

BMBF-Forschungsprojekt
Förderkennzeichen: 02 WU 0263
Zuwendungsempfänger: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Schlussbericht für den Zeitraum 01.09.01 – 28.02.05

Das GeoModel
Evaluierung alternativer Techniken zur Bestimmung des
Bodenwasserhaushaltes

Arbeitsgruppe: Prof. Dr. Wolfgang Rabbel **Projektleiter**
Dr. Said Attia al Hagrey
Dipl.-Geoökol. Ulrike Werban
Prof. (em.) Dr. Rudolf Meißner
Ali Ismaeil

2004

Institut für Geowissenschaften, Abt. Geophysik, CAU, Otto-Hahn-Platz 1, 24118 Kiel
Tel. +49-(0)431-880-3900 Fax. +49-(0)431-880-4432
<http://www.geophysik.uni-kiel.de/home.html>

Prof. Dr. W. Rabbel Tel. +49-(0)431-880-3916 wrabbel@geophysik.uni-kiel.de
Prof. Dr. H.-J. Götze Tel. +49-(0)431-880-3805 goetze@geophysik.uni-kiel.de

INHALTSVERZEICHNIS

I Rahmenbedingungen

1 Aufgabenstellung	1
2 Voraussetzungen	1
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	1
4 Wissenschaftlicher und technischer Stand	2
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	3

II Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse	1
1.1 Technische Ergebnisse	5
1.1.1 Detaillierte Beschreibung der Komponenten	7
1.1.2 Übersicht zu den erfolgten logistischen und baulichen Maßnahmen	9
1.2 Wissenschaftliche Ergebnisse (geophysikalische und hydrologische Messungen)	12
1.2.1 Geoelektrische Messungen	12
1.2.2 GPR (Ground Penetrating Radar) Messungen	13
1.2.3 Wasserausfluss	14
1.2.4 Laboranalysen an Bodenproben	14
1.2.5 Wissenschaftliche Ergebnisse aus dem EU-Projekt „WATERUSE“	14
1.2.6 Öffentlichkeitsarbeit/ Arbeitstreffen	16
2 Voraussichtlicher Nutzen	17
3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle	18
4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	18

III Kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

1 Beitrag zu förderpolitischen Zwecken	22
2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens	23
3 Fortschreibung des Verwertungsplanes	25
4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	26
5 Präsentationsmöglichkeiten	26
6 Einhaltung des Ausgaben- und Zeitplanung	26

Literatur	26
------------------	----

Anhang

I. Rahmenbedingungen

1 Aufgabenstellung

Ziel des BMBF-Forschungsprojektes war die Erstellung eines Großversuchsmodells zur Evaluierung und Entwicklung verschiedener hydrologischer und geophysikalischer Methoden zur Messung des Wasserflusses in Böden. Das Projekt ist eingebettet in einem bewilligten EU Antrag (WATERUSE), an dem insgesamt 8 europäischen Partner beteiligt sind.

2 Voraussetzungen

Das Modell ist integraler Bestandteil des Gesamtprojekts "WATERUSE" und dient der Erprobung und Kalibrierung verschiedener Technologien. Beim Bau des Großmodells können wir auf Erfahrungen zurückgreifen, die wir mit einem Pilotmodell innerhalb eines DFG-Antrags (Präferenzielle Fließwege, Me-335) gewonnen haben.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Nach der Bauphase wurde das Versuchsmodell genutzt, um Experimente unter verschiedenen Randbedingungen durchzuführen, die für einen kritischen Test der entwickelten Konfigurationen und theoretischen Verfahren, sowie für die Kontrolle der Datenqualität nötig waren. Die angewandten Methoden sind Georadar, Gleichstromwiderstand, TDR („time domain reflectometry“) und Tensiometer. Parallel erfolgte die Entwicklung geeigneter Hard-/Software und hochauflösender 3D Modellierungs-, Inversions- und Auswertverfahren.

Außerdem werden Gerätetests unserer EU-Partner im Kieler GeoModel stattfinden, um eine optimale Kombination der Methoden zu gewährleisten. So ist die Erstellung unseres Versuchsmodells eine Voraussetzung zur Optimierung der Technologie für den Feldeinsatz. Die Ergebnisse werden das gesamte Potential integrativer Verfahren zur Messung hydrologischer Variabilitäten in Böden und im Modelltank liefern. Dies ist die Voraussetzung für eine Standardisierung und Kalibrierung verschiedenster Feldversuche.

4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde (Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und verwendete Fachliteratur)

Der Stand der Forschung auf dem Gebiet des Wasserdurchflusses durch sandige Böden geht zurück auf klassische Arbeiten von Darcy (1856), Archie (1942) und verschiedene Arbeiten in Keller und Frischknecht (1966). Die Arbeit von Topp et al. (1980) befasst sich vor allem mit dielektrischen Parametern des Wassergehaltes, und das Buch von Schön (1983) enthält bereits eine Übersicht über alle petrophysikalisch relevanten Kenngrößen zu hydrologischen Problemen. In den 90er Jahren nahmen Forschungen zum Wassergehalt, Wasserverteilung und Wasserfluss zu. Von Seiten der Bodenhydrologie wird mit verfeinerten Lysimetern und Messgeräten gearbeitet (TDR-Sonden), von Seiten der Geophysik ist es eine Verbesserung und Erweiterung des Geoelektrik-Multi-Kanal/-Elektrodensystems einerseits und vor allem die Entwicklung und der enorme Anstieg der Anwendungen von Georadar (auch GPR „Ground Penetrating Radar“), der zu vielen neuen Erkenntnissen und Anwendungen bei hydrologischen Fragestellungen führt.

Unsere Vorarbeiten beziehen sich auf eine Reihe von Untersuchungen, die 1996 mit dem DFG-Projekt „Präferenzielle Fließwege“ (Me-335/96) initiiert wurden (Arbeitsberichte von DFG-Projekt Me-335/96, 1997, 2001, sowie Hagrey et al., 1995, Hagrey et al. 1999, Hagrey und Müller, 2000) und in Kooperation mit dem SFB-192 „Optimierung pflanzenbaulicher Produktionssysteme im Hinblick auf ökonomische und ökologische Effekte“ (Hagrey et al., 1998) fortgesetzt wurden. Die Untersuchungen innerhalb der Projekte waren und sind von einer engen Zusammenarbeit zwischen Disziplinen der Geophysik und Wasserwirtschaft (auch mit der Biologie) geprägt. Eine wichtige experimentelle Voraussetzung unserer Forschung war die Errichtung eines Großbodenmodells. Dieses Großmodell ist Vorgänger des „GeoModel“ und diente der Nachbildung von Fließvorgängen im Maßstab 1:1 und ihrer geophysikalischen Überwachung. Hauptziel war die Untersuchung von Wassertransportprozessen in der ungesättigten Bodenzone. Wasser fließt in der vadosen ungesättigten Zone zumeist nicht in einer gleichmäßigen Front, sondern folgt präferenziellen Fließwegen (Kung, 1990a,b; Ritsema et al. 1993, Michaelsen, 1995; Hagrey und Michaelsen, 1996; Hagrey et al. 1999).

Die durchgeführten Versuche am "alten" Großbodenmodell waren Grundlage für Verbesserungsideen, die in die Konstruktion des 5x3x2 m³ großen neuen Modells (GeoModel) eingeflossen sind.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Dr. Johannes Michaelsen, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, Lisboa, Portugal, jetzt bei Aqua-Consult Hamburg
- Alle Partner des EU-Projektes WATERUSE
- Dr. Susanne Kathage und Dr. Andreas Kathage, GeoHiRes International Ltd., Borken
- Michael Gräber, GeoServe, Michael Gräber & Stefan Wende GbR, Kiel
- Prof. Dr. em. Widmoser, ehemaliger Leiter des Instituts für Wasserwirtschaft, Universität Kiel, jetzt in Erlenbach, Schweiz
- Derk Wachsmuth, Dipl. Geophys., Max-Planck-Institut für Limnologie, Plön
- Dr. Anton Thomsen, Danish Institute for Agricultural Sciences, Tjele, Denmark
- Bauingenieure, Netzwerkadministrator, Werkstattmeister (Feinmechaniker, Elektromechaniker, Elektriker, Infrastruktur-Installator usw.), Mitarbeiter und Gastwissenschaftler der Universität Kiel bzw. des Landes Schleswig-Holstein:

