, J., Schweier, C., Steinle, E. (2004): Concept for an Integrated Disaster Management Tool for Disaster Mitigation and Response. In: Malzahn, D. and Plapp, T. (Hrsg.): Proceedings of the International Conference “Disasters and Society – From Hazard Assessment to Risk Reduction”. Berlin: Logos.

Fiedrich, F., Gehbauer F., Leebmann J., Lungu D., Markus M.; Schweier, C. (2002): EQSIM: A new approach to damage estimatio. In: Lungu, D., Wenzel, F., Mouroux, P., Tojo, I. (Eds.): Proceedings of the International Conference “Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction”, Independent Film, Bucuresti, Romania.

c) in Monographien

Gehbauer, F. und Fiedrich, F. (2005): Modelle für ein effizientes Katastrophenmanagement am Beispiel von Erdbeben. In: H. Schelle, H. Reschke, R. Schnopp und A. Schub (Hrsg.): Projekte erfolgreich managen. Köln: TÜV Media GmbH, S. 1 – 58.

5.2.1.8 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

keine

b) auf wesentlichen Fachkongressen

Markus M., Engelmann H., Gehbauer, F., Schweier C., Rehor, M., Werder, S. (2006): Concepts of the Interdisciplinary Disaster Management Tool and Application Experiences, in: Proceedings of the International Disaster Reduction Conference, 27.08.-01.09.2006 Davos, Switzerland, Swiss Federal Research Institute WSL, Birmensdorf and Davos, Switzerland, Vol. 2: 346 – 349.

c) in Monographien

keine

5.2.1.9 Vorträge

Schweier C. und Markus M. (2005): Classification of collapsed buildings for fast damage and loss assessment, EGU General Assembly, Vienna, Austria.

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 07/1999 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	425.906 €	65.702 €		491.608 €
2005	70.800 €	12.500 €		83.300 €
2006	70.800 €	13.700 €		84.500 €
2007	70.800 €	9.100 €		79.900 €
Summe	**638.306**	**101.002 €**		**739.308 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Gehbauer, F., Prof. Dr.	Baubetrieb	TMB	07/1999–12/2007	
	2. Lennerts, K., Prof. Dr.	Facility Management	TMB	2001–12/2007	
	3. Stempniewski, L., Prof. Dr.	Massivbau	IFMB	06/2000–12/2007	
	4. Bähr, H.-P., Prof. Dr.	Photogrammetrie, GIS	IPF	07/1999–12/2007	
	5. Popa, I., Prof. Dr.-Ing.	Baubetrieb	Universitatea Ecologica Bucuresti	07/1999–12/2007	
	6. Schlick, H. Dr.-Ing.	Baubetrieb	TMB	07/1999–12/2007	
	7. Hirschberger S., Dipl.-Ing.	Konstruktiver Ingenieurbau	selbständig	07/1999–12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	8. Hauth, P., techn. Angest.		TMB	07/1999–12/2007	
	9. Binder, W., Werkstattmeister		TMB	2000–12/2007	
	10. Geanta, S., Col.		Zivilschutz RO	2002–01/2005	
	11. Zamfir, C. BG		Inspektorat f. Notfallsituationen, RO	01/2005–12/2007	

Ergänzungsausstattung						
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	11.	Schweier, C., Dipl.-Ing.	Baubetrieb	TMB	05/2002–12/2007	BAT IIa
	12.	Markus, M., Dipl.-Ing.	Baubetrieb	TMB	07/1999–12/2007	BAT IIa[1]
	13.	Kutzarov, N.	3D-Modellierung	TMB	05/2002–09/2007	stud. HK
	14.	Damian, M.	Dolmetschen, 3D-Modellierung	TMB	06/2002–12/2005	stud. HK
	15.	Knoche, K.-H.		TMB	02/2003–03/2005	stud. HK
	16.	Borchers, H., Dipl.-Ing.	Schadenskatalogdatenbank	TMB	01/2004–03/2005	stud. HK
	17.	Scandura, C.	Rettungseinsätzedatenbank	TMB	12/2003–03/2007	stud. HK
	18.	Jribi, A.	Programmierung	TMB	08/2004–03/2006	stud. HK
	19.	Omid, F.	Dummy	TMB	02/2005–10/2006	stud. HK
	20.	Schweier, J.	Rettungseinsätzedatenbank	TMB	05/2005–04/2007	stud. HK
	21.	Petrova, P.	Dolmetschen	TMB	10/2006–10/2007	stud. HK
	22.	Scheungrab, M.	Gebäudezustandsevaluierung	TMB	10/2006–10/2007	stud. HK
	23.	Ehmann, S.	Rettungseinsätzedatenbank	TMB	11/2007–12/2007	stud. HK
	24.	Werling, M.	Recherche Rettungseinsätzedatenbank	TMB	01/2005–03/2005	stud. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter						

[1]Mitarbeit in C3 und C7, Bezahlung aus C3

Teilprojekt C9

Seismische Gefährdung und Empfindlichkeitsbestimmung bestehender Bauwerke bei Erdbeben

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Prof. Dr-Ing. Lothar Stempniewski
Dipl.-Ing. Sascha Schnepf

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt C9

5.1.1 Titel:

Seismische Gefährdung und Empfindlichkeitsbestimmung bestehender Bauwerke bei Erdbeben

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Massivbau

5.1.3 Leiter:

Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Universität Karlsruhe (TH)
Gotthard-Franz-Str. 3
76128 Karlsruhe

Telefon: 0721/608-2263
Telefax: 0721/608-2265
E-Mail: lothar.stempniewski@ifmb.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. Sascha Schnepf

5.1.5 Rumänische Partner:

Prof. Dan Lungu, Technische Universität Bukarest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das in der letzten Phase vorgestellte Makro-Element für die Mauerwerksausfachung wurde modifiziert. Die Notwendigkeit der Modifikationen ergab sich im Anschluss an mehreren Verifikationen an eigenen Versuchen, wobei teilweise erhebliche Differenzen zwischen numerischen und experimentellen Ergebnissen festgestellt wurden. Durch neue Ansätze bei der Ermittlung geometrischer und materieller Parameter waren schließlich sehr gute Ergebnisse erzielt worden.

Damit eine mauerwerksausgefachte Rahmenstruktur ohne Anwendung der FE-Methode berechnet werden kann, wurde ein zusätzliches Makro-Element entwickelt, womit das Tragverhalten der Stahlbetonrahmenbauteile abgebildet werden kann. Hierbei wurde eine Methode angewandt, wonach die grundlegendsten Mechanismen des Gesamttragverhaltens identifiziert und in Teilelemente isoliert wurden. Für die zyklische Berechnung wurden in Anlehnung an die bekannten Takeda-Regeln und Clough-Regeln Hystereseregeln definiert.

Zur bereits oben erwähnten Verifikation der Makro-Elemente wurden drei Versuche an mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen durchgeführt, wobei wahlweise die Mörtelfestigkeit und Betonfestigkeit variiert wurde. Es zeigte sich, dass mit den programmierten Makro-Elementen, trotz der teilweise sehr vereinfachten Ansätze, sehr gute Ergebnisse erzielt werden konnten. Um die Tauglichkeit der numerischen Modelle sowie die Übertragbarkeit auf mehrstöckige, mehrfeldrige Strukturen zu belegen und damit die Realisierung der Forderung nach einer schnellen und sehr guten Repräsentation des globalen Tragverhalten ganzer Gebäudestrukturen zu zeigen, wurde an zwei siebenstöckigen, vierfeldrigen Strukturen eine Push-over Analyse durchgeführt. Unter Ansatz dieser Ergebnisse wurde anschließend an einer der beiden Strukturen eine Kapazitäts-Spektrum-Methode (KSM) durchgeführt. In Kombination mit Fragilitätskurven konnte anschließend eine Schadensprognose der zu Grunde gelegten Struktur durchgeführt werden.

Des Weiteren wurden Fragilitätskurven für Bauwerke mit weichen Stockwerken berechnet. Hierfür kam das FE-Programm ETABS zu Anwendung, womit mehrer Gebäude unterschiedlicher Grundrissform und Stockwerksanzahl modelliert und durch eine Zeitverlaufsberechnung berechnet worden. In Anlehnung an die maximale Stockwerksverschiebung wurden die Schäden der jeweiligen Gebäude in Schadensklassen eingeteilt, worauf schließlich unter Ansatz probabilistischer Regeln Fragilitätskurven formuliert werden konnten.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Mit Abschluss der vorherigen Phase III konnte ein Makro-Element vorgestellt werden, womit das Tragverhalten der Mauerwerksausfachung repräsentiert wird. Verifikationen an einzelnen mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen, welche innerhalb des TP C2 getestet wurden, belegten die Tauglichkeit hinsichtlich der Abbildung des zyklischen Tragverhaltens von Mauerwerksausfachungen. Des Weiteren wurden auf Basis dokumentierter Schäden an 39 Gebäuden, welche sich allesamt im Testgebiet von Bukarest befanden, Fragilitätskurven präsentiert. In Kombination mit einer vorangegangenen Push-over Analyse an einer sechsstöckigen Gebäudestruktur konnte anschließend durch Anwendung der Kapazitäts-Spektrum-Methode eine Schadensevaluation für die zu Grunde gelegte Gebäudestruktur durchgeführt werden. Es ist hierbei zu erwähnen, dass die Struktur nicht mit dem entwickelten Makro-Element modelliert wurde, insofern hierfür die Modellierung der Rahmenbauteile mit der klassischen FE-Methode erforderlich gewesen wäre. Aus Gründen der Effizienz bediente man sich deshalb des FE-Programms DRAIN 2DX, womit die Tragstrukturen durch Stabelemente ersetzt wurden.

Aus diesem Grund sollte in der aktuellen Phase ein Makro-Element für die Rahmenbauteile entwickelt werden, so dass in Kombination mit dem Makro-Element für die Mauerwerksausfachung das geforderte Ziel einer schnellen Beurteilung der Tragverhaltens ganzer Gebäudestrukturen erreicht wird. Des Weiteren wurden zusätzliche Versuche an mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen notwendig, womit die Verifikation der beiden Makro-Elemente, sowie. deren Interaktion miteinander, durchgeführt werden kann.

Die Tauglichkeit sowie die Übertragbarkeit auf ganze Gebäudestrukturen sollte anschließend durch eine Schadensbeurteilung an mehrstöckigen, mehrfeldrigen Strukturen belegt werden. Hierfür kam die Kapazitäts-Spektrum-Methode in Kombination mit Fragilitätskurven zum Einsatz.

Weiterhin sollten zusätzliche Fragilitätskurven für Gebäude mit weichen Stockwerken erstellt werden. Infolge der ansteigenden Kommerzialisierung und der daraus vermehrt anzutreffenden Ladengeschäfte, die durch notwendige bauliche Maßnahmen in der Regel ein weiches Geschoss darstellen, wird dieser Gebäudetyp in Zukunft mit die größte Aufmerksamkeit bei der Erdbebensicherheit einnehmen.

5.2.1.2 Modifizierungen des Makro-Elements für die Mauerwerksausfachung

In der vergangenen Phase wurde ein Makro-Element vorgestellt, womit das Tragverhalten von Mauerwerksausfachungen abgebildet werden kann. In der aktuellen Phase haben allerdings mehrere Verifikationen an eigenen Versuchen ergeben, dass mehrere Modifikationen erforderlich waren, womit schließlich die experimentellen Ergebnisse deutlich besser repräsentiert werden konnten.

Grundsätzlich wird das Tragverhalten der Mauerwerksausfachung durch zwei diagonale Druckfedern abgebildet. Dies liegt im Tragverhalten mauerwerksausgefachter Stahlbetonrahmen unter horizontaler Belastung begründet. Wie Abbildung 1a) darstellt, wird sich eine Verformungsfigur ergeben, bei der sich zwischen Rahmen und Ausfachung in der oberen lastzugewandten Ecke und der diagonal darunter liegenden Ecke Kontaktflächen einstellen, über diese die eingeleitete Horizontallast im Mauerwerk weitergeleitet wird.

Eine der ersten Studien hinsichtlich des Tragverhaltens von mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen führte Polyakov (wie erwähnt u.a. in (Mallick 1968) und in (Seah 1998)) durch. In Anlehnung der gewonnenen Erkenntnisse empfahl er, die Ausfachung durch eine äquivalente Diagonalstrebe zu ersetzen. Dieser Empfehlung nahmen sich in der Folgezeit viele Wissenschaftler an (Saneinejad 1995), (Zarnic 1994), (Zarnic 1998), wodurch sich das Konzept der "äquivalenten Strebe" heute als eine effektive und effiziente Möglichkeit zur Beschreibung des Tragverhaltens der Ausfachungswand etabliert hat.

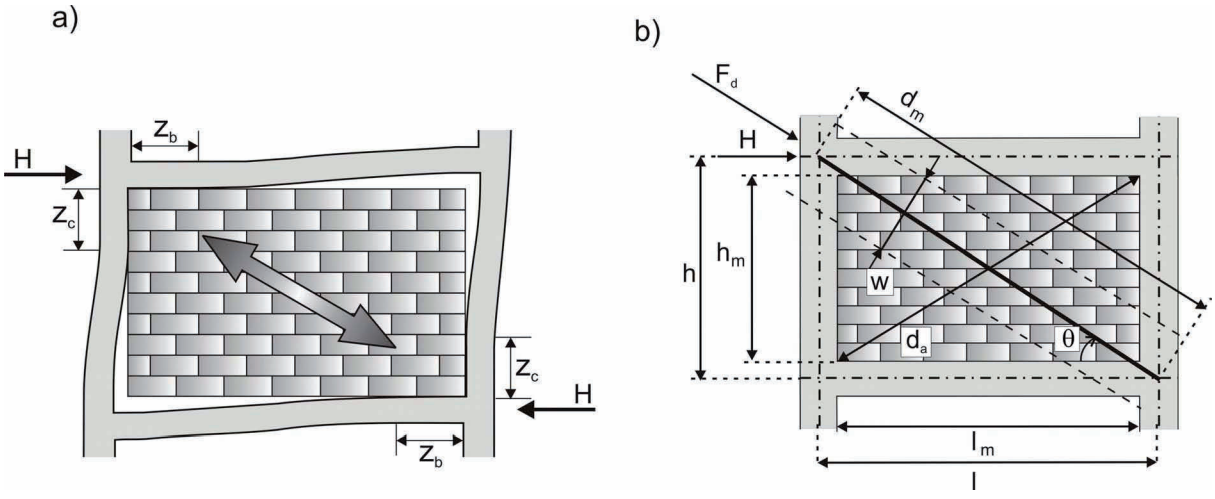


Abbildung 1:Prinzip der äquivalenten Diagonalstrebe sowie alle erforderlichen Parameter

In Abbildung 1b) ist die Diagonalstrebe mit allen erforderlichen materiellen und geometrischen Parametern dargestellt. Eine erste Modifikation des in der vorherigen Phase vorgestellten Makro-Elements wurde bei der Ermittlung der Druckstrebenbreite w durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass mit der Methode von

Mainstone (Mainstone 1971) die experimentellen Ergebnisse nicht korrekt wieder gegeben wurden. Aus diesem Grund wurde ein Ansatz von Decanini und Fantin (wie erwähnt in (Crisafulli 1997), (Crisafulli 2000)) eingeführt, die eine der wenigen Autoren waren, welche die Druckstrebenbreit w in Abhängigkeit eines ungerissenen (Gleichung 1) und gerissenen Zustandes (Gleichung 2) definierten.

$$w = \left(\frac{0{,}748}{\lambda \cdot h_m} + 0{,}085 \right) \cdot d_m \qquad \lambda \le 7{,}85$$
$$w = \left(\frac{0{,}393}{\lambda \cdot h_m} + 0{,}130 \right) \cdot d_m \qquad \lambda > 7{,}85 \qquad (1)$$

$$w = \left(\frac{0{,}707}{\lambda \cdot h_m} + 0{,}010 \right) \cdot d_m \qquad \lambda \le 7{,}85$$
$$w = \left(\frac{0{,}470}{\lambda \cdot h_m} + 0{,}040 \right) \cdot d_m \qquad \lambda > 7{,}85 \qquad (2)$$

Mit λ geht der dimensionslose Parameter nach Stafford Smith und Carter (Stafford Smith 1969) in die Gleichung ein, womit die relative Steifigkeit zwischen Rahmen und Mauerwerk berücksichtigt wird.

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{E_m \cdot t \cdot \sin(2\theta)}{4 \cdot EI \cdot h_m}} \qquad (3)$$

Hierbei entspricht E_m und t dem E-Modul bzw. der Dicke des Mauerwerks. Die Höhe der Mauerwerksausfachung wird mit dem Parameter h_m berücksichtigt. Die Biegesteifigkeit der Stütze geht über EI in die Gleichung (3) ein.

Eine weitere Modifikation wurde bei der Ermittlung der Druckfestigkeit F_d der Diagonalstrebe durchgeführt, welche weiterhin entsprechend der Gleichung (4) über das Produkt der Querschnittsfläche der Druckstrebe und einer fiktiven Mauerwerksdruckspannung f_d^* ermittelt wird.

$$F_d = w \cdot t \cdot f_d^* \qquad (4)$$

Der Formulierung der fiktiven Mauerwerksdruckspannung liegen allerdings nun nicht mehr die Schadenskriterien von Mann/Müller (Mann 1985) zu Grunde, die bei einem Mauerwerk unter vertikaler und horizontaler Belastung annahmen, dass in den Stoßfugen des Mauerwerks keine Schubübertragung statt findet und deshalb einen stufenförmigen Normalspannungsverlauf am Einzelstein ansetzten.

Crisafulli (Crisafulli 1997) veränderte den stufenförmigen Verlauf durch einen linearen Verlauf und formulierte in Anlehnung daran die Versagenskriterien von Mann/Müller um (Gleichung (5)-(8)).

