

## Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern

*Lysimeter – a Tool for Precisely Determining Water and Nutrient Balance Parameters*

W. BERGER, N. BÖTTCHER, W. DURNER, J. FANK, S. C. IDEN, U. JANSEN,  
Ch. LANTHALER, P. MAŁOSZEWSKI, Th. PÜTZ, Th. REIMANN, G. ROCK,  
H. RÜTZEL, M. SCHEITHAUER, I. SCHEUERING, A. STEINS, E. STENITZER,  
W. STICHLER, C. STUMPP, G. VON UNOLD & H. VEREECKEN

### Inhalt

	Seite
1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie für differenzierte Anwendungsbereiche und deren Einordnung in die Skalenproblematik (G. VON UNOLD) .....	93
1.1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie .....	93
1.2. Beschreibung von vier modularen Lysimeterkonstruktionen für verschiedene Anwendungen .....	95
1.2.1. Hydro-Lysimeter .....	95
1.2.2. Meteo-Lysimeter .....	97
1.2.3. Scientific-Field-Lysimeter .....	97
1.2.4. Agro-Lysimeter .....	99
2. Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung moderner Datengewinnungskonzepte (A. STEINS) .....	99
2.1. Datenerfassung und Steuerung .....	99
2.2. Fernwartung .....	101
2.3. Verwaltung von Messdaten .....	101
2.4. Intelligente Sensoren .....	102
3. Wägbare monolithische Feldlysimeter .....	102
3.1. Wägbare monolithische Feldlysimeter in Wagna: Messdatenerfassung und Auswertekonzepte (G. ROCK & J. FANK) .....	102
3.1.1. Einleitung .....	102
3.1.2. Datenerfassung .....	103
3.1.3. Datenmanagement .....	104
3.1.4. Datenauswertungskonzept .....	104
3.1.5. Diskussion und Schlussfolgerungen .....	106
3.2. Messergebnisse des Versuchsfeldes Wagna – ein komplexer Datensatz für die Modellerstellung und -validierung auf der Lysimeterskala (Ch. LANTHALER & J. FANK) .....	106
3.2.1. Einleitung .....	106
3.2.2. Das Forschungsfeld Wagna .....	106
3.2.3. Datensätze für die Modellentwicklung und -validierung .....	107

3.2.3.1. Atmosphäre .....	107
3.2.3.2. Ungesättigte Zone und Ackerbau .....	108
3.2.4. Diskussion und Schlussfolgerung .....	109
4. Hydrologische Modellierung auf der Lysimeterskala.....	109
4.1. Identifizierung von Heterogenitäten des Wassertransports in der ungesättigten Zone von Lysimetern (Ch. STUMPP, J. FANK, P. MAŁOSZEWSKI & W. STICHLER) .....	109
4.1.1. Einleitung.....	109
4.1.2. Material und Methoden .....	110
4.1.3. Ergebnisse und Diskussion .....	112
4.2. Schwerkraft- versus Unterdrucklysimeter – eine Simulationsstudie (E. STENITZER & J. FANK) .....	114
4.2.1. Einleitung.....	114
4.2.2. Material und Methoden .....	115
4.2.2.1. Lysimeterstation Wagna.....	115
4.2.2.2. Lysimeterstation Hirschstetten.....	116
4.2.2.3. Simulation.....	116
4.2.3. Ergebnisse.....	117
4.2.4. Diskussion und Ausblick.....	118
4.3. Bestimmung effektiver Parameter für die Modellierung des Wassertransportes auf der Lysimeterskala (W. DURNER, S. C. IDEN & U. JANSEN) .....	118
4.3.1. Einleitung.....	118
4.3.2. Material und Methoden .....	120
4.3.3. Ergebnisse und Diskussion .....	121
4.4. Modellierung des Bodenwasserhaushalts und des Tracertransportes auf der Lysimeterskala (U. JANSEN & W. DURNER) .....	123
4.4.1. Einleitung.....	123
4.4.2. Material und Methoden .....	123
4.4.3. Ergebnisse.....	124
4.4.4. Diskussion und Ausblick.....	127
4.5. Ansätze zur Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten und des Stickstoffumsatzes in Lysimetern mit dem Modellpaket CoupModel (v. 2.6) (N. BÖTTCHER, J. FANK & Th. REIMANN).....	127
4.5.1. Einleitung.....	127
4.5.2. Modellkonzept.....	127
4.5.3. Ergebnisse.....	128
4.5.4. Diskussion und Ausblick.....	130
5. Sickerwasserprognose .....	131
5.1. Abschätzung der Sickerwasserbeschaffenheit mittels Laborverfahren (Th. PÜTZ, W. BERGER, M. SCHEITHAUER & I. SCHEUERING).....	131
5.1.1. Einleitung.....	131
5.1.2. Material und Methoden .....	131
5.1.3. Ergebnisse.....	131
5.1.4. Diskussion.....	132
5.2. Validierung der Sickerwasserprognose mit den Materialien Hausmüllverbrennungsasche, Abbruchmaterial und PAK-belasteten Boden in Großlysimetern (Th. PÜTZ, H. RÜTZEL & H. VERECKEN) .....	134

5.2.1. Einleitung.....	134
5.2.2. Material und Methoden .....	135
5.2.3. Ergebnisse.....	136
5.2.4. Diskussion.....	139
Zusammenfassung (J. FANK, Zusammenstellung).....	140
Literatur.....	142
Summary (J. FANK, compilation) .....	145

## **1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie für differenzierte Anwendungsbereiche und deren Einordnung in die Skalenproblematik** (G. VON UNOLD)

### **1.1. Modulare Konzepte der Lysimetertechnologie**

Böden spielen wegen ihrer vielschichtigen Funktionen eine Schlüsselrolle bei den meisten ökosystemaren Forschungsprojekten und Umweltmonitoringaufgaben. Das Bodenwasser ist dabei das hauptsächliche Transportmedium für die Stoffverlagerung und der hauptsächliche Energieträger.

Daher ist es von entscheidender Bedeutung, Bodenwasser in seinem komplexen Verhalten zu kennen. Flüsse und Frachten, Retentions- oder Bindungspotentiale sind maßgebend für Untersuchungen zur Wasser-, Stoff- und Energiebilanz, zur Bewirtschaftungsoptimierung, zur Bewässerung, in der Forstwissenschaft, dem Grundwasserschutz und Grundwassermanagement, der Abschätzung von Altlastengefahren sowie dem Umweltmonitoring.

Jedoch variieren natürlich gelagerte Böden in ihrer Textur und Struktur in diesem Kontext enorm. Horizonte verhalten sich verschieden, deren kapillare Übergangsfunktionen sind komplex und Flüsse nicht homogen verteilt, sondern abhängig vom Bodenaufbau mit seinen präferentiellen Fließpfaden und Bypassflüssen. Daher ist es eine besondere Herausforderung mit Böden zu arbeiten und je nach Untersuchungsgegenstand die geeigneten Instrumente der verfügbaren Skalen in Labor und Gelände zu wählen sowie die Mess- und Auswertetools daraufhin abzustimmen.

Damit die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen auf das Feld und punktuelle Informationen in die Fläche übertragen werden können, ist es nötig, mehrere Skalen in ihren Interaktionen synergetisch zu nutzen.

Moderne Lysimeter bilden eine neue Skala zwischen Laborversuchen und Freilandstationen. Sie kombinieren die aus den Laborversuchen bekannte Präzision mit echten Feldbedingungen.

Die Entwicklung der Lysimeter hat in den letzten 10 Jahren eine technische Revolution erlebt. Während Lysimeter ursprünglich zur Sickerwassermessung eingesetzt wurden, stehen uns heute präzise Messinstrumente für die Bodenwassermessung, Sickerwasserbestimmung, Verdunstungsmessung, zur Verlagerung und Stoffumsetzung zur Verfügung. Wegen der vielschichtigen Anwendungen, die sich daraus ergeben, müssen die jeweiligen Anforderungen in der Konstruktion und Instrumentierung berücksichtigt werden. Dies steht im Gegensatz zur Forderung nach standardisierten Methoden. Damit die einzelnen Komponenten standardisiert sind, die Instrumentierung jedoch den Anforderungen der jeweiligen Zielsetzung entsprechen kann, ist ein modulares Konzept notwendig.

Neue monolithische Lysimeter werden zur Wasserbilanzbestimmung, zu Stoffumsetzungs- und zu Stofftransportstudien eingesetzt. Mit dem Präzisionswägesystem ausgestattet, können alle Niederschlagsformen, Evapotranspiration (ET) und Referenz-Evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) sowie Sickerwasser auf 0,01 mm zeitlich hoch aufgelöst gemessen werden. Damit kann die Bodenwasserbilanzgleichung

$$P + I - ET - D - \Delta S = 0,$$

mit

- P – Niederschlag,
- I – Bewässerung,
- ET – Evapotranspiration,
- D – Versickerung,
- $\Delta S$  – Änderung der Menge des gespeicherten Bodenwassers

und die Stoffbilanz

$$Dep + F - V - L - \Delta M = 0,$$

mit

$$Dep = P \cdot P_c + I \cdot I_c = D \cdot \Delta c,$$

mit

- Dep – atmosphärische Deposition,
- F – Düngung,
- V – Verluste durch Vegetation und Gastransport,
- L – Auswaschung,
- $\Delta M$  – Änderung des Masseinhalts,
- c – Stoffkonzentration,

dargestellt in Fig. 1.1, gelöst werden (J. FANK & G. VON UNOLD, 2007). Lysimeter eignen sich daher besonders zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, zur Modellkalibrierung sowie für alle bodenwasserabhängigen Untersuchungen.

Neu ist die Matrixpotentialübertragung der Feldmatrixpotentiale in das Lysimeter oberhalb der Bodenplatte. Damit bleibt der im Feld übliche Wasserfluss im Lysimeter erhalten.

Bei bisherigen Schwerkraftlysimetern geht man von freidränendem Wasser in der Tiefe der Bodenplatte aus, was selten der Fall ist. Um feldidentische Sickerwasserraten zu erzielen, wird oberhalb der Bodenplatte ein Siliziumcarbid(SiC)-Saugkerzenrechen (Fig. 1.2) eingesetzt. Je nach Wasserbewegung im Boden kann über den Saugkerzenrechen das Feldpotential über die Bodenplatte im Lysimeter übertragen werden und Sickerwasser abgesaugt – oder kapillares Aufstiegswasser eingespeist werden. Damit ist für die Höhe des Lysimeterzylinders nicht mehr das Niveau der Bodenwasserscheide entscheidend, sondern der Bodenaufbau und die Durchwurzelungstiefe. In gleicher Weise kann ein natürlicher oder artifizieller Grundwasserspiegel eingestellt werden.

Im Folgenden werden vier modulare Standardlysimeter, entwickelt in Kooperation mit der Kompetenznetzwerk Wasserressourcen GmbH Graz, vorgestellt, deren Konstruktion, Instrumentierung und Auswertetools auf die spezifischen Anforderungen abgestimmt wurden.

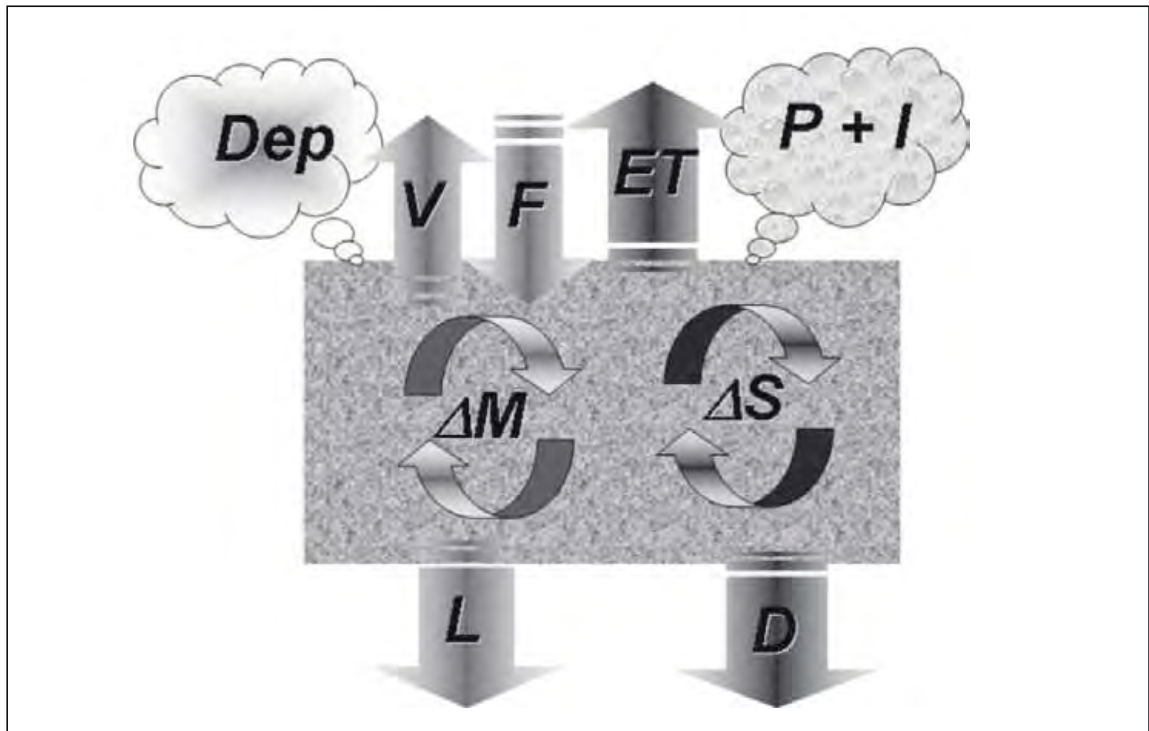


Fig. 1.1: Wasserbilanzparameter nach J. FANK & G. VON UNOLD (2007).  
Parameters of the water balance according to J. FANK & G. VON UNOLD (2007).

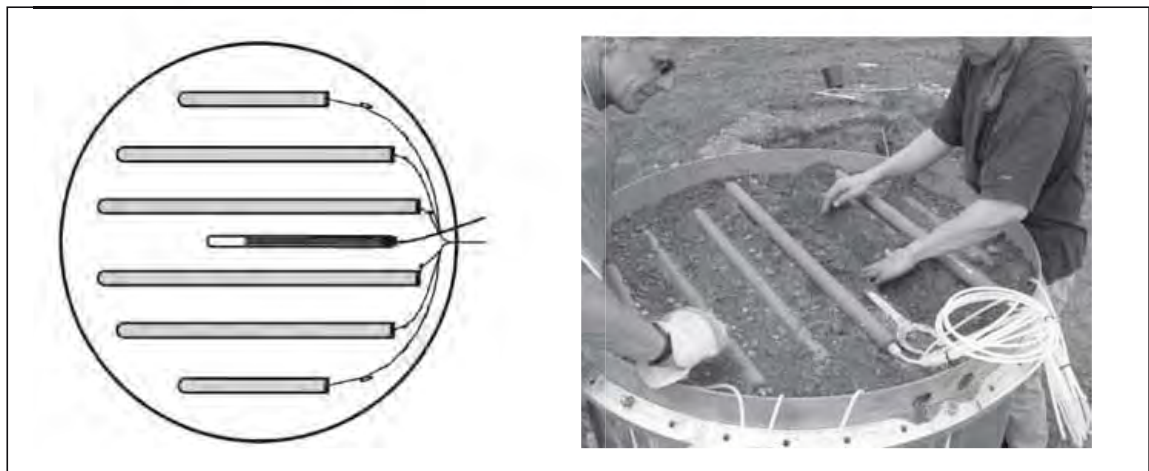


Fig. 1.2: Schematischer Aufbau und Foto des Saugkerzenrechs.  
Sketch and photo of the suction cup rake.

## 1.2. Beschreibung von vier modularen Lysimeterkonstruktionen für verschiedene Anwendungen

### 1.2.1. Hydro-Lysimeter

Zu den Aufgaben der Hydrographie zählt die Bestimmung der regionalen Grundwasserneubildungsraten, des Niederschlags und der Verdunstungsraten. Mit dem Hydro-Lysimeter (Fig. 1.3) werden die Bodenwasserparameter und deren Schnittstellen zu Atmosphäre und Aquifer direkt gemessen. Vorteilhaft ist, dass Niederschlag und

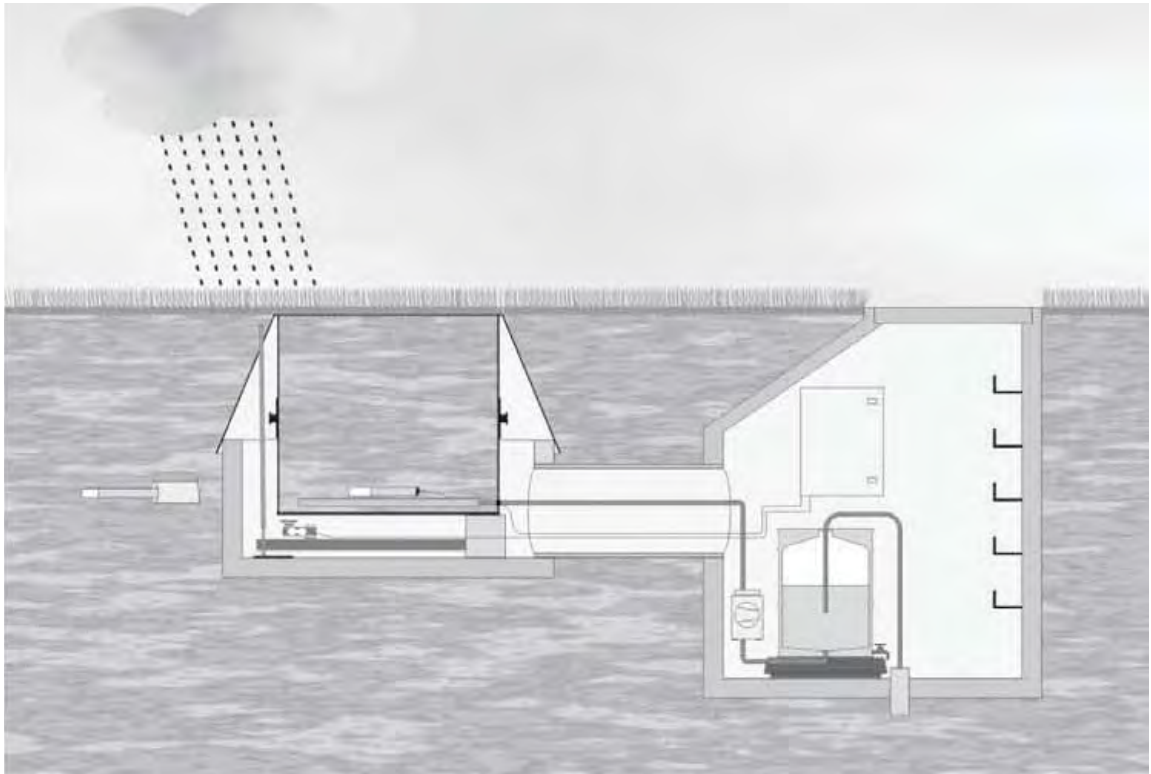


Fig. 1.3: Schematischer Aufbau des Hydro-Lysimeters.  
 Sketch of the Hydro-Lysimeter.

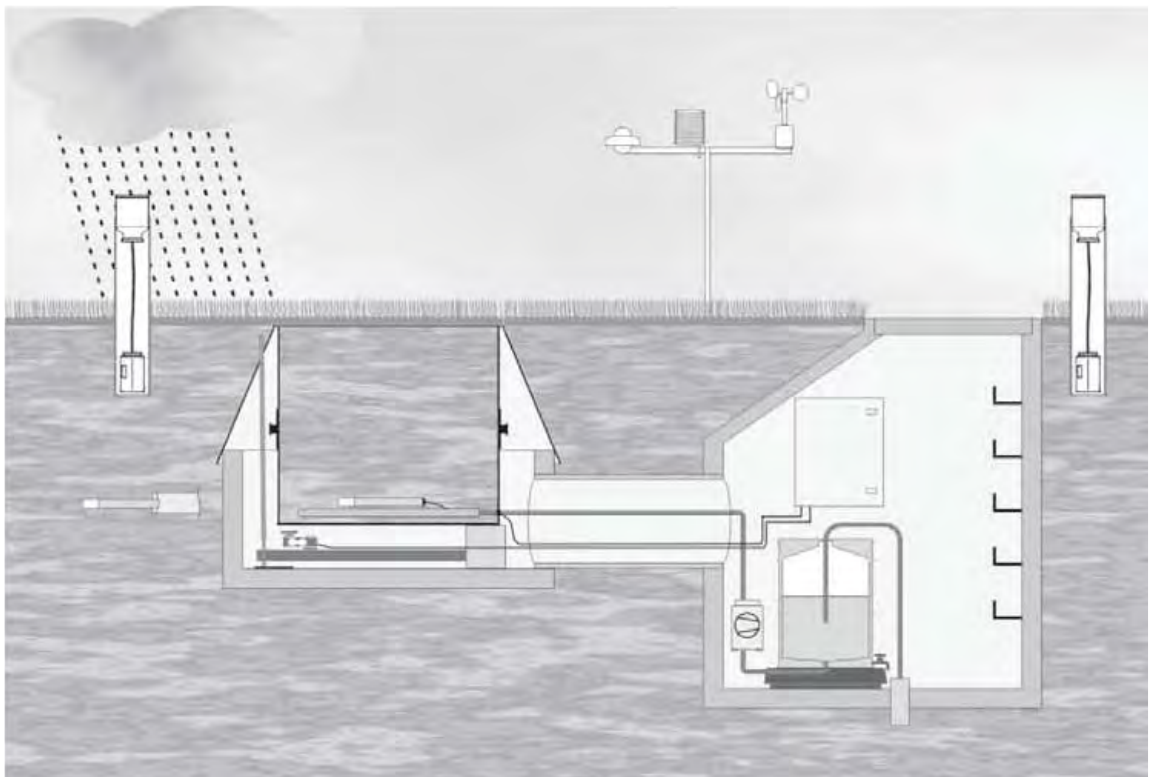


Fig. 1.4: Schematischer Aufbau des Meteo-Lysimeters.  
 Sketch of the Meteo-Lysimeter.

Verdunstung direkt an der Bodenoberfläche und das Sickerwasser bei feldidentischen Bodenwasserbedingungen (Matrixpotentialübertragung) erfasst werden. Die Verdunstungsmessung erfolgt für europäische Klimazonen zeitlich hoch aufgelöst, präzise Messung und Auflösung von Niederschlag und Verdunstung auf 0,01 mm. Sickerwasser wird, neben der Messung der Änderung des Bodenwasserspeicherinhalts, mit einer Auflösung von 0,001 mm erfasst. Damit können Wasserbilanzmodelle validiert werden.

Die Inputparameter sind das Wasserequivalent von Regen, Tau, Reif und Schnee, authentisch zur tatsächlichen Bodenoberfläche bzw. zum Bewuchs. Die Outputparameter sind ET,  $ET_0$  (bei Grasbewuchs), Sublimation und das Sickerwasser.

Das Hydro-Lysimeter ist begrenzt einsetzbar. Es ist nicht geeignet für Hänge oder Waldstandorte. Schneedecken müssen vor der Eisbildung von Hand über dem Ringspalt freigestochen werden. Die Fläche kann nicht maschinell bewirtschaftet werden. Der Grundwasserabstand muss mindestens 2,5 m betragen.

Das Hydro-Lysimeter ist in Fig. 1.3 skizziert. Der Serviceschacht beinhaltet den wägbaren Wassertank zur Sickerwassermessung und Wassereinspeisung. Weiters sind darin der Messschrank mit Datenlogger, Pumpensteuerung und Versorgung untergebracht.

### 1.2.2. Meteo-Lysimeter

Die zur Erstellung der Wasserbilanz nötige Messung der tatsächlichen Verdunstung und der potentiellen Verdunstung war bisher auf Ansätze und Geräte gestützt, die diese Größen nur näherungsweise bestimmen können. Mit dem Meteo-Lysimeter (Fig. 1.4) steht ein System zur Verfügung, das mit der tatsächlichen Bodenoberfläche und Bodenfeuchte sowohl ET als auch  $ET_0$  (bei definiertem Grasbewuchs) präzise messen kann. Ebenso werden das Sickerwasser zeitlich hoch aufgelöst gemessen und Bodenwasserspeicheränderungen erfasst.

Das Meteo-Lysimeter entspricht im Aufbau dem Hydro-Lysimeter, ist jedoch durch eine Klimastation zur Messung der für die Wasser- und Energiebilanz relevanten Klimaparameter ergänzt (Fig. 1.4).

### 1.2.3. Scientific-Field-Lysimeter

Mit dem Scientific-Field-Lysimeter werden Präzisionsmessungen zur Bestimmung der horizontalen Bodenwassersituation und der Wasserflüsse sowie zur definierten Porenwasser- und Sickerwasserprobenahme durchgeführt.

Wasserspannung, Temperatur und der Wassergehalt werden üblicherweise in den Tiefen 30 cm, 60 cm, 120 cm und 180 cm gemessen, wobei individuelle Tiefen gewählt werden können. Die Siliziumcarbidkerzen SIC20 dienen zur Porenwasserprobenahme. Der SIC-Saugkerzenrechen in 195 cm Tiefe agiert wie beim Hydro-Lysimeter zur Übertragung des Matrixpotentials und zur Sickerwasserbestimmung.

Lysimeter und Freiland werden parallel mit Mess- und Probenahmesonden bestückt, wodurch die Vorteile beider Verfahren genutzt werden. Damit eignet sich das System (Fig. 1.5) zum Langzeitmonitoring von bodenkundlichen und bodenwasserrelevanten Prozessen.

