

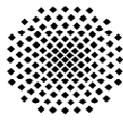
Abschlussbericht

DFG Forschergruppe 581 „Großhang“

Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen für die Modellierung von Großhangbewegungen

**Förderzeitraum: 1.1.2008 bis 31.12.2011
(einige Teilprojekte bis in 2012 bzw. 2013)**





DFG Forschergruppe 581

„Großhang“

Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen für die Modellierung von Großhangbewegungen

Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Stellvertretender Sprecher: Prof. Dr.-Ing. Erwin Zehe

- ZTP: Projekt- und Informationsmanagement,
TU Berlin, BTU Cottbus**
- TP1a: Hydrologie, KIT Karlsruhe, U Stuttgart**
- TP1b: Angewandte Seismik, U Potsdam**
- TP2: Untergrundhydraulik, TU Berlin, U Stuttgart**
- TP3: Kontinuumsmechanik, U Stuttgart**
- TP4: Experimente technische Skala, U Stuttgart**
- TP5a,c: Geophysik, U Stuttgart**
- TP5b: Geophysik, UFZ Leipzig**

Inhaltsverzeichnis

1 Wissenschaftlicher Teil	3
1.1 Zusammenfassung	3
1.2 Abschlussbericht ZTP	5
1.2.1 Allgemeine Angaben	5
1.2.2 Zusammenfassung	16
1.3 Abschlussbericht TP1a	19
1.3.1 Allgemeine Angaben	19
1.3.2 Zusammenfassung	32
1.4 Abschlussbericht TP1b	35
1.4.1 Allgemeine Angaben	35
1.4.2 Zusammenfassung	46
1.5 Abschlussbericht TP2	49
1.5.1 Allgemeine Angaben	49
1.5.2 Zusammenfassung	61
1.6 Abschlussbericht TP3	64
1.6.1 Allgemeine Angaben	64
1.6.2 Zusammenfassung	77
1.7 Abschlussbericht TP4	80
1.7.1 Allgemeine Angaben	80
1.7.2 Zusammenfassung	92
1.8 Abschlussbericht TP5a und TP5c	95
1.8.1 Allgemeine Angaben	95
1.8.2 Zusammenfassung	106
1.9 Abschlussbericht TP5b	109
1.9.1 Allgemeine Angaben	109
1.9.2 Zusammenfassung	122
2 Programmspezifischer Teil	124
2.1 Wurden die im Antrag formulierten Forschungsziele erreicht oder gab es Änderungen? Wenn ja, welche?	124
2.2 Welcher wissenschaftliche Zugewinn wurde durch den Verbund erzielt? Wurden strukturelle Maßnahmen ergriffen, durch die Zusammenarbeit gestaltet und der Verbund gestärkt wurde (z.B. Module Forschergruppen-Professuren, befristete Freistellungen, Fellow-Programm, Transferprojekte)?	124

2.3	In welcher Form fand eine thematische oder örtliche Schwerpunktsetzung statt?	125
2.4	Wie schätzen Sie die internationale Sichtbarkeit der Forschergruppe ein?	127
2.5	Durch welche Maßnahmen wurde der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert?	128
2.6	Welche Maßnahmen zur Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wurden umgesetzt?	129
2.7	Ggf. Transferaspekte: Wurden aus Anwendungssicht Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik erreicht und wenn ja, welche? Lassen sich daraus Folgeprojekte ableiten?.....	129
2.8	Haben Sie sonstige Hinweise an der DFG?	131
3	Übersichten und Verzeichnisse.....	132
3.1	Angaben zu Promotionen, Habilitationen und Berufungen von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern aus den Teilprojekten	132
3.2	Wichtigste Veröffentlichungen und Patente	132

1 Wissenschaftlicher Teil

1.1 Zusammenfassung

Die Forschergruppe Großhang war eine interdisziplinäre Forschergruppe, die sich mit der Modellierung von Strömungs- und Deformationsprozessen für die Modellierung von Großhangbewegungen befasst hat. Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand der Heumöser Hang im Vorarlberg, Österreich, wobei es sich um einen Kriechhang mit jährlichen Bewegungsraten im Bereich von Zentimetern bis wenigen Dezimetern handelt. Während ein Großteil der Hangrutschungsforschung an bereits abgerutschten Hängen durchgeführt wurde, haben wir ein noch intaktes, sich ‚bewegendes‘ Natursystem untersucht. Es wurde ein fundiertes System-, Struktur- und Prozessverständnis entwickelt, um das Natursystem Heumöser Hang hinsichtlich seiner komplexen räumlichen Strukturmuster und deren Dynamik abzubilden und um die zum Teil stark gekoppelten Prozesse Niederschlag, Oberflächenabfluss, Infiltration und Strömungsdynamik im Untergrund sowie Deformation teilgesättigter Böden über eine große Bandbreite von räumlichen und zum Teil auch zeitlichen Skalen zu beschreiben. Die Entwicklung geeigneter Erkundungs-, Monitoring- und Simulationsmethoden stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar, und wir haben in verschiedenen Bereichen dazu substantielle Fortschritte erzielen können, die nur im Rahmen eines solchen interdisziplinären Verbundes möglich waren.

Für die Schlüsselprozesse der Großhangbewegung am Heumöser Hang, die schnelle Infiltration in makroporöse Böden und die Entwicklung von Scherbändern, wurde das Prozessverständnis im Labor und im Feld verbessert und es wurden geeignete Modellkonzepte sowie Simulations- und Kopplungsmethoden entwickelt (Makroporeninfiltration: diskreter Ansatz für kleine Skala (Kaskadenmodell) und Zweiphasen-Doppelpermeabilitätsansatz für große Skala; Scherbänder: Erweiterung eines elasto-viskoplastischen thermodynamisch konsistenten Dreiphasenmodells für Sand; Kopplungsmethoden Oberflächenabfluss - Infiltration). Des Weiteren wurden ein physikalisch-basiertes hydrologisches Gebietsmodell, ein robustes Niederschlags-Oberflächenabflussmodell basierend auf den Flachwassergleichungen, ein datengetriebenes Stabilitäts- und Bewegungsmodell, eine Modellerweiterung zur Berücksichtigung einer vierten, erosiven Phase und ein Web-basiertes Informationsmanagement entwickelt.

Es wurden verschiedene geophysikalische Methoden und Techniken weiterentwickelt, die z.T. erstmalig für Großhangbewegungen bzw. an Kriechhängen eingesetzt wurden. Durch Kombination solcher Methoden waren gegenseitige Plausibilitätstests möglich. So konnten seismische und Bohrlochmessungen zum Erkennen von Schichtgrenzen verglichen werden, und es konnten seismische und nanoseismische Methoden zur Bestimmung von Isopachen (Linien gleicher Mächtigkeit von Schichten) kombiniert werden. Es wurde auch Technologie entwickelt, sog. UAV (Unmanned Aerial Vehicle), wobei es sich um ca. 1 m große ferngesteuerte Flugzeuge handelt, die eine hochauflösende Oberflächenerkundung (Höhen, Landnutzung) ermöglichen.

Projekt- und Informationsmanagement

Zentrales Teilprojekt im Rahmen der Forschergruppe

Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen

**apl. Prof. Dr.-Ing. Frank Molkenthin
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann**

17.04.2013

Brandenburgische Technische Universität
in Kooperation mit der Technische Universität Berlin

1.2 Abschlussbericht ZTP

1.2.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.2.1.1 DFG Geschäftszeichen

HI 640/4-3

1.2.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

apl. Prof. Dr.-Ing. Frank Molkenthin

Professorenstellenvertreter, geb. 14. September 1964, Deutscher

Lehrstuhl Environmental Informatics

Brandenburgische Universität Cottbus, Konrad-Wachsmann-Allee 1, 03045 Cottbus

Tel.: 0355 / 69 2139, Fax: 0355 / 69 2188

Frank.Molkenthin@tu-cottbus.de

Privatadresse: Birlingerweg 14, 14089 Berlin, Tel.: 030 / 9212 3883

zusammen mit

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Universitätsprofessor, geb. 30. November 1962, Deutscher

Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung

Institut für Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin, Sekr. TIB 1 - B 14, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin, Tel.: 030 / 314 23961, Fax: 030 / 314 22910,

Reinhard.Hinkelmann@wahyd.tu-berlin.de, www.wahyd.tu-berlin.de

Privatadresse: Wilhelm-Bluhm-Str. 42, 30451 Hannover, Tel.: 0511 / 715460

1.2.1.3 Thema des Projekts

Projekt- und Informationsmanagement

1.2.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum begann am 1.1.2009 und endete am 31.12.2011. Siehe auch die Anmerkungen zu 1.7.

1.2.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Hinkelmann,R., Zehe,E., Ehlers,W. & Joswig,M. (2011): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies. Vadose Zone J. 10:473,476, doi:10.2136/vzj2011.0032

- b)** Hinkelmann,R. & Zehe, E. (2010): Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes. International Conference Triggering of Rapid Mass Movements in Steep Terrain - Mechanism and Risks, Monte Verita, Switzerland, abstract and keynote lecture
- Li,C.Y., Notay,K.V. & Molkenthin,F. (2012): Time Series Scenario Composition Framework in Hydroinformatic Systems, Proceedings Hydroinformatics Conference 2012, Hamburg, reviewed paper and oral presentation
- Molkenthin,F., Meienberg,C. & Hinkelmann,R. (2010): Information Management of Multi-Scale Physical State Variables in an Interdisciplinary Research Unit. In: Curdt/Bareth (eds.), Geographisches Institut der Univ. Köln, Kölner Geographische Arbeiten, Heft 90, Tagungsband DFG-SFB TR32 Workshop „Data Management“, Köln/Germany, ISSN 0454-1294, reviewed paper
- Molkenthin,F., Notay,K.V., Li,C.Y., Hinkelmann,R. & Stadler,L. (2009): Model Integration and Coupling in a Hydroinformatics System. European Group for Intelligent Computing in Engineering EG-ICE Workshop, paper and oral presentation, Berlin, Book Series of the Department of Civil Engineering, Technische Universität Berlin 01, pp. 218 - 225, ISBN 978-3-8322-8287-5
- Notay,K.V., Li,C.Y. & Molkenthin,F. (2010): Model Integration and Coupling in a Hydroinformatics System. Proceedings of the First IAHR European Congress, Edinburgh, UK, paper and oral presentation
- Notay,K.V., Li,C.Y., Molkenthin,F., Simons,F. & Hinkelmann,R. (2010): Model Integration and Coupling in a Hydroinformatics System. Proceedings of the Ninth International Conference on Hydro-Science and Engineering, in Book of Abstracts p. 47, paper and oral presentation, Chennai, India
- Notay,K.V., Li,C.Y. & Simons,F. (2010): Model Coupling by the Use of Autonomous Tensor Objects. Proceedings of Forum Bauinformatik 2010, Berlin, Heftreihe des Instituts für Bauingenieurwesen, TU Berlin, Band 9, Shaker Verlag, Seiten 161-168, paper and oral presentation
- Notay,K.V., Stadler,L., Simons,F., Molkenthin,F. & Hinkelmann,R. (2012): Model Coupling in Hydroinformatics Systems through the Use of Autonomous Tensor Objects. Proceedings Hydroinformatics Conference 2012, Hamburg, reviewed paper and oral presentation.

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.2.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

In der ersten Förderphase wurde weitgehend in Eigenleistung das Konzept eines Web-basierten durchgängigen Informationssystems („Turtle“) entwickelt und für hydrologische Zeitreihen von Messdaten am Heumöser Hang (u.a. Niederschlag, Temperatur, Feuchtigkeit, Abfluss) eingeführt. Dieses Informationssystem ist die Basis der Arbeiten im zentralen Teilprojekt in der zweiten Förderphase. Durch die Erweiterung der Feldmessungen (neben der Fortführung der bisherigen Messungen) standen zwei erweiterte Zielsetzungen im Informationsmanagement im Fokus der Arbeiten: die Erweiterung des Systems mit GIS-Komponenten für die geplanten räumlich, geophysikalischen Messkampagnen und die Installierung einer Metadatenkomponente für die Verwaltung, Archivierung und langfristigen Nutzung der heterogenen Informationen. Des Weiteren diente das Informationssystem als Ausgangspunkt für die in der zweiten Förderphase als Ziel gesetzte Kopplung ausgewählter Simulationsmodelle und in Eigenleistung der effizienten Bestimmung von Eingangsdaten für die Simulationsmodelle in Form von Anfangs- und Randbedingungen durch Analyse der mehrjährigen Feldmessdaten mit Methoden der Ereignis – und Prozesserkennung. Das zentrale Teilprojekt diente darüber hinaus dem Projektmanagement: Hier waren bis auf die Einbindung der neuen Teilprojekte gegenüber der ersten Förderphase keine wesentlichen neuen Zielsetzungen geplant.

1.2.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Die Zielsetzung des Projektes und die daraus abgeleiteten, geplanten Arbeiten setzten für die Durchführung eine wissenschaftliche Mitarbeiterstelle mit natur- und ingenieurwissenschaftlichen Kenntnissen mit Bezug zum Wasser und Untergrund voraus. Leider wurde nur eine Technikerstelle aus dem Bereich der Informatik bewilligt. Aufgrund der angespannten Lage auf dem Arbeitsmarkt für Fachinformatiker (hohe Nachfrage aus der Wirtschaft) konnte erst nach zweimaliger Ausschreibung zum 24.08.2009 eine Mitarbeiterin mit Verspätung eingestellt werden. Die eingestellte Person (FH-Absolventin mit BSc-Abschluss in Informatik) führte folgende Basisarbeiten durch:

- Überarbeitung der Web-Seiten des Gesamtprojektes mit einem Content-Management-System für den externen Web-Auftritt und das interne Projektmanagement sowie die Anpassung an die Bedürfnissen der 2. Förderphase (mit erweiterter Zusammensetzung der Teilprojekte)
- Installation und Konfiguration einer Web-Cam mit zugehörigem Web-Service auf dem Heumöser Hang in Zusammenarbeit mit Kollegen des TP5 für das visuelle Online-Monitoring
- Installation und Basiskonfiguration einer Standard-Web-GIS-Lösung (GeoServer und Mapbender) als Vorbereitung des Einsatzes für die Forschergruppe

Eine Weiterentwicklung des Informationssystems konnte aufgrund der Komplexität des Systems und der für die verwendete Informationsmodellierung notwendigen naturwissenschaftlichen/numerischen Grundkenntnisse (z.B. Q/H Relationen, Zeitreihenanalyse, Skalierungsmethoden) von der Mitarbeiterin leider nicht ausgeführt werden, ebenso wenig wie Arbeiten aus den Bereichen Metadaten, Modellkopplung und Information Mining. Für den Web-GIS-Service konnten die

Basiskarten und elementaren räumlichen Strukturinformationen (wie Bäche, Messpunkte, Basis-DGM) über Shape-Dateien und Rasterdaten eingebunden werden, eine Einbindung der eigentlichen räumlichen, zeitlichen Informationen und deren Metadaten konnten aber aufgrund der fehlenden fachspezifischen Grundkenntnisse der räumlichen und zeitlichen Approximationen, mathematischen Methoden und physikalischen Bedeutung nicht begonnen werden. Die Mitarbeiterin hat aufgrund einer wesentlich besser bezahlten, permanenten Stelle in der Wirtschaft (IT-Consulting) zum 31.10.2010 gekündigt.

In Absprache mit der DFG konnten danach die verbliebenen Mittel für die Stelle eines wiss. Mitarbeiter umgewandelt werden. Die Stelle war ab 09.02.2011 mit Herrn Notay (MSc in Hydroinformatik und in Geologie) besetzt. Die geplanten Zielsetzungen insbesondere im Bereich Metadaten und Modellkopplung konnten somit erst mit zweijähriger Verspätung in Angriff genommen werden. Neben der systematischen Fortschreibung und Erweiterung des Informationssystems Turtle für die am Heumöser Hang permanent durchgeführten zeitlich und räumlich variierenden Messungen ergaben sich drei neue Arbeitspakete:

- Erweiterung des Informationssystems um eine Metadaten- und Archivierungskomponente
- Einbindung der Web-GIS-Komponente in die Projektarbeitsplattform und Kopplung mit dem Informationssystem Turtle
- Kopplung der Simulationsmodelle HMS/DUMUX und diese mit dem Informationssystem Turtle

Ein viertes Arbeitspaket wurde in Eigenleistung (BTU Cottbus, Herr Li) durchgeführt:

- Komponente zur Ereignis- und Prozesserkennung sowie Szenarienspezifikation aus Messdaten für die Modellierung

Metadaten- und Archivierungskomponente

Die Problematik der langfristigen Nutzbarkeit von Informationen und Ergebnissen aus zeitlich befristeten Forschungsprojekten, im Falle dieser Forschergruppe z.B. der Feldmessdaten, hat zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die DFG hat darauf mit der Veröffentlichung entsprechender „Empfehlungen zur gesicherten Aufbewahrung und Bereitstellung digitaler Forschungsprimärdaten“ im Januar 2009 reagiert, die entsprechend im zentralen Teilprojekt berücksichtigt wurden.

Erster wesentlicher Schritt war die Einführung eines einheitlichen Metadatenschemas für die Messdaten im Feld und Labor sowie Simulationsergebnisdaten der Forschergruppe auf der Basis der ISO-Norm 19115 (vgl. Abbildung 1) entsprechend der INSPIRE-Richtlinie der EU (2007). Neben Basisinformationen zum Metadatensatz wurden für Feldmessdaten, Labormessdaten und Simulationsdaten weitere signifikante Metadaten spezifiziert. Diese Metadatenpezifikationen wurden in das Informationssystem Turtle integriert (vgl. Abbildung 2) und dann zunächst in enger Zusammenarbeit mit TP1a (Hydrologie) konsequent umgesetzt. Dabei wurde die OpenSource Software GeoNetWork genutzt, die auch in anderen GeoDatenInfrastrukturen-Portalen der öffentlichen Hand zum Einsatz kommt.

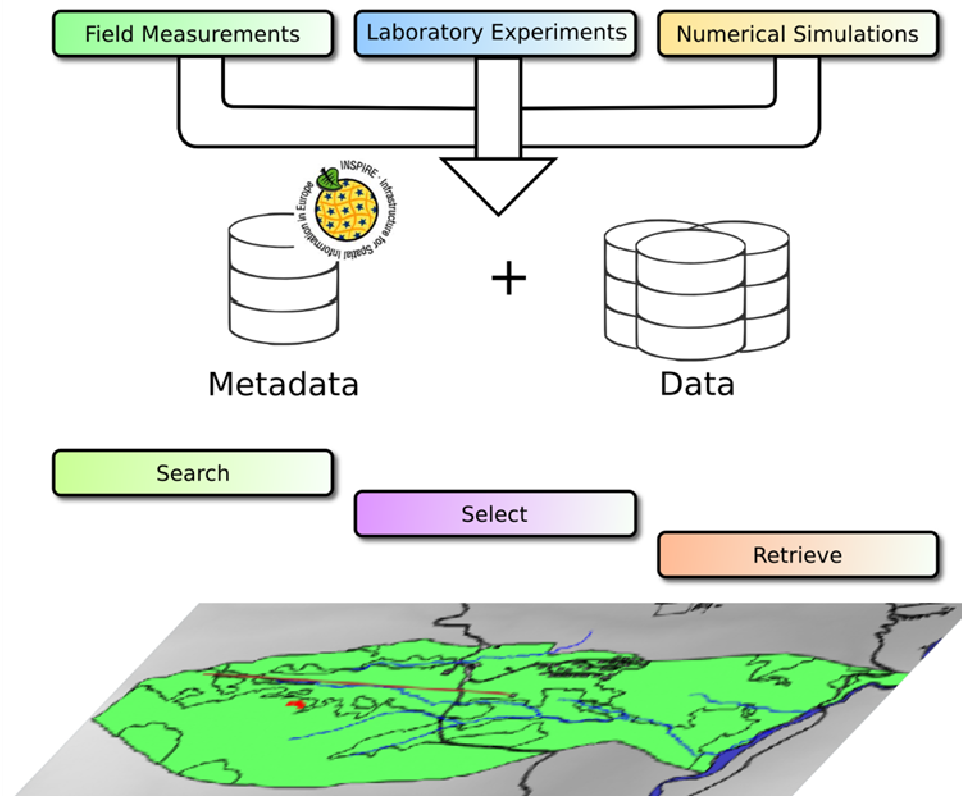


Abbildung 1: Einführung von Metadaten für die Forschergruppe Großhang

Das Informationssystem Turtle wurde um eine Archivierungskomponente erweitert. Die primären Feldmessdaten (Raw Data – FileBase, siehe Abb. 2) und zugehörigen Metadaten, die für die Aufbereitung eingesetzten Filter und Transformatoren sowie die resultierenden sekundären Informationen (TensorBase, siehe Abb. 2) mit homogenisierter, mehrskaliger Zeitdiskretisierung sind vollständig Bestandteil des Systems und in ihrem jeweiligen Format als Datei abgespeichert. Das System generiert einen vollständigen Web-Report mit interaktiven Komponenten, in dem alle Daten und alle angewandten Methoden alphanumerisch und graphisch vollständig enthalten sind. Über diesen Web-Report kann daher sowohl die Suche, die Selektion als auch der Zugriff auf die Feldmessdaten erfolgen. Eine ergänzende interaktive Komponente als Web-Service, z.B. für den Datenexport wurde neben den Web-GIS-Diensten durch ein Java-Servlet über Tomcat realisiert. Wie in Abbildung 2 symbolhaft dargestellt erfolgt der Zugriff über Web-Browser (hier Firefox-Symbol), Metadaten-Dienste (hier INSPIRE-Symbol) und GIS-Systeme bzw. GIS-Web-Dienste (hier ARC-Explorer Symbol).

Web-GIS-Komponente

In der ersten Förderphase wurden primär zeitlich veränderliche Punktmessungen insbesondere vom TP1 (Hydrologie) durchgeführt, und das Informationsmanagement war daher zunächst auf skalare und vektorielle Zeitreihen ausgelegt. Mit der Erweiterung der Forschergruppe um geophysikalische Feldmessungen (TB1b, TP5a,b) haben die räumlich veränderlichen Daten an Bedeutung gewonnen. Hierzu wurde die Web-GIS-Komponente installiert und für die Forschergruppe vorkonfiguriert. Die geophysikalischen Messungen (Refraktionsseismik, Geoelektrik) haben einen sehr hohen

Rohdatenbestand im Gigabytebereich erzeugt, der nur mit gerätespezifischer Software und/oder Auswertungsparametern in physikalische Zustandsvariablen überführt werden konnte. Daher wurde in Absprache mit den jeweiligen Teilprojekten auf die Überführung der Rohdatenmengen in ein zentrales Informationssystem verzichtet und stattdessen die Metadaten der Messungen und die sekundären Informationen der Messauswertungen überführt. Durch die Georeferenzierung der Messungen konnten so in der WEB-GIS Komponente im Zusammenspiel mit den Metadaten die verfügbaren Messdaten indirekt zugänglich gemacht werden und die teilprojektübergreifenden Informationen wie ausgewählte Geländeschnitte für 2D-Simulationen der TP 2 und TP 3 zur Verfügung gestellt werden (siehe Abb. 3).

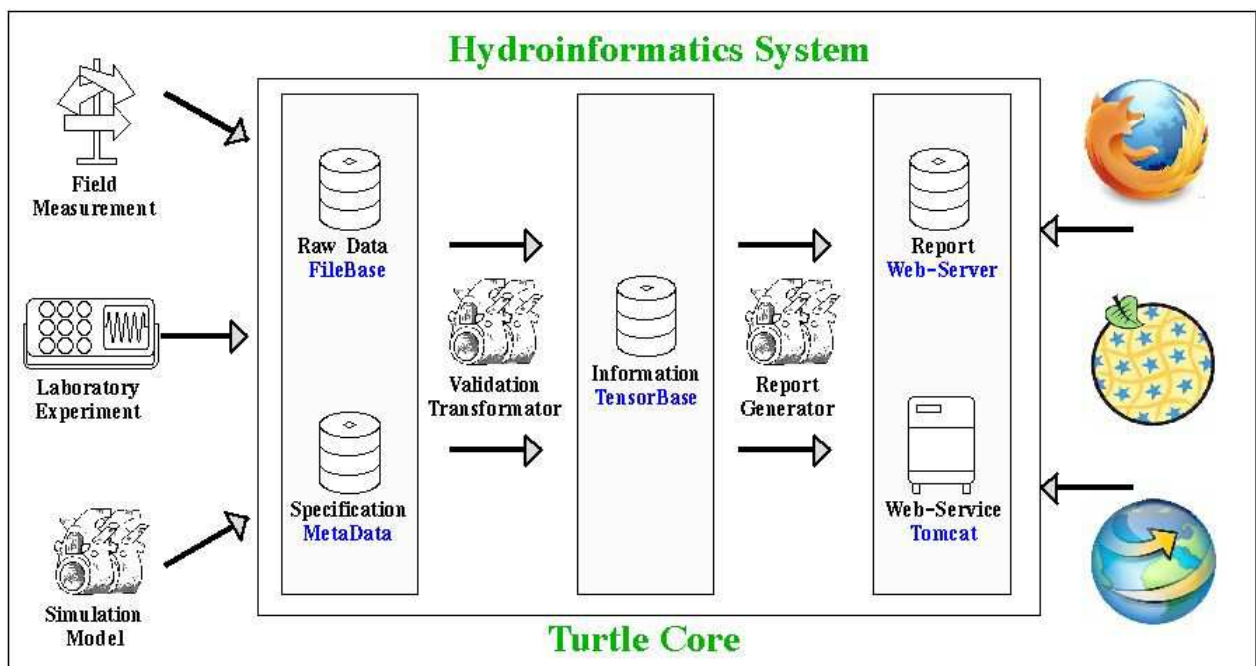


Abbildung 2: Konzept des Informationssystems Turtle nach Molkenthin et al. (2011)

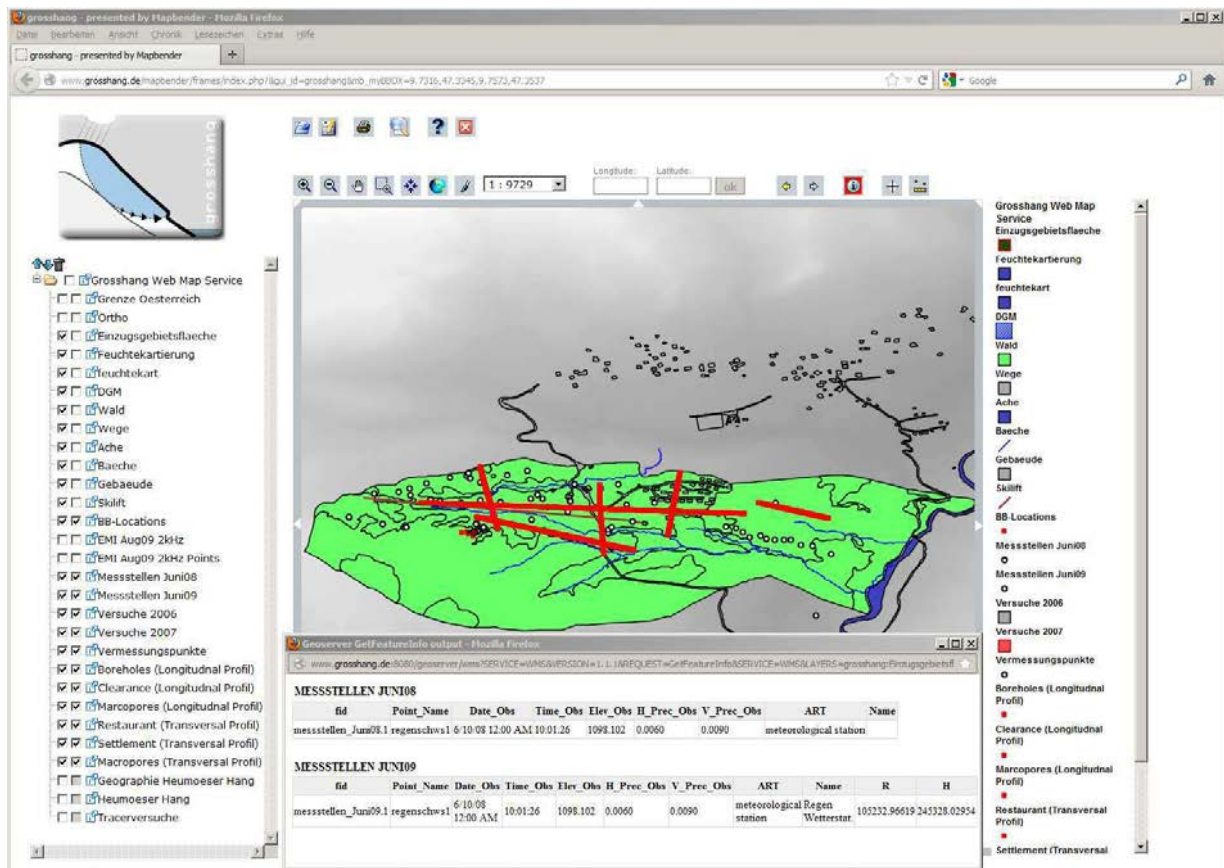


Abbildung 3: Web-GIS-Komponente

Modellkopplung

Durch die Einstellung von Herrn Notay als wiss. Mitarbeiter im zentralen Teilprojekt konnte nach einigen Vorarbeiten 2009/10 an der BTU Cottbus im Frühjahr 2010 der Aufgabenbereich Modellkopplung im ZTP in Angriff genommen werden. Hierzu wurde zunächst ein Testszenario für einen Infiltrationsprozess mit den Modellen HMS und DUMUX (siehe Abb. 6, vgl. TP2) definiert. Die Modellkopplung erfolgt konzeptionell mit einem modellunabhängigen „Broker“, der die Kommunikation zwischen den Modellen koordiniert und den Informationsaustausch zur Laufzeit der Modelle unter Berücksichtigung der modellspezifischen Zeit- und Ortsapproximationen sicherstellt. Dieses Basiskonzept verwendet auch der im Bereich der Hydroinformatik entwickelte OpenMI-Standard, der mittlerweile als OGC-Standard fachübergreifend zur Verfügung steht. Für die Forschergruppe wurde dieses Konzept innovativ erweitert: Der modellunabhängige Broker realisiert den Austausch der Informationen der verschiedenen Modelle durch unabhängige Tensorobjekte. Entsprechend des objektorientierten Paradigma vereinigen diese autonomen Objekte Daten, Methoden und Operatoren zur Abbildung von physikalischem Zustand und Verhalten (vgl. Abbildung 4).

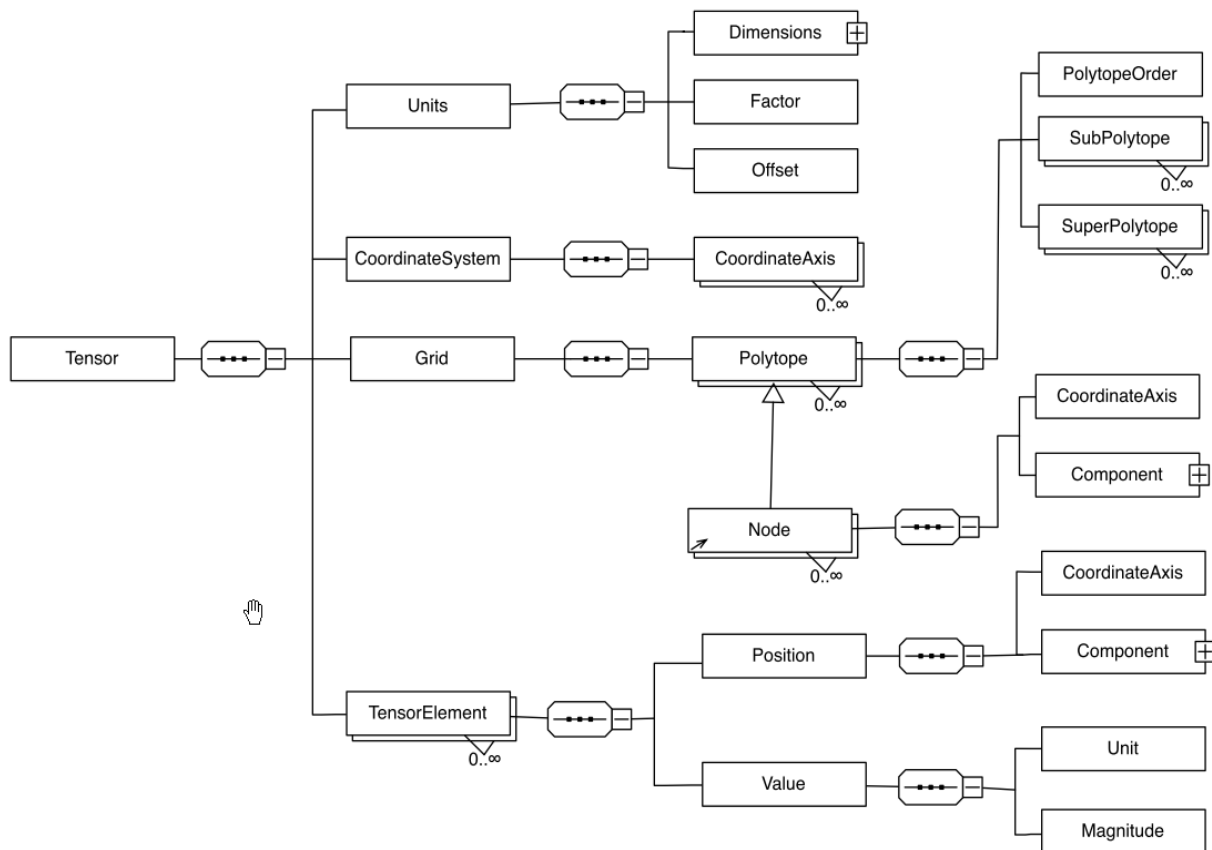


Abbildung 4: Tensor Schema nach Notay (2012).

Durch die Integration von Methoden und Operatoren sind die Tensorobjekte in der Lage, sich verschiedenen Diskretisierungen anzupassen. Ein zeit- und ortsabhängiges Druckfeld als Tensorobjekt kann sich somit auf verschiedene diskrete Zeitapproximationen (z.B. verschiedene Zeitschritte) und Ortsapproximationen (Dreiecksnetze, Raster, hybride Netze) selbst abbilden. Hierfür sind die notwendigen Interpolations- und Skalierungsmethoden Bestandteil der Tensorobjekte und somit modellunabhängig.

Die bei der Kopplung von Modellen verwendeten unterschiedlichen Diskretisierungen werden also vom Broker vollständig berücksichtigt und müssen nicht in den Kopplungsschnittstellen umgewandelt werden. Jedes Modell kommuniziert mit dem Broker direkt mit seiner internen zeitlichen und örtlichen Diskretisierung (vgl. Abbildung 5). Ein weiterer wesentlicher Vorteil der eingesetzten Tensorobjekte ist deren Eigenschaft, auch physikalische Beziehungen und physikalisches Verhalten abzubilden. Einfache Beispiele sind beliebige Q/H Beziehungen, Transformationen von Drücken und piezometrischen Höhen im Grundwasser oder Umrechnungen von Geschwindigkeiten und Durchflüssen bei wasserstandsabhängigen Querschnittsflächen. Komplexe Beispiele sind Wehrformeln, bis hin zu auf Numerik oder KI-Methoden basierende Simulationsmodelle. Letzteres ist zwar theoretisch möglich und ggf. im Einzelfall sinnvoll, wurde jedoch im Rahmen der Forschergruppen für die Kopplung externer, vorhandener Modelle aus Kapazitätsgründen nicht weiter verfolgt.

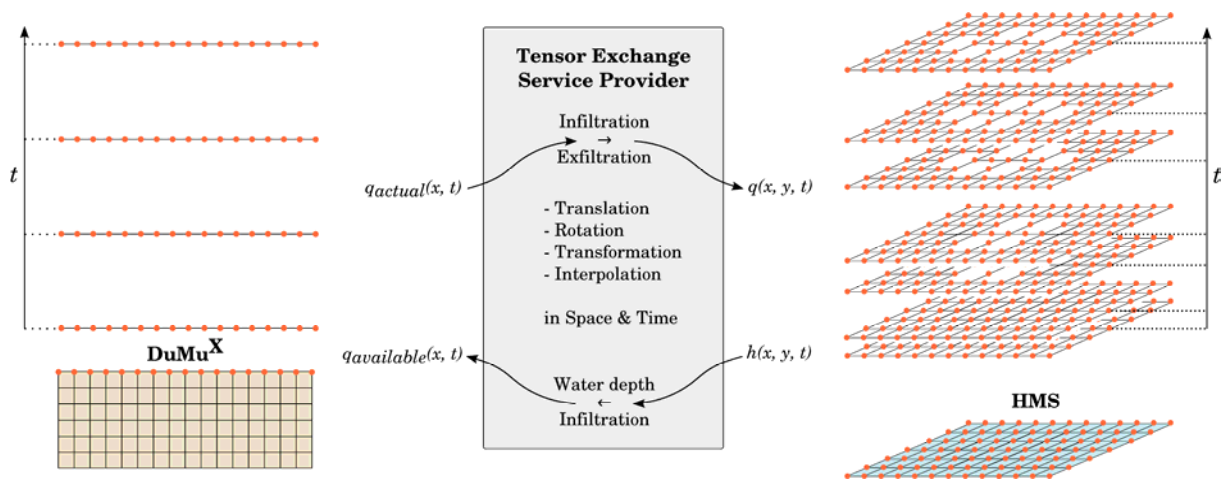


Abbildung 5: Brokerkonzept DUMUX-HMS nach Notay (2012).

Saturation of aqueous phase over time

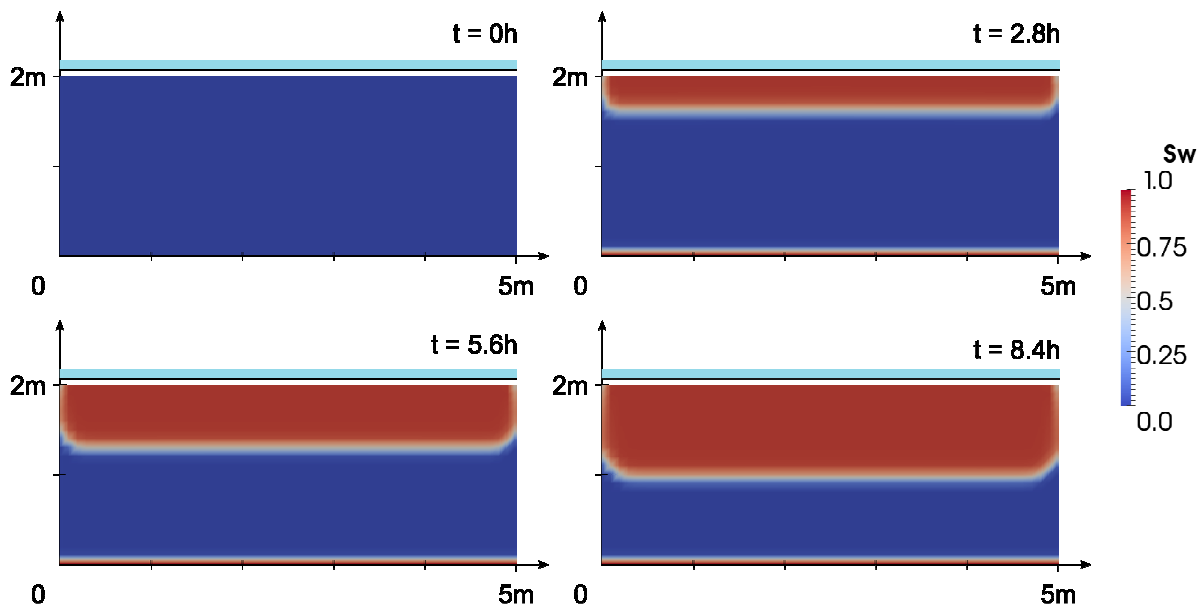


Abbildung 6: Kopplungsbeispiel DUMUX-HMS nach Notay (2012).

Information Mining zur Ereignis- und Prozesserkennung

Erfahrungen aus der ersten Förderphase und anderen Projekten haben gezeigt, dass allein die Verfügbarkeit von Feldmessdaten auch über längere Zeiträume noch nicht automatisch zu zielführenden Eingangsdaten für Simulationsmodelle führen. Neben der üblichen Problematik von Datenlücken, Ausreißern und wechselnden Standorten und Instrumentierung von Messstationen ist insbesondere die Spezifikation von geeigneten, für die Problemstellung relevanten Ereignissen und Szenarien sowie die Erkennung der Zusammenhänge zwischen physikalischen Zustandsgrößen durch Prozesserkennung von großer Bedeutung für die Modellierung der physikalischen Vorgänge am Heumöser Hang. Hierfür wurde als Eigenleistung der BTU Cottbus ein Konzept für die systematische und ingenieurgerechte Spezifikation von Modellierungsszenarien entworfen und pilotweise umgesetzt. Das Konzept basiert auf der Arbeit von Mörchen (2006) „Time Series Knowledge Mining“ und wurde für die Belange der Hydro- und Umweltinformatik entsprechend angepasst und erweitert. Abbildung 7 illustriert die Vorgehensweise.

Ausgangsdaten sind die als Zeitreihen nach einem Preprocessing (Datenlücken, Ausreißer etc.) vorliegenden Feldmessdaten insbesondere aus TP1 (Hydrologie). Aus den Zeitreihen werden durch Methoden der Mustererkennung in Analogie zur Beschreibung von Musik durch Töne, Akkorde und Melodien die einzelnen Zeitreihenkomponenten identifiziert und als Ereignisse beschrieben, die dann als Sequenzen geordnet werden. Durch den Einsatz von Fuzzy Logic werden parallel als Prozessidentifikation Beziehungen zwischen verschiedenen Ereignissen der unterschiedlichen physikalischen Zustandsgrößen ermittelt und so funktionale Zusammenhänge erkannt, die bei der späteren Modellierung Berücksichtigung finden. Die Ereignisse als Ergebnisse der weitgehend automatisierten Abläufe werden dann in der Szenarienkomposition ingenieurgerecht interaktiv vom Anwender zur Erstellung von Modellierungsszenarien zusammengeführt. Ein Szenarium umfasst dann weitgehend alle aus den Ausgangszeitreihen ableitbaren Informationen für Simulationen, wie Simulationszeiträume, Anfangswerte, Randwerte und physikalische Parameter.

Das beschriebene Konzept wird im Rahmen einer Promotion in einem Prototype implementiert und in enger Zusammenarbeit mit TP2 als Basis von gekoppelten Simulationsläufen (vgl. Modellkopplung) verwendet.

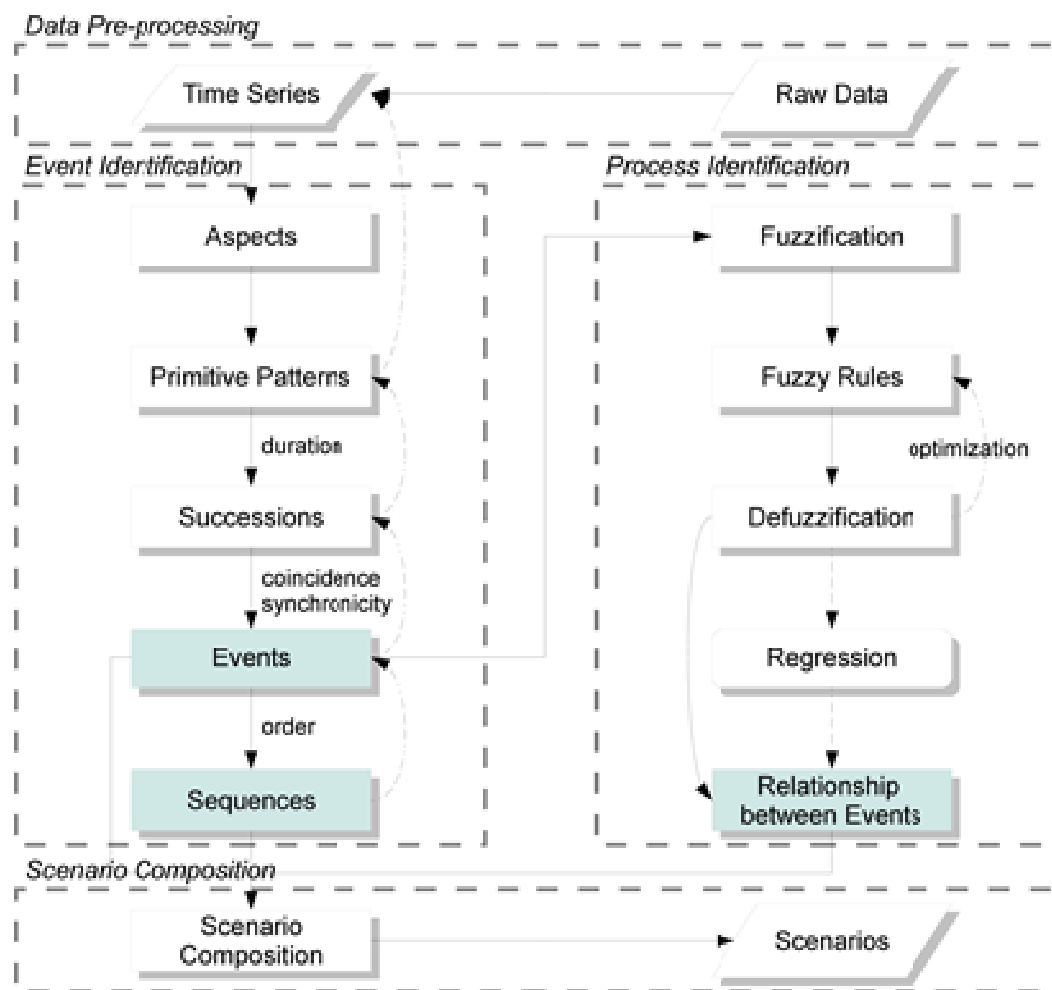


Abbildung 7: Konzept der Komponente für das Information Mining nach Li (2012).

Projektmanagement

Die im Bereich des Projektmanagements vom ZTP durchgeführten Arbeiten waren weitgehend organisatorischer und damit weniger wissenschaftlicher Natur, daher wird auf Einzelheiten an dieser Stelle verzichtet. Im Wesentlichen wurde eine Web-basierte Projektplattform zum Information Sharing aufgebaut und betrieben, die die teilprojektübergreifenden Informationen sowohl organisatorischer (Dokumente, Literatur, Finanzen, Termine) als auch fachspezifischer Natur (Basisgeometriedaten, hydrologischen Zeitreihen, Lage der Messstationen etc.) über das CM-System, die Web-GIS-Komponente und das Informationssystem Turtle der Forschergruppe zur Verfügung stellt.

1.2.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Es besteht die Möglichkeit, das Konzept und die entwickelten Werkzeuge zum Informationsmanagement und das Web-basierte Informationssystem mit entsprechenden Anpassungen in anderen Projekten aus den Wasser-, Geo- und Umweltwissenschaften einzusetzen, in denen in ähnlicher Form Laborexperimente, Feldmessungen und Modellsimulationen durchgeführt werden.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine besonders enge Abstimmung mit TP1a (hydrologische Feldmessdaten) und TP2 (Modellkopplung HMS-DUMUX) sowie TP1b und TP5a/b (räumlich verteilte geophysikalische Feldmessdaten) stattgefunden. Neben den Projektmitarbeitern Frau Cristin Meienberg (24.08.2009 bis 31.10.2010) und Herrn MSc Vikram Notay (01.08.2011 bis 31.12.2012) hat Herr MSc Chi-Yu Li (finanziert aus anderen Drittmitteln der BTU Cottbus) intensiv am Projekt mitgearbeitet.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Vikramyot Notay (2013): Model Coupling in Hydroinformatics Systems by Autonomous Tensor Objects
(Arbeitstitel - Fertigstellung und Einreichung für Sommersemester 2013 geplant)

ChiYu Li (2013): Time Series Scenario Composition Framework in Hydroinformatic Systems
(Arbeitstitel - Fertigstellung und Einreichung für Sommersemester 2013 geplant)

Masterarbeiten:

Yury Durbin (2009): A Groundwater Model for the Natural Slope "Heumöser Hang" (2009)

Literaturverzeichnis

Nelson, B. (2009): Empty Archive, in NATURE | Vol 461|10 September 2009

DFG - Ausschuss für Wissenschaftliche Bibliotheken und Informationssysteme (2009): Empfehlungen zur gesicherten Aufbewahrung und Bereitstellung digitaler Forschungsprimärdaten, http://www.dfg.de/download/pdf/foerderung/programme/lis/ua_inf_empfehlungen_200901.pdf

INSPIRE, Directive 2007/2/EC (2007): <http://inspire.jrc.ec.europa.eu/> (last visit 17 April 2013)

Mörchen, F. (2006): Time Series Knowledge Mining, PhD thesis Dept. of Mathematics and Computer Science, University of Marburg, Germany, 2006

Lindenmaier, F. (2008): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg: identifying dominating processes and structures, PhD thesis, Universität Potsdam, Germany. URL: <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2008/1742/>

1.2.2 Zusammenfassung

Im zentralen Teilprojekt wurde systematisch ein Web-basiertes Informationssystem für die teilprojektübergreifenden Feldmessungen entwickelt, aufgebaut und in der Forschergruppe eingesetzt. Die wesentlichen Arbeitsschritte der Datenaufbereitung und –homogenisierung/-standardisierung sind in dem System als Filter und Transformatoren durch entsprechende mathematische Methoden integriert und dokumentiert. Die Daten wurden mit dem System als Web-Dokumente mit flexiblen Exportoptionen auf der Projektplattform der Forschergruppe zugänglich gemacht und zugleich langfristig dokumentiert und archiviert. Wesentliche Rolle spielte dabei die Umsetzung des Metadatenkonzepts entsprechend der INSPIRE-Richtlinie der EU.

Aufbauend auf dem Informationssystem wurde ein innovatives modellunabhängiges Modellkopplungskonzept entwickelt und implementiert. Die Kopplung erfolgt über einen Broker, der die Kommunikation zwischen Modellen mit Hilfe von Tensorobjekten realisiert. Das Konzept ist damit konform zu Quasistandards (OpenMI, OGC) für die Modellkopplung. Durch den Einsatz von Tensorobjekten konnte über Standard hinausgehend eine modellunabhängige Skalierung und Diskretisierungstransformation im Broker realisiert werden, was die Kopplung von Modellen mit unterschiedlichen Ansätzen stark vereinfacht. Das neue Modellkopplungskonzept wurde exemplarisch für die Kopplung der Simulationsmodelle HMS (Oberflächenabfluss, Fließgewässer) und DUMUX (Wasserinfiltration bzw. Wasser-Gas-Strömungen im Untergrund) sowie mit einem Datenbankmodell für Randbedingungen (In- und Exfiltrationsprozesse) eingesetzt und zunächst anhand einfacher Testfälle überprüft.

Im Bereich des Information Mining wurde als Eigenleistung der BTU Cottbus eine effiziente Methode zur Analyse von zeitabhängigen Feldmessdaten bzgl. Ereignis- und Prozesserkennung mit dem Ziel der Szenarienkomposition entwickelt. Dabei wird das Konzept des „Time Series Knowledge Mining“ für die Hydroinformatik erweitert und spezialisiert. Zeitreihen werden semi-automatisch in Einzelereignisse zerlegt und dann vom Anwender zu Szenarien als Satz von Anfangs- und Randbedingungen für Simulationen ingenieurgerecht zusammengesetzt. Hilfestellung wird dabei durch die Prozessidentifikation gegeben, die funktionale Zusammenhänge zwischen Ereignissen

identifiziert und ggf. auch beschreibt. Erste einfache Testanwendungen wurden realisiert, die Anwendung für komplexere Daten der Forschergruppe sind im Rahmen der Promotionsarbeit als Eigenleistung in Bearbeitung.