Name	Adresse
Dr. Carsten Griewatsch	Netzwerkadministrator, Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Matthias Strahser, Dipl. Geophys.	Geophysik, CAU-Kiel
Gudrun Reim	Graphikerin, Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Kathleen Helbig	Sekretärin, Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Rolf Becker und Mitarbeiter	Feinmechaniker Meister, Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Günter Bresa und Mitarbeiter	Elektromechaniker Meister, Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Peter Schöller	EDV-/Werkstatt-Mitarb., Inst. f. Geowissenschaften, CAU-Kiel
Stephanie Behrend	Werkstatt-Mitarbeiterin
Hans-Jürgen Voß	Mitarbeiter, Hydrologie und Wasserwirtschaft, CAU-Kiel
Klaus Rohmann und Mitarbeiter	Werkstattmeister, CAU-Kiel
Thomas Thomsen und Mitarbeiter	Elektriker-Meister, CAU-Kiel
Jürgen Holz	Tischler, Physikzentrum, CAU-Kiel
Dr. Sherif Hanafy	Department of Geophysics, Cairo University
Dr. Amr Hamouda	National Institute of Oceanography and Fishery, Alexandria

II. Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse

Übersicht

- 1.1 Technische Ergebnisse
 - 1.1.1 Detaillierte Beschreibung der Komponenten
 - 1.1.2 Übersicht zu den erfolgten logistischen und baulichen Maßnahmen
- 1.2 Wissenschaftliche Ergebnisse (geophysikalische und hydrologische Messungen)
 - 1.2.1 Geoelektrische Messungen
 - 1.2.2 GPR (Ground Penetrating Radar) Messungen
 - 1.2.3 Wasserausfluss
 - 1.2.4 Laboranalysen an Bodenproben
 - 1.2.5 Wissenschaftliche Ergebnisse aus dem EU-Projekt „WATERUSE“
 - 1.2.6 Öffentlichkeitsarbeit/ Arbeitstreffen

1.1 Technische Ergebnisse

Das GeoModels besteht aus drei Einheiten: (1) dem Bodenmodell mit der unterliegenden Filterschicht, (2) dem Monitoringraum und (3) dem Computerraum. Die ersten 2 Einheiten sind in einer Fertighalle (13x8x4 m³) beherbergt. Der Computerraum befindet sich in einem angrenzenden Baucontainer.

Übersicht zu Komponenten und Instrumenten	
Bodenmodell	5x3x2m ³ Größe, gefüllt jetzt mit Feinsand
Filterschicht	5x3x0,5m ³ Kies (Korngröße:4-8, 8-16, 16-32mm) unter dem Bodenmodell
Abflusssammler	6x2 (je 0,5m ²) in den zentralen 6m ² , 3 für Randzonen
Modellränder	Hydraulisch isolierende, elektrisch leitende Wände; d.h., Dirichlet-Randbedingung mit Feldkontinuitäten wie in realen Feldversuchen. Altes Modell hatte isolierende Plastikfolie, d.h., Neumann-Randbedingung mit Equipotentiallinien senkrecht zur Grenzfläche, was der Realität nicht entspricht.
Monitoringraum	5x3x4m ³ Größe, bestückt mit Abwasserzähler, Unterdruckpumpe, TDR-/Tensiometer-Anschlüssen
Unterdruckanlage	automatische, zur Verhinderung hydraulischer Barriere an der Sandboden-Kiesfilter-Grenzfläche
TDR and Tensiometer	3 vertikale Profile, je 9 Sensoren alle 20 cm Intervall
Vertikale Elektrodengitter	40x16 Elektroden an 4 Seiten, 12,5cm Intervall
Unter-, Oberflächengitter	je 17x47 Elektroden, 10cm Intervall
Schaltkasten	für alle Elektroden/Decoder, jede Elektrode hat eine Identitätsnummer
GPR-Schlitten	maschinell betätigt, 3D Vermessung, Antennen, Frequenz im Bereich = 50-1500 MHz, mono-/bistatisch, einstellbare Höhe und Profilabstand
GPR-Tomographie	in 16 Bohrlöchern entlang der vertikalen Wänden, 1m Intervall
Bewässerungsanlage	automatische Registrierung der Bewässerungsrate/ -volumen mit der Zeit
Abwasser	automatische Registrierung der Rate and Volumen mit der Zeit
Computerraum	mit Software für Registrierung, Ablesen, Archivieren, Bearbeitung und Übertragung von Daten aller Messsensoren
Pflanze/Baum	Transplantation ist möglich
Metallhalle	131m ² , Schutz gegen Witterung, kontrollierte Randbedingung
Ringdrainage	zur Bodenentwässerung unter dem gesamten Baukomplex
Farbfeld zeigt Verbesserung im Vergleich zur alten Version des Großmodells	

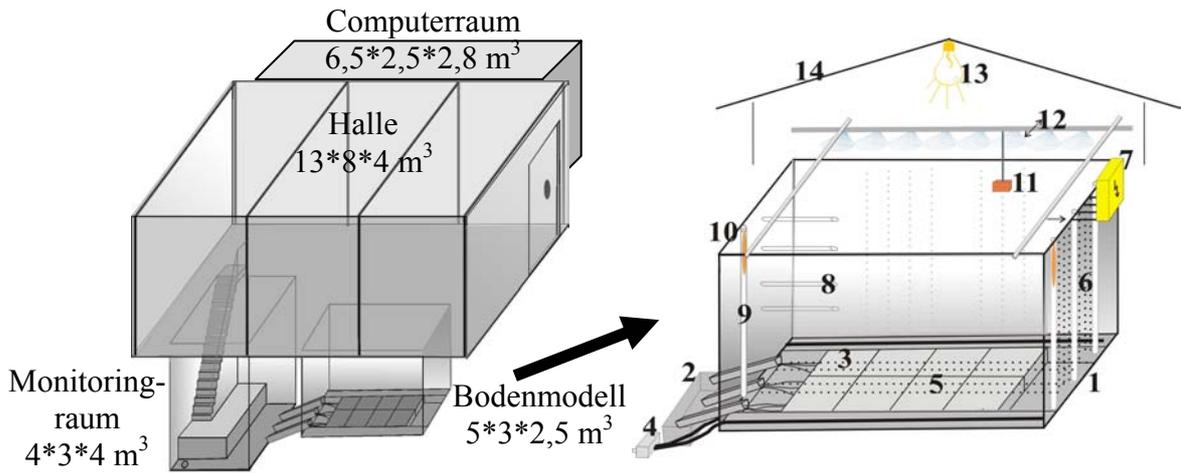
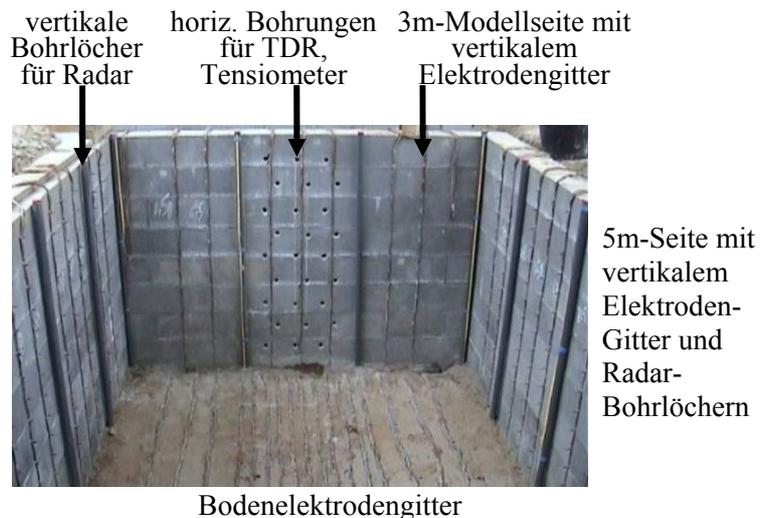


Abb. 1: Aufbau des GeoModels

1	Filterschicht	2	Drainwasser	3	Fangdrain
4	Unterdruckapparat	5	Bodenelektrodengitter	6	Seitenelektrodengitter
7	Steuerkasten, Geoelektrik	8	TDR/Tensiometer	9	Bohrloch
10	GPR-Bohrlochantenne	11	GPR-Antenne	12	Berechnungsanlage
13	Licht	14	Dach, Halle		



a



b

Abb. 2: Untere Kies-Filterschicht mit Drainsystem bestehend aus 3 Kompartimenten, das Mittelkompartiment ist durch 12 Container unterteilt (a), und Bodenmodell (später befüllt mit Feinsand) mit Elektrodengittern und Radarbohrungen (b):

- Untergitter 17x47 Elektroden, 10 cm Intervall
- 4 vertikale Seitengitter 40x16 Elektroden, 12,5 cm Intervall
- Oberflächengitter (beliebig, nicht gezeigt)
- 16 vertikale Bohrungen für Georadar, je 2,5 m Tiefe
- 27 horizontal Bohrungen für TDR/Tensiometer (3x9).