Das Lysimeter wird eingesetzt zur

- Quantifizierung von Wasser- und Stoffflüssen unter realen Bedingungen in wählbaren Tiefenstufen,
- Messung der pF-Kurve in situ,
- Beobachtung von Sickerwasser und Kapillarwasser,
- Messung der Bodenwasserspannung, des Wassergehaltes und der Temperatur im Lysimeterprofil und im Freilandprofil,

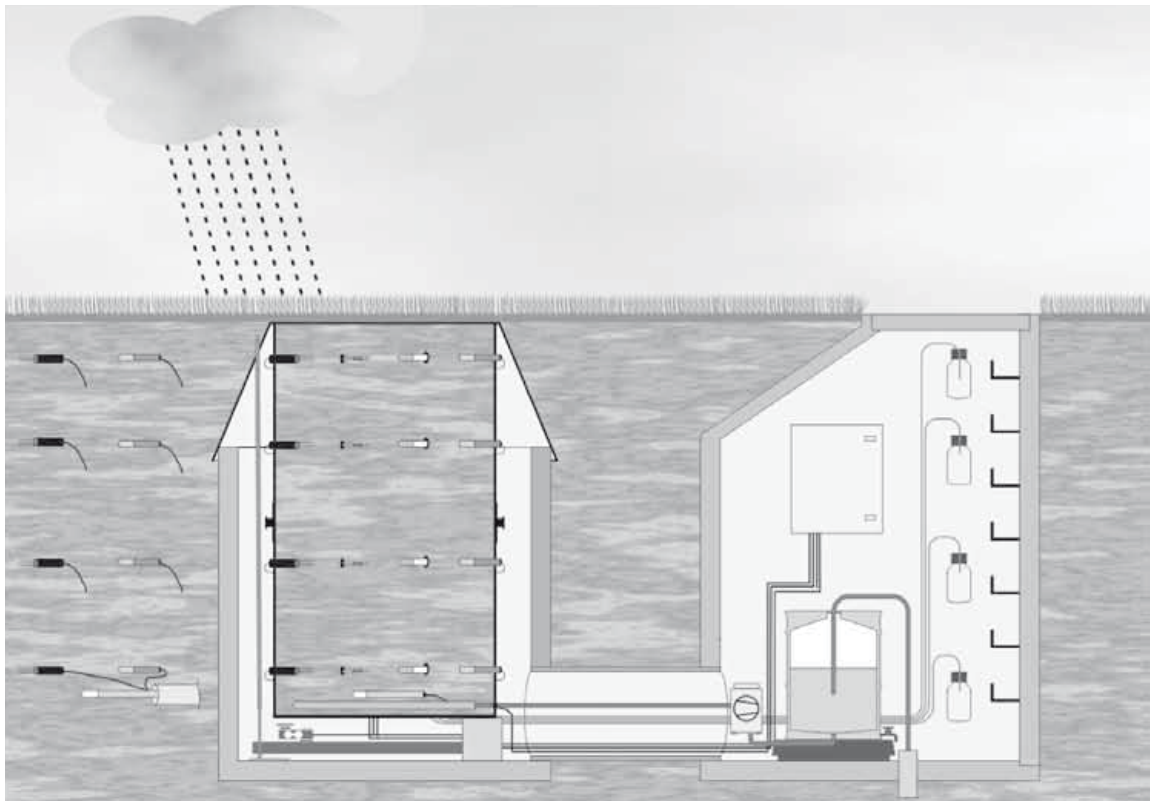


Fig. 1.5: Schematischer Aufbau des Scientific-Field-Lysimeters.  
 Sketch of the Scientific-Field-Lysimeter.

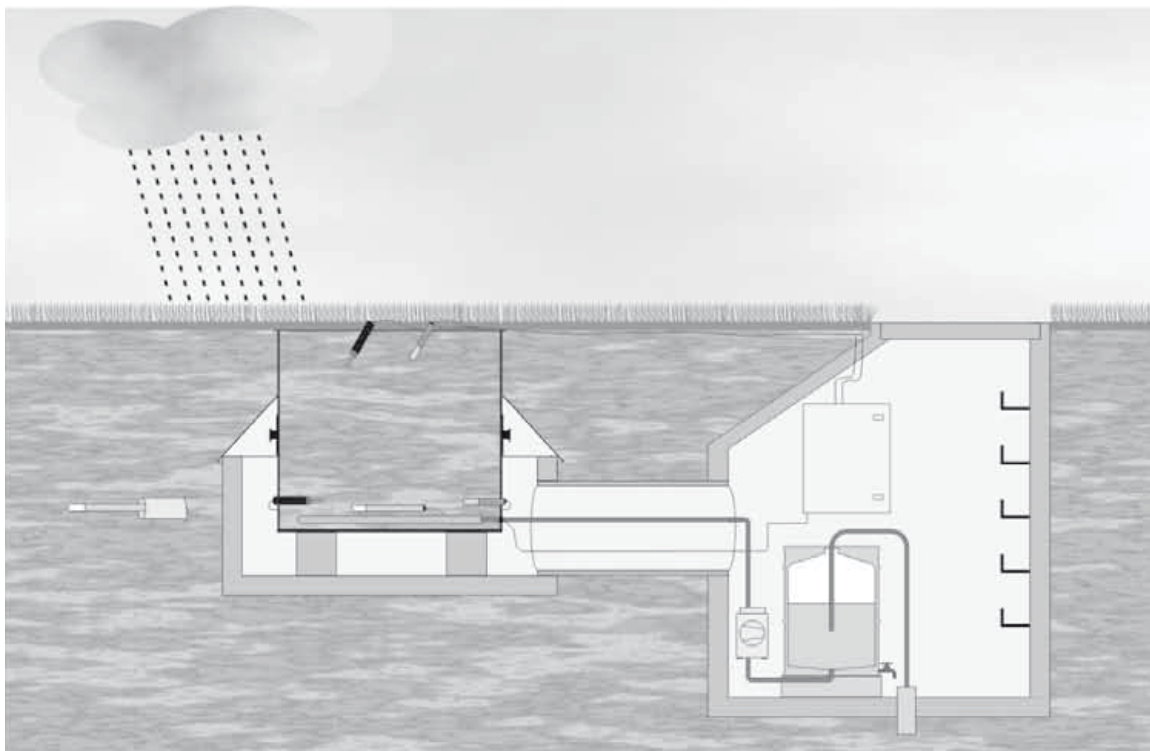


Fig. 1.6: Schematischer Aufbau des Agro-Lysimeters.  
 Sketch of the Agro-Lysimeter.



- Beprobung des Bodenwassers über konstantes oder tensiometergesteuertes Vakuum,
- Messung der Sickerwassermenge mit 0,001 mm Auflösung.

#### 1.2.4. Agro-Lysimeter

Das Agro-Lysimeter (Fig. 1.6) ist ein nicht wägbares, monolithisches Feldlysimeter. Es hat einen abnehmbaren, abgedichteten Ring mit 35 cm Höhe zur konventionellen Feldbewirtschaftung.

Dieser wird vor der Bewirtschaftung abgenommen. Nach der Bewirtschaftung wird der Bearbeitungsring wieder aufgesetzt und abgedichtet. Der schmale Ringspalt wird von Hand rückverfüllt und die oberen Messsonden werden wieder von oben eingesetzt. Das Agro-Lysimeter ist mit Matrixpotentialübertragung ausgestattet.

## 2. Anforderungen an die Messtechnik zur Umsetzung moderner Datengewinnungskonzepte (A. STEINS)

### 2.1. Datenerfassung und Steuerung

Die Lysimeteranlagen in Wagna und Neapel verfügen über eine Simulation der Bodenwasserspannung bzw. des Grundwasserpegels. Im Hydro-Lysimeter Wagna (Fig. 2.1) wird über eine bidirektionale Pumpe Wasser vom Saugkerzenrechen in einen Auffangbehälter und wieder zurück gepumpt. Die Implementierung erfolgt über einen auf die Verhältnisse optimierten Algorithmus.

In Neapel hingegen (Fig. 2.2) wird der Grundwasserspiegel in den Lysimetern durch gravimetrischen Zu- bzw. Abfluss von Wasser geregelt. Pro Lysimeter werden hierbei zwei Magnetpulenventile und ein zentraler Wassertank verwendet.

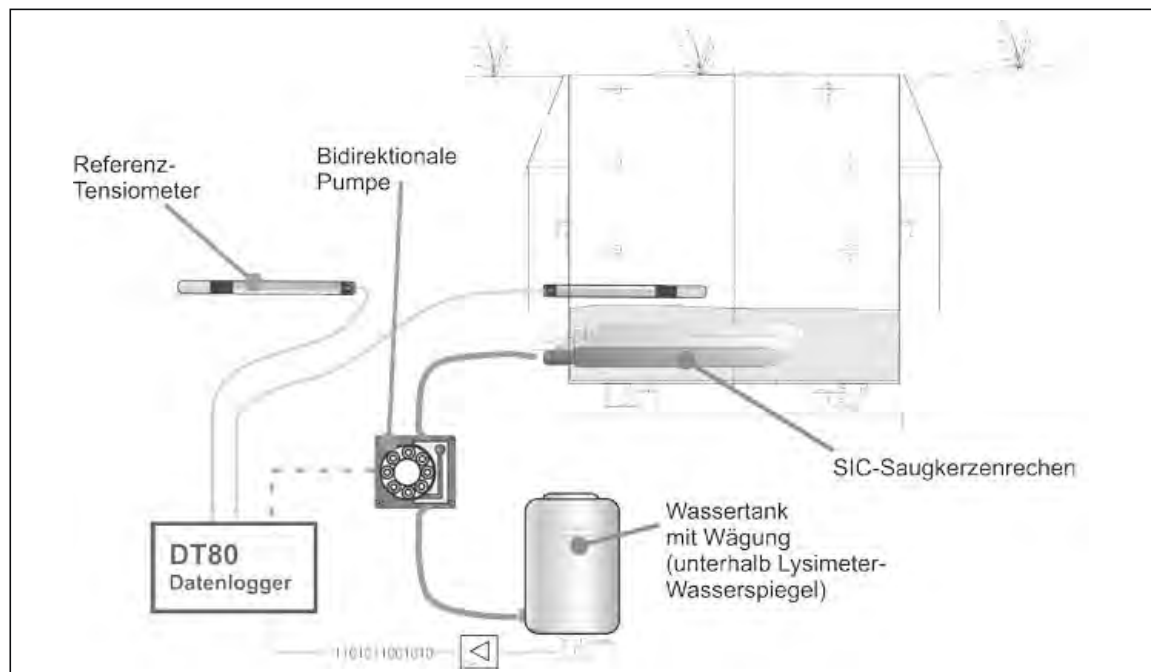


Fig. 2.1: Pumpenregulierung der Bodenwasserspannung.  
Pump regulation of soil water tension.

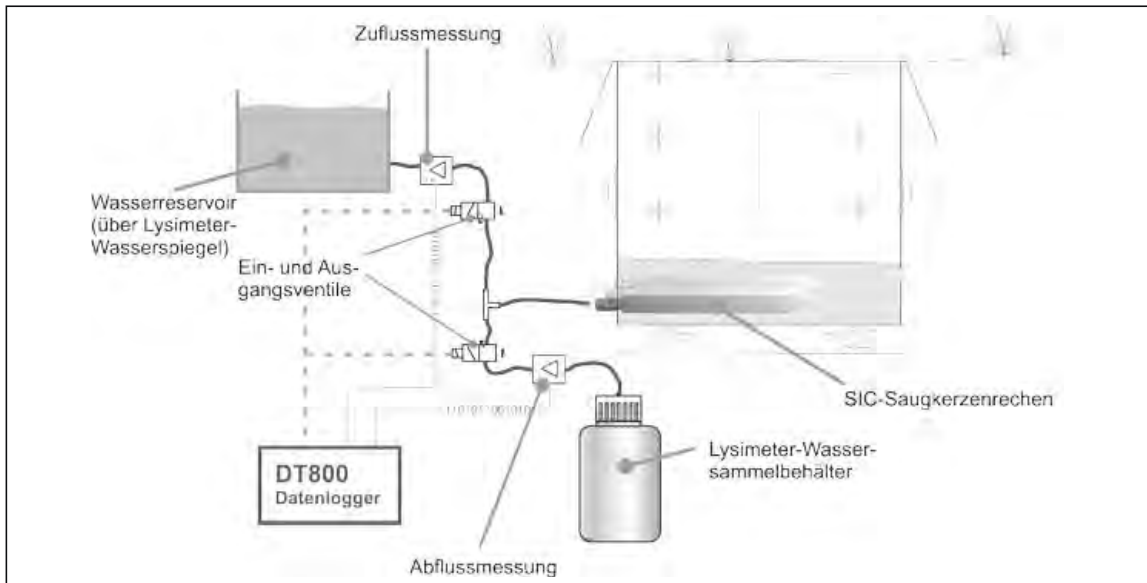


Fig. 2.2: Ventilgesteuerte Regulierung der Bodenwasserspannung.  
Valve control of soil water tension.

Figur 2.3 zeigt einen Auszug der Messdaten von Wagna. Die hellgraue Linie (HLTEN090) stellt den Verlauf der Bodenwasserspannung im Lysimeter dar, während die dunklere Linie (HFTEN090) die Bodenwasserspannung außerhalb des Lysimeters zeigt.

Die Kurve widerspiegelt den Start der Steuerung und das Heranführen an die Bedingungen im Freiland. Auch kleinere Schwankungen werden im Lysimeter simuliert.

Lediglich schnelle Änderungen, hervorgerufen durch starke Regenereignisse, können noch nicht zu 100 % an die Freilandumgebung angeglichen werden. Hierfür werden in Zukunft zusätzliche Pumpen eingeplant, um die aufgefangenen Wassermengen schneller aus dem Lysimeter abpumpen zu können.

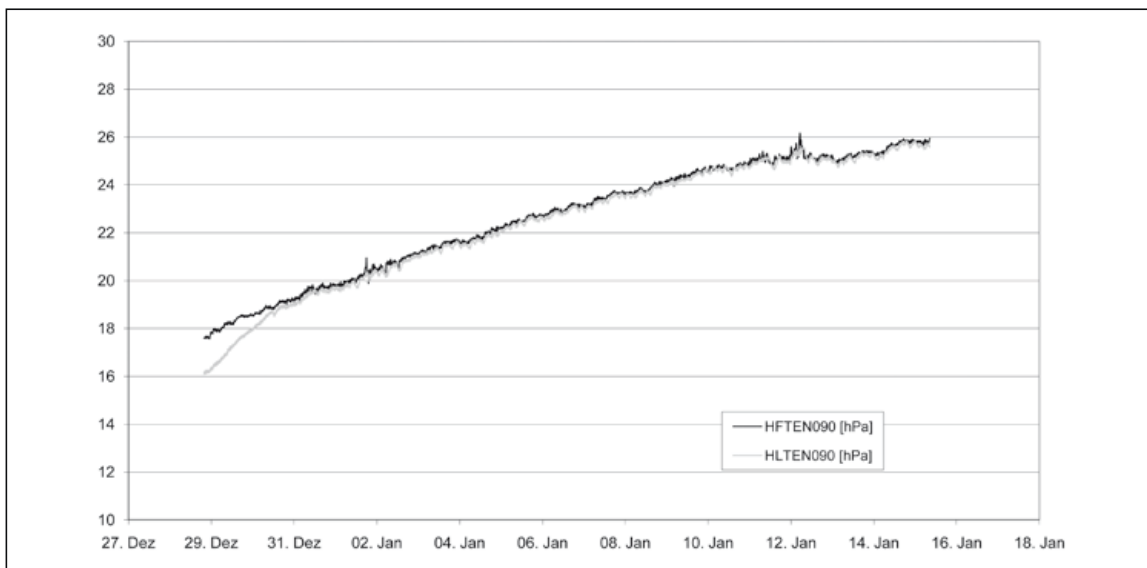


Fig. 2.3: Tensiometergesteuerte Tension im Lysimeter Wagna.  
Controlled tension in Wagna lysimeter.

## 2.2. Fernwartung

Mobilfunktechnologie und Internet erlauben dem Betreiber zu jeder Zeit aktiv in das Geschehen einzugreifen. Gerade in der Startphase einer Messstation bedarf es intensiver Kontrolle über die Sensorik und die Steuerung. Bei beiden Lysimeterstationen können Regelparameter über das Internet online an den Datenlogger übergeben werden. Über das Internet kann auch jederzeit der Status aller angeschlossenen Geräte überprüft werden. Die Betreiber der Messstation haben Zugang zu den Messdaten und weiteren angebotenen Systemen wie z. B. Videoüberwachung und Bodenwasserprobeentnahme. Der technische Support hat des weiteren Zugang zu allen installierten Messgeräten, wodurch Wartungsfunktionen „remote“ durchgeführt werden oder effektiv vor dem Besuch der Station geplant werden können.

Eine Fernanbindung hat auch bei kleineren Messstationen direkte Vorteile für den Anwender. Durch die Verkleinerung der Messdatenabfrageintervalle durch Fernzugriff werden Datenausfälle zeitnah festgestellt und können schnell behoben werden.

## 2.3. Verwaltung von Messdaten

Flexible Datenbanksysteme in Verbindung mit der Datenfernübertragung werden in Zukunft verstärkt dazu beitragen, den Wissenschaftler bei der Datenverwaltung zu entlasten. Hierbei kommuniziert die Messstation bidirektional übers Internet, z. B. über GPRS mit dem Datenbankserver, der vom Hersteller der Messstation gehostet wird. Die Speicherung und Verwaltung der Datenbank übernimmt der Hersteller, während die Daten nur vom Anwender über Username und Passwort abgeholt werden.

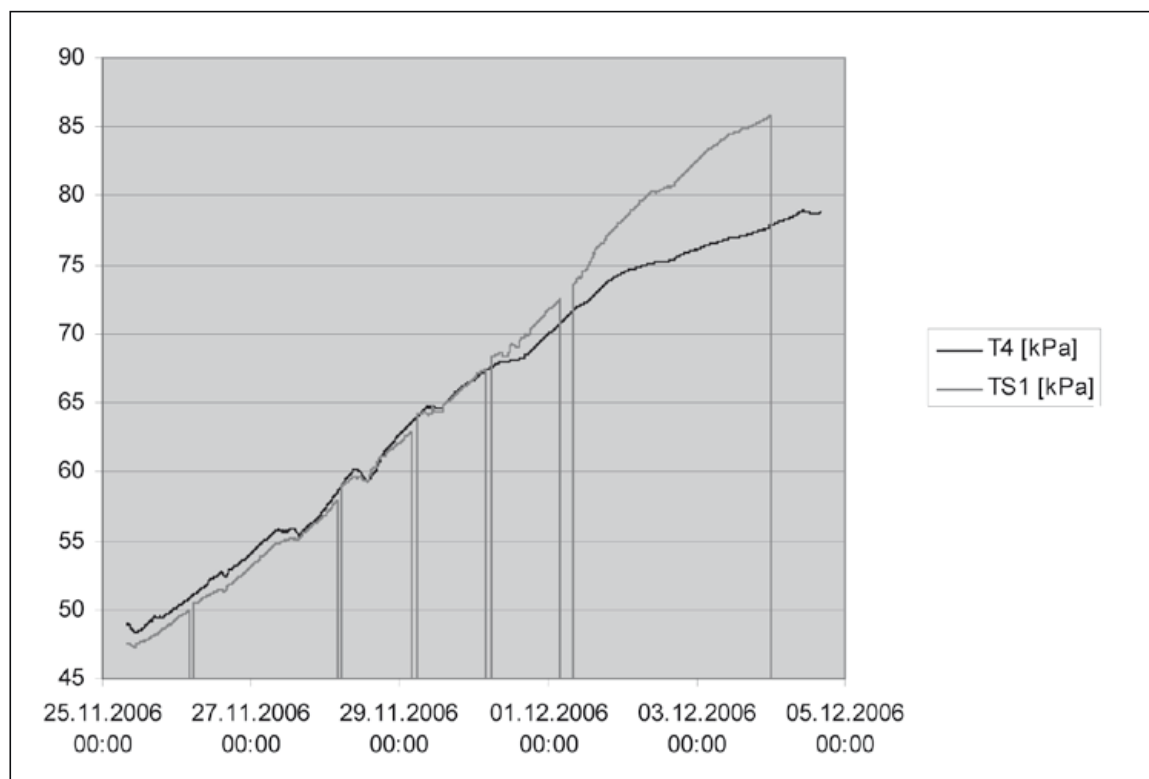


Fig. 2.4: Kennzeichnung unbrauchbarer Messwerte.  
*Signing of measure data integrity.*

## 2.4. Intelligente Sensoren

Intelligente Sensoren helfen uns die Messdatenkonsistenz zu halten. Integrierte Algorithmen zur Fehlerüberprüfung melden dem Anwender z. B. unmissverständlich Datensätze, die von der Verwendung ausgeschlossen werden müssen.

Integrierte Funktionen der Sensoren können helfen vom zentralen Datenerfassungssystem unabhängig zu werden und vermeiden Fehler in der Anwendung.

Bei dem selbstbefüllenden Tensiometer TS1 führt der Mikrocontroller zyklisch eine Überwachung des Kerzenbefüllzustandes durch. Überschreitet das Luftvolumen in der Kerze einen Schwellwert, so wird ein Befüllalgorithmus gestartet. Die Messwerte werden nach außen hin zum Datenlogger entweder gekennzeichnet oder eindeutig signiert (Fig. 2.4), sodass bei der späteren Auswertung der Daten eindeutig ist, wann das Tensiometer korrekt befüllt war und die Messdaten zuverlässig sind. Bei herkömmlichen Tensimetern wie z. B. dem T4 ist die Integrität der Messwerte nicht eindeutig.

## 3. Wägbare monolithische Feldlysimeter

### 3.1. Wägbare monolithische Feldlysimeter in Wagna: Messdatenerfassung und Auswertekonzepte (G. ROCK & J. FANK)

#### 3.1.1. Einleitung

Im Jahre 1991 wurde als Reaktion auf die steigende Nitratkonzentration im Grundwasser des Murtal-Aquifer auf dem landwirtschaftlichen Versuchsgelände von Wagna eine Forschungsstation errichtet. Gemäß der Definition der Anforderungen an Messstellen für die Bewertung und Kalibrierung von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen in der ungesättigten Zone unter landwirtschaftlich genutzten Flächen (J. FANK et al., 2004) wurden die Messeinrichtungen im Sommer 2004 durch zwei wägbare monolithische Präzisionslysimeter ersetzt (J. FANK & G. VON UNOLD, 2005). Das Hauptziel der aktuellen Untersuchungen in Wagna ist der Vergleich des Stoffeintrages in das Grundwasser zwischen konventioneller und biologisch-organischer Landwirtschaft. Unter zwei der 32 Testfelder wurden Messstellen in der ungesättigten Zone eingerichtet, um detaillierte Informationen über Wasserfluss und Stofftransport zu gewinnen.

Ein Überblick über die Konfiguration der Lysimeter wurde bereits publiziert (J. FANK, 2006b). Im Jahre 2006 wurde zusätzlich ein wägbares, monolithisches Lysimeter für die Ermittlung der Wasserbilanzparameter unter extensiver Grünlandnutzung errichtet. Die Gewinnung der Daten dient vor allem der Evaluierung der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung (N. L. KLOCKE et al., 1993). Wägbare Lysimeter ermöglichen die direkte Ermittlung der Evapotranspiration aus den Gewichtsdaten (M. H. YOUNG et al., 1996). Detaillierte Informationen über den Bodenwasserhaushalt bilden die Grundlage für die Quantifizierung des Stofftransportes in der ungesättigten Zone (J. FANK, 2006a). Ein großes wägbares Lysimeter ist die beste Methode, um verlässliche Daten über Sickerwasserquantität sowie -qualität zu beschaffen. Das Hauptziel dieses Beitrages ist:

- die Datenerfassung an der Forschungsstation Wagna zu charakterisieren,
- das Datenverwaltungssystem darzustellen,
- dafür geeignete Datenauswertungskonzepte zu spezifizieren.

### 3.1.2. Datenerfassung

Die landwirtschaftliche Versuchfläche Wagna besteht aus 32 Feldern mit einer Ausdehnung von je 1000 m<sup>2</sup>. Im Zentrum wurden zwei Felder mit je einem Präzisionswiegegelysimeter und einem bodenhydrologischen Messprofil ausgestattet. Als Basis für weitere Auswertungen des Wasser- und Stofftransportes müssen eine Vielzahl an Daten gemessen und gesammelt werden:

- Bewirtschaftungsdaten:  
Anbau, Bodenbearbeitung, Düngung, Einsatz von Pestiziden und Herbiziden sowie Ertragsdaten werden in MS-EXCEL-Datenblättern gespeichert.
- Analysedaten (analoge Daten):  
Bodenphysik und Bodenchemie aus Bodenproben (Profile beim Lysimeterbau), Nährstoffgehalt von Düngemitteln, Inhaltsstoffe von Pflanzen nach der Ernte, Ergebnisse von hydrochemischen und Isotopenanalysen von Sickerwasser, Bodenwasser und Grundwasser aus natürlichem Wasserfluss und aus den Tracerexperimenten.
- Lysimeterdaten (26 Onlinemessungen im 1- oder 10-Minuten-Intervall):  
Lysimetergewichte im 1-Minuten-Intervall, angelegter Unterdruck an Saugkerzen am unteren Ende der Lysimeter, Lufttemperatur im Lysimeterschacht (nahe den Wiegezellen), Sickerwassermenge aus den Saugkerzen und am freien Auslauf, Time-Domain-Reflectometry (TDR) in 35, 60, 90 und 180 cm Tiefe, Smart-Irrigation-Sensor (SIS) in 35, 60 und 90 cm Tiefe, Tensiometer in 90 und 180 cm Tiefe, Bodentemperatursensoren in 35, 60, 90 und 180 cm Tiefe, zusätzlich zwei TDR-Sonden, zwei SIS-Matrixsensoren, zwei Tensiometer und zwei Bodentemperatursensoren in den obersten 35 cm eines Lysimeters während der Vegetationsperiode.
- Bodenhydrologisches Messprofil mit TDR-Sonden, SIS-Matrixsensoren, Tensiometern und Bodentemperatursensoren in denselben Tiefen wie im Lysimeter (14 Onlinemessungen im 10-Minuten-Intervall).
- Grundwasserspiegellage in zwei Bohrungen, Grundwassertemperatur und elektrische Leitfähigkeit (vier Onlinesensoren im 10-Minuten-Intervall).

An einer Wetterstation werden die Lufttemperatur, die relative Feuchtigkeit, die Windgeschwindigkeit in 2 m und in 4 m Höhe sowie die Strahlung gemessen. Die Strahlungsbilanz wird zusätzlich in 2 m Höhe direkt über den Lysimetern erfasst. Der Niederschlag wird mittels einer Niederschlagswippe gemessen. Insgesamt müssen an den beiden Lysimetern Daten von 94 Onlinesensoren verwaltet werden.