**Hydrologische Prozessaufklärung bei einer
Großhangbewegung sowie kontinuierliche, prozess-
differenzierte hydrologische Modellierung**

Teilprojekt 1a im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

Prof. Dr.-Ing. Erwin Zehe

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. András Bárdossy

Dr.-Ing. Jürgen Ihringer

30.06.2013

Karlsruher Institut für Technologie in Kooperation mit der Universität
Stuttgart

1.3 Abschlussbericht TP1a

1.3.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.3.1.1 DFG Geschäftszeichen

ZE 533/3-3

1.3.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr.-Ing. Erwin Zehe

Universitätsprofessor, geb. 09. Mai 1967, Deutscher

Bereich Hydrologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Tel.: +49.721.608.43814, Fax: +49.721.608.45651

E-Mail: erwin.zehe@kit.edu, hyd.iwg.kit.edu

Privatadresse: Wehrastraße 8, 76199 Karlsruhe

zusammen mit

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. András Bárdossy

Universitätsprofessor, geb. 18. November 1954, Ungar

Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie,

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70550 Stuttgart, Tel.: 0711 / 685 64663, Fax.: 0711 / 685 64681

E-Mail: Andras.Bardossy@iws.uni-stuttgart.de, www.iws.uni-stuttgart.de

Privatadresse: Krähwinkelweg 12, 71229 Leonberg

und

Dr.-Ing. Jürgen Ihringer

Oberingenieur am KIT, 06. Februar 1953, Deutscher

Bereich Hydrologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe, Tel.: +49.721.608.43814, Fax: +49.721.608.45651

E-Mail: juergen.ihringer@kit.edu, hyd.iwg.kit.edu

Privatadresse: Rintheimer Hauptstraße 37, 76131 Karlsruhe

1.3.1.3 Thema des Projekts

Hydrologische Prozessaufklärung bei einer Großhangbewegung sowie kontinuierliche, prozessdifferenzierte hydrologische Modellierung

1.3.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum begann am 15.5.2009 und endete am 30.06.2013

1.3.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Hinkelmann,R., Zehe,E., Ehlers,W., & Joswig,M. (2011): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies, *Vadose Zone Journal*, 10, 473-476; doi: 10.2136/vzj2011.0032
- Wienhöfer,J., Germer,K., Lindenmaier,F., Färber,A. & Zehe,E. (2009): Applied tracers for the observation of subsurface stormflow at the hillslope scale, *Hydrology and Earth System Sciences*, 13, 1145-1161
- Wienhöfer,J., Lindenmaier,F. & Zehe,E. (2011): Challenges in Understanding the Hydrologic Controls on the Mobility of Slow-Moving Landslides, *Vadose Zone Journal*, 10, 496-511; doi: 10.2136/vzj2009.0182
- Wienhöfer,J. & Zehe,E., 2013: Predicting subsurface storm flow response of a forested hillslope: the role of connected flow paths and bedrock topography, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 6473-6514; doi: 10.5194/hessd-10-6473-2013 (in Begutachtung)
- b) Lindenmaier,F., Wienhöfer,J., Zehe,E. & Ihringer,J. (2009): Confined aquifer characteristics and stability of a hillslope in the Vorarlberg Alps, Austria, in: *Landslide Processes - From geomorphological mapping to dynamic modelling*, edited by: Malet, J. P., Remaître, A. & Bogaard, T. A., CERG editions, Strasbourg, France, 169-173 (extended abstract and poster presentation)
- Wienhöfer,J., Germer,K., Lindenmaier,F. & Zehe,E. (2009): Where to look, and for which process? Hydrological field investigations at a slow-moving Alpine hillslope, in: *Geophysical Research Abstracts*, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, EGU2009-1032-2001 (abstract and oral presentation)
- Wienhöfer,J., Lindenmaier,F. & Zehe,E. (2009): Temporal variability of a slow-moving landslide: the Heumöser Hang case study in Vorarlberg, Austria, in: *Landslide Processes - From geomorphological mapping to dynamic modelling*, edited by: Malet, J. P., Remaître, A. & Bogaard, T. A., CERG editions, Strasbourg, France, 221-225 (extended abstract and poster presentation)
- Wienhöfer,J., Lindenmaier,F. & Zehe,E. (2010): Hydrological controls on the mobility of a slow-moving landslide in the Austrian Alps: Pore-pressure, preferential flow and snow cover, in: *Geophysical Research Abstracts*, European Geosciences Union General Assembly 2010, Vienna, Austria, EGU2010-4831 (abstract, oral and poster presentation)
- Wienhöfer,J. & Zehe,E. (2012): Modelling rapid subsurface flow at the hillslope scale with explicit representation of preferential flow paths, in: *Geophysical Research Abstracts*, European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, EGU2012-12650 (abstract and poster presentation)

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.3.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Ziel der Arbeiten von TP1a war die Aufklärung der Rolle hydro-meteorologischer Trigger für die Dynamik der Hangbewegung sowie die Anpassung eines hydrologischen Modells intermediärer Komplexität, wobei der Einfluss der dominierenden räumlichen Strukturen besondere Berücksichtigung erhalten sollte. In der ersten Phase der Forschergruppe wurde die Hypothese entwickelt, dass die langsame Bewegung des zentral gelegenen Hangkörpers durch Druckschwankungen in einem zusammenhängenden Drucksystem angetrieben wird. Diese Druckschwankungen werden wiederum durch die schnelle Infiltration von Niederschlag in den steilen, flachgründigen und sehr stark makroporösen südwestlichen Teil des Heumösers ausgelöst (Lindenmaier, 2008). Die zu Beginn des Berichtszeitraums vorliegenden Daten erlaubten keine Tests dieser Hypothese, vor allem aufgrund der zu geringen zeitlichen Auflösung der Deformationsdaten und der Kürze der Zeitreihen zur Grundwasserdruckdynamik. Der erste Arbeitsschwerpunkt der zweiten Antragsperiode war daher die Weiterführung der in der ersten Antragsperiode begonnenen kontinuierlichen Erfassung von Hangbewegung, Grundwasserdrücken, meteorologischen Trigger und hydrologischen Größen sowie die zusammenschauende Analyse dieser Daten.

Ein zweiter Schwerpunkt bestand in der numerischen Simulation des hydrologischen Prozessgeschehens am Heumöser. Dazu sollte zum einen auf Basis von Catflow ein Gebietsmodell für das Untereinzugsgebiet von Bach 1 aufgebaut werden, um das für die Modellierung der beobachteten Abflussdaten der Bäche und der Quelle notwendige Maß an räumlicher Heterogenität zu untersuchen. Zum anderen sollte Catflow auf der Hangskala eingesetzt werden, um durch Simulation der Tracerversuche in den makroporösen Bereichen oberhalb der Quelle weitere Struktur- und Prozessaufklärung zu liefern. Dafür war es wichtig, in Kooperation mit den Projektpartnern vom TP4 die hydraulischen Parameter für die Bodenmatrix an diesem Standort zu bestimmen. Der letzte geplante Schritt war die Einbindung der hydrologischen Modelle in das Gesamtkonzept einer optimalen Modellkomplexität. Dazu gehörte der Vergleich mit den Modellen DUMUX (Untergrundhydraulik, TP2) und HMS (Oberflächenabfluss, TP2) sowie die Kopplung mit dem Deformations- und Bewegungsmodell intermediärer Komplexität, das im Rahmen von TP 5 für den Heumöser Hang entwickelt werden sollte.

1.3.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Weiterführung der Feldbeobachtungen

Das in der ersten Antragsperiode aufgebaute Netz zur kontinuierlichen Felddatenerfassung (Abb. 1) wurde weitergeführt. Ein zentraler Aspekt im Hinblick auf die Fragestellung war die Beobachtung der Hangdeformation in hoher zeitlicher Auflösung. Dies wurde vor allem durch Einbau einer Inklinometerkette in Bohrloch HH4 realisiert, welche in vier Tiefenstufen stündlich die Neigungsveränderung der eingebrachten Sensoren und damit die Bewegung an der Scherzone in 10 – 12 m Tiefe erfasste (Abb. 2a). Die Inklinometerkette war von April 2008 bis Juli 2010 funktionstüchtig, danach fielen die Sensoren in den unteren beiden Tiefen der Inklinometerkette aus, vermutlich aufgrund der mechanischen Beanspruchung. Die beiden oberen Sensoren sind nach wie vor aktiv, die Daten

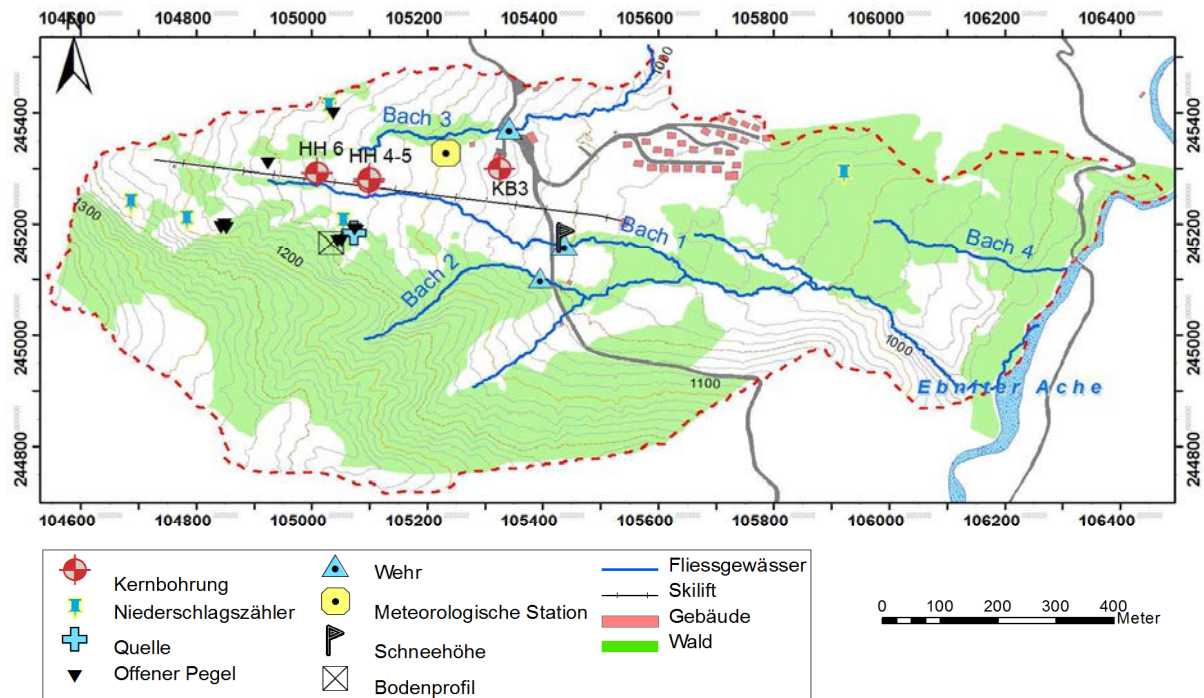


Abbildung 1: Übersichtskarte des Studiengebiets Heumöser mit Lage der Messstellen

lassen sich jedoch wegen der ausgefallenen Sensoren nicht mehr repräsentativ für die Gesamtbewegung über die Scherzone auswerten. Die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung der Hangbewegung wurden daher an diesem Datensatz (Abb. 2) erarbeitet, auch wenn die Arbeiten nicht grundsätzlich darauf beschränkt waren. Die weitere Datenerhebung umfasst größere Zeiträume und dauert z.T. noch an.

Das Monitoring-Netzwerk beinhaltet weiterhin die Beobachtung der Grundwasserdruckdynamik in drei Bohrungen und unterschiedlichen Tiefenstufen sowie die Erfassung der Dynamik des oberflächennahen Grundwassers an 12 Standorten. Die Durchflusserfassungen an den Bächen 1 und 3 sowie der Quelle wurden fortgeführt. Dabei wurden die Quelfassung und das Wehr an Bach 1 erneuert, und an den Bächen 1, 2 und 3 wurden zusätzliche Sensoren zur Messung des Pegels installiert, um die Durchflussmessungen zu verbessern, welche an den Bächen aufgrund der hohen Geröllfracht und folgender Verlandung der Wehre mit erheblichen Unsicherheiten behaftet waren. Kurzfristig waren diese Maßnahmen auch erfolgreich, und die über den Pegel errechneten Durchflüsse waren in guter gute Übereinstimmung mit punktuell mittels Salzverdünnung bestimmten Durchflüssen, langfristig ergaben sich aber ebenfalls Probleme mit Sedimentation (Bach 2 und 3), Stabilität des Wehrs (Bach 3) oder Umläufigkeit des Wehrs (Bach 1). Zur kontinuierlichen Erfassung der meteorologischen Größen wurde im Sommer 2010 neben der vorhandenen Station aus Mitteln der Technischen Universität München eine neue meteorologische Station errichtet, welche auch mit einem beheizten Niederschlagssammler und einer Schneehöhenmessung per Ultraschall ausgestattet wurde. Weiterhin wurden an 5 Standorten Regenschreiber betrieben.

Die Daten aus der kontinuierlichen Erfassung wurden in Zusammenarbeit mit dem ZTP in das Informationssystem Turtle eingepflegt (siehe Abschlussbericht ZTP). Die aktuellen Daten der

meteorologischen Station sind über die Internetseite „grosshang.de“ öffentlich einsehbar (bis Juli 2011 zusammen mit der vom ZTP und TP5 installierten Webcam); die Daten aus allen Zeiträumen sind über einen gesicherten Zugang online verfügbar. Darüber hinaus wurden während der Laufzeit des Projektes für die anderen TP meteorologische und hydrologische Daten sowie Befunde aus Geländekampagnen wie gewünscht aufbereitet und zur Verfügung gestellt.

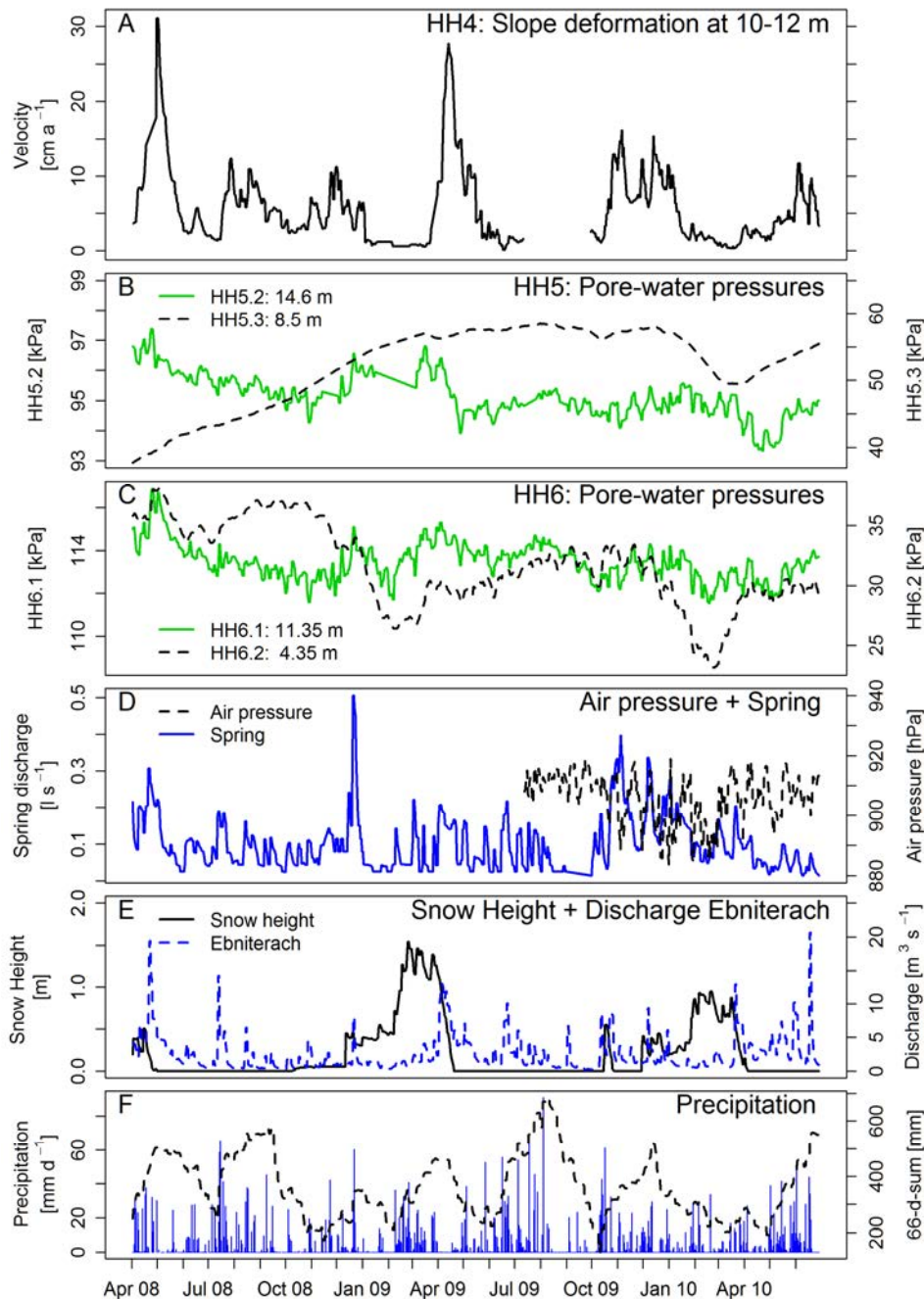


Abbildung 2: Ausgewählte Daten der kontinuierlichen Beobachtungen im Zeitraum der Bewegungsmessungen: Geschwindigkeit der Hangbewegung in der Scherzone (a), Grundwasserdruckdynamik in den Bohrlöcher HH5 und HH6 (b, c), Luftdruck und Quellschüttung (d), Schneehöhe und Abfluss Ebniterach (e) sowie Niederschlagssummen über einen bzw. 66 Tage (f)

Analyse des Zusammenspiels von Hangbewegung und hydrologischer Prozessen mittels datengetriebener Modellierung

Grundsätzlich wird bei den meisten tiefgründigen Hangbewegungen hauptsächlich erhöhter Porenwasserdruck während und nach niederschlagsreichen Perioden als treibender Faktor angesehen (z.B. Terlien, 1998; Coe et al., 2003; Macfarlane, 2009). Dieser grundsätzliche Effekt kann durch andere Faktoren modifiziert oder überlagert werden, beispielsweise Wechselwirkungen zwischen Bewegung und Porenwasserdruck (van Asch et al., 2007; Schulz et al., 2009b), atmosphärische Druckschwankungen (Schulz et al., 2009a), seismische Ereignisse (Salcedo, 2009), oder Hangdestabilisierung durch Erosion am Hangfuß (Bonzanigo et al., 2007).

Zur Aufklärung der dominierenden Einflussfaktoren wurden die erhobenen Monitoringdaten (Abb. 2) zunächst auf Kreuzkorrelation mit der Dynamik der Hangbewegung am Heumöser untersucht. Auffallend hierbei war, dass die Porenwasserdruckdynamik im etwa 100 m entfernten Bohrloch HH6 einen stärkeren Zusammenhang mit der Bewegungsdynamik in Bohrloch HH4 zeigte als die Messungen in HH5. Die Betrachtung aller Beobachtungen legt nahe, dass es sich beim Grundwassersystem am Heumöser um kleinräumig separierte und gespannte Aquifere handelt. Zur weiteren Analyse wurde ein einfaches, datengetriebenes Stabilitäts- und Bewegungsmodell entwickelt (*Infinite Slope Mobility Model*; Wienhöfer et al., 2011). Das Modell basiert auf einer vereinfachten Abschätzung der wirkenden Kräfte an der viskosen Scherzone, angetrieben durch die Porenwasserdruckdynamik. Die Modellergebnisse (Abb. 3) zeigen, dass die Höhe der beobachteten Porenwasserdruckschwankungen oberhalb eines Schwellenwertes für eine Destabilisierung des Hangkörpers hinreichend sein kann. Weiterhin zeigte sich, dass Bodenfeuchte in der Oberbodenzone und Schneelast aufgrund des variablen Auflast eine wichtige Rolle spielen, insbesondere kann die Auflast der Schneedecke während der Wintermonate dem Porenwasserdruck entgegen und somit stabilisierend wirken. Insgesamt sind die vereinfachten Stabilitäts- und Bewegungsmodelle jedoch

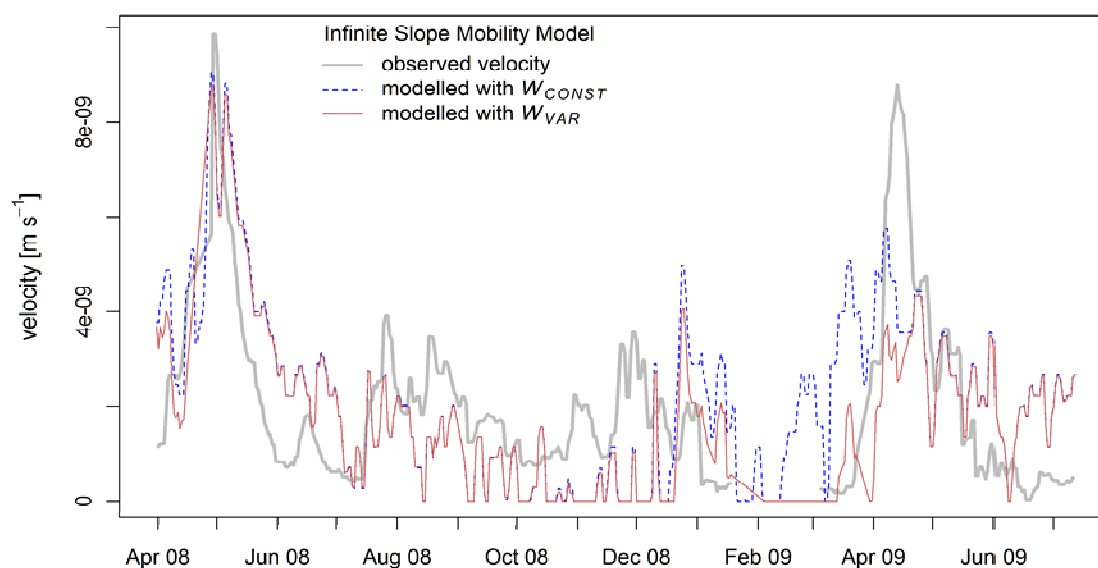


Abbildung 3: Modellierung der Bewegungsdynamik mit dem Infinite Slope Mobility Model unter Verwendung eines konstanten (W_{const}) bzw. aufgrund Schneeauflast variablen (W_{var}) Gewichtes der Bodensäule

nicht in der Lage, die Bewegungsdynamik ausreichend zu erklären. Die Regression von modellierter gegen beobachtete Bewegung lieferte Bestimmtheitsmaße von $R^2 = 0.27$ (W_{const}) bzw. $R^2 = 0.31$ (W_{var} , vgl. Abb. 3). Neben den zahlreichen Vereinfachungen des Modells könnte ein Grund hierfür in den verwendeten Eingangsdaten liegen. Eine Parameteranalyse des Modells zeigte, dass bereits geringe Variationen der Parameter eine perfekte Anpassung liefern würden, etwa Variationen des Reibungswinkels ($\pm 0.3^\circ$), der seitlich wirkenden Kräfte (± 0.75 kPa) oder der Porenwasserdruckdynamik an der Scherzone, welche auf Basis der Beobachtungen in HH6 in Modell Eingang gefunden hat.

Infinite Slope Mobility Model ist von der Form äquivalent zu einem stückweise linearen statistischen Modell mit dem Porenwasserdruck als Regressor. Statistische Modelle erlauben auf einfache Weise die Einbeziehung weiterer Einflussgrößen, und so wurden systematisch lineare Modelle zur Erklärung der Hangbewegung aus dem vorliegenden Datensatz getestet, wobei auch in der Zeit versetzte Zeitreihen einbezogen wurden. Aufgrund der umfassenden Datenbasis konnte eine Vielzahl von statistischen Modellen gefunden werden. Um Modelle zu selektieren, war es daher entscheidend, die Prädiktoren und ihren Einfluss im Modell auf physikalische Plausibilität zu prüfen und auf Kollinearitäten zu achten. Für den Testzeitraum April 2008 – Juli 2009 wurde ein Modell mit den Prädiktoren Porenwasserdruck in HH6.1, Schneehöhe, Quellschüttung und Abfluss der Dornbirnerach selektiert, welches 81 % der Variation der Hangbewegung erklärt (Modell 1, Abb. 4). Die ersten beiden Variablen gingen wie im *Infinite Slope Mobility Model* als antreibende (Porenwasserdruck) bzw. stabilisierende (Schneedecke) Faktoren ein. Die Zunahme der erklärten Varianz gegenüber dem einfachen Stabilitäts- und Bewegungsmodell durch die anderen beiden Variablen lässt sich dahingehend interpretieren, dass die Quellschüttung ein Proxy für die von präferentiellen Infiltrationsprozessen beeinflusste Porenwasserdruckdynamik an der Scherzone ist. Der Abfluss der Dornbirnerach ist entweder ein indirekter Proxy für die hydrologische Gesamtsituation des Systems, oder ein direktes Maß für Erosion am Hangfuß. Für den Vorhersagezeitraum Oktober 2009 – Juli 2010 lieferte das lineare Modell 1 ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.69$. Ein für diesen Zeitraum

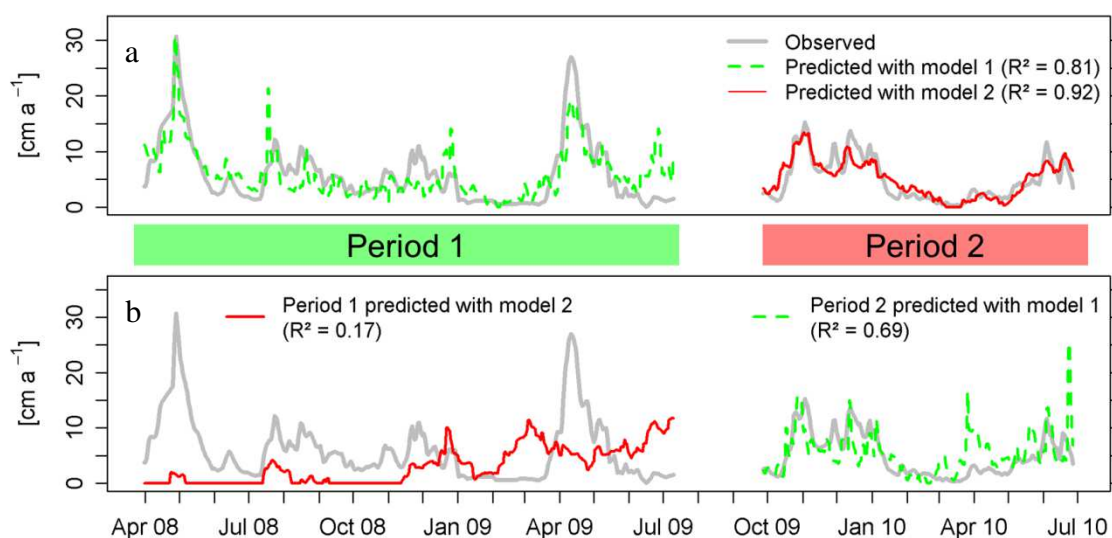


Abbildung 4: Modellierung der Bewegungsdynamik mit linearen statistischen Modellen: Anpassung zweier unterschiedlicher Modelle in verschiedenen Zeitabschnitten (a); Vorhersage der Bewegungsdynamik für den jeweils anderen Zeitabschnitt (b)

angepasstes Modell mit den Prädiktoren Porenwasserdruck in HH5.3, Quellschüttung und Regensumme über 27 d erzielte ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0.92$ (Modell 2, Abb. 4). Dieses Modell 2 erklärte im Testzeitraum April 2008 – Juli 2009 jedoch nur 17 % der Varianz der Bewegungsdynamik. Daraus wird ersichtlich, dass lineare statistische Modelle in ihrer Aussagekraft über physikalische Kausalitätsbeziehungen nicht notwendigerweise eindeutig sind, aber bei sorgfältiger Anwendung mit einer umfassenden Datenbasis Hinweise auf Zusammenhänge liefern können, die mit komplexeren, physikalisch basierten Modellen weiter untersucht werden müssen. Zusammen mit dem einfachen Stabilitäts- und Bewegungsmodell stellen diese datengetriebene Modelle die ersten Modelle der Hangbewegungsdynamik am Heumöser dar, die als Null-Modelle zum Vergleich mit komplexeren Ansätzen herangezogen werden können.

Hydrologische Simulationen auf der Hangskala und auf der Gebietskala

Die durchgeführten Arbeiten zur hydrologischen Modellierung befassten sich mit dem Gebiet der Quelle im bewaldeten Teil des Heumöser sowie dem der Quelle übergeordneten Einzugsgebiet von Bach 1 (Abb. 1 u. Abb. 7).

Modellierung von präferentiellen Fließ- und Transportprozessen am Quellhang

Das etwa 1000 m² große Gebiet der Quelle im bewaldeten Teil stand bereits während der ersten Antragsperiode als ein Schlüsselbereich im Fokus der Arbeiten. In den in der ersten Phase durchgeführten Beregnungs- und Tracerexperimenten (Wienhöfer et al., 2009) war ein schneller Transport von Wasser und Tracer durch ein ausgeprägtes Netzwerk an präferentiellen Fließpfaden beobachtet worden. Dabei zeigten die relativ niedrigen Pecletzahlen, dass der Transport auch nach über 40 m noch sehr stark vom Nahfeld geprägt wird. Daher sollten für die Simulation dieser Experimente mit Catflow die Heterogenitäten im Untergrund räumlich explizit abgebildet werden. Es lagen jedoch nur an drei Punkten Informationen aus Farbinfiltrationsversuchen vor (Wienhöfer et al., 2009), weshalb die Fließpfade für die Implementierung auf der Hangskala stochastisch generiert wurden, wie bereits von Klaus & Zehe (2010; 2011) erfolgreich angewendet. Mithilfe von neu geschaffenen Präprozessing-Routinen, welche die Generierung von verbundenen Strukturen auf einem feinen Gitter und die anschließende Erzeugung der entsprechenden zweidimensionalen Hangschnitte für Catflow erlauben, wurden systematisch Modellaufbauten mit verschiedenen Kombinationen aus vertikalen und lateralen Strukturen sowie Streuschicht und Festgesteinsoberfläche erzeugt. Insgesamt wurden 122 verschiedenen Realisationen getestet. Die Topographie des Festgesteins wurde aus Handbohrungen an 63 Punkten abgeleitet, die Oberflächentopographie vom digitalen Geländemodell der Landesvermessung Vorarlberg übernommen. Die präferentiellen Strukturen und die Streuschicht wurden als Medien mit hoher Durchlässigkeit und geringer Retention parametrisiert, das Festgestein als relativ undurchlässiges Medium. Für die feinkörnige Bodenmatrix wurden die von TP4 an ungestörten Bodensäulen aus dem Bereich des Quellhangs bestimmten bodenhydraulischen Parameter verwendet. Für die Simulation der Beregnungs- und Tracerexperimente bis zur Messstelle ‚cut-bank‘ (Hanganschnitt oberhalb der eigentlichen Quelle) wurden die zweidimensionalen Hangprofile als zunächst als Streifen von 1.75 m entlang der Hangfalllinie (entsprechend der Breite der Beregnungsplots) angelegt. Für die nachfol-

gende Periode natürlicher Niederschläge wurden die gleichen Hangprofile auf die gesamte Breite des Hanges und damit auf die gesamte Hangfläche bezogen.

Der gewählte Modellansatz war für die Simulation der hydraulischen Antwort erfolgreich (Abb. 6a). Von den getesteten Setups erfüllten fünf die Auswahlkriterien hinsichtlich der Übereinstimmung zum beobachteten Abfluss sowohl unter der Beregnung als auch unter dem nachfolgenden natürlichen Niederschlag. Die Kriterien bestanden aus einer Modellgüte größer 0.75 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE), Wasserbilanzfehler kleiner 10 % und begrenztem Auftreten von Oberflächenabfluss (weniger als 10 % während der Beregnung). Alle erfolgreichen Setups wiesen vertikale Strukturen und mindestens eine laterale Struktur auf, und in allen war eine konstante Bodenmächtigkeit vorgegeben. In Modellaufbauten ohne vertikale und laterale Strukturen trat vornehmlich Oberflächenabfluss auf, der während der Beregnung nicht beobachtet worden war und insbesondere während der natürlichen Niederschläge nicht mit der beobachteten Abflussreaktion übereinstimmte (Abb. 6b). Die Abflussreaktion auf der Hangskala wurde mit Catflow unter Verwendung räumlich expliziter Strukturen vergleichbar gut simuliert wie mit Hilfe eines komplexeren Zweiphasen-Dual-Permeability-Modells auf Basis von Dumux (siehe Abschlussbericht TP2).

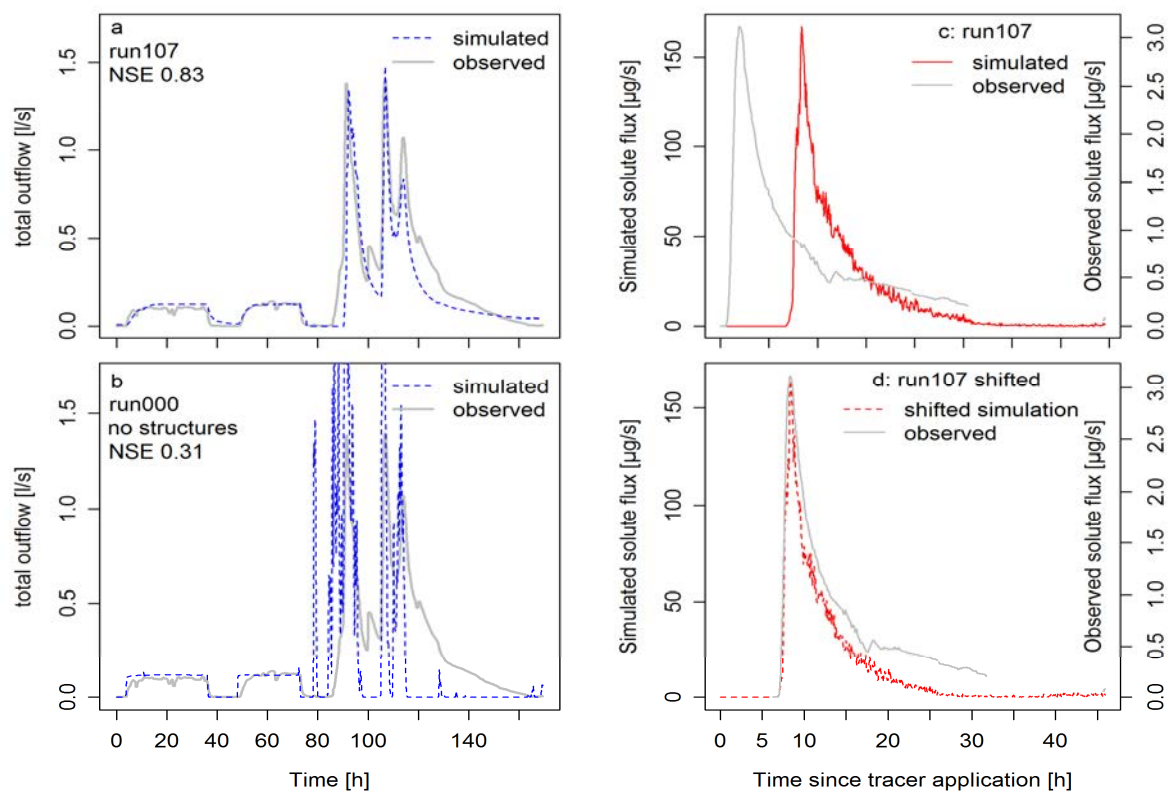


Abbildung 5: Ergebnisse der Simulationen mit expliziten präferentiellen Strukturen: Die linke Seite zeigt Vergleiche von simuliertem und beobachtetem Abfluss für ein Setup mit vertikalen Strukturen und einem lateralen Fließpfad, welches die Beobachtung gut wiedergegeben hat (a) sowie ein Setup ohne Strukturen, bei dem vorwiegend Oberflächenabfluss auftrat (b). Die rechte Seite zeigt die Ergebnisse der Stofftransportsimulation am Beispiel des erfolgreichen Setups im Vergleich zu den Tracerbeobachtungen (c) sowie die zum Vergleich mit der Beobachtung zeitlich verschobene Durchbruchskurve (d)

Die Simulation des Stofftransports war nur teilweise erfolgreich. Zwar fand der Stofftransport bei den erfolgreichen Setups innerhalb der präferentiellen Strukturen statt, und die simulierten Tracerpeaks waren schnell mit ca. 8 h bei 28.7 m Transportdistanz, die Simulationen waren jedoch nicht so schnell wie der beobachtete Peak mit ca. 2 h. Dies konnte teilweise auf das Modellkonzept zurückgeführt werden. Obwohl die Wassersimulationen die Flussdichten zufriedenstellend wiedergegeben haben, wurden die effektiven Transportgeschwindigkeiten im Modell unterschätzt, da durch die Skalierung mit der Hangbreite quer zur Fließrichtung der Fließquerschnitt der präferentiellen Strukturen zu groß angesetzt wird. Würden die Strukturen nur etwa 20 % der Breite einnehmen, wie es im Feld beobachtet wurde, wären die effektiven Transportgeschwindigkeiten bei gleicher Flussdichte bereits in der richtigen Größenordnung. Nichtsdestotrotz stimmen die Formen der simulierten Durchbruchskurven gut mit den Beobachtungen überein (Abb. 6d). Die Form der Durchbruchskurve ist gleichsam wie ein Fingerabdruck des präferentiellen Fließnetzwerkes, und die gefundene Übereinstimmung zeigt, dass die räumlich explizite Berücksichtigung diskreter Strukturen für die Untersuchung der notwendigen Topologie des präferentiellen Fließnetzwerkes und der Rolle der Festgesteinsoberfläche geeignet ist und weiter ausgearbeitet werden sollte. Eine ausführliche Darstellung der skizzierten Arbeiten auf der Hangskala findet sich in Wienhöfer & Zehe (2013).

Simulation der Abflussbildung im Gebietsmodell

Der Bach 1 entwässert mit einem Einzugsgebiet von rund 20 ha bis zum Wehr den größten Anteil des oberhalb der Straße gelegenen westlichen Teils des Heumöser. In diesem Gebiet befindet sich ein Großteil des Beobachtungsnetzwerkes, und hier fanden die meisten Felderkundungen statt. Das Gebiet

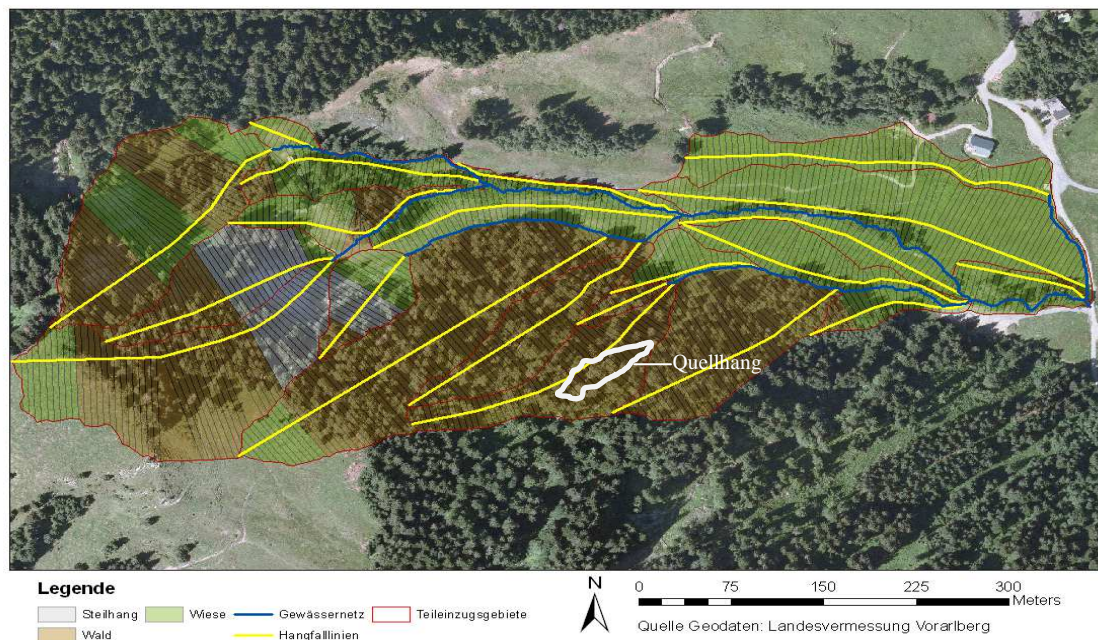


Abbildung 6: Diskretisierung des Einzugsgebietes von Bach 1 in 21 Hänge mit drei unterschiedlichen Landnutzungen (Wald, Wiese, Steilhang) für die Simulation mit Catflow. Der im Detail betrachtete Bereich der Quelle ist hervorgehoben

setzt sich zusammen aus Wiesen, bewaldeten Flächen und felsigen Steilhängen.

Für das Gebietsmodell wurde die Einzugsgebietsfläche in ein Gewässernetz und 21 Teilgebiete aufgeteilt, die jeweils mit einem 2-D Hangprofil mit unterschiedlichen Bodenaufbauten für Wiese, Wald und Steilhang modelliert wurden. Grundlage für den Bodenaufbau der Wiesenbereiche waren die hydrologischen Simulationen des Einzugsgebietes vom nördlich anschließenden Bach 3 von Lindenmaier (2008) aus der ersten Antragsphase. Die Steilhangbereiche wurden zur Abbildung einer Schuttauflage mit einer relativ durchlässigen Bodenschicht in den oberen Zentimetern versehen, darunter wurde eine eher undurchlässige Schicht zur Abbildung des Festgesteins vorgegeben. Für die Waldbereiche wurde zunächst auf die Übertragung der räumlich expliziten Strukturen auf die gesamte bewaldete Fläche verzichtet, da der zuvor im Detail untersuchte Quellhang nur ein kleines Teilgebiet der bewaldeten Flächen darstellt. Stattdessen wurde zur Abbildung der präferentiellen Fließprozesse in diesen Arealen auf eine vereinfachte Parametrisierung mit Hilfe von Makroporositätsfaktoren zurückgegriffen, welche die hydraulische Leitfähigkeit bei Überschreiten eines Sättigungsschwellenwertes erhöhen. Dieser Ansatz (Aufbau 1) hatte in einer Vorstudie für Langzeitsimulationen der Quellschüttung bereits gute Ergebnisse gebracht. Zum Vergleich wurden auch zwei Bodenaufbauten ohne Makroporen-Faktoren getestet. Es zeigte sich, dass mit einem einfachen Aufbau (Aufbau 2 mit einer hoch leitfähigen Schicht über undurchlässigem Untergrund) ohne Makroporositätsfaktoren im Zeitraum Mai – September 2008 die besten Resultate erzielt werden konnten (Abb. 7). Das Gebietsmodell mit diesem Aufbau für den Wald erzielte eine Modellgüte von $NSE = 0,74$, während das Modell mit den Makroporositätsfaktoren (Aufbau 1, $NSE = 0.40$) und ein Referenzmodell mit weniger durchlässigen

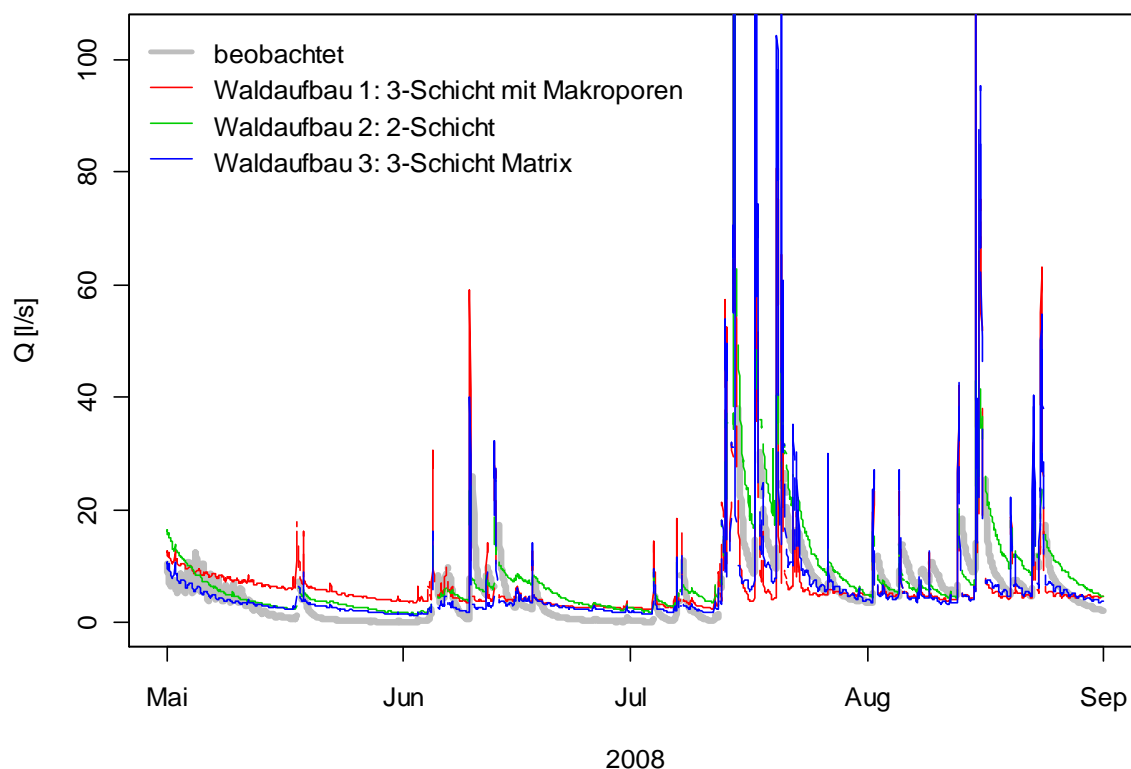


Abbildung 7: Ergebnisse der Abflusssimulation mit dem Gebietsmodell von Bach 1 für den Sommer 2008

Bodenhorizonten (Aufbau 3, NSE = 0.29) schlechter abschnitten. Somit ließ sich ein Einfluss von gekoppelten vertikalen und lateralen präferentiellen Fließpfaden auf die integrale hydrologische Abflussantwort von Bach 1 mit dem Gebietsmodell nicht eindeutig feststellen, wobei neben den Unsicherheiten im Bodenaufbau und Bodenparametrisierung allerdings auch auf die erheblichen Unsicherheiten in den Abflussdaten des Baches verwiesen werden muss. In der Zusammenschau der Feldbeobachtungen und der Ergebnisse, die mit Catflow für Bach 1 und Bach 3 und mit dem Oberflächenabflussmodell HMS für Bach 3 (siehe Abschlussbericht TP2) erzielt worden sind, lassen sich die beobachteten Abflussdaten zum großen Teil durch Oberflächenabfluss sowie oberflächennahen Zwischenabfluss als dominierende Prozesse der Abflussbildung am Heumöser erklären. Ein weiterer wichtiger Faktor in den Gebietsmodellen war der Einfluss von Evapotranspiration und Interzeptionsverdunstung, welche in den Modellszenarien etwa 25 – 30 % der Niederschlagssumme ausmachten. Der Versuch, die Schneehydrologie mit einfachen Ansätzen auf Basis meteorologischer Daten einzubeziehen, war nicht erfolgreich. Mittels eines Ansatzes von Strasser & Marke (2010) wurden Schneeakkumulation und -schmelze berechnet und als Randbedingung im Gebietsmodell verwendet. Dies führte jedoch zu einer deutlichen Überschätzung der beobachteten Abflüsse, vermutlich weil die räumlich verteilte Schneeakkumulation im reliefierten Gelände unzureichend repräsentiert war.

1.3.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Der erhobene Datensatz zur Dynamik der Hangbewegung bietet sich zusammen mit den Erkenntnissen aus den anderen TP der Forschergruppe als Benchmark für weitergehende Modellierungen an. Aus den Arbeiten des TP1a heraus wäre konkret eine Kopplung von Catflow mit dem einfachen Stabilitäts- und Bewegungsmodell zu einem zweidimensionalen Lamellenmodell denkbar, welches die weitere Untersuchung der Bewegungsdynamik in Abhängigkeit von hydrologischen Prozessen, Oberflächen- und Festgesteinstopographie erlauben würde. In diesem Zusammenhang wäre auch eine Erweiterung von Catflow zur räumlich verteilten Modellierung der Schneehydrologie erforderlich, um die für Risikoabschätzungen erforderlichen Langzeitsimulation durchführen zu können. Es besteht bereits Interesse seitens der Ingenieurgeologie am KIT (Prof. Dr. Blum), hierzu einen gemeinsamen Forschungsantrag zu stellen.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine enge Abstimmung mit TP1b, TP2, TP4 und ZTP stattgefunden. Für Arbeiten am Heumöser haben wir mit dem Institut für Ingenieurgeologie der Technischen Universität München (Prof. Dr. Thuro) sowie dem Institut für Wasserbau der Universität Innsbruck (Prof. Dr. Aufleger) kooperiert. Des Weiteren wurden wir von verschiedenen Institutionen aus

Vorarlberg unterstützt: Agrargemeinschaft Ebnit, Stadt Dornbirn (Abteilung Tiefbau), Wildbach- und Lawinenverbauung (Sektion Vorarlberg), und Vorarlberger Landesregierung (Abteilung Wasserwirtschaft; Landesvermessung).

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Wienhöfer, J.: The role of structure-process interactions in controlling systems behavior: the example of hillslope hydrology and slow-moving landslides. Fertigstellung und Einreichung im Sommersemester 2013 geplant

Diplomarbeiten:

Sommerer, E.: Prozessorientierte hydrologische Modellierung des Einzugsgebietes eines alpinen Baches. Diplomstudiengang Geoökologie, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, 2012

Masterarbeiten:

Derbin, Y.: A Groundwater Model for the Natural Slope "Heumöser Hang". Masterstudiengang Hydroinformatics and Water Management, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2009

Bachelorarbeiten:

Rinner, C.: Modellierung von Schneehöhen aus Temperaturmessungen am Beispiel des Heumöser Hangs in Vorarlberg. Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2009.

Kasperek, A.: Statistische Modellierung der Hangbewegung am Heumöser Hang. Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Universität München, 2010

Literaturverzeichnis

Bonzanigo, L., Eberhardt, E. & Loew, S. (2007): Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part I. Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide, Canadian Geotechnical Journal, 44, 1157-1180

Coe, J.A., Ellis, W.L., Godt, J. W., Savage, W.Z., Savage, J. E., Michael, J.A., Kibler, J.D., Powers, P.S., Lidke, D.J. & Debray, S. (2003): Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998-March 2002, Engineering Geology, 68, 67-101

Klaus, J. & Zehe, E. (2010): Modelling rapid flow response of a tile-drained field site using a 2D physically based model: assessment of 'equifinal' model setups, Hydrological Processes, 24, 1595-1609

Klaus, J. & Zehe, E. (2011): A novel explicit approach to model bromide and pesticide transport in connected soil structures, Hydrology and Earth System Sciences, 15, 2127-2144.

- Lindenmaier,F. (2008): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg - Identifying dominating processes and structures, Ph.D. thesis, Institute of Geoecology, University of Potsdam, Potsdam, Germany, 154 pp.
- Macfarlane,D.F. (2009): Observations and predictions of the behaviour of large, slow-moving landslides in schist, Clyde Dam reservoir, New Zealand, *Engineering Geology*, 109, 5-15.
- Salcedo,D.A. (2009): Behavior of a landslide prior to inducing a viaduct failure, Caracas-La Guaira highway, Venezuela, *Engineering Geology*, 109, 16-30
- Schulz,W.H., Kean,J.W. & Wang,G. (2009a): Landslide movement in southwest Colorado triggered by atmospheric tides, *Nature Geoscience*, 2, 863-866, doi: 10.1038/ngeo659.
- Schulz,W.H., McKenna,J.P., Kibler,J.D. & Biavati,G. (2009b): Relations between hydrology and velocity of a continuously moving landslide-evidence of pore-pressure feedback regulating landslide motion?, *Landslides*, 6, 181-190
- Strasser,U. & Marke,T. (2010): ESCIMO.spread - a spreadsheet-based point snow surface energy balance model to calculate hourly snow water equivalent and melt rates for historical and changing climate conditions, *Geoscientific Model Development*, 3, 643-652
- Terlien,M.T.J. (1998): The determination of statistical and deterministic hydrological landslide-triggering thresholds, *Environmental Geology*, 35, 124-130
- van Asch,T.W.J., van Beek,L.P.H. & Bogaard,T.A. (2007): Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides, *Engineering Geology*, 91, 46-55

1.3.2 Zusammenfassung

Im Rahmen des Teilprojektes konnte die Rolle hydro-meteorologischer Trigger für die Dynamik langsam fortschreitender Hangbewegungen weiter aufgeklärt werden. Außerdem wurden erfolgreich hydrologische Modelle für Schlüsselbereiche im Untersuchungsgebiet Heumöser aufgebaut und angewendet, wobei der Einfluss von präferentiellen Fließstrukturen besonders berücksichtigt wurde.

Die Weiterführung des Beobachtungsnetzwerkes führte zu einem konsistenten Datensatz, der es erlaubte, die Einflussfaktoren für die Dynamik der Hangbewegung zu untersuchen. Die Analyse des Datensatzes zeigte auf, dass die Dynamik der Hangbewegung nicht alleine durch die beobachtete Porenwasserdruckdynamik erklärbar ist. Die Ergebnisse aus der Anwendung eines neu entwickelten, einfachen Stabilitäts- und Bewegungsmodells sowie linearer statistischer Modelle lassen schlussfolgern, dass die Porenwasserdruckdynamik an der Scherzone zusätzlich von präferentiellen Fließprozesse beeinflusst ist und dass eine variable Auflast, z.B. durch Schnee, die Bewegungsdynamik beeinflusst. Die Schwierigkeit, die wirksame Porenwasserdruckdynamik zu beobachten, und die Notwendigkeit, weitere hydrologische Prozesse zu betrachten, stellen wichtige Erkenntnisse auch für die Untersuchung ähnlicher Massenbewegungen dar.

Für die hydrologische Simulationen auf der Hangskala mit Catflow wurde das Konzept der Modellierung unter Berücksichtigung räumlich expliziter Strukturen angewendet und verfeinert. Der Ansatz wurde erfolgreich zur Simulation der Beregnungsexperimente aus der ersten Phase eingesetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein präferentielles Fließnetzwerk aus diskreten Strukturen einen dominierenden Einfluss auf die Kontrolle der hydrologischen Prozesse auf der Hangskala hat. Die Simulation des Tracertransports war teilweise erfolgreich. Hierbei konnte der Einfluss der Strukturen

auf die Form der Durchbruchskurve nachgestellt werden, obwohl aufgrund des vereinfachten Modellkonzepts der beobachtete schnelle Durchbruch des Tracers nicht abgebildet werden konnte.