1.1.1 Detaillierte Beschreibung der Komponenten

1. **Bodenmodell** ($5 \times 3 \times 2 \text{ m}^3$): Das Becken, das zur Zeit mit Feinsand gefüllt ist, kann später für andere Bodenmaterialien verwendet werden. Der Feinsand ($\varnothing < 0,2 \text{ mm}$) wurde aus einem norddeutschen Glazialsandlager (bei Rendsburg) mit einem Spezielsieb vorbereitet. Mit Hilfe von Laboranalysen mehrerer Bodenproben wurde die Korngrößenverteilung ermittelt. Der Feinsand bietet eine ausreichende elektrische Ankopplung der Elektroden und verursacht keine Probleme an der Abflussanlage. Die Wände des Beckens sind mit einem Stein, der elektrisch leitend, jedoch hydraulisch dicht ist, gemauert. Diese Umgebungsverhältnisse garantieren realistische Randbedingungen (Dirichlet) ähnlich denen im Feld, im Gegensatz zum alten Modell mit isolierender Neumann-Randbedingung.
2. Die **untere Filterschicht** ($5 \times 3 \times 0,5 \text{ m}^3$), bestehend aus Kies (3 verschiedene Körnungen), befindet sich unter dem Bodenmodell. Diese Filterschicht ist so beschaffen, dass Infiltrationsflüsse sowohl mittels der Schwerkraft als auch mit Unterdruck herbeigeführt werden. Die Filterschicht-Basis hat 3% Neigung und ist in drei Längsbahnen unterteilt. Das Zentrum der mittleren Bahn ist in 12 Kompartimente mit Fangdrainsammlern (je $0,5 \times 0,5 \text{ m}^2$) unterteilt. Das aufgefangene Wasser wird für jedes Kompartiment bzw. jede Bahn getrennt erfasst. An der Stirnseite des Beckens wird das Wasser durch Röhren bzw. Schläuche zur Abflussmessstation im Monitoringraum geführt.
3. **Unterdruck-Apparatur**: Eine innovative selbstentwickelte Unterdruckanlage legt an der Basis der Filterschicht einen Sog an. Dieser Unterdruck soll die hydraulische Kapillarsperre an der Modellsand-Filterkies Grenzfläche (Körnungssprung) ausgleichen. Diese Sperre würde die Veränderung der Fließwege im Kies und vor allem im Sand des Bodenmodells verursachen. Die Anlage besteht aus perforierten Schläuchen, einer Sogpumpe, Vorratsbehältern und Steuerungseinheiten. Der Unterdruck wird über in der Filterschicht verlegte Schläuche gleichmäßig über die Bodenunterseite verteilt. Die Einzelkompartimente werden direkt über die Abflussschläuche mit Unterdruck versorgt.
4. Die **Berechnungsanlage** inkl. der Steuerungseinheiten und dem Wasservorrats tank ($1,5 \times 1 \times 1,5 \text{ m}^3$) ist über dem Bodenmodell installiert. Diese Anlage kann Regenereignisse verschiedener Intensitäten und an unterschiedlichen Lokationen simulieren.

5. Der **Monitoringraum** ($4 \times 3 \times 4 \text{ m}^3$) befindet sich in drei Metern Abstand vom Bodenkörper innerhalb der Metallhalle. Da das Wasser über die Schwerkraft abfließt, liegt die Sohle des Abflussmessraumes vier Meter unter der Bodenoberfläche. Eine Treppe mit Geländer führt in den Monitoringraum. In Höhe der Bodenoberfläche umgrenzt ein Geländer den "Schacht". Wände und Boden sind hydraulisch dicht. Dieser Raum beherbergt Anlagen zur Steuerung der automatischen Abflussmessstation (mit Rohren und Registrierungszählern zur Mengenerfassung des Perkolats aus verschiedenen Kompartimenten), Wasserbehälter, die Unterdruckapparatur, TDR-/Tensiometer-Anschlüsse, einen Wasserauffangbrunnen mit Abpumpanlage und Hochwasser-Warnanlage.
6. Der **Computerraum** befindet sich in einem Baucontainer ($6,5 \times 2,5 \times 2,8 \text{ m}^3$) angrenzend an die Metallhalle mit 3 Arbeitsplätzen, von denen aus die Messinstrumente bzw. -werte überprüft, gesteuert, abgelesen, abgespeichert und im Netzwerk übertragen werden.
7. **Modellbasis und Ringdrainage:** Die Drainage befindet sich 4,5 m unter dem Baukomplex zum Schutz gegen von außerhalb infiltrierendes Bodenwasser. Sie besteht aus perforierten Drainrohren und ist mit Kies überdeckt. Das Drainwasser und das Abflusswasser der Messstation werden zum Wasserauffangbrunnen im Monitoringraum geleitet und mit Hilfe einer Tauchpumpe in die öffentliche Regenwasserdränage abgeführt.
8. **Instrumentierung:** Folgende weitere geophysikalischen und hydrologischen Messgeräte befinden sich im GeoModel:
- a. 6 Elektrodengitter an allen Seiten des Bodenmodells mit mehr als 2000 Feinelektroden, die mit den Steuerboxen und Schaltkästen verbunden sind und durch ein Multi-Kanal-Geoelektrik-Messsystem gesteuert werden. Alle mögliche Kombinationen von Intra- (2D) und Intergitter- (3D) Messungen sind in verschiedenen Konfigurationen möglich.
 - b. 14 Georadar-Bohrlöcher an den Aussenrändern (Intervall = 1 m) und ein Radarschlitten (installiert an der Beregnungsanlage) ermöglichen Messungen mit diversen GPR-Antennen im Frequenzbereich 30-1500 MHz (mono-/bistatisch). Die Bohrlochantennen können für Transmissions-(tomografisch, zwischen Bohrlochern sowie zwischen den Bohrlochern und der Oberfläche) und Reflexions-(Intra-Flächen) Messungen eingesetzt werden. Die Messungen werden mit einer GPR-Multikanalanlage durchgeführt, die auch CMP-Messungen erlaubt.

- c. 3 parallele Profile von TDR und Tensiometer (je 9 Sensoren, Intervall = 0,2 m) horizontal im Bodenmodell installiert und an Computer angeschlossen. Röhren zwischen Monitoringraum und Bodenkompartment erlauben die Wartung, insbesondere an den Tensiometern.

1.1.2 Übersicht zu den erfolgten logistischen und baulichen Maßnahmen

Vorbereitungen des Baugeländes (angrenzend an den Uni Campus):

Geländebesichtigung, Rasenschneiden, Gelände einebnen, Bauwerkpositionieren, Absperrung des Baugeländes, Tor einsetzen, LKW Zufahrt, Einmessen und Planieren. Die Anlage wurde auf dem höchsten Punkt des Geländes errichtet damit eine Grundwasserbeeinflussung des Messkörpers ausgeschlossen werden kann.

Logistische und infrastrukturelle Arbeiten:

Installieren von Wasser-, Abwasser-, Strom- (220/360V), Telefon- (Mobil/Festnetz) und Netzwerkanschluss, Fernmelder, Hochwasserwarnanlage

Ingenieurbauliche Arbeiten: (Bauaufsicht durch die Universität Kiel bzw. das Land Schleswig-Holstein)

- Statische Berechnung (von einem Ingenieurbüro) für die Fundament- und Wanddimensionen (Seitendruck) vom Modellkörper und Monitoringraum
- Planung und Überwachung des Aushubs für den Modellkörper und Monitoringraum,
- Planung der unteren Randbedingung (Unterdrucksystem und Abflusssystem)
- Materialauswahl für untere Randbedingung
- Auswahl geeigneter Baustoffe (Wände des Modell- und Abflußraums): elektrisch leitend, hydraulisch nicht durchlässig, leicht zu verarbeiten - Leitfähigkeit verschiedener Gesteine wurde im Labor untersucht
- Konstruktion eines geeigneten Abflusssystems (automatische Erfassung des Durchflusses, dabei gleichzeitig Anlegen eines Unterdrucks möglich); s. auch untere Randbedingung
- Konstruktion der Beregnungsanlage und Auswahl der Düsen.