Das „Gras-Lysimeter“ befindet sich an der Grenze des Versuchsgeländes von Wagna und ist mit einer weiteren meteorologischen Station ausgerüstet. An ihr werden die Parameter für die Berechnung der Referenzverdunstung nach PENMAN-MONTEITH für kurze Zeitintervalle (I. A. WALTER et al., 2005) gemessen (vier Onlinesensoren, 10-Minuten-Intervall). Die Lysimetergewichte, die Sickerwassermenge als Gewichtsinformation sowie die Daten über die Vakuumpumpe (Drehrichtung und Laufzeit) werden im 1-Minuten-Intervall (vier Onlinesensoren), zusätzlich die Daten von zwei Tensiometern (im freien Feld und im Lysimeter in 95 cm Tiefe) im 10-Minuten-Intervall (zwei Onlinesensoren) gespeichert.

### 3.1.3. Datenmanagement

Aufgrund der großen Anzahl zu speichernder Datensätze (> 100 Onlinesensoren im 1- oder 10-Minuten-Aufzeichnungsintervall und der zusätzlichen Daten der Wetterstation Leibnitz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) war es notwendig, ein effizientes Datenmanagementsystem für die Wagna-Daten zu entwickeln. Die Onlinedaten werden in unterschiedlichen Datenloggern gespeichert (Lysimeterdaten, Daten der bodenhydrologischen Messprofile sowie meteorologische Daten in DL2-Datensammlern, Grundwasserdaten in einem CTD-Diver Datenlogger (CDT-Diver<sup>®</sup> von Schlumberger Water Services mit Sensoren für Temperatur, Druck und elektrische Leitfähigkeit), Wetterdaten der offiziellen Station Leibnitz in einem Meteodat-Logger, Daten des Gras-Lysimeters in einem DT80-Logger (siehe Fig. 3.1). Die Datenlogger, die Wiegezellen der beiden Lysimeter sowie das Videosystem sind direkt mit dem PC in der Forschungsstation verbunden. Der DT80-Logger, der auch die Vakuumpumpe steuert und die Wiegezeiten des Gras-Lysimeters aufzeichnet, ist über eine Richtfunkstrecke mit der zirka 100 m entfernten Station verbunden. Der PC in der Forschungsstation ist über Breitbandinternet mit dem Netzwerk von JOANNEUM RESEARCH verbunden. Mittels einer Software wie „PCAnywhere“ für „Remote Control“ (Programm zum Aufschalten auf fremde Rechner wie z. B. PCAnywhere von Symantec [www.symantec.com]) ist es möglich, direkt vom Büro aus am PC in der Forschungsstation zu arbeiten. Das System wird täglich überprüft, die Videodaten werden gesichtet und ein Bild je Lysimeter zusätzlich gespeichert. Wöchentlich werden die Datensammler ausgelesen und die Daten ins Büro nach Graz übertragen. Nach einer ersten Überprüfung werden alle zeitabhängigen Onlinemessdaten mittels spezieller Importmodule in eine Zeitreihendatenbank importiert.

Die Zeitreihendatenbank ist als so genanntes „Relationales Datenbanksystem“ (z. B. MS-ACCESS, MS-SQL-Server, ORACLE) realisiert. Die Datenbank (DB) erlaubt es, die Daten als hierarchische Struktur zu organisieren. Jeder „DB-Wert“ ist verlinkt mit einem „DB-Parameter“, jeder „DB-Parameter“ ist verlinkt mit einer „DB-Station“. Dabei werden die unterschiedlichen Messpunkte (Lysimeter, bodenhydrologisches Messprofil, Wetterstation etc.) als „DB-Station“ und die unterschiedlichen Messparameter als „DB-Parameter“ definiert. Jeder Messwert ist also ein „DB-Wert“ zugehörig zu einem „DB-Parameter“ und einer „DB-Station“. Jede Korrektur eines Messwertes wird als eigene Version gespeichert. Aufgrund dieses Versionsmanagements kann die Nachvollziehbarkeit aller vorgenommenen Korrekturen sichergestellt werden. Alle Zugriffe auf die Daten erfolgen über Softwaremodule (ausschließlich über SQL-Befehle). Diese Softwaremodule sind als „ActiveX-DLLs“ (wiederverwendbare Programmbausteine für Microsoftbetriebssysteme) realisiert und können auch zur Programmierung von Zusätzen in anderen Softwareprodukten eingesetzt werden (EXCEL, ArcGIS etc.).

### 3.1.4. Datenauswertungskonzept

Auf Basis der Zeitreihendatenbank ist ein Datenauswertungskonzept für die Forschungsstation Wagna entwickelt worden (Fig. 3.1). Die Hauptmodule der Software sind „VIEW“ für die Visualisierung sowie „EDIT“ für die Datenkorrektur. Das Modul „EXPORT“ erlaubt es, Daten je nach Erfordernis an Datenbasen für unterschiedliche Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodelle zu exportieren, Datenschnittstellen zu sonstiger Software anzusprechen und die Messdaten an Statistikpakete zur weiteren Analyse weiterzuleiten. Eine Reportfunktion erlaubt die Erstellung von automatisierten Berichten der Messdaten in tabellarischer und grafischer Form.

Zur Ableitung der Wasserbilanzparameter eines ebenen Standortes aus den Wiegedaten der Lysimeter wurde der „Wasserbilanzrechner“ programmiert (J. FANK, 2006b). Aus den Wetterdaten in der Zeitreihen-Datenbank und zusätzlichen Informationen über die Speicherkapazität des Bodens sowie der Vegetationsbedeckung, die in anderen Datenspeichern vorliegen, kann mittels des „FAO-PENMAN-MONTEITH-Rechners“ (FAO PM-ET Calc.) die Gras-Referenzverdunstung ( $ET_0$ ) für unterschiedliche Zeitintervalle berechnet und die potentielle ( $ET_c$ ) und aktuelle ( $ET_{c,adj}$ ) Pflanzenverdunstung mit Hilfe von entsprechenden Pflanzenkoeffizienten abgeleitet werden. Durch die Verwendung des „ $ET_c$ -dual crop coefficient“-Verfahrens (R. G. ALLEN et al., 1998) kann die Verdunstung in ihren Evaporations- und Transpirationsanteil aufgeteilt werden. Dieses Modul erlaubt auch die Berechnung einer pflanzen- und bodenspezifischen optimalen Bewässerung in Abhängigkeit von Wetterinformationen.

Zusätzliche Module, wie beispielsweise die automatisierte Generierung von Feld-pF-Kurven aus den Messungen des Wassergehaltes und der Tension in den unterschiedlichen Bodenhorizonten als Grundlage für die Parametrisierung von Modellfunktionen sind in Planung bzw. in Erarbeitung. Der „FAO-PENMAN-MONTEITH-Rechner“

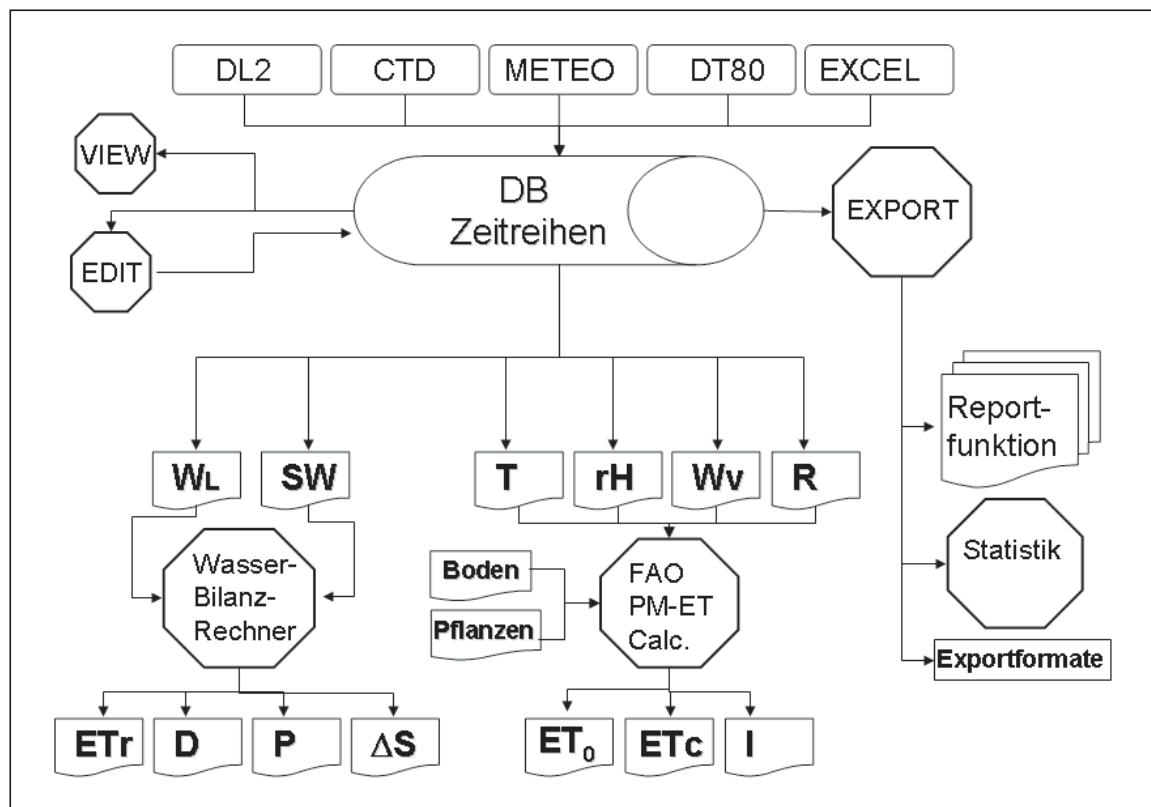


Fig. 3.1: Lysimeterstation Wagna – Datenmanagement und Auswertekonzept.  $W_L$  – Lysimtergewicht,  $SW$  – Sickerwassermenge,  $T$  – Temperatur,  $rH$  – relative Luftfeuchte,  $Wv$  – Windgeschwindigkeit,  $R$  – Strahlung,  $E_{Tr}$  – reale Evapotranspiration,  $D$  – Entwässerung,  $P$  – Niederschlag,  $\Delta S$  – Änderung des Wassergehaltes,  $ET_0$  – Gras-Referenzverdunstung (I. A. WALTER et al., 2005),  $E_{Tc}$  – Pflanzenverdunstung,  $I$  – potentielle (optimale) Bewässerung.

Lysimeter station Wagna – data management and evaluation concept.  $W_L$  – lysimeter weight,  $SW$  – seepage water amount,  $T$  – temperature,  $rH$  – relative humidity,  $Wv$  – wind velocity,  $R$  – radiation,  $E_{Tr}$  – real evapotranspiration,  $D$  – drainage,  $P$  – precipitation,  $\Delta S$  – change of stored water,  $ET_0$  – grass reference evapotranspiration (I. A. WALTER et al., 2005),  $E_{Tc}$  – crop evapotranspiration,  $I$  – potential (optimal) irrigation.

wurde durch die Anbindung eines zweischichtigen Bodenwasserspeichermodells erweitert, sodass auch die wetter-, pflanzen- und bodenabhängige Grundwasserneubildung sowie die Auswirkung von unterschiedlichen Bewässerungsszenarien auf die Sickerwasserbildung berechnet werden kann.

### **3.1.5. Diskussion und Schlussfolgerungen**

Die Erfassung von Messdaten aus einer Vielzahl von Onlinesensoren mit kurzem Messintervall birgt in sich die große Gefahr zur Generierung von „Datenfriedhöfen“. Dieser Gefahr kann nur durch die Entwicklung eines effizienten Daten-Management-systems entgegen getreten werden. Dieses ist so zu generieren, dass seitens der Nutzer eine rasche visuelle Kontrolle der Daten sowie eine Erstkorrektur erfolgen kann. Diesbezüglich ist unbedingt darauf zu achten, dass die Editierschritte auch im Nachhinein nachvollzogen und auch wieder rückgängig gemacht werden können.

Spezifische Auswertesoftware ist so zu konzipieren, dass sie direkt auf die Datenbank zugreifen kann. Anwenderspezifische Erweiterungen können bei der Verwendung von allgemein verwendbaren „ActiveX-DLLs“ einfach erstellt und für verschiedene Softwareplattformen verwendet werden. Durch das für das Versuchsfeld Wagna entwickelte, aber grundsätzlich für die Verwaltung von jeglichen zeitabhängigen Daten unterschiedlicher Datendichte verwendbare Datenmanagementsystem ist es möglich in einer komplexen Messumgebung die Datenaufbereitung bis hin zu standardisierten Auswertungen mit einem Aufwand von etwa zwei Stunden pro Woche durchzuführen. Nur dadurch kann jederzeit die Übersicht über einen großen und ständig wachsenden Datenbestand bewahrt werden.

## **3.2. Messergebnisse des Versuchsfeldes Wagna – ein komplexer Datensatz für die Modellerstellung und -validierung auf der Lysimeterskala**

(Ch. LANTHALER & J. FANK)

### **3.2.1. Einleitung**

Modelle der ungesättigten Zone werden eingesetzt, um die physikalischen Prozesse eines Umweltsystems, wie beispielsweise den Stofftransport oder die Verdunstung, mit Hilfe von mathematischen Gleichungen nachzubilden. Bei der Modellierung der Prozesse des Agro-Ökosystems sind verschiedene Datensätze notwendig, um den Wasser- und Stofftransport sowie die Evapotranspiration zu beschreiben (J. FANK et al., 2004). Die Grundlage jeder Untersuchung des Stofftransportes im Boden und in der ungesättigten Zone ist die Lösung der Bodenwasserbilanz (vergleiche Formel in Kap. 1.1.). Nach Lösung der Wasserbilanzgleichung kann der Stofftransport ermittelt werden (Kap. 1.1.). Monolithische Lysimeter, die technisch auf dem neuesten Stand sind und ein Präzisionswiegesystem aufweisen, sind wichtige Instrumente für die Kalibrierung der Modelle, wie in J. FANK (2006a) nachzulesen ist.

### **3.2.2. Das Forschungsfeld Wagna**

Am Versuchsfeld in Wagna ist eine Reihe von Messinstrumenten vorhanden, die für die Modellkalibrierung und -validierung benötigt werden. Neben der Erfassung der meteorologischen Parameter durch zahlreiche Instrumente der Wetterstation werden Lysimeter verwendet, die das Sickerwasser erfassen. Zwei wägbare Gefäße mit einer Größe von  $1\text{ m}^2 \times 2\text{ m}$  Tiefe sind mit ungestörtem Boden befüllt und direkt im Feld eingebaut und können mechanisch bewirtschaftet werden, da ein mobiler Ring von 35 cm



Tiefe am Lysimeter abgenommen werden kann. Ein drittes Lysimeter von  $1\text{ m}^2 \times 1\text{ m}$  Tiefe ist im Grünland installiert und dient der Erfassung der Gras-Referenzverdunstung ( $ET_0$ ), siehe J. FANK & G. VON UNOLD (2005) und J. FANK (2006b). Da diese Lysimeter ein Präzisionswiegesystem mit einer Genauigkeit der Messung der Sickerwassermenge von 0,05 mm und 0,01 mm haben, sind sie für die Messung der Wasserbilanzparameter für einzelne Zeitschritte unabdingbar. Mehrere Tracerversuche wurden am Versuchsfeld durchgeführt, um die Unterschiede der Transportprozesse der konservativen Tracer, der Mineraldünger sowie organischer Dünger (Gülle) zu untersuchen. Anhand der Tracerversuche werden auch präferentielle Flüsse erkennbar (J. FANK & G. ROCK, 2005).

### 3.2.3. Datensätze für die Modellentwicklung und -validierung

#### 3.2.3.1. Atmosphäre

Der natürlichen Pflanzenentwicklung und des Pflanzenwachstums entsprechend verändert sich die Verdunstung der Pflanze ( $ET_c$ ) und die Gras-Referenzverdunstung ( $ET_0$ ) muss mit Verdunstungskoeffizienten angepasst werden (I. A. WALTER et al., 2005). Wenn wägbare Lysimeter eingesetzt werden, können Verdunstungskoeffizienten von Messdaten abgeleitet werden. Für feuchte Zeiträume können der Bodenverdunstungskoeffizient ( $K_e$ ) und der Basisverdunstungskoeffizient der Pflanzen ( $K_{cb}$ ) ermittelt werden (Fig. 3.2). Der Koeffizient  $K_{cb}$  stellt das Verhältnis der Pflanzenverdunstung gegenüber der Referenzverdunstung bei trockenem Boden ohne Trockenstress dar. In trockenen Zeiten, jedoch ohne Trockenstress, kann die Verdunstung des Bodens unberücksichtigt bleiben, es findet jedoch eine Transpiration der Pflanzen statt. Während der dritten dargestellten Periode in Fig. 3.2 kommt es zu keinen Niederschlägen, und nun kann ein weiterer Koeffizient,  $K_s$ , bestimmt werden:  $K_s$  drückt den Trockenstress der Pflanzen aus.

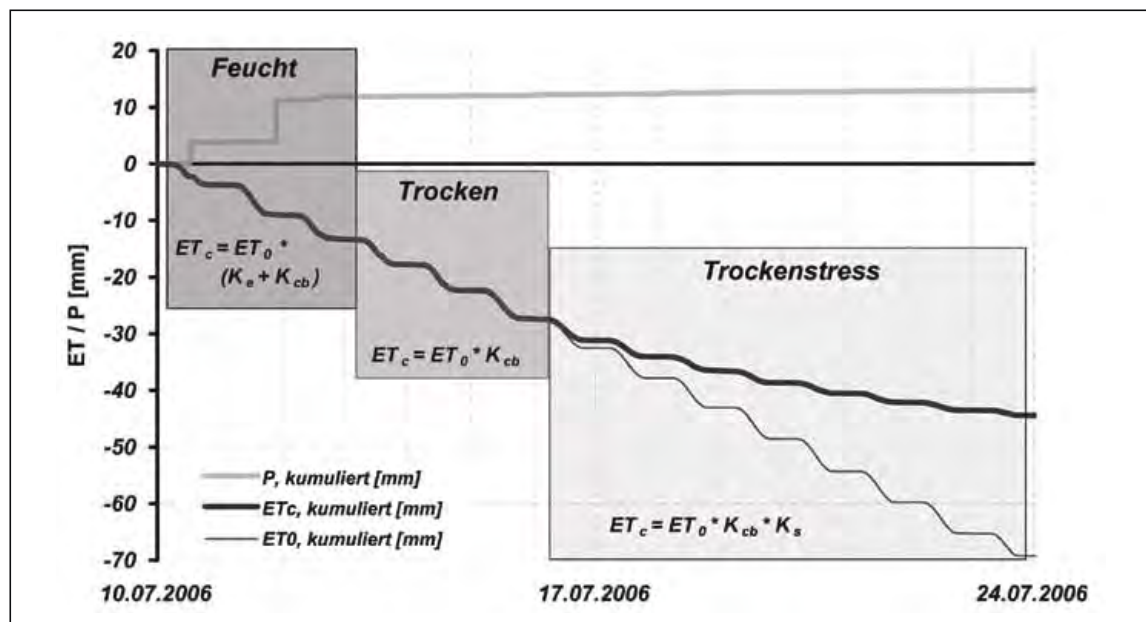


Fig. 3.2: Bestimmung von Pflanzenkoeffizienten und Bodenwasserstress-Faktoren aus Lysimetermessungen und der Gras-Referenzverdunstung für kurze Zeitintervalle (nach I. A. WALTER et al., 2005). Erläuterungen zu den Parametern siehe Kap. 1.1. und Kap. 3.2.3.1. Evaluation of crop factors and soil water stress factors from lysimeter measurement and short term evaluation of grass reference evapotranspiration (after I. A. WALTER et al., 2005). Abbreviations of the parameters are explained in chap. 1.1. and chap. 3.2.3.1.

### 3.2.3.2. Ungesättigte Zone und Ackerbau

In Fig. 3.3 ist die Ableitung der Parameter für zwei Bewirtschaftungssysteme, den konventionellen Ackerbau mit Mais (KON) und den organischen Ackerbau mit Klee/Gras (BIO) dargestellt. Niederschlag (P) wird an der Station Wagna mit mehreren Instrumenten gemessen: einerseits mit einer Niederschlagswippe (P WIPPE) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie einer Niederschlagswaage (P WAAGE) des Hydrographischen Dienstes des Landes Steiermark – beide durch durchgezogene Linien oben dargestellt – und mit einer bodenebenen Niederschlagswippe der Firma UMS, andererseits mit wägbaren Lysimetern (P LYS KON und P LYS BIO, dicke Linien oben). Die Niederschlagsmengen, die mit Lysimetern gemessen werden, sind etwas höher als bei den anderen Messmethoden.

Auch die Sickerwassermengen (SW, lang strichlierte Linien) können exakt mittels Saugkerzen und der Registrierung mit einer Wippe bestimmt werden. Die kurz strichlierten Linien stellen die Wasserbilanz (WB\_KON und WB\_BIO) für das konventionell und das organisch-biologisch bewirtschaftete Lysimeter dar. Die Evapotranspiration (ET, durchgehende Linien unten) wird nach der FAO-Methode (R. G. ALLEN et al., 1998) aus meteorologischen Daten berechnet und anhand der Pflanzenverdunstungskoeffizienten angepasst. Die Ergebnisse der Verdunstungsberechnung auf Tages- und 10-Minuten-Basis  $ET_0$  (d) und  $ET_0$  (10') aus unterschiedlichen Niederschlagsaufzeichnungen sind in Fig. 3.3 links unten angegeben. Wie die Wasserbilanz zeigt, wird die Differenz der Parameter Niederschlag, Sickerwasser und Verdunstung/Evapotranspiration (bzw. in Evaporation E und Transpiration T gegliedert) als die Veränderung des Bodenwassers angenommen.

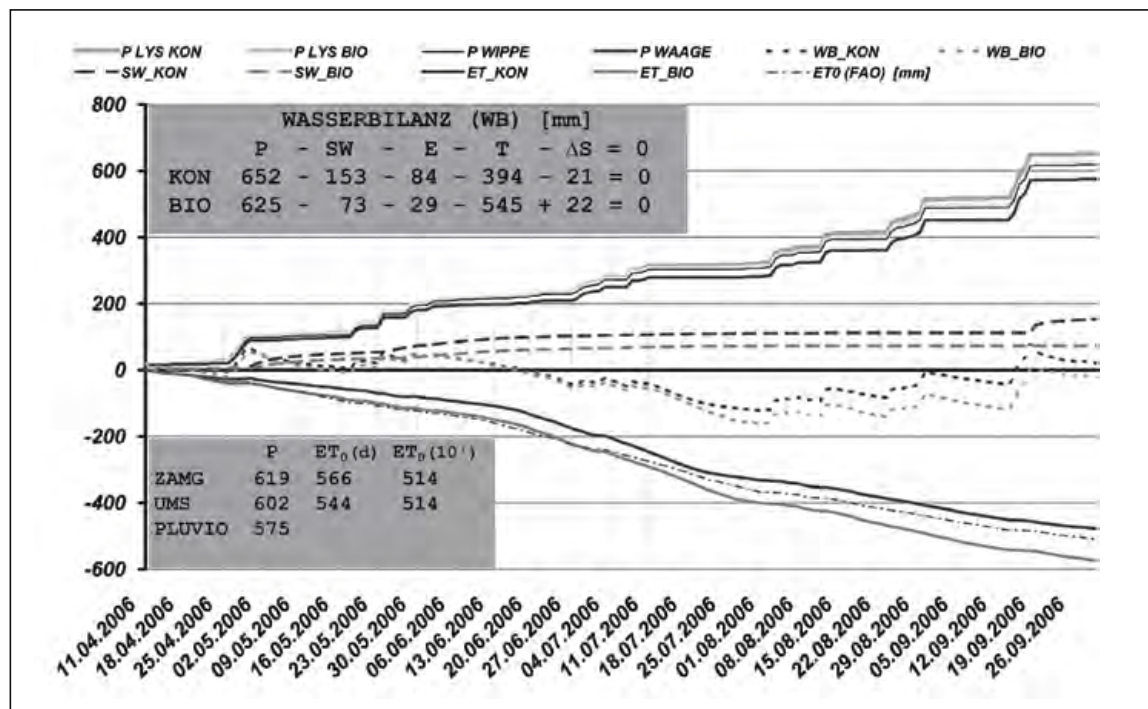


Fig. 3.3: Wasserbilanz einer Fruchtfolgeperiode: Vergleich zwischen konventioneller (KON = Mais) und organischer (BIO = Klee/Gras) Anbaumethode. Erläuterungen zu den Parametern siehe Kap. 1.1. und Kap. 3.2.3.2.

Water balance for a vegetation period: comparison of the conventional (KON = maize) and the organic (BIO = clover/grass) cropping system. Abbreviations of the parameters are explained in chap. 1.1. and chap. 3.2.3.2.

Einige installierte Videokameras an der Station in Wagna ermöglichen es, die verschiedenen Stadien der Pflanzenentwicklung kontinuierlich aufzunehmen. Die Kameras werden auch für den Vergleich der Düngemengen, die auf die Felder appliziert wurden (Fig. 3.4), herangezogen oder um die Wetterdaten visuell zu kontrollieren – z. B.: Ist die gemessene Veränderung des Lysimetergewichtes tatsächlich Niederschlag?

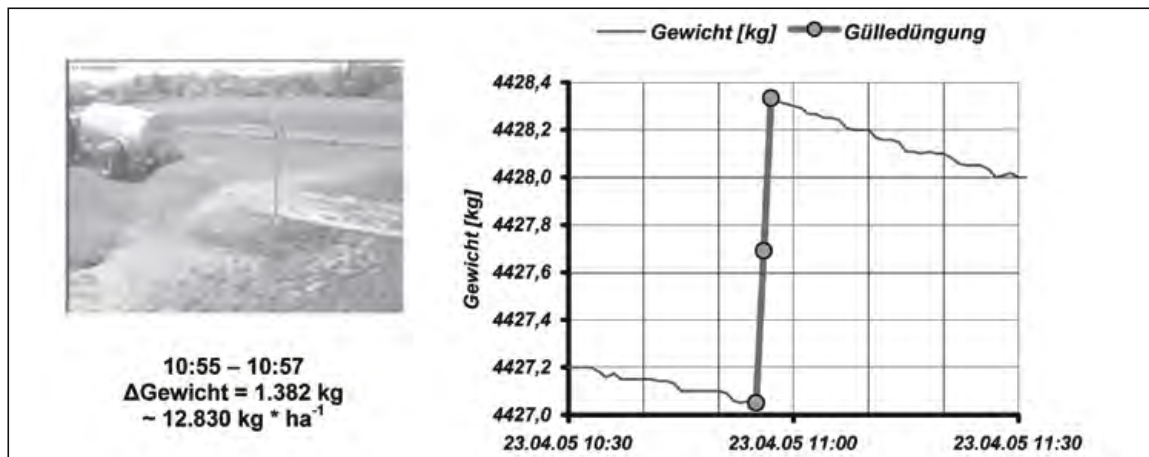


Fig. 3.4: Videomonitoringsystem, um die aufgetragene Düngemenge (links) anhand von Lysimeterdaten zu quantifizieren.