Versagen der Lagerfuge durch Reibung : $$\tau = \beta_{Hs}^{*} + \mu^{*} \cdot \left(\sigma_x - 1{,}5 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \tau \right) \qquad (5)$$

In Gleichung (5) ist β_{Hs}^{*} die reduzierte Haftscherfestigkeit und μ^{*} der reduzierte Reibungsbeiwert.

$$\beta_{Hs}^{*} = \frac{\beta_{Hs}}{1 + \mu \cdot 1{,}5 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y}}; \quad \mu^{*} = \frac{\mu}{1 + \mu \cdot 1{,}5 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y}} \qquad (6)$$

Mit den Parametern Δx und Δy wird die Höhe bzw. die Breite des Mauersteins berücksichtigt.

Versagen des Mauerwerks auf Druck : $$\tau = \left(\beta_{D,Mw} - \sigma_x \right) \cdot \frac{\Delta y}{1{,}5 \cdot \Delta x} \qquad (7)$$

Versagen durch Reißen der Steine : $$\tau = \frac{\beta_{Z,St}}{2{,}0} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_x}{\beta_{Z,St}}} \qquad (8)$$

In einem weiteren Schritt wurde das Versagenskriterium für „Reißen der Steine“ in einen linearen Ausdruck umgewandelt.

Versagen durch Reißen der Steine : $$\tau = \frac{\beta_{Z,St}}{2{,}0} \cdot \left(1 + \frac{\sigma_x}{4 \cdot \beta_{Z,St}} \right) \qquad (9)$$

Mit $\beta_{D,Mw}$ und $\beta_{Z,St}$ wird die Druckfestigkeit des Mauerwerks bzw. die Zugfestigkeit des Mauersteins berücksichtigt. Unter Ansatz der Transformationsgleichungen (10) sowie der Tatsache, dass der Verlauf der Hauptdruckspannungen σ_1 identische mit dem Verlauf der Diagonalstrebe übereinstimmt, kann die Hauptdruckspannung durch die fiktive Mauerwerksdruckspannung f_d^{*} ersetzt, in die Versagenskriterien (5),(7) und (9) eingesetzt und nach f_d^{*} umformuliert werden.

$$\sigma_x = \sigma_1 \cdot \sin^2 \theta; \qquad \tau = \sigma_1 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \qquad (10)$$

Versagen der Lagerfuge durch Reibung : $$f_d^{*} = \frac{\beta_{Hs}^{*}}{\sin\theta \cdot \left(\cos\theta - \mu^{*} \cdot \sin\theta \right)} \qquad (11)$$

Versagen des Mauerwerks auf Druck : $$f_d^* = \frac{\beta_{D,Mw}}{\sin\theta \cdot \left(\cos\theta \cdot 1{,}5 \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} + \sin\theta \right)} \qquad (12)$$

Versagen durch Reißen der Steine : $$f_d^* = \frac{\beta_{Z,St}}{2{,}0 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta - \frac{\sin^2\theta}{4}} \qquad (13)$$

Nachdem die geometrische und materielle Definition der Druckstrebe modifiziert wurde, zeigten sich infolge der Nachrechnung der eigenen Versuche weitere notwendige Modifikationen bei der Definition der Erstbelastungs- sowie der Entlastungskurve. Es muss hierbei erwähnt werden, dass die folgenden hysteretischen Kurven in Form von fiktiven Spannungs-Dehnungs-Kurven und nicht in Form von Kraft-Verformungs-Kurven dargestellt werden. Die Überführung der fiktiven Spannungs-Dehnungs-Kurven auf die erforderlichen Kraft-Verformungs-Kurven erfolgt durch die beiden Gleichungen (14), womit die axiale Kraft F_d und Verformung Δ der Druckstrebe in Anlehnung an eine fiktive Spannung σ^* und fiktive Dehnung ε^* transformiert wird.

$$F_d = w \cdot t \cdot \sigma^*; \qquad \Delta = \varepsilon^* \cdot d_a \qquad (14)$$

Die Erstbelastungskurve wurde dabei komplett neu definiert, wobei sich diese als Kombination zweier Ansätze definiert. Bis zum Erreichen der maximalen Spannung wurde ein Ansatz von Reinhorn und Madan (Reinhorn 1995), (Madan 1997) angesetzt (Gleichung 15), die das Verhalten der Erstbelastungskurve von der Anfangssteifigkeit E_{m0} und dem Sekantenmodul E_{sec} zwischen Nullpunkt und maximaler Spannung f_d^* definierten. Nach Überschreiten der maximalen Spannung wurde ein Ansatz von Crisafulli angesetz. (Gleichung 16).

$$\sigma^* = \frac{f_d^* \cdot \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_c} \cdot r}{r - 1 + \left(\frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_c} \right)^r}; \quad r = \frac{E_{m0}}{E_{m0} - E_{sec}} \qquad (15)$$

$$\sigma^* = f_d^* \cdot \left[1 - \left(\frac{\varepsilon^* - \varepsilon_c}{\varepsilon_u - \varepsilon_c} \right)^2 \right] \qquad (16)$$

In Abbildung 2 ist sowohl die Ent- als auch die Wiederbelastungskurve abgebildet. Im Vergleich zu den Kurven, wie sie zu Ende der letzten Phase vorgestellt wurden haben sich hier nur kleine Änderungen ergeben. So wurde die Berechnung der plastischen Dehnung ε_{pl} (Gleichung 17), welche ursprünglich auf die Arbeit von Mander und seinen Mitautoren (Mander 1988) zurück geht und später von Crisafulli (Crisafulli 1997) durch einen konstanten empirischen Faktor β_k erweitert wurde,

derart modifiziert, indem für β_k Gleichungsausdruck 17 entwickelt wurde, womit sehr viel bessere Ergebnisse erzielt werden konnten. Für die Steigung bei Entlastungsende E_{pl} wurde ein neuer Ausdruck 18 formuliert, womit der Einfluss der Dehnung bei Entlastungsbeginn ε_{ent} berücksichtigt werden kann, insofern mit größerer Dehnung ε_{ent} die Steigung E_{pl} kleiner wird.

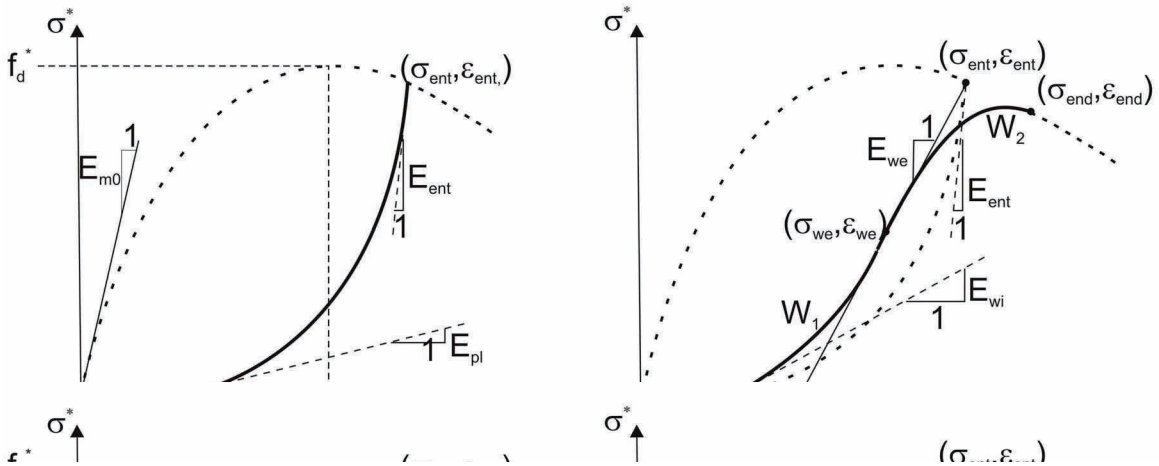


Abbildung 2: Verlauf der Entlastungskurve a) und Wiederbelastungskurve b)

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{ent} \cdot \frac{\left(\varepsilon_{ent} - \frac{\beta_k \cdot f_d^*}{E_{m0}}\right) \cdot \sigma_{ent}}{\sigma_{ent} - \beta_k \cdot f_d^*} \quad \text{mit} \quad \beta_k = \frac{0{,}6}{\varepsilon_c} \cdot \varepsilon_{ent} + 0{,}05 \qquad (17)$$

$$E_{ent} = \gamma_{ent} \cdot E_{m0}; \qquad E_{pl} = \gamma_{pl} \cdot E_{m0} \Big/ \left(1 + \frac{\varepsilon_{ent}}{\varepsilon_c}\right)^{e_1} \qquad (18)$$

Die Gleichungen 17 und 18 wurden zur Abbildung der Entlastungskurve angesetzt. Die empirischen Parameter γ_{ent}, γ_{pl} und e_1 wurden eingeführt, um die numerischen Ergebnisse besser an die experimentellen Ergebnisse anzugleichen. Für die Repräsentation der Wiederbelastungskurve wurden die folgenden Gleichung 19 bis 22 eingeführt. Auch hier sind wieder zwei empirische Parameter α_d, α_{end} eingeführt worden, womit gleichfalls das Ziel der besseren Anpassung von numerischen und experimentellen Resultaten verfolgt wurde.

$$\sigma_{we} = \beta_{we} \cdot \sigma_{end} \quad mit \quad 0{,}5 \le \beta_{we} = \frac{\varepsilon_u^2}{\varepsilon_c} \cdot \varepsilon_{ent} \le 0{,}9 \qquad (19)$$

$$\varepsilon_{we} = \varepsilon_d \cdot \frac{\sigma_{we}}{E_{we}} \quad mit \quad \varepsilon_d = \varepsilon_{pl} + \alpha_d \cdot \left(\varepsilon_{ent} - \frac{\sigma_{ent}}{E_{ent}} - \varepsilon_{pl}\right) \qquad (20)$$

$$E_{we} = \frac{\sigma_{ent}}{\varepsilon_{ent} - \varepsilon_d}; \qquad E_{wi} = 1{,}2 \cdot E_{pl} \qquad (21)$$

$$\varepsilon_{end} = \varepsilon_{ent} + \alpha_{end}\left(\varepsilon_{ent} - \varepsilon_{pl}\right) \qquad (22)$$

5.2.1.3 Makro-Element für Stahlbetonrahmenbauteile

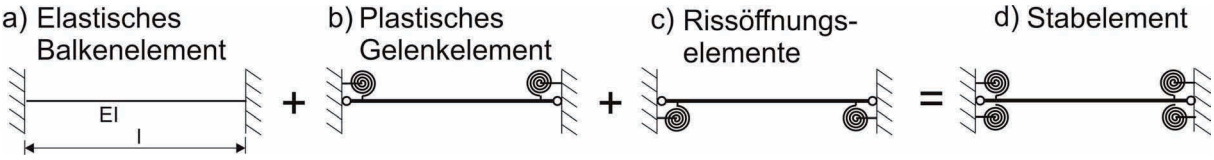


Abbildung 3: Aufbau des Makro-Elements für Stahlbetonrahmenbauteile

Für die Darstellung des zyklischen Tragverhaltens von Stahlbetonrahmen unter horizontaler Belastung mit Hilfe eines Makro-Elements wurde eine Methode angewandt, wonach die grundlegenden Mechanismen des Gesamttragverhaltens identifiziert und in Teilelemente isoliert wurden (Filippou 1992), (Keshavarzian 1994). Es hat sich gezeigt, dass mit einem elastischen Balkenelement, plastischen Gelenkelement sowie mit einem Rissöffnungselement das Tragverhalten sehr gut repräsentiert werden kann. Dabei sind alle drei Teilelemente in Reihe geschaltet, so dass sich das Gesamttragverhalten des zu Grunde gelegten Stahlbetonrahmenbauteils durch Addition der einzelnen Traganteile ergibt (Abbildung 3).

Das Tragverhalten der einzelnen Teilelemente wird dabei über die Momenten-Rotations-Beziehung dargestellt und durch Flexibilitätsmatrizen beschrieben (Abbildung 5). Im Folgenden werden die Teilelemente etwas näher vorgestellt.

Das elastische Balkenelement

Mit dem elastischen Balkenelement wird das Verhalten des Stahlbetonrahmenbauteils vor Eintritt erster Risse abgebildet. Seine Länge l entspricht der Riegel- bzw. Stützenlänge und mit EI wird die Biegesteifigkeit berücksichtigt.

Das plastische Gelenkelement

Mit dem plastischen Gelenkelement werden die plastischen Traganteile des Gesamtragverhaltens berücksichtigt. Dieses Teilelement besteht aus zwei nichtlinearen Rotationsfedern am Ende des Bauteils, die durch einem unendlich steifen Balken miteinander verbunden sind (Abbildung 5b). Man geht somit vereinfacht davon aus, dass sämtlich nichtlineare Verformungen am Ende des Stahlbetonbauteils konzentriert sind (Giberson 1969). Durch den unendlich steifen Balken sind die beiden Rotationsfedern voneinander entkoppelt, so dass sich die Flexibilitätsmatrix durch eine Diagonalmatrix darstellen lässt (Abbildung 5b). Das Last-Verformungs-Verhalten der beiden nichtlinearen Rotationsfedern gehorchen einer bilineare Momenten-Rotations-Beziehung und werden erst nach Überschreiten des Rissmomentes M_{cr} aktiv (Abbildung 5b). Die Steigungen der linearen Abschnitte werden über die Flexibilitätskoeffizienten f_i bzw. f_j definiert, die nun derart formuliert werden, dass nach Überlagerung mit dem Traganteil aus elastischem Balkenelement

die dreilineare Momenten-Rotations-Beziehung des zu Grunde gelegten Rahmenbauteils resultiert (Abbildung 5d) (hellgraue Kurve).

Bei der Formulierung der Momenten-Rotations-Beziehung des zu Grunde gelegten Rahmenbauteils liegt die vereinfachte Annahme einer antimetrischen Momentenverteilung über die Bauteillänge zu Grunde (Abbildung 4). Dies bringt den Vorteil, dass sich die Momenten-Rotations-Beziehung an einem Kragarm der halben Bauteillänge mit angreifender Vertikallast P am abliegenden Ende berechnen lässt. Hierfür wird die Last P solange erhöht, bis sich an der Einspannung nacheinander das Rissmoment M_{cr}, das Fleißmoment M_y und das Bruchmoment M_u einstellen. Zu diesen drei Zuständen werden dann die Momenten- und Krümmungsverläufe über die Kragarmlänge aufgetragen. Die hierfür erforderlichen Stoffgesetzte für Beton und Stahl, sowie die sich daraus ergebende vereinfachte Momenten-Krümmungs-Kurve sind in Abbildung 4b) dargestellt. Durch die Integration der Krümmungen über die Kragarmlänge lassen sich schließlich die Rissrotation θ_{cr}, Fließrotation θ_y und die Bruchrotation θ_u berechnen (Gleichung 23 und 24).

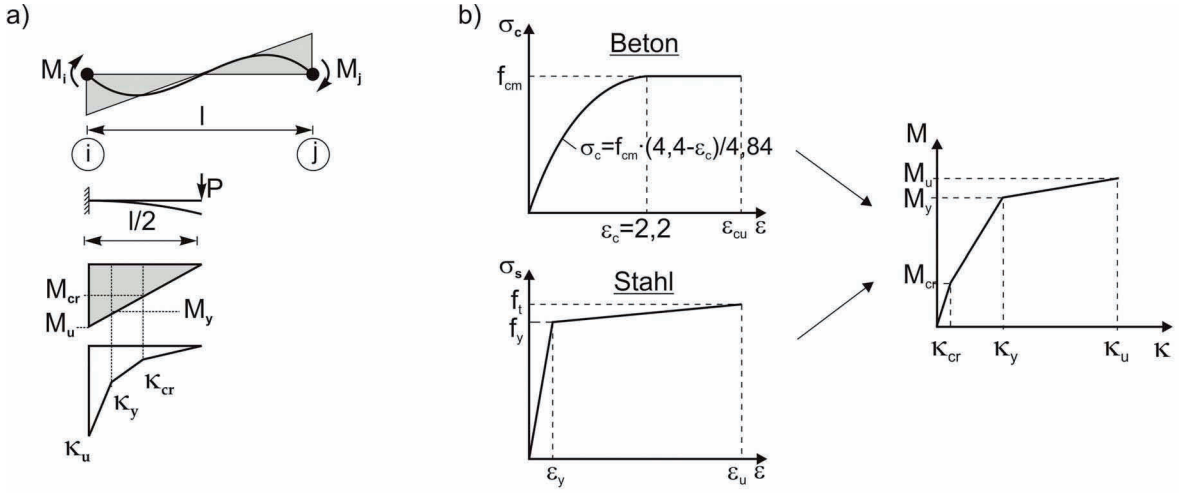


Abbildung 4: Antimetrische Momentenverteilung über Bauteillänge a) sowie Stoffgesetzte und die daraus resultierende Momenten-Krümmungs-Kurve b)

$$\theta_{cr} = \frac{1}{4}\cdot\kappa_{cr}\cdot l\,; \qquad \theta_y = \frac{1}{4}\cdot l\cdot\left[\kappa_{cr}+\kappa_y\cdot\left(1-\left(\frac{M_{cr}}{M_y}\right)^2\right)\right] \tag{23}$$

$$\theta_u = \frac{1}{4}\cdot l\cdot\left[\kappa_{cr}\cdot\frac{M_{cr}}{M_y}+\kappa_y\cdot\left(1-\frac{M_{cr}}{M_y}\right)+\kappa_u\cdot\left(1-\frac{M_y}{M_u}\right)\right] \tag{24}$$

Unter Berücksichtigung der oben formulierten Gleichungen für die Rotation entsprechend der drei Schadenszustände können nun die Flexibilitätskoeffizienten f_i bzw. f_j berechnet werden.