Für die hydrologischen Simulationen auf der Gebietsskala mit Catflow wurde für den Bach 1 ein Gebietsmodell aufgebaut. Die beobachteten Abflussdaten ließen sich am besten durch konzeptionelle Modellaufbauten simulieren, die vornehmlich Oberflächenabfluss und oberflächennahen Zwischenabfluss abbildeten. Ein Einfluss der Makroporen in den Waldbereichen auf die Abflussbildung ließ sich nicht eindeutig nachweisen, nicht zuletzt aufgrund der großen Unsicherheiten in den Abflussbeobachtungen. Die Berücksichtigung der Schneehydrologie mit einem einfachen Ansatz als Randbedingung im Modell führte nicht zum Erfolg. Hierfür bedarf es einer räumlich expliziten Berücksichtigung von Schneeakkumulation und –schmelze in Catflow. Das aufgebaute Gebietsmodell bietet jedoch eine Basis, um solche Erweiterungen zu testen und weitere Strukturinformationen aus den bislang nicht detailliert untersuchten Teilgebieten einzubeziehen.

**Struktur- und Parametererkundung mit aktiven
seismischen und anderen Methoden zur
Untergrundcharakterisierung**

Teilprojekt 1b im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

Prof. Dr. Jens Tronicke

31.03.2013

1.4 Abschlussbericht TP1b

1.4.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.4.1.1 DFG Geschäftszeichen

TR 512/4-2

1.4.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr. Jens Tronicke

Universitätsprofessor, geb. 18.01.1972 , Deutscher,

AG Angewandte Geophysik,

Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam, Karl-Liebknecht-Strasse 24-25

14476 Potsdam, Tel.: 0331 / 977 5815, Fax: 0331 / 977 5700

E-Mail: jens@geo.uni-potsdam.de, www.geo.uni-potsdam.de

Privatadresse: Dürerstrasse 6, 14552 Wilhelmshorst

1.4.1.3 Thema des Projekts

Geophysikalische Strukturaufklärung und Ermittlung kritischer Parameterfelder mit schwach invasiven Methoden.

1.4.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum von begann am 01.06.2009 und endete am 30.07.2012.

1.4.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

a) Rumpf,M., Böniger,U. & Tronicke,J. (2012): Refraction seismics to investigate a creeping hillslope in the Austrian Alps. *Engineering Geology*, 151, 37-46. doi:10.1016/j.enggeo.2012.09.008

b) Böniger,U., Rumpf,M. & Tronicke,J. (2010): Investigating a creeping hillslope by layer-based inversions of seismic first arrival times, 16th European Meeting on Environmental and Engineering Geophysics EAGE-NSG, Zürich, Schweiz (5 Seiten).

Böniger,U., Rumpf,M. & Tronicke,J. (2011): Refraction seismics to explore subsurface architecture of a creeping alpine hillslope, EGU General Assembly, Vienna, Austria.

Böniger,U., Rumpf,M. & Tronicke,J. (2012): 2D und 3D hochauflösende Refraktionsseismik zur Struktur- und Prozesserkundung eines alpinen Kriechhanges in Vorarlberg, Österreich. DGG 2012 Hamburg, Deutschland.

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.4.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Ziel des Vorhabens war es, ein strukturelles 2D und gegebenenfalls 3D Untergrundmodell des Heumösers mittels aktiver seismischer Untersuchungen zu erstellen. Des weiteren sollten die Ergebnisse, das heißt ein strukturelles Untergrundmodell und evtl. ableitbare Parametermodelle in die angrenzende Teilprojekte übertragen werden, um eine möglichst realitätsnahe hydrologische beziehungsweise mechanische Modellierungsgrundlage zu bilden. Zur Erkundung des Standortes sollten vor allem oberflächen- und bohrloch-basierte aktive seismische Experimente genutzt werden, um mittels daraus abgeleiteter seismischer Geschwindigkeitsmodelle (P- und S-Wellengeschwindigkeiten) die dominanten geologischen Einheiten und deren räumliche Variation zu charakterisieren. Beruhend auf den Erkenntnissen aus der ersten Förderperiode, in der der Einfluss und die Wichtigkeit der vorherrschenden Untergrundstrukturen und Gesteinslithologien auf die hydrologischen und mechanischen Prozesse erkannt wurde, wurde die detaillierte geophysikalische Erkundung in der zweiten Förderperiode mittels zwei zusätzlicher geophysikalischer Teilprojekte verstärkt (TP1b und TP5b).

1.4.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Über den gesamten Förderungszeitraum wurden insgesamt 7 mehrtägige Messkampagnen mit insgesamt 49 Feldtagen am Heumöser durchgeführt. Die räumliche Verteilung und Ausdehnung der durchgeführten Messungen kann Abbildung 1 entnommen werden. Der Großteil der Feldaktivitäten befasste sich mit der Akquisition von hochauflösenden 2D und 3D refraktionsseismischen Datensätzen. Zusätzlich wurden jedoch auch Bohrloch-zu-Oberfläche (sogenannte VSP)-, Scherwellenexperimente sowie verschiedene bohrlochgeophysikalische Messungen durchgeführt. Die Messkampagnen verfolgten das Ziel einer stetigen Verfeinerung der Resultate, d.h. der gewonnen Erkenntnisse. Ein Großteil der Arbeiten befasste sich mit der Akquisition und Auswertung der 2D reflektionsseismischen Profile, die einen möglichst umfassenden Bereich des Messgebiets abdecken und beschreiben sollten. Beruhend auf diesen Ergebnissen wurden dann weitere seismische sowie bohrlochbasierte Messungen (in Zusammenarbeit mit TP5b) durchgeführt. Das dichte 2D Messnetz und dessen flächenhafte Interpolation über die gesamte Hangskala führte anschließend zur Identifizierung eines rutschungskritischen Kernbereiches, welcher mittels einer 3D seismischen Messkampagne im Detail untersucht wurde. Hier bestand eine besondere Herausforderung in der Auswertung dieses für oberflächennahe Erkundungen einmaligen Datensatzes (bestehend aus insgesamt 421.128 seismischen Einzelspuren). Neben der refraktionsseismischen Auswertung wurde weiterhin untersucht, ob die aufgezeichneten Daten sich auch für eine reflexionsseismische und oberflächenwellenbasierte Auswertung eignen. Da eindeutige Reflexionseinsätze nicht über größere Profilbereiche identifiziert werden konnten und die abgeleiteten Dispersionskurven keine verlässlichen S-Wellengeschwindigkeiten über einen angemessenen Tiefenbereich lieferten, wird auf diese Auswerteverfahren im Folgenden nicht weiter eingegangen.

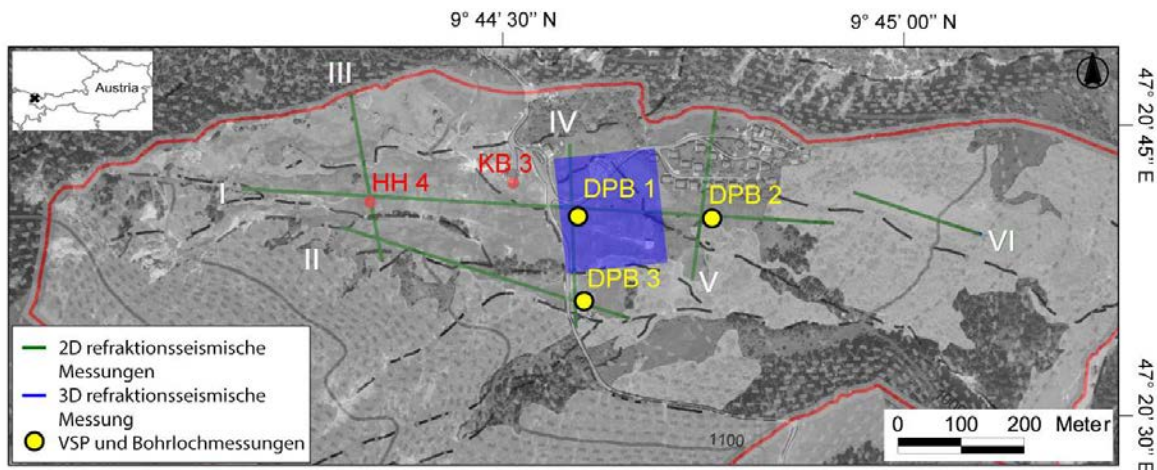


Abbildung 1: Überblick der im Rahmen des Teilprojektes TP1b durchgeführten Messungen. Dies beinhaltet hochauflösende 2D Refraktionsprofile (grüne Linien) sowie eine 3D Refraktionsmessung (blaue Fläche), seismische Bohrloch-zu-Oberflächen- und bohrlochbasierte Messungen (gelbe Kreise). Die roten Kreise markieren zwei Bohrungen, die in der 1. Förderphase der Forschergruppe installiert wurden. Die rote Linie deutet die laterale Ausdehnung des Heumöser an.

2D refraktionsseismische Untersuchungen (P-Wellengeschwindigkeiten)

Innerhalb von mehreren Messkampagnen wurde ein hochauflösendes Netz von 2D refraktionsseismischen Profilen gemessen und ausgewertet. Aufgrund des alpinen Geländes und der Bodenbeschaffenheit haben erste Tests gezeigt, dass alternative seismische Quellen (alternativ zur Hammerschlagseismik) wie die Elvis III Vibratorquelle, als unpraktikabel anzusehen sind und weiterhin deutliche Datenqualitätseinbußen mit sich brachten. Die insgesamt 2.465 Profilmeter wurden somit mit einer 5 kg Hammerquelle, einem Schussabstand von 0,5 m und einem Geophonabstand von 2 m aufgezeichnet. Die Schuss- sowie Geophonpositionen wurden dabei cm-genau mittels einer zielverfolgenden Totalstation eingemessen. Dies resultierte in 2.217 Schusslokationen und 421.128 gepickten Erstankunftszeiten für die 2D Profildatensätze. Tests bezüglich verschiedener Inversionsansätze haben gezeigt, dass aufgrund der hohen strukturellen und geologischen Komplexität des Messgebietes klassische gitterbasierte Inversionsansätze in Modellen resultieren, die äußerst schwierig zu interpretieren sind. Da schichtbasierte Inversionsansätze die Daten mit einem vergleichbaren Fehlerniveau erklären konnten, die Interpretation aufgrund der schichtbasierten Modellparametrisierung jedoch deutlich vereinfachten (und somit auch einen effizienten Wissenstransfer in benachbarte Teilprojekte mit Modellierungsfragestellungen gewährleisten) wurde letztendlich ein schichtbasierter Inversionsansatz gewählt (Hampson and Russell, 1984). Die resultierenden P-Wellen Geschwindigkeitsmodelle sind in den Abbildungen 2 und 3 dargestellt.

Abbildung 2 zeigt die Inversionsergebnisse der parallel zum Hang verlaufenden seismischen Profile (I, II und VI in Abb. 1) kombiniert mit einer geologischen Interpretation basierend auf den Bohrungen HH4 und KB3 und in Anlehnung an Lindenmaier (2007). Verschiedene Tests haben gezeigt, dass die plausibelsten und stabilsten Ergebnisse unter Verwendung eines Vierschichtfalles erzielt werden. Als Startmodell dient dabei ein manuell aus mehreren Laufzeit-Offset Analysen abgeleitetes 2D Geschwindigkeitsfeld. Während sich die Profile I (Abb. 2a) und II (Abb. 2b) durch eine hohe räumliche

Schichtvariabilität auszeichnen, zeigt das Profil VI (Abb. 2c) hauptsächlich planare, parallele Schichtverläufe. Diese Beobachtung kann als ein Grund angeführt werden, weshalb im unteren Hangbereich auch maximalen Bewegungsraten beobachtet wurden (Schneider, 1999).

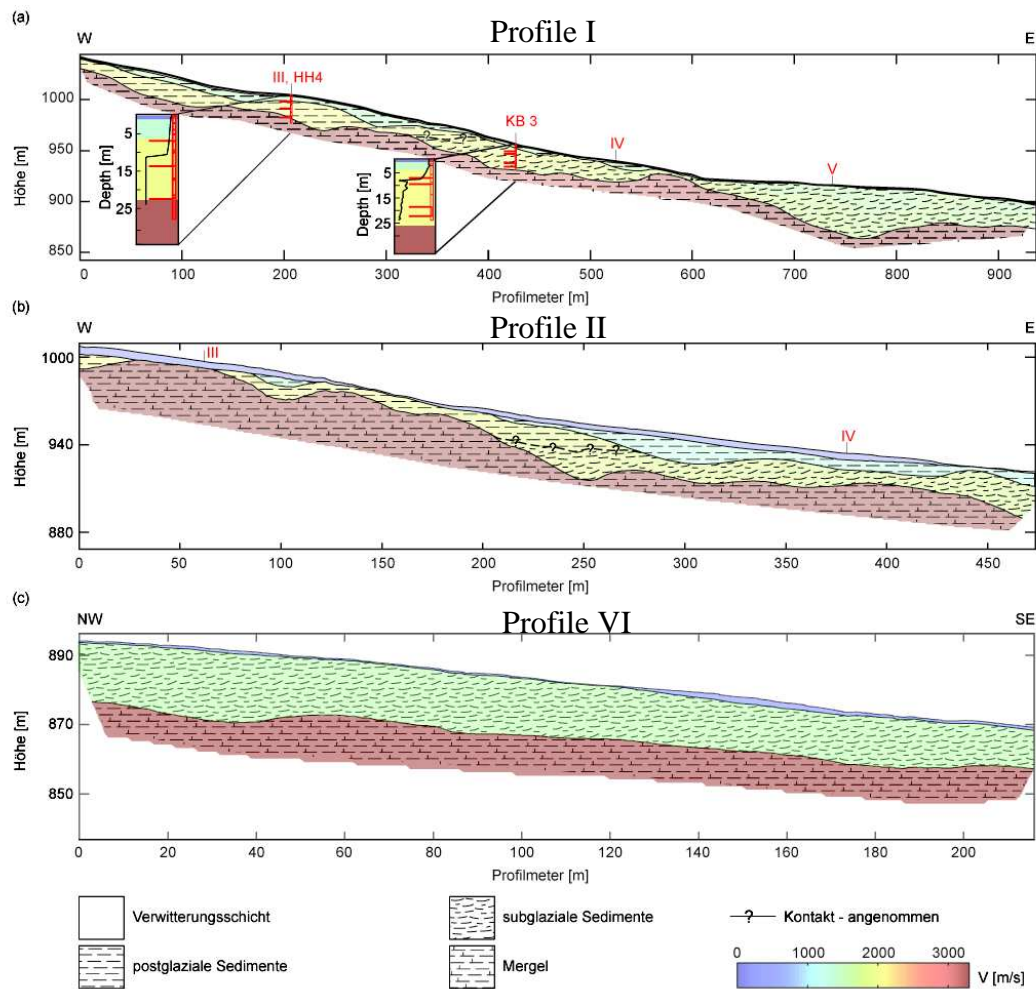


Abbildung 2: Inversionsergebnisse der parallel zum Hang verlaufenden 2D Profile überlagert mit der geologischen Interpretation (in Anlehnung an Lindenmaier, 2007) der einzelnen Schichtpakete. Die räumliche Lage der einzelnen Profile kann Abbildung 1 entnommen werden. In Abbildung 2a wurden zusätzlich die vorhandenen Bohrlochinformationen (Wienhöfer et al. 2009) auf die Profillinie projiziert.

Eine zentrale Beobachtung aus den parallel zum Hang verlaufenden Profile stellt eine dominante, vor unseren Arbeiten gänzlich unbekannte, Struktur in Abbildung 2a um Profilmeter 580-600 dar. Die Festgesteinsoberkante (rotes Schichtpaket in Abb. 2a) liegt an dieser Stelle im Vergleich zu allen anderen Profilen ungewöhnlich oberflächennah. Da in diesem zentralen Hangbereich die Bewegungsraten relativ gering sind (Schneider, 1999) und sich auch die Bewegungsrichtung ändert (siehe Abb. 4), kann davon ausgegangen werden, dass diese Untergrundstruktur eine zentrale Rolle im Hinblick auf die Dynamik des Hanges zukommt. Der Einfluss dieser Struktur wurde im TP 3 mittels Modellierungsrechnungen weiter untersucht.

Eine weitere wichtige Erkenntnis kann durch die Projektion der vorhandenen Bohrlochinformationen (Wienhöfer et al., 2009) auf das entsprechende Geschwindigkeitsmodell (Abb. 2a) gewonnen werden. So zeigt es sich, dass die eigentliche Scherfläche gemäß unserer Ergebnisse innerhalb eines

geologischen Schichtpaketes liegt und somit aufgrund mangelnder Kontraste in der Lithologie bzw. in den relevanten physikalischen Parametern von der Refraktionsseismik nicht aufgelöst werden kann. Daraus ergibt sich, dass die beobachtete Scherfläche nicht an einen seismisch-signifikanten Lithologiewechsel gebunden ist. Dies deckt sich mit Beobachtungen, welche durch Untersuchungen des Bohrkernes (Lindenmaier, 2007) gewonnen werden konnten.

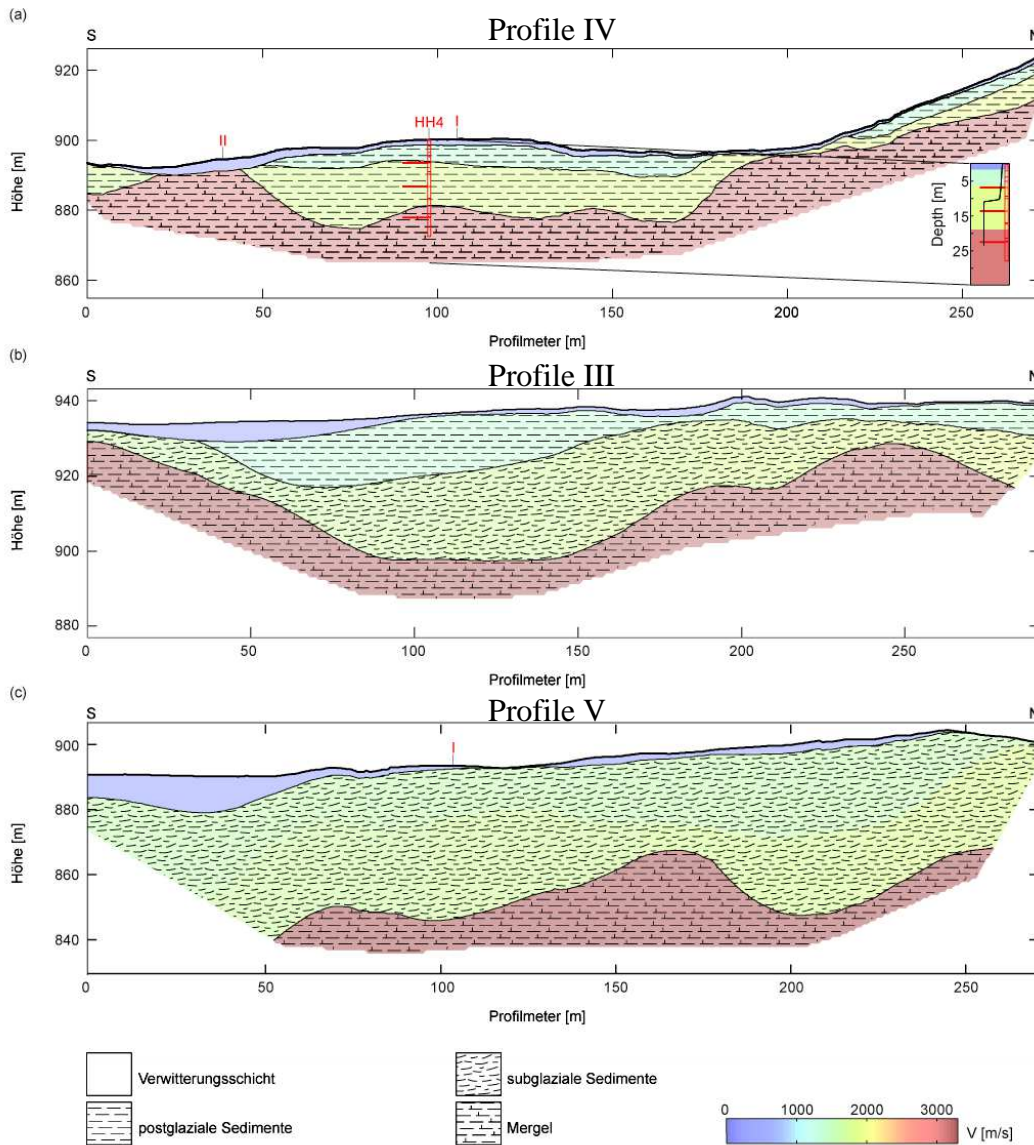


Abbildung 3: Inversionsergebnisse der senkrecht zum Hang verlaufenden 2D Profile überlagert mit der geologischen Interpretation (in Anlehnung an Lindenmaier, 2007) der einzelnen Schichtpakete. Die räumliche Lage der einzelnen Profile kann Abbildung 1 entnommen werden. In Abbildung 3a wurden zusätzlich die vorhandenen Bohrlochinformationen (Wienhöfer et al. 2009) auf die Profillinie projiziert.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der quer zum Hang verlaufenden Profile. Während im oberen und zentralen Hangbereich, Profil III (Abb. 3a) und IV (Abb. 3b), der angenommenen Vierschichtfall abgebildet wird ist zu erkennen, dass in Profil V (Abb. 3c) die zweite und dritte Schicht anhand ihrer P-Wellengeschwindigkeiten nicht mehr unterschieden werden können. Dies ist auch in Abbildung 2a (Profilmeter 700-900) zu sehen und entspricht im Wesentlichen der geologischen Interpretation eines subglazialen Sedimentkörpers in diesem Hangabschnitt (Lindenmaier, 2007).

Um den Einfluss der einzelnen Schichtpakete auf die Hangdynamik zu untersuchen und ein flächenhaftes Bild der relevanten Untergrundstrukturen zu generieren, wurden die 2D Tiefeninformationen anschließend auf der Hangskala räumlich interpoliert. Dazu wurde ein in der Erdölexploration häufig verwendeter Interpolationsansatz verwendet (Haecker, 1992). Dieser iterative Interpolationsansatz gewährleistet die Berücksichtigung großräumiger Trends mit gleichzeitiger Datentreue an den gegebenen Stützstellen (d.h. hier entlang der Profillinien). Abbildung 4 zeigt das räumliche Interpolationsergebnis der Grundgesteinsoberkante kombiniert mit den Bewegungsvektoren nach Schneider (1999).

Die bereits in Abbildung 2a erläuterte oberflächennahe Struktur (gekennzeichnet durch rote Farben im zentralen Hangbereich) deckt sich dabei mit der zu beobachtenden Reduzierung in den Bewegungsraten und dem Trend des Gradienten mit der Bewegungsrichtung. Das in östliche Richtung anschließende postglazial verfüllte Sedimentbecken ist dabei charakterisiert durch eine erhöhte Tiefenlage und eine dementsprechend relativ stabile Hangstruktur. Diese großskalige, räumliche Interpretation führte zu einem deutlich verbesserten Verständnis der gesamten Hangdynamik.

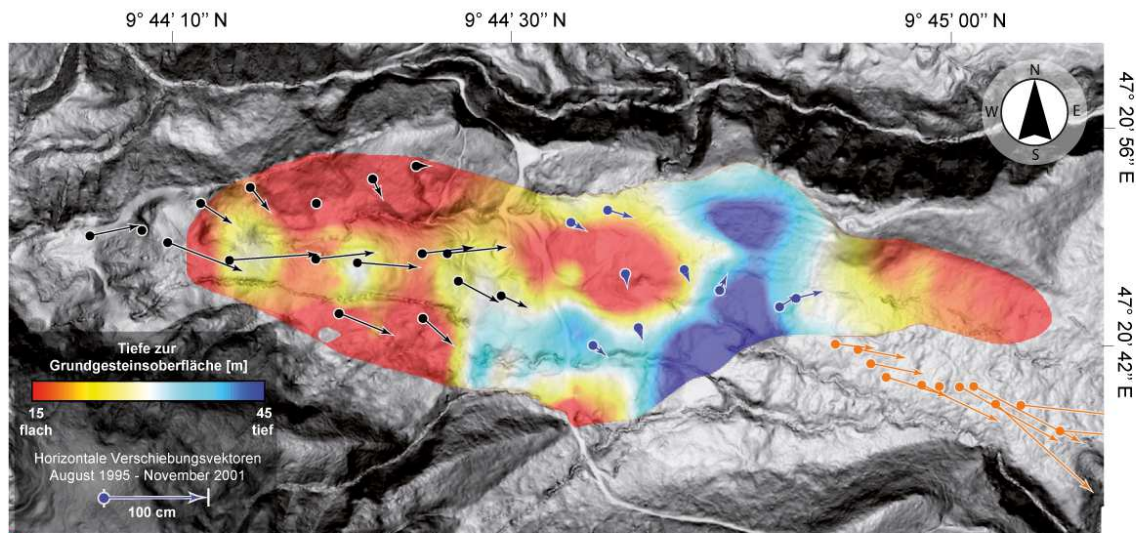


Abbildung 4: Flächenhaft interpolierte Grundgesteinsoberfläche überlagert mit Verschiebungsvektoren (Schneider, 1999). Farbkodiert ist die Tiefe zur Grundgesteinsoberfläche. Die sehr oberflächennahe Struktur (rote Farbe im zentralen Bereich) korreliert deutlich mit den von Schneider (1999) beobachteten niedrigen Bewegungsraten.

3D refraktionsseismische Untersuchungen (P-Wellengeschwindigkeiten)

Basierend auf den Ergebnissen der 2D Refraktionsseismik und deren flächenhaften Interpolation sowie unter Berücksichtigung der geodätischen Untersuchungen von Schneider (1999) wurde der mittlere Hangbereich als ein für die Hangdynamik zentraler Bereich identifiziert. Um diese Struktur und ihre räumlich Lage und Ausdehnung detailliert zu untersuchen, wurde ein aufwendiges seismisches 3D Experiment geplant und durchgeführt, welches in seinen Akquisitionsparametern (Anzahl Schüsse und Empfänger) und -auflösung für oberflächennahe Erkundungen v.a. im alpinen Bereich als einmalig angesehen werden kann.

In Zusammenarbeit mit dem geophysikalischen Gerätepool des Geoforschungszentrums Potsdam (GFZ) war es möglich, eine Kombination aus 235 kontinuierlichen seismischen Stationen (sogenannte DSS Cubes) und 408 konventionellen Kanälen (Geodensystem) zusammenzustellen; d.h. 643 Messkanäle waren für das 3D Experiment gleichzeitig aktiv. Die Planung dieses Experimentes erfolgte unter Einbezug der Resultate der 2D Profillinien. Um die zur erfolgreichen Strukturabbildung erforderliche Datendichte innerhalb eines praktikablen Experimentes zu gewährleisten, wurde die Messgeometrie mittels detaillierten 3D Vorwärtsmodellierungen der zu erwartenden Laufzeiten geplant. Hieraus resultierte ein dichtes Beobachtungsnetzwerk (Geophonabstände ca. 2 m), das notwendig war, um die oberflächennahen sowie wenige Meter mächtigen Schichtpakete aufzulösen. Diese Erkenntnisse führten dazu, dass mit dem letztendlich realisierten Versuchsaufbau eine Fläche von 144 x 144 m abgedeckt werden konnte, welche aufgrund der immer noch limitierten Anzahl Kanäle zwei Mal vollständig „durchschossen“ werden musste. Aus den 343.362 aufgezeichneten Spuren konnten 239.066 Erstankunftszeiten manuell bestimmt werden, wovon schlussendlich (aufgrund einer deutlich schlechteren Datenqualität als in den 2D Profilen) 103.598 Ankunftszeiten für die Inversion verwendet wurden. Eine Relaxation des gewählten Qualitätskriteriums führte zu sehr ähnlichen Ergebnissen auch unter Verwendung von ca. 80.000 zusätzlichen Laufzeiten.

Abbildung 5 zeigt den gesamten Messaufbau mit Quell- und Empfängerpositionen. Das finale 3D Inversionsergebnis ist rechts in Abbildung 5 zu sehen. Auch die 3D Inversionsergebnisse zeigen den dominanten Anstieg des Grundgesteines zur Oberfläche im zentralen Bereich, welcher aus den räumlich interpolierten 2D Profilen vermutet wurde und zu dieser Detailuntersuchung führte. Obschon bereits mit den interpolierten Resultaten ein deutlich verbessertes Verständnis der räumlichen Grundgesteinsvariation gewonnen werden und kinematische Schlussfolgerungen gezogen werden konnte, weisen die 3D Ergebnisse deutlich mehr Details auf. Diese Ergebnisse können als ausgesprochen wichtig angesehen werden, um im Rahmen einer detaillierten Analyse und Modellierung die mechanischen Prozess in diesem Kernbereich zu verstehen und möglichst realitätsnah abzubilden. Eine weitere Publikation mit den aus diesem, 3D refraktionsseismischen, Experiment gewonnen Erkenntnissen und Ergebnissen befindet sich in Vorbereitung.

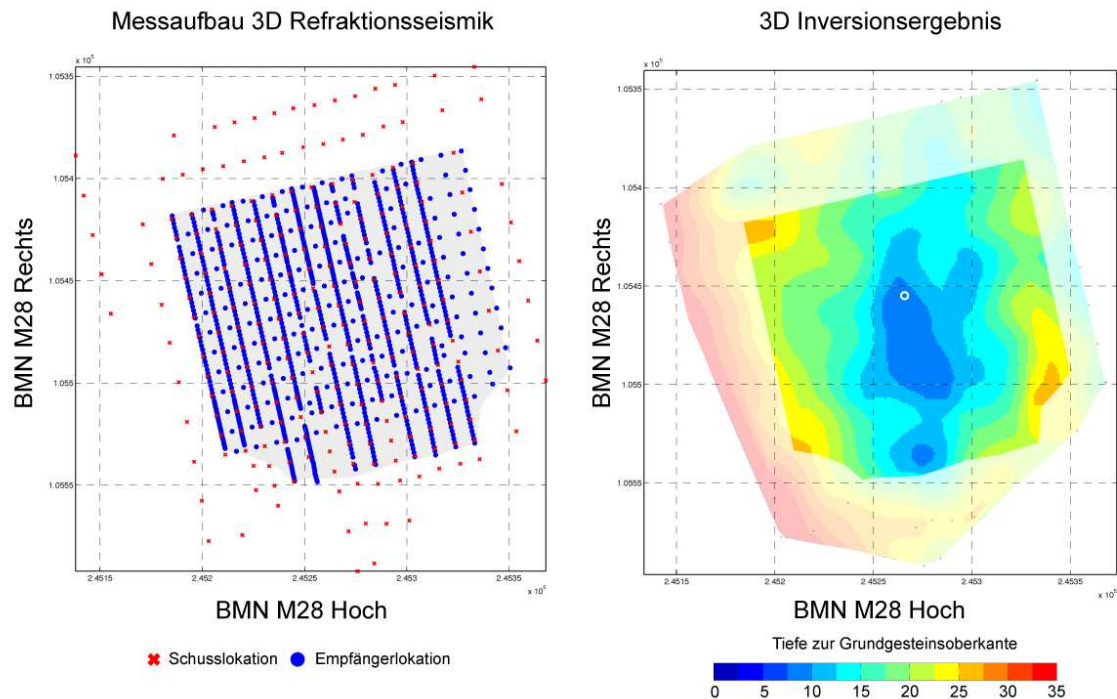


Abbildung 5: Messaufbau des 3D refraktionsseismischen Experiments (links) und das Inversionsergebnis (rechts). Farbkodiert ist die Tiefe zur Grundgesteinsoberkante in Meter.

In Ergänzung zu den neuen strukturellen Erkenntnissen, die im Rahmen der von unserem Teilprojekt durchgeführten seismischen Untersuchungen gewonnen werden konnten, wurden weitere ergänzende Feldexperimente durchgeführt.

Bohrlochmessungen und 2D Scherwellenprofile

Zur Validierung und genaueren Charakterisierung der aus den hochauflösenden 2D Refraktionsprofilen (inkl. der 3D Interpolation) und der 3D seismischen Untersuchung gewonnenen strukturellen Resultate wurden weitere geophysikalische Messungen durchgeführt. Dies umfasste bohrlochgeophysikalische (Log)-, seismische Bohrloch-zu-Oberfläche (VSP) sowie seismische Scherwellen-Messungen mittels einer Vibratorquelle.

Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Bohrloch-Logs und der VSP Messungen. Ein Problem aller Bohrloch Messungen bestand darin, dass keine der Bohrungen bis zum Grundgestein abgeteuft werden konnte. Dies lag an den aufgrund des hohen Tonanteils auftretenden hohen Mantelreibungswiderstände, die beim Direct Push Verfahren, im Gegensatz zum klassischen Ansatz des Bohrens, einen kritischen Einfluss auf die erzielbare Endteufe haben. Diesbezüglich konnten die Bohrlochverfahren auch nicht die erhofften punktuellen Detailinformationen liefern.

Abbildung 6 zeigt die gewonnenen, bohrlochbasierten Daten an den einzelnen Direct Push Punkten (s.a. Abb. 1). Die gezeigten Gamma-Ray Daten, natürliche Aktivität Gamma-Strahlung, bieten aufgrund ihrer geringen Eindringtiefe nur wenig Informationsgehalt. Ein deutlicher Unterschied zwischen DPB 1 und DPB 2 ist jedoch ersichtlich. Während an DPB 1 die Zählraten mit der Tiefe abnehmen, ist ein deutlicher Anstieg unterhalb der Verwitterungsschicht an DPB 2 erkennbar. Im Fall von DPB 2 kann dies mit einer Zunahmen im Tongehalt erklärt werden, was sich auch mit

Feldbeobachtungen deckt. DPB 3 verhält sich unterschiedlich und weist eine deutlich höhere Variabilität als DPB 1 und DPB 2 auf. Dies beruht darauf, dass dieser Bereich erst kürzlich für den Skibetrieb mit lokalem und externem Material modelliert wurde und somit von einem stark gestörten Untergrund ausgegangen werden kann.

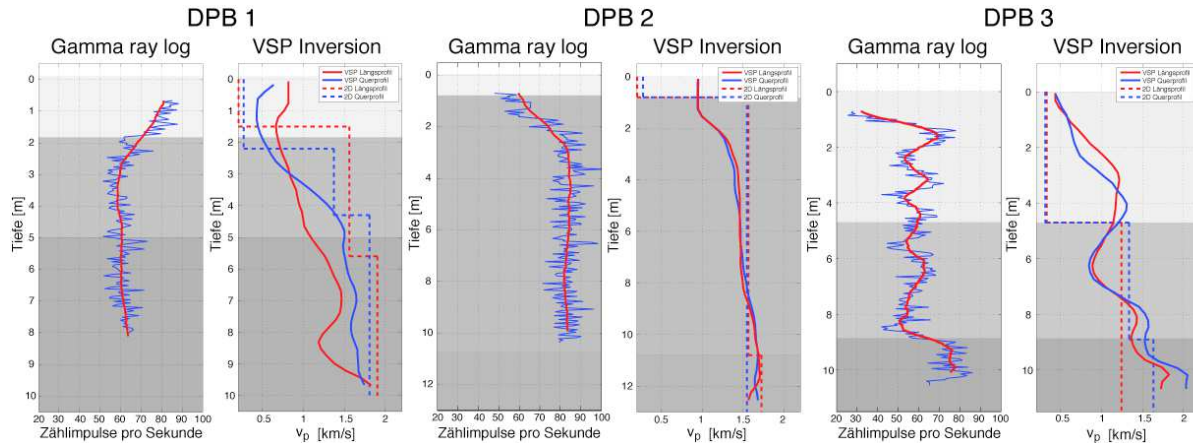


Abbildung 6: Resultate des Gamma Ray Logs und der VSP Messungen im Vergleich zu den schichtbasierten Inversionen (2D Refraktionsseismik). Die Bohrlochlokalationen können Abbildung 1 entnommen werden. Die tatsächlichen Gamma Ray Logs wurden mittels eines gleitenden Mittelwert geglättet, um Trends hervorzuheben. In den Abbildungen bezüglich der VSP Inversionen entsprechen die ausgezogenen Linien der VSP Inversionsergebnisse und die gestrichelten Linien den Geschwindigkeits-Tiefenprofilen aus der 2D-schichtbasierten Inversion jeweils parallel und senkrecht zum Hang gemessen. Hinterlegt in Grauskala sind die mittleren Schichtgrenzen aus den profilbasierten 2D Inversionen.

Die Ergebnisse der VSP Inversionen bestätigen die Ergebnisse der schichtbasierten Inversion (2D Refraktionsseismik). So konnte an DPB 2 die in den 2D Profilen erkennbare Beckenstruktur auch hier abgebildet werden. Unterhalb der Verwitterungsschicht bildet sich ein homogenes Sedimentpaket, welches sich bis zur Grundgesteinsoberkante nur durch minimale Geschwindigkeitsvariationen auszeichnet. Dieses Verhalten ist auch in den VSP Messungen an dieser Position erkennbar. Eine synthetische Studie basierend auf dem VSP Geschwindigkeitsmodell von DPB 3 konnte zeigen, dass die Existenz einer Schicht mit reduzierter Geschwindigkeit schichtbasiert-invertiert ein vergleichbares Resultat liefert. Generell ist jedoch hier zu erkennen, dass die oberflächennahen P-Wellengeschwindigkeiten deutliche Unterschiede zwischen den VSP und schichtbasierten Inversionen aufweisen. Dies kann damit erklärt werden, dass im Fall der VSP Inversion dieser sehr oberflächennahe Bereich nur sehr schlecht abgedeckt wird. In den Profilmessungen besteht ein ähnliches Problem, da aufgrund dieser geringen Mächtigkeit die direkte Welle sehr schussnah durch die erste refraktierte Welle überholt wird und die schussnahen Geophonpositionen oft übersteuert wurden. Dementsprechend sind die Inversionsergebnisse in Tiefe und Geschwindigkeit dieser obersten Schicht stets kritisch zu betrachten.

Weiter wurden Scherwellenexperimente durchgeführt, um auf den P-Wellengeschwindigkeiten aufbauend ein vollständigeres Bild des Heumöser zu erhalten. Unterschiedliche Ansätze wurden

bezüglich ihrer Machbarkeit untersucht sowie unter anderem auch eine Scherwellen-Vibratorquelle. Es hat sich gezeigt, dass mittels Hammerschlagseismik keine uns ersichtlichen Scherwellen erzeugt werden konnten. Auch stellte sich die gezielte Generierung von Scherwellen an diesem Standort als eher schwierig heraus. Abbildung 7 (links) zeigt einen seismischen Einzelschuss akquiriert mit einer Vibrationsquelle (20-80 Hz Sweep) und das daraus abgeleitete Geschwindigkeitsprofil. Projiziert man dieses Resultat auf den entsprechenden Profilbereich der 2D Refraktionsseismik und stellt die Schichtgrenzen als Isopachen dar, so sieht man, dass unter Berücksichtigung der mittleren Schichttiefen die P- und S-basierten Schichtgrenzen gut übereinstimmen. Die Datenqualität in Abbildung 7 stellt jedoch eine Ausnahme dar, da sie in einem Bereich mit stärker verfestigten Untergrund erfolgte. Der Großteil der durchgeführten Testmessungen mit der Vibrationsquelle stellte sich jedoch als nicht auswertbar dar. Aufgrund der mangelnden Qualität und der eingeschränkten Praktikabilität des Vibrators im alpinen Gelände wurden keine ausgedehnten Messkampagnen mit dieser Technik durchgeführt.

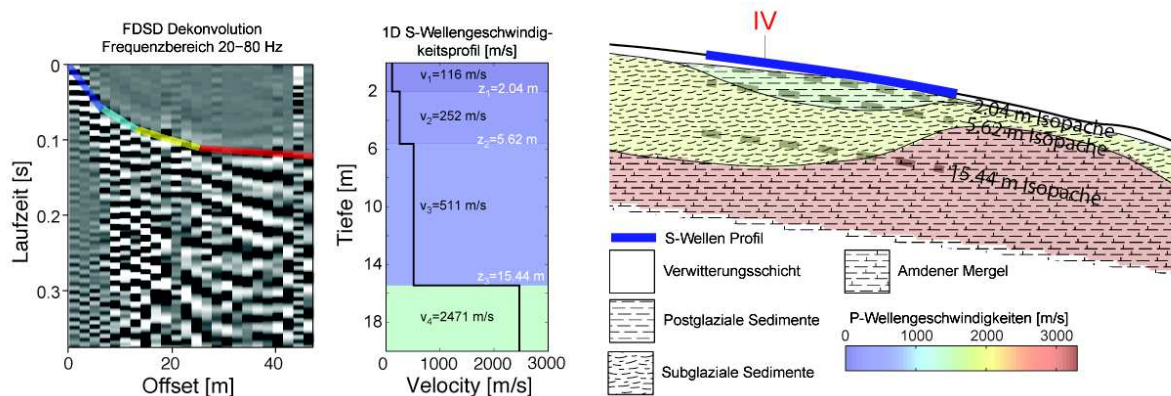


Abbildung 7: Resultate der Elvis III Scherwellenquelle exemplarisch gezeigt für einen Sweep unter Verwendung eines Frequency-Domain Sweep Dekonvolutionsansatzes. Links: beispielhafter Einzelschuss mit interpretiertem Vier-Schichtfall. Mitte: resultierendes 1D Geschwindigkeitsprofil. Rechts: Isopachen der Schichtgrenzen überlagert über einen Ausschnitt aus Abbildung 2a (Profil I).

Aus dem punktuell hochauflösenden Scherwellendatensatz (Abb. 7) können dennoch wichtige Information abgeleitet werden. Die erste Schicht weist ein Geschwindigkeitsverhältnis V_p/V_s von $(280 \text{ m/s})/(116 \text{ m/s}) = 2,41$ auf, was die locker gelagerte Verwitterungsschicht charakterisiert. Die zweite und dritte Schicht weisen deutlich erhöhte Verhältnisse von $(1565 \text{ m/s})/(252 \text{ m/s}) = 6,21$ bzw. $(1880 \text{ m/s})/(511 \text{ m/s}) = 3,68$ auf. Dies weist auf wassergesättigte Schichten mit relativ großen Porenräumen hin. Das Grundgestein hingegen ist durch ein sehr kleines Verhältnis von $(3150 \text{ m/s})/(2471 \text{ m/s}) = 1,27$ charakterisiert, was oft mit geschichteten Medien und schichtungsorthogonaler Wellenausbreitung in Bezug gebracht werden kann (Schön, 2004).

1.4.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Die in diesem Teilprojekt gewonnenen Ergebnisse wurden innerhalb der Forschergruppe kommuniziert und den anderen Teilprojekten zur Verfügung gestellt. Erste Resultate konnten bereits in einem frühen Stadium dieser zweiten Antragsphase in die Modellierungen einfließen. Verfeinerte Resultate wurden im Laufe der Projektphase den einzelnen Teilprojekten zur Verfügung gestellt, so dass ein kontinuierlicher Informationsaustausch gewährleistet war. Weiterführende 3D mechanische Modellierungen im zentralen Hangebereich wären vorstellbar und würden wohl weitere Rückschlüsse über die Hangstabilität und einen möglichen Zusammenhang zwischen der natürlichen seismischen Aktivität und den Untergrundstrukturen am Heumöser liefern.

Beruhend auf den letztendlich über die gesamte Hangskala verfügbaren Geschwindigkeitsinformationen könnten die von TP5a seismologischen Ereignisse verfeinert und in eine gemeinsame Interpretation eingebunden werden. Abbildung 8 zeigt das Resultat einer synthetischen Studie, in welcher die seismologischen Ereignisse mittels eines maximalen und minimalen 3D Geschwindigkeitsmodells unter Verwendung eines 3D-Lösers der Eikonalgleichung und mittels minimaler Differenzlaufzeiten lokalisiert wurden. Der Radius des Kreises spiegelt den Unterschied zwischen den beiden Geschwindigkeitsmodellen (5-fach verstärkt) wider. Es zeigt sich, dass über einen großen Bereich nur minimale Unterschiede bestehen und eine Verfeinerung der Lokalisierung unter Berücksichtigung des detaillierten refraktionsseismischen Geschwindigkeitsmodells möglich wäre. Dies in Zusammenhang mit der räumlichen Variation der Grundgesteinsoberkante stellt eine mögliche weitere Zusammenarbeit mit TP5a auch über die eigentliche Projektlaufzeit dar.

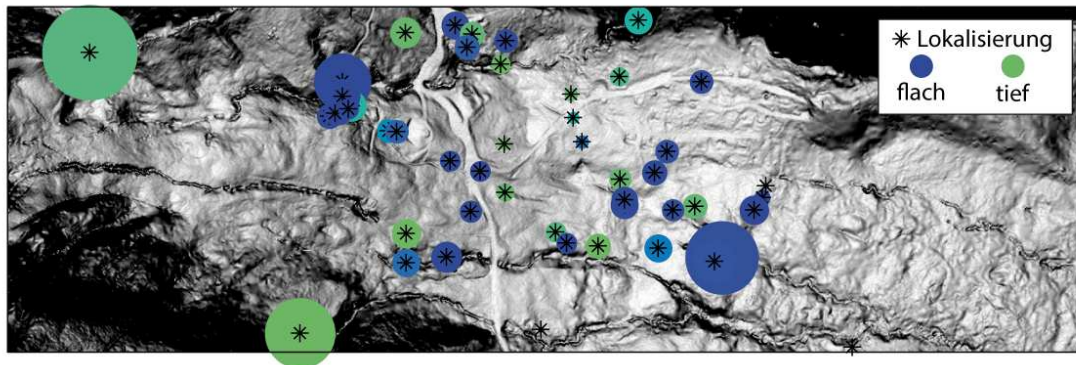


Abbildung 8: Synthetischer Test bezüglich des Einflusses des Geschwindigkeitsmodells auf mögliche Lokalisierung von seismologischen Ereignissen. Farbkodiert ist die Tiefenlage der minimalen Laufzeitdifferenz pro Event. Die Größe des Kreises spiegelt die Lokalisierungsunterschiede zwischen einem minimalen und einem maximalen 3D Geschwindigkeitsmodell (5-fach skaliert) berechnet aus den flächenhaft interpolierten 2D Ergebnissen wider.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Zurzeit sehen wir nicht, dass die Ergebnisse dieses Projektes für eine unmittelbare wirtschaftlichen Verwertung in Betracht kommen und insofern sind auch keinerlei Aktivitäten in diese Richtung geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine besonders enge Abstimmung mit TP1a, TP5a und TP5b stattgefunden. Eine weitere enge Zusammenarbeit hat mit dem Geoforschungszentrum Potsdam (GFZ) im Rahmen des Geophysikalischen Gerätepools (GIPP) stattgefunden.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Diplomarbeit:

Michael Rumpf (2010): Refraktionsseismische Untersuchungen am Heumöser Hang, Institut für Erd- und Umweltwissenschaften, Universität Potsdam.

Weiterhin wurden eine Reihe von studentischen Hilfskräften durch dieses Projekt die Möglichkeit gegeben, sich an wissenschaftlicher Projektarbeit zu beteiligen und einzubringen.

Literaturverzeichnis

- Haecker M. (1992): Convergent gridding: a new approach to surface reconstruction. *Geobyte* 7 (3), 48-53.
- Hampson D. and Russell B. (1984): First-break interpretation using generalized linear inversion. *Journal of the Canadian Society of Exploration Geophysicist*, 20 (1), 40-54.
- Lindenmaier F. (2007): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg. Identifying dominating processes and structures. Doktorarbeit, Universität Potsdam.
- Schön J. H. (2004): *Physical Properties of Rocks: Fundamentals and Principles of Petrophysics*, Elsevier.
- Schneider U. (1999): Geotechnische Untersuchungen, satellitengestützte (GPS) Bewegungsanalysen und Standsicherheitsüberlegungen an einem Kriechhang in Ebnit. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe.
- Wienhöfer J., Lindenmaier F. and Zehe E. (2009): Temporal variability of a slow-moving landslide: the Heumöser Hang case study in Vorarlberg, Austria. In; Malet, J.-P., Rémaitre, A., Boogard, T. (Eds.), *Landslide Processes - From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling*, 221-225.

1.4.2 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Teilprojektes wurden der geologische Aufbau des oberflächennahen Untergrundes am Heumöser mittels hochauflösender 2D und 3D Refraktionsseismik untersucht. Der Umfang und das Auflösungsvermögen der durchgeführten seismischen Experimente kann nach unserem Kenntnisstand als einzigartig in einem solchen alpinen Gelände angesehen werden. Die aus der Refraktionsseismik resultierenden Inversionsergebnisse, insbesondere die räumliche Variation der

Grundgesteinsoberkante, haben zu einem deutlich verbesserten Verständnis des Aufbaus des Heumöser und der relevanten hydrologischen und mechanischen Prozesse beigetragen.

Ein dichtes Netz ausgedehnter 2D refraktionsseismischer Profile über eine Länge von insgesamt ca. 2,5 km lieferte dabei ein lokal hochaufgelöstes und räumlich interpoliertes Bild der dominanten geologischen Einheiten. Anhand der resultierenden 2D Modelle der seismischen P-Wellengeschwindigkeit hat sich auch gezeigt, dass die an zwei Bohrlöchern detektierte Scherfläche mit keinem seismisch signifikanten Lithologiewechsel in Verbindung steht. Anhand der 2D Ergebnisse konnte auch eine bis dato unbekannte Aufwölbung des Grundgesteins detektiert werden. Diese Struktur kann mit einer deutlichen Erniedrigung der bekannter Bewegungsraten in diesem Hangbereich in Beziehung gebracht werden. Zur Bestätigung und detaillierten räumlichen Abbildung dieser Struktur wurde auf der Basis der 2D seismischen Messungen eine aufwendige 3D refraktionsseismische Messkampagne geplant und durchgeführt. Das daraus resultierende 3D Modell der seismischen P-Wellengeschwindigkeit bestätigte und verfeinerte die aus den 2D refraktionsseismischen Messungen bekannten Informationen.

Zur weiteren Charakterisierung der detektierten geologischen Einheiten wurden verschiedene bohrlochbasierte Experimente sowie seismische Scherwellenexperimente durchgeführt. Aufgrund der schwierigen standortspezifischen Gegebenheiten konnten leider die angestrebten Zieltiefen der Bohrungen nicht erreicht werden. Dennoch konnten mittels VSP Messungen innerhalb der realisierten Bohrungen die Ergebnisse der 2D Refraktionsseismik bestätigt werden. Die Scherwellenexperimente konnten punktuell Informationen bezüglich der Tiefenvariation der Scherwellengeschwindigkeiten liefern. In Kombination mit den P-Wellengeschwindigkeiten konnten somit die mechanischen Eigenschaften der einzelnen Schichtpakete deutlich besser charakterisiert werden.

Zusammenfassend ist es uns im Rahmen dieses Teilprojektes gelungen, die Lücke zwischen einer schematischen geologischen Interpretation des Untergrundes und der Realität zumindest in großen Teilen des Untersuchungsgebietes zu schließen. Dies ist als wichtiger Schritt in Richtung realistischeren hydrologischer und mechanischer Modellierungen auf der Hangskala zu betrachten und ist dementsprechend auch in die jeweiligen Teilprojekte eingeflossen.

**Numerische Simulation von
Zweiphasenströmungsprozessen im Untergrund bei
Großhangbewegungen**

Teilprojekt 2 im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

**Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann
Dr.-Ing. Rainer Helmig**

31.3.2013

Technische Universität Berlin
in Kooperation mit der Universität Stuttgart

1.5 Abschlussbericht TP2

1.5.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.5.1.1 DFG Geschäftszeichen

HI 640/5-3

1.5.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Hinkelmann

Universitätsprofessor, geb. 30. November 1962, Deutscher

Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung

Institut für Bauingenieurwesen, Technische Universität Berlin, Sekr. TIB 1 - B 14, Gustav-Meyer-Allee 25, 13355 Berlin, Tel.: 030 / 314 23961, Fax: 030 / 314 22910,

Reinhard.Hinkelmann@wahyd.tu-berlin.de, www.wahyd.tu-berlin.de

Privatadresse: Wilhelm-Bluhm-Str. 42, 30451 Hannover, Tel.: 0511 / 715460

zusammen mit

Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig

Universitätsprofessor, geb. 26. März 1957, Deutscher

Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61 70550 Stuttgart, Tel.: 0711 / 685 4749, Fax: 0711 / 685 7020

E-mail: Rainer.Helmig@iws.uni-stuttgart.de

Privatadresse: Erholungsheimstr. 23/1, 71083 Herrenberg, Tel.: 07032 / 795609

1.5.1.3 Thema des Projekts

Numerische Simulation von Zweiphasenströmungsprozessen im Untergrund bei Großhangbewegungen

1.5.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum begann am 1.1.2009 und endete am 31.12.2011.

1.5.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Hinkelmann,R., Zehe,E., Ehlers,W. & Joswig,M. (2011): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies. *Vadose Zone Journal*, (10(2)), pp. 473-476; doi:10.2136/vzj2011.0032

- Simons,F., Busse,T., Hou,J., & Hinkelmann,R. (in press): *A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System*. Journal of Hydroinformatics; doi:10.2166/hydro.2013.173
- Stadler,L., Hinkelmann,R., & Helmig,R. (2012): Modelling Macroporous Soils with a Two-Phase Dual-Permeability Model. *Transport in Porous Media*, pp. 585-601; doi10.1007/s11242-012-0064-3
- b)** Hinkelmann,R. Stadler,L., Germer,K. & Braun,J. (2009a): Development of Model Concepts for Flow in Macro-porous Media. SIAM Conference on Mathematical & Computational Issues in the Geosciences, Leipzig, Germany, abstract and oral presentation in Minisymposium
- Hinkelmann,R. & Zehe,E. (2010): Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes. International Conference Triggering of Rapid Mass Movements in Steep Terrain - Mechanism and Risks, Monte Verita, Switzerland, abstract and keynote lecture
- Stadler,L., Admaczak,C. & Hinkelmann,R. (2011a): Modelling water infiltration into macroporous hill slopes using special boundary conditions. Proceedings of Coupled Problems 2011: Computational Methods for Coupled Problems in Science and Engineering IV, Greece, Kos Island, ISBN 978-84-87867-59-0, paper and oral presentation
- Stadler,L., Germer,K. & Hinkelmann,R. (2011b): Developing Model Concepts for Simulating Water Infiltration into Macroporous Soils for Understanding Triggers for Landslides. Geophysical Research Abstracts **13**, EGU2011-2415-1, EGU General Assembly Vienna, Austria, abstract and oral presentation
- Stadler,L., Hinkelmann,R. & Zehe,E. (2009): Two-phase flow simulation of water infiltration into layered natural slopes inducing soil deformation. Proceedings of the International Conference - Landslide Processes: From Geomorphological Mapping to Dynamic Modelling, Strasbourg, France. ISBN: 2-9518317-1-4, pp. 197-201, reviewed paper and oral presentation

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.5.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

In den vorangegangenen Arbeiten der Forschergruppe wurde die These entwickelt, dass die makroporösen Bereiche des Heumöser und das darunter liegende Festgestein ein zusammenhängendes Drucksystem bilden, das entscheidend für die beobachteten Hangdeformationen ist. Während Regenperioden gelangt das infiltrierende Wasser zügig in die tieferen Hangschichten und sorgt für den beobachteten Druckanstieg, der letztendlich die Deformationen am Hang auslöst (siehe auch Hinkelmann et al. 2011, Lindenmaier 2008).