*Video surveying system to check fertilisation (left) and lysimeter data to quantify the amount applied.*

### 3.2.4. Diskussion und Schlussfolgerung

An der Forschungsstation Wagna werden die Daten zur Erstellung der Wasserbilanz und zur Ermittlung der Pflanzenverdunstungskoeffizienten in kurzen Messintervallen – meist alle 10 Minuten – gespeichert. Dies ist ebenso für die Validierung der Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodelle notwendig, wie auch für detaillierte Informationen der Bewirtschaftung und Düngemaßnahmen, die am Versuchsfeld aufgezeichnet werden. Wenn Modelle für größere Gebiete – mit weniger bekannten Parametern – angewendet werden sollen, müssen Modelle zuerst Messdaten der ungesättigten Zone nachbilden können. Detaillierte Aufzeichnungen von modernen Lysimetern bilden dabei die Grundlage für die Modellkalibration und -validierung.

## 4. Hydrologische Modellierung auf der Lysimeterskala

### 4.1. Identifizierung von Heterogenitäten des Wassertransports in der ungesättigten Zone von Lysimetern (C. STUMPP, J. FANK, P. MAŁOSZEWSKI & W. STICHLER)

#### 4.1.1. Einleitung

Die Abschätzung heterogener Transportprozesse in der ungesättigten Zone ist äußerst wichtig für den Grundwasserschutz. Jedoch gibt es praktisch keine zufrieden stellende Bestimmung heterogener Wasserflüsse. Heterogene Böden beinhalten verschiedene Fließpfade, entlang deren sich unterschiedliche Flussraten mit unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten ausbilden. Diese Fließpfade sind messtechnisch nicht voneinander trennbar und

deshalb quantitativ schwer zu erfassen. Eine Möglichkeit die Heterogenität des Wasserflusses in der ungesättigten Zone zu quantifizieren, ist die Verbindung von Umwelteisotopen mit einer integrativen Modellierung. Umwelteisotope (z. B.  $^3\text{H}$ ,  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) wurden bereits erfolgreich herangezogen, um den Transport qualitativ zu beschreiben (C. GAZIS & X. FENG, 2004, S. MACIEJEWSKI et al., 2006, P. MAŁOSZEWSKI et al., 2006, B. SWENSEN, 1997). Außerdem wurden auch quantitative Heterogenitätsbestimmungen in brachliegenden Böden durchgeführt (C. STUMPP et al., 2007). In der vorliegenden Studie wird eine quantitative Methode präsentiert, die die Heterogenität im Wasserfluss durch die ungesättigte Zone eines Lysimeterexperiments mit ackerbaulicher Bewirtschaftung untersucht.

#### 4.1.2. Material und Methoden

Für die Modellierung wurde ein Lysimeter der Forschungsstation in Wagna gewählt. Eine detaillierte Beschreibung des gesamten Testfeldes Wagna ist in J. FANK (1999) gegeben. Das hier untersuchte Gravitationslysimeter (Fig. 4.1) mit einer Oberfläche von  $1\text{ m}^2$  und einer Tiefe von  $150\text{ cm}$  war mit einer Braunerde befüllt. Dem  $30\text{ cm}$  mächtigen  $A_p$ -Horizont (lehmiger Sand) folgte ein  $70\text{ cm}$  mächtiger B-Horizont (lehmiger Sand). Die

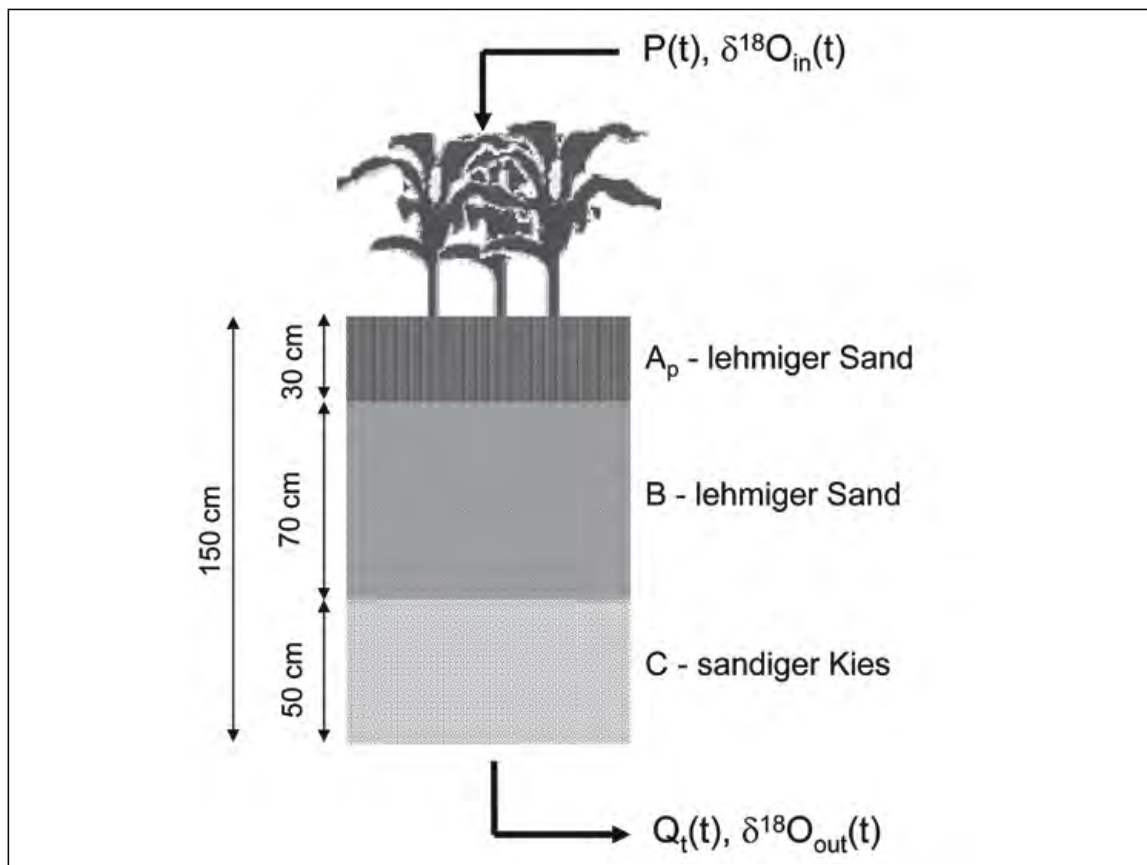


Fig. 4.1: Schematischer Aufbau des Lysimeters mit  $150\text{ cm}$  Tiefe,  $1\text{ m}^2$  Oberfläche, drei verschiedenen Bodenhorizonten und Bepflanzung mit Maismonokultur.  $P(t)$  – Zeitreihe Niederschlag,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{in}}(t)$  – Zeitreihe  $\delta^{18}\text{O}$  im Niederschlag,  $Q_{\text{out}}(t)$  – Zeitreihe Sickerwassermenge,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{out}}(t)$  – Zeitreihe  $\delta^{18}\text{O}$  im Sickerwasser;  $A_p$ , B, C – Bodenhorizonte.

Schematic experimental setup of the lysimeter with a depth of  $150\text{ cm}$ , surface area of  $1\text{ m}^2$ , three different soil horizons and planted with maize monoculture.  $P(t)$  – time series of precipitation,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{in}}(t)$  – time series of  $\delta^{18}\text{O}$  in precipitation,  $Q_{\text{out}}(t)$  – time series of seepage water,  $\delta^{18}\text{O}_{\text{out}}(t)$  – time series of  $\delta^{18}\text{O}$  in seepage water;  $A_p$ , B, C – soil horizons.

unteren 50 cm wurden mit einer sandigen Kiesschicht befüllt. Die Befüllung erfolgte mit gestörtem Material. Es wurde jährlich eine Maismonokultur angepflanzt. Zwischen den Vegetationsperioden wurde das Lysimeter begrünt. Die Bewirtschaftung wurde händisch durchgeführt. Das Sickerwasser  $Q_{\text{out}}(t)$  wurde kontinuierlich mit einer Kippwaage registriert. Niederschlagsmengen  $P(t)$  und andere meteorologische Daten wurden ebenfalls auf der Forschungsanlage erfasst, daraus wurde die Evapotranspiration nach der FAO-56-Methode (R. G. ALLEN et al., 1998) bestimmt. Isotopenverhältnisse im Niederschlag  $\delta^{18}\text{O}_{\text{in}}(t)$  und im Sickerwasser  $\delta^{18}\text{O}_{\text{out}}(t)$  sowie Niederschlags- und Sickerwassermengen wurden über neun Jahre (1992 bis 2000) gemessen.

Figur 4.2 zeigt die wöchentlichen Werte des Lysimeterin- (a) und -outputs (b), die aus unregelmäßigen Beprobungszeitreihen berechnet wurden. Die saisonalen Schwankungen sind deutlich in beiden Zeitreihen erkennbar. Die jährliche Wasserbilanz ist in Tab. 4.1 dargestellt. Die Niederschläge sind im gesamten Zeitraum relativ konstant ( $989 \pm 118 \text{ mm/a}$ ). Die Sickerwassermengen hingegen schwanken stärker ( $394 \pm 138 \text{ mm/a}$ ). Sehr geringe Mengen treten vor allem in den Sommermonaten Juli bis September auf. Nur in den Jahren 1998 und 1999 gab es in diesen Monaten überhaupt Sickerwasser. Zur Berechnung der Transportprozesse wurde die potentielle Verdunstung ( $ET_0$ ) verwendet, da die aktuelle Evapotranspiration ( $ET_{\text{c,act}}$ ) zwar über den gesamten Beobachtungszeitraum von der Summe her übereinstimmt, doch die einzelnen Jahre nicht korrekt abgeschätzt wurden. In den Jahren 1992 bis 1995 und 1997 wäre die Wasserbilanz negativ, was aus einer Unterschätzung der aktuellen Evapotranspiration resultierte. In den Jahren 1996 und 1998 bis 2000 ist genau das Gegenteil der Fall. Hier war die berechnete aktuelle Evapotranspiration zu hoch. Dies ist eine Folge der Abschätzung vieler unbekannter Parameter bezüglich des Bodenwasserspeichervermögens, der Pflanzenentwicklung und des Wurzelwachstums bei der FAO-Methode.

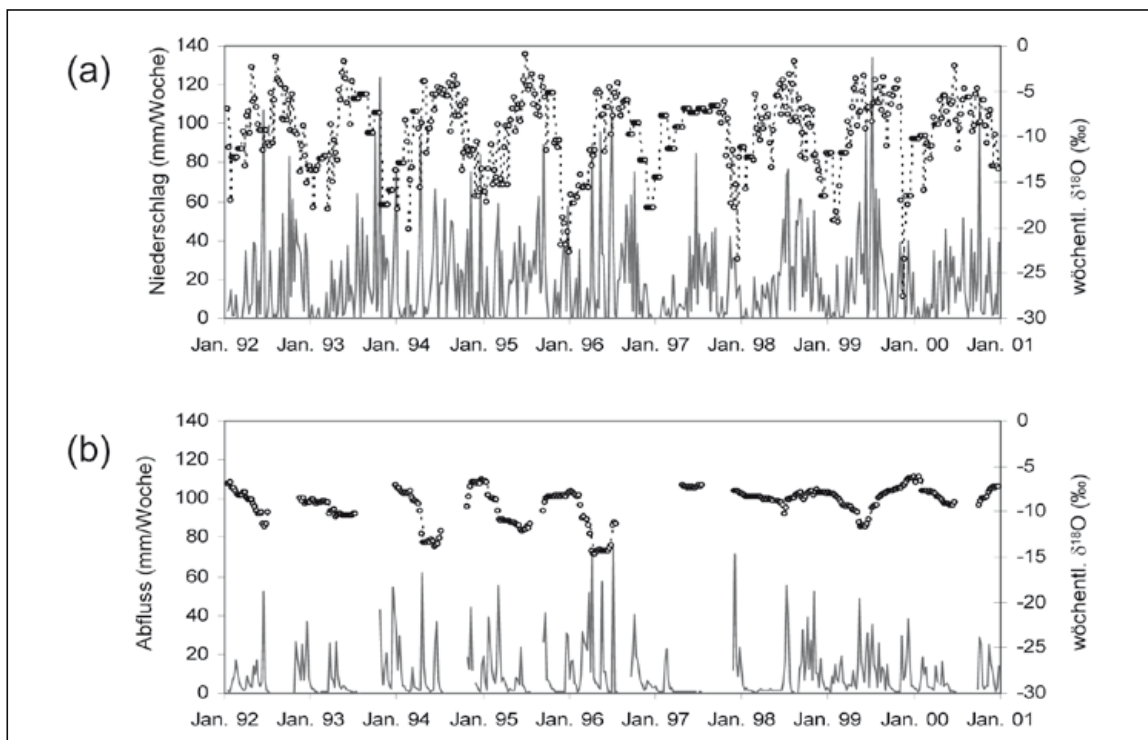


Fig. 4.2: Wöchentlicher Input (a) und Output (b) der Wasserflüsse (graue Linie) und der  $\delta^{18}\text{O}$ -Werte (Kreise).

Weekly input (a) and output (b) water fluxes (grey line) and  $\delta^{18}\text{O}$  values (circles).

Tab. 4.1: Jährliche Mengen der Wasserbilanz (in mm/a) des Lysimeters in Wagna, Österreich.  $P$  – Niederschlag,  $ET_0$  – Referenz-Evapotranspiration,  $ET_{c,act}$  – aktuelle Evapotranspiration,  $Q_{out}$  – Sickerwassermenge des Lysimeters.

Yearly amounts of the water balance in mm/a of the lysimeter in Wagna, Austria.  $P$  – precipitation,  $ET_0$  – reference evapotranspiration,  $ET_{c,act}$  – actual evapotranspiration,  $Q_{out}$  – seepage water from the lysimeter.

Jahr	P	$ET_0$	$ET_{c,act}$	$Q_{out}$
1992	905,6	589,8	502,7	353,5
1993	932,1	699,0	601,5	308,1
1994	1075,0	668,3	627,8	353,8
1995	1040,7	656,1	601,9	404,1
1996	1164,4	615,7	548,6	649,1
1997	802,8	668,5	594,9	202,7
1998	1042,4	630,9	612,7	450,9
1999	1073,7	637,0	614,7	547,1
2000	860,8	715,5	634,2	278,5
Mittel	988,6	653,4	593,2	394,2

Zur Beschreibung der Transportprozesse wurde ein ähnlicher Ansatz wie bei den Autoren P. MAŁOSZEWSKI et al. (2002) verwendet. Dabei wird der Wasserfluss in der ungesättigten Zone in ein paralleles Fließsystem mit zwei Komponenten eingeteilt: dem Matrix- und präferentiellen Fluss (Fig. 4.3). Um die Fließzeitverteilungen zu bestimmen, wurde der Boden als komplexes System vereinfacht, indem ein Lumped-Parameter-Ansatz gewählt wurde (P. MAŁOSZEWSKI & A. ZUBER, 1996), der die In- und Output-Isotopenwerte mit hydraulischen Messungen kombiniert. Darin beschreibt das Dispersionsmodell die Fließzeitverteilung des natürlichen  $\delta^{18}\text{O}$ -Tracergehaltes im Sickerwasser durch das Matrixfließsystem ( $C_m(t)$ ), was gleichzeitig den dispersiven, konvektiven Fluss des mobilen Wassers und möglichen diffusiven Austausch mit stagnierendem Wasser beinhaltet. Der Isotopentransport durch präferentielle Fließwege ( $C_c(t)$ ) wird durch das PISTON-Flow-Modell charakterisiert. Hierzu zählen Makroporen, Wurzelkanäle und andere Fließwege, die nicht am Matrixfluss teilnehmen und in denen das Wasser rein konvektiv durch den Boden fließt. Neben diesem Ansatz, der auf stationären Bedingungen beruht, wurden zusätzlich numerische Berechnungen zum Wasser- und Stofftransport mit dem Programm HYDRUS-1D (J. SIMUNEK et al., 2005) durchgeführt. Hier wird der Wasserfluss durch die RICHARDS-Gleichung und der Isotopentransport durch die Konvektions-Dispersions-Gleichung berechnet. Der Anteil am präferentiellen Fluss an der gesamten Sickerwassermenge wurde durch eine Zwei-Komponenten-Mischung bestimmt, unter der Annahme, dass der präferentielle Fluss konvektiv innerhalb einer Woche, beschrieben durch das PISTON-Flow-Modell, stattfindet.

#### 4.1.3. Ergebnisse und Diskussion

Für die Bestimmung der mittleren Fließzeitverteilung des Matrixflusses wurde der Datensatz in die einzelnen Maisvegetationsperioden unterteilt und unabhängig für jedes Jahr die Parameter für die Fließzeitverteilung bestimmt, da die Abflussmenge unter Mais jährlich stark schwankten (8–280 mm). In der initialen Wachstums- und Pflanzenentwicklungsphase war die mittlere Fließzeit hoch (41 bis 49 Wochen) – verglichen mit denen bei reifendem

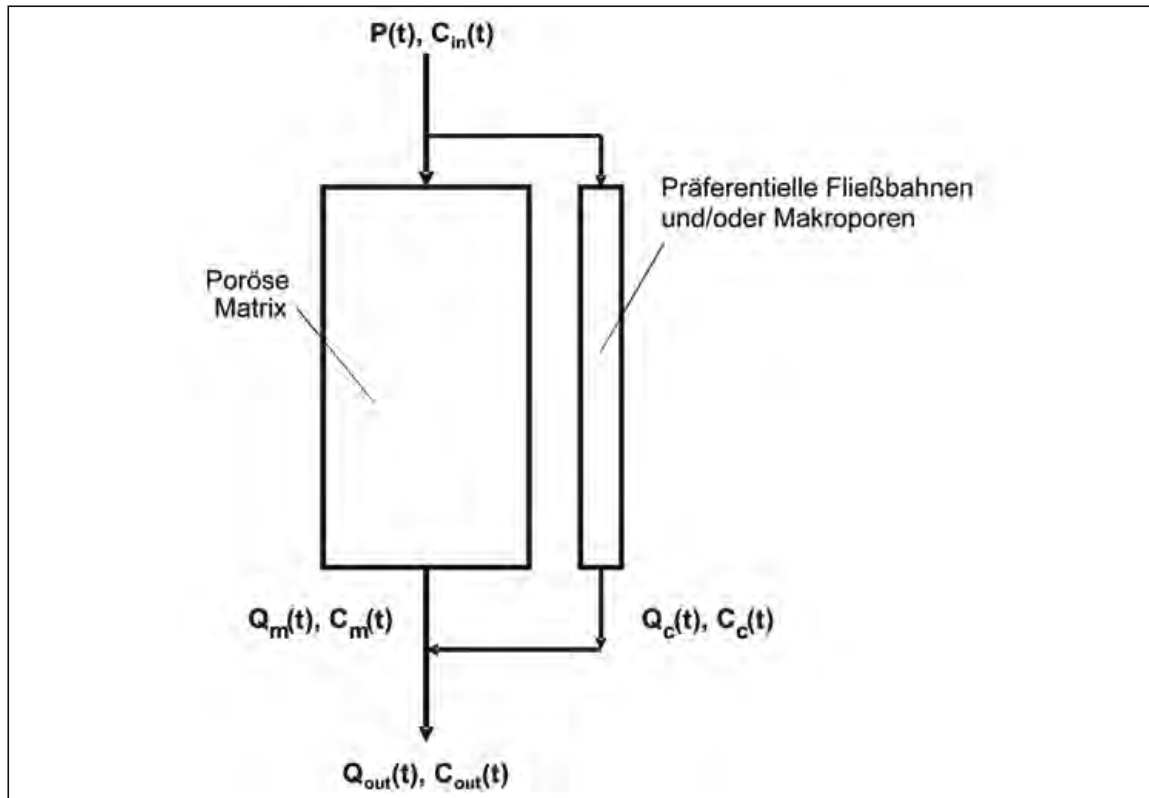


Fig. 4.3: Konzeptionelles Modell des Wasserflusses durch ein Lysimeter mit der Berücksichtigung von präferentiellem ( $Q_c(t)$ ) und Matrixfluss ( $Q_m(t)$ ), wobei die Inputfunktion  $C_{in}(t)$  in eine Outputfunktion  $C_{out}(t)$  umgeformt wird.  $P(t)$  – Zeitreihe Niederschlag,  $C_c(t)$  – Zeitreihe  $\delta^{18}O$  in präferentiellen Fließwegen,  $C_m(t)$  – Zeitreihe  $\delta^{18}O$  im Matrixfluss,  $Q_{out}(t)$  – Zeitreihe Sickerwassermenge.  
 Conceptual model of water flow through a lysimeter considering preferential ( $Q_c(t)$ ) and matrix flow ( $Q_m(t)$ ), where the input function  $C_{in}(t)$  is transformed into the output function  $C_{out}(t)$ .  $P(t)$  – time series of precipitation,  $C_c(t)$  – time series of  $\delta^{18}O$  in preferential flow,  $C_m(t)$  –  $\delta^{18}O$  in matrix flow,  $Q_{out}(t)$  – time series of seepage water.

Bestand (ca. 20 Wochen). Daraus ergab sich eine sehr heterogene Fließzeitverteilung während des Maisbewuchses. Für die Begrünungsphase von Herbst bis Frühling reichte für den gesamten Beobachtungszeitraum eine einzige Anpassung aus, die eine mittlere Fließzeit von 31 Wochen ergab. Wie erwartet, ergab die numerische Modellierung eine wesentlich bessere Anpassung der Transportprozesse (Fig. 4.4). Dabei mussten die bodenhydraulischen Parameter, die in Laborexperimenten ermittelt wurden, stark abgeändert werden, da im Lysimeter eine dichtere Lagerung vorlag und auch die mittleren Wassergehalte niedriger waren.

Aus dem Mischungsansatz wurden die Anteile an präferentiellem Fluss abhängig vom Bewuchs bestimmt. Für die Maisbepflanzung ergab sich ein mittlerer Anteil von 18%, wobei der Wert durch außergewöhnlichen niedrigen präferentiellen Anteil im Jahr 1999 (3%) stark nach unten gezogen wurde. Lässt man dieses Jahr unberücksichtigt, erhält man im Schnitt einen Anteil von 24% präferentiellen Fluss. Warum der Anteil 1999 so niedrig ist, lässt sich nicht eindeutig erklären. Allerdings könnte die Ausbildung präferentieller Fließwege entlang von Wurzelbahnen in diesem Jahr vermindert gewesen sein, weil das Jahr sehr feucht mit geringeren Erträgen und deshalb eventuell verringertem Wurzelwachstum war, was aber nicht belegt werden kann. Der mittlere Wassergehalt im gesamten Bodenprofil war während dieser Vegetationsperiode 1999 auch höher und relativ konstant ( $18,6 \pm 1,2\%$ ) im Vergleich zu den anderen Jahren ( $16,6 \pm 2,4\%$ ). Präferentieller Fluss trat nämlich vor

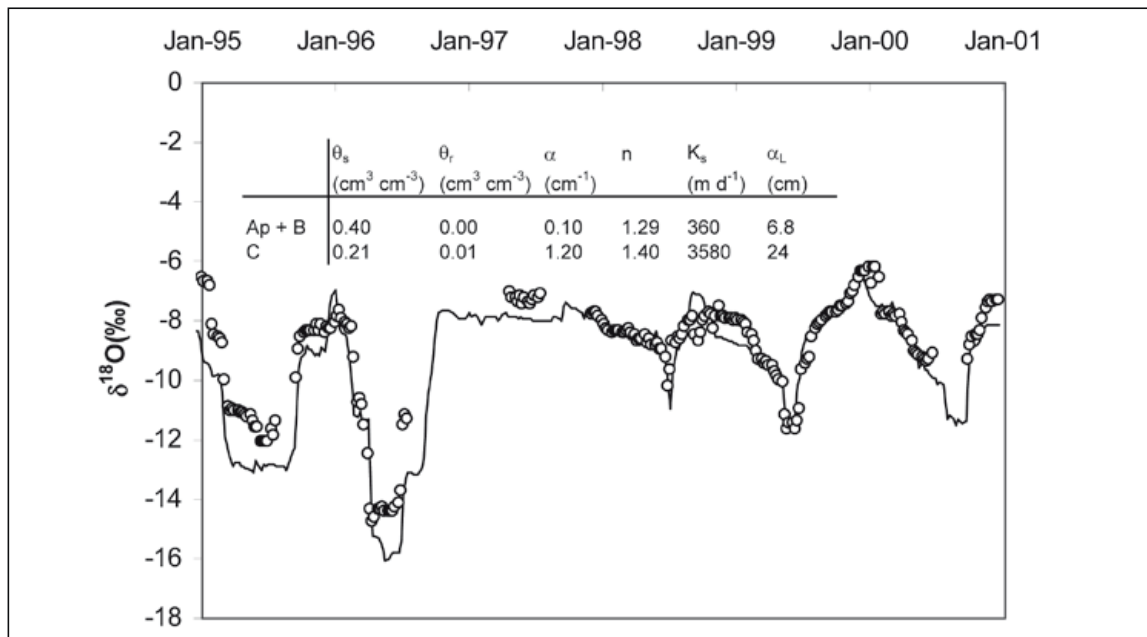


Fig. 4.4: Vergleich der numerischen Modellierung des Isotopentransports mit HYDRUS-1D (Linie) unter Verwendung der angegebenen bodenhydraulischen Parameter mit den Messwerten (Punkte).  $\theta_s$  – Wassergehalt bei Sättigung,  $\theta_r$  – Restwassergehalt,  $\alpha$  und  $n$  – Formparameter,  $K_s$  – gesättigte hydraulische Leitfähigkeit,  $\alpha_L$  – Dispersivität;  $A_p$ , B, C – Bodenhorizonte (vgl. Fig. 4.1).  
 Comparison of numerical modelling of isotope transport with HYDRUS-1D (line) using the stated soil hydraulic parameters with the measured data (points).  $\theta_s$  – saturated water content,  $\theta_r$  – residual water content,  $\alpha$  and  $n$  – shape forming parameter,  $K_s$  – saturated hydraulic conductivity,  $\alpha_L$  – dispersivity;  $A_p$ , B, C – soil horizons (compare fig. 4.1).

allein bei einer Erhöhung des mittleren Wassergehaltes auf. Die Autoren W. W. STONE & J. T. WILSON (2006), die zwei Chlorid-Tracerversuche bei unterschiedlichen Starkregenereignissen durchführten, fanden in der Rohrdrainage eines mit Mais und Sojabohne bewachsenen Feldes 11 % bzw. 51 % Anteil an präferentiellm Fluss.