Das Rissöffnungselement

Es wurde zudem ein Rissöffnungselement eingeführt, womit die zusätzlichen Rotationen infolge der Stahldehnungen in dem Kontaktbereich zwischen Riegel und Stütze berücksichtigt werden können. Für die Ermittlung der zusätzlichen Rotationen geht man vereinfacht davon aus, dass die Kontaktspannung τ konstant über die Verbundlänge l_b verteilt ist und die Stahlspannung σ_s linear, mit maximaler Amplitude am Rissufer, ansteigt. Unter Ansatz dieser vereinfachten Annahmen können Gleichungen aufgestellt werden, womit die zusätzlichen Rotationen in Abhängigkeit davon, ob der Stahl noch nicht im Fließzustand ist ($M<M_y$) (Gleichung 25) oder bereits den Fließzustand überschritten hat ($M>M_y$) (Gleichung 26), definiert sind.

$$\theta_s = \frac{1}{8} \cdot \frac{d_s}{E_s \cdot \tau} \cdot \frac{\sigma_s}{h - d_1 - d_2} \cdot \left(\frac{M}{M_y} \right)^2 \qquad (25)$$

$$\theta_s = \frac{d_s \cdot f_y^2}{8 \cdot \tau \cdot (h - d_1 - d_2)} \cdot \left(\frac{1}{E_s} \cdot \left(\frac{2 \cdot M}{M_y} - 1 \right) + \frac{1}{E_y} \cdot \left(\left(\frac{M}{M_y} \right)^2 - 1 \right) \right) \qquad (26)$$

Das Rissöffnungselement besteht aus zwei nichtlinearen Rotationsfedern am Bauteilende, die durch einen unendlich steifen Balken miteinander verbunden sind (Abbildung 4c). Die Rotationsfedern werden erst mit Überschreiten des Rissmomentes M_{cr} aktiv, wobei die Steigungen der linearen Abschnitte durch die Flexibilitätskoeffizienten s_i und s_j definiert sind, die wiederum in Anlehnung an die Gleichungen 25 und 26 formuliert werden.

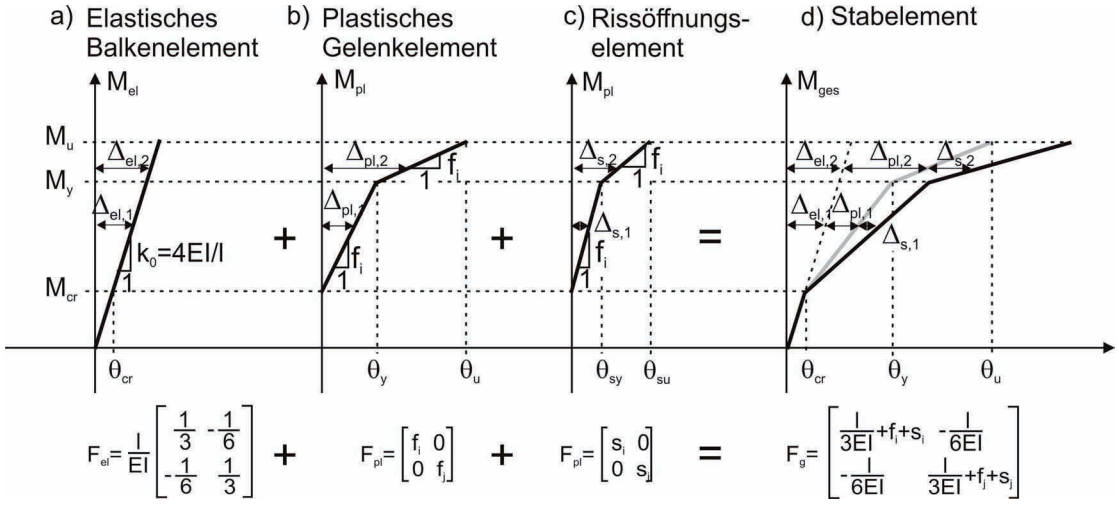


Abbildung 5: Stabelement nach Überlagerung der Traganteile

Hysteretisches Verhalten des Stabelements

Es wurden in Anlehnung an die Takeda-Regeln (Takeda 1970) 7 Hystereseregeln definiert, womit das gesamte Last-Verformungs-Verhalten des Stabelements ohne Berücksichtigung des Traganteils aus Rissöffnungselement abgebildet werden kann. Es wurde hierbei darauf geachtet, dass der Einfluss der Steifigkeitsminderung bei Ent- und Wiederbelastung infolge größerer Verformungen bzw. Rotationen berücksichtigt wird. Der Pinching-Effekt, d.h. die Einschnürung der Last-Verformungs-Kurven im Bereich des Nullpunktes, sowie die Festigkeitsminderung wurden nicht berücksichtigt. Wie in Wenk (Wenk 2000) nach zu lesen ist, zeigen Bauteile, die gemäß der Kapazitätsbemessung konstruiert wurden bei zyklischer Belastung keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss der beiden Effekte. Wissenschaftler wie Saiidi (Saiidi 1982), Keshavarzian (Keshavarzian 1984) oder Filippou (Filippou 1998), (Filippou 1992) verzichteten ebenfalls auf die Berücksichtigung dieser Effekte und berichteten in ihren Arbeiten von sehr guten numerischern Ergebnissen. Parallel hierzu wurden 5 Hystereseregeln für das Rissöffnungselement definiert, die auf der Basis der Clough-Regeln formuliert wurden. In der Arbeit von (Schnepf 2007) findet sich ein ausführliche Beschreibung der beiden Hysteresemodelle. Nachdem beide Hystereseregeln definiert wurden, erfolgt die endgültige Hysteresekurve für das Stabelement durch Überlagerung der beiden Hysteresemodelle. Das Resultat zeigt sich in Abbildung 6, wo deutlich die abgeflachte Kurven durch den Einfluss der Hystereseregeln des Rissöffnungselements zu erkennen ist.

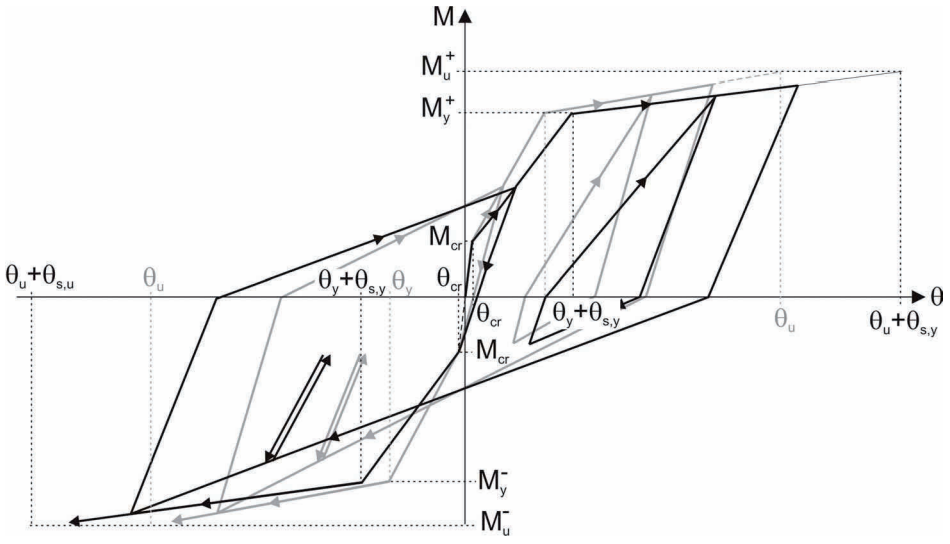


Abbildung 6: Endgültiges Hysteresemodell des Stabelements

Eigene Versuche zur Verifizierung der Makro-Elemente

Im Rahmen der aktuellen Phase wurden drei Versuche an mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen durchgeführt. Dabei wurden wahlweise die Mörtelfestigkeit und die Betonfestigkeit geändert. Als Mauerstein wurde für alle drei Versuche ein KS 12 – 1,8 – 3DF verwendet. Am Versuchstag wurden sowohl an Mörtel- als auch an Betonproben Kleinversuche durchgeführt, die den numerischen Berechnungen zu Grunde gelegt wurden. Die Ergebnisse der Kleinversuche an den Beton- und Mörtelproben sind in Tabelle 1 und Tabelle 2 dargelegt.

Tabelle 1: Resultate der Materialtests an Betonproben

Versuch	Prüfalter	Rohdichte	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit	E-Modul
V1	38 Tage	2,30 kg/dm³	38,41 MN/m²	5,17 MN/m²	24984,42 MN/m²
V2	85 Tage	2,27 kg/dm³	34,34 MN/m²	4,59 MN/m²	23633,87 MN/m²
V3	65 Tage	2,34 kg/dm³	62,25 MN/m²	4,90 MN/m²	27898,98 MN/m²

Tabelle 2: Resultate der Materialtests an Mörtelproben

Versuch	Prüfalter	Rohdichte	Druckfestigkeit	Biegezugfestigkeit
V1	28 Tage	1,75 kg/dm³	2,04 MN/m²	0,67 MN/m²
V2	28 Tage	1,85 kg/dm³	9,78 MN/m²	2,94 MN/m²
V3	28 Tage	1,76 kg/dm³	1,82 MN/m²	0,73 MN/m²

An den Mauersteinen wurde keine Versuchsserie durchgeführt, insofern die verwendeten Steine aus der gleichen Produktionscharge stammen, wie sie von (Stempniewski & Wallner 2004) verwendet wurden. Die Autoren hatten Experimente an tragenden Mauerwerkswänden durchgeführt und im Rahmen dessen Kleinversuche an mehreren Mauersteinen durchführten, wobei sie eine Spaltzugfestigkeit von 2,0 MN/m² und ein E-Modul von 5012,0 MN/m² bestimmten.

Der Großversuchskörper mit allen geometrischen Randbedingungen sowie das FE-Modell auf Basis der programmierten Makro-Elemente ist in Abbildung 7 dargestellt.

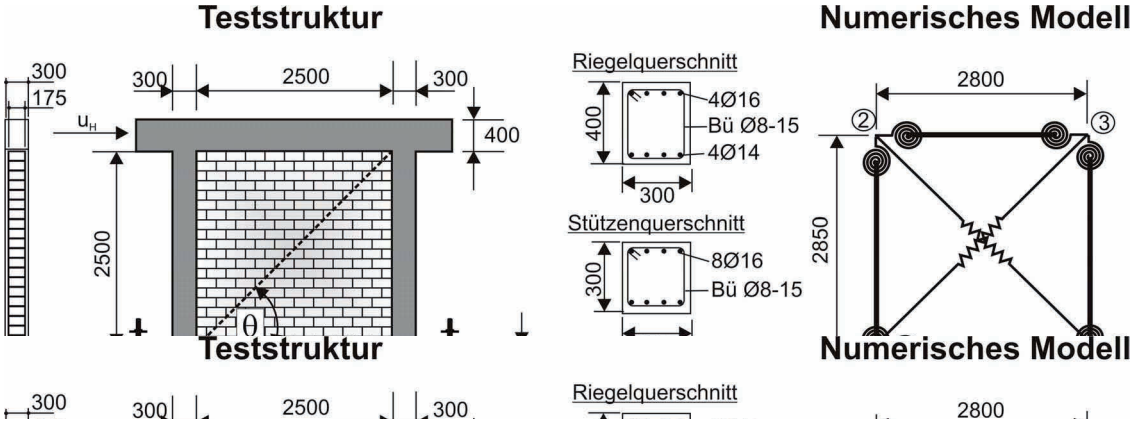


Abbildung 7: Versuchskörper und FE-Modell

Die Einleitung der Last erfolgt horizontal am Riegel durch einen Hohlkolbenzylinder. Der komplette Versuch teilte sich dabei in 10 Versuchsläufe auf, wobei mit jedem folgenden Versuchslauf die horizontale Auslenkung erhöht wurde. Die Maximalauslenkung jedes Versuchslaufs wurde schließlich durch mehrere ansteigende Lastzyklen auf die Struktur aufgebracht. Mit dem 10. Versuchslauf wurde die Struktur solange ausgelenkt, bis ein merkliches Versagen der Struktur stattfand. Für die numerische Nachrechnung wurden aus den experimentell aufgezeichneten Last-Verformungs-Kurven charakteristische Eckpunkte herausgelesen und der numerischen Berechnung zu Grunde gelegt.

In Abbildung 8 sind die experimentellen sowie die numerischen Last-Verformungs-Kurven des ersten Versuchs V1 abgebildet. Der Versuch wurde abgebrochen, als bei einer Auslenkung in positiver Richtung von etwa 110mm die Wand sich aus ihrer Ebene herausdrehte. Zu diesem Zeitpunkt wurde die maximale Traglast von 282kN dokumentiert. Das numerische Ergebnis zeigt, dass die maximale Traglast bei maximaler Auslenkung sehr gut repräsentiert werden kann. Auch die Kurvenverläufe stimmen bis zu einer Auslenkung von 40mm gut überein, weichen dann etwas von den experimentellen Kurven ab. Die plastische Verformung, nachdem die Struktur maximal ausgelenkt wurde, wird etwas unterbewertet.

Einen weitereren Verifikationsparameter stellt die mittlere Steifigkeit k dar. Hierfür werden die Spitzenpunkte der Last-Verformungs-Kurven eines Versuchslaufs in positiver und negativer Richtung miteinander verbunden, wobei sich die Steigung dieser Verbindungsgeraden als mittlere Steifigkeit definiert. Wird dies für alle 10 Versuchsläufe durchgeführt und verbindet man daraufhin die Punkte miteinander, so stellt sich die Steifigkeitskurve gemäß Abbildung 8 dar.

Nach dem gleichen Verfahren wurde die mittlere Steifigkeit auch für die numerischen Ergebnisse durchgeführt und der experimentellen Kurve überlagert. Es ist gut zu erkennen, dass ab einer Auslenkung von etwa 5mm beide Kurven nahezu identisch übereinander liegen. Bei kleinen Auslenkungen hingegen weichen die Kurven stark voneinander ab.

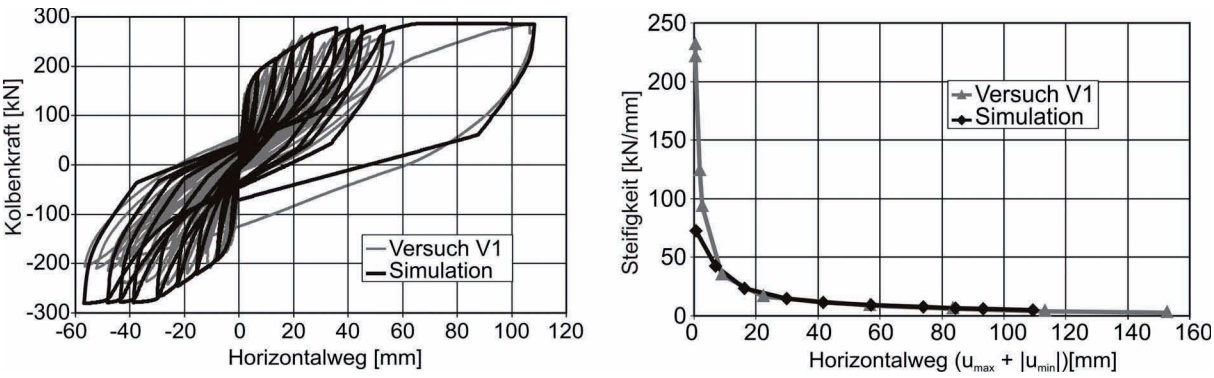


Abbildung 8: Experimentelle und numerische Ergebnisse

Die Ursache hierfür liegt darin, dass beim Experiment während der ersten beiden Versuchsläufe maximale Horizontalauslenkungen von 1mm gefahren wurden. Zu diesem Zeitpunkt kam es noch nicht zu einer Trennung zwischen Mauerwerk und Rahmen, so dass die Tragwirkung monolithisch war. Infolge von Alterungsprozessen und Umwelteinflüssen kann jedoch in der Realität nicht von einem monolithischen Tragverhalten ausgegangen werden, weshalb die experimentellen Ergebnisse bei sehr kleinen Auslenkungen nicht repräsentativ sind. Nachdem es zu einer Trennung der beiden Tragstrukturen kam, führte dies zu sehr guten Übereinstimmungen, so dass das numerische Ergebnis als sehr gut bewertet werden kann.

Die experimentellen und numerischen Ergebnisse des zweiten und dritten Versuchs sind ausführlich in der Arbeit von (Schnepf 2007) dokumentiert. Des Weiteren finden sich in dieser Arbeit vertiefte Beschreibungen und Darlegungen der programmierten Makro-Elemente. Im Sinne einer intensiven Studie der dargelegten numerischen Modelle sowie der durchgeführten Versuche wird somit auf (Schnepf 2007) verwiesen.

Push-over Analyse an einer siebenstöckigen, vierfeldrigen Struktur

Es wurden Push-over Analysen an zwei siebenstöckigen, vierfeldrigen Strukturen durchgeführt. In Abbildung 9 ist eine der beiden Strukturen mit allen erforderlichen geometrischen und materiellen Eigenschaften dargestellt. Die zweite Struktur unterscheidet sich lediglich darin, dass sämtliche Mauerwerksausfachungen entnommen wurden. Zudem ist in Abbildung 9 das numerische Modell dargestellt, welches unter Anwendung der programmierten Makro-Elemente modelliert ist.