Bauarbeiten:

- Aushub von Baugruben für Modellkörper und Abflussraum inkl. Ringdrainage, Fundamente und Abflussrohre
- Erstellen der Ringdrainage unter dem gesamten Baukomplex

- Erstellen der Fundamente
- "Grobe" Umsetzung der Unterdruck-Randbedingung im Modellkörper
- Verlegen der Abflussrohre vom Modellkörper zum Abflussraum
- Verlegen der Abflussrohre vom Abflussraum zur öffentlichen Regenwasserdränage
- Erstellen der Mauern um den Modellkörper und Abflussraum
- Verfüllen der Restgruben mit Filter-/ Bodenmaterial und Sensoren
- Beseitigung von Wassereintrittsstellen durch Verbesserung des Regenwasserabflusses in der Umgebung des GeoModel (Pflasterung des Eingangsbereiches, Verlegung der Regenrinne)

Werkstatt-/ Klempnerarbeiten:

- Wasser-, Abwasseranschlüsse
- Beregnungsanlage (Durchflussmessung, Montage der Düsen, Rohre, etc.)
- Abflussanlage
- Pumpen (Beregnung, Abwasser, Unterdruck, Abflussmessung)

Elektrische und elektrotechnische Arbeiten

- Stromanschlüsse (220, 360 V), Licht, Telefon, Netzwerk, Datenleitungen
- Beleuchtung und Steckdosen für Halle, Monitoring-, Computer- und Lagerraum (geeignet für Außen- und Feuchträume)
- Anschließen von Anlagen zur: (1) Regelung der Beregnungsmenge (Druckregelung), (2) Steuerung des Radarschlittens, Montage der Motoren, (3) Automatische/manuelle Erfassung der Abflussmenge/Rate, (4) Pumpen

Allgemeine Werkstattarbeiten/Auftrag an Dritte /Hiwi-Arbeiten:

- Bau der Beregnungsanlage (Regeneinheit, Gerüst, Wasservorratstank und Wasserzufuhr, seitliche Wasser Auffangvorrichtung und Ableitung)
- Bau der Elektrodengitter und des Schaltkastens für die Geoelektrik
- Bau des Messschlittensystems für das Georadar, Auswahl geeigneter Motoren
- Bau des Abflussmesssystems
- Bau und Montage des Unterdrucksystems
- Montage und Errichtung der Fertighalle (im Auftrag des Herstellers wegen Garantie)
- Abflussraum ausrüsten (Dach, Treppe, Gelände, Fangcontainer, etc.)
- Computerraum mit Glaswand und 3 Arbeitsplätzen ausrichten
- Elektroden im Sand einarbeiten
- Kabelschächte eingraben
- Kabel für Geoelektrik verlegen

- Schaltkasten Geoelektrik anschließen
- Großraumheizgerät (Gasheizung)
- Installation der Heizungsanlage im Monitoringraum (Frostfreiheit wird gewährleistet zum Schutz der Unterdruckapparatur)
- Computerinstallation, Netzwerkanschluss, Telefonanschluss
- Anbringen einer Abdeckplane über dem Monitoringraum und Anstrich der Holzgeländer
- Installation des Alarmgebers an der Tauchpumpe im Ablaufschacht und Inbetriebnahme der Alarmanlage zum Schutz vor Wasserüberlauf aus dem Ablaufschacht
- Inbetriebnahme der Anlage und Testen verschiedener Komponenten

Benötigtes Material:

- Feinsand (40 m³), Kies (9 m³) in 4-8, 8-16, 16-32 mm Körnungen, 70 m³ Füllsand, Zementplatten
- Wandsteine (Kellerformsteine) für das Modell (5x3x2,5 m³, Dicke=24 cm), Monitoringraum (4x3x3 m³, Dicke=36 cm), Zement, Kies
- Computerraum/Baucontainer (6,5x2,5x2,8 m³) ausgestattet Glasfenstern für optische Kontrolle
- Abflusssystem (Durchflusszähler, Schläuche, (Drainage-)Rohre, Steuerelektronik, Datenleitungen, Container, Sammler)
- Unterdrucksystem (Magnet-)Ventile, Manometer, (perforierte) Schläuche, Unterdruckgastank, Vakuumpumpe, PVC-Kleber, Dichtung)
- Beleuchtung (Strahler, Steckdosen, (Erd-)kabel, Sicherungen)
- Diverse Teile für Beregnungsanlage (Ketten, Motor, Sprühdüsen, Rohre, Vorratstank, Durchflusszähler, Druckregelung, Abflussrinnen, Auffangbehälter)
- Verschiedene Werkzeuge, Wasserhahn, Holzpfähle

Wissenschaftliche Geräte:

- TDR: 9 Sensoren mit zugehöriger Soft- und Hardware (Logger, Kabel, Rohre, ...)
- Tensiometer: 9 Sensoren mit zugehöriger Soft- und Hardware (Logger, Kabel, Rohre)
- 6 Elektrodengitter (mehr als 2200 Elektroden mit Kabeln, Steckern, Schuhen, Bindern, Schildern, Schrumpfschläuchen etc.), s. Tabelle 1.
- Geoelektrischer Schaltkasten mit mehr als 2200 Ein- und Ausgangsanschlüssen der einzelnen Elektroden und Kabelverbindungen
- Radarschlitten (Gerüst, Motor, ...)

- Geoelektrik-, Georadarapparatur, Verbindungskabel, Steuerkasten mit De-/Encoderrelays und Zubehör
- 3 Computer, Notebook (Logger), verschiedene Datenspeicherträger (Zip-, MO-Laufwerke, USB sticks, etc.)

Großbaugeräte:

Bagger, Kran, Lader, Bauwagen, Förderband, Betonmischer, LKW Transporter

1.2 Wissenschaftliche Ergebnisse (geophysikalische und hydrologische Messungen)

Auf Grund der umfassenden Messungen werden wir hier die wichtigsten Ergebnisse in Stichpunkten erwähnen. Weitere Details können aus den zugehörigen Veröffentlichungen (im Anhang beigelegt) entnommen werden.

Entsprechend der Ziele dieses Vorhabens werden wir zuerst die Erprobungsphase der Hardware und Software und die entwickelten Methoden beschreiben. Im weiteren Verlauf berichten wir über weitere wissenschaftlichen Anwendungen im Rahmen des EU-Projekt „WATERUSE“.

1.2.1 Geoelektrische Messungen

- Anfangsarbeiten vor der Inbetriebnahme (*s. Anhang 4, 5, 15, 25, 27*)
 - Technische Überprüfungen, Funktionalitätstest der Elektroden (Erdung) an allen Gittern (Seitenwände, Boden), Überprüfung der einzelnen Anschlüsse, Nummerierung und Zuordnung im Boden und an dem Schaltkasten
 - Beseitigung von Ankopplungsproblemen, lockeren Verbindungen, lockerem Bodenmaterial usw.
 - Evaluierung der Messwertqualität: Testen der Wiederholbarkeit und der Reziprozität von Messdaten. Die Messwertabweichung ist <3%.
- Überprüfung der Homogenität des eingefüllten Bodensandes aus den invertierten Widerstandsmodellen in 2D und 3D (*s. Anhang 5, 15, 25*).
- Abschätzung der Verteilung der Bodenfeuchte im GeoModel aus einer empirischen Beziehung elektrischer Widerstand-Wassergehalt, die in-situ und im Labor für den Feinsand des GeoModels bestimmt wurde (*s. Anhang 5, 15, 25*).

- Entwicklungen von Messalgorithmen und Abstimmung der Messsoftware für verschiedene Anwendungen im Feld und Labor. Diese Entwicklung bildet einen Teil von „Deliverable D2“ für das EU-Projekt. Die Messanordnungen wurden u.a. bei Feldmessungen im Sommer 2002 in Andria (Italien) und im Sommer 2003 in Rio Frio (Portugal) eingesetzt (s. *Anhang 7,9,10,11,12,13,14,16,18,19,21, 28*).
- Entwicklung von neuen Messalgorithmen zur Aufnahme von 2D und 3D Messungen innerhalb der einzelnen Elektrodengitter (Intra-Gitter) und zwischen den jeweiligen Gittern (Inter-Gitter). Widerstandmessungen (von allen Elektrodengittern) wurden isochronisch mit gleicher Stromspeisung (an 2 Elektroden) parallel an 6 Kanälen durchgeführt, um die Messzeiten stark zu minimieren und die zeitliche Auflösung des Monitoring von Prozessen zu verbessern (s. *Anhang 20, 25, 28*)
- Auswertung mit 2D und 3D Inversionen mit Hilfe der für das EU-Projekt entwickelten Software und Abschätzung der Inhomogenitäten des Bodenwassergehalts (s. *Anhang 5, 25, 28*)
- 3D Inversion von kombinierten umfassenden Datensätzen aus allen möglichen Messkombinationen und Konfigurationen in einer Auflösung von 0,625 cm (s. *Anhang 20, 25*).