Betrachtet man die Begrünungsphase von Herbst bis Frühling, so wurden hier wesentlich geringere Anteile an präferentiellm Fluss beobachtet. Im Mittel stammten hier 3,3 % des Abflusses aus präferentiellm Fließwegen. Die Spanne zwischen den einzelnen Jahren war nicht so groß wie unter Maisbewuchs (1,7–5,2 %). Aus den Berechnungen lässt sich zusammenfassend schließen, dass der Fluss unter Maisvegetation wesentlich heterogener verlief. Hier wurden starke Unterschiede in mittleren Fließzeiten, im mittleren Wassergehalt und am Anteil an präferentiellm Fluss beobachtet. Dahingegen waren die Fließverhältnisse unter Gründedecke homogener und es trat nur ein geringer Anteil an präferentiellm Fluss auf.

## 4.2. Schwerkraft- versus Unterdrucklysimeter – eine Simulationsstudie

(E. STENITZER & J. FANK)

### 4.2.1. Einleitung

Für eine nachhaltige Nutzung der Grundwasservorräte muss die natürliche Grundwasserneubildung bekannt sein. Auch bei der Anwendung von Grundwassermodellen (G. ROCK, 2003) und für die Prognose des Stofftransportes in das Grundwasser ist eine möglichst genaue Erfassung der Sickerwasserbewegung (E. KLAGHOFER, 2002) erforderlich. Die zuverlässigste Methode zur Erfassung der Grundwasserneubildung aus Niederschlägen ist die Versicke-



rungsmessung mit Lysimetern, wobei allerdings die so genannten Lysimeterfehler vermieden werden müssen. Bei Verwendung von Schwerkraftlysimetern wird der Wasserfluss an deren Untergrenze am Übergang vom Boden in das Sammelgefäß zurückgehalten, da dort die Saugspannung auf den Wert 0 abfällt und sich die Bodenporen sättigen müssen, bevor sich Sickerwasser bilden kann (C. H. M. VAN BAVEL, 1961, H. NORDMEYER & D. ADERHOLD, 1994), während im natürlichen Bodenprofil ein Gradient die kontinuierliche Sickerung zum Grundwasser ermöglicht. Durch diese Verzögerung des Sickerwasserflusses herrschen in einem Schwerkraftlysimeter höhere Wassergehalte als in einem natürlichen Bodenprofil vor, was eine Verbesserung der Wasserversorgung des Pflanzenbestandes auf dem Lysimeter und damit eine höhere Transpiration bzw. eine verringerte Sickerwasserbildung bewirkt. Für eine exakte Ermittlung der Grundwasserneubildung müssen daher Unterdrucklysimeter verwendet werden, bei welchen die im natürlichen Bodenprofil gegebene Saugspannung auf die Untergrenze des Lysimeters übertragen wird. In der vorliegenden Arbeit wird für zwei unterschiedliche Standorte der Fehler abgeschätzt, mit welchem bei Verwendung von einfachen Schwerkraftlysimetern anstelle von Unterdrucklysimetern zu rechnen ist.

## 4.2.2. Material und Methoden

### 4.2.2.1. Lysimeterstation Wagna

An der Lysimeterstation in Wagna (Steiermark) sind seit Frühjahr 2004 zwei wägbare monolithische Unterdrucklysimeter mit 1 m<sup>2</sup> Oberfläche und 200 cm Tiefe (J. FANK & G. VON UNOLD, 2006) installiert. Das eine Lysimeter befindet sich in einer Großparzelle mit konventioneller Fruchtfolge, während mit dem anderen die Auswirkung des biologischen Landbaues hinsichtlich der angestrebten Verbesserung der Grundwasserqualität untersucht wird. Für unsere Simulationsstudie wurden die Messungen des „biologischen“ (BIO) Lysimeters im Zeitraum von Sommer 2005 bis Herbst 2006 verwendet, in welchem die Versuchsparzelle mit einem Klee-grasgemisch bepflanzt war (Fig. 4.5).

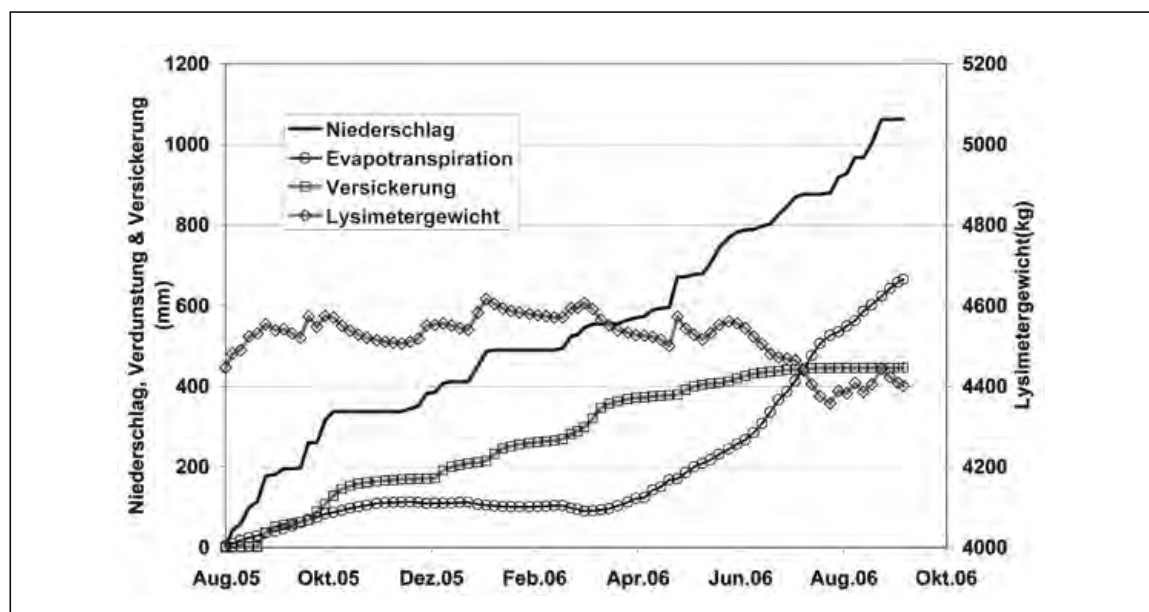


Fig. 4.5: Messwerte von Niederschlag, Evapotranspiration, Versickerung und Gewicht des BIO-Lysimeters in Wagna.

Measured precipitation, evapotranspiration, deep percolation and weight of the BIO lysimeter at Wagna.

#### 4.2.2.2. Lysimeterstation Hirschstetten

An der Lysimeterstation in Hirschstetten (bei Wien) sind seit dem Frühjahr 1995 18 nicht wägbare gefüllte Schwerkraftlysimeter mit 3 m<sup>2</sup> Oberfläche und 250 cm Tiefe installiert (K. BÖHM & J. HÖSCH, 2001), welche die drei wichtigsten Bodenformen des Marchfeldes repräsentieren. Für die Untersuchungen wurden Messungen eines mit einem „tiefgründigen Tschernosem“ aus Fuchsenbigl gefüllten Lysimeters der Jahre 2001 bis 2005 verwendet, in welchen die Lysimeter und ihre Umgebung mit Senf, Kartoffeln, Winterweizen und Wintertraps bepflanzt waren (Fig. 4.6). Während dieser Zeit fiel bei dieser Bodenform im Lysimeter keine Versickerung an!

#### 4.2.2.3. Simulation

Die Versickerung aus beiden Lysimetertypen wurde mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell SIMWASER (E. STENITZER et al., 2007) unter Verwendung gemessener Eingabedaten berechnet. Die benötigten hydraulischen Bodenparameter wurden für das Lysimeter in Wagna an ungestörten Bodenproben ermittelt, die beim Lysimereinbau gewonnen worden waren, während sie für das Lysimeter in Hirschstetten aus den zeitgleichen Messungen des Wassergehaltes und der Saugspannung in den verschiedenen Tiefen abgeleitet wurden. Für beide Standorte wurde jeweils in einem Fall das natürliche Bodenprofil bis zur Grundwasseroberfläche und im anderen Fall ein einfaches Schwerkraftlysimeter simuliert, indem als untere Randbedingung eine konstante Saugspannung von 0 angesetzt wurde. Für das Lysimeter in Hirschstetten wurde zusätzlich die Auswirkung einer Umwandlung des bestehenden Schwerkraftlysimeters in ein einfaches Unterdrucklysimeter mit einem konstanten Unterdruck von 200 hPa auf die zu erwartende Sickerwasserbildung simuliert. Die Ergebnisse wurden im Falle von Wagna mit den Messwerten des Unterdrucklysimeters, und im Falle von Hirschstetten mit den Messungen des Schwerkraftlysimeters verglichen; damit konnte einerseits die Aussagefähigkeit des Modells demonstriert und andererseits der Fehler eines Schwerkraftlysimeters quantifiziert werden.

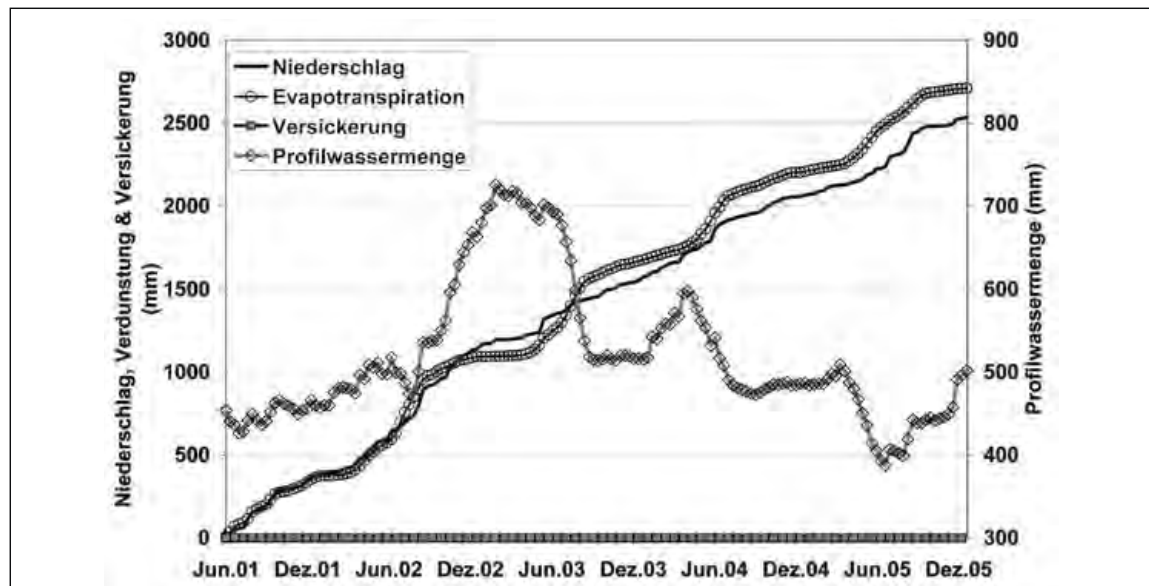


Fig. 4.6: Messwerte von Niederschlag, Evapotranspiration, Versickerung und Profilwassergehalt des „Schluffigen Tschernosem“-Lysimeters in Hirschstetten.  
Measured precipitation, evapotranspiration, deep percolation and soil water storage of the “Silty Chernozem” lysimeter at Hirschstetten.

### 4.2.3. Ergebnisse

In Wagna entspricht die simulierte Grundwasserneubildung der mit dem Unterdrucklysimeter gemessenen Versickerung (Fig. 4.7), während die für ein Schwerkraftlysimeter berechnete Versickerung etwa um 10 % niedriger als die Versickerung in einem natürlichen Profil liegt. Beim Lysimeter in Hirschstetten ergab die Simulation des (exi-

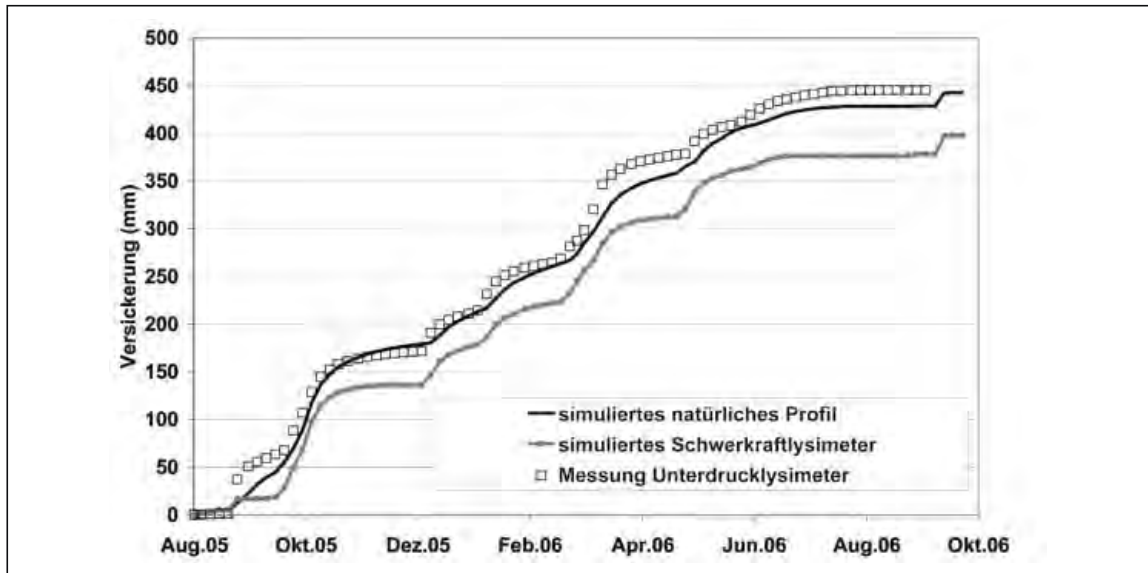


Fig. 4.7: Gemessene Sickerwassermenge des Unterdrucklysimeters in Wagna im Vergleich zur simulierten Versickerung des ungestörten Bodenprofils bzw. eines Schwerkraftlysimeters.  
 Measured percolation of the “controlled tension” lysimeter at WAGNA in comparison with simulated percolation of the “natural” soil profile and a “tension free” lysimeter respectively.

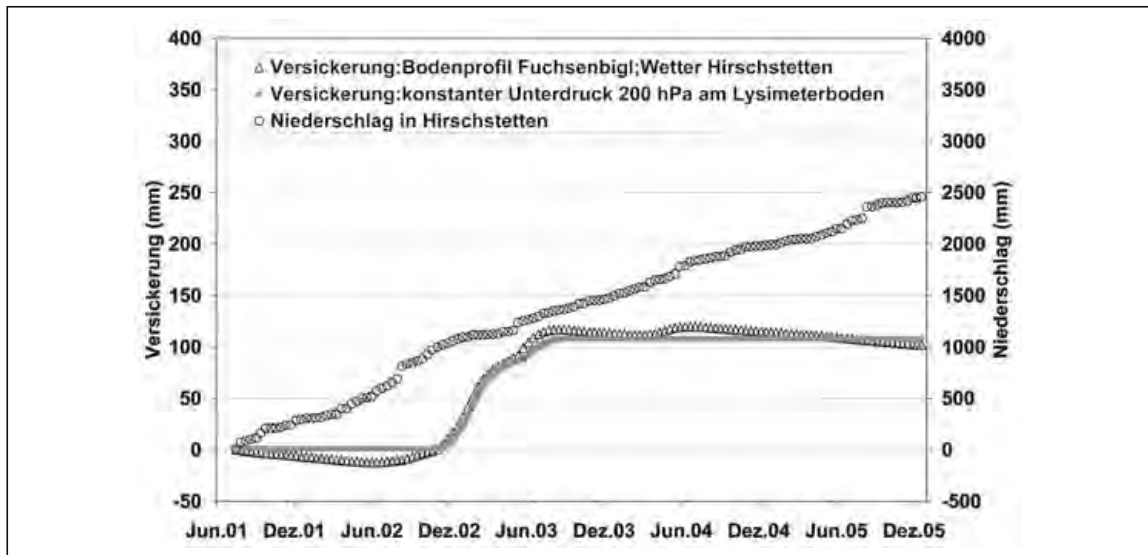


Fig. 4.8: Niederschlag in Hirschstetten und simulierte Versickerung der tiefgründigen Schwarzerde mit natürlichem Bodenprofil des Herkunftsstandortes Fuchsensbigl im Vergleich zur simulierten Versickerung nach Umwandlung des Schwerkraftlysimeters in ein Unterdrucklysimeter.  
 Precipitation at Hirschstetten and simulated percolation of the natural soil profile at the site of origin in Fuchsensbigl, compared to the simulated percolation after modification of the tension free lysimeter into a tension lysimeter.

stierenden) Schwerkraftlysimeters analog zu den Messungen keine Versickerung, während sowohl beim simulierten natürlichen Bodenprofil als auch bei einer simulierten Umwandlung in ein Unterdrucklysimeter eine Grundwasserneubildung von 120 mm berechnet wurde (Fig. 4.8).

#### **4.2.4. Diskussion und Ausblick**

Der Vergleich zwischen der gemessenen und der simulierten Versickerung in Wagna zeigt zunächst einmal, dass der mit dem Modell SIMWASER berechnete Bodenwasserhaushalt des dort anstehenden Bodenprofils mit den Messungen des Unterdrucklysimeters gut übereinstimmt. Da der an der Untergrenze des Lysimeters angelegte (und gemessene) Saugspannungsverlauf weitestgehend dem im natürlichen Bodenprofil gemessenen Verlauf entspricht und da die Lysimeteroberfläche komplett im Feldbestand integriert ist, kann weiters angenommen werden, dass der Bodenwasserhaushalt des Unterdrucklysimeters dem des natürlichen Bodenprofils entspricht.

Damit kann es als erwiesen angesehen werden, dass mit dem Modell SIMWASER die natürliche Grundwasserneubildung des Standortes am „BIO-Lysimeter“ in Wagna richtig berechnet wurde. Andererseits zeigt die Simulation des Schwerkraftlysimeters in Hirschstetten, dass die im Modell für einen solchen Fall angesetzte „untere Randbedingung“ sowohl hinsichtlich der Versickerung als auch hinsichtlich der im Bodenprofil des Lysimeters gespeicherten Wassermenge (Fig. 4.6) richtige Ergebnisse liefert.

Die Simulationsergebnisse zeigen nun, dass bei Anwendung einfacher Schwerkraftlysimeter die Grundwasserneubildung generell unterschätzt wird. Bei niederschlagsreichen Standorten dürfte der Fehler bei der Bestimmung der punktuellen Neubildung jedoch tolerierbar sein: Er beträgt im Falle von Wagna etwa 10% der „richtigen“ Grundwasserneubildung. Dieser Befund entspricht dem Ergebnis von Vergleichsmessungen zwischen kleinen (Durchmesser 45 cm, Tiefe 110 cm) monolithischen Schwerkraft- und Unterdrucklysimetern aus sandigem Lehm in Berkshire (England), die bei einem Jahresniederschlag von 680 mm und einer Zusatzbewässerung von 110 mm erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede zeigten (R. DOWDELL & C. P. WEBSTER, 1980), da durch die ausreichende Wasserversorgung des Grasbestandes aus Niederschlag und Bewässerung kein wesentlicher Wasserentzug aus dem unteren Lysimeterbereich durch die Pflanzenwurzeln stattgefunden hat. Im Trockengebiet wie z.B. dem Marchfeld jedoch sollten bei tiefgründigen Standorten mit hoher Speicherkraft Unterdrucklysimeter zur Erfassung des Bodenwasserhaushaltes bzw. der Grundwasserneubildung verwendet werden, da ansonsten fälschlicherweise angenommen würde, dass von solchen Böden kein Stoffeintrag durch Sickerwasser und deshalb keine Grundwasserbelastung stattfinden könne. Bei der Bewertung bisher vorliegender Messergebnisse der Schwerkraftlysimeter in Hirschstetten sowie vergleichbarer anderer Anlagen im Trockengebiet sollte daher vor einer Übertragung der punktuellen Messergebnisse auf Bereiche mit vergleichbaren tiefgründigen Bodenverhältnissen zunächst eine Anpassung an das natürliche Bodenprofil mit Hilfe der Simulation vorgenommen werden.

### **4.3. Bestimmung effektiver Parameter für die Modellierung des Wassertransportes auf der Lysimeterskala (W. DURNER, S. C. IDEN & U. JANSEN)**

#### **4.3.1. Einleitung**

Eine geeignete Charakterisierung von Wasserfließprozessen spielt in beinahe allen allgemeinen und angewandten Bereichen der Boden-, Wasser-, Nährstoff- und Salzgehaltsforschung eine große Rolle. Wasserflüsse in Böden werden gewöhnlich durch die

RICHARDS-Gleichung beschrieben, welche die Wasserretentionskurve und die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion als grundlegende Beziehungen enthält. Die RICHARDS-Gleichung ist auf einer Skala von  $10^{-2}$  bis  $10^{-1}$  m, der so genannten Messskala, gültig (W. DURNER & H. FLÜHLER, 2005), wird aber häufig als Prozessmodell für den Wassertransport auf sehr viel größeren Skalen eingesetzt. Die Retentionskurve sowie die Leitfähigkeitsfunktion werden als effektive Eigenschaften verwendet. Die häufig sehr große räumliche Variabilität der bodenhydraulischen Eigenschaften wird dementsprechend durch eine Homogenitätsannahme ersetzt. Aufgrund der Nichtlinearität der Fließgleichung ergibt die Mittelung von nichtlinearen Eigenschaften mittlere Eigenschaften, welche in der Regel nicht mit den „effektiven“ Eigenschaften identisch sind. Für den allgemeinen Fall ist nicht geklärt, ob effektive Eigenschaften überhaupt existieren. Wenn sie existieren, ergeben sich Fragen hinsichtlich ihrer globalen Form im Vergleich zu lokalen Eigenschaften (z. B. VAN GENUCHTEN/MUALEM-Funktion). Eine Methode zur Lösung dieses Problems besteht in der Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften auf der eigentlichen Interessenskala durch inverse Modellierung (Fig. 4.9).

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Untersuchung der Identifizierbarkeit von effektiven hydraulischen Eigenschaften homogener sowie geschichteter Bodensysteme auf

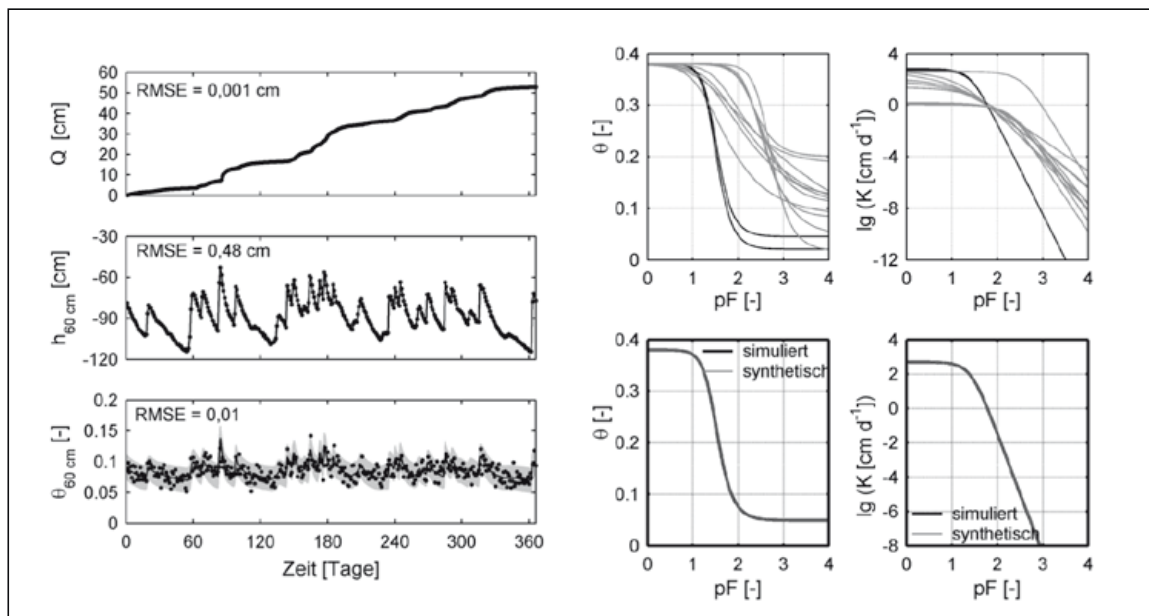


Fig. 4.9: Links: synthetisch gemessene und invers simulierte kumulative Ausflüsse ( $Q$ ), Matrixpotentiale ( $h$ ) und Wassergehalte ( $\theta$ ) in 6 cm Tiefe in einem 2 m tiefen Lysimeter. Bodenart: Sand. Experimenttyp: natürliche Randbedingungen. RMSE = „root mean square error“. Rechts: identifizierte hydraulische Eigenschaften. Obere Zeile: Identifizierung bei Anwendung des lokal konvergenten LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus, erhalten aus verschiedenen Schätzungen der Anfangsparameter. Untere Zeile: korrespondierende Schätzungen bei Anwendung des global konvergenten SCE-UA-Algorithmus.  $pF$  – Wasserspannungsmessung,  $\lg(K [\text{cm d}^{-1}])$  – Logarithmus der hydraulischen Leitfähigkeit.