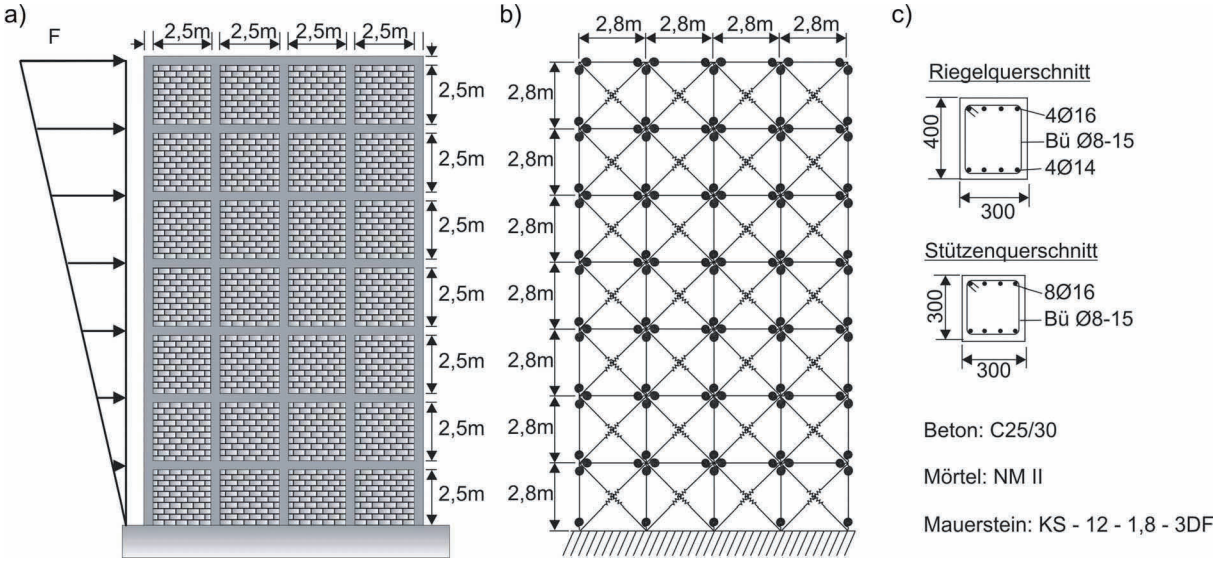


Abbildung 9: Siebenstöckige Struktur a), numerisches Modell b) sowie sämtliche geometrischen und materiellen Eigenschaften c)

Die Ergebnisse der beiden Push-over Analysen, bei der die Strukturen durch eine dreiecksförmig verteilte Last F über die Gebäudehöhe belastet wird (Abbildung 9), sind in Abbildung 10 dargestellt. Die linke Last-Verformungs-Kurve ist das Resultat

der Berechnung der komplett mauerwerksausgefachten Struktur. Bei etwa 21cm war die maximale Traglast von ca. 2,6MN erreicht. Nachdem die Mauerwerksausfachungen aus der Struktur entnommen wurden, waren deutlich größere Dachauslenkungen berechnet worden. Dies hängt damit zusammen, dass die Rahmentragwerke sehr fest und äußerst duktil angenommen wurden. Allerdings betrug die Traglast nur noch knapp 50% der Struktur mit komplett ausgefachten Rahmen. An diesen beiden Last-Verformungs-Kurven lässt sich der Einfluss einer Mauerwerksausfachung sehr deutlich darstellen. Dem eigentlich positiven Effekt einer Traglasterhöhung infolge der Mauerwerksausfachung steht die negative Konsequenz gegenüber, dass durch eine Mauerwerksausfachung größere Steifigkeiten resultieren und dadurch die angreifende Erdbebenlast deutlich erhöht wird. Des Weiteren ist durch die Mauerwerksausfachung ein deutlicher Verlust an Duktilität zu verzeichnen, insofern mit Versagen des Mauerwerks ein Komplettversagen der gesamten Struktur einhergeht. Der Rahmen ist nicht im Stande nach Versagen des Mauerwerks die Last von 2,6MN aufzunehmen.

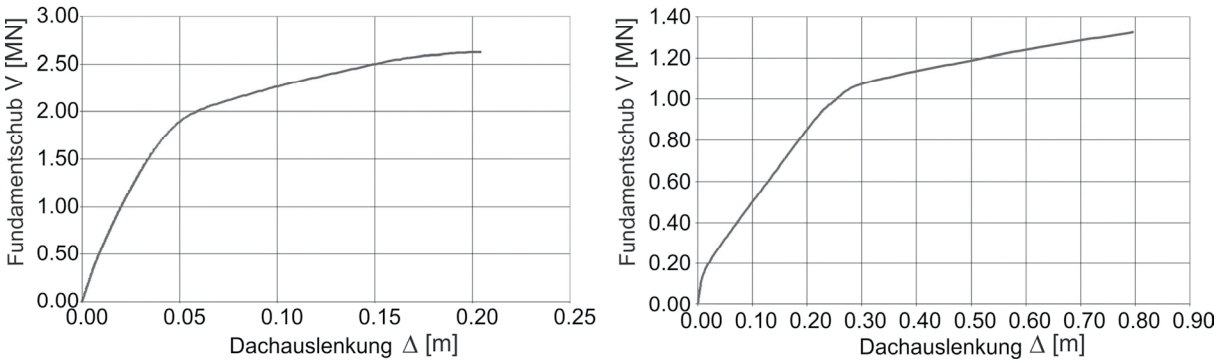


Abbildung 10: Last-Verformungs-Kurven der siebenstöckigen, vierfeldrigen Struktur mit Mauerwerksausfachung a) und ohne Mauerwerksausfachung b)

Schadensprognose der mauerwerksausgefachten Struktur

Im Folgenden wird eine Schadensevaluation an der mauerwerksausgefachten Struktur geführt, wozu die Kapazitäts-Spektrum-Methode (KSM) in Kombination mit Fragilitätskurven angewandt wird. Die KSM ist ein vereinfachtes nichtlineares Analyseverfahren, bei der die Kapazitätskurve des Gebäudes bzw. die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes mit der Belastung in Form von Antwortspektren (AWS) überlagert wird. Aus einem Vergleich dieser beiden Eingangsdaten lässt sich iterativ die Anforderung an das Duktilitätsvermögen ermitteln (Freeman, S.A 1975), (Freeman, S.A 1988), (ATC 40 1996), (FEMA 274 1997).

Unter Verwendung der dynamischen Eigenschaften des zu Grunde gelegten siebenstöckigen Bauwerks wurde die Push-over Kurve aus Abbildung 10a) in eine Kapazitätskurve konvertiert, wobei jeder Punkt V und Δ in die entsprechenden Punkte Spektrale Beschleunigung S_A und Spektrale Verschiebung S_D unter

Verwendung der Gleichungen 27 transformiert wird. Mit der Kapazitätskurve kann die globale Antwort des Gebäudes durch einen nicht-linearen Einmassenschwinger beschrieben werden.

$$S_A = \frac{V/W}{\alpha_1}; \quad S_D = \frac{\Delta_R}{PF_1 \cdot \Phi roof} \qquad (27)$$

mit

W: Eigengewicht des Gebäudes

α_1: Modaler Massenkoeffizient der ersten Eigenform

PF_1: Modaler Partizipationsfaktor der ersten Eigenform

Φ_{roof}: Amplitude der ersten Eigenform in Höhe des Daches

Insofern das (AWS) über die gleichen Diagrammachsen aufgezeichnet ist wie die Kapazitätskurve, können beide in einem gemeinsamen Diagramm überlagert werden und der sog. „Performance Point“ ermittelt werden, womit die maximale Spektrale Auslenkung des nicht-linearen Einmassenschwingers definiert wird. Bevor allerdings der maßgebende Schnittpunkt bzw. „Performance Point“ ermittelt werden kann, muss das AWS zu einer Schar inelastischer AWS reduziert werden, um somit den günstigen Einfluss der nichtlinearen plastischen Tragreserven des Gebäudes, insbesondere bei Starkbeben, berücksichtigen zu können (Abbildung 11a). Bezüglich der Berechnung inelastischer AWS wird an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen (Bachmann 2002) (Stempniewski 2004), (Meskouris 2003) und hier nicht näher erläutert. Jeder Schnittpunkt der beiden Kurven liefert sowohl für das AWS als auch für die Kapazitätskurve eine Duktilität μ. Der Schnittpunkt, der bei beiden Kurven zu dem gleichen μ-Wert führt wird schließlich als „Performance Point“ bezeichnet. Für das vorliegende Bauwerk wurde eine Spektralverschiebung von 13,0 cm bei einer Duktilität von $\mu = 2.0$ infolge des Vrancea Erdbebens von 1977 ermittelt.

Die Ermittlung der wahrscheinlich eintretenden Schadenszustände erfolgt, indem die Spektrale Verschiebung über Fragilitätskurven aufgetragen wird. Hierfür wurden Fragilitätskurven in Anlehnung an die Richtlinien von (HAZUS 1999) ermittelt. Insofern sich die siebenstöckige, vierfeldrige mauerwerksausgefachte Struktur aus Abbildung 9 in die gleiche Bauwerksklasse einordnen lässt, wie sie bereits bei der Schadensprognose von (Bayraktarli 2000) zu Grunde gelegt wurde, konnten die Fragilitätskurven direkt von Bayraktarli übernommen werden. Eine ausführliche Beschreibung der Ermittlung dieser Kurven findet sich in (Stempniewski 2004) und (Bayraktarli 2000). Auf eine Anwendung der Fragilitätskurven, die in der vorherigen Phase auf Grundlage dokumentierter Schäden an 39 Bauwerken berechnet wurde, ist infolge der sehr kleinen Datenbasis und somit der sehr labilen Fragilitätskurven verzichtet worden. Wie in Abbildung 11b) zu sehen ist, wird sich eine Verteilung der möglichen Schadenszustände ergeben, wonach ein Einsturz mit 22%-iger Wahrscheinlichkeit eintritt. Ein starker, mittlerer oder leichter Schaden tritt mit einer Wahrscheinlichkeit von 39%, 31% bzw. 7% ein. Dass die Struktur ohne Schaden das Erdbeben übersteht wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 1% bewertet.

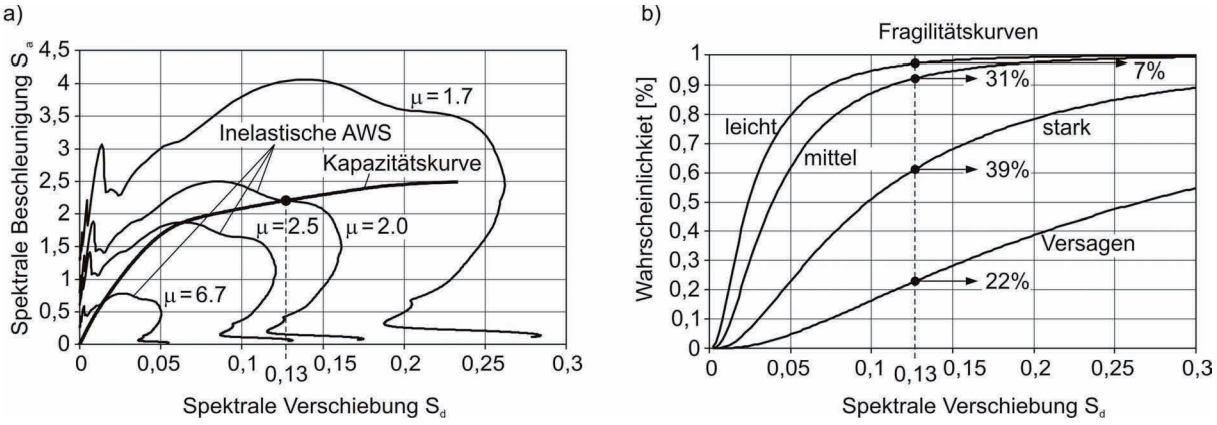


Abbildung 11: Ermittlung des Performance Point a) sowie die daraus resultierende Schadensprognose der mauerwerksausgefachten Struktur b)

Ermittlung von Fragilitätskurven für Bauerwerke mit weichen Stockwerken (soft storey)

Ein weiteres Ziel der aktuellen Phase bestand darin, Fragilitätskurven zu erstellen, womit das Schadenspotential von Bauerwerken mit weichen Stockwerken bewertet werden kann. Bei der Ermittlung dieser Kurven behalf man sich des Numerik, insofern für diese Art von Strukturen keine oder nur sehr wenige Schadensdokumentationen infolge Erdbeben vorliegen und somit keine Basis für die Erstellung empirischer Fragilitätskurven vorhanden ist. Für die numerischen Berechnungen der Bauwerke wurde das FE-Programm (ETABS 2005) angewandt, womit insgesamt 72 Bauerwerke mit quadratischem, rechteckigem oder L-förmigem Grundriss, mit unterschiedlicher Stockwerksanzahl und mit einem weichen Erdgeschoss modelliert wurden. Die Mauerwerksausfachung wurde durch eine diagonale Strebe ersetzt, deren materielle und geometrische Eigenschaften entsprechend der Empfehlungen nach (FEMA 356 1997) formuliert wurden. Eine Anwendung der eigenen programmierten Makro-Elemente war hierbei nicht möglich, insofern nichtlineare Zeitverlaufsberechnungen durchgeführt wurden und die eigenen numerischen Modelle nicht für dynamische Berechnungen konzipiert sind. Der Schaden des Bauerwerks definiert sich schließlich in Abhängigkeit der maximalen Stockwerksverschiebung (maximum inter-storey drift), womit in Anlehnung an die Empfehlungen nach (SEAOC 1995) eine wahrscheinlichkeitsbasierte Einteilung in vernachlässigbare, leichte, mittlere, schwere und komplette Schadenszustände des Bauwerks erfolgen konnte. Insgesamt wurden drei Fragilitätsdiagramme ermittelt (Abbildung 12), die sich hinsichtlich der Stockwerksanzahl unterscheiden. Die Bauwerksklasse für niedrige Bauwerke umfasst all diejenigen Bauwerke, die eine maximale Anzahl von bis zu 4 Stockwerken aufweisen. Bauwerke mittlerer Höhe haben 5-8 und hohe Bauwerke 9-12 Stockwerke.

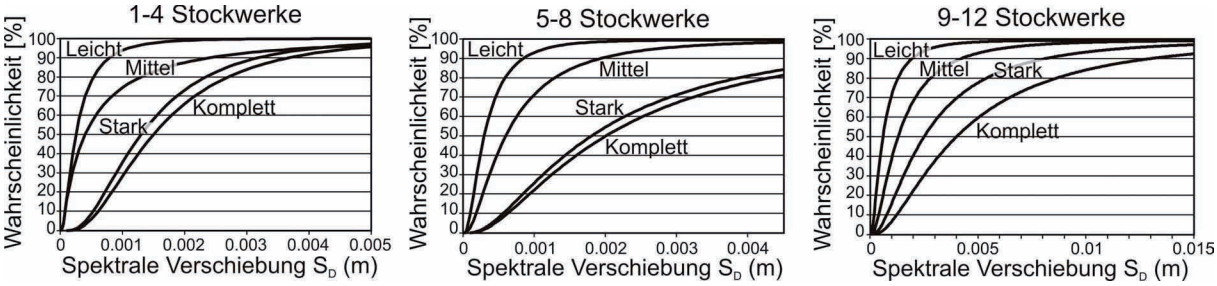


Abbildung 12: Fragilitätskurven für Bauerwerk mit weichem Stockwerk

Für die Ermittlung der Fragilitätskurven einer Bauerwerksklasse wurde ein Verfahren von (Shinozuka 2001), (Shinozuka 2002) angewandt, wobei sämtliche Bauwerke einer Klasse tabellarisch zusammengefasst und entsprechend des Schadenszustands den jeweiligen Spalten von „mindestens vernachlässigbarer Schaden“ bis „mindestens kompletter Schaden“ zugeordnet wurden. Dabei sind die Zellen mit einer „1“ versehen worden, sofern das Gebäude diesen Schadenszustand erreicht hat. Erleidet das Gebäude einen Schadenszustand nicht, wurde eine „0“ eingefügt. Die Tabellen können der Arbeit von (Mandal 2007) entnommen werden. Auf Basis dieser Auswertung ist es schließlich möglich den prozentualen Anteil eines Schadenszustandes in Abhängigkeit der Spektralen Verschiebung S_D zu berechnen. Für eine ausführliche Darlegung dieser Methodik wird auf die Arbeiten von (Stempniewski 2004) und (Mandal 2007) verwiesen. Letztlich berechnet sich die Fragilitätskurve eines definierten Schadenszustandes unter Anwendung der Gleichung 28, womit die Kurve als kumulative logarithmische Normalverteilung dargestellt werden kann.

$$P\left[ds \middle| S_D\right] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln\left(\frac{S_D}{\overline{S}_{D,ds}}\right)\right] \qquad (28)$$

$\overline{S}_{D,ds}$ ist hierbei der Medianwert der spektralen Verschiebung, bei der das Gebäude die Grenze des Schadenszustandes ds erreicht. Die Standardabweichung des Logarithmus wird mit β_{ds} bezeichnet und Φ ist die kumulative Verteilungsfunktion. In Tabelle 3 sind sowohl die Standardabweichungen als auch die Medianwerte aller Fragilitätskurven dargestellt.