Ziel der Arbeiten von TP2 war es, die schnelle Infiltration in den makroporösen Bereichen zu simulieren. Hierfür wurde das Zweiphasen-Dual-Permeability-Modell (2PDPM) für den Feldfall weiterentwickelt und in Dumux implementiert. Für die Anwendung des 2PDPM müssen die bodenhydraulischen Parameter für das Matrix- und Makroporengbiet vorgegeben werden. Zusätzlich muss der Austausch zwischen den beiden Porengbietern mit Hilfe geeigneter Terme beschrieben werden. Für die Untersuchung des Austauschs wurden von TP4 Experimente (Halbtonnenversuche) durchgeführt und in der ersten Projektperiode ein Modellkonzept für die Simulation entwickelt. Während sich die Makroporenversuche von TP4 im Wesentlichen auf die Grundlagen für den Austausch zwischen Matrix und einer einzelnen Makropore konzentrierten, stand für die Simulation der Strömungsprozesse im Feldfall die Bestimmung gemittelter bodenhydraulischen Parameter im Vordergrund. Eine wichtige Aufgabe war es daher, in Kooperation mit den anderen Projektpartnern die für die Modellierung auf der Hangskala notwendigen Modellparameter (Geometrien, bodenhydraulische Parameter etc.) zu bestimmen. Um ein besseres Verständnis über die Interaktion zwischen Matrix und Makroporen zu bekommen, war geplant, die Austauschprozesse anhand der Infiltrationsexperimente von TP1 nachzuvollziehen. Für diese Untersuchung war die Erweiterung des Modells um den Transport eines konservativen Tracers in der Wasserphase vorgesehen.

Der letzte geplante Schritt war die Einbindung des Modells in das Gesamtkonzept einer optimalen Modellkomplexität. Dazu gehörte die Erweiterung und Kopplung des Modells mit den Modellen Catflow (Untergrund, TP1) und HMS (Oberflächenabfluss, TP2), um Anfangs- und Randbedingungen einschließlich ihrer Dynamik zu beschreiben. Die Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse auf der Hangskala hingen stark vom Zusammenwirken der Prozesse an der Erdoberfläche ab. Die Beschreibung dieser Dynamik über Randbedingungen wurde als zwingend notwendig erachtet, um die schnelle Wasserinfiltration über die makroporösen Hangebereiche zu simulieren und die Druckreaktion der Anfangsthese zu belegen.

1.5.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Simulation Laborexperimente und Parameterbestimmung

Die Studien zu den Halbtonnenexperimenten (Hinkelmann et al. 2009a, Stadler et al. 2011b) haben gezeigt, dass die hohe Kapillarität des Sandes ein Spezialfall für die Makroporeninfiltration darstellt. Die Matrix ist bei niedrigen bis mittleren Infiltrationsraten in der Lage, das Wasser vollständig aufzusaugen, so dass die Makropore im mittleren Bereich über die ganze Infiltrationszeit hinweg

trocken bleibt. Das Wasser strömt im oberen Bereich in die Matrix, fließt über die Matrix zum Boden der Tonne, wo sich das Wasser leicht aufstaut und über die Makropore zur Öffnung am Behälterboden ausströmt. Anders als ursprünglich erwartet war nicht die Formulierung und Parametrisierung des Austauschterms zwischen Matrix und Makroporen das entscheidende Problem, sondern die Parametrisierung des Sandes. Durchgeführte Parameteroptimierungen und Sensitivitätsstudien haben gezeigt, dass für stark unterschiedliche Matrixparameter eine gleich gute Anpassung an die von TP4 gemessenen Tensiometerdaten möglich ist. Die ursprünglich geplante Übertragung der Austauschparameter auf den Feldfall erwies sich als wenig praktikabel, da die gewonnen Koeffizienten für den Austausch viel größer waren als in der Literatur angegebene Werte für Richardsmodelle. Dies lag daran, dass die Oberflächen der Makroporen im Feld oft mit schlecht durchlässigen Schichten überzogen waren, die den Austausch hemmen. So haben die von TP1a am Heumöser untersuchten Makroporen eine dunkle Oberfläche, was auf eine hemmende Wirkung auf die Austauschprozesse schließen ließ.

Die Simulation der Halbtonnenexperimente (Abb. 1) erlaubte es aber, die Nichtlinearität des Wasseraustausches über die Zeit zu analysieren. Dies war vor allem wichtig, um in Abhängigkeit des betrachteten Bodentyps zu entscheiden, ob Austauschansätze höherer Ordnung möglicherweise entscheidende Vorteile haben (siehe Zimmermann et al. 1996, Köhne et al. 2004).

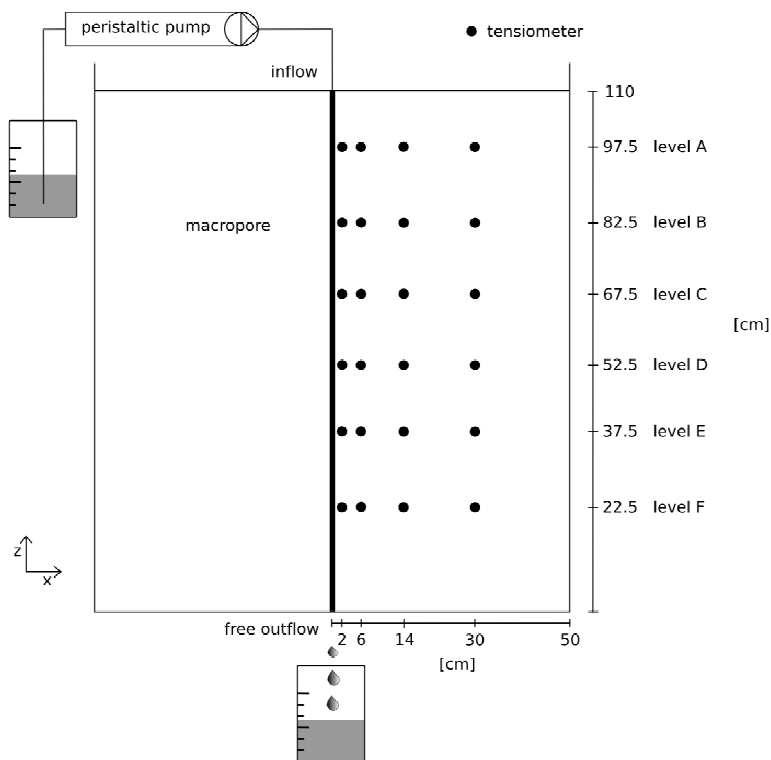


Abbildung 1: Versuchsaufbau Halbtonnenexperiment

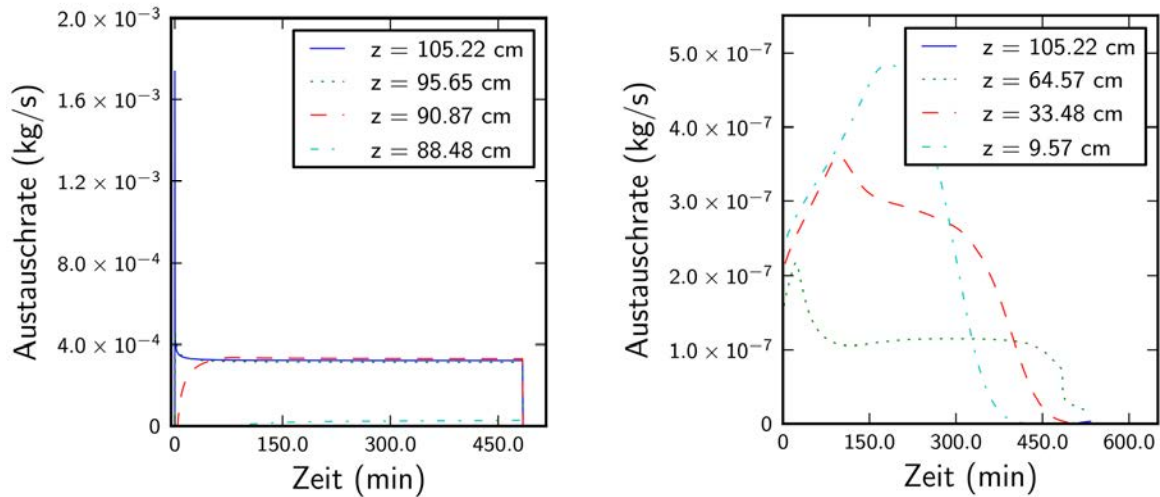


Abbildung 2: Simulierter Wasseraustausch von der Makropore in die Matrix (Links) und Luftaustausch (rechts) in unterschiedlichen Höhen während einer Infiltrationsrate von 166 ml/min (Versuch Q166)

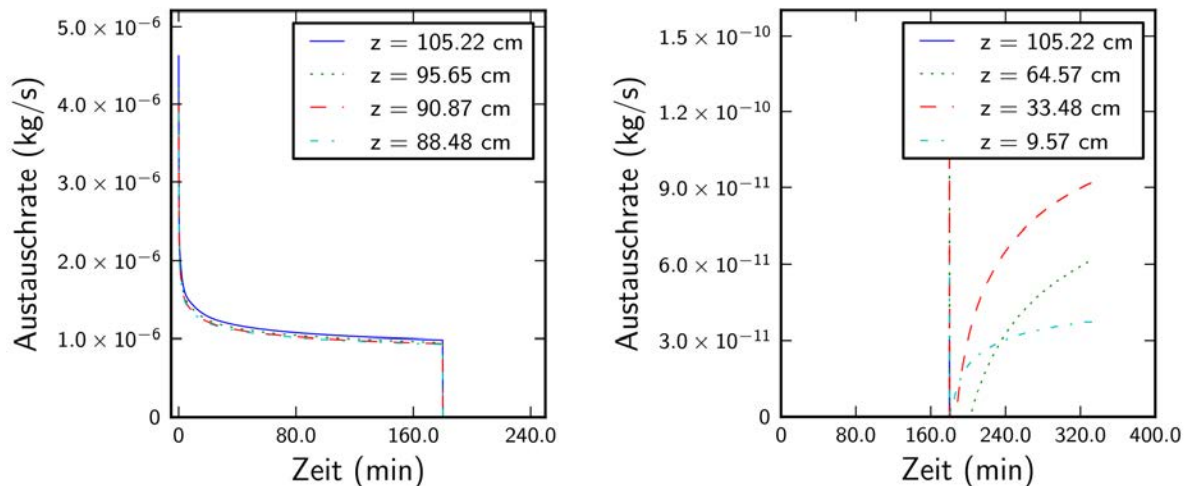


Abbildung 3: Simulierter Wasseraustausch von der Makropore in die Matrix (Links) und Luftaustausch (rechts) in unterschiedlichen Höhen während einer Infiltrationsrate von 166 ml/min für einen schluffigen Lehm

Abbildung 2 zeigt die Entwicklung des simulierten Wasseraustausches für den im Experiment untersuchten Sand über die Zeit. Im Nachhinein hat sich gezeigt, dass der Luftaustausch im Experiment die wichtigere Komponente im Vergleich zum Wasseraustausch darstellt. Ursprünglich wurde angenommen, dass die Luft vollständig über die Bodenmatrix entweicht. Die Simulation zeigt aber einen deutlichen Austausch der Bodenluft. Zu beachten ist, dass während des Experiments nur der obere Bereich der Makropore gesättigt war (~ bis $z = 85$ cm). Am obersten Knoten ($z = 105.22$ cm) kommt es erst nach der Wasserzugabe zum Luftaustausch.

Wenn das Modell für andere Böden angewendet wird, ergeben sich andere Austauschraten, zudem wird bei verringerten Transferraten während der Infiltration die gesamte Makropore mit Wasser gesättigt. Abbildung 3 zeigt den zeitlichen Verlauf für einen schluffigen Lehm für einen hohen Anfangswassergehalt. Der Wasseraustausch findet über die gesamte Höhe statt und ist deutlich

geringer als für den Sand. Im Unterschied zum vorherigen Beispiel findet der Luftaustausch erst nach der Wasserzugabe statt, da die Makropore die Matrix über ihre gesamte Länge mit Wasser versorgt. Der Luftaustausch startet sofort nach der Infiltration (180 min), sinkt wieder ab und steigt dann in Abhängigkeit der Höhe wieder an. Dieses Verhalten konnte während der Arbeiten nicht abschließend geklärt werden, stellt aber eine wichtige Grundlage für zukünftige experimentelle Arbeiten dar, die sich mit dem Luftaustausch befassen. Deshalb ist es notwendig, den Austausch zeitlich und räumlich hoch aufgelöst zu erfassen.

Für die Simulation auf der Hangskala wurden die Daten der Feldmessungen (TP1a, TP4) in Kombination mit Literaturwerten für die Wahl der bodenhydraulischen Parameter für das Matrix- und Makroporengbiet verwendet. Dabei zeigte sich, dass der Austausch bei Starkregenereignissen eine untergeordnete Rolle spielt, da die Matrix eine relativ geringe Permeabilität hat und die Makroporen einen Großteil des Wassers abführen.

Modellentwicklungen und Modellkopplung

Im ersten Schritt der Arbeit wurde das in MUFTE-UG implementierte 2PDPM für die Simulation von Transportprozessen erweitert. Ziel der Erweiterung war es, die Tracer-Experimente (TP1) auf der Hangskala simulieren zu können. Leider ergaben sich bei den ersten durchgeführten Hangstudien mit realen Bodenparametern vom Heumöser numerische Probleme bei der Lösung mit MUFTE-UG. Daher wurde zunächst der Umstieg auf Dumux durchgeführt. Die Gründe für die Probleme mit MUFTE-UG konnten nicht abschließend geklärt werden. Es wird angenommen, dass es sich um eine Kombination mehrerer Faktoren handelt. Zum Einen spielt die zuverlässige Regularisierung der nicht-linearen bodenhydraulischen Funktionen eine wichtige Rolle, zum Anderen können Lufteinschlüsse dazu führen, dass die Lösung mit dem Newton-Raphson Verfahren nicht konvergiert (siehe Stadler et al. 2012). Der Wechsel von MUFTE-UG zu Dumux brachte neben einer enormen Steigerung der Rechengeschwindigkeit auch eine Zunahme in der Stabilität und der Zeitschrittgröße.

Während der Durchführung der ersten Infiltrationsstudien an einem makroporösen Profil des Heumöser stellte sich heraus, dass die zeitliche Variation der Randbedingungen eine größere Rolle spielt als anfangs angenommen. Für eine physikalisch sinnvolle Abbildung der Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse war es notwendig, Matrix und Makroporen in ihrem dynamischen Zusammenwirken zu betrachten (siehe Stadler et al. 2011a). Die für die Simulation notwendigen Anfangs- und Randbedingungen lassen sich daher nicht im Vorfeld festlegen, sondern hängen vom jeweiligen inneren und äußeren Systemzustand ab. Während eines Niederschlagsereignisses kann das Wasser an der Oberfläche sowohl über die Matrix, als auch über die Makroporen infiltrieren. Üblicherweise infiltriert das Wasser zunächst über die Matrix, bis die Infiltrationskapazität der Matrix überschritten ist. Dann infiltriert das überschüssige Wasser über die Makroporen in den Boden. Um die Infiltration zu beschreiben, müssen die Randbedingungen also ständig angepasst werden. Eine ähnliche komplexe Situation tritt bei der Beschreibung der Exfiltrationsprozesse auf. Für beide Fälle müssen die Massenflüsse über die Systemrändern überprüft werden, damit es bei Dirichlet-Randbedingungen nicht zu einem über-/unterschätzen von Massenflüssen kommt.

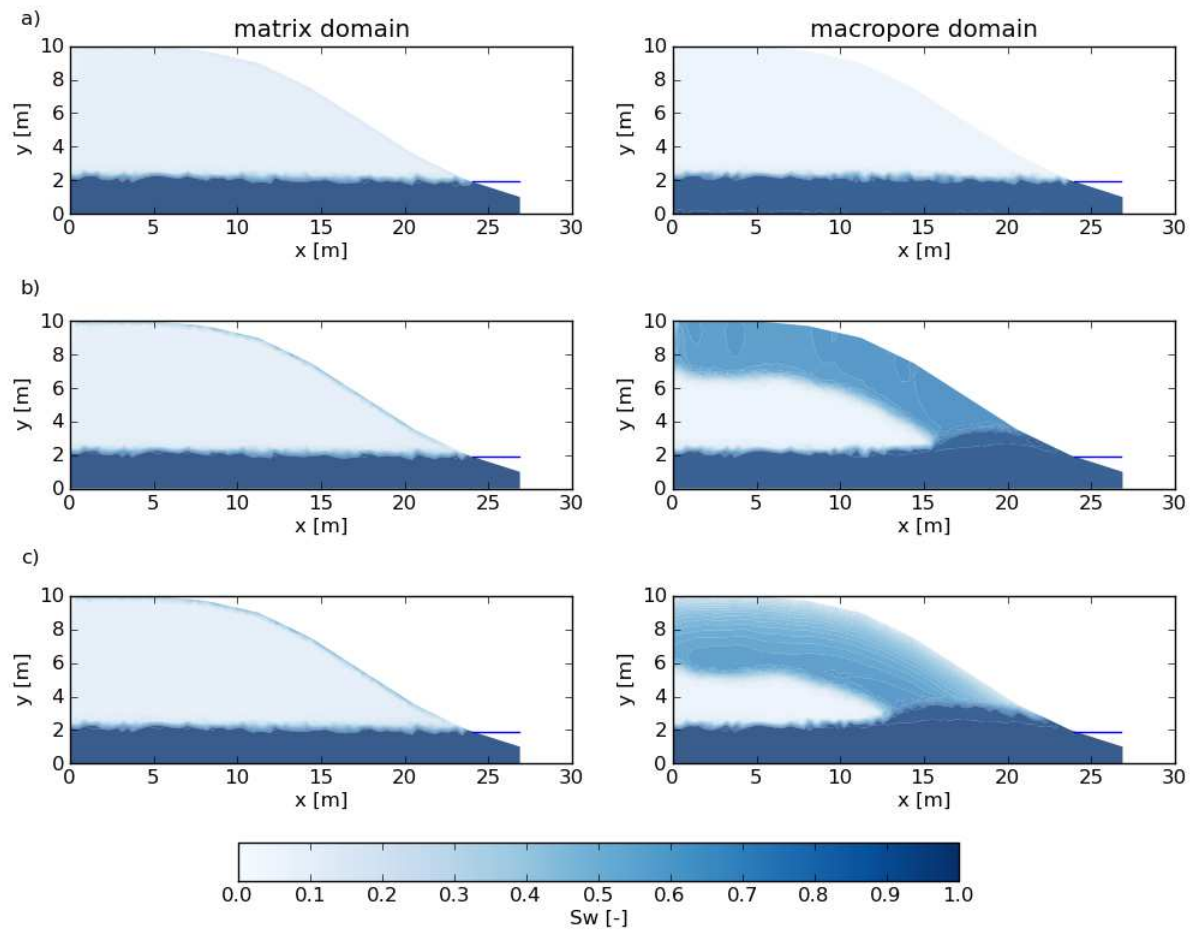


Abbildung 4: Simulierte Wasserinfiltration in Matrix (Links) und Makroporen (rechts) zu verschiedenen Zeitpunkten ($a = 0 \text{ h}$, $b = 2 \text{ h}$ und $c = 2.5 \text{ h}$) bei einem Niederschlagsereignis von 40 mm/h und einer Niederschlagsdauer von zwei Stunden nach Stadler et al. (2011a)

Im Zuge der Arbeiten wurde zunächst ein Programm entwickelt, das ein intensives Postprocessing der Simulationsergebnisse erlaubte und es möglich machte, die einzelnen Flüsse innerhalb der Zellen auszuwerten und anzeigen zu lassen. Für die Umsetzung der dynamischen Randbedingungen wurde ein entsprechendes Modellkonzept entwickelt (siehe Stadler et al. 2011a) und über ein externes Python Programm mit Dumux gekoppelt. Später wurde das Modellkonzept für die dynamischen Randbedingungen in Dumux implementiert. Abbildung 4 zeigt den Wechsel der Randbedingungen bei einer zunehmenden Wassersättigung für ein idealisiertes Regenereignis (40 mm/h). Während der Infiltration wechseln die Randknoten oberhalb des Gewässers (blaue Linie rechts) in den Makroporen von Neumann zu Dirichlet. Nach dem Abklingen des Regens sinkt die Sättigung, und die Randknoten wechseln zurück zu einer Neumann-Randbedingung. Das Wasser tritt unterhalb wieder aus und strömt in das Gewässer. Das erweiterte Modell erlaubt es, Infiltration und Exfiltration auf beliebigen Skalen zu beschreiben. Als Eingangsgröße für das Modell dienen hierfür Niederschlagswerte. Das am Hang ein- und austretende Wasser liefert Randbedingungen für das Oberflächenabflussmodell HMS und ist somit eine wichtige Grundlage für die Modellkopplung (siehe ZTP, Notay et al. 2012).

Die Übernahme von Anfangsbedingungen von Catflow (TP1) für die Simulation der makroporösen Schichten erwies sich als nicht sinnvoll, da die Sättigungen der Matrix und Makroporen nicht aus dem

einfachen Modell auf Basis der Richardsgleichung übernommen werden können. Die hohe Rechengeschwindigkeit von Dumux erlaubte es aber alternativ Szenarien für Anfangs- und Randbedingungen zu berechnen. So können mit Hilfe des Jahresniederschlages und einer Rechendauer über mehrere Jahre die Anfangssättigungen in Matrix und Makroporen abgeschätzt werden.

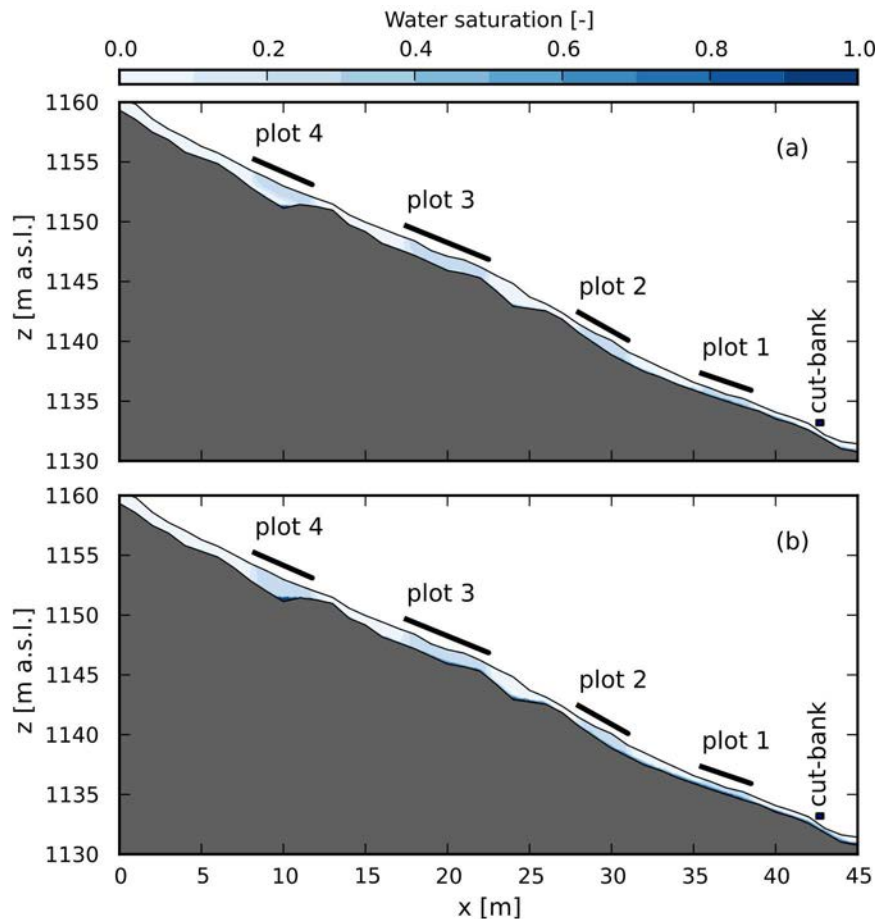


Abbildung 5: Wassersättigung in den Makroporen (a nach 30 min, b nach 60 min) im oberen makroporösen Bereich des Heumöser (Stadler et al. 2012)

Simulation auf der Hangskala

Wie eingangs beschrieben sorgen die Makroporen im oberen bewaldeten Hangbereich des Heumöser für die schnelle Infiltration und den Transport von Stoffen in die tiefer gelegenen Hangbereiche (siehe auch Hinkelmann & Zehe 2010, Hinkelmann et al. 2009b). Wie in Stadler et al. (2009) gezeigt werden konnte, ist eine vollständig geschlossene Überdeckung mit einer gering durchlässigen Bodenschicht nicht zwingend notwendig, um einen lokale Druckreaktion in einem Hangsystem zu erzeugen. Eine wichtige Fragestellung zur Infiltration ist, wie gut die obere Bodenschicht an das darunter liegende Festgestein angebunden ist. Wienhöfer et al. (2009) TP1 haben das System mit Hilfe einer künstlichen Beregnung und Tracern untersucht. Dabei konnte eine schnelle Reaktion (Wasseraustritt) an einem Hangabbruch (cut-bank) an einem Wanderweg und an der tiefer gelegenen Quelle beobachtet werden. Stadler et al. (2012) konnten die Initialisierung und den zeitlichen Verlauf der Quellschüttung

am Hangabbruch mit Hilfe des Zweiphasen – Dual-Permeability Modells abbilden. Eine wichtige Erkenntnis aus den Arbeiten ist, dass die Makroporen für die beobachteten Reaktionen eine so hohe Durchlässigkeit haben müssen, dass eine Verbindung mit dem darunter liegenden Festgestein nicht unmittelbar notwendig ist, um das Wasser abzutransportieren und Oberflächenabfluss zu vermeiden. Die Makroporen sind in diesem Bereich in der Lage, das Regenwasser effektiv abzuführen und dadurch den Oberflächenabfluss größtenteils zu limitieren. Abbildung 5. zeigt die simulierte Wassersättigung in den Makroporen während des Experiments. Oberhalb des Festgesteins bildet sich eine gesättigte Zone aus, in der das Wasser schnell Hang abwärts geleitet wird. Bei der Studie wurde von einem homogenen Matrix- und Makroporengbiet ausgegangen und für jedes Gebiet ein Satz von bodenhydraulische Parametern verwendet. Die Wahl konstanter Parameter ist ein erster Schritt für das Prozessverständnis, die räumliche Variabilität der Parameter kann grundsätzlich berücksichtigt werden, sofern diese bekannt ist.

Modellentwicklung Oberflächenabfluss

Grundlage für die Modellentwicklung war das am Fachgebiet Wasserwirtschaft und Hydrosystemmodellierung der Technischen Universität Berlin entwickelte Hydro Modeling System (HMS). HMS ist ein Java-basiertes, objektorientiertes Software-Framework mit dem Ziel, Bibliotheken und Methoden für die Entwicklung und Anwendung verschiedener Ansätze für Strömungs- und Transportprozesse in Oberflächengewässern bereit zu stellen (siehe auch Simons et al. 2011, 2012). Durch eine flexible und einfach erweiterbare Softwarearchitektur vereinfacht HMS im Rahmen der wissenschaftlichen Arbeit die Entwicklung und den Test von neuen Algorithmen und Methoden.

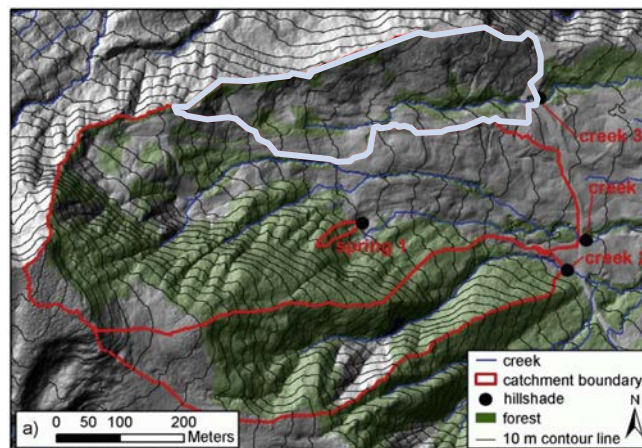


Abbildung 6: Teileinzugsgebiete am Heumöser (Lindenmaier 2008)

Im Zuge der Arbeiten wurde ein auf der Finite-Volumen-Methode basierendes numerisches Verfahren zur Lösung der zweidimensionalen tiefengemittelten Flachwassergleichungen in HMS implementiert. Das von Liang (2010) vorgestellte Verfahren verwendet den HLLC approximativen Riemann-Löser zur Berechnung der numerischen Flüsse. Dieser zeichnet sich durch eine robuste und genaue Lösung bei komplexen Strömungsbedingungen aus, wie sie z. B. beim Trockenfallen und Benetzen, bei Wechsellspürungen oder unregelmäßigen Oberflächenstrukturen auftreten. Mit Hilfe der Total Variation

Diminishing (TVD) Methode wurde das Verfahren auf eine Genauigkeit zweiter Ordnung im Raum erhöht. Damit erhält man auch auf groben Berechnungsgittern eine genaue Lösung. Der Niederschlag und die Infiltration werden über den Quell- bzw. Senkenterm in der Massenerhaltungsgleichung berücksichtigt. Die Infiltrationsrate kann hierbei als konstant angenommen werden oder mit Hilfe des Green-Ampt Modells oder der Phillips Gleichung berechnet werden. Bei niedrigen Abflusstiefen, wie sie auch am Heumöser vorherrschen, kann die Reibung eine besonders wichtige Rolle spielen und die Stabilität des Verfahrens stark beeinflussen. Zur Lösung des Reibungsterms wurde deshalb ein besonders robustes Splitting-Verfahren implementiert.

Simulation des Oberflächenabflusses auf der Hangskala

Im Rahmen einer Fallstudie wurde der Oberflächenabfluss des Teileinzugsgebiets des Bachlaufs 3 am

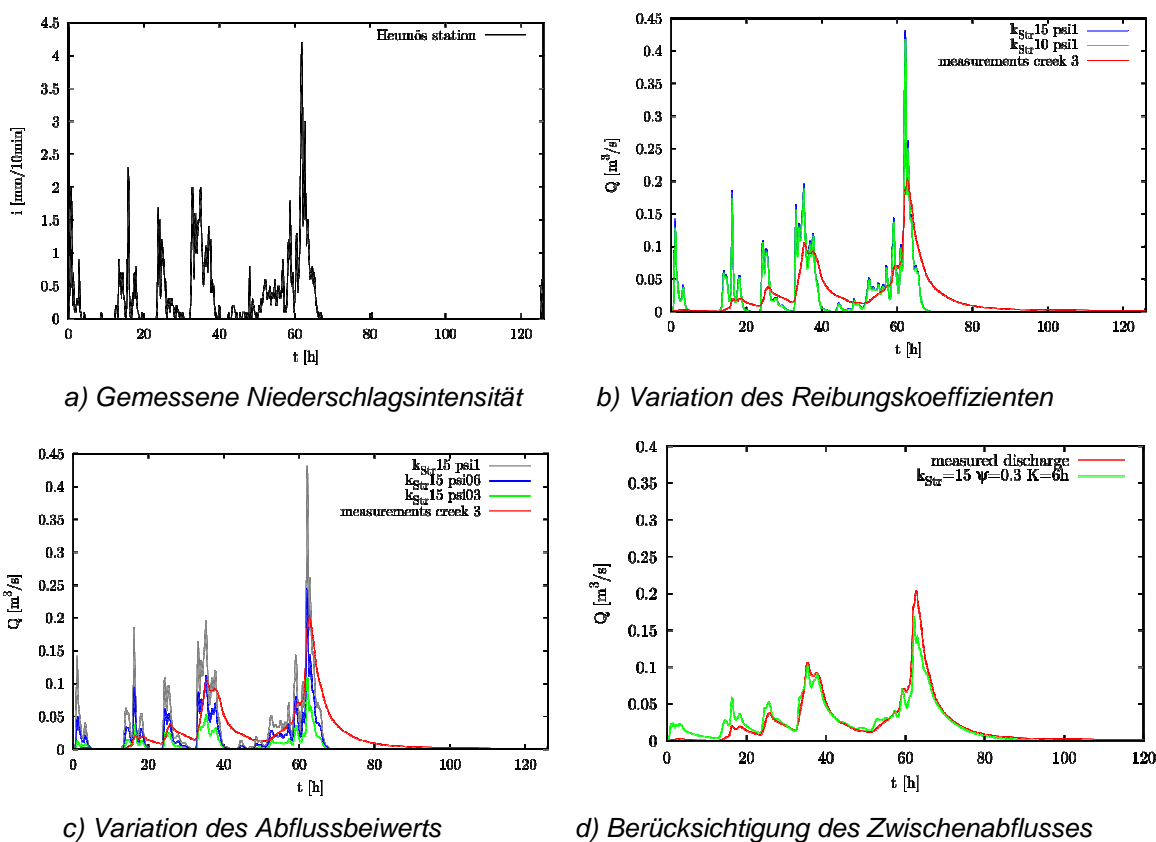


Abbildung 7: Ergebnisse der Simulation des Oberflächenabflusses am Heumöser

Heumöser (Abbildung 6, creek 3) für ein Regenereignis im Juli 2008 simuliert (Simons et al. 2011). Dabei wurden etwa 160 mm Niederschlag in 100 Stunden (Abbildung 7a) und ein Spitzenabfluss von 0,2 m³/s an einem Wehr am Gebietsauslass gemessen. Für den Modellaufbau wurde ein von der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreich zur Verfügung gestelltes digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 1 m verwendet.

Alle Simulationen wurden auf einem strukturierten regelmäßigen Gitter mit einer Maschenweite von 1 m und 147 000 Gitterzellen durchgeführt. Im ersten Schritt wurde der Einfluss des Reibungskoeffizienten nach Strickler untersucht. Abbildung 7b zeigt, dass die Variation in dieser

Größenordnung nur einen geringe Änderung des integralen Abfluss am Gebietsauslass hervorruft. Im zweiten Schritt wurde die Infiltration mit Hilfe eines Abflussbeiwerts berücksichtigt. Mit steigendem Abflussbeiwert kommt es zu Verringerungen der Abflussspitzen und einer Annäherung an die gemessenen Spitzenwerte (Abbildung 7c). Gleichzeitig lässt sich beobachten, dass das Modell den in den Messungen erkennbaren verzögerten Abfluss nicht wiedergeben konnte. Dies ließ sich dadurch erklären, dass im Modell kein Zwischenabfluss und damit keine langsame Abflusskomponente berücksichtigt wurde. Zur Stützung dieser These wurde in einer weiteren Untersuchung der für einen Abflussbeiwert von $\psi = 0,3$ bestimmte infiltrierte Anteil des Niederschlags über ein einfaches Einzelspeichermodell mit einer Speicherkonstante von $K = 6$ h dem Gebietsabfluss zugeführt. Die Ergebnisse in Abbildung 7d zeigen eine gute Übereinstimmung dieses modifizierten Gebietsabfluss mit der gemessenen Abflusskurve und bestätigen damit die zuvor genannte Vermutung.

Das auf den Flachwassergleichungen basierende Modell ermöglicht außerdem eine räumlich differenzierte Berechnung der Abflusstiefen und -geschwindigkeiten im Gebiet. Abbildung 8 zeigt das Strömungsfeld zum Zeitpunkt nach 62 Stunden, an dem der höchste Abfluss gemessen wurde. Das Fließnetzwerk hat sich bereits vollständig ausgebildet. In den kleinen Bachläufen treten hohe Fließgeschwindigkeiten auf (dunkelblau, $>0,6$ m/s), während die Geschwindigkeiten auf den Oberflächen klein sind (hellblau, $<0,1$ m/s).

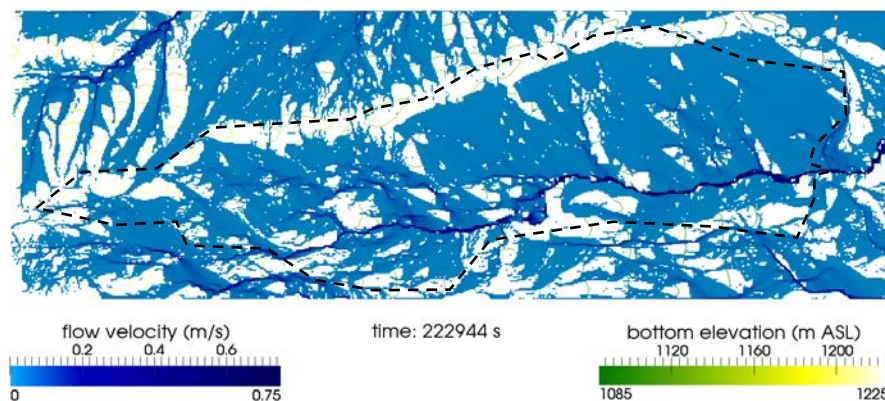


Abbildung 8: Simuliertes Strömungsfeld nach $t = 62$ h

1.5.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Im Rahmen der Arbeit kam die Frage auf, inwieweit sich das vorgestellte 2PDPM von klassischen Dual-Permeability Modellen auf Basis der Richardsgleichung unterscheidet. Dabei geht es vor allem um die Frage, ob die Berücksichtigung der Gasphase einen Vorteil bringt und für manche Böden/Niederschlagsereignisse sogar notwendig ist, um den Infiltrationsverlauf abbilden zu können. Auf dem von der Forschergruppe durchgeführten Abschlussworkshop wurde dieses Thema von renommierten Experten aufgegriffen, konnte aber nicht abschließend geklärt werden. Neben numerischen Untersuchungen wie etwa in (Stadler et al. 2012) sind hierfür weitere Experimente notwendig, die neben der Wasserphase auch die Gasphase betrachten.

Eine Möglichkeit für die Anwendung der entwickelten Modelle besteht darin, verschiedene praktische Fragestellungen zu untersuchen. So können z.B. Fragestellungen zur Drainage an den Hängen oder Auswirkungen von Starkregen- bzw. Hochwasserereignissen berechnet werden. Des Weiteren ist es möglich, Auswirkungen von Klima- und Landnutzungsänderungen (Bewuchs, Nutzung) auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Die Kombination des hoch aufgelösten Oberflächenabflussmodells (HMS) mit dem Zweiphasenphasenströmungsmodell für den Untergrund (Dumux) macht es möglich, die Prozesse Abflussbildung (zurzeit ohne Evapotranspiration) und Abflusskonzentration (einschließlich In- und Exfiltration) in kleinen Einzugsgebieten alternativ zu hydrologischen Modellen zu berechnen (basierend auf hochaufgelösten Strukturinformationen wie z.B. DGM)

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine besonders enge Abstimmung mit TP1a, TP4, ZTP und TP3 stattgefunden. Des Weiteren wurden wir von der Wildbach- und Lawinenverbauung (Forsttechnischer Dienst der Sektion Vorarlberg und Tiefbauamt Vorarlberg) unterstützt. Neben den Projektmitarbeiter Herrn Dipl.-Ing. Leopold Stadler hat Herr Dipl.-Ing. Franz Simons (finanziert aus der Grundausstattung der TU Berlin) intensiv am Projekt mitgearbeitet.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Stadler,L.: Entwicklung von Modellkonzepten für Zweiphasenströmungsprozesse in makroporösen Böden, Einreichung geplant im Sommersemester 2013

Diplomarbeiten:

Katerinopoulou,A.: Development of Concepts to Generate Boundary and Initial Conditions for a Two-Phase Flow Dual-Permeability Model to Simulate the Rapid Water Infiltration into Macro-Porous Soils, TU Berlin in Kooperation mit National Technical University of Athens, Griechenland, 2009
Özgen,I.: An HLLC Riemann Solver Based Second Order Scheme for the Shallow Water Equations, Diplomstudiengang Bauingenieurwesen, TU Berlin, 2011

Bachelorarbeiten:

Storck,T.: Erstellen eines Programms zur einheitlichen Beschreibung, Visualisierung und Bewertung bodenhydraulischer Funktionen, Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen, TU Berlin, 2011
Adamczak,C.: Implementierung von systemabhängigen Randbedingungen für Zweiphasen Strömungen in porösen Medien, Bachelorstudiengang Bauingenieurwesen, TU Berlin, 2011

Literaturverzeichnis

- Gerke, H.H. & van Genuchten, M.Th. (1993): A Dual-Porosity Model for Simulating the Preferential Movement of Water and Solutes in Structured Porous Media. *Water Resources Research* **29**, pp. 305–319
- Hinkelmann, R., Stadler, L., Helmig, R. & Zehe, E. (2009b): A Double Continuum Approach for Two-phase Flow Simulation in Natural Slopes. SIAM Conference on Mathematical & Computational Issues in the Geosciences
- Köhne, J.M., Mohanty, B.P., Šimůnek, J. & Gerke, H.H. (2004): Numerical evaluation of a second-order water transfer term for variably saturated dual-permeability models. *Water Resources Research* **40**, DOI 10.1029/2004WR00385
- Liang, Q. (2010): Flood Simulation Using a Well-Balanced Shallow Flow Model, *Journal of Hydraulic Engineering* **136**(9), pp. 669-675
- Lindenmaier, F. (2008): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg: identifying dominating processes and structures, PhD thesis, Universität Potsdam, Germany. URL: <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2008/1742/>
- Notay, K.V., Stadler, L., Simons, F., Molkenhain, F. & Hinkelmann, R. (2012): Model Coupling in Hydroinformatics Systems through the use of Autonomous Tensor Objects, Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics, Hamburg, Germany, ISBN 978-3-941492-45-5, reviewed paper and oral presentation
- Wienhöfer, J., K. Germer, F. Lindenmaier, A. Färber and Zehe, E. (2009): Applied tracers for the observation of subsurface stormflow on the hillslope scale. *Hydrological Earth System Sciences* **13**, pp.1145–1161, DOI 10.5194/hess-13-1145-2009
- Zimmerman, R.W., Hadgu, T. & Bodvarsson, G.S. (1996): A new lumped-parameter model for flow in unsaturated dual-porosity media. *Advances in Water Resources* **19**(5), pp. 317–327

1.5.2 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere neue Modellkonzepte entwickelt und erfolgreich angewendet. Für die Simulation der Laborexperimente von TP4 wurde das Kaskadenmodell entwickelt, das einen wichtigen Einblick in den zeitlichen Verlauf des Wasser- und Luftaustauschs zwischen Matrix und Makropore erlaubte. Auf größeren Skalen ist es nicht möglich, die Makroporen räumlich diskret aufzulösen. Bisher wurden daher auf größeren Skalen Richards Dual-Permeability-Modelle verwendet. Die im Projekt entwickelte Erweiterung auf ein Zweiphasenmodell erlaubt es nun, auch Systeme zu simulieren, bei denen das einfache Entweichen der Bodenluft während der Infiltration nicht gewährleistet werden kann (diskontinuierliche Gasphase). Bei der Durchführung der Arbeiten zeigte sich, dass noch erheblicher Forschungsbedarf bezüglich des Gasaustauschs zwischen Makroporen und Bodenmatrix besteht. Generell sorgen Makroporen für eine Durchlüftung von Böden, der Unterschied zwischen Zweiphasenmodellen und Richards Dual-Permeability-Modell ist daher in vielen Fällen gering. Wenn das Entweichen der Bodenluft an der Oberfläche durch die Verschlammung der Makroporen behindert ist oder innerhalb des Bodens eine diskontinuierliche Gasphase auftritt, spielt die Bodenluft und der zeitliche Verlauf des Gasaustauschs jedoch eine wichtige Rolle.

Die Studien am Heumöser Hang haben bestätigt, dass mit dem entwickelten Zweiphasen Dual-Permeability-Modell komplexe Natursysteme wie der von Makroporen durchzogene obere Bereich des Heumöser simuliert werden können. Für die Simulation wurden Infiltrations- und Exfiltrationsprozesse über dynamische Randbedingungen für die Bodenmatrix- und die Makroporengelände beschrieben. Die Modellkopplung zwischen Dumux und HMS macht es möglich, auch Fälle mit Oberflächenabfluss zu simulieren (siehe auch ZTP).

Das objektorientierte Software-Framework HMS erlaubt die räumlich hochaufgelöste zweidimensionale tiefengemittelte Modellierung des Oberflächenabflusses in Fließgewässern wie auch in kleinen Einzugsgebieten. Ein Vorteil des Flachwassermodells in Einzugsgebieten besteht darin, dass räumliche Verteilungen der Wassertiefen und Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden und so die lokale Topographie und Landnutzung genauer berücksichtigt werden als in einem hydrologischen Niederschlags-Abflussmodell. Die simulierten Werte lassen sich mit Felddaten wie dem Durchfluss an Wehren abgleichen. Die größte Herausforderung für die Anwendung der Flachwassergleichungen auf natürliche Hänge bestand in der Entwicklung eines robusten numerischen Lösungsverfahrens, das neben dem Trockenfallen und Benetzen komplexe Strömungsbedingungen wie z. B. scharfe Fronten und Wechselsprünge abbilden kann.

Der modulare Ansatz von HMS wurde dazu verwendet, weitere Prozesse, zunächst die Infiltration (Green-Ampt-Modell, Phillips Gleichung), in die Flachwassermodellierung einzubinden. Die Ergebnisse für ein Regenereignis in einem Teileinzugsgebiet des Heumöser Hangs zeigen, wie sich ein komplexes Fließnetzwerk auf dem Hang ausbildet. Gleichzeitig wurde deutlich, dass die Abflussmessung am Pegel nicht ausschließlich durch den Oberflächenabfluss und die Infiltration erklärbar ist, sondern auch durch langsamere Abflusskomponenten beeinflusst wird. In der Simulation wurde dies beispielhaft durch eine Interflow-Komponente mit Hilfe eines Einzelspeichermodells berücksichtigt und führte so zu einer deutlichen Verbesserung zwischen gemessenen und berechneten Ergebnissen.

Kontinuumsmechanik von Großhangbewegungen

Teilprojekt 3 im Rahmen der Forschergruppe

Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Ehlers

PD Dr.-Ing. Bernd Markert

24.04.2013

Universität Stuttgart

1.6 Abschlussbericht TP3

1.6.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581

1.6.1.1 DFG Geschäftszeichen

EH 107/17-3

1.6.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Ehlers

Universitätsprofessor, geb. 1. August 1951, Deutscher

Institut für Mechanik (Bauwesen), Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 66345, Fax: 0711 / 685 66347

Wolfgang.Ehlers@mechbau.uni-stuttgart.de, www.mechbau.de/ls2

Privatadresse: Schulstr. 40, 70771 Leinfelden, Tel.: 0711 / 752567

zusammen mit

PD Dr.-Ing. Bernd Markert

Akademischer Oberrat, geb. 13. Dezember 1971, Deutscher

Institut für Mechanik (Bauwesen), Lehrstuhl für Kontinuumsmechanik

Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 7, 70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 66341, Fax: 0711 / 685 66347

Bernd.Markert@mechbau.uni-stuttgart.de, www.mechbau.de/ls2

Privatadresse: Paracelsusstr. 13, 71229 Leonberg, Tel.: 07152 / 909750

1.6.1.3 Thema des Projekts

Kontinuumsmechanik von Großhangbewegung

1.6.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum begann am 1.1.2009 und endete am 31.12.2011.

1.6.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Avci & Ehlers (2011): Experimental and Computational Issues in the Mechanics of Multi-Physical Unsaturated Soil. In R. I. Borja, W. Wu (eds.): *Multiscale and Multiphysics Processes in Geomechanics*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 125-128; 978-3-642-19630-0; doi:10.1007/978-3-642-19630-0_32

- Ehlers, Avci & Markert (2011b): Computation of slope movements initiated by rain-induced shear bands in small-scale tests and in situ. *Vadose Zone Journal* 10 (2), pp. 512-525; doi: 10.2136/vzj2009.0156
- Ehlers & Avci (2012): Stress-dependent hardening and failure surfaces of dry sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, pp. 1—23; doi:10.1002/nag.1121
- Hinkelmann, Zehe, Ehlers & Joswig (2011a): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies. *Vadose Zone Journal*, 10 (2), pp. 473-476; doi: 10.2136/vzj2011.0032
- b)** Avci & Ehlers (2008a): Realisation and Modelling of Geotechnical Experiments. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 8, pp. 10401-10401
- Avci & Ehlers (2010): Stress-dependent Failure Surface of Granular Materials. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics* 10, pp. 697-698
- Avci & Ehlers (2010): A new approach for plastic failure criteria of granular materials. *European Conference on Computational Mechanics ECCM 2010*
- Avci, Ehlers & Markert (2011) Numerical investigation of landslide scenarios in laboratory and real scale. Geophysical Research Abstracts 13, EGU2011-1396-3, EGU General Assembly Vienna, Austria, abstract and oral presentation
- Markert, Avci & Ehlers (2009). Initiating Large Slope Movements by Rain-induced Shear Bands. SIAM Conference on Mathematical & Computational Issues in the Geosciences, Leipzig, Germany, abstract and oral presentation in Minisymposium

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.6.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Die schleichende Bewegung von Großhangsystemen bis hin zu deren abruptem Scherversagen und Abrutschen mit den damit verbundenen katastrophalen Folgen stellt in Zeiten zunehmender Extremwetterlagen eine unvorhersagbare Bedrohung dar. Dies liegt u. a. an dem aktuell noch unzureichenden Prozessverständnis, was eine zuverlässige Prognose bzw. Risikoabschätzung auf der Basis computergestützter Modelle erschwert. Insbesondere die inhärente Kopplung aus Untergrundhydraulik und inelastischer Deformation des Korngerüsts des Hangmaterials im Zusammenspiel mit hydrologischen und geophysikalischen Gegebenheiten stellt eine Herausforderung für die kontinuumsmechanische Modellbildung dar. Genau hier setzte das bearbeitete Teilprojekt an, in dem eine in der Festkörper-, Flüssigkeits- und Gasphase gekoppelte, makroskopische Beschreibung der elasto-plastischen bzw. elasto-viskoplastischen Deformations- und Versagensprozesse von Böschungen und Hängen entwickelt wurde. Auf der Basis der Theorie Poröser Medien (TPM) wurde dazu in der ersten Antragsphase ein Dreiphasenmodell konzipiert und gemäß der Zielsetzung zu einem vollständig funktionierenden Simulationswerkzeug für teilgesättigte Reibungsmaterialien ausgebaut. Dabei wurden die Festkörpereigenschaften der Bodenmatrix im Rahmen eines elasto-viskoplastischen Ansatzes dargestellt, der für verschwindende Relaxationszeiten im plastischen Multiplikator in einen elasto-plastischen Ansatz übergeht. Die wesentliche Herausforderung der zweiten Förderperiode bestanden in einer weiteren Verfeinerung des poroplastischen Modells und der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf den Feldfall des Heumöser Hangs. Aufgrund der Komplexität des realen Natursystems war hierzu eine Idealisierung erforderlich, die nur in engster Kooperation mit den anderen Teilprojekten erreicht werden konnte.

1.6.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten orientieren sich an dem Arbeitsprogramm des Folgeantrags und wurden ohne nennenswerte Änderungen gemäß dem vorgegebenen Zeitplan abgearbeitet. Da die wesentlichen Ergebnisse der Projektarbeiten in den unter 1.5 gelisteten Publikationen bzw. in der eingereichten Dissertation des Projektmitarbeiters, Dipl.-Ing. Okan Avci, in englischer Sprache verfasst wurden, werden diese als thematisch zusammengefasste Einheiten im Folgenden auch auf Englisch beschrieben. Auf die Darlegung weiterführender mathematischer und numerischer Details wird an dieser Stelle verzichtet und auf die o. g. Veröffentlichungen verwiesen.

Improvement of the triaxial test device for a correct characterisation of plastic soil behaviour

One difficulty of triaxial tests on stiff soils (e. g., dense sand) is the correct volume measurement, particularly, if small contractant or dilatant specimen deformations must be accurately resolved. Because of the considerably large cell deformations of conventional acrylic glass cells, different kinds of double-wall cell systems are on the market, which eliminate the cell deformation by controlling the pressures in the inner and the outer cell. The price to pay is the high complexity of the test system and the circumstantial handling of the specimen set-up. On this account, a new triaxial cell has been

developed in this subproject, which is illustrated in Figure 1. The new cell retains simplicity, even though reduces unwanted volume deformations to a minimum. Proceeding from a homogeneous deformation of compact specimens, the volumetric deformation can be easily measured via in- and outflow of the cell water. At this, it is important to minimise the water in the system to the smallest necessary amount, because it is the main source of error in the volume measurement during triaxial experiments. Our new testing system requires only a total water volume of about 1100 cm^3 when using a cylindrical specimen of 785 cm^3 (diameter and height of 10 cm). This very low amount of confined cell water allowed us to significantly reduce the volume measurement error, which is a crucial prerequisite for a reliable characterisation of soil-like materials.