1.2.2 GPR (Ground Penetrating Radar) Messungen

- Antennentest, Messungen mit unterschiedlichen Frequenzen ($f = 100, 200, 400, 500, 900, 1500$ MHz) in verschiedenen Auflösungen (s. *Anhang 5, 15, 20, 25*)
- Vergleich der Radargeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Frequenzen und Studie der Dispersionseffekte, (s. *Anhang 7, 25*)
- Erarbeitung eines Messalgorithmus zur effizienten Durchführung von tomographischen Transmissionsmessungen (s. *Anhang 3, 12, 28, 31, 32*)
- Durchführung der Transmissionsmessungen (Sender und Empfänger in getrennten Bohrlöchern bzw. Sender im Bohrloch und Empfänger an der Oberfläche) und Reflexionsmessungen (Sender und Empfänger in einem Bohrloch). Dafür wurde weitere 2 bistatische Bohrlochantennen ($f=100$ MHz) und 2 Mehrkanalapparaturen beschafft und verwendet (s. *Anhang 20, 25*).
- Überprüfung und Minimierung des Einflusses von Störeffekten durch Reflexionen am metallischen Hallendach (s. *Anhang 25*)

1.2.3 Wasserausfluss

- regelmäßige Überwachung des Wasserausflusses der verschiedenen Kompartimente am Boden des Modells

1.2.4 Laboranalysen an Bodenproben

- Bestimmung der mittleren Dichte ($1,5 \text{ g/cm}^3$), effektiven Porosität (28 %) und Siebanalyse zur Bestimmung der Korngrößenverteilung und zur Auswahl der optimalen Bodenmaterialgröße (Feinsand), (s. *Anhang 2*)
- Erstellung einer empirischen Beziehung zwischen elektrischem Widerstand und Wassergehalt und zwischen Radargeschwindigkeit (für $f = 100, 200, 400, 500, 900, 1500 \text{ kHz}$) und Wassergehalt für den Sättigungsbereich 0-100% und Untersuchung der Dispersion in GPR-Daten (s. *Anhang 4, 5*)
- Verwendung des GeoModel-Feinsandes für Laborexperimente mit Bepflanzung, Beobachtung des kurzfristigen (täglichen) und langfristigen (saisonalen) Wasserkonsums einer Hibiskuspflanze mit Hilfe geophysikalischer und hydrologischer Methoden (*Anhang 17, 21, 26*).
- Radarreflexionsmessungen an Wurzeln und wurzelähnlichen Materialien (*Anhang 21, 26*).

1.2.5 Wissenschaftliche Ergebnisse im Zusammenwirken mit dem EU-Projekt „WATERUSE“

Das GeoModel ist ein wichtiger Bestandteil des EU-Projektes WATERUSE und somit notwendig für die Realisierung der Projektziele. Im GeoModel wurden Geräte für die Feldanwendungen optimiert und Methoden entwickelt. Für uns (und andere Partner des Projektes) diente das GeoModel dem Gerätetest, der Bewertung der Datenqualität und Messgenauigkeit, der Erstellung von Hard-/Software für die Datenakquisition und Feldanwendung und der Entwicklung von hochauflösenden Kartierungs- und Monitoringsmethoden (3D/4D). Im folgenden werden wir einige wichtige Ergebnisse der Anwendungen auf verschiedenen Standorten innerhalb des WATERUSE-Projektes zusammenfassen:

- Untergrundkartierung an mehreren EU-Standorten insbesondere der IOP (intensive observation periods) Standorte, eine Olivenplantage in Andria (Süd-Italien) und ein Korkeichen-Montado in Rio Frio (Portugal): (s. *Anhang 9, 11, 18*)
- Erstellen empirischer petrophysikalischer Beziehungen zwischen dem Bodenwassergehalt und dem elektrischen Widerstand bzw. der Radar-Geschwindigkeit auf Basis von Gleichungen von Archie, Topp, CRIM usw. In diesen Experimenten haben wir einen verfeinerten Ansatz, basierend auf den hydrologischen Hintergrundstudien im GeoModel, eingesetzt. Die petrophysikalischen Beziehungen wurden durch verschiedene Infiltrationsexperimente in-situ und im Labor an diversen Bodenproben erstellt. Die Einflüsse verschiedener Faktoren (z.B. Temperatur, Wasserionengehalt, Disperionseffekte verschiedener Radarfrequenzen) wurden in den Feld- und Labormessung untersucht und berücksichtigt. (s. *Anhang 7, 9, 11, 18, 21, 27*)
- Bestimmung des statischen Bodenwassergehaltes an verschiedenen Standorten aus empirischen Gleichungen. Geoelektrische Untergrundmodelle/Sektionen wurden in Bodenwasserverteilung umgerechnet. (s. *Anhang 7, 9*)
- Monitoring der dynamischen Fließprozesse im Boden wie (präferenzialer) Wasserfluss in verschiedenen Böden, Wasserentnahme (Wasserverbrauch) durch Wurzelzonen. (s. *Anhang 7, 9, 11, 18, 21, 27*)
- Kartierung der Wurzelzonen an verschiedenen europäischen Standorten (s. *Anhang 7, 8, 9, 13*)
- Monitoring des Wasserhaushaltes in der Wurzelzone und Untersuchung des Tages- und Saisonalverhalten sowie des Einflusses der Temperatur (s. *Anhang 17, 21, 26*).
- Entwicklung eines neuen verbesserten Tomographie-Algorithmus (Software "SeismoRad") für die Inversion von Seismik- und Radardaten. Das Programm kombiniert Methoden der Seismiktomographie und Finiten-Differenzen für die

Inversion multipler Laufzeitdaten. Im Gegensatz zu den konventionellen Verfahren berücksichtigt unsere Methode gekrümmte Strahlwege, die die realistischen Gradientmedien des Untergrunds repräsentieren. In mehreren numerischen und Labor-Tests zeigen unsere Methode eine bessere Auflösung als die konventionellen Verfahren. Wir haben die Methode an der Wurzelzone einer Pappel in Kiel angewendet und konnten eine klare negative Geschwindigkeitsanomalie in der Wurzelzone kartieren. Diese reflektiert einen hohen Wassergehalt (aus dem Bodenporenwasser und der Wurzelfeuchte zusammen). Der SeismoRad-Algorithmus kann für die hochauflösende Kartierung hydrologischer und biologischer Heterogenitäten in der oberflächennahen Zone sowie bei kleinräumigen Anomalien in verschiedenen Untersuchungsgebieten, z.B. Archäologie, Geotechnik, Ingenieur- und Umweltgeophysik angewandt werden. (*s. Anhang 3, 32*)

- Entwicklung eines neuen Multielektroden-Ringarrays zur elektrischen Abbildung der Innenstruktur von Baumstämmen. Das Ringarray aus Feinelektroden (Gel oder Edelmetall) wird um den Umfang eines Baumstammes sehr vorsichtig im Kontakt mit dem Holzgewebe angebracht. Der Inversionsalgorithmus wurde für perfekte und nichtperfekte Zylindergeometrien entwickelt. Diese neue Methode wurde sowohl an numerischen Modellen als auch an geschnittene Stammscheiben im Labor getestet und später an mehreren Baumarten angewandt. Die Ergebnisse zeigen, dass wir eine robuste, schnelle und nahezu zerstörungsfreie (baumschonende) Methode zur 2D Kartierung der Ringstruktur und deren Feuchte weiterentwickelt haben. Die Methode kann die Infektionen innerhalb des Baumes gut in 2D auflösen und daher für Bauminspektionen ohne Bohrungen verwendet werden. Vielversprechende Ergebnisse erwarten wir bezüglich einer der 3D Kartierung und Anisotropie-Analyse des Holzgewebes (*s. Anhang 7, 8,9, 10, 11, 13, 16, 21, 30*).

1.2.6 Öffentlichkeitsarbeit/ Arbeitstreffen

- Posterpräsentation des GeoModels und der Arbeitsmethoden beim "open day" zur Information der interessierten Bevölkerung und Fachpublikum im Rahmen des EU-Projektes WATERUSE während der Feldmessungen in Portugal (sieben Poster), 29.6.2003

- Präsentation des GeoModel während der 14. Tagung für Ingenieurgeologie in Kiel (26.-29. März 2003)
- Präsentation des GeoModels durch 2 Faltblätter im Jahr der Geowissenschaften 2002
- Nutzung des Modells durch unsere EU-Partner und andere Wissenschaftler (Postdoktoranden, Doktoranden) für Experimente
- Regelmäßige Besprechungen mit der Fa. GeoHires und gemeinsame Experimente am GeoModel
- Nationale (INTERURBAN-Projekt, TU-Berlin) und internationale (Italien, Brasilien) Anfragen und Erfahrungsaustausch zur Konstruktion bzw. zu gemeinsamen Experimenten
- Die einzigartige Forschungsinfrastruktur des GeoModels ist eine Grundlage eines neuen DFG-Antrages mit der Fachabteilung Hydrologie und Wasserwirtschaft (CAU Kiel) zur Beobachtung der Wasserentnahme durch Wurzeln.