Tabelle 3: Eingangswerte zur Ermittlung der Fragilitätskurven

	Leichter Schaden		Mittlerer Schaden		Schwerer Schaden		Kompletter Schaden	
Stock-werke	Standard-abweichg.	Median	Standard-abweichg.	Median	Standard-abweichg.	Median	Standard-abweichg.	Median
1-4	0,0006	0,9	0,0012	0,9	0,003	0,9	0,004	0,9
5-8	0,0003	0,8	0,0006	0,9	0,0018	0,9	0,002	0,9
9-12	0,00025	0,9	0,0004	1,4	0,0013	0,7	0,0015	0,7

5.2.1.4 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Die Methode der Makro-Elemente ist seit vielen Jahren ein sehr weit verbreitetes und anerkanntes Verfahren zur schnellen und genauen Beurteilung des Tragverhaltens großer Strukturen. Aus diesem Grund haben sich seither einige Wissenschaftler mit diesem Thema beschäftigt, wobei sich die Makro-Elemente hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, Übertragbarkeit, Genauigkeit und Effizienz teilweise erheblich unterscheiden. In dieser Arbeit hat man zwei Makro-Elemente entwickelt, in denen die beiden Kriterien größtmögliche Genauigkeit zur Beurteilung des globalen Tragverhaltens und maximale Einfachheit in seiner Anwendung optimal aufeinander abgestimmt sind. Das Ziel bestand somit in der Entwicklung sehr effizienter und dennoch leistungsfähiger Werkzeuge. Um dieses Ziel zu erreichen wurde eine intensive Recherche der bisher vorgestellten Methoden aus der Literatur betrieben, die präsentierten Ansätze hinsichtlich des eigenen geforderten Ziels beurteilt und schließlich direkt, in der Regel jedoch in modifizierter Form, den eigenen Modellen zu Grunde gelegt. Primär wurde darauf geachtet, dass die Anwendung weitgehend unabhängig von notwendigen Kleintests an z.B. Beton– oder Mörtelproben erfolgen kann und unterscheidet sich dadurch deutlich von den meisten bereits vorhandenen, auf empirischer Grundlage entwickelter Makro-Elementen. Somit können die eigenen Makro-Elemente durchweg auf der Grundlage von Eigenschaftswerten aus der Normen- bzw. Fachliteratur angewendet werden, was den Vorteil der Übertragbarkeit auf weitere Strukturen unterschiedlicher geometrischen und materieller Randbedingen impliziert.

Des Weiteren wurde die materielle und geometrische Definition sowie das Last-Verformungs-Verhalten der äquivalenten Diagonalstrebe durch modifizierte und neu entwickelte Ansätze formuliert. Somit basiert zwar das angewandte Prinzip der äquivalenten Diagonalstrebe auf der Erkenntnis vieler vorangegangener wissenschaftlicher Arbeiten, das Tragverhalten und die materielle wie geometrische Formulierung des Makro-Elements aber ist in dieser Art noch nicht präsentiert worden und stellt somit eine neue Form der Abbildung des Tragverhaltens der Mauerwerksausfachung dar.

Für die Verifizierung an mehrstöckigen, mehrfeldrigen Strukturen, wurden drei Versuche an mauerwerksausgefachten Stahlbetonrahmen durchgeführt. Trotz der geringen Anzahl an Versuchen wurde gezeigt, dass die geforderte und oben erwähnte Übertragbarkeit auf Strukturen unterschiedlicher geometrischer und materieller Eigenschaften realisiert werden konnte. Weitere Verifikationen der Makro-Elementen wie sie in der Arbeit von (Schnepf 2007) angeführt wurden bekräftigen zusätzlich diese Aussage. Die Versuche sind ebenfalls als neue Ansätze im Vergleich zu anderen Arbeiten zu diesem Thema zu bewerten.

Zum Schluss wurden Fragilitätskurven ermittelt, die in dieser Form noch nicht vorhanden waren. Die Kombination aus Gebäuden mit weichem Stockwerk und dem

Ansatz materieller Eigenschaften für Beton und Stahl wie sie in Bukarest vorzufinden sind, liefert Fragilitätskurven, die direkt auf die örtlichen Gegebenheiten konzentriert sind und stellen somit komplett neue Kurven dar.

5.2.1.5 Offene Fragen

Es konnten zwei Makro-Modelle vorgestellt werden, womit das zyklisch nichtlineare Tragverhalten sowohl einzelner Rahmenstrukturen mit und ohne Ausfachung als auch mehrstöckiger, mehrfeldriger Strukturen abgebildet werden kann. Die Verifizierung an eigenen Wandversuchen haben durchweg sehr gute Ergebnisse gezeigt, sodass die Forderung nach einer schnellen und genauen Methodik zur Beurteilung des zyklischen Tragverhaltens ganzer Gebäudestrukturen erreicht wurde. Allerdings sind die numerischen Modelle auf den zweidimensionalen Fall beschränkt, wodurch die Anwendung dieser Modelle auf Gebäude mit regelmäßigem Grund- und Aufriss beschränkt sind. Insofern in Bukarest auch häufig sehr unregelmäßige Gebäude vorzufinden sind und im Fall eines Erdbebens Effekte eintreten, welche die Schadensanfälligkeit der Gebäude deutlich erhöht, sollten in einem nächsten Schritt die Makro-Modelle auf den dreidimensionalen Fall erweitert werden. Dabei müssen mögliche Schwierigkeiten wie z.B. die Schiefe Biegung bei den Rahmenstützen oder auch die klaffende Fugen im Mauerwerk zwischen Mauerstein und Mörtel infolge einer Belastung quer zur Wandebene berücksichtigt werden.

Des Weiteren wurden Fragilitätskurven für Gebäude mit einem weichen Geschoss analytisch erstellt. Fragilitätskurven für Gebäude ohne weiches Geschoss wurden bereits in der vorangegangenen Phase anhand von Schadensdaten an 39 Gebäuden im Testgebiet von Bukarest erstellt. Infolge der allerdings sehr geringen Datenbasis sind diese Kurven nur bedingt für eine Schadensbeurteilung ansetzbar. Aus diesem Grund sollten weitere analytische Studien durchgeführt werden, so dass die Fragilitätskurven auf einer größeren Datengrundlage basieren. Es hat sich in der aktuellen Phase gezeigt, dass mit einer analytischen Studie Fragilitätskurven sehr schnell erstellt werden können.

Zusätzlich sollte die Methode der Makro-Modelle auch auf tragende Mauerwerksscheiben angewandt werden. Diese Struktur stellt, zusammen mit den ausgefachten Rahmen, den größten Anteil von Gebäudetypen in seismischen Regionen. Damit wird es möglich sein, eine gehaltvollere Aussage über das Schadenspotential städtischer Regionen zu erhalten.

5.2.1.6 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt C9 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.7 Literatur

(ATC 40) Applied Technology Council, 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Report ATC 40

Bachmann, H. (2002): Erdbebensicherung von Bauwerken. Birkhäuser Verlag Basel, 2. überarbeitete Auflage

Bayraktarli, Y (2000): Vulnerabilitätsuntersuchung einer Stahlbeton-Rahmenkonstruktion in Bukarest/Rumänien, Diplomarbeit am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, der Univ. Karlsruhe (TH)

Crisafulli, F.J. (1997): Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infill. Diss., Department of Civil Engineering, University Canterbury, Christchurch, New Zealand

Crisafulli, F.J., Carr, A.J., Park, R. (2000): Analytical Modelling of Infilled Frame Structures – A General Review. New Zealand Society for Earthquake Engineering, Vol. 33

ETABS v9 (2005), User´s Guide Version 9, Computer and Structures, Berkeley, California, USA

FEMA 274, (1997): NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitytion of Buildings, Federal Emergency Management Agency

FEMA 356, (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Federal Emergency Management Agency

Filippou, F.C. (1992): Nonlinear Static and Dynamic analysis of Reinforced Concrete Subassemblages. Report No. UCB/EERC-92/08, Earthquake Engineering Research Centre, College of Engineering, University of California, Berkeley

Filippou, F.C., Issa, A. (1998): Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Frames under Cyclic Load Reversals. Report No. UCB/EERC-85/05, Earthquake Engineering Research Centre, College of Engineering, University of California, Berkeley

Freeman, S.A., 1998. The Capacity Spectrum Method as a Tool for Seismic Design, 11th European Conference on Earthquake Engineering, September 6-11th 1998, Paris, A.A. Balkema, Rotterdam

Freeman, S.A., Nicoletti J.P., Tyrell J.V., 1975. Evaluation of Existing Buildings for Seismic Risk – A Case Study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington, Proceedings of the U.S. National Conference on Earthquake Engineering, EERI, P. 113-122, Berkeley

Giberson, M.F. (1967): Two Nonlinear Beams with Definitions of Ductility. Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 95, Nr.ST2, S.137-157

HAZUS, 1999. Natural Hazard Loss Estimation Methodology, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., USA

Keshavarzian, M., Schnobrich, W.C. (1984): Computed Nonlinear Seismic Response of R/C Wall-Frame Structures. Proposed by National Technical Information Service, University of Illinois

Madan, A., Reinhorn, A.M., Mander, J.B., Valles, R.E., (1997) : Modelling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, Nr. 10, S. 1295-1302

Mainstone, R.J. (1971): On the Stiffness and Strength of Infilled Frames. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Supplement IV, S. 57-90

Mallick, S.V., Severn, R.T. (1968): The Behaviour of Infilled Frames under Static Loading. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineering, Vol. 38, S. 639-656

Mandal, P. (2007): Evaluation of Fragility Curves for the Soft-Storey Buildings in Bucharest. Diplomarbeit am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, der Univ. Karlsruhe (TH)

Mander, J.B.; Priestley, M.J.N.; Park, R., (1988): Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 114, Nr. 8, pp 1804-1826

Mann, W.; Müller, H., (1985): Schubtragfähigkeit von gemauerten Wänden und Voraussetzungen für das Entfallen des Windnachweises, Mauerwerk-Kalender 1985, S. 95-114

Meskouris, K., Hinzen, K.-G., 2003. Bauwerke und Erdbeben, Grundlagen - Anwendung – Beispiele, Vieweg-Verlag, ISBN 3-528-02574-3

Reinhorn, A.M.; Madan, R.E.; Reichmann, Y.; Mander, J.B.; (1995): Modelling of Masonry Infill Panels for Structural Analysis, Technical Report NCEER-95-0018, National Centre for Earthquake Engineering Research, Department of Civil Engineering, State University of New York at Buffalo

Saiidi, M. (1982): Hysteresis Models for Reinforced Concrete. Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 108, Nr. ST5

Saneinejad, A., Hobbs, B. (1995): Inelastic Design of Infilled Frames. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, Nr. 4, S. 634-650

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Kim, H., Uzawa, T. Ueda, T., (2001): Statistical Analysis of Fragility Curves, Technical Report MCEER

Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J., Naganuma, T., (2002): Statistical Analysis of Fragility Curves, Journal of Engineering Mechanics

Schnepf, S., Stempniewski, L., Lungu, D. (2007a): Application of the Capacity Spectrum Method for Seismic Evaluation of Structures, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, October 4-6, 2007, Bucharest, Romania

Schnepf, S. (2007b): Numerische Simulation des Tragverhaltens ebener mauerwerksausgefachter Stahlbetonrahmen unter zyklischer Belastung. Diss. am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, der Univ. Karlsruhe (TH)

SEAOC (1995): Version 2000 – A Framework for Performance Based Design, Volumes I, II, III. Structural Engineers Association of California, Sacramento, California

Seah, C.K. (1998): A Universal Approach for the Analysis and Design of Masonry. Diss. an der University of Brunswick

Stafford Smith, B.S., Carter, C. (1969): A Method of Analysis for Infilled Frames. In: Proceedings of the Institute of Civil Engineering, Vol. 44, S. 31-48

Stempniewski, L., Schnepf, S. (2004): Seismische Gefährdung und Empfindlichkeitsbestimmung bestehender Bauwerke bei Erdbeben, Forschungsbericht, Sonderforschungsbereich 461, Teilprojekt C9

Stempniewski, L., Wallner, C. (2004): Methoden zur nachträglichen Ertüchtigung bestehender, vorgeschädigter Bauwerke. Forschungsbericht, Sonderforschungsbereich 461, Teilprojekt C2

Takeda, T., Sozen, A.M., Nielsen, N.N. (1970): Reinforced Concrete Response to Simulate Earthquakes. Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 96, Nr. ST12

Wenk, T. (2000): Nichtlineare dynamische Berechnung von Stahlbetonrahmen unter Erdbebeneinwirkung. Diss., Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

Zarnic, R. (1994): Experimental Investigation of the R/C Frame Infilled by Masonry Wall. International Journal of Engineering Modelling, Vol. 7, S. 37-45

Zarnic,R., Gostic, S. (1998): Non-Linear Modelling of Masonry Infilled Frames. In: Proceedings of the 11th Conference on Earthquake Engineering, Paris, France

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) auf wesentlichen Fachkongressen

Schnepf, S., Stempniewski, L., Lungu, D. (2007a): Application of the Capacity Spectrum Method for Seismic Evaluation of Structures, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, October 4-6, 2007, Bucharest, Romania

b) in Monographien

Schnepf, S. (2007b): Numerische Simulation des Tragverhaltens ebener mauerwerksausgefachter Stahlbetonrahmen unter zyklischer Belastung. Diss. am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, der Univ. Karlsruhe (TH)

Mandal, P. (2007): Evaluation of Fragility Curves for the Soft-Storey Buildings in Bucharest. Diplomarbeit am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Massivbau, der Univ. Karlsruhe (TH)

c) Vorträge

Schnepf, S., Stempniewski, L., Lungu, D. (2007a): Application of the Capacity Spectrum Method for Seismic Evaluation of Structures, International Symposium on Strong Vrancea Earthquakes and Risk Mitigation, October 4-6, 2007, Bucharest, Romania

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 01/2002 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	206.400 €	19.635 €		226.035 €
2005	91.800 €	7.200 €		99.000 €
2006	91.800 €	7.200 €		99.000 €
2007	70.800 €	3.300 €		74.100 €
Summe	**460.800 €**	**37.335 €**		**498.135 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	1. Stempniewski, L., Prof. Dr. 2. Lungu, D., Prof. Dr. 3. Huber, G., Dr. 4. Bonjer, K.-P., Dr. 5. Keintzel, E., Dr-Ing. 6. Gehbauer, F., Prof. Dr.	Massivbau Massivbau Bodenmechanik Geophysik Massivbau Baubetrieb	IfMB TU Bukarest IBF GEOK IfMB IMB	06/2000 bis 12/2007 07/1996 bis 12/2007 07/1996 bis 12/2007 07/1996 bis 12/2007 07/1996 bis 02/2006 07/1996 bis 12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	7. Schnepf, S., Dipl-Ing. 8. N.N., st. HK	Massivbau Massivbau	IfMB IfMB	07/2002 bis 12/2007 01/2002 bis 12/2007	BAT IIa st. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter					

Teilprojekt Z1

Betrieb des zentralen Geo-Informationssystems (GIS)

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

Dipl.-Ing. (FH) Werner Weisbrich
Dr.-Ing. Joachim Wiesel

Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt Z1

5.1.1 Titel:

Betrieb des zentralen Geo-Informationssystems (GIS)

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

Geoinformationssystem, Datenbank, Web-Entwicklung

5.1.3 Leiter:

Dr. Wiesel, Joachim, 06.05.1947
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Bähr, Hans-Peter, 07.11.1942
Institut f. Photogrammetrie u. Fernerkundung, Englerstr. 7, 76128 Karlsruhe
Telefon: 0721 / 608-2316/2315
Telefax: 0721 / 608-8450
E-Mail: joachim.wiesel@kit.edu
hans-peter.baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Dipl.-Ing. (FH) Werner Weisbrich

5.1.5 Rumänische Partner:

-

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Das Teilprojekt Z1 unterscheidet sich grundsätzlich von den anderen Teilprojekten des Sonderforschungsbereich 461 „Starkbeben: Von geowissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen“. Im Vordergrund steht die Unterstützung der anderen Teilprojekte durch den Einsatz von zeitgemäßen Verfahren der Geo-Informatik und nicht die unmittelbaren Lösungen einzelner geologischer und geophysikalischer Probleme.

Dieses Teilprojekt übernimmt wichtige Servicefunktionen für den gesamten SFB. Diese Aufgaben beinhalten im wesentlichen die Administration eines Geo-informationsystems (BARTHELME 1995), die Erfassung und Verteilung digitaler topographischer Basisdaten, die Erfassung und Verteilung von Publikationen und Dokumenten in einem für die Öffentlichkeit zugänglichen Dokumentenserver, die Administration und Pflege der Datenbanken für die DMT-Gruppe und die Übernahme spezieller Serviceleistungen und Beratung

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangs-fragestellung

-

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Methoden

Die Basis des Geodaten- und Dokumentenservers besteht aus dem Relationalen Datenbank-System (RDBMS) Oracle10g® mit Oracle10g®Spatial. Das RDBMS Oracle10g® eignet sich auf Grund der vielfältigen Schnittstellenanbindung zu zahlreichen GIS-Klienten (ArcGIS, AutoCAD-Map, Intergraph GeoMedia, ESRI IMS, ArcSDE) als gemeinsame Plattform für den Zugriff auf und Austausch von Geodaten (BUHMANN/WIESEL 2007). Oracle10g® ist konform zur OGIS Simple Feature Specification und wurde vom OGC zertifiziert (Open GIS Consortium, OGIS 2007). Zusätzlich bietet das RDBMS Oracle10g® mit Oracle®Text eine Erweiterung zur Verwaltung von Dokumenten und Publikationen in einem Volltextarchiv.