Figure 1: (left) Assembled aluminium cell with a load piston of diameter 2.5 cm, (middle) disassembled parts and (right) the load piston of diameter 10 cm for extension tests.

Understanding and modelling the plastic material behaviour of frictional granular media

Concerning the description of an elasto-plastically deforming solid skeleton with granular microstructure, the most difficult part is the description of the evolution of the plastic yield surface with its associated hardening and softening behaviour. In case of frictional granular materials, the yielding behaviour has been experimentally studied, for instance, by Poorooshasb et al. (1966) and by Tatsuoka and Ishihara (1974). These investigators carried out stress-path-dependent triaxial compression tests including unloading and reloading cycles, where the shear stress was properly kept below the peak value in order to detect the restarting points of yielding at various confining pressures. These points were identified as loci on a yield surface. Lade and Kim (1988) assumed that yield points with the same plastic work uniquely belong to the same contour of a yield surface evolving independently from the stress path or the stress level until the failure surface is reached. As a consequence, the standard failure behaviour was described by only one fixed failure surface. In contrast to this, the stress-path-dependent experiments on dry sand revealed that there must exist an individual failure surface for each stress level at the failure state. This led to the conclusion that the failure surface is not fixed, but depends on the current stress level. Similar experiments were carried out by Lade and Prabucki (1995), where they found the same results, namely, that pre-shearing until the peak failure state increases the failure strength at lower stress levels. To explain this particular behaviour, consider the differences of granular media in comparison to dense solid materials like, for instance, metallic polycrystals. In metal plasticity, the hardening process irreversibly changes the

internal structure of the material, thus extending the elastic domain in the principal stress space assuming isotropic hardening. The hardening process continues with increasing external load until the material fails and the corresponding failure surface is reached. Close to the failure surface, unloading and reloading cycles exhibit an elastic behaviour up to the failure state. In contrast to dense metals, where the yield and failure functions do not depend on the hydrostatic stress (plastic incompressibility), the response of granular materials distinctly depends on it through the confining pressure. As a result, the loading paths of conventional triaxial experiments first prescribe a hydrostatic stress up to a certain value of the confining pressure continued by a shear loading both accompanied by elasto-plastic deformations. The application of the hydrostatic stress leads to a certain densification of the grain packing. During shear loading, the packing is first densified further and then loosened at higher shear-stress levels. This compaction and dilatation process is accompanied by a structural interlock of the particles which finally defines the corresponding failure surface, namely, when the peak shear stress is reached. Subsequent shear unloading and reduction of the confining pressure to a smaller value maintains the intergranular structure unchanged. If the shear stress is increased again, one obtains a peak shear stress higher than that one would obtain under monotonic loading at the smaller confining pressure. However, any ongoing displacement-controlled loading immediately causes the shear stress to drop to the smaller value related to the lower confining pressure. This can be explained from the granular microstructure, where the particles move into a looser packing under further loading thereby partly losing their mutual interlock associated with a shrunk failure surface and lower peak shear stress.

Triaxial benchmark experiments for model calibration

To account for the above mechanisms, the original porous media plasticity model developed in the first funding period had to be refined by making the evolution of the yield surface dependent on the hydrostatic stress state. To calibrate and verify the new failure approach, respective triaxial benchmark experiments with the new triaxial cell (Figure 1) have been performed on dense sand using the following loading path:

1. Hydrostatic loading up to $\sigma^{H1}_1 = \sigma^{H1}_3 = 0.05$ MPa confining pressure (point 1 in Figure 2).
2. First shear loading until the peak stress is reached at constant σ^{H1}_3 (point 4 in Figure 2).
3. Shear unloading followed by an increase of the confining pressure up to $\sigma^{H2}_3 = 0.2$ MPa.
4. Second shear loading until the peak stress is reached at constant σ^{H2}_3 (point 8).
5. Shear unloading followed by a reduction of the confining pressure to $\sigma^{H1}_3 = 0.05$ MPa.
6. Third shear loading at constant σ^{H1}_3 first leads to point 9 on the red failure surface in Figure 2, while further loading yields a softening down to points 10 and 11 at the same level as point 4.

The experimental and simulation results are depicted in Figure 2 with the points 1 to 11 indicating the specific steps of the above loading path. In hardening elasto-plasticity, the yield curve is reached again after an unloading-reloading cycle. The reloading up to the yield limit is thereby purely elastic, while the response under further loading is governed by the hardening process. In the stress-strain diagram (Figure 2), this becomes apparent from a change of the graph from linear to nonlinear at the yield point 5. This is nicely captured by the new failure concept, while the old plasticity model is only

capable of mimicking the behaviour up to the yield point 5. Thereafter, it describes only an elastic response until the failure curve (corresponding to $\sigma_3^{H2} = 0.2$ MPa) is reached. In contrast, considering the second shear loading step, where the confining pressure has been increased from $\sigma_3^{H1} = 0.05$ MPa to $\sigma_3^{H2} = 0.2$ MPa, it is seen that $|\sigma_1 - \sigma_3|$ is throughout linear from zero to the peak value at point 8. In conclusion, the improved plasticity model is capable of adequately describing the dependence of the yield surface evolution on the present hydrostatic stress state, which is a crucial property of frictional granular media.

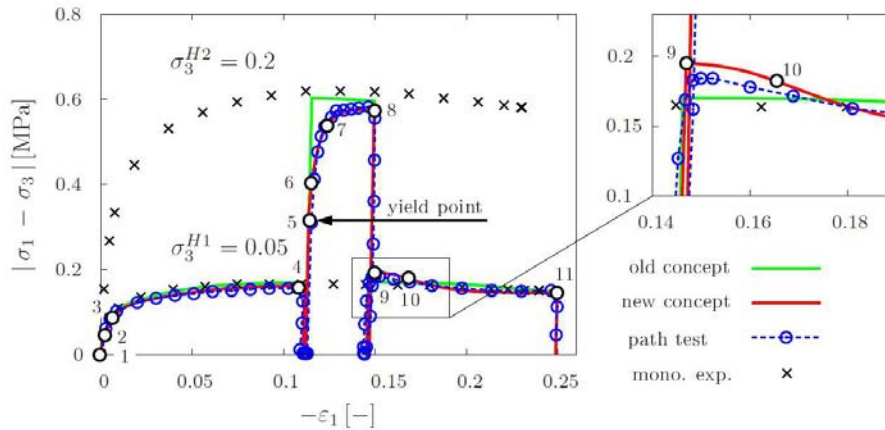


Figure 2: Comparison of experimental data from the triaxial benchmark tests with the simulation results based on the old (first funding period) and the newly developed failure concept.

Validation of the elasto-viscoplasticity model on foundation- and slope-failure experiments

During the first funding period, we conducted laboratory-scale foundation- and slope-failure experiments on dry GEBA fine sand (cf. previous report and extension proposal) in order to validate our poroplasticity model. With recourse to the existing experimental data, the new failure concept is validated by FE simulations of the laboratory tests using the model parameters identified from the triaxial benchmark experiments. Figure 3 shows the three testing scenarios with the initial and boundary conditions as described in the previous report.

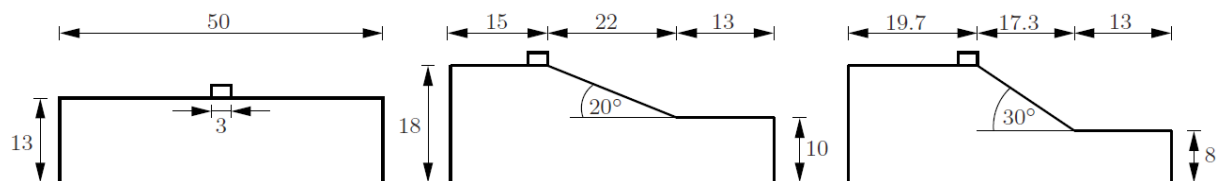


Figure 3: Sketches of the laboratory-scale validation experiments (dimensions in cm): Foundation-failure test (left) and slope-failure tests with different slope angles (middle and right).

The simulation results are shown in Figure 4 in form of stress-displacement diagrams of the load plate. In particular, Figure 4 (a) presents the predicted response using the new failure concept in comparison with the experimental observations for the three test cases, while Figure 4 (b) shows the results of the simulations using the old plasticity formulation with fixed failure surface. As can be seen, the new poroplasticity model is capable of mimicking the nonlinear material behaviour very satisfactory and almost exactly matches the observations of all three experiments. Even the softening behaviour is

nicely reproduced. In contrast, the old plasticity formulation could neither capture the exact peak stress nor mimic the softening adequately. The reason for this poor performance is found in the hydrostatic stress levels of the validation experiments, which strongly differ from the hydrostatic stress levels of the triaxial benchmark experiments to which the fixed failure surface has been adapted.

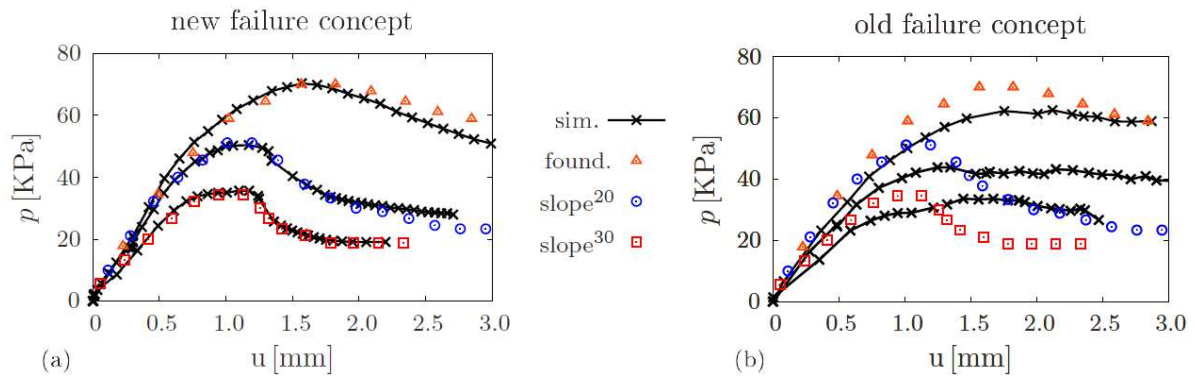


Figure 4: Stress-displacement curves for the foundation-failure experiment (found.) and both slope-failure experiments with slope angles of 20° (slope²⁰) and 30° (slope³⁰) using the new failure concept (a) and the old failure concept (b).

FE simulation of the Heumoes slope along representative 2-d cross sections

The major part of the second funding period was devoted to the transfer of the triphasic poroplasticity model to the real-scale field problem of the Heumoes slope. In this connection and guided by the discussions with the investigators of the other subprojects, we became aware of the fact that a fully three-dimensional (3-d) description is pointless because of the lack of material and structural data of the geological slope system. Therefore, it was decided to base the continuum-mechanical investigation of the Heumoes slope movement on representative cross sections (cf. Figure 5).

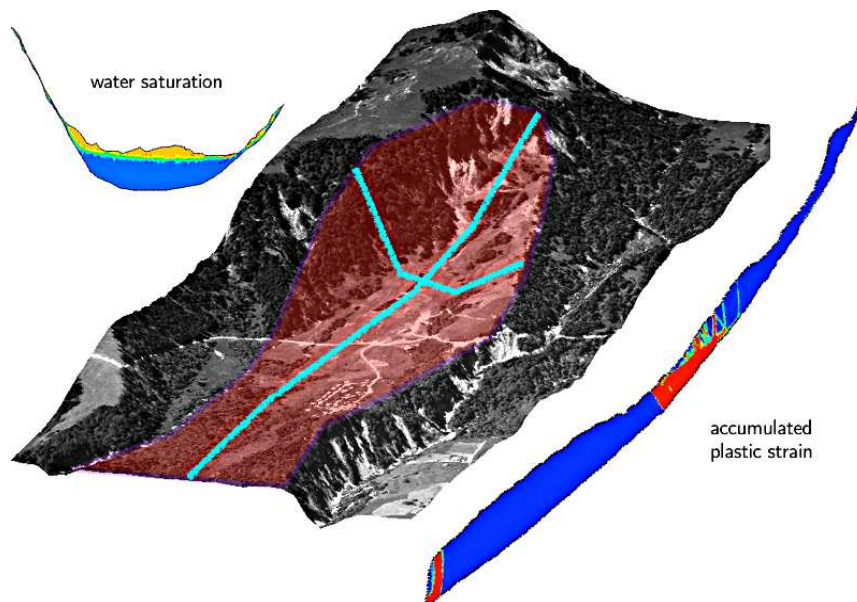


Figure 5: Terrain model of the Heumoes slope with representative cross sections and first qualitative simulation results (left: blue colour = fully saturated, right: red colour = large plastic strains).

In particular, one downslope cross section (west-east orientation) and one perpendicular to that (north-south orientation) through the macro-pore forest have been chosen in coordination with all partners of the research unit. A typical numerical result is depicted in Figure 5, where heavy rain on the macro-pore forest yields to a rapid increase of the water table (or likewise a rapid pressure increase in the slope hydrosystem), which readily destabilises the slope due to buoyancy effects causing the development of shear zones at prominent locations in the downslope cross section.

As the onset of shear zones strongly depends on the geological structure, the originally proposed two-layered structure with smooth bedrock profile (Lindenmaier, 2008) along the downslope cross section needed to be refined. At this, more detailed information about the internal structure was obtained from seismic refraction methods by Rumpf et al. (2012) as depicted in Figure 6. Particularly, the topography of the slope bedrock was found to be quite hilly compared to the assumption of Lindenmaier (2008). Moreover, Rumpf et al. (2012) structured the slope in three layers (Figure 6), where the distinction of the layers is based on the p-wave (primary wave) velocity difference. However, p-waves only give qualitative estimates of the density variation of the slope material, i. e., the boundaries of the layers do not necessarily represent the boundaries of a specific slope material. Nevertheless, for the simulation only the upper two layers are considered, while the bedrock is assumed to be rigid and is modelled as a fixed kinematic boundary condition of the second layer. Furthermore, at the point about 580 m down the slope, the bedrock forms an elevation that comes very close to the slope surface (see Figure 6) and impedes further mass movement of the upper part of the slope, while the part further down the slope may move independently. Consequently, in a 2-d analysis, the slope movement can be considered decoupled in the upper and the lower part of the slope. Hence, both slope parts can be separately investigated. Here, we concentrate the presentation on the upper part of the Heumoes slope as depicted in Figure 7.

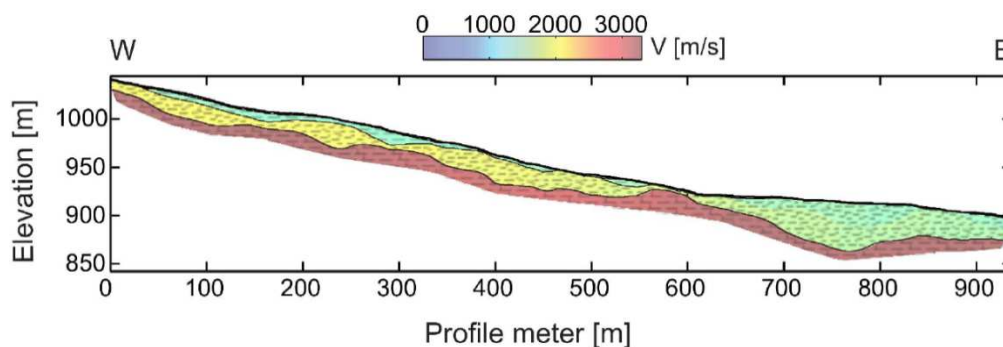


Figure 6: Substructure of the downslope cross section subdivided into three layers determined from seismic refraction (Rumpf et al., 2012).

The material composition of the upper slope can be roughly distinguished into clayey silt and fine sand, which are assumed to be homogeneously distributed over the corresponding layers (Figure 7). The first layer (top stratum - clayey silt) is more impermeable, has more cohesion but the material strength is lower because of its higher porosity compared to the second layer (middle stratum - fine sand). The cross sections are spatially discretised with triangular mixed finite elements, where an

adaptive meshing strategy with the water saturation and the accumulated plastic strain as error indicators in order to accurately resolve the water table and the shear bands.

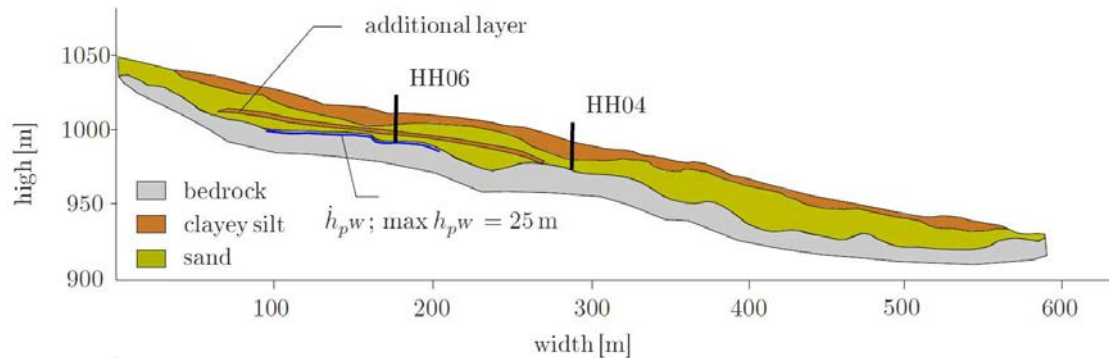


Figure 7: Representative cross-section through the Heumoes slope from west to east; \dot{h}_{pw} is the pore-water-infiltration rate per week.

The hydraulic loading conditions are guided by the heavy precipitation event recorded in 2006 with 248 mm in 38 h, cf. Wienhöfer et al. (2011). Based on this value, adjusted by the surface runoff and the evapotranspiration, we prescribed an effective pore-water pressure related to an infiltration rate of 80 mm/wk over distinct regions along the northern and southern hillside of the north-south cross section representing the fast infiltration areas (Ehlers et al., 2011b). The infiltrated subsurface water is dammed in the middle of the slope section and flows downhill along the west-east cross section, thereby, increasing the water table. The impound water under the west-east extent of the slope is modelled by a high pore-water pressure increase associated with an infiltration rate of accumulated $\dot{h}_{pw} = 3500$ mm/wk in the upper part of the west-east cross section along the extent of the southern hillside. At this, the hydraulic head has been limited to a maximum of $h_{pw} = 25$ m related to the bedrock profile along the applied boundary condition. The hydraulic boundary conditions for the numerical treatment are chosen in such a way that the best mimic the described situation at the Heumoes slope. Furthermore, an additional layer has been integrated into the second layer in order to model a confined aquifer situation suggested by Wienhöfer et al. (2011), see Figure 7. However, such a layer could not be detected by Rumpf et al. (2012). Nevertheless, the Heumoes slope has been numerically studied with and without the additional impermeable layer, for which the material properties of the clayey silt layer have been adopted.

The computational analysis of the flow and deformation processes of the Heumoes slope has been carried out in several simulation steps. Some of these steps are necessary to compute the initial state of the slope in order to avoid numerical difficulties caused by an abrupt prescription of the initial conditions. These preliminary steps include the computation of the initial water saturation (initial water table) and the gravitational forces, which are continuously increased up to the correct starting value. During the initial state computation, plastic deformations are already developing due to the dead load of the slope. This is illustrated in Figure 8 (top-right) and the corresponding initial saturation is shown in Figure 8 (top-left).

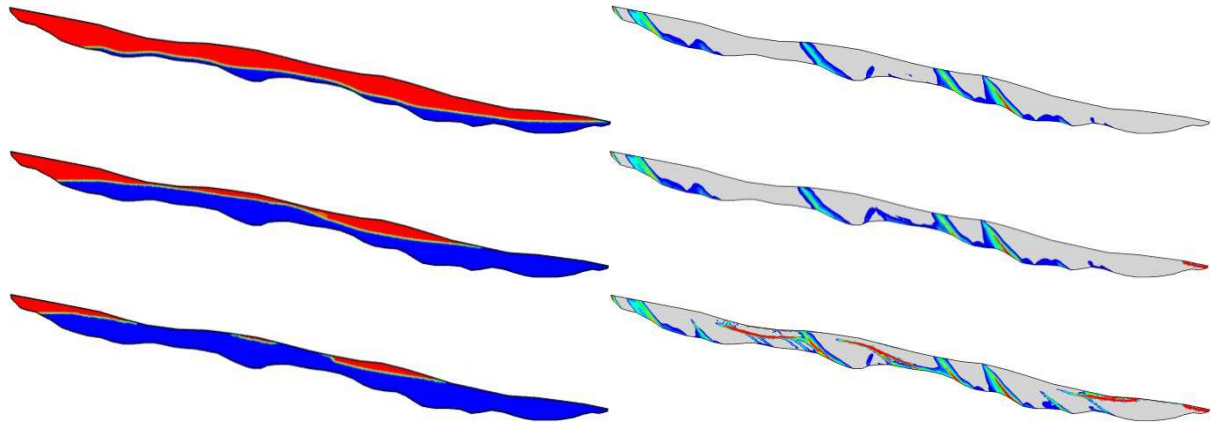


Figure 8: Water saturation (left, blue colour = fully saturated) and shear band evolution (right, red colour = large plastic strains) of the upper downslope cross section without additional less permeable layer: (top) initial state, (middle) at time 6 h and 25 min and (bottom) 7 h and 51 min.

The localisation of shear bands under dead load is mainly concentrated at the steep parts of the bedrock profile. Starting from the initial state, the increasing water head h_{pW} up to time 6 h and 25 min does not cause a considerable increase of the plastic deformations, although the water table rises close to the surface, cf. Figure 8 (middle). However, a further increase of the water head leads to cumulative plastic deformations, advancement of existing shear bands and also development of new shear bands, cf. Figure 8 (bottom). The factors influencing the initiation of the new shear bands are the aforementioned steep descents of the bedrock and the stiffness difference between the clayey silt and the sand layer.

As can be seen from the figures, the Heumoes slope is relatively flat with an average inclination of only 19° . Therefore, the slope movement is mainly triggered by an increase of the degree of saturation causing a growth of the dead load and cumulative plastic yielding. In this context, the deformation rates are very small in comparison to slopes with a steeper inclination, which are reportedly more prone to abrupt failure. Our simulation results of the Heumoes slope rather reveal a creeping slope motion, which can be distinguished into several independent parts with varying motion rates. This is confirmed by the computed shear band distribution (Figure 8, bottom-right), from which it can be concluded that the slope does not move as a monolithic entity. Following this, it can be assumed with reasonable certainty that a sudden failure of the Heumoes slope has not to be expected.

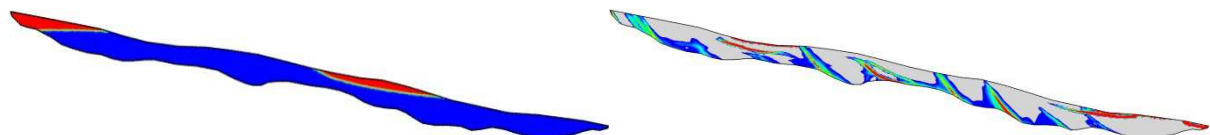


Figure 9: Water saturation (left, blue colour = fully saturated) and shear bands (right, red colour = large plastic strains) of the upper downslope cross-section with additional less permeable layer at the failure state at time 8 h and 35 min.

Next, we considered the case with additional less permeable clayey-silt layer (recall Figure 7), which has been incorporated to emulate a confined pressure situation in a part of the Heumoes slope. The final simulation results are depicted in Figure 9. In comparison with the results without the additional

layer (Figure 8, bottom), only a few differences in the shear bands can be detected in the region around the additional layer. The water saturation distribution is almost the same after 8 h and 35 min. It should be noted that the result may be different if the hydraulic boundary conditions are changed such that a faster increase and a higher level of the pore-water pressure is prescribed. However, such a fast-changing, high confined pressure situation is not found at the Heumoes slope.

Modelling of internal erosion processes

The hydraulic driven slope-failure experiments of TP4 have shown that erosion takes place at the foot of the slope. Therefore, the triphasic porous media model has been extended to model internal erosion processes. Internal erosion denotes the detachment of grains from the soil matrix and their transport through the pore channel network with the seepage flow. In this regard, Ziems (1969) distinguished between internal erosion and internal suffusion. The difference between both is that the suffusion process denotes only the detachment of the fine grain content of the soil, while the coarse grains build the main fabric grain structure which remains unaffected. In contrast, during internal erosion processes, all grains can be transported and so-called erosion pipes can develop. Thus, suffusion is a special case of erosion driven at low seepage forces. Within this subproject, only internal suffusion processes have been considered, although the term internal erosion is used.

In particular, the partially saturated, triphasic soil model has been extended by an additional erosion phase. Thereby, the modelling approach is based on the work of Steeb and Diebels (2003), who derived an internal erosion model for saturated soils in a thermodynamic consistent fashion using the Theory of Porous Media (TPM). Due to the complexity of general internal erosion processes, we proceed from several simplifications. The major simplification is that we do not consider the evacuation and further transport of the detached grains from the soil fabric. Hence, our focus is not on the accurate description of the erosion process in regard to the grain movement and deposition as well as the clogging of pores, but rather on the development of soil porosity. In fact, the degradation of the solid matrix through erosion affects the mechanical and hydraulic properties and, as a consequence, the probability of material failure increases.

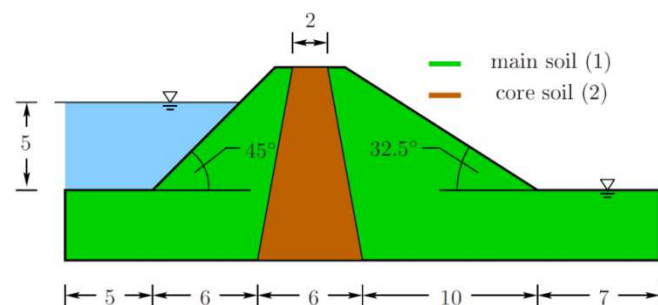


Figure 10: Sketch of an embankment with central core (dimensions in m).

As a practical example, consider an embankment built by a loosely raised soil with an almost impermeable internal core, see Figure 10. The embedded internal core has a 20 times lower permeability than the surrounding soil and hinders the infiltration and percolation of the dammed water through the embankment. However, a steep hydraulic gradient and a high pressure difference

between the dammed water and the air side exists. This can trigger an erosion process starting from the low-water side of the core, proceeding gradually through the core and accelerating the seepage flow by increasing the porosity. Following this, a backward erosion process is initiated, which finally generates a pipe through the almost impermeable core that connects to the reservoir. This finally yields an increasing water table in the core as well as at the air side of the embankment, which may lead to a collapse of the construction due to buoyancy effects.

For the simulations, the water table is increased at the left side of the embankment to 5 m in 24 h and then kept constant. Figure 11 shows the distribution of the liquid saturation s^L and the solidity n^S in the embankment immediately after increasing the water table to 5 m and at the state of failure. The degradation of the solid volume fraction n^S is initiated by the steep hydraulic gradient within the core. Due to the growing porosity and concurrently increasing permeability, the seepage flow is enforced. This leads to the formation of a pipe through the core, which proceeds in the direction of the reservoir. Then, the water table gradually increases at the water-protected side of the embankment, cf. Figure 11 (bottom-left). This puts the right slope under buoyancy, which finally causes the collapse of the embankment. The deformation state at failure is depicted in Figure 12 (left), where the complete embankment is in motion along the primary shear band as shown in Figure 12 (right).

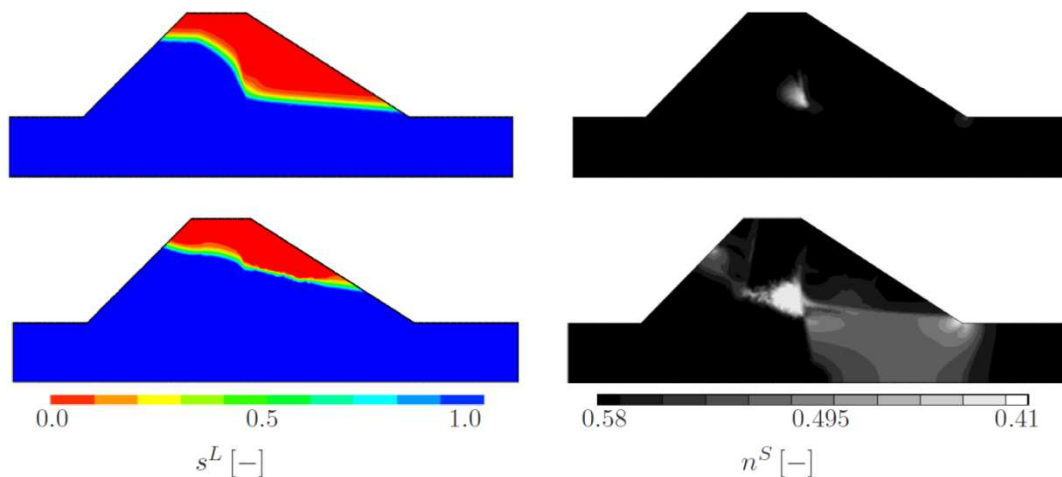


Figure 11: Simulation results after raising the water table to 5 m (top) and at the failure state (bottom): (left) liquid saturation s^L and (right) solidity n^S .

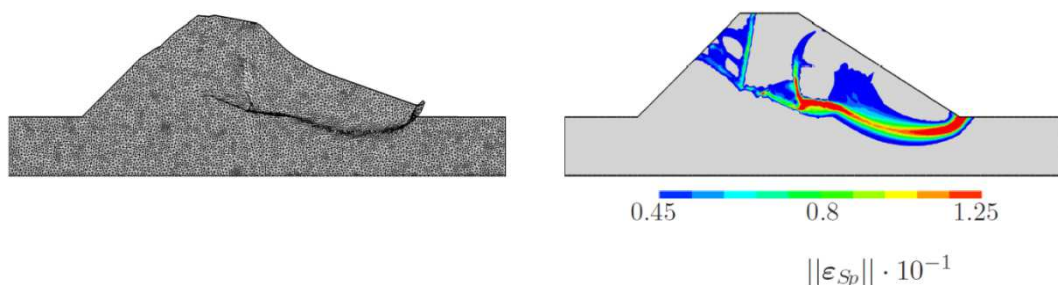


Figure 12: Deformed mesh at the final state with 10-times magnification (left) and the evolved shear bands (right).

1.6.1.8 Weiteres

Concluding remarks and future challenges

The reliability of the numerical analysis of natural slopes depends mainly on the quality of the model input data, which has to be obtained from field measurements. This is one of the challenges faced by hydrologists and geophysicists, because the valuable simulation of real-scale problems definitely requires three-dimensional information about the subsurface structure and the mechanical and hydraulic properties. The application of computer simulations to elucidate the complex hydraulic pressure and flow systems that might trigger hillslope movements poses also challenges to the numerical algorithms. In fact, the numerical treatment of strongly coupled, inelastic solid-fluid problems on real-scale domains requires high computing power exploiting parallel and distributed solution strategies, which are far from being standard.

We are quite confident that only three-dimensional simulations, for instance, of an internal erosion process combined with an inelastic stress analysis of a solid-fluid coupled continuum to stay with the above problem, will open the avenue to more practically relevant applications. It is thereby out of question that the computer-aided prediction of failure scenarios and the reliable risk assessment of natural systems will become more and more important. However, a valuable analysis requires a suitable modelling approach accounting for all relevant mechanisms affecting the problem under study. This brings up the desire of models with optimal complexity, i. e., models that are sophisticated enough to appropriately model the problem on the desired scale, but are at the same time consolidated and simple enough to allow for an efficient numerical solution.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat über die gesamte Laufzeit eine enge Abstimmung mit allen TP stattgefunden. Besonders enge Kooperationen ergaben sich bei der Modellkalibrierung und Übertragung auf den Feldfall mit den Projekten aus TP1 und TP5 und bei der Modellierung und numerischen Berechnung der Strömungsprozesse bei Teilsättigung mit TP2. Des Weiteren hat ein intensiver Erfahrungsaustausch zur Konzeption der Validierungsexperimente mit TP4 stattgefunden. Demonstrative Anfangsrandwert- und Benchmarkprobleme sowie Berechnungsergebnisse wurden über das Zentrale Teilprojekt (ZP) bereitgestellt.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Avci (2013): Coupled deformation and flow processes of partially saturated soil: Experiments, model validation and numerical investigations, eingereicht im Januar 2013.

Diplomarbeiten:

Zizza (2008): Numerische Untersuchungen geotechnischer Experimente mit trockenem Sand, Diplomarbeit, Bericht Nr. 8-II-2 aus dem Institut für Mechanik (Bauwesen), Universität Stuttgart 2008.

Literaturverzeichnis

Lade & Kim (1988): Softening Single hardening constitutive model for frictional material, II. Yield criterion and plastic work contours. *Computers and Geotechnics* **6**, pp. 13-29.

Lade & Prabucki (1995): Softening and Preshearing Effects in Sand. *Soils and Foundations* **35**, pp. 93-104.

Lindenmaier (2008): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg: identifying dominating processes and structures, PhD thesis, Universität Potsdam, Germany. URL: <http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2008/1742/>

Poorooshasb, Holubec & Sherbourne (1966): Yielding and Flow of Sand in Triaxial Compression, Part I. *Canadian Geotechnical Journal* **3**, pp. 179-190.

Rumpf, Böninger & Tronicke (2012): Refraction seismics to investigate a creeping hillslope in the Austrian Alps. *Engineering Geology* **151**, pp. 37-46.

Steeb & Diebels (2003): A thermodynamic-consistent model describing growth and remodeling phenomena. *Computational Materials Science* **28**, pp. 597-607.

Tatsuoka & Ishihara (1974): Yielding of Sand in Triaxial Compression. *Soils and Foundations* **14**, pp. 63-76.

Wienhöfer, Lindenmaier & Zehe (2011): Challenges in Understanding the Hydrologic Controls on the Mobility of Slow-Moving Landslides. *Vadose Zone Journal* **10**, pp. 496-511.

Ziems (1969): Beitrag zur Kontakterosion nichtbindiger Böden in porösen Medien, Dissertation, Universität Dresden.

1.6.2 Zusammenfassung

The objective of subproject TP3 was the experimental and theoretical investigation of partially saturated soil with special focus on geomechanical problems as close as possible to reality. It was the overall aim within the research unit to apply the developed model to the natural Heumoes slope in order to predict the movement of the slope based on a continuum-mechanical top-down approach. It was intended to use numerical simulations to shed light on the coupled hydrologic and mechanical phenomena in natural slopes and to help to foster the understanding of their instability and failure behaviour. To this end, a thermodynamically consistent triphasic porous media model for the description of partially saturated soil composed of an elasto-viscoplastic solid skeleton and two pore fluids, water and air, was developed in the framework of the Theory of Porous Media (TPM). The mechanical material parameters were determined for dry sand on the basis of monotonic and non-monotonic triaxial experiments using a newly designed stiff triaxial cell. The triaxial tests showed that the plastic hardening and softening behaviour of the sand is intrinsic and dependent on the hydrostatic stress state, which required an accurate measurement of the volume deformation and an improvement

of the plasticity model. The good agreement with independent validation experiments revealed that the presented approach is well-suited for realistic simulation of quasi-static problems of cohesionless frictional geomaterials.

The motion of the pore fluids water and air, which saturate the pore space of the soil matrix, were adapted to the respective hydraulic experimental data available from the other subprojects. For the validation of the partially saturated model, the calibrated model was applied for the simulation of different slope failure scenarios at the technical scale. The computational results showed that the presented TPM model appropriately mimics the physical behaviour of multiphase materials such as partially saturated sand and also reliably predicts shear failure triggered by the hydraulic conditions. Moreover, the capability of the TPM model was tested on the natural Heumoes slope. Therefore, the hillslope was described by representative cross sections proceeding from a simplified material composition of the slope body, which in downslope direction is divided into two layers (clayey silt and sand). The finite-element simulations revealed several shear bands, which are mainly located between the layer interfaces as well as at the steep descents of the bedrock. Although the Heumoes slope is quite flat, it is observed that it is in heterogeneous creep motion. This heterogeneous motion may be partly explained by the predicted shear bands that intersect the slope body into decoupled regions.

Finally, to model internal erosion processes, the triphasic model has been extended by an additional erosion constituent representing the detached grains degraded from the solid matrix. Thereby, the focus was on the weakening of the solid skeleton by a constitutive reduction of the solidity governed by the seepage flow. In conclusion, the overall modelling approach and its numerical treatment within the mixed finite-element method provides a powerful tool for the predictive simulation of failure scenarios in coupled solid-fluid systems such as natural slopes.

**Experimentelle Untersuchungen auf der technischen
Skala zur Prozessaufklärung und zur Verifizierung
numerischer Modelle bei Großhangbewegungen**

Teilprojekt 4 im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

Jürgen Braun, Ph.D.

31.03.2013

Universität Stuttgart

1.7 Abschlussbericht TP4

1.7.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581

„Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“. Teilprojekt 4: Experimentelle Untersuchungen auf der technischen Skala zur Prozessaufklärung und zur Verifizierung numerischer Modelle bei Großhangbewegungen

1.7.1.1 DFG Geschäftszeichen

BR 1734/1-3

1.7.1.2 Antragsteller

Jürgen Braun, Ph.D.

Wissenschaftlicher Leiter, geb. 04. September 1961

Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung – VEGAS, Institut für Wasser- und Umweltsystemmodellierung, Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 61, 70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685-67018 / Tel.: 0711 / 685-64717 (Schr.) / Fax: 0711 / 685-67020

Email: juergen.braun@iws.uni-stuttgart.de

Privatadresse: Schlesierstr. 46, 74321 Bietigheim-Bissingen, Tel.: 0179-7828-741

1.7.1.3 Thema des Projekts

Experimentelle Untersuchungen auf der technischen Skala zur Prozessaufklärung und zur Verifizierung numerischer Modelle bei Großhangbewegungen

1.7.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum.

Der Förderzeitraum begann am 1. Januar 2009 und endete am 31.12.2011.

1.7.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Germer, K. & Braun, J. (2011): Effects of Saturation on Slope Stability: Laboratory Experiments Utilizing External Load. *Vadose Zone Journal* 10 (2): 477-486; doi: 10.2136/vzj2009.0154
- Wienhöfer, J., K. Germer, F. Lindenmaier, A. Färber & Zehe, E. (2009): Applied tracers for the observation of subsurface stormflow at the hillslope scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13:1145-1161
- b) Germer K. & Braun, J. (2009): Slope failure experiments triggered by external loads in a laboratory flume - Effects of water content. (Geophysical Research Abstracts, Vol. 11, EGU2009-10600-1, abstract and poster presentation on EGU General Assembly). Vienna, Austria

- Germer, K. & Braun, J. (2009): Slope failure processes in a laboratory flume. p. 115–118. In J.-P. Malet et al. (ed.) *Landslide processes: From geomorphological mapping to dynamic modelling*. CERG Ed., Strasbourg, France
- Germer K. & Braun, J. (2011): Laboratory container experiments to observe slope failures under dynamic groundwater situations. (*Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU2011-1720 abstract and poster presentation on EGU General Assembly*). Vienna, Austria
- Stadler, L., Germer, K. & Hinkelmann, R. (2011): Developing Model Concepts for Simulating Water Infiltration into Macroporous Soils for Understanding Triggers for Landslides. (*Geophysical Research Abstracts Vol. 13, EGU2011-2415-1, abstract and oral presentation on EGU General Assembly*). Vienna, Austria

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.7.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Vom Teilprojekt 4 (TP 4) wurden experimentelle Untersuchungen in Abstimmung mit den anderen Teilprojekten der Forschergruppe durchgeführt. Die experimentellen Untersuchungen wurden auf Grund der großen Anzahl verschiedenartiger Parameter streng nach „Infiltration/Strömung“ (Zusammenarbeit mit TP2) und „Deformation/Hangversagen“ (Zusammenarbeit mit TP3) getrennt. Die Entwicklung konstitutiver Beziehungen unterstützte die numerische Modellierung dieser Prozesse. Zusätzlich konnten durch die gewonnenen Daten die entwickelten numerischen Modelle validiert werden. Die zwei Projektphasen waren in ineinandergreifende Arbeitspakete gegliedert. Zu Beginn wurden Materialparameter und hydraulische Eigenschaften der verwendeten Materialien ermittelt, die dann anschließend in den zwei Großversuchsreihen zu „Wasserinfiltration über Makroporen“ und „Hangversagen“ verwendet wurden.

1.7.1.7 Durchgeführte Arbeiten

1.7.1.7.1 Großversuch „Wasserinfiltration über Makroporen“

Ein konzeptionelles Modell für die Initiation von Großhangbewegungen ist eine, durch Infiltration über Makroporen hervorgerufene, sehr schnelle Erhöhung der Piezometerhöhe im Bereich des Hangfußes, die dort zu einer Destabilisierung des Hanges führt. Makroporen können dabei durch Wurzeln, Würmer und/oder Quell- und Schrumpfungsprozesse vorhanden sein.

Ziel des Großversuchs „Wasserinfiltration über Makropore“ war es, die Austauschprozesse zwischen Makroporen und der umgebenden Bodenmatrix zu quantifizieren, um somit TP 2 (Untergrundhydraulik: Numerische Simulation von Zweiphasenströmungs- und Massentransferprozessen im Untergrund) bei der Entwicklung numerischer Ansätze zu unterstützen und ihnen Datensätze zur Validierung ihrer Modellansätze zu liefern. In der ersten Projektphase wurde dazu ein laborskaliger Versuch zur Bestimmung der Strömung in und im direkten Umfeld von Makroporen aufgebaut.

Versuchsaufbau

Ausgehend von der Annahme, dass die Ausbreitung von Wasser in die Matrix von einer senkrecht angeordneten Makropore radialsymmetrisch stattfindet, wurde eine halbzyklindrische Versuchsgeometrie ausgewählt ($H = 120 \text{ cm}$, $r = 50 \text{ cm}$). Dieser Aufbau hat einerseits den Vorteil der Materialersparnis, andererseits erlaubt er durch die Ausbildung eines „Fensters“ auch eine visuelle Observation der Fluidausbreitung im porösen Material (siehe Abb. 1). Eine künstliche Makropore aus feinem Drahtgewebe (Durchmesser $D = 1 \text{ cm}$) wurde zentral in der Zylinderachse des halbzyklindrischen Versuchsstandes positioniert, wobei die Maschenweite ($62 \mu\text{m}$) so gewählt wurde, dass eine Verstopfung der Pore durch feine Bodenpartikel vermieden wird. Die Makropore wurde unten durch den Boden des Experiments herausgeführt. Dadurch wurde sichergestellt, dass „überschüssiges“ Wasser, also Wasser, das nicht durch die Matrix kapillar aufgenommen wurde, nach unten ablaufen konnte. Der Versuchsstand wurde mit Feinsand befüllt und mit Tensiometern in verschiedenen Tiefen und Abständen zur Makropore bestückt. Zur Einstellung kontrollierter Anfangsbedingungen wurde der Grundplattenbereich des Halbzyklinders mit Saugrohren aus porösem

Siliziumkarbid (Lufteintrittspunkt ca. 110 mbar) ausgelegt. Mit der an den Saugrohren angeschlossenen Vakuumpumpe kann die untere Randbedingung somit in einem Bereich zwischen 0 und ca. 110 cm Kapillarhöhe (h_c) eingestellt werden.

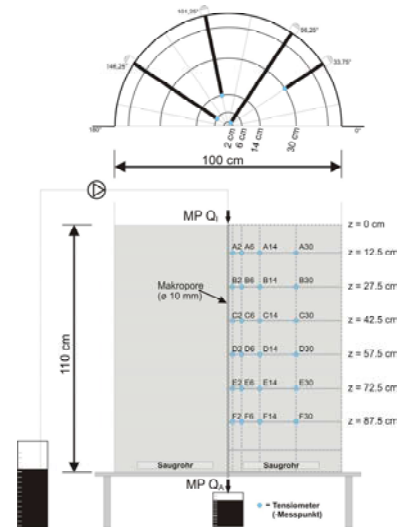


Abbildung 1: Fotos: Ansichten des Versuchsstandes „Wasserinfiltration über Makroporen“; links leer, rechts mit 110 cm hoher Sandfüllung in der „Halbtonne“; Schema rechts: Anordnung der 24 Tensiometer (-Messpunkte) zur Bestimmung des Porenwasserdrucks (oben Aufsicht, unten Ansicht (Tensiometer auf Scheibe projiziert)).

Versuchsdurchführung

Insgesamt wurden vier Versuchskonzepte entwickelt und bearbeitet:

Versuchskonzept 1 (nur Makroporeninfiltration): Die Halbtonne ist homogen mit Feinsand gefüllt, im Zentrum befindet sich die senkrechte Makropore und ist oben wie unten offen und es wird ausschließlich Wasser mit konstanter Rate direkt am oberen Ende in die Makropore injiziert. Die konstanten Injektionsraten wurden von Versuch zu Versuch gesteigert.

Versuchskonzept 2 (Matrix und Makroporeninfiltration kombiniert): Etwas naturnäher ist die Kombination von gleichzeitig stattfindender Makroporen und Matrixinfiltration. Mittels Überstau wurde hier zum einen eine reine Matrix -Infiltrationsfront erzeugt (Makropore war für direkte Wasserinjektion von oben geschlossen, Versuchsvariante 2a). Zum anderen bei geöffneter Makropore wurden sich „verschmelzende“ Makroporen und Matrix- Infiltrationsfronten erzeugt (Versuchsvariante 2b) (Abb. 2).

Versuchskonzept 3 (Schichtung): Bei Versuchsdurchführung wie im Versuchskonzept 1 wurde zusätzlich die homogene Sandfüllung mit einer mittleren Schluff-Schicht „durchsetzt“ (siehe Abb. 2). Injiziert wurde ausschließlich direkt in die Makropore. Das Injektionswasser wurde teilweise mit „Brilliant Blue“ zur besseren Sichtbarkeit angefärbt. Um die Ausbreitung noch deutlicher zu machen wurde gefärbtes Wasser im Wechsel mit Klarwasser injiziert.

Versuchskonzept 4 (Multimakroporen): Eine weitere Steigerung der Komplexität der Versuche wurde dadurch verwirklicht, dass mehrere Makroporen parallel angeordnet wurden (hier nicht gezeigt).

Zur Einstellung der Anfangsbedingungen wurde bei allen Versuchen an den unten eingebauten Saugrohren ein Unterdruck von ca. 100 mbar angelegt. Dies führte zu einer Entwässerung der Sandmatrix und zu Anfangswassersättigungen von ca. 5 bis 10 Vol.% von oben nach unten im Profil.

Der Unterdruck an den Saugrohren wurde nach Einstellung der stationären Anfangsbedingungen wieder abgestellt. Wasser wurde mit einer konstanten Rate mittels einer Peristaltikpumpe von oben direkt in die Makropore eingeleitet (Versuchskonzept 1,3 und 4) oder die gesamte Oberfläche der Sandmatrix wurde mit einer konstanten Wasserhöhe von ca. 5 cm überstaut (Versuchskonzept 2).

Die Injektionsrate wurde in Abstimmung mit TP 2 festgelegt und variierte von Experiment zu Experiment. Der Ausfluss Q_A aus der Makropore am Boden des Experiments wurde bei allen Versuchsreihen mit einer Kippwaage ermittelt und kontinuierlich aufgezeichnet. Zur visuellen Erfassung der Infiltrationsprozesse an der Glasseite wurde Intervallphotographie eingesetzt.

Die Entwicklung des Kapillardrucks an den Tensiometern (bis zu 24 Stück, Positionen siehe Abb. 1) wurde mit Druckaufnehmern und mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Sekunden bis 5 Minuten aufgezeichnet (Versuchskonzepte 1,2 und 3).

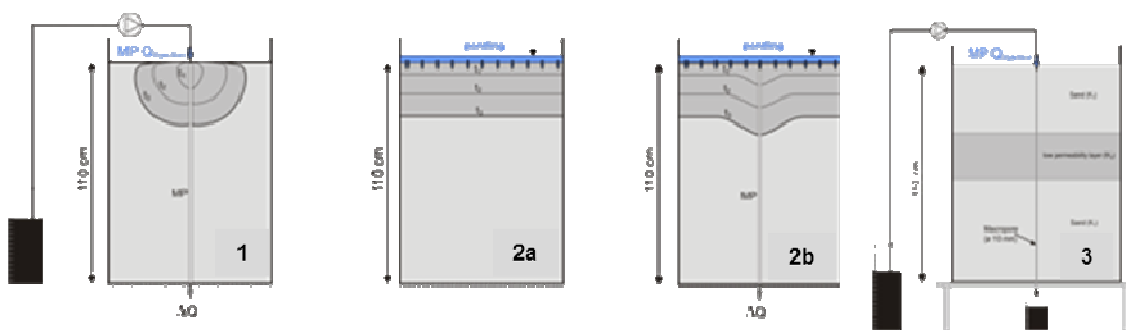


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Versuchsvarianten.

Ergebnisse: Großversuch „Wasserinfiltration über Makroporen“

Versuchskonzept 1 (nur Makroporeninfiltration in homogener Sandfüllung)

Die Ergebnisse zu der Versuchskonzept 1 (nur Makroporeninfiltration in homogener Sandfüllung) wurden im Bericht zur ersten Projektphase ausführlich beschrieben. Weiterführende Überlegungen und Auswertungen während der zweiten Projektphase führten zu neuen Ansätzen zur Ermittlung von Makropore zu Matrix Transferraten in Abhängigkeit vom Porenwasserdruck in der Makroporennahen Matrix. Diese Überlegungen werden derzeit quantitativ vervollständigt und sollen im Rahmen der Promotion von Kai Germer publiziert werden.

Versuchskonzept 2 (Matrix- und Makroporeninfiltration)

Die Ergebnisse aus den Intervallphotographien zu den Versuchen aus Versuchskonzept 2 (Matrix- und Makroporeninfiltration) sind in Abb. 4 dargestellt. Hier kann zu ausgewählten Zeitpunkten der Eindringfortschritt der Infiltrationsfront betrachtet werden. Auf einem residual gesättigten porösen Medium wurde innerhalb von wenigen Minuten ein Überstau von 4 - 5 cm auf der gesamten Oberfläche erzeugt und konstant gehalten. Dabei konnte das Wasser nicht direkt von oben in die Makropore eindringen. Nach ca. 20 Minuten war die Infiltrationsfront ca. 55 cm tief eingedrungen und nach ca. 38 Minuten erreichte die Front die Grundplatte des Versuchsstandes. Danach sättigte sich der Sand im unteren Bereich immer mehr auf, bis sich ein positiver Wasserdruck aufbaute und somit

Wasser über die Makropore drainieren konnte. Bis zum Beginn des Drainierens ergab sich eine vertikale Frontausbreitung mit einer Geschwindigkeit von ca. 2,9 cm/min.

Bei oben offener Makropore drang das Wasser bei Überstau über vertikale Infiltration in die Matrix und gleichzeitig in die Makropore ein (Versuchsvariante 2b). Von dort gelangte das Wasser dann teilweise durch laterale Infiltration auch in die Matrix. Bei konstantem Überstau von 2-3 cm begann bereits nach ca. 1-2 Minuten der Ausfluss. Während im oberen Bereich vertikale und laterale Infiltration stattfand, konnte am unteren Makroporende auf Grund einer geringen Querschnittsverengung nicht das gesamte in der Makropore fließende Wasser direkt abgeführt werden und somit ergab sich am Makroporenausgang ein Rückstau der dazu führte, dass hier ein starker Wassertransfer von Makropore zur umgebenden Matrix stattfand (Wasser wird in die Matrix gedrückt). Bei Betrachtung der Infiltrationsfront, die sich direkt von der Oberfläche her in der Matrix ausbreitet ist zu erkennen, dass die Eindringgeschwindigkeit mit 1,25 cm/min deutlich geringer ist als bei Versuchsvariante 2a (2,9 cm/min), was insbesondere ein Effekt des ca. 2 cm niedrigeren Überstaus ist.

Bei beiden Versuchsvarianten (2a und 2b) war die Wassermenge, die auf die Oberfläche aufgebracht wurde, ähnlich groß. Durch die starke Wasserabfuhr in der Makropore bei Variante 2b konnte sich der Überstau nicht so einstellen wie bei Versuchsvariante 2a. Dies zeigt, dass durch Makroporeninfiltration Oberflächenabfluss vermindert werden kann, was sich durchaus auf ein Natursystem übertragen lässt. Durch eine Ausflusslimitierung am unteren Makroporende, fand dort zusätzlich eine starke Aufsättigung des porösen Mediums statt. Übertragen auf ein Natursystem heißt dies, dass bei hoher bis vollständiger Sättigung der Makropore bei jeder Querschnittsverengung mit erhöhtem Übergang von Wasser in die umgebende Matrix zu rechnen ist. Die Bodenplatte des Versuchsstandes zeigt im Weiteren den Effekt einer undurchlässigen Schicht; und zeigt, dass in einem Natursystem mit einer verstärkten Aufsättigung und teilweise mit Anstieg des Grundwasserspiegels zu rechnen ist.