2 Voraussichtlicher Nutzen (Verwertbarkeit i. S. des Verwertungsplanes)

Unser Großversuchsmodell steht für alle Tests von neuen Instrumenten und Verfahren zur Datenakquisition, Bearbeitung und Auswertung zur Verfügung. Hard- und Software zur Feldanwendung, z.B. für Georadar-Tomographie oder für integrative 3D-Inversionen der elektrischen Widerstände haben ein breites Anwendungsfeld. Für bestimmte Fragestellungen der Kartierung und Überwachungen wird verschiedene Hardware und Software entwickelt, getestet und evaluiert, z.B. Feldarrays von Elektrodenprofilen und Gittern, Radarschlitten und Konfigurationen verschiedener Elektroden und Sender-/Empfänger-Antennen. Für bessere Auflösungen mit der Tiefe können Messkonfigurationen der Multielektroden aus Oberflächenverteilung und vergrabenen Elektroden (vertikaler Elektrodenprofil) verwendet werden.

Die Bilanzierung der Wasserflüsse in verschiedenen Böden und die detaillierte Untersuchung der Wasseraufnahme durch Wurzeln dienen der besseren Erkundung von Kontaminationen einerseits und der notwendigen Abschätzung der Bewässerung in Landwirtschaft und Forst andererseits. So ist das Verständnis der verschiedenen Mechanismen des Wasserflusses im System Boden-Pflanze-Atmosphäre auch für praktische Anwendungen und Strategien einer nachhaltigen Wasserbewirtschaftung von entscheidender Bedeutung.

Zusammengefasst wird das einzigartige GeoModel, mit seinen vollkontrollierten Randbedingungen, verwendet für:

- Gerätetests
- Eichung von Geräten
- Entwicklung von neuen Methoden (Hard-/Software) ohne Skalierungsproblem, d.h. direkt anwendbar im Feld
- Methodenvergleiche
- Schulungs-, Praktikums- und Weiterbildungszwecke

3 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle

Nach unseren Informationen gibt es ein Großmodell für (Infiltrations)-Experimente in diesem Ausmaß (natürliche Skala, vollkontrollierte Randbedingungen, Ausrüstung an hydrogeophysikalischen Geräten, Variabilitäten und Funktionen) bisher nicht. Allerdings gibt es Lysimeter verschiedener Größe an verschiedenen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland, z.B. am Forschungszentrum in Jülich ($\varnothing = 2$ m, Höhe = 2,5 m, befüllt mit einem typischen Boden).

Weiterhin existieren zahlreiche halbkontrollierte Versuchsfelder und Strecken, die zur Erprobung neuer Verfahren und Technologien für Lösung nichtkonventionellen Probleme eingesetzt werden.

4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Veröffentlichungen:

1. Hagrey al, S. A. & Michaelsen, J., 2002. Hydrogeophysical soil study at a drip irrigated orchard, Portugal, *European Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 7, 75-93
2. Hagrey al, S. A., GPR mapping toluene infiltration in a sand model, in *8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, European Section*, pp. 4, Aveiro, Portugal, 2002.

3. Hanafy, S. M. & Hagrey al, S. A., GPR tomography for mapping soil moisture and roots, Extended Abstracts, in *8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, European Section*, pp. 4, Aveiro, Portugal, 2002.
4. Hagrey al, S. A., The full scale GeoModel at Kiel University for hydrogeophysical techniques, Extended Abstracts, in *8th Meeting Environmental and Engineering Geophysics, European Section*, pp. 4, Aveiro, Portugal, 2002.
5. Hagrey al, S. A., Rabbel, W., Meissner, R., Werban, U. & Ismaeil, A., The "GeoModel" at Kiel - A hydrogeophysical full scale model for Engineering Geology to study pore water, contamination and structure of soils, in *14th Conference on Engineering Geology*, edited by V. Feeser, pp. 2, Kiel, Germany, 2003.
6. Hagrey al, S. A., 2004. GPR-application for mapping toluene infiltration in a heterogeneous sand model, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **9**, 79-85
7. Hagrey al, S. A., Meissner, R., Werban, U., Ismaeil, A. & Rabbel, W., 2004. Hydro-, Bio- Geophysics, *The Leading Edge*, **23**, 670-674
8. Hagrey al, S. A. & Meissner, R., 2004. Botanical Problems studied by applied geophysics, *Mitteilungen der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, **2**, 2-8
9. Hagrey al, S. A., Meissner, R. & Ismaeil, A., Hydrogeophysical study at an olive farm, S. Italy, in *Near Surface 2004, 10th European Meeting Environmental and Engineering Geophysics*, pp. 4, European Association of Geophysicists and Engineers, Utrecht, The Netherlands, 2004.
10. Hagrey al, S. A., Meissner, R. & Ismaeil, A., Applied DC resistivity for tree trunks, in *Near Surface 2004, 10th European Meeting Environmental and Engineering Geophysics*, pp. 4, European Association of Geoscientists & Engineers, Utrecht, The Netherlands, 2004.
11. Hagrey al, S. A., Werban, U. & Ismaeil, A., Hydrogeophysical investigations of a cork oak habitat, Portugal, in *Near Surface 2004, 10th European Meeting Environmental and Engineering Geophysics*, pp. 4, European Association of Geoscientists & Engineers, Utrecht, The Netherlands, 2004.

Veröffentlichungen in Tagungsbänden / bei Workshops / Faltblätter:

12. Hanafy, S., Hagrey al, S. A. & Meissner, R., Application of GPR tomography for mapping soil moisture heterogeneities, in *XXVII General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts Vol.4*, European Geophysical Society, Nice, France, 2002.
13. Hagrey al, S. A., Ismaeil, A. & Meissner, R., Geophysical experiments at tree sites, in *XXVII General Assembly of the European Geophysical Society, Geophysical Research Abstracts Vol.4*, European Geophysical Society, Nice, France, 2002.
14. Hagrey al, S. A., Ismaeil, A., Meissner, R. & Rabbel, W., Hydro- and bio-geophysical studies at an Olive farm, Canosa, Italy, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts Vol. 5*, European Geophysical Society, Nice, France, 2003.
15. Hagrey al, S. A., Ismaeil, A., Werban, U., Meissner, R. & Rabbel, W., The "GEOMODEL" at Kiel University: A hydrogeophysical full scale model to study pore water, contamination and structure of vadose soils, in *EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Geophysical Research Abstracts Vol. 5*, European Geophysical Society, Nice, France, 2003.
16. Hagrey al, S. A., Meissner, R., Ismaeil, A. & Werban, U., Geoelektrische Abbildung von Baumstämmen, in *64. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, pp. 2, Berlin, 2004.
17. Hagrey al, S. A. & Werban, U., Hydrogeophysikalische Beobachtung des Wassergehaltes im Wurzelraum einer Hibiscuspflanze (*Hibiscus rosasinensis*), in *64. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, pp. 2, Berlin, 2004.
18. Hagrey al, S. A., Werban, U., Michaelsen, J. & Ismaeil, A., Hydrogeophysical investigation of water fed of a cork oak site in Portugal during the dry summer, in *64. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, pp. 2, Berlin, 2004.
19. Hagrey al, S. A., Werban, U., Michaelsen, J. & Ismaeil, A., Hydrogeophysikalische Untersuchung der Wasserversorgung eines Korkeichenstandortes in Portugal während der Trockenphase im Sommer, in *Landnutzungsbedingte Bodenheterogenität und ihre*

Folgen - Jahrestagung 2004 des Arbeitskreises BodenGeographie (AK BoGeo), pp. 4, Kiel, 2004.