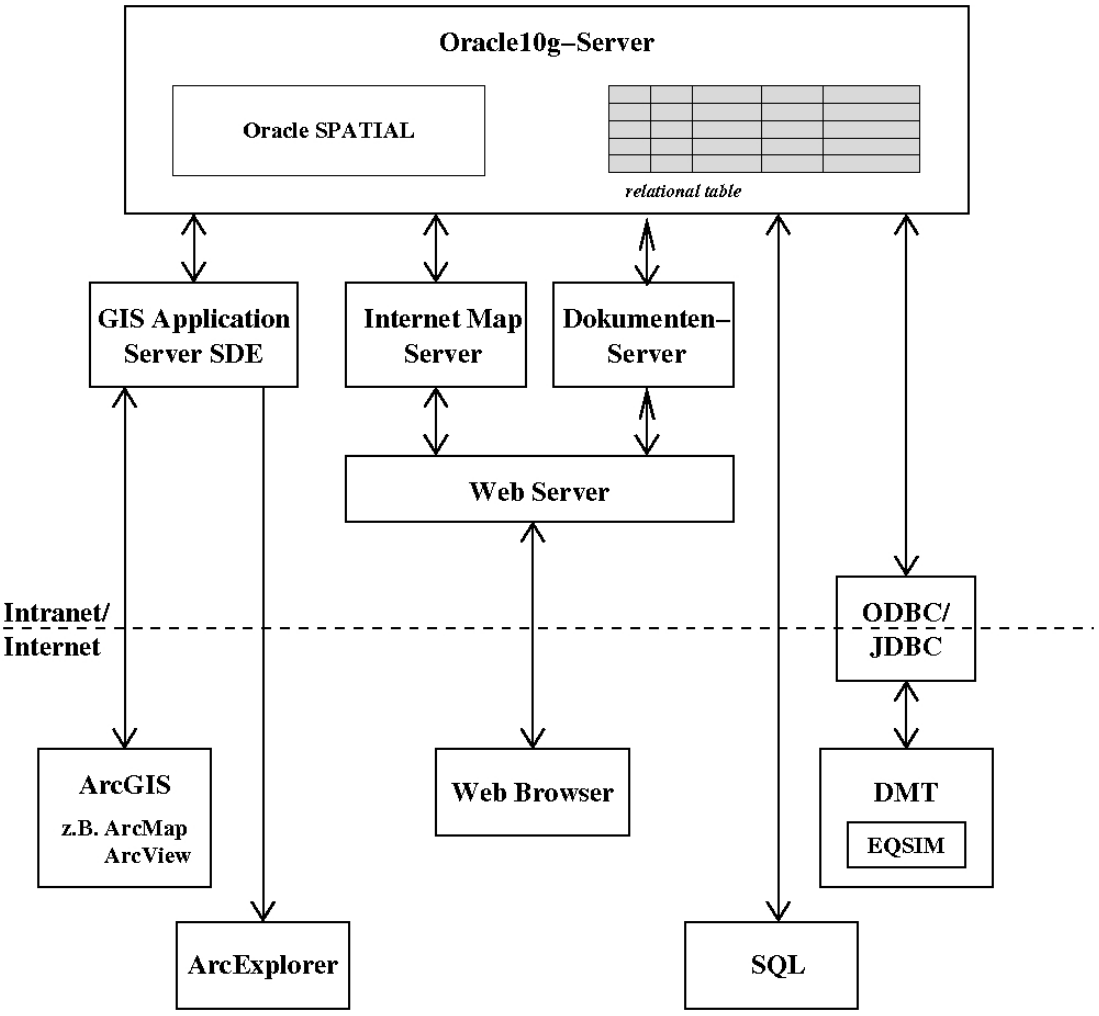


Abbildung 1: Schema des Geodaten- u. Dokumentenservers.

Die Nutzer sind in der Lage die für ihre Anwendungen am besten geeignete Software zu verwenden, ohne dabei auf die gemeinsame Nutzung der Daten innerhalb des SFB461 verzichten zu müssen. Die Konfiguration innerhalb des SFB461 veranschaulicht die folgende Abbildung 1.

Ergebnisse und ihre Bedeutung

Geoinformationssystem

In dieser Berichtsphase wurde das unter dem Betriebssystem SuSE Linux 8.1 laufende RDBMS Oracle9i®R2 durch Oracle10g®R2 auf einem neuen Rechner mit dem Betriebssystem SuSE Linux 9.2 ersetzt. Die Daten, die unter Oracle9i®R2 bestanden, wurden nach Oracle10g®R2 migriert. Dieser Schritt war notwendig, da der ursprüngliche Rechner auf Grund seines Alters ersetzt werden musste. Das neue Rechnersystem, das in dieser Berichtsphase angeschafft wurde, enthält auch ein RAID-System, welches einen ausfallsicheren 24-Stunden-Betrieb garantiert.

Die unterschiedlichen Zugriffsmöglichkeiten auf die Geodaten wie ArcGIS, ArcMAP, ArcExplorer und Web-Browser wurden in WEISBRICH/WIESEL (2004) erläutert und beschrieben.

Allerdings hat sich in dieser Hinsicht in den letzten Jahren einiges getan. Mit der Veröffentlichung von 3D-Applikationen wie Google Earth, NASAs World Wind und Microsofts Virtual Earth wurde das Thema GIS einer breiteren Öffentlichkeit bewusst gemacht. Am Beispiel von Google Earth wird gezeigt, wie unkompliziert es ist, geobezogene Daten zu visualisieren.

Am Beispiel von Google Earth wird gezeigt, wie unkompliziert es ist, geobezogene Daten zu visualisieren.

Google Earth

Zu Beginn des SFB 461 mussten allgemeine grundlegende Geodaten, wie z. B. Landesgrenzen, Städte, Flüsse, noch aufwändig aus Kartenunterlagen u. ä. digitalisiert werden. Mit Google Earth gibt es ein Datenaustauschformat, welches als XML-basierte Markup Language KML (Keyhole Markup Language, GOOGLE EARTH 2007) realisiert wurde. Hiermit können ähnlich wie in GML (Geography Markup Language) die Geometrie und der Raumbezug der Daten sowie Informationen über Darstellung und Symbolisierung der Objekte beschrieben werden. Diese KML-Dateien können durch verschiedene Methoden erstellt werden. Hier werden zwei Methoden beispielhaft dargestellt.

- Erstellen einer KML-Datei mit textbasiertem Editor

```
<Placemark>
  <name>BAP</name>
  <description>
   <![CDATA[
   <table padding="2">
    <tr><td><b>Station:</b></td><td>BAP</td></tr>
    <tr><td><b>Site:</b></td><td>Bucharest, administr. parc</td></tr>
    <tr><td><b>Geology:</b></td><td>sed.</td></tr>
    <tr><td><b>Altitude:</b></td><td>103</td></tr>
    <tr><td><b>opened:</b></td><td>06.11.2003</td></tr>
    <tr><td><b>closed:</b></td><td>-</td></tr>
    <tr><td><b>samples:</b></td><td>1233</td></tr>
    <tr><td><b>comment:</b></td><td>-</td></tr>
   </table>
   ]]>
  </description>
  <styleUrl>#StationIcon</styleUrl>
  <Point>
    <coordinates>26.118994,44.405880,0</coordinates>
  </Point>
</Placemark>
```

Abbildung 2: Textbeispiel ein KML-Datei.

Als Grundlage dieser KML-Datei dienen die Daten der geöffneten Messstellen des K2-Messnetzes von Rumänien (Stand: 03/2006). Diese werden wie in Abb. 2 gezeigt in eine Datei unter Berücksichtigung der Beschreibungsvorschriften für das Erstellen von KML-Dateien editiert. Diese KML-Datei kann dann zu der 3D-Applikation Google Earth hinzugefügt werden.

Durch Anklicken an den Punkt „BAP“, der eine Messstation in Bukarest symbolisiert, öffnet sich ein Pullup-Fenster, in dem zusätzliche Information und Links zu anderen Webserver integriert werden können. Ein solcher Link könnte eine Abfrage zu einer dahinterliegenden Datenbank sein, in welchem dann die Messwerte für ein bestimmtes Messereignis angezeigt werden.

- Erstellen einer KML-Datei mit im Internet erhältlichen Tools und Skripte

  Im Internet gibt es eine Vielzahl von frei verfügbaren (public domain/ freeware) und kommerziellen Tools und Skripten, die es ermöglichen aus verschiedenen GIS-Programmen KML-Dateien zu konvertieren. Mit dem freien Software-Tool „shp2kml“ (ZONUM 2007) der Fa. Zonum Solution können Shapefiles in eine KML-Datei konvertiert und in Google Earth eingebunden werden.

Diese mit den zwei aufgeführten Methoden erstellten KML-Dateien können mit Email verschickt oder auf einer Webseite angeboten werden und zusätzlich noch in einer Datenbank gespeichert werden.

Zur Zeit gibt es noch Grenzen für die Einsatzmöglichkeiten, aber diese werden sich durch die kontinuierliche Verbesserung der Funktionalitäten erweitern. Seit November 2007 beschäftigt sich die „KML 2.2 Standards Working Group“ (OGC 2007) mit der OpenGeoSpatial-Standardisierung für die Version KML 2.2.

Dokumentenserver DokuServ des SFB461

Da innerhalb der Laufzeit eines SFBs viele Publikationen und Dokumente anfallen, wurde im Teilprojekt Z1 ein Dokumentenserver eingerichtet. Ziel ist es, die Dokuentation der Ergebnisse und Arbeiten des SFB461 und die zusammenfassenden Publikationen für die internationale Community in einem RDBMS zusammenzufassen und über das Web recherchierbar und verfügbar zu machen.

Architektur des Dokumentenservers

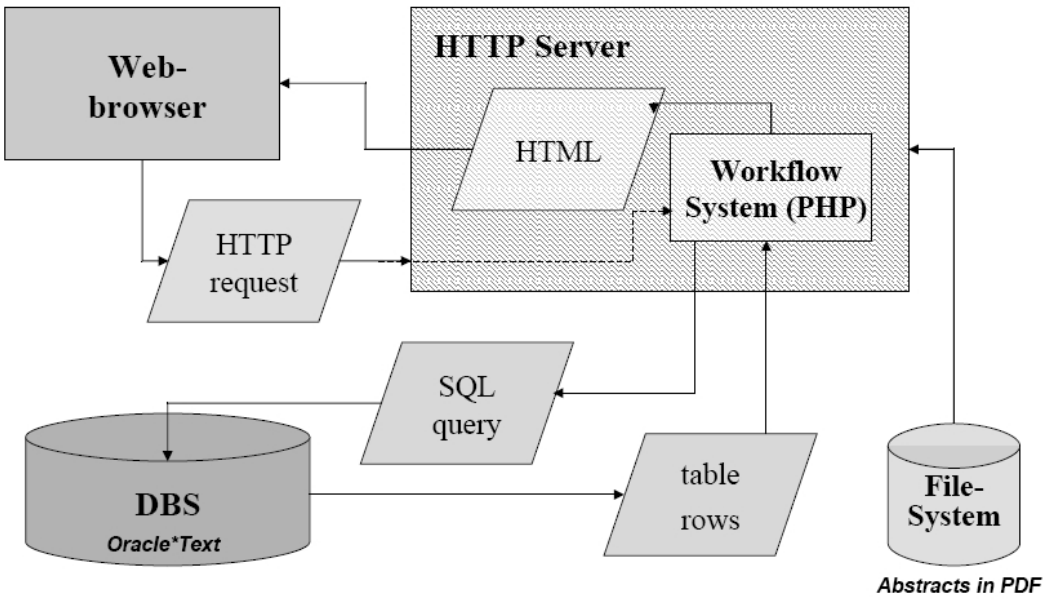


Abbildung 3: Architektur des Dokumentenservers des SFB461.

Über einen Webbrowser stellt der Benutzer einen Anfrage (HTTP-Request) an den Webserver. Das Workflow-System, in diesem Fall mit der Scriptsprache PHP realisiert, formuliert eine entsprechende Select-Anweisung (SQL query) an das Datenbank-System. Die Datenbank übertragt die ausgewählten Tabellenspalten (table rows) an das Workflow-System. Das Workflow-System erzeugt eine HTML-Seite, die dem Webbrowser übermittelt wird (Abb. 3).

Kriterien für Oracle Text

Da das RDBMS Oracle10g®R2 schon als Grundlage der Datenspeicherung für das Geo-Informationssystem vorhanden ist, wurde hier die Cartridge Oracle Text (ORACLE TEXT 2005) mitverwendet. Es bietet folgende Vorteile:

- unterstützt über 150 Dateiformate (Word, PDF, HTML,..),
- multilingual,
- Indexierung von Dokumenteninhalten,
- Relevanz-Gewichtung,
- Volltextabfrage auf Dokumente verschiedenster Formate,
- verschiedene Abfragemöglichkeiten (boolean, Kontextsuche, Wildcards, Stemming, gewichtete Termabfragen),
- Stopwortlisten (für Wörter wie „der“, „die“, „das“, „und“, „the“, ...).

Aufbau der Datenbankstruktur

Um die Datenbankstruktur aufbauen zu können, wurde zuerst festgelegt, welche Metadaten in den Tabellen eingetragen werden müssen. Diese sind:

- Titel,
- Autor(en),
- Schlagwörter (Keywords),
- beteiligte Teilprojekt(e),
- Sprache,
- Copyright,
- Kurzfassung (Abstract),
- externe Verlinkung,
- Reviewed,
- Dateigröße und Anzahl der Seiten,
- Ansprechpartner mit Email-Adresse und Zeitpunkt der Übermittlung des Dokuments,
- Veröffentlichung
    - Herausgeber
    - Buch-/Zeitschriften-Titel
    - Verlag
    - Erscheinungsjahr
    - ISBN / ISBN13 /ISSN
    - von (Seite) bis (Seite).

Nachdem geklärt war, wurde ein ER-Modell (Entity Relationship) zur Modellierung der Datenbankstruktur erstellt, die es gestattet, die Beziehungen der verschiedenen Tabellen zu modellieren (Abb. 4)

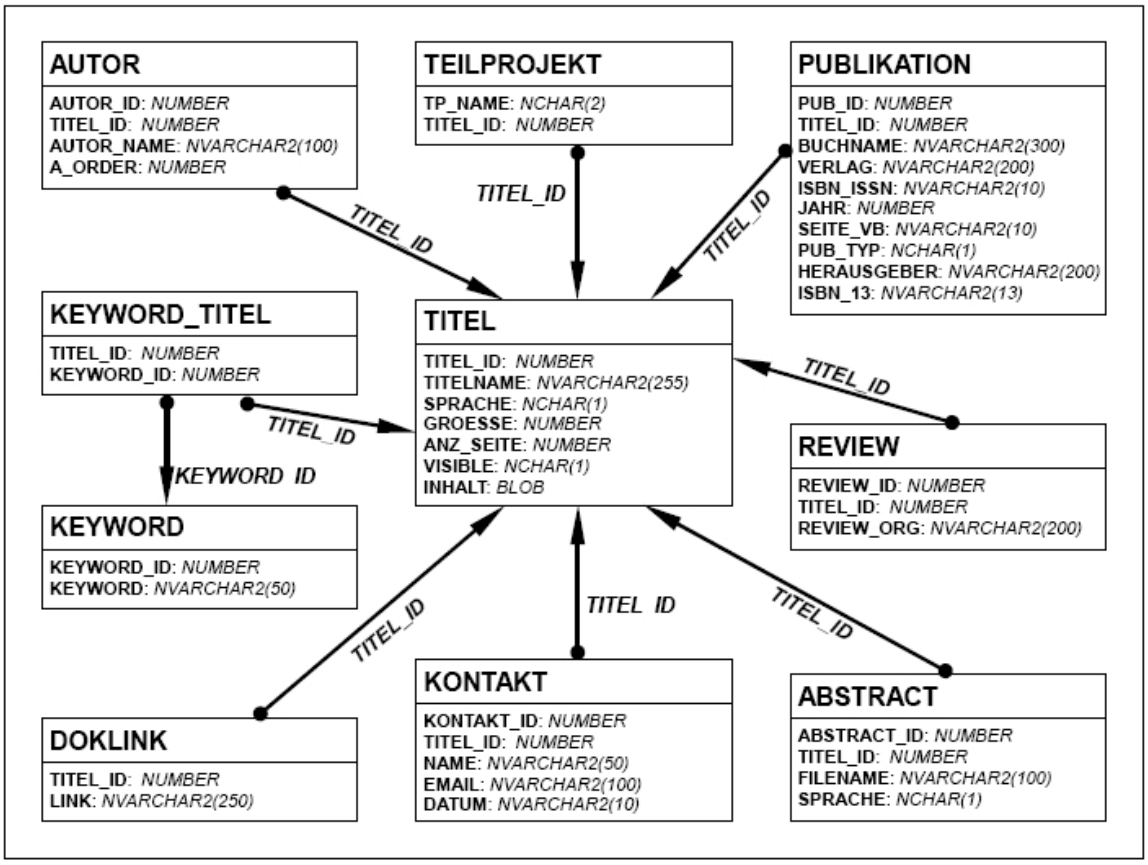


Abbildung 4: ER-Modell des Dokumentenservers.

Das DB-Objekt „TITEL“ bildet hierbei das zentrale Objekt. Jedem neu eingefügten Dokument wird als eindeutige Identifikation eine „TITEL_ID“ übergeben. Diese „TITEL_ID“ ist der Primärschlüssel zur Verknüpfung mit den anderen in Abb. 4 dargestellten Objekten. Des weiteren ednthält diese Tabelle folgende Angaben für das Dokument: Titelname, Sprache, Größe, Anzahl der Seiten. Die Spalte „VISIBLE“ wird mit dem Wert „0“ belegt, sollte das Dokument „Copyright“-geschützt sein, damit es später nicht angezeigt werden kann. Das komplette Dokument wird in die Spalte „INHALT“, der als „BLOB“ vereinbart wurde, eingebracht. Der Spaltentyp „BLOB“ speichert sehr große binäre Dateien in der Datenbank. Dies ist notwendig, da das Format des Dokuments, um in die Datenbank eingepflegt zu werden, als PDF vereinbart wurde. Die meisten gängigen Betriebssysteme wie Windows, Linux, Solaris, Mac OS können dieses Format darstellen. Nebenbei entfällt bei diesem Format die „On The Fly“-Konvertierung bei der Ausgabe aus der Datenbank.

Das DB-Objekt „AUTOR“ speichert die „AUTOR_ID“, den Namen des Autors („AUTOR_NAME“), die „TITEL_ID“ und die Spalte „A_ORDER“. Die Spalte „A_ORDER“ enthält die Reihen-folge der Autoren des Dokumentes.

Das DB-Objekt „TEILPROJEKT“ beschreibt welche(s) Teilprojekt(e) an dem Dokument mitgearbeitet haben.

Das DB-Objekt „ABSTRACT“ beinhaltet die „TITEL_ID“, die „ABSTRACT_ID“, den Dateinamen („FILENAME“) und die Sprache („SPRACHE“) der Kurzfassung (Abstract). Da das Abstract nicht „COPYRIGHT“-geschützt ist, wird es nicht direkt in der Datenbank gespeichert, sondern im Dateisystem des Web-Servers. Die Abstracts werden auch als PDF-formatierte Datei abgelegt. Es ist zudem möglich, Abstracts in verschiedenen Sprachen abzulegen, die durch die Spalte „SPRACHE“ beschrieben sind.