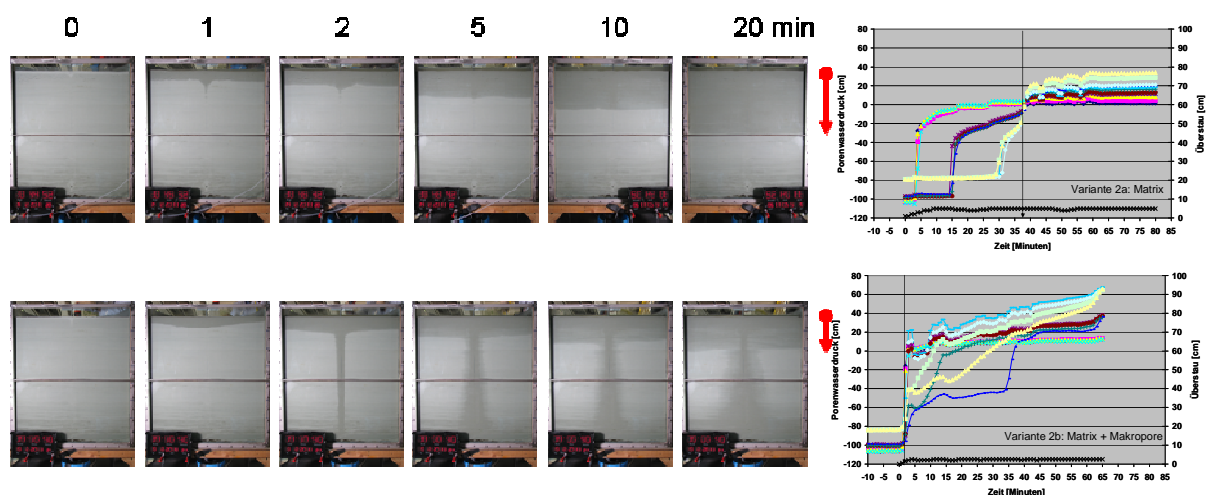


Abbildung 3: Fotos zu Stichzeiten während der ersten 20 Minuten, die die Wasserfrontausbreitung im System bei den Versuchsvarianten 2a (oben) und 2b (unten) zeigen; rote Pfeile deuten die Infiltrationstiefe nach 20 Min. an. Verläufe der Porenwasserdrücke bei den Versuchsvarianten 2a und 2b; senkrechte Linien zeigen den Zeitpunkt des Makroporen-Ausflussbeginns an.

In Abb. 3 sind die zu den Versuchsvarianten 2a (nur Matrixinfiltration) und 2b (Matrix- und Makroporeninfiltration gleichzeitig) gemessenen Porenwasserdrücke in drei Tiefenniveaus dargestellt (Tiefenniveau A, C und E). Die Messungen spiegeln das visuell erfasste Geschehen wieder.

Bei Versuch 2a reagieren die Porenwasserdrücke, die innerhalb eines Niveaus gemessen wurden, immer gleichzeitig entsprechend der rein vertikal eindringenden Feuchtigkeitsfront. Erst mit Beginn des Ausflusses wird das Strömungsgeschehen dreidimensional. Messungen im Niveau E (unten) zeigen, dass sich mit Ausflussbeginn nach ca. 38 Minuten, das Strömungsfeld trichterartig zum Makroporenausflusspunkt hin verändert.

Bei Versuchsvariante 2b hingegen kann gezeigt werden, wie sich die vertikale Infiltration von oben (erste Tensiometer-Reaktionen im Niveau A), der laterale Makropore-Matrix Übergang (erste Tensiometer-Reaktionen in zwei cm Abstand) und die Aufsättigung von unten (Tensiometer-Reaktionen in Niveau E) überlagern (Abb. 3). Späte Porenwasserdruckänderungen am Tensiometer C 30 zeigen, dass der Randbereich in mittlerer Höhe (siehe Messpunkt C30) länger trocken blieb und am längsten nicht vom Strömungsgeschehen beeinflusst wurde.

Versuchskonzept 3 (Makroporeninfiltration bei Anwesenheit einer mittleren Schluff-Schicht)

Die visuellen Ergebnisse bei Makroporeninfiltration bei Anwesenheit einer mittig gelegenen, wenig durchlässigen Schicht sind in Abb. 4 dargestellt. Der laterale Wassertransfer von Makropore zur Matrix beginnt unmittelbar nach Injektionsbeginn an der Injektionsstelle oben. Der Übergang wird zu Beginn der Versuchsdurchführung durch die kapillaren Saugkräfte der Matrix angeregt und kontrolliert. Bei den in dem Versuch eingestellten Anfangsbedingungen kann man sehen, dass der Wasserübergang von Makropore zur Matrix im Bereich der Schluffschicht stark vermindert ist. Sobald aber Wasser in der Makropore die Schluffschicht passiert hat, wird dieses Wasser wieder stark vom Feinsand aufgenommen, was sich wiederum in der starken lateralen Ausbreitung zeigt. Im Weiteren ist zu erkennen, dass Wasser, das erst überwiegend lateral in die Feinsandmatrix transferiert wurde (oberhalb der Schluffschicht), sich aber auch gravitativ in die Tiefe bewegt und somit von oben her in die Schluffschicht eindringt, dabei aber noch zusätzlich kapillar lateral bewegt wird.

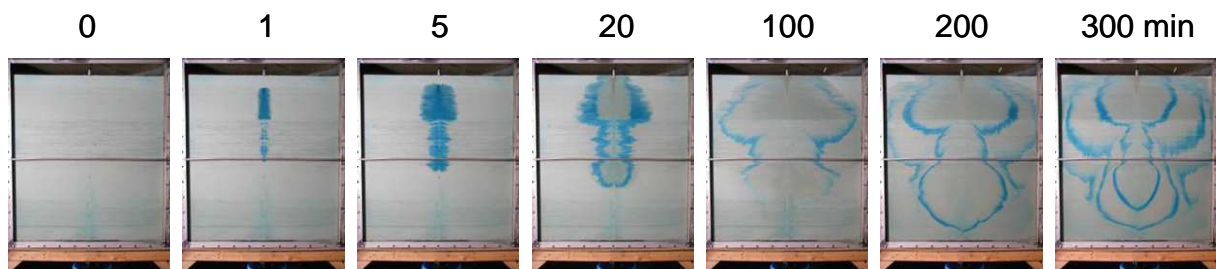


Abbildung 4: Visuelle Beobachtung der Wasserausbreitung bei Versuchskonzept 3 (mit 30 cm hoher mittlerer Schluffschicht) für die ersten 400 Minuten der Versuchsdurchführung; Zu Beginn und dreimal nach je zwei Stunden wurde für 10 Minuten blaugefärbtes Wasser injiziert, ansonsten Klarwasser.

1.7.1.7.2 Großversuch „Hangversagen“

Versuchsaufbau

Basierend auf den Vordimensionierungen durch TP 3 (Kontinuumsmechanik von Großhangbewegungen) wurde ein 80 cm breiter, 200 cm langer und 100 cm hoher Versuchstand aufgebaut. Der Versuchsstand ist ein Stahlcontainer (Rechteckcontainer), der auf einer Längsseite mit einer Glasscheibe versehen ist. Rechts und links (Querseite) sind Kammern angebracht, über die Festpotentialrandbedingungen eingestellt werden können (Abb. 5).

Ein Hangversagen tritt dann ein, wenn die Gravitationskräfte (Hangabtriebskräfte) die Reibungskräfte übersteigen. Eine Deformation oder ein Versagen eines Hanges ist insbesondere dann zu erwarten, wenn dieser durch eine zusätzliche Auflast, und/ oder durch eine Reduzierung der Kohäsionskräfte auf Grund zunehmender Wassersättigung und/ oder durch Auftrieb infolge starker Regenfälle instabil wird. Diese drei Deformationsursachen wurden in den Experimenten getrennt betrachtet

Im Feld ist die Auflast durch die entsprechende Fortsetzung des Hanges nach oben gegeben. Im Experiment war dies durch eine zusätzliche Auflast, die als Druckkraft am Kopf des Hanges wirkt, einzustellen. Zur Aufbringung der Auflast am Hangkopf wurde eine Lastplatte mit den Abmessungen 30 x 80 cm konstruiert, die über einen hydraulischen Doppelzylinder in diskreten Druckstufen bis zum Versagensfall in den Hang gedrückt werden konnte. Das obere Ende der Zylinder wurde mittels eines Schrittmotors so bewegt, dass die Kraft immer vertikal in den Hang eingetragen wurde und somit keine zusätzlich destabilisierenden Horizontalkräfte auf den Hang einwirkten. Die Lastplatte war um die y-Achse beweglich, und ihre Neigung wurde über Ultraschallsensoren registriert.

Eine Verminderung der Kohäsionskräfte wurde durch die Einstellung konstanter Grundwasserspiegel und der damit einhergehenden Positionierung der darüberliegenden Wassersättigung erreicht. Dynamische Druckänderungen (Auftrieb infolge Starkregen) wurde durch räumlich gezielte dynamische Injektion von Wasser abgebildet. Als poröses Medium wurde, wie bei den Versuchskonzepten zu „Wasserinfiltration über Makroporen“ ein Feinsand verwendet. Die Befüllung mit dem Feinsand fand unter Wasser statt, hierbei wurde ein jeweils ca. fünf Zentimeter hoher Überstau eingestellt, in dem anschließend trockener Feinsand lagenweise eingerieselt und verdichtet wurde. Mit dieser Methode wurden Lagerungsdichten von 1,55 bis 1,6 g/cm³ erreicht. Zunächst wurde der gesamte Container 90 cm hoch befüllt. Dann wurde der Wasserspiegel über die Festpotentialränder abgesenkt, und nach Beendigung des Drainageprozesses wurde die Hanggeometrie gemäß der Angaben durch TP 3 ausgegraben.

Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Deformationsversuche werden verschiedene Vorgehensweisen verfolgt. In Abb. 5 sind die verschiedenen Fälle schematisch dargestellt.

- Fall A (statische Grundwassersituation): Hangversagen wird bei statischem Grundwasserspiegel durch stufenweise Erhöhung der Auflast bis zum Versagensfall (F_{crit-A}) erzeugt.
- Fall B (stationäre Grundwasserströmung): stationäre Grundströmung (links nach rechts) mit entsprechender Erhöhung der Sättigung im Scherbereich. Das Hangversagen wurde wiederum durch stufenweise Erhöhung der Auflast bis zum Versagensfall (F_{crit-B}) induziert.

- Fall C (dynamische Grundwassersituation: Zustrom unter Hangfuß): Ausgehend von Anfangsbedingungen des Fall A wurde die Auflast erhöht bis kurz vor Versagensfall eintrat ($\sim 0,9 \times F_{\text{crit-A}}$). Danach Wasserinjektion unter Hangfuß per Festpotential-Behälter bis zum Eintritt des Versagensfalls.
- Bei Fall D (dynamische Grundwassersituation: Zustrom über Hangrücken): Ausgehend von Anfangsbedingungen wie in Fall C wurde die Piezometerhöhe auf der linken Seite schnell angehoben. Der sich ausbildende Grundwasserstrom reicht ab einer bestimmten Ausdehnung in den Bereich der Scherzone hinein und führt zur Destabilisierung des Hanges.

In allen Fällen wurde neben den Anfangsbedingungen die Porenwasserdrücke entlang der Grundfläche des Versuchstandes, die Zunahme der Auflast und die Rotation sowie die horizontale und vertikale Verschiebung der Lastplatte als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Für die Fälle A, B und C wurden jeweils bis zu fünf Wiederholungen durchgeführt.

Die Seitenwand aus Glas erlaubte die visuelle Beobachtung der Strömungsprozesse und der Deformation (Entwicklung des Scherbandes). Sowohl die Seitenansicht als auch eine Ansicht vertikal zum Hang wurden digital gefilmt.

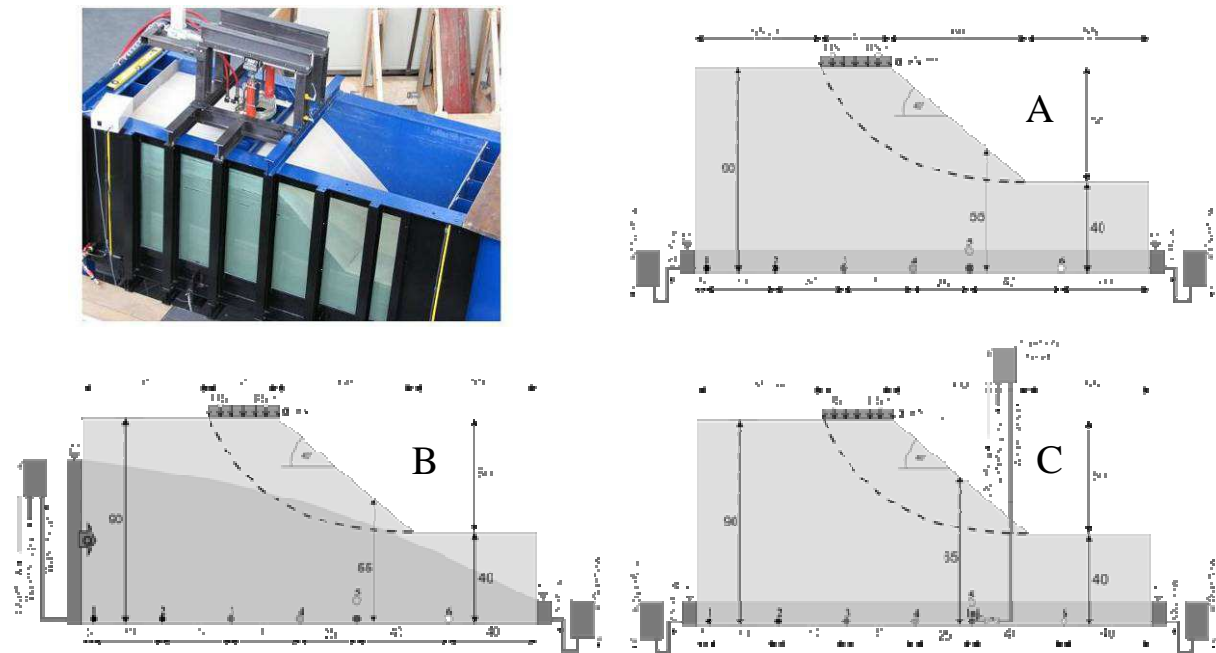


Abbildung 5: links oben: Ansicht Deformationsversuch im Rechteckcontainer mit modelliertem Hang und Aufbau zur Aufbringung und Steuerung der Auflast. Schematischer Aufbau des Deformationsversuchs für die Fälle A (links oben), B (links unten) und C/D (rechts oben); Durchnummerierte Markierungspunkte nahe der Grundplatte des Versuches kennzeichnen die Porenwasserdruck- Messstellen.

Ergebnisse

Fall A: Abbildung 6 zeigt links charakteristische Szenen (Fotos) der Versuche der Fälle A, B und C sowie rechts jeweils die zugehörigen Messergebnisse der Porenwasserdrücke (Grundwasserstände), der Auflasten und die Deformation (gemessen an der Lastplatte).

Für den Fall A wurde die Auflast schrittweise erhöht ($dq = 10 \text{ kN/m}^2$ bei $dt = 2 \text{ Minuten}$) und dieses für 48 min, bis die Böschung bei einer Lastkraft $F_{crit-A} = 243 \text{ kN/m}^2$ versagte. Es ist erkennbar, dass jede Erhöhung der Auflast eine unmittelbare und schnelle Verformung (Verdichtung) des Böschungskörpers zur Folge hatte. Diese Verformungen waren sehr klein (ca. 0,5 mm) wobei die stärkste Deformation jeweils zu Beginn eines Druckschrittes stattfand. Das Versagen zeigt sich in einer plötzlichen Abnahme des Druckes in den Hydraulikzylindern. Nach dem Versagen fanden die Zylinder keinen Widerstand mehr und deformierten mit geringem Druckaufwand die Böschung.

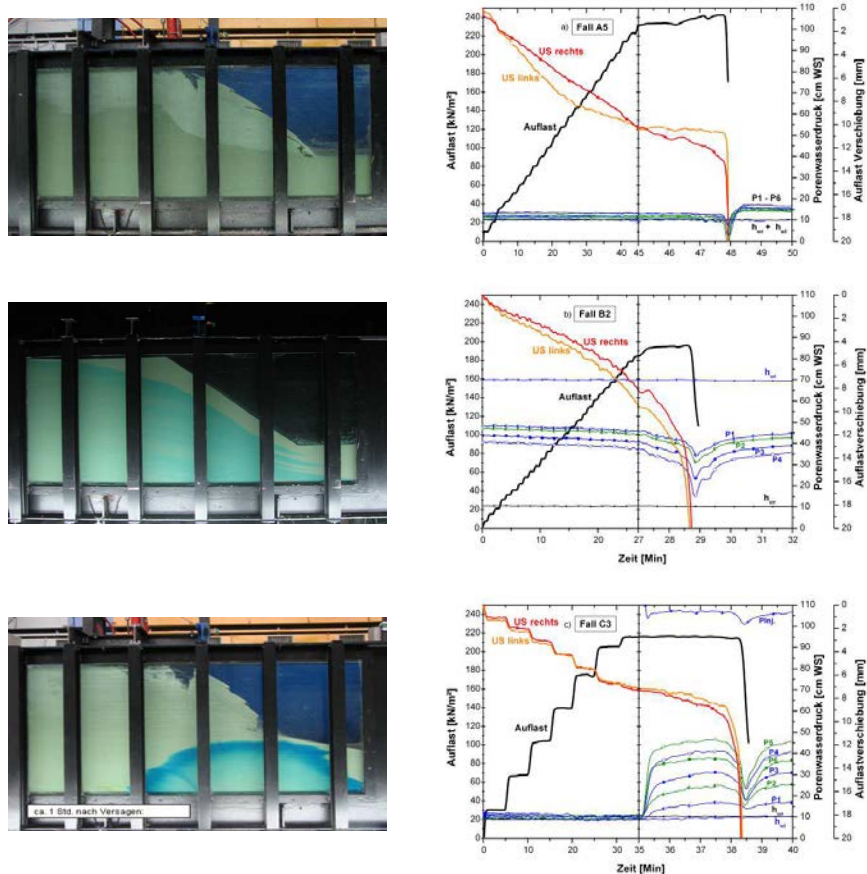


Abbildung 6: links: Charakteristische Szenen zu den Versuchen zu Fall A (oben): Seitenansicht kurz nach dem Versagensfall, Fall B (Mitte): Aufnahme während der Einstellung der stationären Durchströmung (mit blau eingefärbtem Wasser) und zu Fall C (unten): Aufnahme nach dem Versagen welches durch Wasserinjektion unter dem Hangfuß ausgelöst wurde mit sichtbarer (blaufärbter) Wasserausbreitung; rechts: Deformationsversuch Fall A,B und C : Stufenweise Druckerhöhung bis zum Versagensfall (A und B) und zugehörige, mit Ultraschall-Sensoren (US) erfasste, Verschiebung der Lastplatte; Darstellung der Porenwasserdrücke (P) an bis zu sechs Messpunkten sowie Wasserspiegel links und rechts.

Bei Betrachtung der Porenwasserdrücke, kann man beobachten, dass der Grundwasserspiegel im System stabil war, was darauf hindeutete, dass die Verdichtung langsam genug stattfand, um keine deutliche Umverteilung des Wassers zu erzeugen. Zur Zeit des Versagens wurde jedoch eine starke Abnahme der Porenwasserdrücke beobachtet. Diese starke Veränderung der Porenwasserdrücke

steht im Zusammenhang mit der Veränderung der Porosität, die durch die Scherbandentwicklung erzeugt wird.

Fall B: In den Experimenten für Fall B versagte die Böschung im Durchschnitt bei $F_{crit-B} = 192 \text{ kN/m}^2$, das entspricht ca. 80 % der maximalen Belastung die für Fall A bestimmt worden war. Die Verformungen des Systems waren in der ersten Phase ähnlich wie die Verformungen in Fall A, jedoch war die vertikale Verschiebung, die mit dem Versagen einhergeht nicht so plötzlich sondern allmählich. Die Abbildung 6 (rechts Mitte) zeigt deutlich, dass die Verformungen bei Fall B sich schon ca. eine Minute vor dem Versagen stark erhöhten.

Die Porenwasserdrücke gemessen an den Piezometermesspunkten (P1 bis P4) zeigen im Fall B, im Gegensatz zu Fall A, eine leichte aber stetige Abnahme in der Anfangsphase. Minuten vor dem Versagen zeigte sich eine weitere schnelle Abnahme der Porenwasserdrücke parallel zur erhöhten Verschiebung der Auflastplatte.

Fall C: Die externe Last wurde schrittweise erhöht ($dq = 35 \text{ kN/m}^2$, $dt = 5 \text{ min}$), bis ein $F_{max-C} = 215 \text{ kN/m}^2$ erreicht wurde, das entspricht ca. 90 % der maximalen Belastung die für Fall A bestimmt worden war (Abb. 6). Mit Beginn der Wasserinjektion ($t = 35 \text{ min}$) war F_{max-C} schon seit einiger Zeit erreicht. die Wasserinjektion wurde schlagartig mit einem Druck von 125 cm Wassersäule gestartet, was innerhalb kurzer Zeit ($<1 \text{ min}$) zu einer starken Erhöhung des Porenwasserdrücke in der Nähe der Injektionsstelle führte. Zeitgleich beschleunigte sich die vertikale Verschiebung. Etwa zwei Minuten nach Injektionsbeginn sanken die Porenwasserdrücke wiederum und deuten auf das bevorstehende Böschungsversagen hin, welches nach ca. einer weiteren Minute eintrat. Während die Porenwasserdrücke sanken, blieb die Tragfähigkeit der Böschung aber stabil (Auflast konstant gemessen).

Fall D: Für den Fall D wurden lediglich zwei Versuche durchgeführt. Die Prozesse bis hin zum Versagen liefen analog denen bei Fall C ab. Bei Fall D dauerte es länger, bis es zum Hangversagen kam, weil das rückseitig heranströmende Wasser erst an den Scherbereich gelangen musste. Aufgrund der geringen Anzahl der Versuche (geringe Reproduzierbarkeit) wurden die Experimente für Fall D nicht zur tieferen Auswertung herangezogen. Die Versuche dienten aber der qualitativen Einschätzung dieser Form der Böschungsdestabilisierung.

Hangversagen durch Erosion

Die Sättigungen und Grundwasserstände bei den Deformations- und Böschungsbruchversuchen zu Fall A bis D wurden bewusst so durchgeführt, dass kein Wasseraustritt über die Böschungsoberfläche stattfinden konnte. In dem Antrag zur zweiten Projektphase war angedacht den Austrag von Feinpartikeln aus einer Sandböschung (mit weiter Kornverteilung) zu bestimmen. Durch den Partikelaustrag sollten Rückschlüsse auf die Matrixveränderung und somit auf eine mögliche Stabilitätsveränderung gemacht werden können.

Nachdem die in den vorigen Kapiteln beschriebenen Versuche weit mehr Zeit in Anspruch genommen hatten als ursprünglich geplant und gleichzeitig die ursprünglich beantragte Bearbeitungszeit um 30% reduziert worden war, konnten die Versuche leider nicht in dem ursprünglich geplanten Umfang durchgeführt werden. Testweise wurde mit demselben Sand und dem gleichen Versuchsdesign (Rechteckcontainer) wie für die Versuche Fall D ein Versuch durchgeführt bei dem bewusst die

Grundwasserspiegel so gefahren wurden, dass ein oberflächlicher Wasseraustritt stattfinden konnte. Bei diesem Versuch wurde keine Auflast verwendet, dennoch fand eine langsame Deformation der Böschung aufgrund von rückschreitender Erosion statt. Basierend auf diesem Versuch fand die Planung und Entwicklung Einbauten statt, die im Oberflächenbereich des Hangfußes zur Partikelsammlung installiert werden sollten. Da aber bei der rückschreitenden Erosion diese Einbauten auch hätten rückschreiten müssten und da diese Einbauten einen direkten, jedoch experimentell nicht quantifizierbaren Einfluss auf die Hangstabilität gehabt hätten, konnte die Konstruktion leider nicht sinnvoll weitergeführt werden. Nachdem diese Untersuchungen weiterhin keinen direkten Einfluss auf die ursprünglich aufgestellte Hypothese (Deformation durch Destabilisierung auf Grund von schnellen Druckveränderungen des Grundwassers im Bereich der Scherfläche) hatten wurde in enger Rücksprache mit dem Sprecher (Prof. Hinkelmann) und seinem Stellvertreter (Prof. Zehe) beschlossen, den Fokus der experimentellen Forschungsarbeiten auf die oben beschriebenen Makropore-Matrix-Interaktion und die Hangstabilität zu legen.

1.7.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Die vorgestellte Kombination von Makroporenversuchen auf der vorgestellten Skala verknüpft mit Messtechnik und Visualisierung ist nach Einschätzung der Berichter neu. Mit dem bestehenden experimentellen Aufbau sollten weiterhin Fragestellungen in Bezug auf Makroporeninfiltration bearbeitet und insbesondere systematische Versuche zu unterschiedlichen porösen Materialien durchgeführt werden. Auch der Effekt von Matrixheterogenitäten auf das Infiltrationsgeschehen könnte mit dem vorhandenen Versuchsaufbau vertieft untersucht werden.

Eine sehr interessante Entdeckung bei der Durchführung der Hangbruchversuche war, dass sich ein bevorstehendes Hangversagen in einer Veränderung des Porenwasserdrucks ankündigt (Germer und Braun, 2011). Während der zeitliche Abstand zwischen dieser Druckänderung und dem Hangversagen zu kurz ist, um darauf ein direktes Warnsystem aufzubauen, lohnt es sich bestimmt, diesen Effekt auf der Porenskala weiter zu betrachten um daraus Stabilitätskriterien für gefährdete Hänge abzuleiten.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Eine wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse ist derzeit noch nicht möglich.

Kooperationspartner

Neben intensiver Zusammenarbeit innerhalb der Forschergruppe (dabei insbesondere mit Jan Wienhöfer (TP1), Leopold Stadler (TP2) und Okan Avci (TP3) wurde eine nachhaltige Kooperation mit Prof. Wolfgang Durner (TU Braunschweig) aufgebaut. Schwerpunkt dieser Zusammenarbeit ist insbesondere das gemeinsame Interesse an Mehrphasenströmung und dem Effekt des Matrix-Potentials auf Makroporen-Matrix-Interaktion und der damit verbundenen konstitutiven Beziehungen..

Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Die Erkenntnisse der Arbeiten werden derzeit im Rahmen der Doktorarbeit von **Kai Germer** zusammengefasst. Es ist geplant, die Arbeit im Sommersemester 2013 einzureichen.

Studentenarbeiten:

Maurer, S., Bachelorarbeit: Deformationsvorgänge bei Hangversagen: Wissenschaftliche Untersuchung von hydraulischen Vorgängen in einem Sandkörper, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau – VEGAS und Hochschule für Technik Esslingen a. N., 2010

Lamprecht, M., Studienarbeit: Messungen mit Kapazitiv-Sonden zur Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes in porösen Materialie, Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau – VEGAS, 2010

Melasse, E., Seminararbeit: Laboratory Measurement of Capillary Pressure vs. Moisture Content Curve (Retention Curve), Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau – VEGAS, 2010

Im Weiteren waren während der Projektlaufzeit bis zu sechs verschiedene studentische Hilfskräfte in den Aufbau und die Durchführung der Experimente involviert und konnten dabei wertvolle experimentelle und wissenschaftliche Erfahrungen sammeln.

1.7.2 Zusammenfassung

Die vorgestellte experimentelle Forschung wurde zur Überprüfung der Hypothese, dass am Heumöser Hang in Ebnit schnelle Infiltration über Makroporensysteme im oberen Hangbereich zu einem schnellen Anstieg des Porenwasserdrucks in tiefer gelegenen Bereichen und damit zur Destabilisierung des Hangs führen, durchgeführt. Der Schwerpunkt des Teilprojekts 4 lag somit in der experimentellen Erarbeitung eines Prozessverständnisses der eine Hangrutschung verursachenden komplexen Infiltrations- und Deformationsvorgänge. Zur Überprüfung der Hangrutschungshypothese wurden zwei Großversuche entwickelt und durchgeführt mit deren Hilfe es möglich war, maßgebliche Parameter für Infiltrations- und Deformationsprozesse getrennt voneinander zu betrachten.

In den durchgeführten Arbeiten konnte ein direkter Zusammenhang zwischen Makroporendurchfluss und Tiefeninfiltration aufgezeigt werden. Der Austausch Makropore-Matrix wurde quantifiziert und es wurden Szenarien beschrieben und experimentell nachgewiesen, die zu einer Verstärkung/ Abschwächung der Makroporeninfiltration führen.

In einem weiteren einfachen Versuch aus der Reihe der Infiltrationsversuche konnte gezeigt werden, dass Infiltration in ein poröses Medium ohne Makropore(n) ausgehend von einem leichten Überstau zu einer „langsamen“ Infiltrationsfront durch die Matrix führt. Bei gleichem Versuchsaufbau und denselben Randbedingungen, jedoch mit einer zusätzlichen, zur Oberfläche offenen Makropore konnte gezeigt werden, dass nunmehr das Eindringen in und das Abfließen durch die Makropore dominiert und die reine Matrixinfiltration abgeschwächt wurde.

Im Weiteren wurden Infiltrationsversuche durchgeführt, bei denen die Infiltration durch multiple Makroporen stattfand und Superpositionseffekte aufgezeigt werden konnte sowie Versuche mit

Makroporeninfiltration verbunden mit heterogenen Bodenstrukturen (verschiedene Schichten). Bei diesen Versuchen mit geringdurchlässiger Schicht wirkte diese zum einen als Stauer für Wasser, welches oberhalb dieser Schicht von der Makropore zur Matrix transferiert wurde (Verlangsamung der Wasserinfiltration). Zum anderen aber wurde der Anteil des Wassers, welcher oberhalb der Schicht nicht in die Matrix transferierte (also der Teil der in der Makropore weiter nach unten fließt) im Bereich der geringdurchlässigen Schicht schneller in die Tiefe geleitet, weil dort die Makropore zu Matrix Transferrate niedriger war.

Weitere Untersuchungen verbesserten das Verständnis des Deformationsverhaltens von Laborhängen als Folge schnellen Druckanstiegs unter dem Hangfuß und/oder durch Destabilisierung des Korngerüsts. In Deformationsversuchen wurde die Abhängigkeit der Böschungstabilität von Auflast, statischer Wassersättigung und dynamischer Wasserdruckveränderung erarbeitet. Es wurde gezeigt, dass dynamischen Wasserdruckerhöhungen im Bereich des Hangfußes maßgeblich zu einer Destabilisierung des Hangs beitragen. Ein interessanter Aspekt dieser Untersuchungen war die Erkenntnis, dass einem Hangversagen ein Abfall des Porenwasserdrucks vorausgeht. Diese Arbeiten wurden im *Vadose Zone Journal* (Germer, K. and J. Braun. 2011. Effects of Saturation on Slope Stability: Laboratory Experiments Utilizing External Load. *Vadose Zone J.* 10) publiziert.

**Seismisches Monitoring von Bruchprozessen
und
Hochauflösende Fernerkundung mittels UAV**

Teilprojekt 5a und 5c im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

Prof. Dr. Manfred Joswig

26.06.2013

Universität Stuttgart

1.8 Abschlussbericht TP5a und TP5c

1.8.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.8.1.1 DFG Geschäftszeichen

JO 400/4-1

1.8.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr. Manfred Joswig

Universitätsprofessor, geb. 30. September 1951, Deutscher

Institut für Geophysik, Universität Stuttgart, Azenbergstrasse 16, 70174 Stuttgart,

Tel.: 0711 / 68587402, Fax: 0711 / 68587401,

Manfred.Joswig@geophys.uni-stuttgart.de, www.geophys.uni-stuttgart.de

Privatadresse: Goethestraße 25, 40237 Düsseldorf, Tel.: 0211 / 6913972

1.8.1.3 Thema des Projekts

Geophysikalische Untersuchungen der Massenbewegung am Heumöser Hang; hier nur

TP5a: Seismisches Monitoring von Bruchprozessen

TP5c: Hochauflösende Fernerkundung mittels UAV

1.8.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den zweiten Förderzeitraum. Der Förderzeitraum von TP5a begann am 01.01.2009 und endete am 31.12.2011. Der Förderzeitraum von TP5c begann am 01.01.2011 und endete am 31.10.2011.

1.8.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

a) Walter,M., Schwaderer,U. & Joswig,M. (2012): Seismic monitoring of precursory quakes from a destructive rockfall in the Vorarlberg Alps, Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12, 3545-3555; doi:10.5194/nhess-12-3545-2012

Sick,B., Walter,M. & Joswig,M. (2012): Visual event screening of continuous seismic data by super-sonograms. *Pure and Applied Geophysics topical Volume on Recent Advances in Nuclear Explosion Monitoring, Vol. I., Pure and Applied Geophysics*; doi:10.1007/s00024-012-0618-x

Niethammer,U., James,M.R., Rothmund,S., Travelletti,J. & Joswig,M. (2012): UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. *Engineering Geology*. 128, 2-11

Walter,M., Arnhardt,C. & Joswig,M. (2012): Seismic monitoring of rockfalls, slide quakes, and fissure development at the Super-Sauze mudslide, French Alps, *Engineering Geology*, 128, 12-22

- Walter,M., Walser,M. & Joswig,M. (2011): Mapping Rainfall-Triggered Slidequakes and Seismic Landslide-Volume Estimation at Heumoes slope. *Vadose Zone Journal*, 10 (2): 487-495
- Walter,M., Niethammer,U., Rothmund,S. & Joswig,M. (2009): Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *First Break*, 27 (8), 75-82

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.8.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Seismisches Monitoring von Bruchprozessen

Im Rahmen der ersten Projektphase (JO 400/3-1) konnte durch Anwendung von *Nanoseismic Monitoring* (Joswig 2008) erstmalig das 'Kriechkontinuum' des Heumöser Hanges in diskrete Bruchprozesse aufgelöst werden. Das zeitliche und räumliche Auftreten dieser Bruchprozesse korrelierte nur in Einzelfällen mit Starkregenereignissen, aber überraschenderweise auch mit schwachen Lokalbeben M_L 2.0 aus der Bodenseeregion. Beide Effekte sind mit registrierten Bruchstärken M_L –2.0 am Heumöser Hang um Größenordnungen unter den bisher bekannten Beobachtungen von Fluid-induzierten Beben (Hainzl et al. 2006, Husen et al. 2007) und ferngetriggerten Beben. Besonders überraschend war, dass die Bruchsignaturen eindeutig impulsiv sind und Spröbruchcharakteristik zeigen. Vergleichbare Beobachtungen an Felshängen sind zwar bekannt (Brückl & Mertl 2006, Roth et al. 2005, Spillmann et al. 2007), dagegen besteht der Heumöser Hang aber im Wesentlichen aus glazialen Lockersedimenten.

Das Ziel der seismischen Untersuchungen von TP5a war, die bereits bekannte Existenz von kleinsten Bruchprozessen im Hang auf ihre räumlich-zeitlichen Auftretensmuster, insbesondere den Zusammenhang zu Starkregen, Tauphasen und Triggerung durch Lokalbeben langfristig zu untersuchen. Durch die Installation eines permanenten seismischen Netzwerkes sollten die Langzeitbeobachtungen ermöglicht werden, die statistisch belastbarere Erkenntnisse zulassen. Bisherige Untersuchungen gehen im Wesentlichen von durch rasche Wasserinfiltrationen verursachten Auftriebeffekten aus, die die Bewegung am Heumöser Hang auslösen. Welchen Einfluss die durch Wasserinfiltrationen oder Schneeeauflage im Winter erhöhte Last des Rutschungskörpers hat, war unklar. Das Zusammenspiel von erhöhter Auflast und der reduzierten Festigkeit des Mergels bei hohen Sättigungen soll durch das zeitliche Auftreten von Bruchprozessen bei unterschiedlichen Witterungsbedingungen und klimatischen Verhältnissen spezifiziert werden.

Die Bewegung des Heumöser Hanges kann nach bisherigen Untersuchungen nicht ganzheitlich betrachtet werden. Vielmehr ist davon auszugehen, dass der Hang in Bereiche unterschiedlicher Deformationsprozesse aufgeteilt ist (Lindenmaier 2008). Die räumliche Verteilung der Bruchprozesse soll Hinweise auf Hangbereiche unterschiedlicher Bewegungsanfälligkeit und unterschiedlicher Deformation geben.

Hochauflösende Fernerkundung mittels UAV

Das Ziel der fernerkundlichen Forschungen am Heumöser Hang war die räumlich hoch auflösende Erfassung des Rutschungskörpers und seiner Dislokation sowie die Bestimmung zeitlicher Variationen unterschiedlich durchfeuchteter Hangbereiche. Hierfür sollten Verfahren der Kantenfindung sowie eine multispektrale Analyse (VIS, NIR, TIR) der Luftaufnahmen entwickelt und realisiert werden. In Erweiterung des bisher erhobenen Spektrums sollten die Aufnahmen im nahen und thermischen Infrarot entscheidende Informationen über die Durchfeuchtung und den Bewuchs der Hangoberfläche liefern.

1.8.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Seismisches Monitoring von Bruchprozessen

Im Juli 2009 wurde ein permanentes seismisches Netzwerk bestehend aus drei seismischen Kleinarrays am Heumöser Hang installiert. In dem Zeitraum von Juli 2009 bis Mai 2011 konnten insgesamt folgende relevanten seismischen Ereignisse registriert und identifiziert werden:

- 286 Lokalbeben
- 83 rutschungsinduzierte Bruchprozesse
- 33 Episoden von Frostbrüchen
- das Felssturzereignis am 10.05.2011 in der Rappenlochschlucht.

Die registrierten Lokalbeben mit Magnituden zwischen $M_L = -1,1$ und $M_L = 3,9$ entstanden durch die lokale tektonische Seismizität des Oberrheingrabens in einer Entfernung von bis zu 100 km zum Heumöser Hang. Eine Beben-getriggerte Generierung von Hangprozessen, wofür es in den Messkampagnen im Mai/Juni 2007 der ersten Projektphase Indizien gab, konnte während der permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hanges nicht bestätigt werden.

Während der ca. 22-monatigen permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hanges konnten insgesamt 83 rutschungsinduzierte Bruchprozesse mit Magnituden von $-2,5 \leq M_L \leq -0,5$ registriert und lokalisiert werden. Die Abbildung 1 zeigt die Epizentren der in diesem Zeitraum lokalisierten Ereignisse in Abhängigkeit ihrer Magnitude.

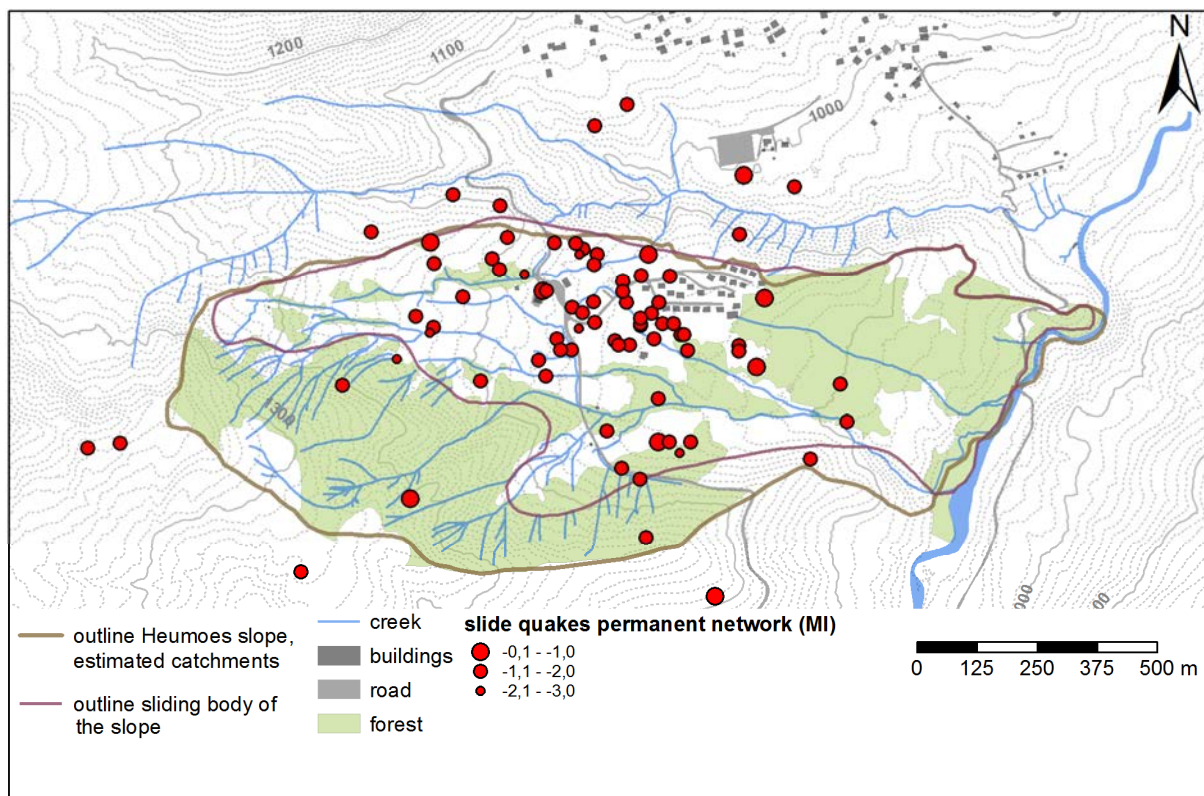


Abbildung 1: Lokationen der 83 während der permanenten seismischen Überwachung (2009 – 2011) am Heumöser Hang registrierten Bruchprozesse

Aus Abbildung 1 ist ersichtlich, dass sich die Bruchereignisse im mittleren Hangbereich, bei dem die geringsten Bewegungsraten an der Oberfläche registriert wurden, räumlich clustern, wohingegen im östlichen Hangbereich, wo die höchsten Bewegungsraten observiert wurden, kaum Bruchprozesse lokalisiert wurden (vgl. Lindenmaier et al. 2005). Diese widersprüchlich erscheinende Beobachtung kann durch die synoptische Analyse des räumlichen Auftretens der Bruchprozesse unter Einbeziehung der Untergrundtopographie erklärt werden. Mit Hilfe von refraktionsseismischen Untersuchungen konnte 2007 im Rahmen der ersten Projektphase eine signifikante Erhöhung des basalen Festgesteins am Heumöser Hang observiert werden (Walser 2008), die vom Teilprojekt TP1b der Forschergruppe bestätigt werden konnte. Diese Erhöhung könnte als ‚Rutschungsbremse‘ für den gesamten Hang fungieren und für die geringen Bewegungsraten an der Oberfläche des mittleren Hangbereichs ursächlich sein. Da diese Festgesteinserrhöhung senkrecht zur Hauptbewegungsrichtung des Heumöser Hanges orientiert ist, könnte es in diesem Hangbereich zu einer erhöhten Spannungsakkumulation kommen, die wiederum die Häufung von Bruchprozessen in diesem Hangbereich erklären würde. Die Abbildung 2 zeigt eine schematische Darstellung dieser Hypothese. Die synoptische Analyse und Interpretation des räumlichen Auftretens rutschungsinduzierter Bruchprozesse bei Lockergesteinshangrutschungen am Heumöser Hang, am Schlammstrom in Super-Sauze (Walter et al. 2009, 2012) und an der Slumgullion Hangrutschung in Colorado, USA (Gomberg et al. 1995, 2011) zeigt, dass trotz der hangspezifischen kinematischen Unterschiede die Generierung von seismisch erfassbaren Bruchprozessen prinzipiell direkt an deren Untergrundtopographie bzw. deren lateralen Begrenzungen gekoppelt ist.

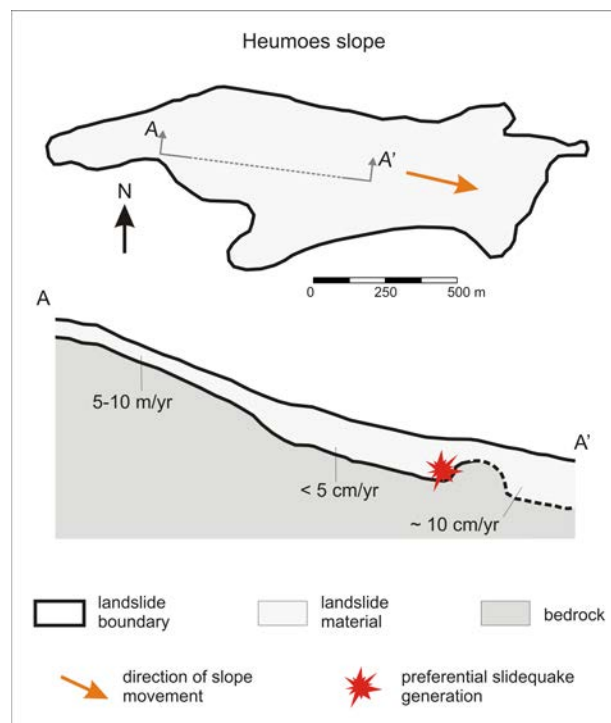


Abbildung 2: Schematische Darstellung der vorrangigen Generierung von Bruchprozessen am Heumöser Hang an der Erhöhung der basalen Festgesteinstopographie (Untergrundtopographie verändert nach Walser 2008)

Bezüglich des zeitlichen Auftretens der observierten Bruchprozesse konnte kein prinzipieller Zusammenhang zwischen meteorologischen oder hydraulischen Einflüssen bzw. Änderungen auf die Generierung von Bruchprozessen abgeleitet werden (Abb. 3). Die meteorologischen und hydrologischen Daten wurden am Heumöser Hang registriert und von Kollegen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TP1a) zur Verfügung gestellt. Aus Abbildung 3 wird aber ersichtlich, dass während der jeweiligen Wintermonate (November bis Februar) eine nur sehr geringe Anzahl von Bruchprozessen observiert wurde. Dies führt zu der Vermutung, dass die klimatischen Verhältnisse während der Wintermonate den Heumöser Hang eher zu stabilisieren scheinen und somit auch die flächige Auflast der Schneebedeckung von über einem Meter den Hang nicht zu destabilisieren scheint. Diese Hypothese wird von den Ergebnissen des Teilprojekts TP1a gestützt.

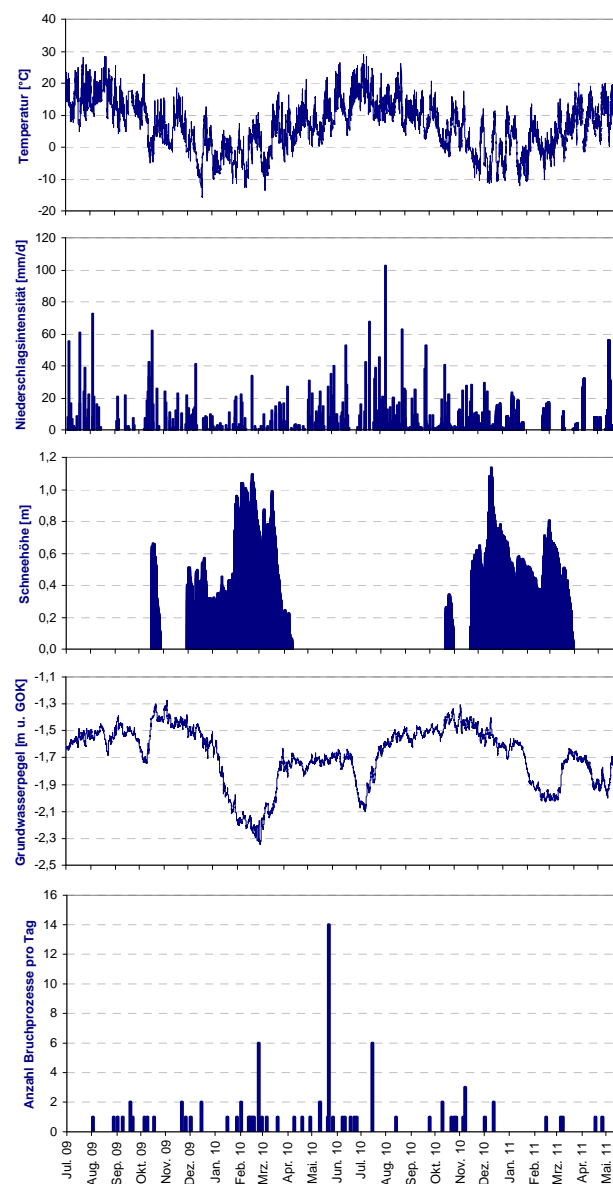


Abbildung 3: Lufttemperatur, Niederschlagsintensität, Schneehöhe, Grundwasserpegel und Anzahl der observierten Bruchprozesse pro Tag während der permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hangs von 2009 – 2011

Neben Lokalbeben und Bruchereignissen konnten während der permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hanges insgesamt 33 Episoden von Frostbrüchen observiert werden. Diese Signale traten lediglich in den Wintermonaten bei Lufttemperaturen unter 0 °C auf, was bereits auf eine mit Frost im Zusammenhang stehende Generierung deutet. Die Abbildung 4 zeigt das zeitliche Auftreten der beobachteten Episoden von Frostbrüchen während der permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hanges von Juli 2009 – Mai 2011 sowie die im gleichen Zeitraum registrierte Lufttemperatur. Die Lufttemperatur wurde an der Wetterstation am Heumöser Hang, die von Kollegen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe (TP1a) im Rahmen der Forschergruppe Grosshang installiert wurde, registriert und deren Daten zur Verfügung gestellt.

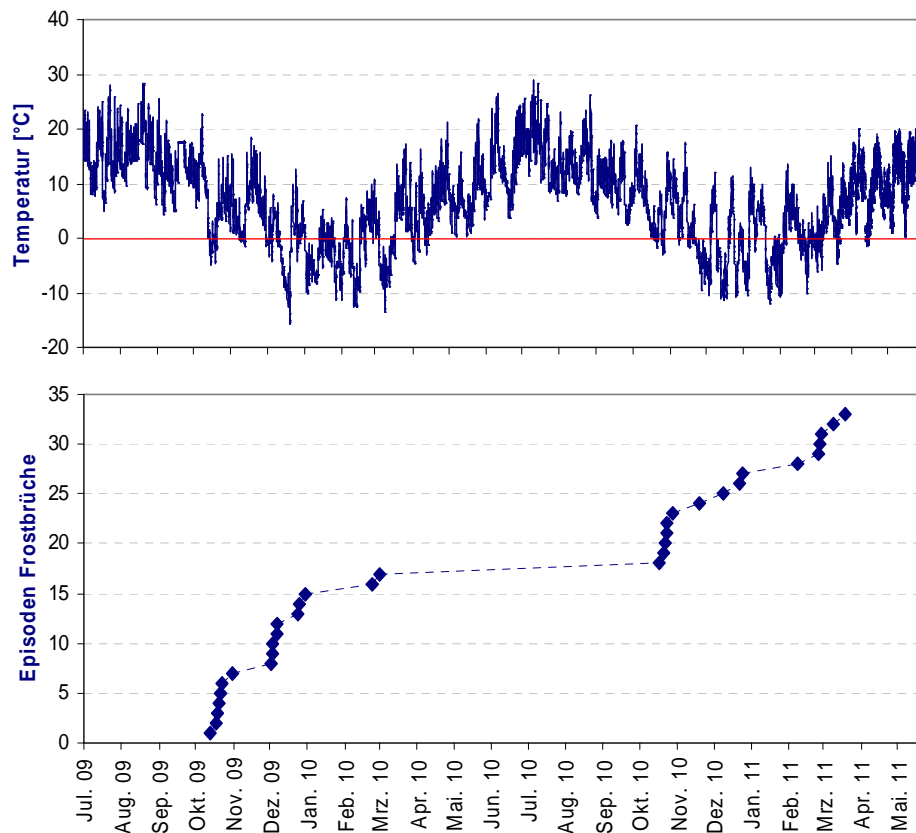


Abbildung 4: Zeitliches Auftreten der 33 Episoden von Frostbrüchen während der permanenten seismischen Überwachung des Heumöser Hanges (2009 – 2011, unten) sowie die im gleichen Zeitraum registrierte Lufttemperatur (oben)

Um mögliche Herdprozesse der registrierten Signale zu bestimmen, wurde im Winter 2010/2011 ein Feldexperiment unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt. Dafür wurde das Materialverhalten von ca. 60 kg des Lockersediments des Heumöser Hanges bei unterschiedlichen Temperaturen seismisch erfasst. Das Experiment zeigte, dass vergleichbare Signale wie sie am Heumöser Hang observiert wurden, durch frostinduzierte Rissentwicklung im Material (Frostsprennung) generiert werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass diese Signale in der obersten Schicht des Hangmaterials entstanden und letztlich in keinem Bezug zu dynamischen Prozessen des Hanges stehen. Dennoch

könnten die durch Frost entstandenen Risse bei der Schneeschmelze Wasserwegsamkeiten darstellen, durch die es zu rasch ablaufenden Infiltrationsprozessen kommen könnte. Am Heumöser Hang dürfte dieser Effekt allerdings eine eher untergeordnete Rolle spielen, da dort die punktuell gemessene Frosteindringtiefe lediglich maximal 10 cm beträgt (Wienhöfer (TP1a), persönliche Mitteilung).

Am 10.05.2011 ereignete sich in einer Entfernung von ca. 5 km zum Heumöser Hang in der Rappenlochschlucht ein Felssturzereignis mit einem geschätzten Volumen von ca. 15.000 m³. Durch den Felssturz wurde eine Brücke, die man auf der einzigen Straße, die zum Heumöser Hang führt, überqueren muss, auf einer Länge von ca. 30 m weggerissen. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Stationen des permanenten seismischen Netzwerks in der Nähe befanden, konnte dieses Ereignis seismisch erfasst werden.

Neben der Registrierung des Felssturzes an sich konnten zum einen zwei weitere kleinere Felsstürze sowie zum zweiten mehrere Bruchsignale mit Magnituden von $-0,5 \leq M_L \leq 0,4$ registriert und in dem Gebiet der Rappenlochschlucht lokalisiert werden, die bis zu fünf Stunden vor dem Felssturz stattfanden (Abb. 4).