20. Hagrey al, S. A., Werban, U., Meissner, R., Rabbel, W. & Ismaeil, A., High resolution hydrogeophysical techniques, in *Workshop on Water Use of Woody Crops*, pp. 10, Ílhavo, Portugal, 2004.
21. Hagrey al, S. A., Werban, U., Meissner, R., Rabbel, W. & Ismaeil, A., Hydrogeophysics of Soils and Trees, in *Workshop on Water Use of Woody Crops*, pp. 11, Ílhavo, Portugal, 2004.
22. Thoss, H., Werban, U., Lück, E., Kuhnert, M., Günthner, A. & al Hagrey, S. A., Geophysikalische Methoden zur räumlichen Erfassung hydrologisch relevanter Bodeneigenschaften, in *Tag der Hydrologie 2004 "Wasser- und Stofftransport in heterogenen Einzugsgebieten"*, pp. 4, Universität Potsdam, PIK, GFZ, UFZ, Fachgemeinschaft "Hydrologische Wissenschaften" in der ATV-DVWK, Potsdam, 2004.
23. Working Group: SOIL-, HYDRO- AND BIOGEOPHYSICS, 2002, Das neue GeoModel an der Universität Kiel, *Faltblatt zum Jahr der Geowissenschaften 2002*.
24. Working Group: SOIL-, HYDRO- AND BIOGEOPHYSICS, 2002, Wasser, Das GeoModel, Eine Versuchsanlage für den Wassertransport in Böden und geophysikalisches Monitoring, Skala 1:1, *Faltblatt zum Jahr der Geowissenschaften 2002*.
25. Working Group: SOIL-, HYDRO- AND BIOGEOPHYSICS, 2004, GeoModel - GPR velocity tomography and 3D resistivity mapping: *Poster at the Workshop on WATERUSE of Woody trees, May 20th and 21st, Ílhavo, Portugal*
26. Working Group: SOIL-, HYDRO- AND BIOGEOPHYSICS, 2004, Water content in the root zone of a hibiscus plant: *Poster at the Workshop on WATERUSE of Woody trees, May 20th and 21st, Ílhavo, Portugal*
27. Bericht zum Teilprojekt D1 des EU-Projekt WATERUSE (Deliverable D1): Full scale analog tank model for testing instruments and techniques for data acquisition, processing and interpretation.

28. Bericht zum Teilprojekt D2 des EU-Projekt WATERUSE (Deliverable D2): Hardware and software for field application of arrays, GPR tomography program and 3D resistivity inversion.

29. Hagrey, S. A. al & Werban, U., 2004. Hydrogeophysical observations of root zone moistures, a hibiscus plant: *Dept. Geophysics, University of Kiel*, 4p.

Eingereichte Veröffentlichungen:

30. Hagrey, S. A. al, 2004, Dc resistivity imaging of some wooden tree trunks: submitted to *Near Surface Geophysics, European Association of Geoscientists and Engineers*.

31. Hanafy, Sh. M. and Hagrey, S. A. al, 2003, GPR Pulse tomography Technique Tested for soil moisture heterogeneity: submitted to *Geophysics*.

Dissertationen:

32. Hanafy, Sh. M., 2002, GPR/seismic tomography for delineating subsurface structures: Ph.D. thesis, Cairo University.

33. Werban, U., 2005/06, Water in the soil – descriptions in the system soil-plant, Ph.D. thesis, Kiel University, Kiel, in preparation

Zahlreiche Vorträge und Seminare an der Universität Kiel und anderen europäischen Universitäten (Partner des EU-Projektes WATERUSE).

III. kurzgefasster Erfolgskontrollbericht

1 Beitrag zu förderpolitischen Zielen

Das GeoModel ist eine einzigartige Forschungsinfrastruktur, dient der Entwicklung und dem Test neuer hydrogeophysikalischer Methoden und Geräte und ist somit wichtiger Beitrag zur Grundlagenforschung. Es dient auch der Weiterentwicklung von Verfahren zur Kartierung und Überwachung von Grundwasser und von Bodenwasser in der teilgesättigten Zone (z.B. Verschmutzung) und trägt somit zur Sicherung und der nachhaltigen Nutzung der Ressource Wasser bei.

Durch verschiedener Beiträge zur Öffentlichkeitsarbeit an unserer Universität (z.B. jährlicher „Tag der offenen Tür“, Jahr der Geowissenschaften 2002, zahlreiche Besucher unseres Instituts) wurde das GeoModel einem breiten Publikum gezeigt, welches für die neuen Möglichkeiten der Anlage großes Interesse und die Akzeptanz zeigte.

2 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse des Vorhabens, erreichte Nebenergebnisse, wesentliche Erfahrungen

Das GeoModel (5 m x 3 m x 2 m) ist ein Großversuchsmodell für Vollskala-Simulationen der vadosen Bodenzone und somit eine Brücke zwischen skalierten Labormodellen (typisch 1 m³) und Feldversuchen (einige km³). Es besteht aus dem Bodenmodell, Computerraum und Monitoringkammer. Eine Beregnungsanlage ist für Simulation verschiedener Bewässerungsszenarien (Intensitäten und Kontaminationen) installiert. An der Modellbasis befindet sich eine Filterkiesschicht, die in verschiedene Segmente für das Monitoring der lateraler Verteilung des (präferenziellen) Flusses geteilt ist. Eine eigenentwickelte Unterdruckapparatur dient dem Ausgleich hydraulischer Kapillarsperren zwischen dem Filterkies und dem aufliegenden Feinsand (Körnungssprung).

Im GeoModel können mit Hilfe verschiedener Methoden (Goelektrik, Georadar, TDR, Tensiometer und Tracer) hochauflösende 3D Experimente stattfinden. Das GeoModel stellt eine neue, einzigartige Möglichkeit für die Quantifizierung des Bodenwasserhaushaltes dar, dies beinhaltet die Untersuchung des Wassergehaltes, (präferenzielle) Fließwege, Wasserentnahme durch die Wurzel und die Auflösung feiner Heterogenitäten, wie Strukturen, Objekte und Wurzeln. Das GeoModel ist essenziell für die Entwicklung hochauflösender integrativer 3D Kartierungsverfahren, für die Instrumenteneichung, für Lehr- und Praktikumszwecke und für Geotechnik-, Archäologie- und Umwelt-Experimente.

Das Projekt hat ein technisches Hauptziel: die Konstruktion eines verbesserten modernen Großversuchsmodells (GeoModel), um wissenschaftliche Ziele innerhalb des EU-Projektes WATERUSE zu realisieren. Dies beinhaltet die Entwicklung von Methoden (Hard- und Software) zur Untersuchung von statischen und dynamischen Wasserhaushaltsgrößen in der teilgesättigten Bodenzone einschließlich der Wurzelzone. Im Folgenden geben wir eine zusammenfassende Übersicht über die wichtigsten Ergebnisse des BMBF-Projektes und des EU-Projektes WATERUSE. Detaillierte Erkenntnisse können aus der beigefügten Literatur entnommen werden.

- a. Konzeption, Konstruktion und Hardware-Ausstattung einer verbesserten Großmodell-Version „GeoModel“ (s. *Anhang 4, 5, 15, 25, 27*) mit:
 - o verfeinerter Messgitterauflösung

- annähernder Feldrandbedingung (Dirichlet), d.h. entwickelte Methoden und Geräte werden im Feld direkt verwendet ohne Skalierungsprobleme
 - Konstruktion einer selbstentwickelten Unterdruckapparatur zum Ausgleich der hydraulischen Sperren, d.h. Verhinderung möglicher Verfälschung von Fließwegen
 - Mechanisierung und Automatisierung der meisten Messungen, bessere Auflösung und weniger Aufwand
- b. Planung und Durchführung von geoelektrischen 3D Messungen im GeoModel und Inversion der Messergebnisse (*s. Anhang 5, 25*)
- c. Anwendung der 3D-Geoelektrik Mess- und Inversionsalgorithmen (siehe b.) bei Feldmessungen zur Kartierung und zum Monitoring (bspw. präferenzierter Fluss des Wassers und Wasserentnahme durch Wurzeln) der heterogenen teilgesättigten Zone (*s. Anhang 7, 8, 11, 28, 32*)
- d. Planung und Durchführung hochauflösender GPR Messungen, sowohl von der Oberfläche als auch in Kombination mit den Bohrlöchern des GeoModels (*s. Anhang 5, 25*)
- e. Entwicklung eines Algorithmus zur Inversion von Radartomographiemessungen (siehe c.) und Anwendung, Test und Evaluierung der entwickelten Software „SeismoRad“ (*s. Anhang 3, 32*)
- f. Erstellen empirischer petrophysikalischer Beziehungen zwischen Bodenwassergehalt und elektrischem Widerstand bzw. Radar-Geschwindigkeit auf Basis der Gleichungen von Archie, Topp und CRIM für das GeoModel und verschiedene Standorte (*s. Anhang 7, 9, 11, 18, 21, 27*)
- g. Bestimmung des statischen Bodenwassergehaltes an verschiedenen Standorten aus den empirischen Gleichungen, die für den jeweiligen Standort entwickelt wurde (*s. Anhang 7, 9*)

In Hinblick auf die komplexen Fragestellungen der Beschreibung von Wasserflüssen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre fanden in unserer Arbeitsgruppe weitere Versuche und Entwicklungen statt, die als Voraussetzung für zukünftige Projekte im GeoModel gelten.

Dazu zählen:

- h. das Monitoring des Wasserhaushaltes in wurzelbeeinflussten Böden, dabei speziell die Untersuchung des Tages- und Saisonal-Verhaltens sowie der Einfluss von Licht und Temperatur (*s. Anhang 17*)

i. die Abbildung der Innenstruktur vom Baumstämmen und die Entwicklung eines Multielektroden-Ringarray (s. *Anhang 7, 8,9, 10, 11, 13, 16, 21, 30*)

Alle diese Arbeiten wurden auf mehreren Konferenzen/Workshops präsentiert und in verschiedenen renommierten Journalen publiziert bzw. zur Publikationen eingereicht (s. Publikationsliste).