Left: synthetic measured and inversely simulated cumulative outflow ( $Q$ ), pressure heads ( $h$ ) and water contents ( $\theta$ ) at a depth of 60 cm in a lysimeter 2 m deep. Soil type: sand. Experiment type: natural boundary conditions. RMSE = „root mean square error“. Right: identified hydraulic properties. Upper Row: identification results by the local convergent LEVENBERG-MARQUARDT algorithm, obtained from different initial parameter estimates. Lower row: corresponding estimates obtained by the global convergent SCE-UA algorithm.  $pF$  – suction measurement,  $\lg(K [\text{cm d}^{-1}])$  – log hydraulic conductivity.

der Lysimeterskala. Um diese Fragen zu beantworten, sind Machbarkeitsstudien unter Einbeziehung von synthetischen Daten notwendig. In Kap. 4.4. wird diese Methode zur Untersuchung realer Messdaten der Lysimeterstation Wagna in Österreich verwendet.

#### 4.3.2. Material und Methoden

Synthetische Daten des Bodenwasserstatus (Wassergehalte und Matrixpotentiale in verschiedenen Positionen) und Wasserflüsse über die Ränder (kumulative Ausflussdaten und obere Randflüsse) wurden in Vorwärtssimulationen der Bodenwasserbewegung in 2 m tiefen Lysimetern unter Verwendung der HYDRUS-1D-Software (SIMUNEK et al., 1998) erstellt. Die generierten Daten wurden durch Addieren von zufälligen Fehlern

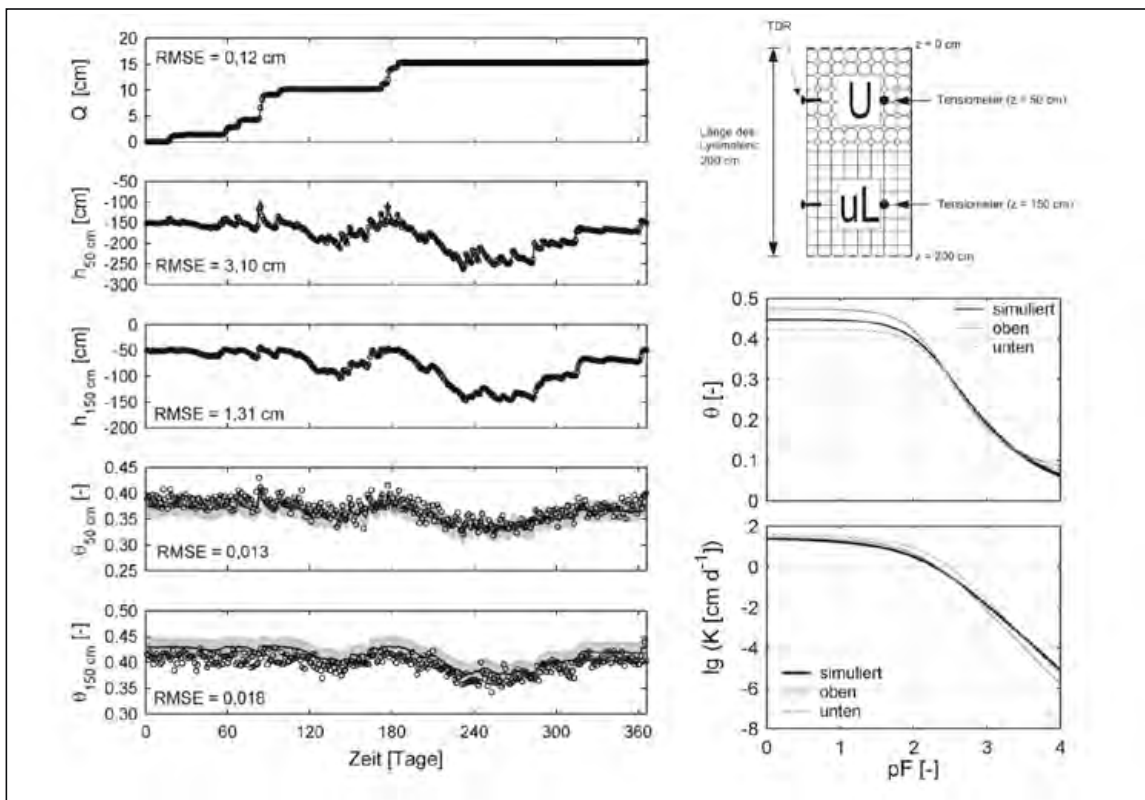


Fig. 4.10: Links: synthetisch gemessene und invers simuliert kumulative Ausflüsse ( $Q$ ), Matrixpotentiale ( $h$ ) und Wassergehalte ( $\theta$ ) in zwei Tiefen in einem 2 m tiefen Lysimeter. Bodentyp: Profil I. Experimenttyp: natürliche Randbedingungen. RMSE = „root mean square error“. Rechts: identifizierte hydraulische Eigenschaften bei Anwendung des global konvergenten SCE-UA-Algorithmus. Zum Vergleich wurden die hydraulischen Funktionen der einzelnen Bodenschichten als hellgraue Linien hinzugefügt. Die Unsicherheiten in den effektiven hydraulischen Funktionen sind als 95 %-Konfidenzintervalle dargestellt. U – Bodenart Schluff, uL – Bodenart schluffiger Lehm, TDR – Wassergehaltsmessung, pF – Wasserspannungsmessung,  $\lg(K [\text{cm d}^{-1}])$  – Logarithmus der hydraulischen Leitfähigkeit.

Left: synthetic measured and inversely simulated cumulative outflow ( $Q$ ), pressure heads ( $h$ ) and water contents ( $\theta$ ) at two depths in a lysimeter 2 m deep. Soil type: profile I. Experiment type: natural boundary conditions. RMSE = „root mean square error“. Right: identified hydraulic properties obtained by the global convergent SCE-UA algorithm. For comparison, the hydraulic functions of both individual soil layers are included as grey lines. The uncertainties in the effective hydraulic functions are presented as 95 % confidence intervals. U – silt, uL – silty loam, TDR – water content measurement, pF – suction measurement,  $\lg(K [\text{cm d}^{-1}])$  – log hydraulic conductivity.

in der Größenordnung typischer Messfehler ausgelenkt und anschließend in inversen Simulationen zur Bestimmung effektiver hydraulischer Eigenschaften eingesetzt. Die Vorwärtssimulationen fanden unter natürlichen, instationären Randbedingungen über einen Zeitraum von einem Jahr sowohl für homogene Böden (Ton, Schluff und Sand, wie in W. DURNER & H. FLÜHLER, 2005, definiert) und zum anderen für geschichtete Profile mit unterschiedlichen Bodenmaterialien statt.

Die Kombination von Schluff und schluffigem Lehm (Fig. 4.10, Profil I) führte zu einem schwach heterogenen Bodensystem, die Kombination aus Schluff und lehmigem Sand (Fig. 4.11, Profil II) rief eine starke Heterogenität hervor. Die generierten Daten wurden in inversen Simulationsszenarien verwendet. Die Zielfunktion beinhaltete 366 kumulative Ausflüsse (ein Wert pro Tag), 732 Matrixpotentiale und – in einigen Szenarien – auch 732 Wassergehalte. Alle synthetischen Daten wurden mit einem Fehler belegt: durch Addieren eines normal verteilten Fehlers mit einem Mittelwert von 0 und einer Standardabweichung von 0,001 cm für die Ausflüsse, 0,5 cm für die Matrixpotentiale und 0,01 cm für die Wassergehalte. Diese Abweichungen geben die Genauigkeit der Messinstrumente der Lysimeterstation Wagna wieder. Die Gewichte für die Daten in der Zielfunktion wurden als Kehrwerte der Varianzen der Messfehler definiert.

Die bodenhydraulischen Funktionen wurden gemäß der VAN GENUCHTEN/MUALEM-Funktion definiert und beinhalten fünf Parameter: Den Sättigungswassergehalt  $\theta_s$ , den Restwassergehalt  $\theta_r$ , den Porengrößenparameter  $\alpha$ , den Parameter  $n$  und die gesättigte Wasserleitfähigkeit  $K_s$ . In der inversen Parameterschätzung wurde der Sättigungswassergehalt  $\theta_s$  auf seinen realen Wert fixiert, sodass der Parametervektor  $p$  vier Unbekannte enthielt. Für die Parameteroptimierung wurden der LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus, welcher in HYDRUS-1D enthalten ist, und der global konvergente Shuffled-Complex-Evolution(SCE-UA)-Algorithmus angewendet. Der SCE-UA-Algorithmus ist in MATLAB, Version 7 (THE MATH WORKS, 2007) implementiert und mit dem HYDRUS-1D-Kernel, Version 7 (J. SIMUNEK et al., 1998), verknüpft. Eine Unsicherheitenanalyse wurde durch Anwendung der First-order-second-moment (FOSM)-Methode durchgeführt. Für weitere Details siehe U. JANSEN (2005).

### 4.3.3. Ergebnisse und Diskussion

Die inverse Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften lokal homogener Lysimeter aus Beobachtungen von Randflüssen und Statusvariablen in zwei Tiefen unter natürlichen Randbedingungen war erfolgreich. Für die meisten Bodentypen war es ausreichend, den kumulativen Fluss am oberen Rand und einige tensiometrische Messungen in die Zielfunktion zu integrieren. Die Beobachtungen und inversen Simulationen zeigen eine perfekte Übereinstimmung (Fig. 4.9). Die Identifikation der ursprünglichen Eigenschaften war zum größten Teil korrekt und eindeutig. Dieses Ergebnis für synthetische Daten spiegelt jedoch einen idealen Fall wider ohne Berücksichtigung von Fehlern hinsichtlich des Prozessmodells und des parametrischen Modells und ohne systematische Fehler in den Daten. Dieses Ergebnis ist außerdem beschränkt auf den Gebrauch eines robusten Parameterschätzverfahrens (Fig. 4.9). Die inverse Simulation ergab für geschichtete Bodenprofile (Fig. 4.10 und 4.11) durchweg eine gute Übereinstimmung zwischen beobachteten und gefitteten Ausflüssen trotz der Homogenitätsannahme. Die interne Heterogenität wird in den Ausflussdaten nicht sichtbar. Für das weniger heterogene Profil I (Fig. 10) ist sogar die Anpassung der simulierten an die gemessenen Statusvariablen (Matrixpotentiale und Wassergehalte) gut. Im Fall des stärker heterogenen Profils II (Fig. 4.11) sind die Abweichungen jedoch sehr offensichtlich. Das geschichtete System

kann nicht länger durch effektive „mittlere Bodeneigenschaften“ beschrieben werden. Wenn die Schichtung explizit in das Parameterschätzverfahren integriert wird, ist es möglich, die Eigenschaften von zwei einzelnen Schichten simultan durch die inverse Prozedur zu bestimmen (U. JANSEN, 2005).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ableitung effektiver hydraulischer Eigenschaften großer Bodenkörper auf einer für Feldböden relevanten Längenskala aus Messungen an Lysimetern möglich ist. Im Vergleich zu freien Bodenkörpern ergibt sich der wichtige Vorteil der korrekten Kenntnis der Wasserflüsse an den Rändern des Systems. Die Ermittlung von Wasser- und Stofftransportparametern aus Lysimeterexperimenten mit Hilfe der Methode der inversen Modellierung beinhaltet dennoch beträchtliche Herausforderungen. Es erfordert den Gebrauch effizienter und moderner Computercodes zur Lösung der Transportgleichungen und robuste Algorithmen für die Parameterschätzung. Probleme bei der Übertragung dieser Technik auf reale Daten ergeben sich aus der Verletzung

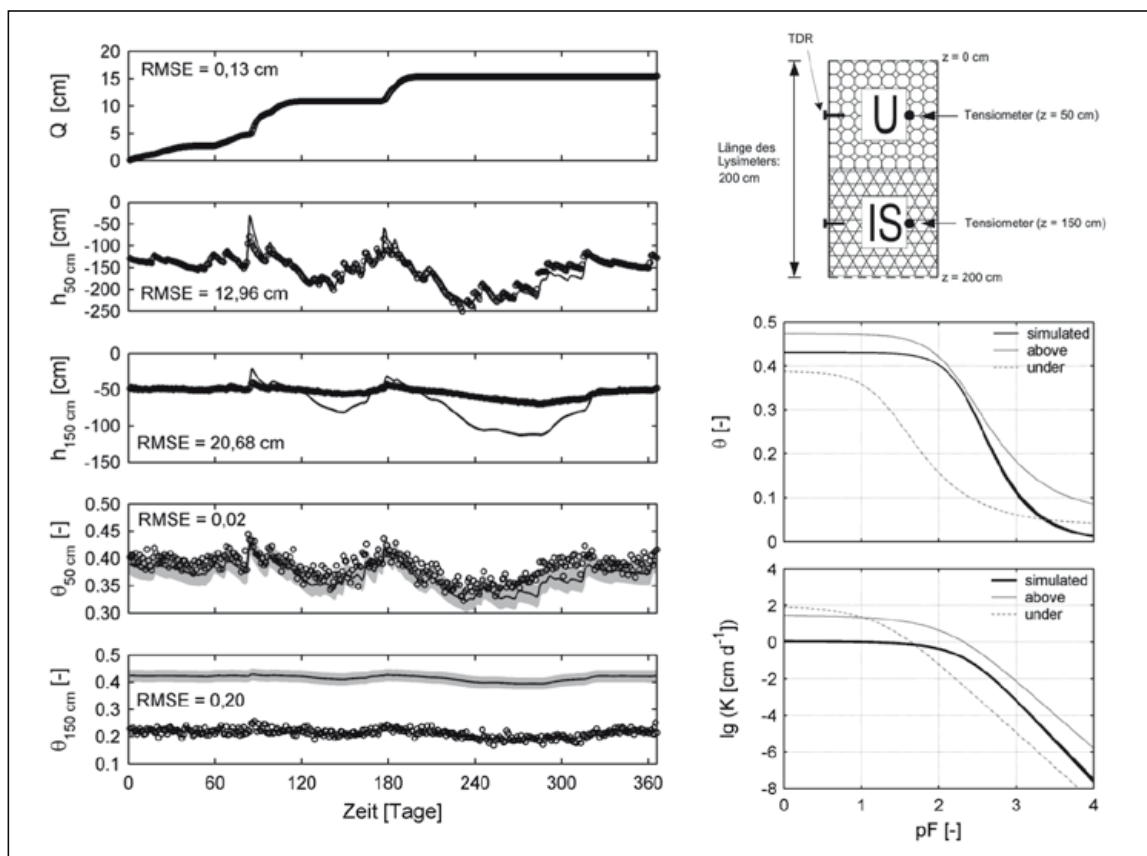


Fig. 4.11: Links: synthetisch gemessene und invers simuliert kumulative Ausflüsse ( $Q$ ), Matrixpotentiale ( $h$ ) und Wassergehalte ( $\theta$ ) in zwei Tiefen in einem 2m tiefen Lysimeter. Bodentyp: Profil II. Experimenttyp: natürliche Randbedingungen. RMSE = „root mean square error“. Rechts: identifizierte hydraulische Eigenschaften bei Anwendung des global konvergenten SCE-UA-Algorithmus.  $\bar{U}$  – Bodenart Schluff,  $IS$  – Bodenart lehmiger Sand, TDR – Wassergehaltsmessung,  $pF$  – Wasserspannungsmessung,  $lg(K [cm d^{-1}])$  – Logarithmus der hydraulischen Leitfähigkeit. Left: synthetic measured and inversely simulated cumulative outflow ( $Q$ ), pressure heads ( $h$ ) and water contents ( $\theta$ ) at two depths in a lysimeter 2m deep. Soil type: profile II. Experiment type: natural boundary conditions. RMSE = „root mean square error“. Right: identified hydraulic properties obtained by the global convergent SCE-UA algorithm.  $\bar{U}$  – silt,  $IS$  – loamy sand, TDR – water content measurement,  $pF$  – suction measurement,  $lg(K [cm d^{-1}])$  – log hydraulic conductivity.



einiger der zuvor aufgestellten Voraussetzungen, wie z. B. der fehlerlosen Darstellung der Fließprozesse durch die RICHARDS-Gleichung und das Vernachlässigen von Hysterese. Außerdem führt die Aktivität von Pflanzen bei der Wasseraufnahme während der Evapotranspiration zwangsläufig zu Problemen. Dieser Aspekt wird in Kap. 4.4. näher thematisiert.

#### **4.4. Modellierung des Bodenwasserhaushalts und des Tracertransportes auf der Lysimeterskala (U. JANSEN & W. DURNER)**

##### **4.4.1. Einleitung**

Das Modellieren des Stofftransportes in Böden erfordert eine exakte Charakterisierung des Wassertransportes. Im Allgemeinen wird die RICHARDS-Gleichung zur Beschreibung instationärer Fließprozesse verwendet. Aufgrund der hochgradigen Nichtlinearität der hydraulischen Funktionen ist die Übertragbarkeit dieser Gleichung auf größere Skalen für Böden mit räumlichen Variabilitäten der hydraulischen Parameter ein häufig diskutiertes Problem in der Bodenhydrologie (W. DURNER & H. FLÜHLER, 2005). Um die Skalenlücke zwischen Labor und Feld zu schließen, gelangte die Lysimeterskala vermehrt in den Fokus der bodenphysikalischen Forschung. Lysimeter haben den Vorteil einer kontrollierten Massenbilanz, da das Wasser, welches das System am oberen oder unteren Rand verlässt, durch Wiegen und Auffangen des Ausflusses hoch aufgelöst gemessen werden kann.

Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes „Kalibrierung von Wasser- und Stofftransportparametern auf der Lysimeterskala anhand von Daten der Lysimeterstation Wagna, Österreich“ lag auf der inversen Simulation des ungesättigten Wassertransportes zur Bestimmung der hydraulischen Eigenschaften heterogener Böden unter der Verwendung von Messdaten der Lysimeterstation Wagna in Österreich (J. FANK, 1999). Die in der Optimierung erhaltenen hydraulischen Parameter gingen in die inverse Bestimmung des Austragsverhaltens des Tracers Bromid ein. Die Lysimeterexperimente fanden unter atmosphärischen Randbedingungen über einen Zeitraum von mehreren Jahren statt bzw. dauern noch an. Diese Studie knüpft an die Ergebnisse inverser Simulationen des Wassertransportes unter Einbeziehung von synthetischen Lysimeterexperimenten mit heterogenen, geschichteten Böden an (U. JANSEN, 2005, und Kap. 4.3.). Die synthetischen Simulationen zeigten die Schwierigkeiten der inversen Bestimmung effektiver hydraulischer Parameter insbesondere bei starker Heterogenität sowie atmosphärischen Randbedingungen auf. Es wurde deutlich, dass die Heterogenität der Böden in Wagna zu groß ist, um effektive Eigenschaften durch das Schätzen eines einzigen Satzes an hydraulischen Parametern zu bestimmen. Deshalb wurden in allen Simulationen dieses Projektes mindestens zwei Sätze an hydraulischen Parametern simultan bestimmt.

##### **4.4.2. Material und Methoden**

Da die Intensivierung der Landwirtschaft in der Region des Leibnitzer Feldes (Steiermark) in den 80er Jahren zu Qualitätsproblemen im Grundwasser geführt hat, wurde 1991 die Lysimeterstation Wagna gegründet (J. FANK, 1999). Seit Herbst 2004 besitzt die Station zwei monolithische Wägelysimeter (Oberfläche: 1 m<sup>2</sup>, Tiefe: 2 m), welche auf unterschiedlich ackerbaulich bewirtschafteten Versuchsfeldern (ökologisch und konventionell) eingebaut wurden. Eine Besonderheit der Lysimeter besteht darin, dass sie aufgrund einer speziellen Umrandung und Absenktechnik auf gleiche Weise bepflanzt und bearbeitet werden können wie der Rest des bewirtschafteten Feldes. Die Lysime-

terböden zeichnen sich durch eine sehr starke vertikale Heterogenität aus, welche von einem feinkörnigeren Oberboden bis hin zu einem kiesigen Unterboden reicht. In diesem Forschungsprojekt wurden vornehmlich Daten des Lysimeters auf dem konventionell bewirtschafteten Versuchsfeld verwendet, da dieses Lysimeter mit zusätzlichen Tensiometern und TDR-Sonden ausgestattet worden ist. Während des Simulationszeitraums (Oktober 2004 bis Januar 2006) wurden auf den Feldern verschiedene Kulturen angebaut. Für die Simulation des Wassertransportes spielten vor allem die in der Vegetationsperiode von Mai bis September 2005 angepflanzten Kürbisse aufgrund ihres hohen Wasserbedarfs eine ausschlaggebende Rolle.

Für die inverse Simulation des ungesättigten Wassertransportes wurde ein kurzer Simulationszeitraum (38 Tage) herangezogen, welcher sich durch ein stetiges Austrocknen des Bodens auszeichnete, sodass der Prozess der Hysterese nicht berücksichtigt werden musste. Die Optimierung der hydraulischen Parameter erfolgte in allen Fällen mit dem global konvergenten SCE-UA-Algorithmus von Q. DUAN et al. (1993). Die bimodale VAN GENUCHTEN/MUALEM-Funktion (W. DURNER, 1994) sowie die frei geformte mathematische Beschreibung nach S. BITTERLICH et al. (2004) wurden zur Charakterisierung der ungesättigten hydraulischen Funktionen verwendet. Als untere Randbedingung wurde das neben dem Lysimeter in gleicher Tiefe gemessene variable Matrixpotential eingestellt.

Die besten geschätzten hydraulischen Parameter gingen im nächsten Schritt in direkte Simulationen des Wassertransportes über längere Simulationszeiträume ein und wurden anschließend für die inverse Simulation des Stoffaustrags des Tracers Bromid verwendet, welcher am 12. 04. 2005 appliziert worden ist. Diese Simulationen wurden in der Software HYDRUS-1D (J. SIMUNEK et al., 1998) mit Hilfe des lokal konvergenten LEVENBERG-MARQUARDT-Algorithmus durchgeführt. Dabei wurde die Konvektions-Dispersions-Gleichung in Form des Zwei-Regionen-Modells (Mobil-Immobil-Ansatz) angewandt.

#### 4.4.3. Ergebnisse

Die beste Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Daten lieferte das inverse Simulationsszenarium unter Berücksichtigung der frei geformten Parametrisierung der hydraulischen Funktionen. Da diese Parametrisierung jedoch in der HYDRUS-1D-Software nicht enthalten ist, wurde ein nur geringfügig schlechteres Szenarium mit bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Parametern und zwei Bodenschichten in den weiteren Stofftransportsimulationen verwendet und an dieser Stelle dargestellt (Fig. 4.12). Simulationen unter Einbeziehung von mehr als zwei Bodenschichten konnten derzeit aufgrund zu hoher Rechnerleistungen nicht realisiert werden.

Es ist eine sehr gute Anpassung von simulierten kumulativen Ausflüssen ( $Q$ ) (durchgezogene schwarze Linie) und gemessenen Werten (schwarze Kreise) zu beobachten (Fig. 4.12, oben rechts). Auch die Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Matrixpotentialen ( $h$ ) ist trotz der zweischichtigen Gliederung des Bodenprofils relativ gut. Die Wassergehalte ( $\theta$ ) weisen systematische Abweichungen zwischen gefitteten und gemessenen Daten auf, was auf weitere Heterogenitäten in der oberen Bodenschicht hindeutet. Zur Verbesserung müsste eine zusätzliche Schicht einbezogen werden. Die Unsicherheiten der Modellvorhersagen wurden anhand der zugehörigen 95 %-Konfidenzintervalle berechnet und können in Parameter- (dunkelgrau) und durch Messfehler verursachte Unsicherheiten (hellgrau) untergliedert werden. In den meisten Fällen sind die Parameterunsicherheiten gering (Fig. 4.12). Die Modellvorhersageunsicherheit ist für

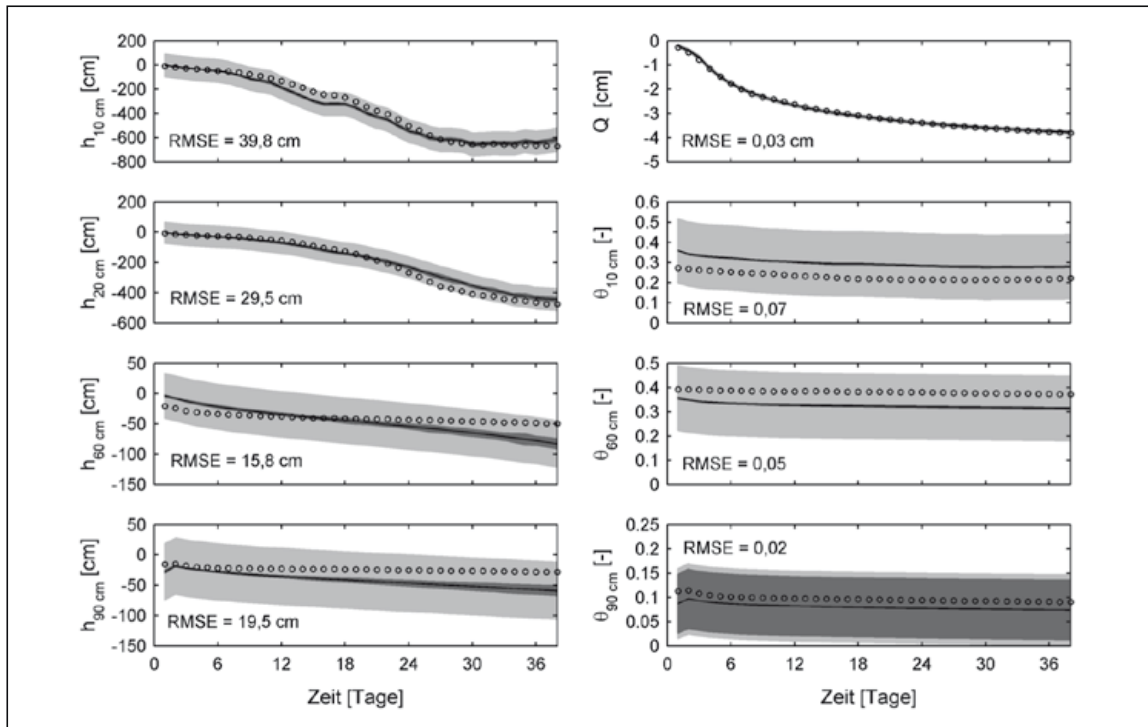


Fig. 4.12: Gemessene (Kreissignatur) und simulierte (durchgezogene Linie) Matrixpotentiale ( $h$ ), Wassergehalte ( $\theta$ ) und kumulative Ausflüsse ( $Q$ ) der inversen Simulation mit zwei Bodenschichten bei Anwendung der bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Parametrisierung der hydraulischen Funktionen (05. 10. 2005 bis 10. 11. 2005). RMSE = „root mean square error“.