In dem DB-Objekt „PUBLIKATION“ befinden sich der Name des Buches („BUCH-NAME“), in dem das Dokument mit der „TITEL_ID“ veröffentlicht wurde, der Verlag des Buches („VERLAG“), der Herausgeber des Buches („HERAUSGEBER“), die internationale Standardbuchnummer bzw. die internationale Standardseriennummer („ISBN_ISSN“), die Art der Publikation (Buch oder Zeitschrift „PUB_TYP“), die neue 13-stellige ISBN („ISBN_13“), das Jahr der Publikation („JAHR“) und auf welchen Seiten das Dokument innerhalb des Buches oder der Zeitschrift zu finden ist („SEITE_VB“).

In dem DB-Objekt „REVIEW“ wird aufgezeichnet, ob das Dokument reviewed wurde und von wem („REVIEW_ORG“).

In das DB-Objekt „DOKLINK“ kann ein zusätzlicher Verweis des Dokuments auf eine externe Webseite eingefügt werden. Es können auch mehrere Links für ein Dokument eingetragen werden.

Das DB-Objekt „KONTAKT“ beinhaltet den Namen („NAME“) und die Email-Adresse („EMAIL“) des Dokumentenübermittlers und das Datum („DATUM“) der Dokumentenübermittlung. Dieses DB-Objekt wird nur für den internen Gebrauch benötigt, für den Fall, dass möglicherweise zu einem späteren Zeitpunkt Rückfragen betreffend des Dokumentes zu stellen sind.

In dem DB-Objekt „KEYWORD“ sind die Schlagwörter (Keywords) verzeichnet, die über das DB-Objekt „KEYWORD_TITEL“ mit dem Dokument verlinkt sind. Für jedes Dokument können beliebig viele Schlagwörter (Keywords) angegeben werden. Es sollten aber wegen der Übersichtlichkeit maximal 10 Schlagwörter gewählt werden.

Einstellen von Dokumenten bzw. Publikationen in die Datenbank

Der Autor lädt sich vom Webserver des TP Z1 das Formular zur Dokumentenerfassung für den Dokumentenserver des SFB461 herunter, füllt dieses mit den entsprechenden Metadaten aus und schickt es zusammen mit dem Dokument an das TP Z1. Das TP Z1 konvertiert bei Bedarf das Format des Dokumentes nach PDF, pflegt die Metadaten in die Datenbank ein. Anschließend wird das Dokument in die Datenbank übernommen und eine PDF-Volltext-Indizierung gestartet. Das TP Z1 verschickt eine Mitteilung mit einem URL-Link an den Autor, der die Metadaten und das Dokument nach Fehlern überprüft. Wenn das Dokument und dessen Metadaten

richtig sind, benachrichtigt der Autor TP Z1 und das Dokument erhält die endgültige Freigabe im Dokumentenserver. Bei unkorrekten Einträgen nimmt der Autor zur Berichtigung der Einträge Kontakt mit dem TP Z1 auf. Das TP Z1 bessert nach und übermittelt abermals den URL-Link für die Metadaten und das Dokument an den Autor.

Web-Interface des Dokumentenservers

Das Web-Interface des Dokumentenservers wurde mit der Hypertext Markup Language (HTML), die über das Hypertext Transfer Protocol (HTTP) angesprochen wird, als grafische Benutzeroberfläche (GUI) realisiert. Der Vorteil liegt in der Plattformunabhängigkeit, da für jedes netzwerkfähige Betriebssystem ein Webbrowser verfügbar ist.

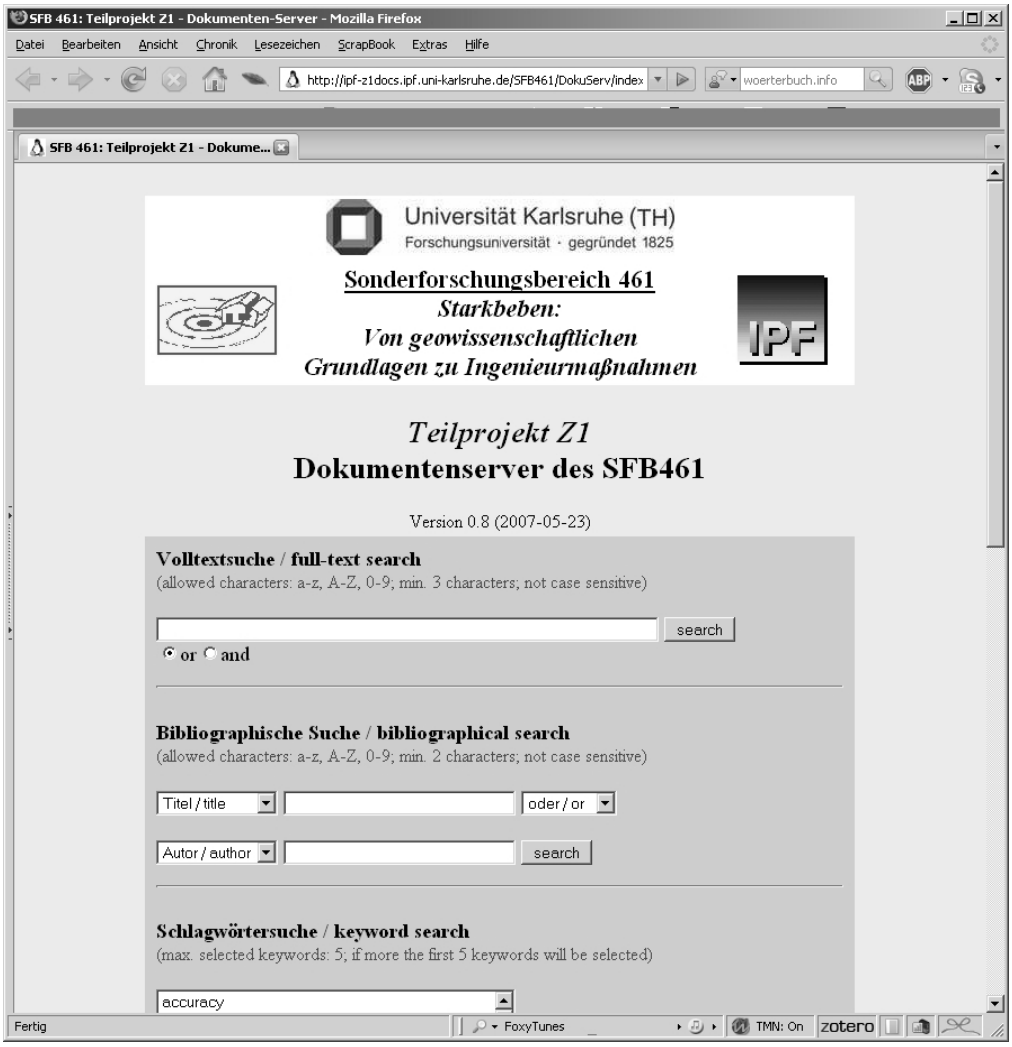


Abbildung 5: Einstiegsseite des Dokumentenservers des SFB461.

In Abbildung 5 ist die Einstiegsseite des Dokumentenserver dargestellt, der folgende Abfragemöglichkeiten bereitstellt:

- Volltextsuche / full-text search
    - ein oder mehrere Wörter verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
    - keine Unterscheidung zwischen Groß- und Kleinschreibung
- bibliographische Suche / bibliographical search
    - Teilwort aus Dokumententitel
    - 2 Teilworte aus Dokumententitel verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
    - Teilwort aus Autorenname
    - 2 Teilworte aus Autorenname verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
    - jeweils 1 Teilwort aus Dokumententitel und Autorenname verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
    - keine Unterscheidung zwischen Groß- und Kleinschreibung
- Schlagwörtersuche / keyword search
    - wählbar sind bis zu 5 Schlagwörter verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
- Teilprojektsuche / project search
    - wählbar sind bis zu 5 Teilprojekte verknüpft mit „oder/or“ oder „und/and“
- Veröffentlichungsjahr-Suche / year of publication search

Bei der Volltextsuche wird der komplette Text des Dokumentes, der indiziert in der Datenbank vorliegt, anhand der vorgebenenen Bedingung durchsucht und bei Erfolg die in Abbildung 6 dargestellte Ergebnisseite angezeigt.

Bei der „bibliographischen Suche“ beschränkt sich die Suche nur auf das Vorkommen des Suchstrings innerhalb des Autorennamens und/oder des Dokumententitels (Abbildung 6).

Bei der „Schlagwörtersuche“ können bis maximal 5 Schlagwörter mit der logischen Verknüpfung „oder/or“ oder „und/and“ selektiert werden. Die Dokumente werden dann entsprechend ihrer hinterlegten Schlagwörter ausgewählt und in der in Abbildung 6 dargestellten Ergebnisseite angezeigt.

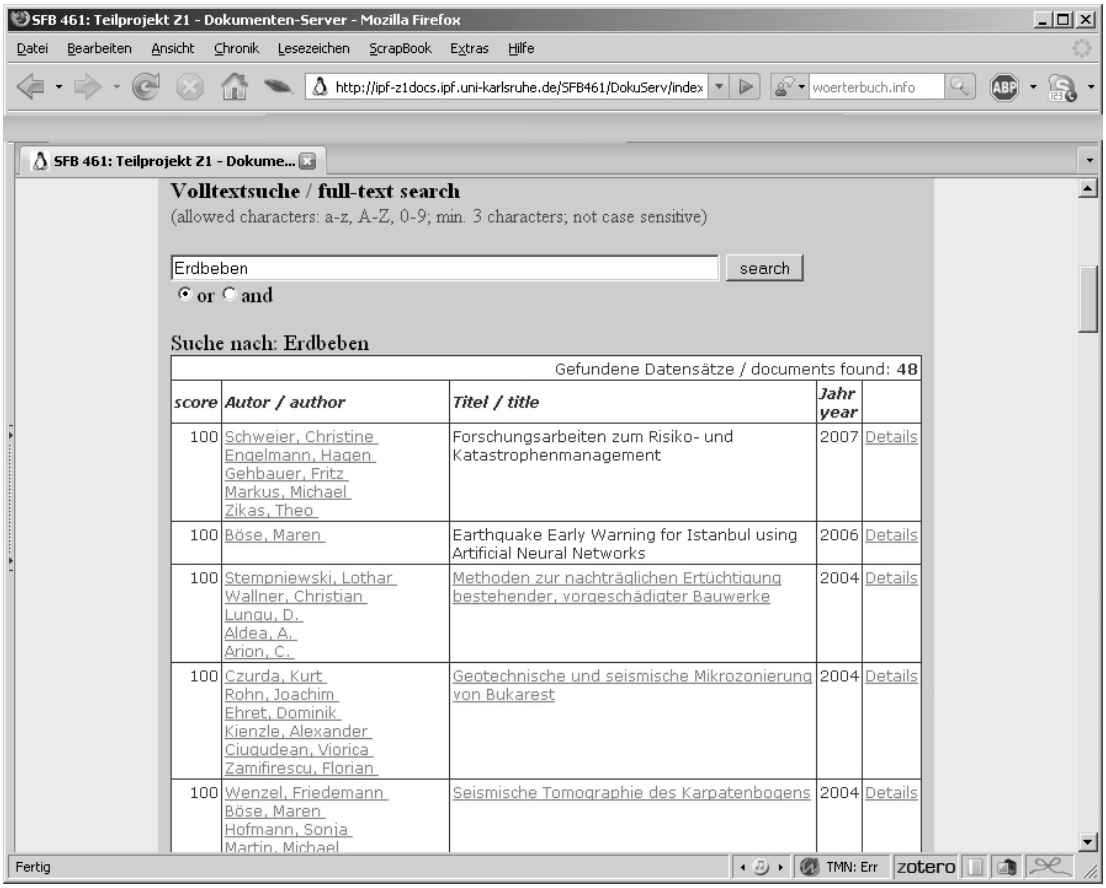


Abbildung 6: Ergebnisseite einer Volltextsuche.

Auf der Ergebnisseite (Abb. 6) wird oberhalb der Ergebnistabelle, der Textstring, der gesucht wurde, aufgeführt. Danach folgt die Ergebnistabelle, die sich in folgende Spalten untergliedert:

- Score

  In dieser Spalte wird die Relevanz des gesuchten Textstrings innerhalb des Dokumentes angezeigt. Der maximal erreichbare Score beträgt 100. Dieser ist ein Algorithmus, der von der Datenbank bei der Abfrage berechnet wird. Oracle Text benützt den Algorithmus der inversen Häufigkeit, basierend auf der Formel von Salton (SALTON 1989).

- Autor / author

  Diese Spalte enthält den Autor bzw. die Autoren, die dieses Dokument erstellt haben. Der Name des Autors ist ein Hyperlink, der auf dem Webserver einen Prozess startet und anschließend als Ergebnis eine Liste der Dokumente aufzeigt, an denen der Autor beteiligt war.

- Titel / title

  Die dritte Spalte enthält den Namen des Dokumentes. Besitzt das Dokument einen Hyperlink, so ist dieses Dokument lesbar. Hat das Dokument keinen Hyperlink, dann unterliegt es entweder dem „Copyright“, darf nicht gezeigt werden, oder es existieren von diesem Dokument nur die Metadaten.

- Jahr / year

  Die vierte Spalte beinhaltet das Jahr der Veröffentlichung.

- Details

  Die letzte Spalte beinhaltet für jedes angezeigte Dokument den Hyperlink „Details“. Durch Klicken dieses Links werden die Metadaten-Informationen des entsprechenden Dokumentes angezeigt (Abbildung 7).

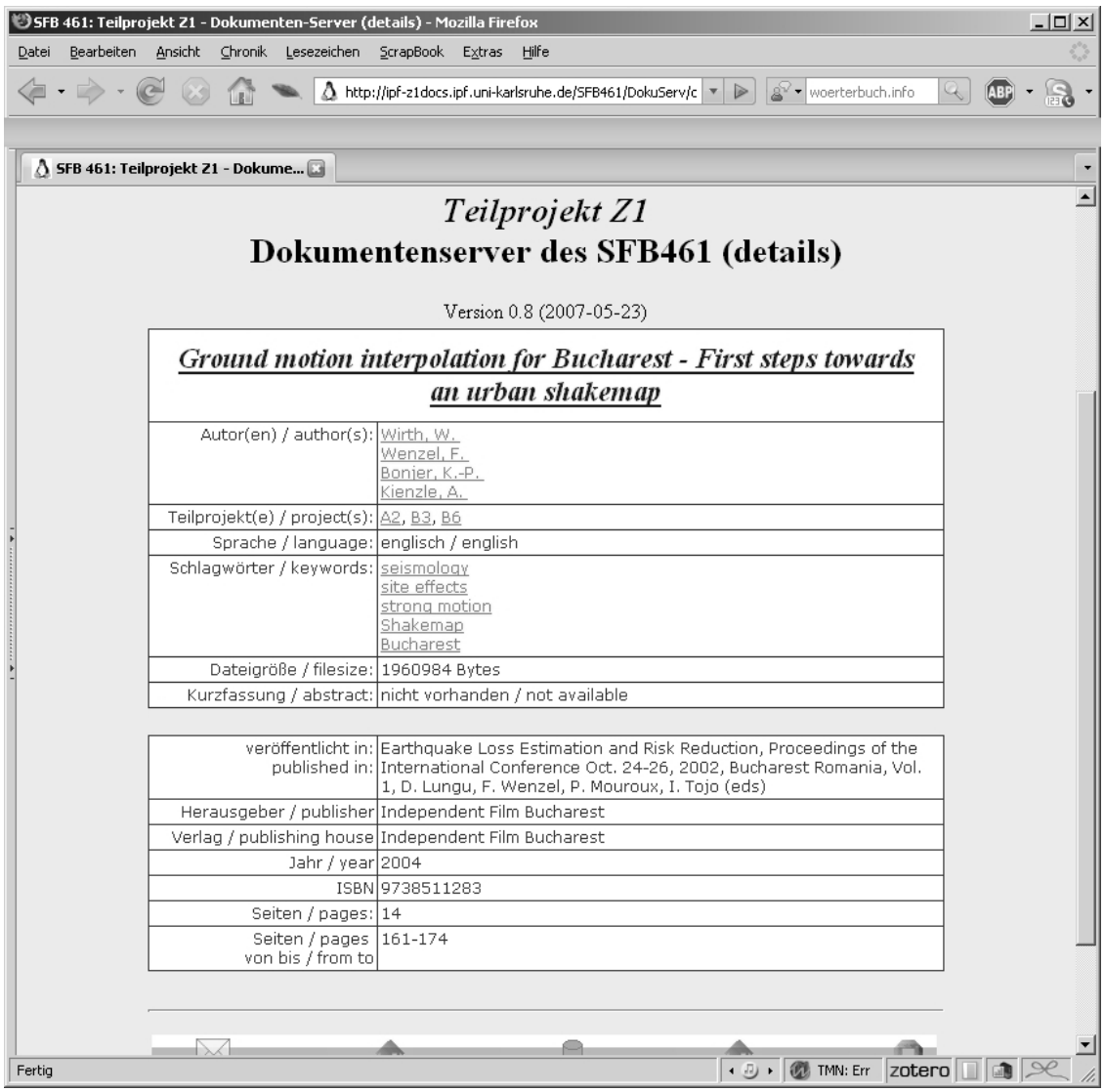


Abbildung 7: Die Detail-Seite des Dokumentenservers.

Auf der Detail-Seite befinden sich die Metadaten des ausgewählten Dokuments. Den Kopf der Tabelle bildet der Titel des Dokumentes, wobei hier das gleiche gilt wie oben unter dem Punkt „Titel / title“ erwähnt. Anschließend folgt die Tabelle mit den Metadaten des Dokuments.