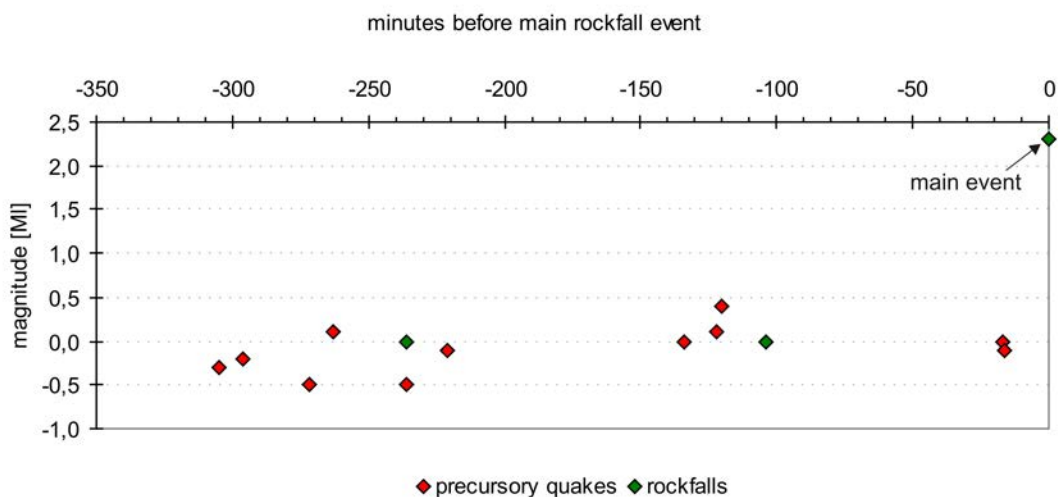


Abbildung 4: Zeitliches Auftreten der observierten Felsstürze und Bruchereignisse am 10.05.2011 in der Rappenlochschlucht in Abhängigkeit ihrer Magnituden

Die Tatsachen, dass diese Bruchereignisse in der 22-monatigen dauerhaften seismischen Überwachung des Heumöser Hanges sonst nie aufgetreten sind, ihr zeitliches Auftreten im Zusammenhang mit dem Hauptereignis zu stehen scheint und sie in der Nähe der Rappenlochschlucht lokalisiert wurden, deuten darauf hin, dass diese Bruchereignisse Vorläufer des katastrophalen Felssturzes darstellen. Mögliche Triggermechanismen, die das Felssturzereignis ausgelöst haben könnten, wurden umfassend untersucht. Dennoch konnte, ähnlich wie bei den Bruchprozessen am Heumöser Hang, ein auslösender Faktor des Felssturzes (z.B. Starkregen, Schneeschmelze, o. ä.) nicht bestimmt werden und ist derzeit unbekannt.

Hochauflösende Fernerkundung mittels UAV

Ein Problem für das Teilprojekt 5c stellt die gekürzte Mittelvergabe dar. Da sowohl die beantragte dreijährige Stelle auf eine zehnmonatige gekürzt wurde also auch benötigtes Equipment, wie die TIR Kamera, nicht bewilligt wurden, musste eine alternative Vorgehensweise und Aufgabenpriorisierung gewählt werden. So konnte in manchen Bereichen, wie der Multispektralanalyse, lediglich Machbarkeitsstudien und teilweise nur Literaturvergleiche durchgeführt werden. Dennoch konnten, dank einer zusätzlichen Finanzierung durch Institutsmittel, wertvolle Ergebnisse gewonnen werden.

Da der Heumöser Hang eine starke Vegetation aufweist und sowohl landwirtschaftlich als auch als Skihang genutzt wird, funktioniert eine automatische Bildkorrelation kaum. Außerdem sind Oberflächenstrukturen somit meist verdeckt oder anthropogenen Ursprungs.

Eigene Studien mit einer Thermalkamera zeigten, dass die räumliche Auflösung von 160 x 120 Pixel, was das derzeitige Maximum zu bezahlbaren Preisen und maximaler Zuladung für die UAVs darstellt, zu gering ist, um luftbildgestützte TIR Bilder zu generieren. Ein UAV System mit acht Motoren wurde eigens entwickelt, um eine höhere Nutzlast tragen können.

Bis vor einigen Jahren war es undenkbar, ungekühlte Wärmebildkameras im zivilen Bereich zu nutzen. Erst als die amerikanische Regierung im Jahr 1992 die Ende der 70iger Jahre entwickelte Mikrobolometer Technologie für die zivile Nutzung freigab, war es möglich, mobile und ungekühlte TIR Kameras zu entwickeln. Diese waren am Anfang recht unhandlich und schwer. Mittlerweile werden TIR Kameras mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel bei einem Gewicht von ca. 2,5 kg vertrieben. Dies ist derzeit immer noch zu schwer für die verwendeten UAV. Dennoch wird es bei dieser Entwicklung in einigen Jahren möglich sein, TIR Kameras in UAV Systemen zu verbauen, die eine ausreichende Auflösung bei geringem Gewicht mitbringen.

Weitere Probleme für die Auswertung von TIR Bildern stellt am Heumöser Hand die kontinuierliche Durchfeuchtung dar, da somit kaum Unterschiede in der Temperatur zu erkennen sind. Des Weiteren ist hier ebenfalls der Bewuchs störend, da eine Luft-TIR-Aufnahme lediglich die Temperatur der Pflanzen anzeigt, welche mit der Lufttemperatur und der Sonneneinstrahlung und nicht mit der Bodentemperatur korreliert.

Eine Zusammenstellung der Ergebnisse, der verwendeten Hard- und Software der UAVs und der Open Source Software zur Auswertung mit entsprechender Anpassung ist im Wesentlichen in Niethammer et al. (2011) zusammengestellt. Weitere Ergebnisse sind:

1. Befliegung und Erstellung eines Orthofotomosaiks in 2008 des oberen Hangbereiches.
2. Befliegung und Erstellung eines Orthofotomosaiks in 2009 des gesamten unbewaldeten Hangbereiches.
3. Aus dem Orthomosaik von 2009 wurde durch Anwendung von Global- und Nachbarschaftsoperatoren eine Bewuchsdichte bestimmt, welche Rückschlüsse auf die Bodenbeschaffenheit und die Wasservorkommen zulässt.
4. Eine Machbarkeitsstudie multispektraler Bildauswertung (TIR, NIR, VIS) wurde durchgeführt und eine grundsätzliche Eignung für das Vermessen von Bewuchsdichte und Wassergehalt festgestellt.
5. Zwei Befliegungskampagnen wurden im Abstand von ca. einem Monat mit Bildern im VIS und NIR von ausgewählten Bereichen des Heumöser Hanges an mehreren aufeinanderfolgen

Tagen durchgeführt. Daraus lassen sich mit Hilfe von Bewuchsindizes und Falschfarbbildern die Entwicklung des Bewuchs und teilweise signifikante Untergrundstrukturen ableiten.

6. Aus hohen Befliegungsbildern während einer dünnen geschlossenen Schneedecke war durch Kantenfindung eine Auskartierung der Wasserläufe möglich.

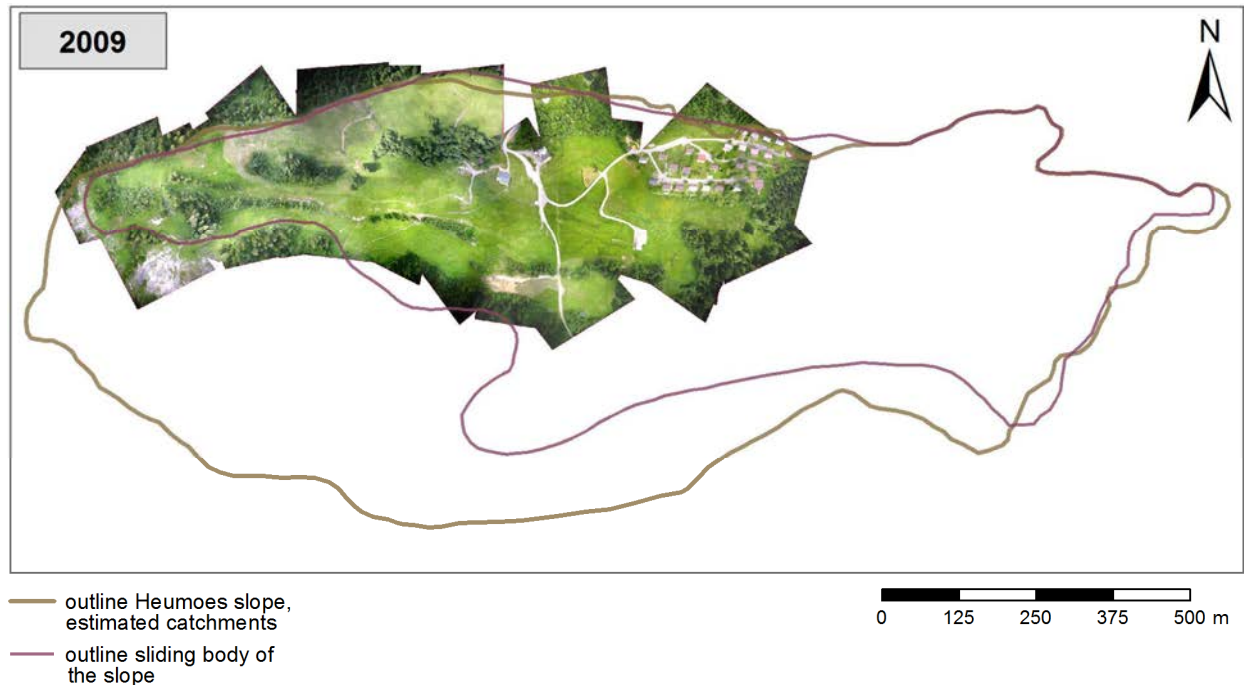


Abbildung 5: Orthofotomosaik von 2009 des gesamten unbewaldeten Hangbereiches

1.8.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Obwohl mit Hilfe von Nanoseismic Monitoring die Kriechbewegung des Heumöser Hanges, zumindest zum Teil, in diskrete Bruchereignisse aufgelöst werden konnte, sind die physikalischen Prozesse, die zu spröder Deformation von Lockergestein führen, derzeit unzureichend erforscht.

Der synoptische Vergleich der räumlichen Auftretensmuster der beobachteten Bruchprozesse am Heumöser Hang und am Schlammstrom in Super-Sauze mit denen an der Slumgullion Hangrutschung in Colorado, USA, zeigt, dass seismisch erfassbare Bruchprozesse an Lockergesteins-Hangrutschungen direkt an die jeweilige Untergrundtopographie gekoppelt zu sein scheinen (Walter et al. NSG, accepted for publication). Wir vermuten, dass an diesen ‚Barrieren‘ Prozesse stattfinden, wodurch das Hangmaterial entwässert wird und das Material spröde deformieren kann. Diese Hypothese soll in weiteren Folgeprojekten untersucht werden.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine besonders enge Abstimmung und Zusammenarbeit mit TP1a, TP1b, TP5b und TP5c stattgefunden.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Walter, M. (2012): Seismische Untersuchungen von Lockergesteins-Hangrutschungen und ihr Beitrag zum ganzheitlichen Verständnis der Hangdynamik. Dissertation am Institut für Geophysik, Universität Stuttgart, 216 S.

Diplomarbeiten:

Gassenmeier, M. (2011): Überwachung einer Hangrutschung mittels statistischer Verfahren angewendet auf kontinuierliche seismische Daten. Diplomarbeit am Institut für Geophysik, Universität Stuttgart

Blascheck, P. (2010): Entwicklung eines automatischen Ereignisdetektors und Aufbau eines Messnetzwerks zur seismischen Datenerhebung am Heumöser Hang. Institut für Geophysik, Universität Stuttgart, 132 S.

Schwaderer, U. (2010): Luftbildgestützte Kartierung von Bodenfeuchte und Bruchdynamik am Heumöser Hang. Institut für Geophysik, Universität Stuttgart, 120 S.

Winkler, C. (2010): Fernerkundliche Identifikation kriechender Sediment- und Felsrutschungen. Institut für Geophysik, Universität Stuttgart

Literaturverzeichnis

Brückl, E. & Mertl, S. (2006): Seismic Monitoring of Deep-Seated Mass Movements. *Proceedings of INTERPRAEVENT International Symposium "Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*. Universal Academy Press, Inc. / Tokyo, Japan, 571-580

Hainzl, S., Kraft, T., Wassermann, J., Igel, H., & Schmedes, E. (2006): Evidence for rainfall-triggered earthquake activity, *Geophys. J. Int.*, 33, L19303

Husen, S., Bachmann, C., & Giardini, D. (2007): Locally triggered seismicity in the central Swiss Alps following the large rainfall event of August 2005, *Geophys. J. Int.*, 171, 1126-1134

Joswig, M. (2008): Nanoseismic Monitoring fills the gap between microseismic networks and passive seismic. *First Break*. 26, 121-128

Lindenmaier, F., Zehe, E., Dittfurth, A. & Ihringer, J. (2005): Process identification at a slow-moving landslide in the Vorarlberg Alps. *Hydrological Processes*. 19, 1635-1651

Lindenmaier, F. (2008): Hydrology of a large unstable hillslope at Ebnit, Vorarlberg Identifying dominating processes and structures. Dissertation an der Universität Potsdam, 154 S

Niethammer, U., Rothmund, S., Schwaderer, U., Zeman, J. & Joswig, M. (2011): Open source image-processing tools for low cost UAV-based landslide investigations, in proc. of the international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, Vol XXXVIII-1/C22, ISSN 1682-1777, Zürich, Switzerland

- Roth, M., Dietrich, M., Blikra, L.H. & Lecomte, I. (2005): Seismic monitoring of the unstable rock slope at Åknes, Norway. NORSAR, Report for the International Centre for Geohazards
- Spillmann, T., Maurer, H., Green, A.G., Heincke, B., Willenberg, H. & Husen, S. (2007): Microseismic investigations of an unstable mountain slope in the Swiss Alps. *Journal of Geophysical Research*. 112, B07301
- Walser, M. (2008): Refraktionsseismik am Heumöser Hang. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Geophysik, Universität Stuttgart
- Walter, M., Gombert, J., Schulz, W., Bodin, P. & Joswig, M. Slidequake generation versus viscous creep at softrock-landslides: synopsis of three different scenarios at Slumgullion landslide, Heumoes slope, and Super-Sauze mudslide. *Near Surface Geophysics Special Issue on Geotechnical Assessment and Geoenvironmental Engineering*. Accepted for publication.

1.8.2 Zusammenfassung

Seismisches Monitoring von Bruchprozessen

Am Heumöser Hang konnten insgesamt 83 Bruchprozesse mit Magnituden zwischen $M_L = -2,5$ und $M_L = -0,5$ detektiert und lokalisiert werden. Dabei clustern sich die Epizentren der Bruchereignisse räumlich im mittleren Bereich des Heumöser Hanges, wo die geringsten Bewegungsraten observiert wurden. Mit Hilfe refraktionsseismischer Verfahren konnte die Geometrie der Untergrundtopographie des Heumöser Hanges ermittelt werden. Damit konnte eine signifikante Erhöhung des Festgesteins im mittleren Hangbereich nachgewiesen werden, die senkrecht zur Hauptbewegungsrichtung des Hanges orientiert ist und somit sowohl für die geringen Bewegungsraten als auch für die Häufung von Bruchprozessen in diesem Hangbereich, aufgrund erhöhter Spannungsakkumulation, ursächlich sein könnte. Neben der Untersuchung des räumlichen Auftretens observierter Bruchprozesse erlaubte die permanente seismische Überwachung des Heumöser Hanges zwischen Juli 2009 und Mai 2011 eine ausführliche Analyse möglicher Triggerfaktoren. Obwohl der Zusammenhang zwischen hydrologischen Änderungen des Hangmaterials und der Generierung von Bruchprozessen nicht statistisch belastbar observiert werden konnte, gibt es einige Indizien für ein verstärktes Auftreten von Bruchereignissen nach extremen Niederschlagsereignissen (vgl. JO 400/3-1), wohingegen Frostperioden während der Wintermonate den Hang eher zu stabilisieren scheinen. Neben rutschungsinduzierten Bruchprozessen konnten am Heumöser Hang weitere seismische Signale registriert und identifiziert werden, die im Zusammenhang mit Deformationen bzw. der Dynamik des Hanges stehen. So wurden am Heumöser Hang in den Wintermonaten Signale registriert und durch Feldexperimente identifiziert, die durch Frostsprengung generiert wurden. Aufgrund der geringen Frosteindringtiefe können diese Frostbrüche lediglich in den obersten Dezimetern des Hangkörpers entstehen und sind somit irrelevant bezüglich der gesamten Hangdynamik.

Am 10. Mai 2011 ereignete sich in der Rappenlochschlucht, in einer Entfernung von ca. 5 km zum Heumöser Hang ein Felssturz mit einem geschätzten Volumen von ca. 15.000 m^3 , der eine massive Betonbrücke auf einer Länge von ca. 30 m weggerissen hat. Durch das permanente seismische Netzwerk konnte dieses katastrophale Ereignis erfasst werden. Neben dem Hauptereignis konnten mehrere Bruchereignisse mit Magnituden zwischen $M_L = -0,5$ und $M_L = 0,5$ registriert und lokalisiert werden. Diese Bruchereignisse, die während der Dauer der permanenten seismischen Überwachung

des Heumöser Hanges ansonsten nie beobachtet wurden, traten mehrere Stunden vor dem Felssturz auf und konnten dem Felssturzereignis zugeordnet und in dessen Quellgebiet lokalisiert werden. Daher wurden diese Bruchereignisse als ‚Vorläufer‘ bzw. Spannungsabbauprozesse interpretiert, die letztlich den Felssturz generierten.

Hochauflösende Fernerkundung mittels UAV

Dank einer zusätzlichen Finanzierung durch Institutsmittel konnten trotz Kürzungen der Stellen und Mittel für das Teilprojekt 5c wertvolle Ergebnisse gewonnen werden, welche der Forschergruppe zur Verfügung gestellt wurden. Alle Ergebnisse basieren auf Aufnahmen im sichtbaren und im NIR-Lichtspektrum, da eine Integration einer TIR-Kamera in einen UAV mit hinreichender Auflösung derzeit noch nicht machbar ist. Eine (automatisierte) Auswertung der Luftbilder konnte wegen des Bewuchses, der landwirtschaftlichen und wintersportlichen Nutzung des Hanges kaum durchgeführt werden. Dennoch konnten verschiedene DEMs und ein Orthofotomosaik erstellt werden.

**Geoelektrische Strukturerkundung und
Feuchtemonitoring**

–

**Geophysikalische Untersuchungen der
Massenbewegungen am Heumöser Hang**

Teilprojekt 5b im Rahmen der Forschergruppe

**Kopplung von Strömungs- und
Deformationsprozessen zur Modellierung von
Großhangbewegungen**

Prof.Dr. Peter Dietrich

28.03.2013

1.9 Abschlussbericht TP5b

1.9.1 Allgemeine Angaben

Abschlussbericht im Rahmen der Forschergruppe 581 „Kopplung von Strömungs- und Deformationsprozessen zur Modellierung von Großhangbewegungen“

1.9.1.1 DFG Geschäftszeichen

Di 833/7-1

1.9.1.2 Antragsteller, Fachgebiet und Lehrstuhl

Prof. Dr. Peter Dietrich

Leiter des Departments Monitoring- und Erkundungstechnologien

geboren am 20. Dezember 1965, Deutscher

Department Monitoring- und Erkundungstechnologien

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Permoserstraße 15, 04318 Leipzig, Tel.: 0341-235 1253/1208, Fax: 0341-235 1837;

Peter.Dietrich@ufz.de, www.met.ufz.de/met/

Privatadresse: Geschwister-Scholl-Str. 13, 04425 Taucha, Tel.: 034298-49098

1.9.1.3 Thema des Projekts

Geophysikalische Untersuchungen der Massenbewegung am Heumöser Hang; hier nur TP5b: Geoelektrische Strukturerkundung und Feuchtemonitoring

1.9.1.4 Berichtszeitraum und Förderzeitraum

Dieser Bericht bezieht sich auf den Förderzeitraum von TP5b. Der Förderzeitraum von TP5b begann am 01.03.2009 und endete am 28.02.2012

1.9.1.5 Liste der wichtigsten Publikationen in diesem Projekt

- a) Popp,S., Altdorff,D. & Dietrich,P. (2013): Assessment of shallow subsurface characterization with non-invasive geophysical methods at the intermediate hill-slope scale. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1297-1307, doi:10.5194/hess-17-1297-2013
- Sauer,D., Popp,S., Dittfurth,A., Altdorff,D., Dietrich,P. & Paasche,H: Soil moisture assessment over an alpine hillslope with significant soil heterogeneity. Accepted for publication in Vadose Zone Journal
- b) Dietrich,P., Altdorff,D. & Popp-Hofmann,S. (2010): Application of multi-frequency electromagnetic induction for monitoring of soil-moisture dynamics at the hillslope scale. Near Surface 2010 - 16th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics 6 - 8 September 2010, Zurich, Switzerland (abstract (4 pages) and oral presentation)

- Popp-Hofmann,S., Altdorff,D., Sauer,D., Paasche,H. & Dietrich,P. (2011): Electromagnetic Induction (EM) for monitoring of soil-moisture pattern at the hill-slope scale. 1st International Workshop on Geoelectrical Monitoring - GELMON, Vienna, 30.11.–02.12.2012 (abstract and oral presentation)
- Popp-Hofmann,S., Altdorff,D., Sauer,D. & Dietrich,P. (2011): Geoelectrical exploration of subsurface structures and processes of the Alpine "Heumöser" hillslope. Geophysical Research Abstracts, Vol. 13, EGU2011-7526-1, EGU General Assembly 2011 (abstract and oral presentation)
- Popp-Hofmann,S. & Dietrich,P. (2010): Multifrequenz-Elektromagnetik zur Strukturerkundung eines rutschungsgefährdeten Hanges. 70. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Bochum, 15.-18. März 2010 (abstract and oral presentation)
- Popp-Hofmann,S., Sauer,D. & Dietrich,P. (2011): Geoelektrische Messungen zur Strukturerkundung und Prozessbeobachtung eines rutschungsgefährdeten alpinen Hanges. 71. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft in Köln, 21.-24. Februar 2011 (abstract and oral presentation).

Arbeits- und Ergebnisbericht

1.9.1.6 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Ziel des Vorhabens war die räumliche Charakterisierung des Heumöser Hanges hinsichtlich der Identifikation von Hangbereichen mit unterschiedlichen geohydrologischen Eigenschaften, das zeitliche Monitoring der Bodenfeuchtedynamik sowie die Erfassung relevanter Untergrundstrukturen. Dazu sollten elektromagnetische (EM) und gleichstromgeoelektrische Verfahren genutzt werden, da die messbaren Parameter „elektrische Leitfähigkeit/ elektrischer Widerstand“ im Lockergestein in direktem Zusammenhang mit dem Bodenwassergehalt stehen. Die Arbeiten sollten die bisherigen punktuellen geohydrologischen Untersuchungen aus der ersten Förderperiode ergänzen und erweitern sowie auf die gesamte Hangskala übertragen. Darüber hinaus sollten „Direct-Push“ (DP) Sondierverfahren zur strukturellen Erkundung, zur Parameterableitung und unterstützend für weitere geophysikalische Untersuchungen in Zusammenarbeit mit anderen TPs genutzt werden.

Entwicklung, Abweichungen und Probleme der durchgeführten Arbeiten

Nach der ersten Feldbegehung stellte sich heraus, dass die zu untersuchende Hangfläche aufgrund des sehr unebenen, z. T. auch steilen Untergrundes nicht mit einem Fahrzeug und Schlitten für schleppgeophysikalische Messungen befahrbar ist. Die Nutzung des Geländefahrzeuges wurde auch aus Sicherheitsgründen wegen des oft feucht bis nassen Untergrundes sowie aus Gründen der Landnutzung als Weideland (mit Einzäunungen) unterlassen. Alle EM-Kartierungen wurden daher zu Fuß durchgeführt. Neben der großen und schwierigen Messfläche (ca. 15 ha) stellten die Stromzäune und Tierbestände auf den Wiesen eine weitere Herausforderung dar (Abb. 1).

Vor Ort stellte sich ebenfalls heraus, dass die Straßentunnel nach Ebnit mit den UFZ eigenen LKWs aufgrund des Aufbaus nicht zu passieren sind. Mit höherem logistischem Aufwand wurde die DP-Sondiermaschine von einem lokalen Transportunternehmen auf den Hang gebracht. Auf dem Hang war es durch den feuchten Untergrund nicht möglich, höhere Hangbereiche zu erreichen (die Maschine rutschte weg, siehe Abb. 1). Die Sondiertiefen beschränkten sich durch die extreme Mantelreibung des tonreichen Hangmaterials und Gesteinsbrocken auf durchschnittlich 13 m und maximal 19 m, der Messstellenbau für Bohrlochgeophysik auf maximal 13 m. Aufgrund dieser Einschränkungen bzw. der schweren Sondierbarkeit wurde nur eine DP-Feldkampagne durchgeführt.



Abbildung 1: Transport der DP-Sondiermaschine nach Ebnit (links), rutschiger Untergrund verhindert Sondierungen in höheren Hangbereichen (Mitte) und EM-Kartierung zwischen Tieren (rechts).

1.9.1.7 Durchgeführte Arbeiten

Im Förderungszeitraum fanden insgesamt 12 mehrtägige Feldkampagnen mit insgesamt 53 Arbeitstagen am Hang statt. Den Hauptteil der Arbeiten vor Ort umfassten EM-Kartierungen und EM-Profilmessungen für Monitoring- und Erkundungszwecke. Darüber hinaus wurden Gleichstromgeoelektrikmessungen (ERI – „*electrical resistivity imaging*“) sowie einmalig eine flächenhafte Kartierung mittels Gamma-Spektroskopie und die DP-basierten Sondierungen und Erkundungsbohrungen durchgeführt. Die Methoden wurden entsprechend einem hierarchischen Untersuchungskonzept angewandt, wie im folgenden Kapitel beschrieben. Die Ergebnisse werden dabei entsprechend der Zielstellung in zwei Hauptkapiteln dargestellt, der Charakterisierung des Untergrundes und der Monitoring-Ansatz, wobei es zur wiederholten Darstellung der genutzten Methoden kommen kann.

Charakterisierung des Untergrundes – Hierarchischer Ansatz

Zur Strukturerkundung kamen alle bereits genannten Methoden zum Einsatz: EM, ERI, Gamma-Spektroskopie und DP-Sondierungen. Die Methoden wurden entsprechend ihrer Einsatzmöglichkeiten hierarchisch strukturiert eingesetzt: Die gesamte Hangfläche sowie Teilflächen wurden mit EM wiederholt und einmalig mit Gammasspektroskopie kartiert (Abb. 2). Multielektroden-Gleichstromgeoelektrik wurde zur Untergrunderkundung entlang von Profilen und DP-Sondierungen zur punktuellen Untersuchung eingesetzt. Untergeordnet wurde auch mittels EM entlang von Profilen gemessen.

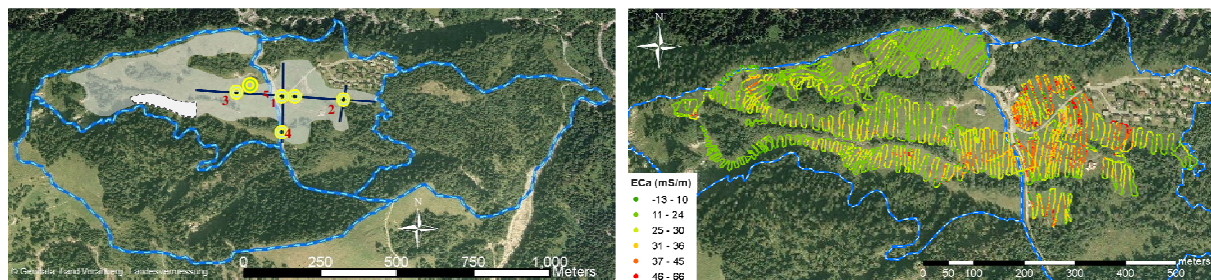


Abbildung 2: Darstellung des hierarchischen Untersuchungskonzepts (links), bei dem die gesamte Fläche (grau unterlegt) sowie Teilflächen (u. a. hellgrau mit gestrichelter Linie) mit EM und Gammasspektroskopie kartiert und Detailuntersuchungen entlang von Profilen und durch Punktmessungen (blaue Linien und gelbe Punkte) realisiert wurden. Rechts sind Rohdaten einer EM Kartierung dargestellt, gemessen durch schleifenförmiges Ablaufen der Hangfläche.

Für die EM-Messungen wurden verschiedene Geräte genutzt: EM31, EM34, EM38DD (alle Geonics), EMP-400 (im Folgenden EM-Profiler genannt, von GSSI). Allen Geräten liegt das gleiche Messprinzip zugrunde (Zweispulen-System, siehe z. B. Callegary et al. 2007), jedoch zeichnen sie sich durch unterschiedliche Spulenabstände und Messfrequenzen aus, womit unterschiedliche Erkundungstiefen und Messsensitivitäten ermöglicht werden. Die Geräte EM31 und EM34 erwiesen sich aufgrund des unhandlich großen Spulenabstandes und des Gewichts als ungeeignet für die (wiederholte) Kartierung des gesamten Hanges. Beide Geräte wurden nur für Profilmessungen bzw. für die Kartierung ausgewählter Teilflächen genutzt. Die gesamte Hangfläche wurde mit den leichteren Sensoren EM38DD und EM-Profiler untersucht. Der Profiler wurde insbesondere für das EM-Monitoring eingesetzt (siehe nächstes Kapitel). Unter Nutzung der zwei möglichen Dipolanordnungen des EM38DD und des EM31 (vertikal und horizontal, beim EM38DD gleichzeitig in einem Messvorgang, beim EM31

durch zwei Messungen mit gedrehten Spulen messbar) wurde mittels dem „*profile ratio*“ (kurz PR, Corwin et al. 2003, Cockx et al. 2007) die vertikale Heterogenität des Bodens flächenhaft aufgelöst (Abb. 3). Ein PR-Wert $\ll 1$ steht für eine höhere elektrische Leitfähigkeit tieferer Schichten relativ zu den überlagernden Schichten. Ein Wert $\gg 1$ zeigt relativ höhere Leitfähigkeiten der oberflächennahen Schichten an, und ein Wert um 1 beschreibt im vertikalen Profil relativ homogene Verhältnisse der elektrischen Leitfähigkeiten. Die erfassten Tiefen hängen dabei von den Geräteeigenschaften und den damit verbundenen Sensitivitäten ab: Eine horizontale Dipolanordnung erfasst generell die oberflächennahen Schichten, die Erkundungstiefe liegt beim EM38 bei bis zu 0,75 m, beim EM31 bei bis zu 3,00 m. Der vertikale Dipol ermöglicht größere Erkundungstiefen, die beim EM38 bei bis zu 1,50 m und beim EM31 bei bis zu 6,00 m liegen.

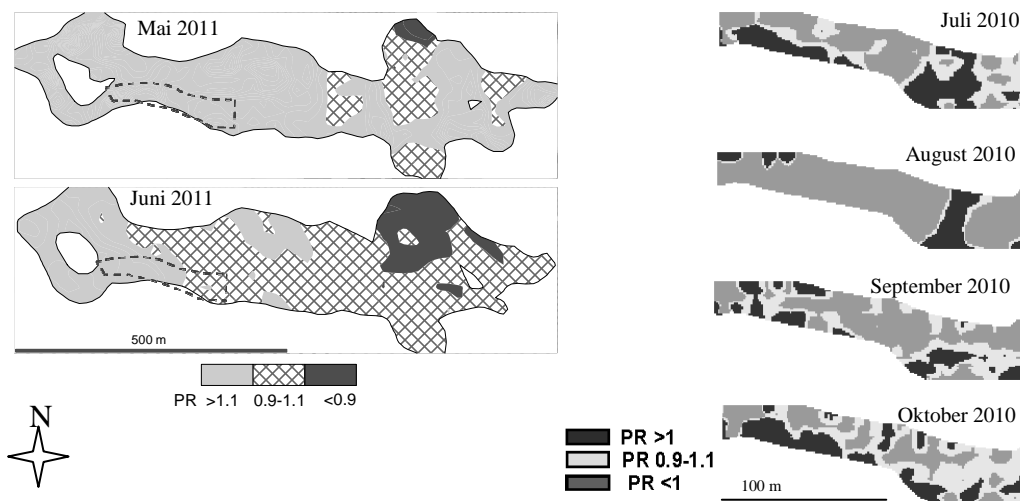


Abbildung 3: Vertikale Heterogenität des oberflächennahen Untergrundes, dargestellt als „*profile ratio*“ (PR) über die gesamte Hangfläche (links), gemessen mit dem EM38DD (aus Popp et al. 2013), und einer Teilfläche (rechts), gemessen mit dem EM31. Die Lage der Teilfläche ist durch die gestrichelte Linie in den rechten Karten bzw. in Abb. 2 angezeigt.

Anhand der EM-Messwerte (interpolierte elektrische Leitfähigkeiten, siehe nächstes Kapitel) und den PR-Werten kann nicht eindeutig auf Untergrundstrukturen geschlossen werden. Wie in Abbildung 3 deutlich wird, ist die Heterogenität des Untergrundes, angezeigt durch Änderungen in den elektrischen Leitfähigkeiten der Böden und dem davon abgeleiteten PR-Wert, nicht nur räumlich signifikant, sondern auch zeitlich sehr variabel. Punktuelle EM-Untersuchungen und Bodenanalysen ergaben keine eindeutige Beziehung von EM-(und Gamma-)Werten mit bestimmten Bodenparametern. Popp et al. (2013) haben Korrelationskoeffizienten von 0,16 und 0,39 für die Beziehung zwischen dem gravimetrischen Wassergehalt und dem horizontalen und vertikalen Dipol des EM38DD und von 0,50 für die Beziehung zwischen Gammasignal und gravimetrischen Wassergehalt ermittelt. Während einer Hangkartierung mit dem EM-Profilier wurden ebenfalls Bodenproben genommen und zusätzlich granulometrisch analysiert. Im Ergebnis wurde deutlich, dass auch keine signifikanten Abhängigkeiten des EM-Signals zu den einzelnen Kornfraktionen Ton, Silt und Sand besteht (Abb. 4). Das EM-Signal am Heumöser Hang ist daher als Mischsignal zu bewerten, beeinflusst von verschiedenen Bodenparametern.

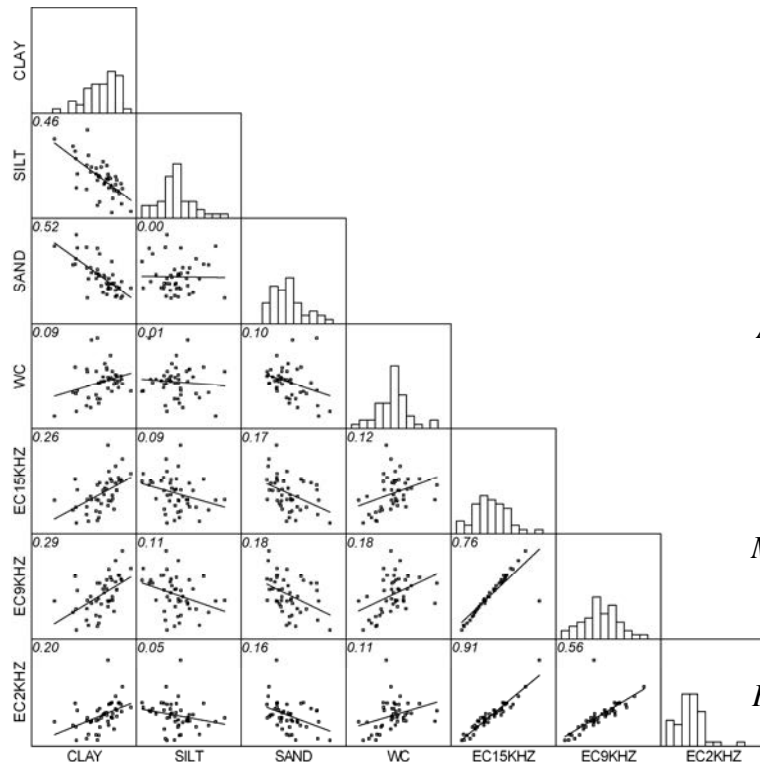


Abbildung 4: Korrelationsmatrix von Bodenparametern (Kornfraktionen Ton, Silt, Sand sowie gravimetrischer Wassergehalt („WC-water content“) und punktuellen EM-Messungen (EM-Profiler mit drei verschiedenen Frequenzen im vertikalen Dipol) an 52 Punkten am Hang. Angegeben sind die Korrelationskoeffizienten und die Histogramm-Verteilung.

Aufgrund der Mehrdeutigkeit der EM-, aber auch der Gamma-Messungen wurde eine statistische Analyse (Clusteranalyse) der flächenhaften Daten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Popp et al. (2013) veröffentlicht und zeigen eine plausible Strukturierung der Hangfläche, welche relativ ähnlich und vergleichbar ist mit einer früheren Unterteilung der Hangfläche, die auf einer vegetations- und bodenkundlichen Kartierung basierte (siehe Abb. 7 in Popp et al. 2013).

Zur detaillierteren Strukturierung haben wir entlang von Profilen (siehe Abb. 2) Multielektroden-Gleichstromgeoelektrik sowie punktuelle DP-Sondierungen, hauptsächlich EC-Logs (vertikale Profile der elektrischen Leitfähigkeit) durchgeführt. Die Lage der Profile entspricht denen der seismischen Erkundungen von TP1. Die DP-Sondierungen wurden in erster Linie an den Kreuzungspunkten der Profile abgeteuft. Die Inversion der geoelektrischen Daten, gemessen in Wenner Konfiguration mit Elektrodenabständen von 3 bis 5 Metern erfolgte mit dem Programm *DC2DInvRes*. Im Längsprofil (W-O-Richtung) wurde dabei die in der Seismik gefundene Grundgebirgsaufwölbung abgebildet (Abb. 5). Dieser Befund wurde mit einer DP-Sondierung bestätigt, welche nur bis zu einer Tiefe von ca. 7,50 m abgeteuft werden konnte, was der Tiefenlage der Grundgesteinsaufwölbung basierend auf der seismischen Interpretation entsprach. Während also die tiefen, hochohmigen Bereiche im Längsprofil als anstehendes Grundgestein interpretiert werden können, ist diese Zuordnung bei den Querprofilen nicht eindeutig möglich, wie am Beispiel des Querprofils 2 gezeigt (Abb. 5). Hochohmige Bereiche des Querprofils 2 fallen mit einer in der Seismik gefundenen Beckenstruktur mit Sedimenten zusammen. Grundsätzlich müssen die ERI-Ergebnisse vor dem Hintergrund der Mehrdeutigkeit der Methode sowie der starken Heterogenität der Hangsedimente mit zum Teil wechselhaften und gegenteiligen Einflüssen auf geoelektrische Messung betrachtet werden. Um die Mehrdeutigkeiten in der Strukturanalyse noch zu verringern, ist eine gemeinsame Datenanalyse („*joint inversion*“) mit den seismischen Befunden geplant.

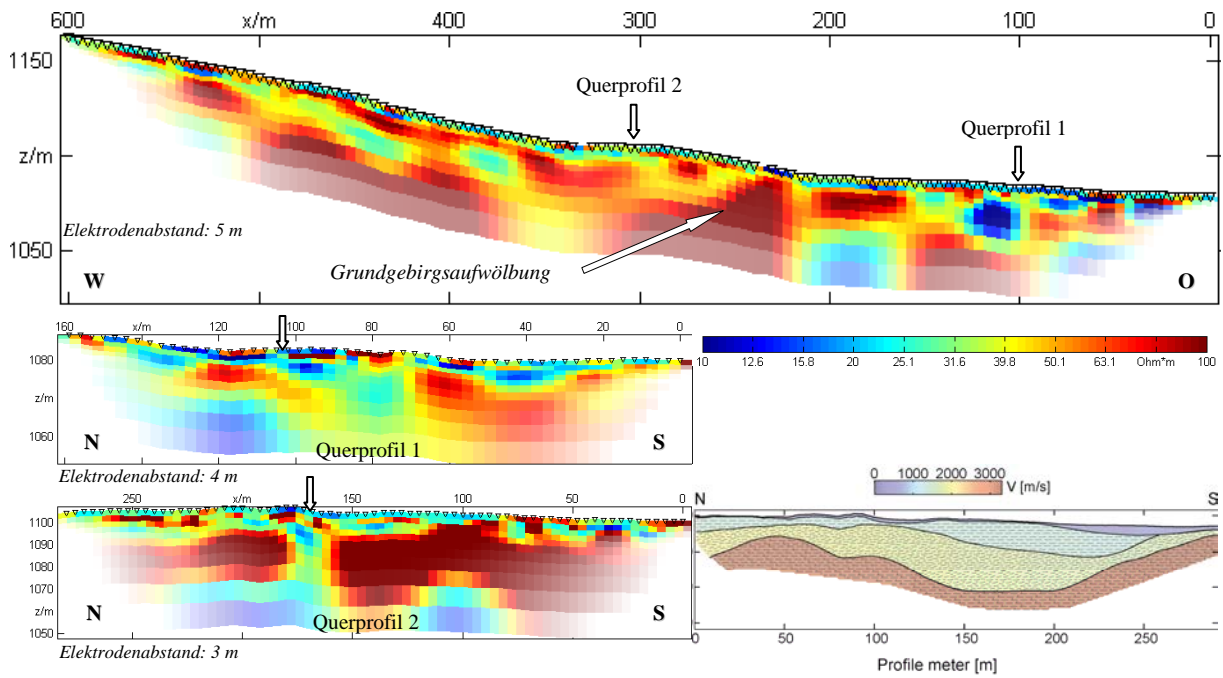


Abbildung 5: Invertierte ERI-Messungen (Wenner) entlang des Längs- und zweier Querprofile (Lage der Profile siehe Abb. 2). Im Gegensatz zum Längsprofil zeigen hochohmige Bereiche nicht zwangsläufig das Grundgestein an, wie im Vergleich Querprofil 2 und Seismik (von Urs Böniger, TP1) gezeigt. Die Pfeile in den N-S gerichteten Querprofilen zeigen den Schnittpunkt mit dem Längsprofil an.

EC-Logs wurden hauptsächlich an den Kreuzungspunkten der ERI- und Seismikprofile sowie zur Vorerkundung beim Messstellenbau für die seismischen Bohrlochmessungen durchgeführt. EC-Logs werden allgemein für eine relative Charakterisierung der Schichtenabfolge genutzt (niedrige EC-Werte: sandig/trocken, hohe EC-Werte: tonig/feucht, siehe z. B. Schulmeister et al. 2003). Die EC-Logs vom Hang zeigen eine zum Teil diffuse Variabilität, welche den Charakter der heterogenen und ungeschichteten Hangschutt-Sediment widerspiegelt (Abb. 6).

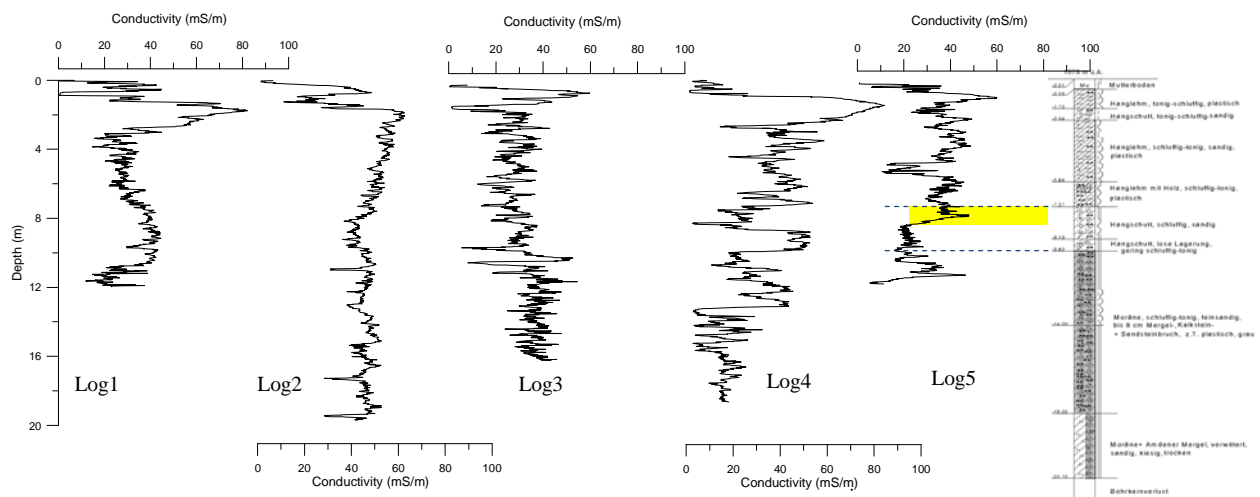


Abbildung 6: Ausgewählte EC-Logs vom Hang (Lage der Punkte siehe Abb. 2) zeigen eine diffuse Variabilität. Log5 wurde ca. 2 m neben der Kernbohrung KB3 (siehe Lindenmaier et al. 2005) abgeteuft. Die gestrichelten Linien zeigen gefundene Schichtgrenzen im Sedimentkern nach, die nicht

eindeutig im EC-Log erkennbar sind. Gelb markiert ist der Abscherbereich, in dem mit Inklinometermessungen eine Bewegung der Hangsedimente nachweisbar war (Lindenmaier et al. 2005).

Mit dem EC-Log neben der Kernbohrung KB3 (Log5 in Abb. 6) wurde gezeigt, dass aufgrund der undifferenzierten Eigenschaften der Sedimente (relativ tonreiches und feuchtes Material) kaum zwischen Hangschutt und Moränenmaterial unterschieden werden kann. Im Bereich der Abscherbewegung (gelb markiert in Abb. 6) sinkt zwar die elektrische Leitfähigkeit um ca. 20 mS/m, jedoch sind solche Variationen allen EC-Logs in verschiedenen Tiefen vorhanden und können ohne Zusatzinformationen nicht als Bewegungshorizont oder stratigrafische Grenze bewertet werden.

An den Sondierungspunkten Log1, Log2 und Log3 wurden zusätzlich Sedimentkerne genommen. Von ausgewählten Proben aus verschiedenen Tiefen wurden Körnungsanalysen zur Ableitung der hydraulischen Leitfähigkeit k durchgeführt (Abb. 7).

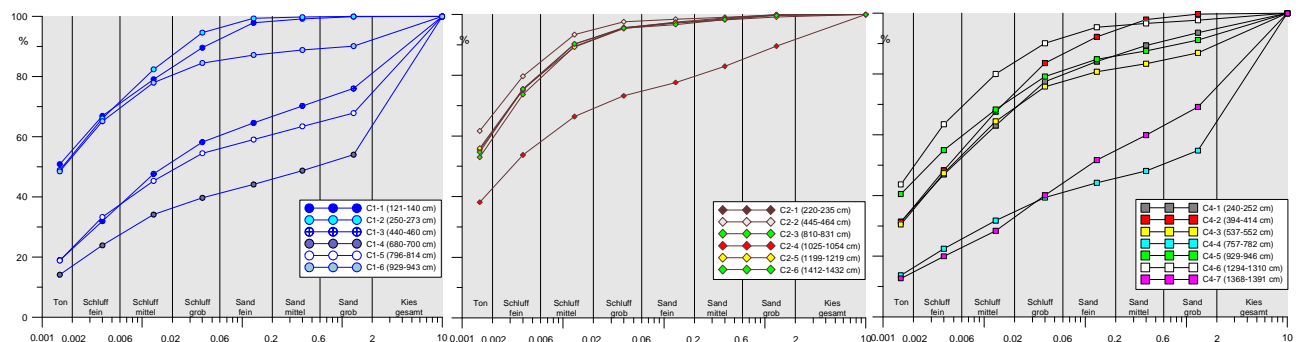


Abbildung 7: Kornsummenkurven von Proben aus unterschiedlichen Tiefen von 3 Sedimentkernen.

Der Feinkornanteil aller Proben ist sehr hoch, die Tongehalte liegen in allen Tiefenbereichen bei über 10%. Zur Berechnung der Durchlässigkeit wurden die Formeln von USBR ($k=0,0036 \times d_{20}^{2,3}$) und Seelheim ($k=0,00357 \times d_{50}^2$) genutzt (siehe Vienken et al. 2011). Aufgrund der hohen Feinkornanteile liegen die k -Werte der beprobten Sedimente hauptsächlich bei 10^{-8} bis 10^{-9} m/s, vereinzelt bei 10^{-5} bis 10^{-6} m/s.

Monitoring

Das EM basierte Monitoring wurde mit dem EM-Profiler durchgeführt, welcher Messungen mit bis zu drei Frequenzen gleichzeitig ermöglicht, womit unterschiedliche Auflösungen von Leitfähigkeitsanomalien des Untergrundes erreicht werden sollten. Wie in Abbildung 2 gezeigt, wurde das flächenhafte Monitoring durch wiederholtes, schleifenförmiges Ablaufen der Hangflächen bewerkstelligt. Der Profiler (und jeder andere genutzte EM-Sensor) wurde vor Beginn der Messungen gemäß den Herstellerangaben kalibriert. Für das EM-Monitoring war es wichtig, dass die Kalibrierung immer am gleichen Punkt am Hang unter möglichst gleichartigen Bedingungen durchgeführt wurde, um die Vergleichbarkeit von gemessenen Daten zu gewährleisten. Für die Qualitätskontrolle wurde ein definiertes Referenzprofil wiederholt vor, während und nach einer Kartierung eingemessen.

Die allgemeine Datenaufbereitung umfasst folgende Schritte, die in gleicher Weise auf alle Datensätze angewandt worden sind: Die Rohdaten der flächenhaften Kartierungen wurden im ersten Schritt auf Ausreißer geprüft, welche auf externe Einwirkungen (z. B. Stromzäune, metallische Objekte) zurück zu führen sind. Werte größer/kleiner 500 mS/m, welche weit außerhalb der natürlichen elektrischen

Leitfähigkeiten der Böden vor Ort liegen, wurden herausgefiltert. Von diesem begrenzten Datensatz wurde weiterhin nur der statistisch sichere Datenbereich genutzt, welcher innerhalb der 3-fachen Standardabweichung liegt. Anschließend wurde noch eine Temperaturkorrektur mit den am Hang gemessenen Bodentemperaturen vorgenommen. Die so bereinigten Rohdaten wurden für die Variogramm-Analyse genutzt und mittels „ordinary-block-kriging“ auf ein einheitliches Punktraster von 10x10 m interpoliert und für jede Messkampagne dargestellt (Abb. 8). Die Referenzprofile des EM-Profilers sind in Abbildung 9 dargestellt.

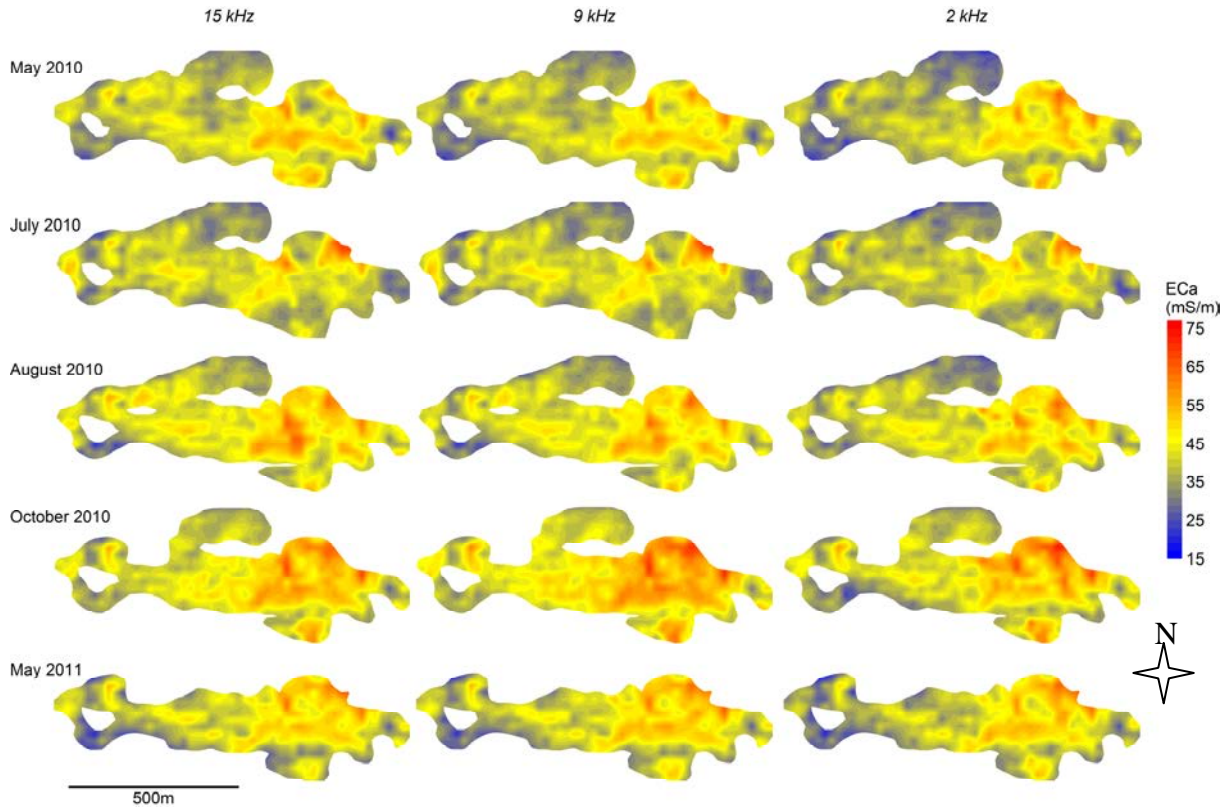


Abbildung 8: Interpolierte elektrische Leitfähigkeiten (in mS/m) der einzelnen Messkampagnen. In den drei Kolumnen sind die Ergebnisse der einzelnen Frequenzen dargestellt.