Measured (circles) and simulated (drawn lines) matrix potential ( $h$ ), water content ( $\theta$ ) and cumulative outflow data ( $Q$ ) of the inverse simulation with two soil layers by application of the bimodal VAN GENUCHTEN/MUALEM parameterisation of the hydraulic functions (05. 10. 2005 to 10. 11. 2005). RMSE = “root mean square error”.

den kumulativen Ausfluss sehr klein, was bedeutet, dass die effektiven Fließeigenschaften des Systems durch die Simulation sehr gut abgebildet werden konnten. Im Fall der Wassergehalte und Matrixpotentiale führten die systematischen Abweichungen zu großen Vorhersagenunsicherheiten. Für weitere Details siehe U. JANSEN (2005).

Im Allgemeinen wäre das separate Schätzen der hydraulischen Parameter für mehr als zwei Bodenschichten notwendig gewesen. Eine weitere Fehlerquelle resultierte aus der unsicheren und möglicherweise falschen Definition des Wurzelwachstums und der Wurzelwasseraufnahme, welche natürlich die bodenhydraulische Parameterschätzung beeinflusst.

Das Übertragen der optimierten hydraulischen Parameter auf die gesamte Simulationsperiode führte zu den in Fig. 4.13 dargestellten kumulativen Ausflüssen. Die Abweichungen in dem letzten Drittel der Simulationszeit könnten mit der fehlenden Einbindung der Transpiration der Grasvegetation in Verbindung gebracht werden, da in HYDRUS-1D Wurzelwachstumsparameter nur für eine Vegetationsperiode definiert werden können.

Da jedoch der Gesamtbetrag des simulierten Ausflusses im Bereich der gemessenen Werte lag, wurden die optimierten hydraulischen Parameter auch für die inverse Simulation des Bromidaustrags herangezogen. In Fig. 4.14 sind das gemessene Gesamtvolumen an Bromid und die simulierten Bromidgehalte zweier inverser Szenarien gegen das Porenvolumen aufgetragen. Sowohl die Dispersivität  $\alpha$  als auch der Massentrans-

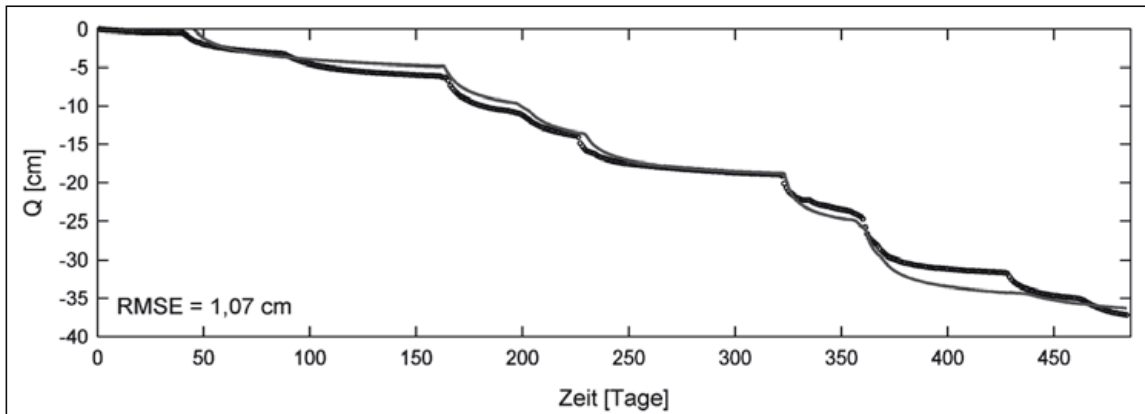


Fig. 4.13: Gemessene (Kreissignatur) und simulierte (hellgraue Linie) kumulative Ausflüsse der direkten Simulation mit zwei Bodenschichten bei Anwendung der bimodalen VAN GENUCHTEN/MUALEM-Parametrisierung der hydraulischen Funktionen (05. 10. 2004 bis 31. 01. 2006). RMSE = "root mean square error".

Measured (circles) and simulated (drawn lines) cumulative outflow data of the direct simulation with two soil layers by application of the bimodal VAN GENUCHTEN/MUALEM parameterisation of the hydraulic functions (05. 10. 2004 to 31. 01. 2006). RMSE = "root mean square error".

fer-Koeffizient des Mobil-Immobil-Ansatzes wurden für beide Bodenschichten in den Optimierungsprozess eingebunden. Während der Simulationsperiode von annähernd 300 Tagen wurde kein vollständiges Porenvolumen ausgetauscht, sodass die maximale Bromidkonzentration im Ausfluss noch nicht erreicht wurde. Ungefähr 23% des gesamten injizierten Bromids wurden bis Ende Januar 2006 aufgefangen. Dies entspricht einer Bromidmasse von ca.  $0,9 \text{ mg cm}^{-2}$ . Die simulierten Bromidgehalte im Ausfluss des ersten Szenariums (Szen 1) entsprechen annähernd den gemessenen Werten. Um diese gute Übereinstimmung zu erzielen, musste eine hohe Bromidaufnahme durch die Kürbisvegetation simuliert werden, welche von den tatsächlich gemessenen Werten in dem Pflanzenmaterial erheblich abweicht.

In einem zweiten Simulationsszenarium (Szen 2) wurde diese Bromidaufnahme in etwa an die gemessenen Gehalte in den Pflanzen angepasst. Dies führte zu einer signifi-

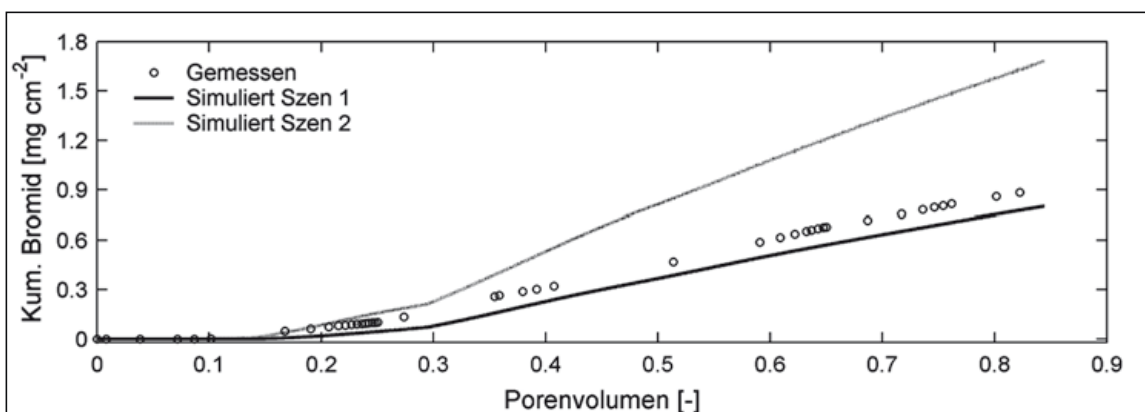


Fig. 4.14: Gemessene und simulierte kumulative Bromidkonzentration im Lysimeterausfluss (12. 04. 2005 bis 31. 01. 2006).

Measured and simulated cumulative bromide concentration in the lysimeter outflow (12. 04. 2005 to 31. 01. 2006).

kanten Überschätzung der Bromidmasse im Ausfluss (Fig. 4.14). Dieses Ergebnis könnte durch ein falsches Festlegen der immobilen and mobilen Bereiche in der Simulation im Vergleich zur realen Situation erklärt werden. Ein Mangel des Zwei-Regionen-Modells besteht in der Definition der Immobilität, welche unabhängig vom wahren Wassergehalt einen konstanten Wert erhält, sodass diese immer kleiner sein muss als der kleinste Wassergehalt innerhalb der gesamten Simulationszeit (T. ZURMÜHL & W. DURNER, 1996). Dies kann zu einer Überschätzung des mobilen Porenanteils führen, was wiederum mit einer zu hohen Bromidauswaschung einhergeht.

#### **4.4.4. Diskussion und Ausblick**

Unsere Studie zeigt, dass inverse Wasser- und Stofftransportsimulationen geeignete Werkzeuge zur Ableitung von Transportparametern auf der Lysimeterskala darstellen. Im vorliegenden Fall ist es jedoch notwendig, mehrere separate Bodenschichten und Sätze an hydraulischen Parametern in den Simulationen zu berücksichtigen, was verbesserte Rechnerleistungen erfordert. Bessere Optimierungsalgorithmen und flexiblere Beschreibungen der hydraulischen Funktionen wie z. B. die frei geformte Parametrisierung könnten ebenfalls zu einer Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen. In Zukunft sollten außerdem eine genauere Definition der Vegetationsparameter sowie verbesserte Stofftransportmodelle in die Simulationssoftware integriert werden.

### **4.5. Ansätze zur Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten und des Stickstoffumsatzes in Lysimetern mit dem Modellpaket CoupModel**

(v. 2.6) (N. BÖTTCHER, J. FANK & Th. REIMANN)

#### **4.5.1. Einleitung**

Das Modell CoupModel ist ein Programm zur Simulation der Transportprozesse von Wärme, Wasser und Stoffen im Boden und in der Pflanze. Es wurde am Royal Institute of Technology der KTH Stockholm von einem Team um den Hydrologen Per-Erik JANSSON entwickelt und ist eine Kopplung der älteren Modelle SOIL und SOIL-N, welche immer noch integrale Bestandteile des neuen Programms sind (P.-E. JANSSON & L. KARLBERG, 2004). Diese Arbeit entstand im Rahmen eines Fachpraktikums. Sie soll in erster Linie dazu dienen, das Modell auf seine Anwendbarkeit für die Modellierung von Großlysimetern zu überprüfen.

#### **4.5.2. Modellkonzept**

Bei CoupModel handelt es sich um ein eindimensionales instationäres Modell zur Modellierung von Wärme, Wasser und Stofftransportprozessen in der ungesättigten Bodenzone. Dabei werden auch Sorptionsprozesse sowie Stoffumwandlung bzw. -abbau berücksichtigt. Das Modell zeichnet sich vor allem durch eine Vielzahl an möglichen Eingabedaten und Parametern aus, wodurch es auf der einen Seite zu einem vielseitigen Werkzeug für verschiedene Disziplinen wird, auf der anderen Seite jedoch sehr viel Aufwand bei der Parametrisierung erfordert. Ursprünglich für Waldböden entwickelt, kann CoupModel durch erweiterte Pflanzenparameter für die Simulation von nahezu jedem Ökosystem verwendet werden. Es findet heute vor allem Anwendung in Bereichen der Landwirtschaft, Bodenkunde und Wasserwirtschaft. CoupModel besteht grundsätzlich aus einer abiotischen und einer biotischen Komponente. Diese beiden Teile sind normalerweise strikt voneinander getrennt, sie arbeiten folglich unabhängig voneinander. Dies ist vor allem dann vorteilhaft, wenn vorhandene Wasserhaushaltsmodelle mit Stofftrans-

portmodellen gekoppelt werden sollen. Der abiotische Ansatz von CoupModel betrachtet ausschließlich den Wasser- und Wärmetransport im Boden. Dazu wird ein Tiefenprofil des Untergrundes verwendet, welches durch verschiedene Horizonte mit charakteristischen Bodenparametern beschrieben wird. Mit Hilfe der RICHARDS-Gleichung ermittelt das Programm den Wasserfluss zwischen den einzelnen Horizonten unter Berücksichtigung entsprechender Randbedingungen. Die Lösung der RICHARDS-Gleichung erfolgt anhand der Methode der finiten Differenzen. Die Randbedingungen werden während der Simulation aus empirischen Zeitreihen gelesen. Sollten Daten nicht verfügbar sein, so können einige auch durch Anpassung verschiedener Parameter generiert werden.

Die biotische Komponente des Programms befasst sich mit der Modellierung der Kohlenstoff- und Stickstofftransporte, indem biologische Prozesse wie Pflanzenwachstum und mikrobieller Abbau simuliert werden. Die Stickstoffgehalte des Bodens sowie der Pflanzen werden durch eine Vielzahl unterschiedlicher Pools repräsentiert. Durch Verlagerung der Stickstoffgehalte innerhalb dieser Pools werden Umwandlungsprozesse wie Humifizierung, Nitrifizierung, Denitrifizierung und Assimilation simuliert. Eintragsquellen von Stickstoff können neben organischer und mineralischer Düngung auch atmosphärische Deposition sowie der Eintrag atomaren Stickstoffs durch Mykorrhiza sein.

Dem in dieser Arbeit simulierten Ökosystem liegen Messdaten des biologisch bewirtschafteten Lysimeters der Forschungsstation Wagna zugrunde. Der Simulationszeitraum erstreckte sich von April bis September 2005. Während dieser Zeit wurde auf dem Lysimeter Ölkürbis (*Cucurbita peto*) angebaut. Das Lysimeter war mit einer ungestörten Bodenprobe gefüllt. Dabei handelte es sich im oberen Teil (bis ca. 110 cm Tiefe) um einen sandigen Lehm, im unteren Teil um Schotter (bis 180 cm Tiefe). An der Unterseite des Lysimeters, zwischen 180 und 200 cm Tiefe, wurde eine Filterschicht aus Kies eingebaut. Da es sich bei diesen Lysimetern um Unterdrucklysimeter handelt, wurden an deren Unterseiten Saugkerzen angebracht, um Sickerwasser zu entnehmen. Der angelegte Unterdruck entsprach dabei dem Matrixpotential im freien Feld in derselben Tiefe. Die für die Simulation relevanten Daten liegen für den gesamten Simulationszeitraum als Zeitreihen in 10-Minuten-Intervallen vor. Dazu zählen in erster Linie Klimadaten wie Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Nettostrahlung, Bodendaten (Wasserspannung, Wassergehalt, Temperatur), Sickerwassermenge sowie der am Lysimeterboden angelegte Unterdruck. Die verwendeten Klimadaten wurden in der Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) aufgenommen, welche sich auf dem Gelände der Forschungsstation Wagna befindet. Die Matrixpotentiale wurden mit Gipsblöcken in 35, 60 und 90 cm Tiefe sowie mit Tensiometern in 90 und 180 cm Tiefe ermittelt. Die Wassergehalte wurden in denselben Tiefen durch TDR-Sonden gemessen. Die Sickerwassermenge wurde mit Hilfe einer hydrologischen Wippe ermittelt.

### 4.5.3. Ergebnisse

Zunächst erfolgte die zeitliche und räumliche Diskretisierung des Modells. Der Simulationszeitraum für die Wasserbilanz erstreckte sich vom 15. 04. 2005 bis zum 15. 09. 2005. Der Stickstoffhaushalt wurde vom 20. 09. 2004 bis zum 15. 09. 2005 simuliert. Für die räumliche Charakterisierung des Lysimeters wurde ein Bodenprofil mit sieben Horizonten erstellt. Mit Hilfe des Programms RETC (M. Th. VAN GENUCHTEN et al., 1991) konnten aus den Messdaten der Wasserspannung und des Matrixpotentials aus vier verschiedenen Tiefen Wasserretentionskurven erstellt werden. Die Eigenschaften der Horizonte, für die keine Daten vorhanden waren, wurden von CoupModel aus den übrigen Werten interpoliert.

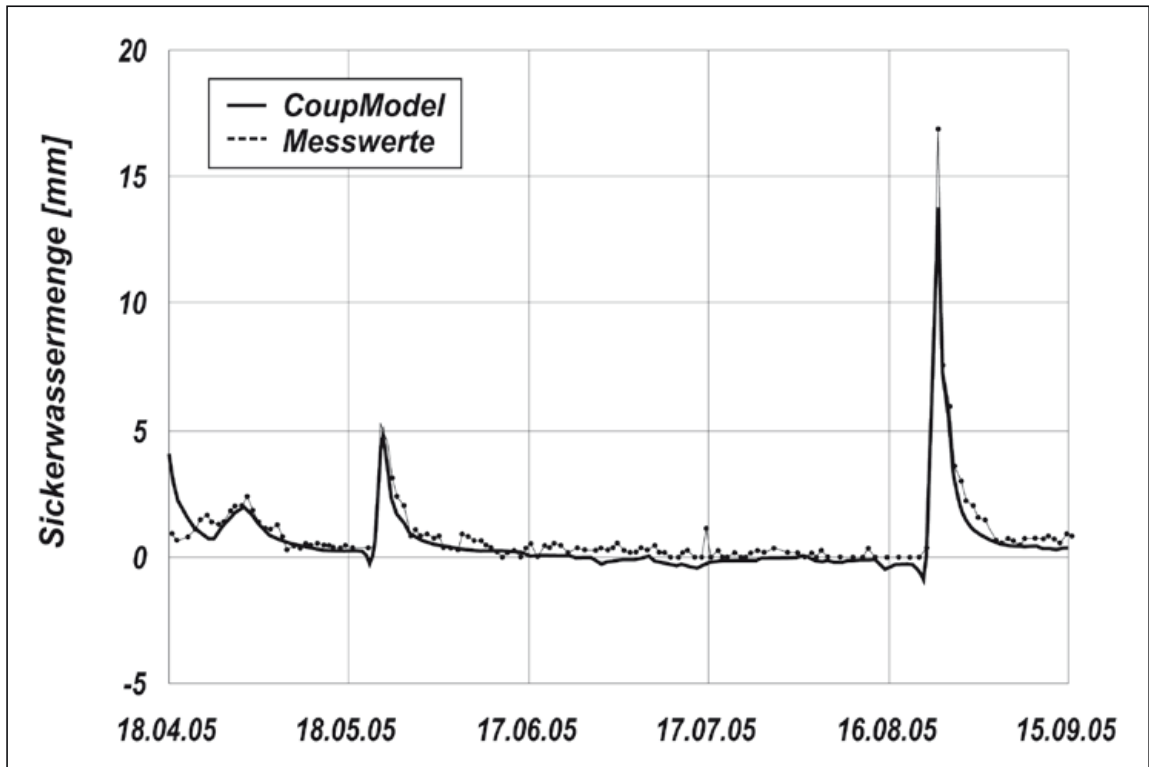


Fig. 4.15: Gemessene und berechnete Sickerwassermengen.  
Observed and simulated seepage hydrographs.

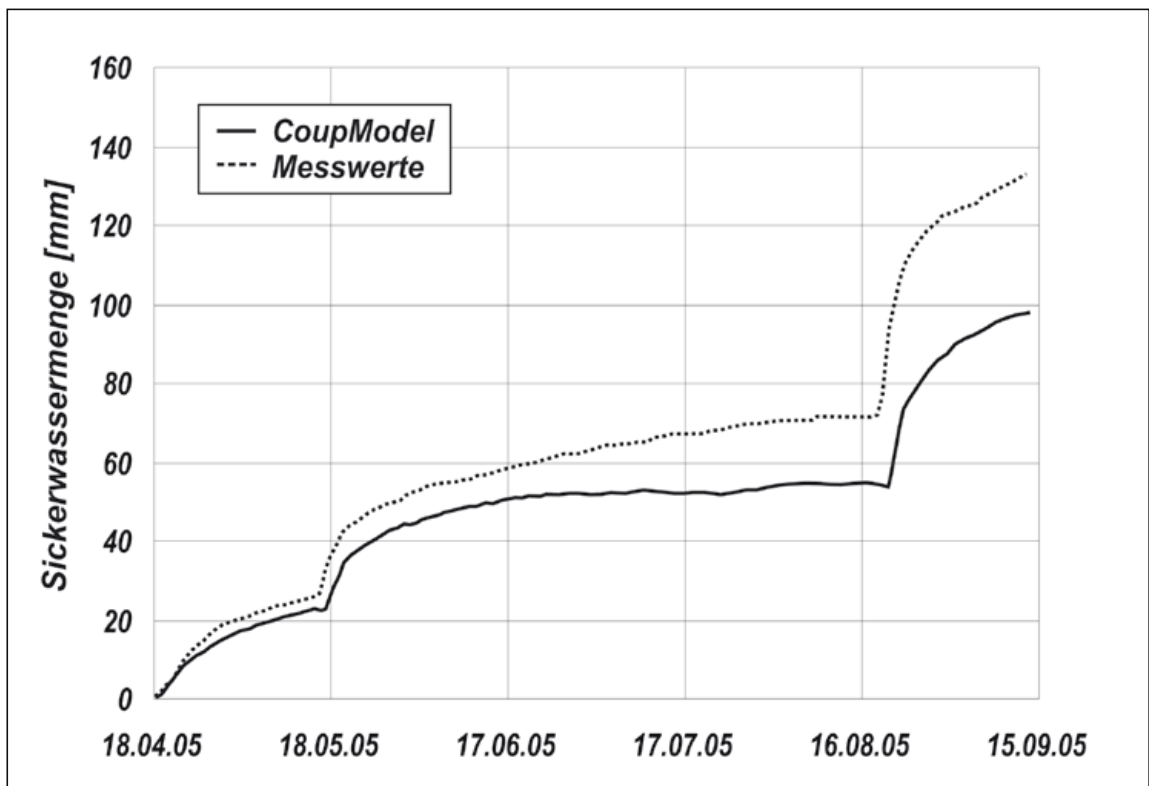


Fig. 4.16: Vergleich der aufsummierten Sickerwassermengen.  
Comparison of accumulated seepage.

Anschließend wurden für jeden Bodenhorizont Ausgangsbedingungen wie z. B. Wassergehalte, Bodentemperatur sowie Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen angegeben. Die Entwicklung der Vegetation wurde mit Hilfe von Fotomaterial eingeschätzt und durch die Anpassung verschiedener Parameter modelliert. Um mit der Durchführung der Simulation zu beginnen, fehlte nur noch die Verknüpfung des Modells mit den meteorologischen Zeitreihen für Niederschlag und Verdunstung als obere Randbedingung sowie den am Lysimeter angelegten Unterdrücken als untere Randbedingung. Für die Kalibrierung des Modells waren viele Programmdurchläufe nötig. Dabei wurden hauptsächlich die hydraulischen Eigenschaften aller Bodenhorizonte innerhalb sinnvoller Grenzen variiert. Ferner stellte sich der Verlauf der Pflanzenentwicklung als wirksamer Eichparameter heraus.

Als Kontrollgröße für den Wasserhaushalt kamen die Wassergehalte bzw. Saugspannungen in Frage, von besonderer Bedeutung waren jedoch die Sickerwassermengen. Der in Fig. 4.15 dargestellte Vergleich zwischen observierter und prognostizierter Sickerwasserganglinie zeigt im zeitlichen Verlauf eine gute Übereinstimmung, jedoch liegt die berechnete Sickerwassermenge deutlich unterhalb der gemessenen. Dies wird bei der Betrachtung der aufsummierten Sickerwasserganglinie (Fig. 4.16) besonders deutlich.

Das Defizit bei der Modellrechnung beläuft sich auf ca. 40 mm für den gesamten Simulationszeitraum. Als mögliche Hauptursache für dieses Defizit sind Ungenauigkeiten bei der Abschätzung der Pflanzenparameter zu nennen. Dadurch wird die Verdunstung zu hoch berechnet. Sie beträgt beim Modell 443 mm gegenüber gemessenen 383 mm.

Die Genauigkeit des Stickstoffmodells lässt sich aufgrund fehlender Kontrollgrößen nur mit Hilfe der Analyse der Ernterückstände überprüfen. Die Laboruntersuchung von Rankenmaterial, Fruchtfleisch und Samen ergab einen Gesamtstickstoffgehalt von ca. 16 g für beide Pflanzen. Im Modell nahmen die Pflanzen bis zum Sommer etwa 10 g Stickstoff auf, durch Blattabwurf verblieben davon bis zum Erntetag noch ca. 6 g am Lysimeter.

#### **4.5.4. Diskussion und Ausblick**

In seiner derzeitigen Komplexität und Parametriegüte sind mit CoupModel realitätsnahe Modellierungen von Wasser- und Stickstofftransport möglich. Die aus der Modellkomplexität resultierende Modellgüte bedingt jedoch einen sehr hohen Parametriaufwand, welcher einen hohen empirischen Dateneinsatz erfordert. Stehen diese Daten zur Verfügung, so sind die verwendeten Modellansätze durchaus zur Abbildung der Vorgänge in der ungesättigten Bodenzone geeignet. Noch bestehende Aussageungenauigkeiten im Bereich der Stickstoffvorgänge können durch eine Verbesserung der Parametrisierung mittels genauer Datenbasen verbessert werden. Unzulängliche Daten liegen beispielsweise im Bereich der Pflanzeigenschaften vor. Zu nennen sind dabei insbesondere der Blattflächenindex, die Durchwurzelungstiefe und der pflanzenspezifische Stickstoffmetabolismus. Bei der Erstellung der Wasserretentionskurven wurde zwar auf umfangreiche Messdaten zurückgegriffen, es zeigt sich jedoch, dass diese Messungen nicht immer für die jeweilige gesamte Bodenschicht repräsentativ sind. Aufgrund dieser Ungenauigkeiten ergeben sich Fehler in der Berechnung der ungesättigten Leitfähigkeit oder des Bodenspeichers, wodurch die Abweichungen in der Wasserhaushaltskomponente teilweise begründet werden. Um die Aussagengenauigkeit von CoupModel zu verbessern, ist eine tiefgründige Untersuchung der in diesem Bereich verwendeten Ansätze erforderlich.



## 5. Sickerwasserprognose

### 5.1. Abschätzung der Sickerwasserbeschaffenheit mittels Laborverfahren

(Th. PÜTZ, W. BERGER, M. SCHEITHAUER & I. SCHEUERING)

#### 5.1.1. Einleitung

Wasserlösliche Inhaltsstoffe einer Bodenprobe können mittels Laborverfahren abgeschätzt werden: Bodensättigungsextrakt (BSE; BBODSCHV, 1999), Ammoniumnitrat-Extrakt (DIN 19730, 1997), S4-Methode (DIN EN 12457-4, 2003).

Mit dem Bundesbodenschutzgesetz (BBODSCHG, 1998) haben diese Laborverfahren zur Ableitung einer Sickerwasserkonzentration am Ort der Probenahme besonderes Gewicht erhalten. Diese Methoden wurden jedoch nicht für die Ermittlung von Sickerwasserkonzentrationen am Ort der Probenahme entwickelt. Entsprechend ihrer originären Anwendungsbereiche führen die genannten Methoden daher zu unterschiedlichen Ergebnissen.