Wesentliche Ergebnisse sind auf unserer Webseite (<http://www.ifg.uni-kiel.de/Ingenieurgeophysik>) dokumentiert und für interessierte Dritte zugänglich.

3 Fortschreibung des Verwertungsplanes

Das GeoModel steht der Universität Kiel und die gesamte Forschungsgemeinschaft im In- und Ausland auch weiterhin für Experimente und Messungen zur Verfügung. Angestrebt sind vor allem Kooperationen mit den Fachbereichen Hydrologie, Wasserwirtschaft und Botanik, um Wasserhaushalt und Prozesse in der teilgesättigten Zone mit und ohne Pflanzenwurzel (Bodenwasserfluss, Wasserentnahme durch die Wurzeln) nicht nur geophysikalisch zu beobachten, sondern um auch geeignete hydrologische Modellierungsalgorithmen anzuwenden.

Es wird angestrebt, weitere geophysikalische Methoden im GeoModel zu testen und weiterzuentwickeln, da die vollkontrollierten Randbedingungen Voraussetzung zur Evaluierung neuer Mess- und Auswertemethoden sind.

Eine ganz neue Untersuchungsart ist z.B. die Seismo-Elektrik. Durch Messungen im Großmodell soll beispielsweise untersucht werden, welche Information in seismo-elektrischen Signalen steckt, d.h. welche Untergrundparameter die Signalstruktur in welcher Grade beeinflussen. Insbesondere soll der Einfluss von Porosität, hydraulischer Leitfähigkeit und Wassersalinität untersucht werden. Die seismo-elektrischen Messungen werden jeweils durch seismische und geoelektrische Messungen ergänzt. Durch seine Bauart erscheint das Kieler GeoModel für eine Untersuchung sowohl des Konversions- als auch des Abstrahlverhaltens seismo-elektrischer Signale geeignet. Für die Abstrahlung wird ein Dipolcharakter erwartet. Dies wurde bisher jedoch unseres Wissens experimentell nicht verifiziert. In Bezug auf das Konversionsverhalten wäre die Abhängigkeit der Amplitude, z.B. von der Porosität oder Permeabilität der fluidführenden Schicht, aber auch von der Salinität des Fluides von Interesse. Zur Durchführung entsprechender Experimente müsste ein konvertierender Horizont, z.B. eine Beregnungsfront oder ein wassergesättigter Störkörper, evtl. auch eine

Tonlinse, in das Modell eingebracht werden. Die seismische Anregung kann per Hammerschlag erfolgen, wobei die seismischen Signale in den vorgefertigten Bohrlöchern aufgezeichnet werden müssten, während die elektrischen Signale an den in den Boden und in die Wände eingelassenen Elektroden an der Oberfläche des Modellkörpers beobachtet werden.

4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

5 Präsentationsmöglichkeiten

Alle neu entwickelten Messmethoden und die Implementierung der Erfahrungen in Software wurden und werden einem breiten wissenschaftlichen Publikum bei Fachtagungen und in Fachzeitschriften präsentiert. Dabei wird auf die einzigartige Experimentieranlage "GeoModel" verwiesen, da sie Grundlage für neue Entwicklungen ist.

Weiterhin wurde die Konstruktion und der Baufortschritt des GeoModels in Vorträgen beschrieben und auf zahlreichen Postern dokumentiert (siehe Veröffentlichungen).

Viele unserer Gäste in der Abteilung Geophysik besichtigten das GeoModel und zeigten großes Interesse an gemeinsamen Experimenten. Auf der Webseite unserer Arbeitsgruppe kann man sich über die Konstruktion und über Experimente informieren.

Der Öffentlichkeit wurde das GeoModel bei den Veranstaltungen zum "Jahr der Geowissenschaften" und beim jährlichen "Tag der offenen Tür" der Universität vorgeführt.

6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Arbeiten erwiesen sich als umfangreicher und langwieriger als geplant. Durch die intensive Mithilfe der universitären Werkstätten und die finanzielle Unterstützung der Universität wurde jedoch der Bau und Installationen in einer vertretbaren Zeit fertig.

Literatur:

Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Transactions of the American Institute of Mining Engineers 146, 54-62.

Darcy, H., 1856. The Public Fountains of the City of Dijon, English translation by P. Bobeck, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa "Les fontains publiques de la ville de Dijon, Dalmont, Paris".

- Hagrey, S. A. al. & Müller, C., 2000. GPR-study of pore water content and salinity in sand, *Geophysical Prospecting*, 48, 63-85.
- Hagrey, S. A. al., Meissner, R. & Widmoser, P., 2000. Präferenzielle Fließwege – Ein Gemeinschaftsprojekt von Geophysik und Wasserwirtschaft an der Universität Kiel, *Wasser & Boden*, 1/2, 57-62.
- Hagrey, S.A. al., Widmoser, P. & Michaelsen, J., 2000. Geophysical and hydrological soil studies at peach orchards, Atalaia, I: Soil water flow at the study site of drip, *Extended Abstracts, 6th Ann. Mtg., Env. & Eng. Geophys. Soc., Eur. Sect., Bochum*, 4p.
- Hagrey, S.A. al., Widmoser, P. & Michaelsen, J., 2000. Geophysical and hydrological soil studies at peach orchards, Atalaia, II: Soil moisture regime with water stress and under ponding infiltration of dye tracer, *Extended Abstracts, 6th Ann. Mtg., Env. & Eng. Geophys. Soc., Eur. Sect., Bochum*, 4p.
- Hagrey, S. A. al. & Michaelsen, J., 1999. Resistivity and percolation study of preferential flow in vadose zone at Bokhorst, Germany, *Geophysics*, , 64, 746-753.
- Hagrey, S. A. al., Schubert-Klempnauer, T., Wachsmuth, D., Michaelsen, J. & Meissner, R., 1999. Preferential flow, first results of a full scale flow model, *Geophysical Journal International*, 138, 643-654.
- Hagrey S. A. al., Schubert-Kempnauer, T., Wachmuth, D., Michaelsen, J. & Meissner, R., 1998. Flow paths in a full scale model, *Extended Abstracts, 4th Ann. Mtg., Env. & Eng. Geophys. Soc., Eur. Sect., Barcelona*, 271-274.
- Hagrey, S. A. Al., Nies, M., Frank, A., Heincke, B. & Hartwigsen, H., 1998. Untersuchung zeitlicher Variationen der Bodenfeuchte mit geoelektrischen und bodenhydrologischen Methoden in Hohenschulen (Norddeutschland)- Erste Ergebnisse, VII Arbeitsseminar „Hochauflösende Geoelektrik“, Univ. Leipzig, 5p.
- Hagrey, S. A. al. & Michaelsen, J., 1996. Tracing soil water flow using resistivity and percolation methods at Bokhorst, Germany, *Extended Abstracts, 2nd Ann. Mtg., Env. & Eng. Geophys. Soc., Eur. Sect., Nantes*, 322-325.
- Hanafy, Sh. M., 2002. GPR/seismic tomography for delineating subsurface structures, Ph.D. thesis, Cairo University, Giza.
- Hanafy, Sh. & Hagrey S.A. al., 2002. GPR tomography for mapping soil moisture and roots, *Extended Abstracts, 8th Ann. Mtg., Env. & Eng. Geophys. Soc., Eur. Sect., Aveiro, Portugal*, 4p.
- Keller, G.V. & Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Inc.

- Kung, K-J.S., 1990a. Preferential flow in a sandy vadose zone, 1, Field observation, *Geoderma*, 46, 51-58.
- Kung, K-J.S., 1990b. Preferential flow in a sandy vadose zone, 2, Mechanism and implications, *Geoderma*, 46, 59-71.
- Michaelsen, J., 1995. Monitoring preferential leaching of herbicides at a tile drained field plot, Annual Meeting on Groundwater Contamination Research, Vingstedcentret 7-8 March 1995. Copenhagen, Danish Academy of Sciences, 197-208.
- Ritsema, C.J., Dekker, L.W., Hendricks, M.H. & Hamminga, W., 1993. Preferential flow mechanism in a water repellent soil, *Water Resources Research*, 29, 2183-2193.
- Schön, J., 1983. *Petrophysik*, Ferdinand Enke Verlag., Stuttgart, pp 214-286.
- Topp, G.C., Davis, J.I. & Annan, A.P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content. Measurements in coaxial transmission lines: *Water Resources Research*, 16, 574-582.