- Autor(en) / author(s)

  Hyperlink der beteiligten Autoren des Dokuments (s.o. unter „Autor / author“),

- Projekt(e) / project(s)

  Hyperlink der an diesem Dokument beteiligten Teilprojekte, durch Klicken erscheint eine Liste der Dokumente, an denen das entsprechende Teilprojekt beteiligt war,

- Sprache / language

  die Sprache des Dokuments,

- Schlagwörter / keywords

  Hyperlink der Schlagwörter. Durch Anklicken werden die Dokumente mit dem gleichen Schlagwort angezeigt,

- Dateigröße / filesize

  die Größe des Dokumentes in Bytes,

- Kurzfassung / abstract

  steht in dieser Zeile „nicht vorhanden / not available“ existiert zu diesem Dokument keine Kurzbeschreibung, gibt hierzu eine Kurzbeschreibung. Entsprechend der hier als Hyperlink aufgeführten Sprachen (z.B. „deutsch“, „english“) gibt es die Kurzfassung (abstract) in der entsprechenden Sprache. Hier können auch Kurzfassungen in anderen als den erwähnten Sprachen eingebunden werden,

- veröffentlicht in / published in

  Buch- oder Zeitschriftentitel,

- Herausgeber / publisher

  Name des Herausgebers,

- Verlag / publishing house

  Name des Verlags,

- Jahr / year

  Jahr der Veröffentlichung,

- ISSN /ISBN,

- reviewed

  Wenn das Dokument „reviewed“ wurde, steht in dieser Zeile, wer es reviewed hat, andernfalls ist diese Zeile ausgeblendet,

- Seiten / pages

  Anzahl der Seiten des Dokuments,

- Seiten von bis / pages from to

  Die Seiten innnerhalb der Zeitschrift oder des Buches,

- ISBN-13

  existiert die neue 13-stellige ISBN wird dies hier angezeigt, andernfalls wird diese Zeile ausgeblendet.

Zur Zeit befinden sich im Dokumentenserver mehr als 230 Dokumente.

Eingebundene Geodaten in GIS

Folgende Geodaten wurden in das GIS integriert:

- mit Geo-Referenzierung
  - Rumänien
    - Romplus3: Erdbeben-Ereignisse in Rumänien mit Magnitude>=3
    - K2-Erdbeben-Meßstationen-Netz v. Rumänien
    - Geologische Karte
    - World-Stress-Map-Daten
    - Schusspunkte des Refraktionsprojektes VRANCEA99
    - Geophone des Refraktionsprojektes VRANCEA99
    - CALIXTO’99 Messstationen
    - Makroseismische Karte v. 10. 11. 1940

      Layer 1: Epizentrum

      Layer 2: Schadenskartierung

      Layer 3: Schadensklassen
    - Makroseismische Karte v. 04.03.1977

      Layer 1: Epizentrum

      Layer 2: Schadenskartierung

      Layer 3: Schadensklassen

- Makroseismische Karte v. 30.08.1986
  - Layer 1: Epizentrum
  - Layer 2: Schadenskartierung
  - Layer 3: Schadensklassen
- Makroseismische Karte v. 30.05.1990
  - Layer 1: Epizentrum
  - Layer 2: Schadenskartierung
  - Layer 3: Schadensklassen
- Makroseismische Karte v. 31.05.1990
  - Layer 1: Epizentrum
  - Layer 2: Schadenskartierung
  - Layer 3: Schadensklassen
- Landesgrenze
- Provinzen
- Provinzhauptstädte
- Ansiedlungen
- Digitales Geländemodell 2.5 * 2.5 Minuten
- Höhenlinien in 100-Meter Auflösung
- Gewässernetz
- Energieversorgung
- Straßennetz
- Hauptschienennetz

- Bukarest
  - Stadtumrandung
  - Straßenmittenlinien
  - Grundstücke, Flurstücke, Straßen

    klassifiziert in
    - Straßen, Parkplätze und undefiniert
    - vorstädtische und städtische Siedlungen
    - Seen, Flüsse, Kanäle

- Industrie
- Agrarflächen
- Parks, Gärten, Sportflächen
- Friedhöfe
- Wälder
- Weinberge, Obstgärten, Gewächshäuser

- Testgebiet Bukarest
  - Gebäude
  - Gebäudeknoten
  - Gebäude mit spezieller Risikoklasse
  - Straßen
  - Straßenknoten
  - Straßenblöcke
  - Tankstellen
  - Botschaften
  - Krankenhäuser
  - Hotels
  - Metro-Stationen
  - Restaurants
  - Säle, Hallen
  - Lage der Down- und Crosshole-Messungen 2005
  - Geologische Modell
    - Ergebnisse der Interpolation der Mächtigkeit der obersten 6 quartären Schichten
    - Eingangsdaten für die Interpolation
  - Grundwasserstand im Colentina-Aquifer (interpoliert)
  - Lage der Erkennungsbohrungen, durchgeführt im NATO-Projekt in Kooperation mit dem NIEP

- ohne Geo-Refernezierung (Inselkarten)
    - Karte von Onesti im Maßstab 1:5.000 (digitalisiert und bereitgestellt von C3/Institut für Maschinenwesen im Baubetrieb)
    - Karte von Onesti Nr. L-35-(28-B) im Maßstab 1:50.000 (digitalisiert im Auftrag vom Institut f. Photogrammetrie und Fernerkundung
    - Karte von Cimpuri Nr. L-35-(20-D) im Maßstab 1:50.000 (digitalisiert im Auftrag vom Institut f. Photogrammetrie und Fernerkundung)

Eingebundene Sachdaten in Datenbank

Folgende Sachdaten wurden in die Datenbank integriert:

- Acceleration-Daten (Beschleunigungsdaten) von Erdbeben in Rumänien mit Magnitude >= 4,
- Response-Spektren (Antwort-Spektren) von Erdbeben in Rumänien mit Magnitude >= 5,
- K2-Messparameter,
- K2-Sensor-Parameter,
- Gebäudebeschreibung vom Testgebiet in Bukarest,
- Gebäudeklassen vom Testgebiet in Bukarest,
- Romplus3-Daten,
- K2-Stations-Beschreibung,
- Versuchsergebnisse der Crosshole-Messungen (2005),
- Versuchsergebnisse der Downhole-Messungen (2005),
- Versuchsergebnisse der Refraktionsseismik-Messungen (2005).

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

-

5.2.1.4 Offene Fragen

Derzeit basiert die technische Infrastruktur (Datenbanken, GIS-Software, Webserver, Applikationsserver, Betriebssysteme) zu einem Teil auf kommerzieller – und damit kostenpflichtiger – Software (ORACLE, ArcGIS). Neue Entwicklungen im Open-Source-Bereich werden in nächster Zukunft erlauben, wesentliche proprietäre Komponenten durch freie zu ersetzen:

Das Datenbanksystem PostgreSQL (POSTGRESQL 2007) wird in der Version 8.3 eine vollständige Volltextverwaltung enthalten. Die Geo-Erweiterung PostGIS (POSTGIS 2007) wird in der zukünftigen Version 9.3 der GIS-Software ArcGIS-SDE unterstützt werden. Zahlreiche OpenSource-GIS Programme (FREEGIS 2007) verwenden bereits PostGIS als Datenhaltungskomponente.

ArcIMS als Web-Service kann durch UMN-Mapserver (MAPSERVER 2007) oder Geoserver (GEOSERVER 2007) mit Mapbender (MAPBENDER 2007) mittlerweile problemlos ersetzt werden.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt Z1 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Barthelme, N. (1995): Geoinformatik: Modelle Strukturen Funktionen. Heidelberg und Berlin: Springer.

Buhmann, E., Wiesel, J. (2007): GIS-Report. Software Daten Firmen. Karlsruhe: Bernhard Harzer.

FreeGIS (2007): FreeGIS. http://www.freegis.org/.

GeoServer (2007): GeoServer. http://geoserver.org/.

Google Earth (2007):KML 2.1 Tutorial. http://code.google.com/apis/kml/documentation/kml_21tutorial.html.

Mapbender (2007): Mapbender. http://www.mapbender.org/.

MapServer (2007): MapServer. http://mapserver.gis.umn.edu/.

OGC (2007): KML 2.2 SWG. http://www.opengeospatial.org/projects/groups/kml2.2swg.

OGIS (2007): Open Geodata Interoperability Specification. http://www.opengis.org/.

Oracle Text (2007): Oracle Text Reference 10g Rekease 2 (10.2). Oracle. http://download.oracle.com/docs/cd/B19306_01/text.102/b14218/toc.htm.

PostGIS (2007) : PostGIS. http://www.postgis.org.

PostgreSQL (2007) : PostgreSQL. http://www.postgresql.org/.

Salton, G. (1989: Automatic Text Processing: The Transformation, Analysis, and Retrieval of Information by Computer. Reading (MA), Addison-Wesley.

Weisbrich, W., Wiesel, J. (2004): Betrieb des zentralen Geo-Informationssystems (GIS).In: SFB 461 Starkbeben: Von wissenschaftlichen Grundlagen zu Ingenieurmaßnahmen. Berichtsband für die Jahre 2002-2004, Karlsruhe.

Zonum (2007): shp2kml 2.0: Shape-file to Google Earth, Zonum Solutions. http://www.zonums.com/shp2kml.html.

5.2.2 Liste der aus dem Teilprojekt seit der letzten Antragstellung entstandenen Publikationen

-

5.2.2.1 Referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

-

b) auf wesentlichen Fachkongressen

-

c) in Monographien

-

5.2.2.2 Nicht referierte Veröffentlichung

a) in wissenschaftlichen Zeitschriften

-

b) auf wesentlichen Fachkongressen

-

c) in Monographien

-

5.2.2.3 Vorträge

-

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von Juli 1996 bis Dezember 2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	165.381 €	34.613 €	0	199.994 €
2005	0	11.300 €	0	11.300 €
2006	0	6.500 €	0	6.500 €
2007	0	6.500 €	0	6.500 €
Summe	165.381 €	58.913 €	0	224.294 €

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Wiesel, J., Dr., AD Bähr, H.-P., Prof. Dr. Vögtle, T., Dr. AOR Weidner, U., Dr.	Bildanalyse, GIS Bildanalyse, GIS Bildanalyse, GIS Bildanalyse, GIS	IPF IPF IPF IPF	07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 01/2003–12/2007	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Ringle, K., Dipl.-Ing. (FH) Weisbrich, W., Dipl.-Ing. (FH)		IPF	07/1996–12/2007 07/1999–12/2007	
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)					
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Weisbrich, W., Dipl.-Ing. (FH)		IPF	07/1996–06/1999	

Teilprojekt Z2

Zentrale Angelegenheiten

Arbeitsbericht Phase IV

(01.01.2005 - 31.12.2007)

An diesem Bericht haben mitgewirkt:

PD Dr. Joachim Ritter[1]
Prof. Dr. Günter Schmitt[2]
Dipl. Geoökol. Ulrike Sturm[3]

[1]Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
[2]Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
[3]Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Universität Karlsruhe (TH)

5.1 Allgemeine Angaben zum beendeten Teilprojekt Z2

5.1.1 Titel:

Zentrale Angelegenheiten

5.1.2 Fachgebiete und Arbeitsrichtung:

5.1.3 Leiter:

PD Dr. Ritter, Joachim, 16.10.1963
Prof. Dr. Wenzel, Friedemann, 17.01.1951
Geophysikalisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe, Germany
Tel.: 0721-608-4539 (J.R.) 0721-608-4431 (F.W.)
Fax: 0721-71173
E-Mail: joachim.ritter@gpi.uni-karlsruhe.de
friedemann.wenzel@gpi.uni-karlsruhe.de

5.1.4 Mitarbeiter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Günter Schmitt, Geodätisches Institut
Dr. Maren Böse, Geophysikalisches Institut
Dipl.-Geoökol. Ulrike Sturm, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung
Silvia Bachmann, SFB461

5.1.5 Rumänische Partner:

Prof. Dr. Corneliu Dinu, Bucharest University
Prof. Dr. Dan Lungu, Technical University, Bucharest
Prof. Dr. Gheorge Marmureanu, National Institute for Earth Physics, Bucharest
Prof. Dr. Johan Neuner, Technical University, Bucharest

5.2 Bericht über die Entwicklung des Teilprojekts

5.2.1 Bericht

Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojektes Z2 wurden zentral die verwaltungstechnischen und organisatorischen Aufgaben des SFB 461 koordiniert und erledigt. TP Z2 war somit ein rein auf Serviceaufgaben beschränktes Teilprojekt ohne direkte wissenschaftliche Arbeit. Im Rahmen des Teilprojektes Z2 wurden von der Geschäftsführung und dem Vorstand des SFB 461 alle zentralen und übergeordneten Aufgaben übernommen, um die Mitarbeiter in den wissenschaftlichen Teilprojekten zu entlasten und unterstützen. Über das Teilprojekt Z2 wurden Sitzungen des Koordinierungsgremiums und des Vorstands organisiert sowie der Kontakt zur DFG gehalten. Die organisatorische Unterstützung des SFB durch TP Z2 hat die kohärente wissenschaftliche Arbeit des gesamten SFB stark gefördert. Das Konzept einer zentralen SFB Verwaltung hat sich daher über die gesamte Laufzeit des SFB bewährt und kann uneingeschränkt weiterempfohlen werden.

Die Aufgabenstellung betraf zum einen die Abrechnung der Mittel der einzelnen Teilprojekte, um deren wissenschaftliches Personal zu entlasten. Zum anderen wurde die Verwendung und Abrechnung der gemeinsamen, zentral bewirtschafteten SFB-Mittel vorgenommen. Weitere Aufgaben waren beispielsweise: Außendarstellung des SFB, Organisation des 2-tägigen SFB Workshops in Freudenstadt im Januar 2006, Organisation der Abschlusskonferenz in Bukarest im Oktober 2007, Edition der Konferenz-Proceedings, Koordinierung des SFB-Seminars mit externen und internen Rednern, Edition des Abschlußberichts.

Die personelle Organisation des TP Z2 bestand aus einer verantwortlichen Geschäftsführerin, Frau Dr. Maren Böse, die vom Leiter der Geschäftstelle und Teilprojektleiter, Herrn PD Dr. Joachim Ritter, unterstützt wurde. Zum Abschluss des SFBs wurde die Geschäftsführung von Frau Ulrike Sturm unterstützt, die nach der Beendigung der Förderung durch die DFG als Geschäftsführerin die Endabwicklung und Berichterstattung koordinierte.

5.2.1.1 Kenntnisstand bei der letzten Antragstellung und Ausgangsfragestellung

Entfällt, da reines Service Projekt ohne wissenschaftliche Arbeiten

5.2.1.2 Angewandte Methoden, Ergebnisse und ihre Bedeutung

Entfällt, da reines Service Projekt ohne wissenschaftliche Arbeiten

5.2.1.3 Vergleiche mit Arbeiten außerhalb des Sonderforschungsbereiches

Entfällt, da reines Service Projekt ohne wissenschaftliche Arbeiten

5.2.1.4 Offene Fragen

Das Teilprojekt konnte ohne Schwierigkeiten sehr erfolgreich durchgeführt werden.

5.2.1.5 Grund für die Beendigung des Teilprojekts

Das Teilprojekt Z2 endet durch das Auslaufen des SFB 461.

5.2.1.6 Literatur

Entfällt, da reines Service Projekt ohne wissenschaftliche Arbeiten.

5.3 Bewilligte Mittel für die laufende Förderperiode

Das Teilprojekt wurde im Sonderforschungsbereich von 01/2005 bis 12/2007 gefördert.

Haushaltsjahr	Personalmittel	Sachmittel	Investitionsmittel	Gesamt
bis 2004	542.698 €	1.206.842 €	--	1.749.540 €
2005	42.000 €	112.500 €	--	154.500 €
2006	42.000 €	137.500 €	--	179.500 €
2007	42.000 €	136.000 €	--	178.000 €
Summe	**668.698 €**	**1.592.842 €**	**--**	**2.261.540 €**

5.3.1 Personal im Teilprojekt

	Name, akad. Grad, Dienststellung	engeres Fach des Mitarbeiters	Institut der Hochschule oder der außeruniv. Einrichtung	im SFB tätig von (Monat/ Jahr) bis (Monat/ Jahr)	Entgelt-gruppe
Grundausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Wenzel, F., Dr., Professor Schmitt, G., Dr., Professor Ritter, J., PD Dr., Akadem. Rat Böse, M., Dr., wiss. Angestellte (w.A.) Sturm, U., Dipl. Geoökol., w.A.	Sprecher des SFB 461 Sprecher des SFB 461 Leiter der Geschäftsstelle (GS) Geschäftsführung Geschäftsführung	GEOK GIK GEOK GEOK IPF	07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 07/1996–12/2007 01/2005–11/2007 10/2007–04/2008	
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Bartman, G., Verwaltungsangestellte Bigott, M., Verwaltungsangestellte		GPI GIK	01/2005–01/2006 01/2006–12/2007	
Ergänzungsausstattung					
wissenschaftl. Mitarbeiter (einschl. Hilfskräfte)	Sturm, U., Dipl. Geoökol., w.A. Jüngert, A., Dipl.-Geophys. Veile, I. Büchler, R., MA Flores, I.	Unterstützung der GS Unterstützung der GS Unterstützung der GS Unterstützung der GS Unterstützung der GS	IPF GEOK GEOK GEOK GPI	07/2005–09/2007 02/2005–04/2006 04/2006–07/2006 09/2006–10/2006 08/2007–10/2007 12/2007	0,5 E13 st. HK st. HK wiss. HK st. HK
nichtwissenschaftl. Mitarbeiter	Bachmann-Perathoner, S.		GEOK	07/1996–12/2007	E 8

SFB 461

Universität Karlsruhe (TH)

ISBN: 978-3-86644-234-4
www.uvka.de