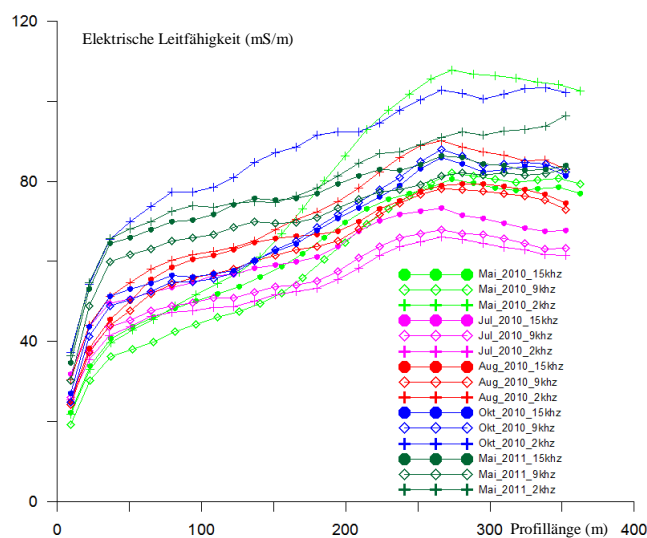


Abbildung 9: EM-Messungen entlang des Referenzprofils. Linien gleicher Farbe kennzeichnen jeweils eine Messung mit den drei Frequenzen (unterschiedliche Symbole). Pro Messkampagne ist exemplarisch nur eine Messung dargestellt.

In Abbildung 8 ist ersichtlich, dass die Variationen der elektrischen Leitfähigkeit im oberflächennahen Bereich ($\ll 2$ m) am Hang über die Zeit relativ gering sind, und die räumlichen Unterschiede über die ca. 15 Hektar große Messfläche deutlich größer sind. Die höchsten Leitfähigkeiten wurden im flachen östlichen und mittleren Teil des Hanges gemessen, wo relativ weiche mineralische und organische Böden anstehen. Die geringsten elektrischen Leitfähigkeiten wurden im westlichen Teil des Hanges gemessen,

wo eher geringmächtige und trockenere Böden dominieren und in steilen Bereichen sogar das Festgestein an der Oberfläche ausstreicht. Ungeachtet dieser allgemeinen Standortcharakteristik lässt sich im Detail keine Abhängigkeit der EM-Messungen von einem einzelnen Bodenparameter am Heumöser feststellen, wie durch punktuelle Analysen untersucht (vgl. Abb. 4). Die Messwerte aller Frequenzen sind nur sehr schwach mit, z. B. dem Ton- und Wassergehalt korreliert. Auffällig ist jedoch die gute Korrelation der einzelnen Frequenzen zueinander, was auch bei den Ergebnissen des Referenzprofils deutlich wird (vgl. Abb. 8). Das bedeutet, dass die genutzten Frequenzen 2, 9 und 15 kHz zumindest an diesem Standort ähnliche Sensitivitäten haben und somit keine tiefenorientierten Messungen möglich sind. Die auf der Hang-Skala auftretenden, geringfügigen Unterschiede in den frequenzabhängig gemessenen elektrischen Leitfähigkeiten sind sehr gering und statistisch nicht signifikant. Die im Projekt gesammelten Erfahrungen zur Vergleichbarkeit wiederholter EM-Messungen sowie der Qualitätskontrolle flossen zum Teil in ein Papier des Europäischen Komitees für Normung hinsichtlich der Anwendung von elektromagnetischen Methoden im oberflächennahen Bereich ein (CEN 2011).

Über den Messzeitraum konnten Variationen in der elektrischen Leitfähigkeit des Untergrundes beobachtet werden, sowohl über die Fläche (Abb. 8) als auch bei Punkt- oder Profilmessungen (Abb. 9). Die Profilmessungen dienen als Qualitätsmaßnahme und zeigen über die Zeit qualitativ vergleichbare Messergebnisse (gezeigt ist eine Auswahl, pro Messkampagne wurde jeweils eine Vielzahl von Profilmessungen durchgeführt). Der Verlauf bzw. das Profil der in Abbildung 9 dargestellten Messungen sind vergleichbar, die Unterschiede liegen in den absoluten Werten und den Amplituden, welche durch die allgemeinen Messbedingungen in den unterschiedlichen Jahreszeiten verursacht worden sind. Die Kalibrierung des EM-Sensors vor Ort „fängt“ diese Unterschiede ein und kalibriert das Messgerät entsprechend der vorherrschenden Standortbedingungen. Aus diesem Grund können Variationen über die Zeit nur relativ und nicht in absoluten ECa-Werten bestimmt werden. Ein einfaches Maß für die relative Variabilität ist die Standardabweichung, welche über den Messzeitraum Hangbereiche mit unterschiedlicher Dynamik in der elektrischen Leitfähigkeit abgrenzt (Abb. 10).

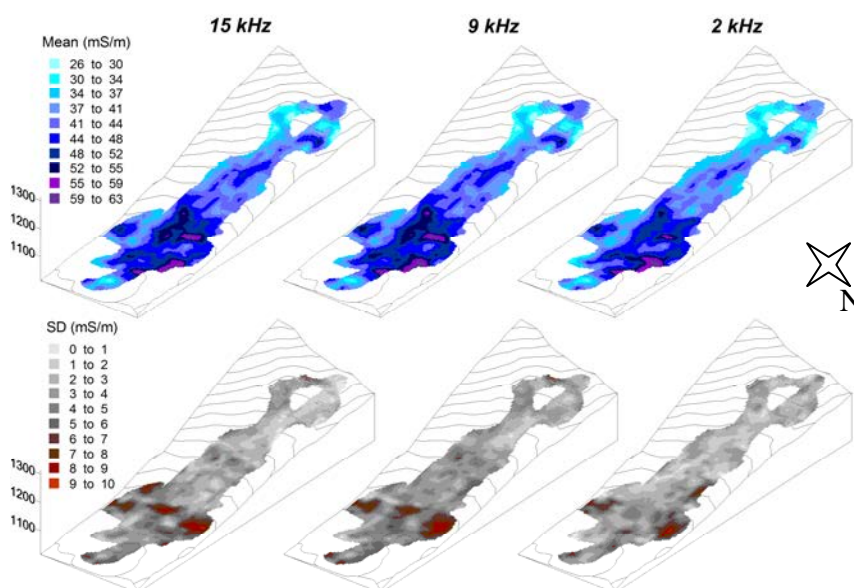


Abbildung 10: Mittelwerte (mean) und Standardabweichung (SD) aller in Abb. 8 dargestellten Monitoringmessungen als Maß für die relative Variabilität der elektrischen Leitfähigkeiten.

In Abbildung 10 wird deutlich, dass eine signifikante Variabilität der elektrischen Leitfähigkeit des oberflächennahen Untergrundes auf wenige Bereiche des Hanges beschränkt ist. Es handelt sich dabei um die Wiesenflächen entlang der N-S-verlaufenden Straße bei dem Gasthaus „Heumöser Stühle“. Obwohl keine direkte Korrelation der EM-Messungen zu den Bodenparametern existiert, kann man annehmen, dass die zeitlichen Variationen in der elektrischen Leitfähigkeit Änderungen in der Bodenfeuchte widerspiegeln, sofern Störeinflüsse negiert und unterschiedliche Bodentemperaturen bei den einzelnen Messungen berücksichtigt sind. Unter der Annahme, dass die Bodenstruktur (inklusive Porenraum), der Tongehalt, der Nährstoffgehalt des Bodens über die Beobachtungszeit annähernd gleich bleiben, sind die einzigen Änderungen eines Parameters über die Zeit der Wassergehalt, welcher die elektrische Leitfähigkeit direkt beeinflusst. Die Flächen der größten Variabilität der elektrischen Leitfähigkeiten können also als Bereiche der größten Schwankungen im Bodenwassergehalt interpretiert werden. Diese Annahme deckt sich mit den Beobachtungen im Gelände (feuchte Wiesen, die je nach Wetter Staunässe zeigen) und der abgeleiteten Hangstrukturierung sowie der ökologischen Feuchtekarte.

Gleichstromgeoelektrik

Mithilfe der kompakten 4-Punkt-light Lippmann und dazu gehöriger Messkette mit jeweils 16 aktiven Elektroden wurde ein Monitoring am Hang durchgeführt. Nach Testmessungen auf dem Gelände des UFZs und ersten kurzzeitigen Monitoring-Messungen am Hang wurde eine kreuzförmige Auslage, bestehend aus zwei Messketten in Schlumberger-Konfiguration neben der Wetterstation auf dem Heumöser Hang installiert. Der Standort wurde ausgewählt, weil die Wetterstation Schutz vor Beschädigungen durch Weidetiere, die direkte Zuordnung von Wetterdaten auf Messzeitreihen sowie eine einfache Datenanalyse bot (keine Topographiekorrektur durch relativ ebenes Gelände). Die Elektroden wurden in logarithmischer Aufstellung kreuzförmig in der Erde vergraben, wobei eine Auslage hangparallel, die zweite hangabwärts gerichtet angeordnet wurde (Abb. 11).

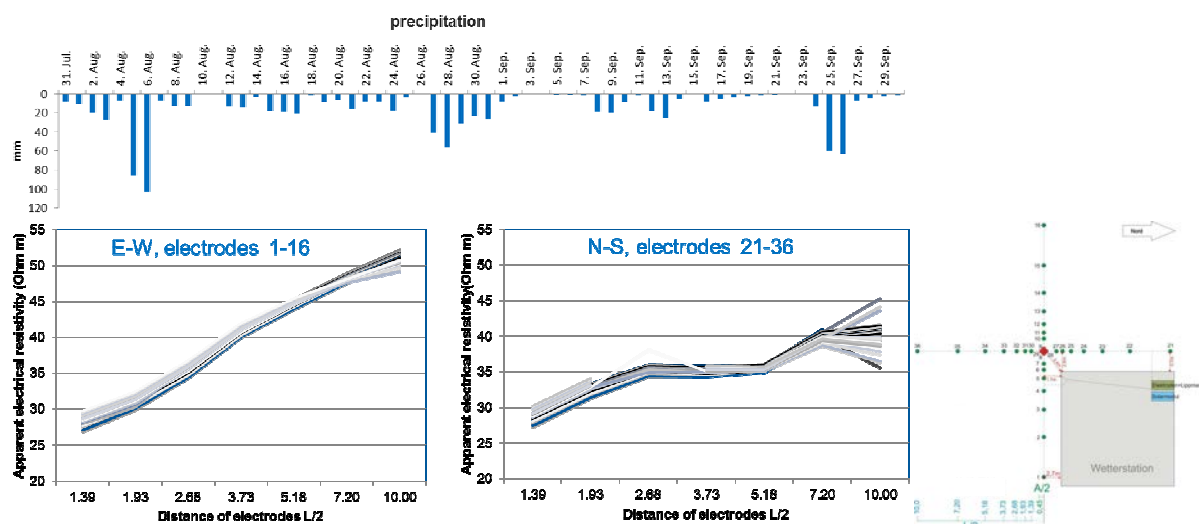


Abbildung 11: Sondierungskurven über den ersten Messzeitraum der Monitoringmessungen. Zwei Elektrodenketten wurden kreuzförmig neben der Wetterstation installiert (kleines Bild rechts). Die Ergebnisse sind für beide Auslagen dargestellt und zeigen kaum Änderungen im elektrischen Widerstand über die Zeit. Über den Sondierungskurven sind die Regenmessungen dargestellt.

Messergebnisse von zwei Monaten sind als Sondierungskurven für beide Aufstellungen dargestellt, gemessen über dem gemeinsamen Mittelpunkt. Der Übersicht wegen ist nur eine Messung pro Tag dargestellt; gemessen wurde jedoch halbstündlich bzw. stündlich. Die Sondierungskurven für beide Aufstellungen zeigen einen etwas unterschiedlichen Verlauf, was auf strukturelle Unterschiede im Untergrund im Bereich der hangparallelen und hangabwärts gerichteten Auslage hinweist. Bei der hangparallelen Auslage (N-S Ausrichtung) kam es im Bereich der mittleren und maximalen Elektrodenabstände ($L/2$: 2,68 m und 10,00 m) zu fehlerhaften Messungen, möglicherweise durch periodisch hangabwärts fließendes Wasser und Ausspülungen direkt an den Elektroden. Extreme Ausreißer wurden herausgeschnitten. In den Kurven beider Aufstellungen ist nur eine geringe Variation des elektrischen Widerstandes zu erkennen, obwohl Regenereignisse im Messzeitraum auftraten. Die geringe Änderung im elektrischen Widerstand des Systems Boden auf Wassereintrag ist im Detail für drei Elektrodenaufstellungen ($L/2 = 1,39$ m, 3,37 m, 10,00 m) in Abb. 12 dargestellt. Obwohl die größten Schwankungen in der $L/2 = 1,39$ m Aufstellung (=geringste Messtiefe, blaue Kurve) am größten sind, ist weder in dieser noch in den anderen Aufstellungen die erwartete Reaktion zum Wassereintrag, was allgemein einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit/Abnahme des elektrischen Widerstandes von Böden und Sedimenten entspricht, zu erkennen.

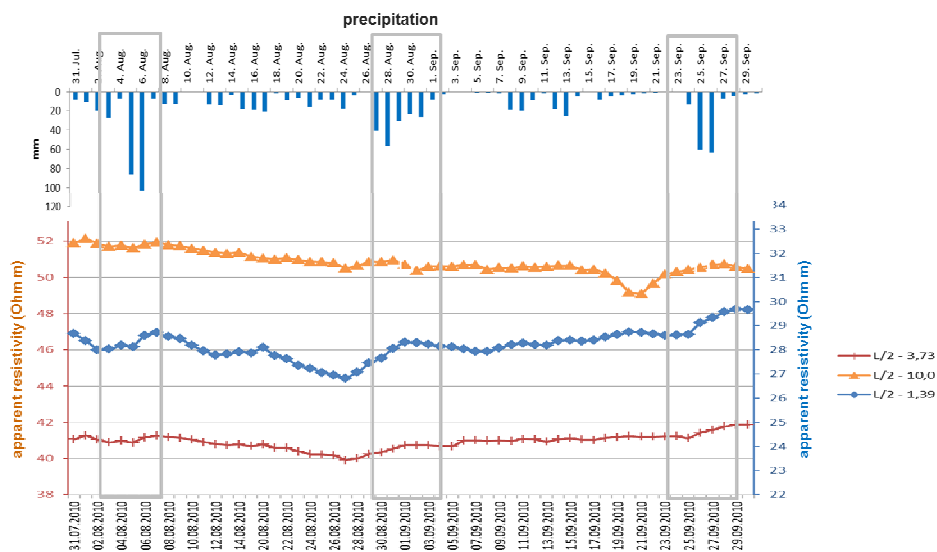


Abbildung 12: Zeitreihen von drei Elektrodenkonfigurationen der hangabwärts gerichteten Auslage ($L/2 = 1,39$ m, 3,73 m und 10,00 m, was einer minimalen, mittleren und maximalen Erkundungstiefe entspricht) und die Reaktion des gemessenen elektrischen Widerstandes im Vergleich mit Regenereignissen.

Wie schon Lindenmaier et al. (2005) konstatierten, ist der Hanguntergrund beinahe ganzjährig feucht und zum Teil wassergesättigt. Schwankungen in der Bodenfeuchte treten den Autoren zufolge nur im sehr oberflächennahen Boden auf, welche mit 10% Variabilität zudem sehr gering sind. Das erklärt die geringen Variationen im geoelektrischen Monitoring. Im weiteren Verlauf des Monitorings kam es immer öfter zu fehlerhaften Messungen, dessen Ursachen nicht vollständig geklärt werden konnten. Daher wurde für die Zeit der Schneeschmelze vom Februar bis April eine zusätzliche Messkette mit gesteckten Elektroden in der Nähe der Wetterstation installiert. Die Ergebnisse, hier nicht dargestellt,

sind ähnlich denen in Abbildungen 11 und 12: Die Änderung des elektrischen Widerstandes vom Beginn der Messungen im Februar mit mindestens 0,5 m Schneehöhe und komplett geschmolzenen Schnee im April war relativ geringfügig und betrug maximal fünf Ohmmeter, was unerwartet gering war. Das punktuelle Gleichstromgeoelektrik-Monitoring erwies sich am Hang als nicht sehr wirkungsvoll.

1.9.1.8 Weiteres

Mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen

Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Erkundungsstrategie mit geoelektrischen Verfahrenen kann ohne weiteres für ähnliche Fragestellungen auf nahezu allen Flächen angewendet werden, wo geohydrologische Prozesse signifikant für das Gesamtsystem sind, jedoch aufgrund der Geländegröße nur in Teilen erfasst werden können. Das betrifft sowohl natürliche Systeme (Hangrutschungen, Agrarflächen), als auch z.B. die Standsicherheitsproblematik von Tagebaukippen. Das Problem der Mehrdeutigkeit unter den gegebenen Umständen am Hang sollte für Folgeuntersuchungen differenzierter betrachtet werden. Zwei Lösungsansätze kristallisierten sich während der Arbeit am Heumöser heraus. Besteht aufgrund der Untergrundsituation die Möglichkeit der Anwendung weiterer (geophysikalischer) Messmethoden, kann der Ansatz weiter verfolgt werden, die Ergebnisse zu kalibrieren und in den "Zielparameter" zu übersetzen. Ist das aufgrund der Bedingungen, wie sie am Heumöser anzutreffen waren (signifikante vertikale und laterale Heterogenität der Böden, keine eindeutige Korrelation des Messwertes zum "Zielparameter" im Boden), nicht möglich, können die Ergebnisse ohne geophysikalische Verknüpfung als rein qualitative Variable in hydrologischen Modellen genutzt werden. Auf dem von der Forschergruppe durchgeführten Abschlussworkshop wurde dies von eingeladenen und renommierten Experten angeregt, konnte aber im Rahmen des Projektes nicht mehr aufgegriffen werden.

Wirtschaftliche Verwertbarkeit der Ergebnisse

Dies ist nicht geplant.

Kooperationspartner

Im Rahmen der Forschergruppe hat eine besonders enge Abstimmung mit TP1a, TP1b, TP5a und TP5c stattgefunden. Neben dem Projektmitarbeiter Herrn Dr. Steffen Popp-Hofmann hat Herr Dipl. Geol. Daniel Altdorff (finanziert aus anderen Mitteln des Departments MET des UFZs) intensiv am Projekt mitgearbeitet.

Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses

Doktorarbeiten:

Keine ausschließlich zum Projekt, da der Projektbearbeiter bereits promoviert war. Der Standort wurde jedoch als ein Fallbeispiel zur Standortcharakterisierung innerhalb einer Dissertation genutzt:

Altdorff,D.(2012): Combination of hydro-geophysical methods for delineation of characteristic structures in subsoil. Universität Basel, 100 S.

Diplomarbeiten:

Sauer,D. (2011): Räumliche und zeitliche Erfassung der relativen Durchfeuchtung einer alpinen Großhangrutschung mit geoelektrischen Verfahren. Universität Potsdam, 79 S.

Literaturverzeichnis

Callegary,J.B., Ferre,T.P.A. & Groom, R.W. (2007): Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments. *Vadose Zone J* 6(1): 158-167

CEN – European Committee for Standardization (2011): Best practice approach for electromagnetic induction (EMI) measurements of the near surface. CEN workshop agreement, CWA 16373

Cockx,L., Van Meirvenne,M. & De Vos,B. (2007): Using the EM38DD Soil sensor to delineate clay lenses in a sandy forest soil, *Soil Sci Soc Am J*, 71(4), 1314-1322

Corwin,D.L., Kaffka,S.R., Hopmans,J.W., Mori,Y., van Groenigen,J.W., van Kessel,C., Lesch,S.M.& Oster,J.D. (2003): Assessment and field-scale mapping of soil quality properties of a saline sodic soil, *Geoderma*, 114, 231–259

Lindenmaier,F., Zehe,E., Dittfurth,A.& Ihringer,J.(2005): Process identification at a slow-moving landslide in the Vorarlberg Alps, *Hydrological Processes*, 19(8), 1635-1651

Schulmeister,M.K., Butler Jr,J.J., Healey,M., Zheng,L., Wysocki,D.A. & McCall,G.W. (2003): Direct-Push Electrical Conductivity Logging for High-Resolution Hydrostratigraphic Characterization. *Ground Water Monitoring & Remediation* 23(3): 52-62

Vienken,T. & Dietrich,P. (2011): Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data. *Journal of Hydrology* 400, 58–71

1.9.2 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden Struktur- und Prozessuntersuchungen auf verschiedenen Skalen auf der Hangfläche mit vorwiegend geophysikalischen Methoden durchgeführt. Die Anwendung der Methoden und Untersuchungen erfolgte dabei entsprechend eines hierarchischen Ansatzes. Für die groß- bis kleinräumigen (flächenhaft- bis punktuellen) Untersuchungen wurden geoelektrische Methoden eingesetzt, die unter den gegebenen Standortbedingungen unterschiedliche Ergebnisse erzielten. Eine große Schwierigkeit bei der Anwendung und Analyse geoelektrischer Messungen an diesem Standort war die Mehrdeutigkeit der Ergebnisse, welche aus den sehr inhomogenen Untergrundbedingungen mit relativ hohen und stark variierenden Ton- und Bodenwassergehalten resultierten. Messungen über die gesamte Hangfläche, bzw. Teilflächen erzielten gute Ergebnisse, da auf dieser Skala die Variabilität (oder Kontrast) des gemessenen physikalischen Parameters (elektrische Leitfähigkeit, elektrischer Widerstand, Gammastrahlung) deutlich größer war als Schwankungen infolge von Messungenauigkeiten sowie variierender Sensitivitäten des EM-Systems (und Gamma-Spektroskopie) durch kleinräumige Inhomogenitäten des Untergrundes innerhalb des Erkundungsbereichs („sample volume“). Die flächenhaften Daten ermöglichten damit eine objektive Betrachtung der gesamten untersuchten Hangfläche auf Basis gemessener physikalischer Größen.

Aufgrund der angesprochenen Mehrdeutigkeit und der insgesamt schwachen Korrelationen zwischen EM-Signalen und verschiedenen Bodenparametern, welche zusätzlich aufgrund des sehr unterschiedlichen „sample volume“ von Bodenprobe und integralem EM-Signal eher als Annäherung betrachtet werden sollten, konnten die Ergebnisse nur qualitativ über eine Clusteranalyse bzw. über die Betrachtung relativer Änderungen ausgewertet werden. Letzterer Ansatz zeigte nur geringe Schwankungen in den flächenhaften elektrischen Leitfähigkeiten, was unter Berücksichtigung der beeinflussenden Faktoren auf eine nur geringe räumliche und zeitliche Variabilität der Bodenfeuchte hinweist. Die größten Schwankungen wurden in den flacheren Bereichen entlang der Nord-Süd-verlaufenden Straße ermittelt.

Schwieriger ist die Bewertung der punktuellen Messungen am Heumöser. Sowohl das Gleichstrom-geoelektrik-Monitoring als auch die punktuellen DP-EC-logs und die gewonnenen Sedimentkerne lassen keine eindeutigen Schlussfolgerungen für strukturelle Analysen und Prozessbewertungen zu. Die Eigenschaften des Hangmaterials sind zu undifferenziert und die Parameterbeziehungen, wie sie für die EM-Messungen untersucht wurden, sind zu ungenau bzw. mehrdeutig. Eine Auswertung der Gleichstromgeoelektrik-Messungen entlang der Profile ist zum Teil möglich, wenn die Ergebnisse mit anderen Befunden verifiziert werden können, wie am Beispiel des W-O-gerichteten Längsprofils. Generell sind die Gleichstromgeoelektrik-Profilmessungen auch von der Mehrdeutigkeit betroffen, welche an diesem Standort durch die schwierigen Untergrundverhältnisse mit relativ geringen Kontrasten verstärkt wird. Hier besteht für den Standort generell noch weiterer Forschungsbedarf, um z. B. die geoelektrischen Messsysteme auf den komplexen Untergrund zu optimieren (Sensitivitätsstudien, Elektrodenkonfigurationen, u. a.) oder verbesserte Parameterbeziehungen aufzustellen. Generell besteht die Herausforderung, diesen Standort skalenübergreifend bzw. auf jeder Feldskala optimal zu charakterisieren. Die flächenhaften geoelektrischen Untersuchungen zeigten im Rahmen dieses Arbeitspaketes gute Ergebnisse für die gesamte Hangskala.

2 Programmspezifischer Teil

2.1 Wurden die im Antrag formulierten Forschungsziele erreicht oder gab es Änderungen? Wenn ja, welche?

Für den zweiten Förderzeitraum waren folgende Ziele formuliert worden:

- Modellweiterentwicklungen und Modellkopplungen
- Benchmark und Transferexperimente
- Weitergehende Prozess- und Felderkundungen
- Multiskalen-Modellierungen und optimale Modellkomplexität

Die zu den ersten drei Punkten aufgeführten Ziele sind weitgehend erreicht worden. Zum vierten Punkt ist anzuführen, dass Multiskalen-Modellierungen durchgeführt worden sind, die Arbeiten zur optimalen Modellkomplexität konnten aber nur erst ansatzweise angegangen werden. Ein Grund hierfür resultierte u.a. aus dem Umstand, dass ein dreidimensionales Strukturmodell vom Untergrund erst im Sommer 2011 (3. Quartal des 3. Jahres) zur Verfügung stand. Darüber hinaus möchten wir anführen, dass es sich bei der Ermittlung einer optimalen Modellkomplexität um eine nach wie vor hoch ambitionierte und hoch komplexe Aufgabenstellung handelt, deren weitgehende Erledigung nach heutigem Stand einen wesentlich höheren Zeitrahmen erfordert, beispielsweise eine weitere dreijährige Förderperiode. Nichtsdestotrotz sind die Antragsteller mit den erzielten Ergebnissen, wie in den Arbeitsberichten und Veröffentlichungen formuliert, insgesamt zufrieden.

2.2 Welcher wissenschaftliche Zugewinn wurde durch den Verbund erzielt? Wurden strukturelle Maßnahmen ergriffen, durch die Zusammenarbeit gestaltet und der Verbund gestärkt wurde (z.B. Module Forschergruppen-Professuren, befristete Freistellungen, Fellow-Programm, Transferprojekte)?

Die Forschergruppe hat ganz wesentlich von dem Umstand profitiert, dass die hier beteiligten Forscher neben ihrem eigenen Spezialgebiet auch über Kenntnisse der Fachgebiete der Kollegen verfügten, so dass es fachliche ‚Overlaps‘ gab, insbesondere in folgenden Bereichen: Hydrologie (TP1a, TP2), (Untergrund)Hydraulik (TP2, TP1a, TP3, TP4), Kontinuumsmechanik (TP3, TP2), Experimente technische Skala (TP4, TP3, TP1a) und Geophysik (TP1b, TP5a, TP5b).

Es konnten wichtige Schlüsselprozesse der Großhangbewegung am Heumöser Hang hinsichtlich ihrer Dynamik grundsätzlich im Labor und im Feld identifiziert und ihr Verständnis verbessert werden: die Porenwasserdynamik angetrieben durch schnelle Infiltration in makroporöse Böden, die Entwicklung von Scherbändern und die stabilisierende Wirkung von Schneeauflast. Darauf aufbauend wurden geeignete Modellkonzepte sowie Simulations- und Kopplungsmethoden entwickelt

(Makroporeninfiltration: diskreter Ansatz für kleine Skala (Kaskadenmodell) und Zweiphasen-Doppelpermeabilitätsansatz für große Skala; Erweiterung eines elasto-viskoplastischen thermodynamisch konsistenten Dreiphasenmodells für Sand; Kopplungsmethoden Oberflächenabfluss - Infiltration). Des Weiteren wurden ein physikalisch-basiertes hydrologisches Gebietsmodell, ein robustes Niederschlags-Oberflächenabflussmodell basierend auf den Flachwassergleichungen, ein datengetriebenes Stabilitäts- und Bewegungsmodell, eine Modellerweiterung zur Berücksichtigung einer vierten, erosiven Phase sowie ein Web-basiertes Informationsmanagement entwickelt.

Es wurden verschiedene geophysikalische Methoden und Techniken weiterentwickelt, die z.T. erstmalig für Großhangbewegungen bzw. an Kriechhängen eingesetzt wurden. Durch Kombination solcher Methoden waren gegenseitige Plausibilitätstests möglich. So konnten seismische und Bohrlochmessungen zum Erkennen von Schichtgrenzen verglichen werden, und es konnten seismische und nanoseismische Methoden zur Bestimmung von Isopachen (Linien gleicher Mächtigkeit von Schichten) kombiniert werden. Es wurde auch Technologie entwickelt, sog. UAV (Unmanned Aerial Vehicle), wobei es sich um ca. 1 m große ferngesteuerte Flugzeuge handelt, die eine hochauflösende Oberflächenerkundung (Höhen, Landnutzung) ermöglichen.

Insgesamt konnte ein fundiertes System-, Struktur- und Prozessverständnis entwickelt werden, um das Natursystem Heumöser Hang hinsichtlich seiner komplexen räumlichen Strukturmuster und deren Dynamik abzubilden und um die zum Teil stark gekoppelten Prozesse Niederschlag, Oberflächenabfluss, Infiltration und Strömungsdynamik im Untergrund sowie Deformation teilgesättigter Böden über eine große Bandbreite von räumlichen und zum Teil auch zeitlichen Skalen zu beschreiben. Mehrere der zuvor genannten Entwicklungen konnten nur im Rahmen eines solchen interdisziplinären Verbunds erzielt werden.

Strukturelle Maßnahmen wie die zuvor genannten wurden nicht ergriffen.

2.3 In welcher Form fand eine thematische oder örtliche Schwerpunktsetzung statt?

Thematische Schwerpunktsetzungen haben in folgenden Bereichen stattgefunden: Makroporeninfiltration (Experimente, Modellkonzepte und Simulationsmethoden; TP4, TP2, TP1a), Bodendeformation (Experimente, Modellkonzepte und Simulationsmethoden; TP4, TP3, TP1a, Niederschlag-Abfluss-Modellierung (Modellkonzepte; TP1a, TP2), geophysikalische Methoden (Erkundung und Monitoring; TP1b, TP5b, TP5a, TP1a) und Web-basiertes Informationsmanagement (ZTP mit allen anderen TP).

Örtliche Schwerpunktsetzungen mit intensiver Zusammenarbeit fanden am Heumöser Hang in zwei Bereichen statt, zum einen im Makroporenwald (Macropore Forest, siehe Abb. 1) und auf der Heumöser Weide (Heumöser Meadow, siehe Abb. 2). Der Makroporenwald ist im immobilen Bereich

des Hangs innerhalb des roten Ovals. Es fand hier eine intensive Zusammenarbeit der Teilprojekte 1a und 4 mit 2 und 3 in folgenden Bereichen statt: Makroporenexperimente im Labor, Tracerexperimente im Feld einschließlich, Makroporenkerngewinnung und zugehörige Laborexperimente, Simulation der Laborexperimente, Ableitung von Parametern für Strömungs- und Deformationsberechnungen

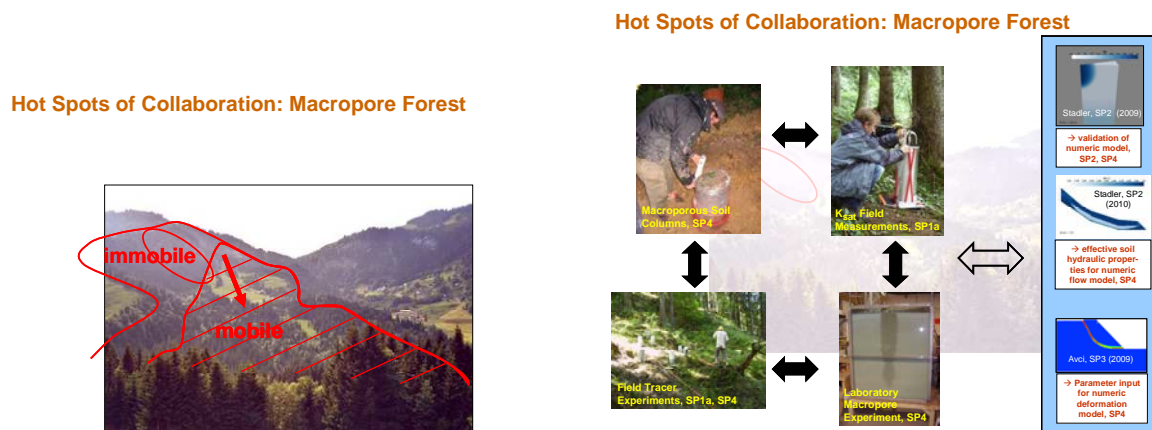


Abbildung 1: Intensive Zusammenarbeit am Makroporenwald

Im Bereich der Heumöser Weide hat es eine intensive Abstimmung der Erkundungs- und Monitoringarbeiten auf der einen Seite mit den unterschiedlichen Modellierungsarbeiten auf der anderen Seite gegeben. Dies umfasste folgende Arbeiten: Kernbohrungen, Scherzonenbestimmung und Beobachtung der Dynamik der Hangbewegung TP1a, schichtbasierte Inversion, Scherzonenbestimmung und Isopachen TP1b, Isopachen TP5a, Direct Push Methoden und Dynamik der elektrischen Leitfähigkeit TP5b, Luftbildaufnahmen TP5c und zentrales Informationsmanagement ZTP sowie hydrologisches Modell und einfaches Stabilitätsmodell TP1a, Dreischichtenmodell TP1b, Niederschlags-Oberflächenabflussmodell TP2, Deformationsmodelle von TP3 und TP5d.

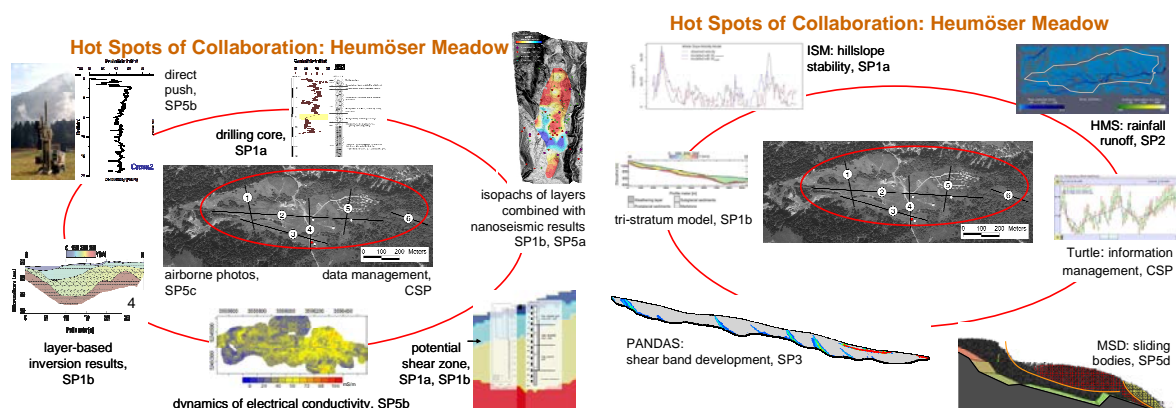


Abbildung 2: Intensive Zusammenarbeit auf Heumöser Wiese

2.4 Wie schätzen Sie die internationale Sichtbarkeit der Forschergruppe ein?

Wir schätzen die internationale Sichtbarkeit der Forschergruppe aus nachfolgend aufgeführten Gründen als sehr hoch ein:

- **Special Section on Landslides** im **Vadose Zone Journal** Volume 10, 2011 mit 5 Beiträgen (in der Reihenfolge aus der Special Section):
Hinkelmann,R., Zehe,E., Ehlers,W. & Joswig,M. (2011): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies. *Vadose Zone Journal* 10(2): 473-476; doi:10.2136/vzj2011.0032
Germer,K. & Braun,J. (2011). Effects of Saturation on Slope Stability: Laboratory Experiments Utilizing External Load. *Vadose Zone Journal* 10 (2): 477-486; doi: 10.2136/vzj2009.0154
Walter,M., Walser,M. & Joswig,M. (2011). Mapping Rainfall-Triggered Slidequakes and Seismic Landslide-Volume Estimation at Heumoes Slope. *Vadose Zone Journal*. 10 (2): 487-495; doi:10.2136/vzj2009.0147
Wienhöfer, J., Lindenmaier, F. & Zehe, E. (2011): Challenges in Understanding the Hydrologic Control on the Mobility of Slow-Moving Landslides. *Vadose Zone Journal* 10 (2): 496-511; doi: 10.2136/vzj2009.0182
Ehlers,W., Avci,O., & Markert,M. (2011b): Computation of slope movements initiated by rain-induced shear bands in small-scale tests and in situ. *Vadose Zone Journal* 10(2): 512-525; doi: 10.2136/vzj2009.0156
- **Abschlussworkshop** zur Forschergruppe: Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes am 12.+13.12.2011 in Bad Herrenalb; ca. 50 nationale und internationale Teilnehmer
- **EGU 2011**, 7.4.2011 in Wien, Österreich: **Präsentation aller Teilprojekte**, 2 Vorträge in Session HS2.14/NH3.13: Landslide Hydrology: from hillslope hydrology to landslide understanding und 6 Poster in der Postersession
Vortrag: Stadler,L., Germer,K. & Hinkelmann,R.: Developing model concepts for simulating water infiltration into macroporous soils for understanding triggers for landslides
Vortrag: Avci,O., Markert,B. & Ehlers,W.: Numerical investigation of landslide scenarios in laboratory and real case
- **SIAM Conference** on Mathematical & Computational Issues in the Geosciences: **Minisymposium MS 45** - Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes am 7.6.2009 in Leipzig, **Organizer: Reinhard Hinkelmann**; 4 Vorträge, davon 2 aus der Forschergruppe, ein weiterer Vortrag in anderem Minisymposium MS45: Hinkelmann,R., Stadler,L., Helmig,R. & Zehe,E.: A Double Continuum Approach for Two-phase flow Simulation in Natural Slopes

MS45: Ehlers,W., Markert,B. & Avci,O.: Initiating Large Slope Movements by Rain-induced Shear Bands

MS9: Hinkelmann,R. & Stadler,L.: Development of Model Concepts for Flow in Macroporous Media on Different Scales

- **Landslide Processes** – From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling: Teilnahme von Hinkelmann,R., Zehe,E., Joswig,M., Ihringer,J., Wienhöfer,J., Lindenmaier,F., Germer,K. & Walter,M. am 6.+7.2.2009 in Strasbourg, Frankreich sowie 4 Beiträge zum Thema der Forschergruppe als Vorträge und im Konferenzband
 - Germer, K. & Braun, J.: Slope failure processes in a laboratory flume
 - Lindenmaier,F., Wienhöfer,J., Zehe,E. & Ihringer,J.: Confined aquifer characteristics and stability of a hillslope in the Vorarlberg Alps, Austria
 - Stadler,L., Hinkelmann,R. & Zehe,E.: Two-phase flow simulation of water infiltration into layered natural slopes inducing soil deformation
 - Wienhöfer,J., Lindenmaier,F. & Zehe,E.: Temporal variability of a slow-moving landslide: the Heumöser Hang case study in Vorarlberg, Austria

- **Triggering of Rapid Mass Movements in Steep Terrain** – Mechanisms and Risks: **Keynote Lecture Reinhard Hinkelmann**: Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes am 13.4.2010 in Monte Verita, Schweiz

- **Sino-German Workshop on Scientific Issues in Earthquake Engineering Research** organised by **NSFC – DFG: Reinhard Hinkelmann**: Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes am 25.2.2009 in Beijing, China

- **Vorstellung der Forschergruppe** durch Sprecher **Reinhard Hinkelmann**: Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes
 - 15.4.2009 im Kolloquium Wasserwesen, TU Berlin
 - 16.9.2011 auf Spätsommerversammlung Contelos Engineering, Hamburg
 - 9.2.2012 in Karlsruher Vortragsreihe - Forschung und Praxis in Wasserbau und Wasserwirtschaft, KIT Karlsruhe
 - 4.10.2012 in der Vortragsreihe der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften, TU Graz, Österreich

2.5 Durch welche Maßnahmen wurde der wissenschaftliche Nachwuchs gefördert?

Die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen der Forschergruppe erfolgte auf zwei Ebenen, zum einen in den einzelnen Arbeitsgruppen und zum anderen innerhalb der Forschergruppe. Innerhalb der Arbeitsgruppen wurden i.d.R. folgende Maßnahmen durchgeführt: regelmäßige Rücksprachen mit den Betreuern der Dissertation; Empfehlung des Betreuers zum

Besuch von weitergehenden Lehrveranstaltungen, z.T. im Rahmen von Promotionsprogrammen; Arbeitsgruppentreffen und interne Seminare, auf denen über den Stand der Arbeit, Probleme und nächste Schritte diskutiert wird; Besuch von nationalen und internationalen Konferenzen; z.T. Besuch und Aufenthalt bei nationalen oder/und internationalen Forschungspartnern.

Innerhalb der Forschergruppe war ein wesentliches Element zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, dass auf jedem Forschergruppentreffen (ca. 3 jedes Jahr) einstündige allgemein verständliche Übersichtsvorträge gehalten wurden, um das fächerübergreifende Wissen für die Doktoranden und auch für die Projektleiter zu vermitteln. In den ersten Treffen hat jeder Teilprojektleiter sein Forschungsgebiet und seine Zielstellungen innerhalb der Forschergruppe vorgestellt. Später wurden dann externe Experten geladen, die im Bereich der Hangrutschungen oder den zugehörigen Forschungsgebieten tätig waren. Darüber hinaus hat es eine Vielzahl von bi- oder trilateralen Treffen, meistens der Doktoranden, gegeben, die sich zur Bearbeitung ihrer Forschungsaufgaben fächerübergreifend ausgetauscht haben und so ihr Kompetenzfeld verbreitert haben.

2.6 Welche Maßnahmen zur Gleichstellung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern wurden umgesetzt?

Es wurden Maßnahmen umgesetzt, die den Arbeitsplatz „Wissenschaft“ familienfreundlicher gestaltet haben, insbesondere hinsichtlich der Vereinbarkeit von Familie und wissenschaftlicher Karriere. Dazu wurde die Einrichtung von Heimarbeitsplätzen in fünf Fällen unterstützt, was den Antragstellenden ermöglichte, sich intensiver um die Betreuung ihrer Kinder zu kümmern bei gleichzeitiger Verlagerung von Arbeitszeiten in die Abendstunden. In einem weiteren Fall wurde eine verlängerte Elternzeit durch Einstellung einer Vertretungskraft unterstützt. Da in der Forschergruppe Wissenschaftlerinnen weder auf Ebene der Projektleitung noch als Nachwissenschaftlerinnen tätig waren, wurden nur etwa zwei Drittel der beantragten Mittel ausgegeben.

2.7 Ggf. Transferaspekte: Wurden aus Anwendungssicht Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik erreicht und wenn ja, welche? Lassen sich daraus Folgeprojekte ableiten?

In mehreren Teilprojekten wurden Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik erzielt, und es ist denkbar und z.T. geplant, Folgeprojekte abzuleiten.

Im Zentralen Teilprojekt wurde u.a. ein Web-basiertes Informationssystem entwickelt, das mit entsprechenden Anpassungen auch für andere Verbundprojekte eingesetzt werden kann. Grundideen hiervon werden bereits für die Koordinierung des Verbundprojektes ‚Einbau leitbildkonformer Ersatzstrukturen in die Panke und Optimierung ihrer Wirksamkeit eingesetzt‘, das von Prof. Reinhard Hinkelmann geleitet und durch das Umweltentlastungsprogramm II des Landes Berlin und durch EFRE gefördert wird.

Der von Teilprojekt 1a erhobene Datensatz zur Dynamik der Hangbewegung bietet sich zusammen mit dem Strukturmodell aus Teilprojekt 1b als Benchmark für weitergehende Modellierungen an. Ein mögliches Beispiel hierfür wäre eine Kopplung des von Teilprojekt 1a entwickelten einfachen Stabilitäts- und Bewegungsmodells mit dem hydrologischen Gebietsmodell, um die Bewegungsdynamik in Abhängigkeit von hydrologischen Prozessen, Oberflächen- und Festgesteinstopographie am Beispiel des Heumöser Hangs und bei vergleichbaren Hangbewegungen weitergehend zu untersuchen.

Aufgrund der über die gesamte Hangskala verfügbaren Geschwindigkeitsinformationen ist eine weitergehende Zusammenarbeit von aktiven seismischen Verfahren aus Teilprojekt 1b und nanoseismischen Verfahren aus Teilprojekt 5a denkbar.

Mit den entwickelten Werkzeugen des Teilprojektes 2 (Oberflächenabflussmodell, Untergrundströmungsmodell) können grundsätzlich praktische Fragestellungen bearbeitet werden, die sich mit Starkregen, Hochwasser und Auswirkungen von Landnutzungsänderungen befassen. Folgeprojekte sind denkbar, die sich mit dem Einsatz des hochauflösenden Niederschlags-Oberflächenabflussmodells in größeren Einzugsgebieten als Alternative bzw. Verbesserung klassischer Niederschlags-Abflussmodelle oder in urbanen Einzugsgebieten als Alternative oder Verbesserung klassischer stadthydrologischer Modelle befassen. Weiter wäre denkbar zu untersuchen, bei welchen Böden und welchen Fragestellungen Zweiphasenströmungsmodelle anstelle von Richardsmodellen eingesetzt werden sollten.

Mit den entwickelten Werkzeugen des Teilprojektes 3 können grundsätzlich Fragestellungen bearbeitet werden, die sich mit Deformations- und Stabilitätsfragestellungen befassen, z.B. auch Bodenverbesserungen, Befestigungen, Bodennägel. Die Erweiterung um die erosive Phase ermöglicht darüber hinaus, das Modell für die Standsicherheit von Deichen und Dämmen einzusetzen, bei denen die Gefahr der inneren Erosion auftritt.

Aufgrund der vorhandenen experimentellen Einrichtungen des Teilprojektes 4 zur Makroporeninfiltration und zum Scherversagen sind hier weitergehende Untersuchungen möglich, z.B. zum beobachteten Druckabfall vor dem Scherversagen.

Die weitergehende Erkundung von physikalischen Prozessen, die zu spröden Deformationen in Lockergestein führen, kann von Teilprojekt 5a, c weitergehend erforscht werden. Dazu können auch Vergleiche mit anderen Rutschungen wie Super-Sauze (Frankreich) oder Slumgullion (Colorado) herangezogen werden. Wir vermuten, dass an Untergrundbarrieren aus Festgestein Entwässerungen stattfinden, die spröde Deformation begünstigen.

Die im Teilprojekt 5b durchgeführte Erkundungsstrategie kann auch für ähnliche Fragestellungen eingesetzt werden, z.B. für Agrarflächen oder für Standsicherheitsuntersuchungen bei

Tagebaukippen. Das Problem der Mehrdeutigkeit unter den Bedingungen am Heumöser Hang sollte in Folgeuntersuchungen differenzierter betrachtet werden.

Die in Teilprojekt 5c entwickelten UAV können für viele andere Fragestellungen, bei denen kleinräumige hochauflösende Geländemodelle benötigt werden, eingesetzt werden.

2.8 Haben Sie sonstige Hinweise an der DFG?

Wir haben keine sonstigen Hinweise an die DFG.

3 Übersichten und Verzeichnisse

3.1 Angaben zu Promotionen, Habilitationen und Berufungen von Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftlern aus den Teilprojekten

Name, Vorname	Alter und (geplanter) Zeitpunkt der Promotion	Abschluss der Promotion in welcher Förderphase des Projektes
Avci, Ocan	36, SS 13 (geplant)	nach Projektende
Germer, Kai	37, SS 13 (geplant)	nach Projektende
Notay, Vikram	30, SS 13 (geplant)	nach Projektende
Stadler, Leopold	33, SS 13 (geplant)	nach Projektende
Walter, Marko	36, WS 12/13	nach Projektende
Wienhöfer, Jan	35, SS 13 (geplant)	nach Projektende

Es gibt keine Habilitationen und auch keine Berufungen von Nachwuchswissenschaftlern/innen auf Professuren.

3.2 Wichtigste Veröffentlichungen und Patente

- a) Avci,O. & Ehlers,W. (2011): Experimental and Computational Issues in the Mechanics of Multi-Physical Unsaturated Soil. In R. I. Borja, W. Wu (eds.): Multiscale and Multiphysics Processes in Geomechanics. Springer Berlin Heidelberg, 125-128, ISBN 978-3-642-19630-0; doi.org/10.1007/978-3-642-19630-0_32
- Ehlers,W., Avci,O. & Markert,B. (2011b): Computation of slope movements initiated by rain-induced shear bands in small-scale tests and in situ. Vadose Zone Journal 10(2): 512-525; doi: 10.2136/vzj2009.0156
- Ehlers,W. & Avci,O. (2012): Stress-dependent hardening and failure surfaces of dry sand. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1-23; doi:10.1002/nag.1121
- Germer,K. & Braun,J. (2011): Effects of Saturation on Slope Stability: Laboratory Experiments Utilizing External Load. Vadose Zone Journal 10 (2): 477-486; doi: 10.2136/vzj2009.0154
- Hinkelmann,R., Zehe,E., Ehlers,W. & Joswig,M. (2011): Special Section on Landslides: Setting the Scene and Outline of Contributing Studies. Vadose Zone Journal 10(2): 473-476; doi:10.2136/vzj2011.0032
- Niethammer,U., James,M.R., Rothmund,S., Travelletti,J. & Joswig,M. (2012): UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. Engineering Geology. 128, 2-11
- Popp,S., Altdorff,D. & Dietrich,P. (2013): Assessment of shallow subsurface characterization with non-invasive geophysical methods at the intermediate hill-slope scale. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 1297-1307, doi:10.5194/hess-17-1297-2013

- Rumpf,M., Böniger,U. & Tronicke,J. (2012): Refraction seismics to investigate a creeping hillslope in the Austrian Alps. *Engineering Geology*, 151, 37-46. doi:10.1016/j.enggeo.2012.09.008
- Sauer,D., Popp,S., Dittfurth,A., Altdorff,D., Dietrich,P. & Paasche,H: Soil moisture assessment over an alpine hillslope with significant soil heterogeneity. Accepted for publication in *Vadose Zone Journal*
- Sick,B., Walter,M. & Joswig,M. (2012): Visual event screening of continuous seismic data by super-sonograms. *Pure and Applied Geophysics topical Volume on Recent Advances in Nuclear Explosion Monitoring, Vol. I., Pure and Applied Geophysics*; doi:10.1007/s00024-012-0618-x
- Simons,F., Busse,T., Hou,J., & Hinkelmann,R. (in press): A model for overland flow and associated processes within the Hydroinformatics Modelling System. *Journal of Hydroinformatics*; doi:10.2166/hydro.2013.173
- Stadler,L., Hinkelmann,R., & Helmig,R. (2012): Modelling Macroporous Soils with a Two-Phase Dual-Permeability Model. *Transport in Porous Media*, 585-601; doi:10.1007/s11242-012-0064-3
- Walter,M., Arnhardt,C. & Joswig,M. (2012): Seismic monitoring of rockfalls, slide quakes, and fissure development at the Super-Sauze mudslide. *French Alps, Engineering Geology*, 128, 12-22
- Walter,M., Niethammer,U., Rothmund,S. & Joswig,M. (2009): Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing. *First Break*, 27 (8), 75-82
- Walter,M., Schwaderer,U. & Joswig,M. (2012): Seismic monitoring of precursory quakes from a destructive rockfall in the Vorarlberg Alps, Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 12, 3545-3555; doi:10.5194/nhess-12-3545-2012
- Walter,M., Walser,M. & Joswig,M. (2011). Mapping Rainfall-Triggered Slidequakes and Seismic Landslide-Volume Estimation at Heumoes Slope. *Vadose Zone Journal* 10 (2): 487-495; doi:10.2136/vzj2009.0147
- Wienhöfer,J., Germer,K., Lindenmaier,F., Färber,A. & Zehe,E. (2009): Applied tracers for the observation of subsurface stormflow at the hillslope scale. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 13:1145-1161
- Wienhöfer,J., Lindenmaier,F. & Zehe,E. (2011): Challenges in Understanding the Hydrologic Controls on the Mobility of Slow-Moving Landslides, *Vadose Zone Journal*, 10, 496-511, doi: 10.2136/vzj2009.0182
- Wienhöfer,J. & Zehe,E. (2013): Predicting subsurface storm flow response of a forested hillslope: the role of connected flow paths and bedrock topography. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 10, 6473-6514; doi: 10.5194/hessd-10-6473-2013.

- b)** Hinkelmann,R. & Zehe E. (2010): Coupling of Flow and Deformation Processes for Modeling the Movement of Natural Slopes. International Conference Triggering of Rapid Mass Movements in Steep Terrain - Mechanism and Risks, Monte Verita, Switzerland, abstract and keynote lecture
- Molkenthin,F., Meienberg,C. & Hinkelmann,R. (2010): Information Management of Multi-Scale Physical State Variables in an Interdisciplinary Research Unit. In: Curdt/Bareth (eds.), Geographisches Institut der Univ. Köln, Kölner Geographische Arbeiten, Heft 90, Tagungsband DFG-SFB TR32 Workshop „Data Management“, Köln/Germany, ISSN 0454-1294, reviewed paper

Es sind keine Patente entwickelt worden.