Es wurde eine Vergleichsuntersuchung von unterschiedlichen Laborverfahren durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, die Labormethoden hinsichtlich ihrer Aussagekraft zu anorganischen Stoffkonzentrationen im Sickerwasser zu überprüfen.

#### 5.1.2. Material und Methoden

Für die Untersuchung wurden die drei Referenzmaterialien „Boden“ (BO), „Hausmüllverbrennungsasche“ (AS) und „Bauschutt“ (BS) aus dem BMBF-Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“ (W. BERGER & U. KALBE, 2003) ausgewählt. Die S4-Methode wurde nach DIN EN 12457-4 (2003) durchgeführt. Neben dem üblichen Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 (S4\_1:10) erfolgte ein Versuchsansatz mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2:1 (S4\_1:2). Das BSE-Verfahren entsprach den Vorgaben der BBODSCHV (1999). Von M. SCHEITHAUER & W. BERGER (2004) wurde in Anlehnung an die Vorschrift des BSE-Verfahrens ein definiertes Wasser/Feststoff-Verhältnis von 1:1 (Extr\_1:1) vorgeschlagen.

Die Säulenversuche wurden als Auslaufsäule mit einer konstanten Umgebungstemperatur von 10 °C angelegt. Die unter Wassersättigung schrittweise gefüllte Säule wurde nach einer Kontaktzeit von 24 Stunden abhängig vom Untersuchungsmaterial mit einer Fließrate von 0,05–0,08 mL min<sup>-1</sup> von unten angeströmt.

Sulfat- und Chloridkonzentrationen wurden nach DIN EN ISO 10304-1 (1995), Kupfer, Nickel, Chrom, Arsen, Antimon, Kobalt und Cadmium wurden nach DIN EN ISO 11885 (1998) gemessen.

Das Lysimetermonitoring erfolgte unmittelbar nach Einbau der Referenzmaterialien in die mit Bodenmonolithen befüllten Lysimeter (vgl. Kap. 5.2.). Das Bodenwasser wurde mittels Borosilikatglas-Saugkerzen mit einem kontinuierlichen, konstanten Unterdruck 5 cm unterhalb des Referenzmaterials gewonnen.

#### 5.1.3. Ergebnisse

Mit dem BSE-Verfahren wurden gegenüber allen anderen Batchversuchen meist deutlich höhere Stoffkonzentrationen ermittelt (Fig. 5.1, 5.2). Diese hohen Konzentrationen liegen im Bereich der Anfangskonzentration der Säulenversuche (erstes Porenvolumen). In derselben Probe zeigt zudem Antimon in allen Batchversuchen einen vergleichbaren Wert. Insgesamt sind die Werte aus dem S4-Verfahren mit den Werten aus dem Sä-

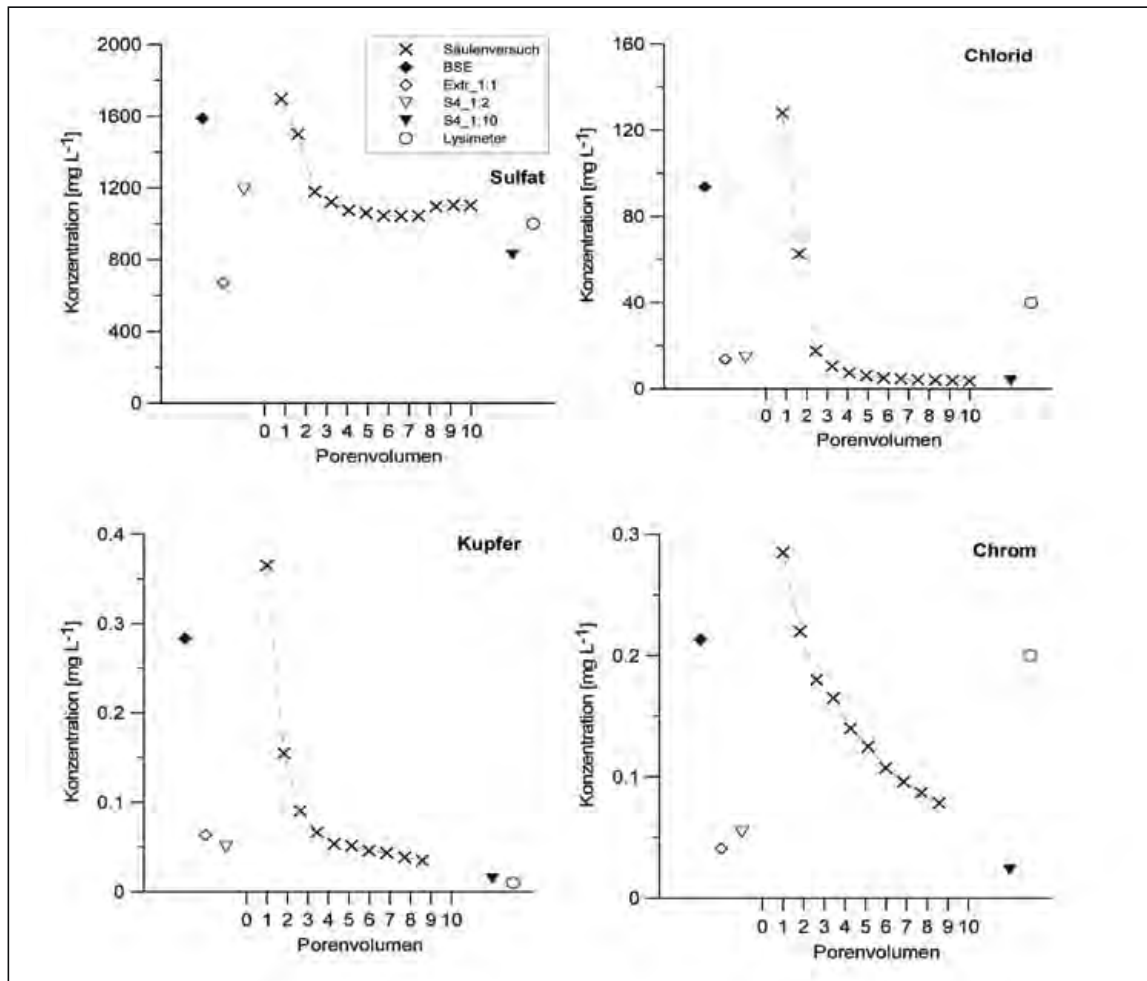


Fig. 5.1: Konzentrationen in den Eluaten des Materials BS (Bauschutt). Die Lysimeterangabe ist die mittlere Sickerwasserkonzentration.

Results of the leaching experiments with material BS (demolition). The lysimeter data is the average of the seepage water concentration.

lenversuch zu Versuchsende (ca. 10 Porenvolumen) gut vergleichbar. Die Ergebnisse aus dem Extr\_1:1 bzw. S4\_1:2 erreichen die Größenordnung des Säulenversuchs nach dem Austausch von zwei bis drei Porenvolumen. Beim Material BS ermittelt der Extr\_1:1 einen auffällig niedrigen Sulfatwert (Fig. 5.1). Der Konzentrationsverlauf der Säulenversuche ist charakterisiert durch einen raschen Abfall einer hohen Anfangskonzentration vom ersten bis dritten bzw. fünften Porenvolumenaustausch. Danach nehmen die Werte nur noch geringfügig ab.

#### 5.1.4. Diskussion

Die Reaktion der Stofflösung einer Feststoffphase in einem 3-Phasen-System ist unter anderem von den Einflussgrößen: pH-Wert, Temperatur, Ionenstärke der wässrigen Phase und der Reaktionszeit abhängig. Das komplexe System der Desorption kann nicht mit einem einfachen Laborverfahren abgebildet werden. Es wird lediglich geprüft, ob die Desorption verfügbarkeits- oder löslichkeitslimitiert ist. In der Natur überlagern sich die verschiedenen Stofffreisetzungsprozesse, sodass nicht immer eindeutig unterschieden werden kann, ob eine löslichkeits- bzw. verfügbarkeitslimitierte Stofffreisetzung dominiert. Ferner

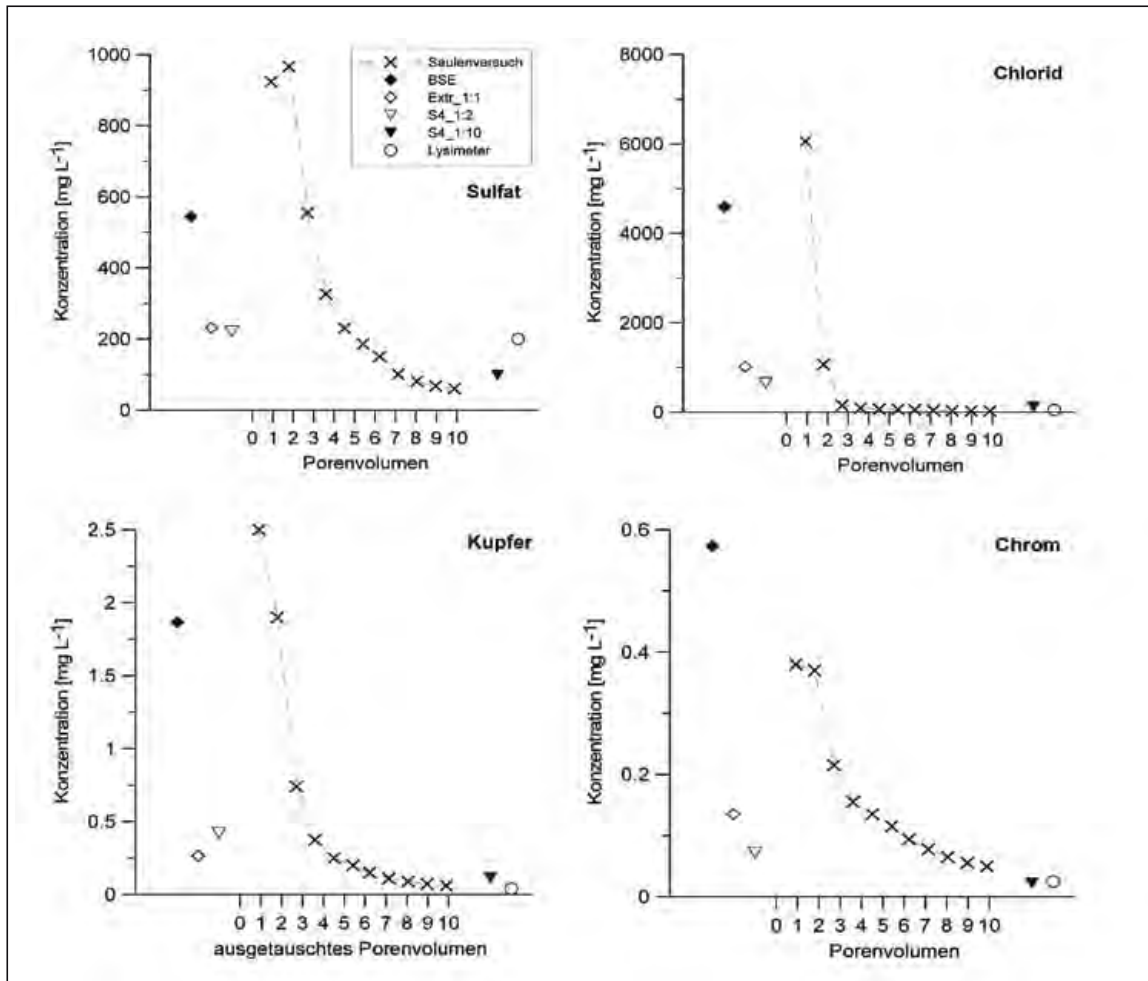


Fig 5.2: Konzentrationen in den Eluaten des Materials AS (Hausmüllverbrennungsasche). Die Lysimeterangabe ist die mittlere Sickerwasserkonzentration.  
 Results of the leaching experiments with material AS (ash). The lysimeter data is the average of the seepage water concentration.

wird die Unterscheidung der einzelnen Prozesse durch laborbedingte Artefakte erschwert. Nicht selten kommt es bei der Durchführung von Laborverfahren zu starken Abweichungen von der realen Situation.

Verschiedene Untersuchungen belegen, dass mit dem BSE-Verfahren gegenüber dem S4-Verfahren in der Regel die höheren Konzentrationen erzielt wurden (M. SCHEITHAUER & W. BERGER, 2004). Die untersuchten 24 unterschiedlich kontaminierten Proben zeigen in 13% der Fälle elementunabhängig nahezu gleiche Konzentrationen beim BSE- und S4-Verfahren (ebenso M. SCHEITHAUER & W. BERGER, 2004). Dieses ähnliche Elutionsverhalten wird als lösunglimitiertes Freisetzungverhalten interpretiert. In 82% der Fälle treten beim BSE-Verfahren gegenüber dem S4-Verfahren deutlich höhere Konzentrationen auf und nur in 5% der Fälle werden höhere Ergebnisse beim S4-Verfahren beobachtet. Die höheren Konzentrationen des BSE-Verfahrens gegenüber dem S4-Verfahren resultieren aus einem Verdünnungseffekt, bedingt durch die unterschiedlichen Wasser/Feststoff-Verhältnisse. Die höheren Konzentrationen beim S4-Verfahren ergeben sich durch Materialabrieb infolge mechanischer Beanspruchung durch das Überkopfschütteln der Proben (24 Stunden). Hierbei entstehen neue Oberflächen, die eine erhöhte Verfügbarkeit bewirken können.

Eine generelle Abhängigkeit von Element und Stofffreisetzung lässt sich nicht erkennen. Eine wesentliche Bedeutung für die Stofffreisetzung im Rahmen von Elutionsuntersuchungen kommt der Bindungsform der betrachteten Elemente innerhalb der Probe zu.

Bei Batchversuchen ist eine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Stofffreisetzung nicht möglich. Um dies zu erreichen, sind Säulenversuche nötig, die aufgrund einer dynamischen Versuchsanordnung Zeitrafferexperimente ermöglichen. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Untergrundsituationen ist schwierig.

Für rund 96% aller untersuchten Elemente der 24 Bodenproben wurden ausgehend von einer relativ hohen Anfangskonzentration rasch abnehmende Werte beobachtet. Nach dem drei- bis fünffach ausgetauschten Porenvolumen wurde bis zum Versuchsende nur eine geringfügige Konzentrationsabnahme festgestellt. Dieser Konzentrationsverlauf ist als eine verfügbarkeitslimitierte Stofffreisetzung zu interpretieren. In rund 4% der Fälle wurde im Säulenversuch für das Element Arsen eine gleichbleibende Konzentration beobachtet. Dieser Konzentrationsverlauf ist als eine lösungslimitierte Stofffreisetzung anzusehen. Der deutlich höhere Anteil (13%) der lösungslimitierten Stofffreisetzung bei Batchversuchen ist vermutlich durch die Überlagerung von artefaktbedingter Lösung und rein chemischer Lösung bedingt. Die mit dem BSE-Verfahren erzielten Konzentrationen sind relativ gut mit den Konzentrationen des ersten ausgetauschten Porenvolumens der Säulenversuche vergleichbar. Dies kann durch das gleiche Wasser/Feststoff-Verhältnis sowie durch die nahezu gleiche Reaktionszeit für die Gleichgewichtseinstellung der Verfahren erklärt werden. Die S4-Verfahren (S4\_1:2, S4\_1:10) und der Extr\_1:1 sind vergleichbar mit dem mehrfach ausgetauschten Porenvolumen (> 3).

Zur Bewertung der Sickerwasserbeladungen wurde ein Vergleich mit Konzentrationen in Lysimetersickerwässern vorgenommen. In den vier betrachteten Fällen stimmen die Konzentrationen aus den S4-Verfahren und der Extr\_1:1 deutlich besser mit der mittleren Konzentration der Lysimetersickerwässer als beim BSE-Verfahren überein. Eine Ausnahme bildet das Element Chrom. Für Chrom zeigt das BSE-Verfahren bei den Referenzmaterialien BO und BS eine gute Übereinstimmung mit dem Lysimetersickerwasser. Die Konzentrationen aus dem BSE-Verfahren stimmen teilweise gut mit den vorwiegend zu Beginn auftretenden maximalen Konzentrationen im Lysimetersickerwasser überein (analog zum Säulenversuch).

## **5.2. Validierung der Sickerwasserprognose mit den Materialien Hausmüllverbrennungssasche, Abbruchmaterial und PAK-belastetem Boden in Großlysimetern** (Th. PÜTZ, H. RÜTZEL & H. VERECKEN)

### **5.2.1. Einleitung**

Große Mengen schwach kontaminierter Recyclingmaterialien werden zur Untergrundbefestigung von Wegen sowie zum Straßen- und Wegebau verwendet. Hierbei ist nicht geklärt, ob diese Materialien wasserlösliche Begleitstoffe enthalten, die mittel- bis langfristig eine Gefährdung für unsere Grundwasserressourcen darstellen. Die Ziele des BMBF-Forschungsschwerpunktes „Sickerwasserprognose“ sind:

1. mögliche Grundwasserkontaminationen abzuschätzen und
2. Testverfahren zu entwickeln, die die Quellstärke grundwassergefährdender Stoffe aus Recyclingmaterial zuverlässig und schnell bestimmen.

Zur Validierung dieser Untersuchungen sind realitätsnahe Daten notwendig, die alle relevanten Detailprozesse umfassen und unter Freilandbedingungen gewonnen wurden.

## 5.2.2. Material und Methoden

Die Versuche wurden mit vier wägbaren Großlysimetern (Tiefe: 2,5 m, Fläche: 2,0 m<sup>2</sup>) in einer klimatisierten, unterkellerten Anlage durchgeführt (Fig. 5.3). Die Bodenlösungsgewinnung erfolgte über Borosilikatglas-Saugkerzen mit 180 hPa Unterdruck in 0,85 m, 1,15 m und 1,85 m unter Geländeoberkante (GOK). In diesen Tiefen wurden auch Tensiometer, TDR-Sonden und Temperaturfühler installiert. Über Edelstahlintermetallplatten an den Lysimetersohlen und einem konstanten Unterdruck von 30 hPa wurde ein feldnaher Wasserfluss sichergestellt und der unerwünschte Sickerwasserstau verhindert. Die Großlysimeter waren mit Parabraunerde-Monolithen aus Löss befüllt.

Vor der Applikation wurde aus den vier Lysimetern der Boden bis zu einer Tiefe von 0,80 m entnommen. Zur Beschreibung des Stofftransportes und der Wasserbewegung wurden am 08./09. April 2002 auf die Böden aller vier Lysimeter in 0,80 m unter GOK die beiden Indikatorstoffe Isoproturon (IPU) und 2,6-Di-Fluorbenzoesäure (DFB) sowie der Wassertracer Bromid appliziert. Anschließend wurden die Referenzmaterialien „Boden“ (BO), „Hausmüllverbrennungsasche“ (AS) sowie „Bauschutt“ (BS) eingebaut und abschließend eine Grobsandschicht entsprechend der Differenz aus entnommener Bodenschicht abzüglich Mächtigkeit der eingefüllten Referenzmaterialien aufgebracht (Tab. 5.1). Im Kontrolllysimeter wurde eine 0,80 m mächtige Grobsandschicht eingefüllt. Auf den Grobsand aller Lysimeter wurde als Wassertracer 65%iges Deuteriumoxid (D<sub>2</sub>O) eingeregnet.

Die Probenahme der Bodenlösungen und der Perkolate erfolgte monatlich. Um der Niederschlagsmenge des Parallelstandortes München-Neuherberg zu entsprechen, wurde mit Millipore-Wasser in Gaben von 10 bis 20 mm mittels Tropfer (208 Stück, Raster von 10 cm×10 cm) beregnet. Der Bewuchs auf den Lysimetern wurde mechanisch entfernt.

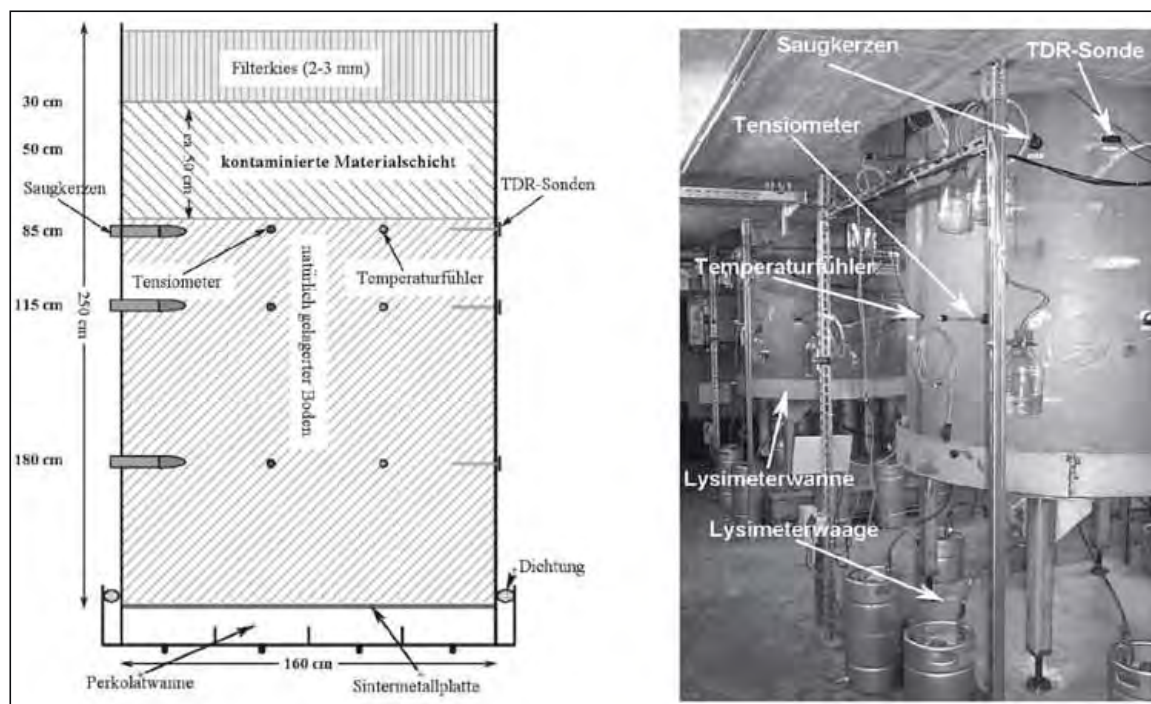


Fig. 5.3: Querschnitt eines Lysimeters (links), Ansicht der Lysimeter im Lysimeterkeller (rechts).  
Cross section of a lysimeter (left), view of the lysimeters in the lysimeter cellar (right).

Tab. 5.1: Kenngrößen der Referenzmaterialien „Boden“ (BO), „Bauschutt“ (BS) und „Asche“ (AS). n.m. – nicht gemessen, n.d. – nicht detektiert.  
Parameters of the reference materials „soil“ (BO), „demolition“ (BS) and „ash“ (AS). n.m. – not measured, n.d. – not detected.

Parameter	BO	BS	AS
Eingefülltes Material [kg]	1510,0	1660,0	1544,2
Schichtdicke [m]	0,47	0,46	0,45
Acenaphthen [mg kg <sup>-1</sup> ]	10–50	1–5	n.m.
Anthracen [mg kg <sup>-1</sup> ]	1–5	1–5	n.m.
Fluoren [mg kg <sup>-1</sup> ]	10–50	1–5	n.m.
Phenanthren [mg kg <sup>-1</sup> ]	10–50	5–10	n.m.
As [mg kg <sup>-1</sup> ]	n.d.	1–5	5–10
Pb [mg kg <sup>-1</sup> ]	5–10	10–50	500–1000
Cu [mg kg <sup>-1</sup> ]	10–50	10–50	1000–2000
Zn [mg kg <sup>-1</sup> ]	10–50	50–100	2000–3000
Ca [g kg <sup>-1</sup> ]	10–50	10–50	50–100

### 5.2.3. Ergebnisse

Die bisherige Versuchsdauer umfasst 34 Monate. Der Perkolatmengenanteil der einzelnen Lysimeter an den Niederschlägen und der Zusatzberechnung lag zwischen 63 und 72 %. Unter Berücksichtigung der entnommenen Bodenlösungen erhöhten sich die Anteile auf 78–82 %.

Insgesamt wurden 25 verschiedene Messgrößen analysiert, wovon einige Ergebnisse beispielhaft präsentiert werden.

Der Wassertracer Bromid wurde mit Bodenlösungen und Perkolaten mit Wiederfindungsraten von 86 bis 105 % aus den Lysimetern ausgetragen. Die Lysimeter zeigten ein sehr ähnliches Bromidverlagerungsverhalten, wobei der Kontrolllysimeter einen tendenziell schnelleren Durchbruch aufweist, der durch die höchste Perkolatmenge erklärt werden kann. Eine deutliche Peakverbreiterung und die Abflachung des Kurvenverlaufes sind typisch für eine Tiefenverlagerung. Der Wassertracer D<sub>2</sub>O weist dem Bromid vergleichbare Kurvenverläufe auf.

Die DFB wurde mit den Bodenlösungen und den Perkolaten mit Wiederfindungsraten von 92 bis 96 % aus den Lysimetern ausgetragen. Mit Ausnahme des Lysimeters „Asche“ wurde bei der letzten Probenahme in den Bodenlösungen kein DFB mehr analysiert. Lediglich in den Perkolaten wurden noch nennenswerte DFB-Mengen nachgewiesen. Das DFB-Verlagerungsverhalten wird durch die organische Substanz des Bodens nachhaltig beeinflusst (J. DRESSEL, 2004). Da aber die Applikationsfläche 0,80 m unter GOK lag und die organischen Kohlenstoffgehalte in dieser Tiefe äußerst gering waren ( $C_{\text{org}} < 0,1 \%$ ), wies DFB ein dem Wassertracer Bromid vergleichbares Verlagerungsverhalten auf. Die Referenzsubstanz IPU wurde zu Versuchsbeginn zeitgleich in allen Beprobungstiefen gemessen, wobei eine deutliche Konzentrationsabnahme mit der Tiefe beobachtet wurde. Mit Ausnahme des Kontrolllysimeters wurde bei späteren Probenahmeterminen kein IPU mehr nachgewiesen. Von den eingebrachten polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) waren aufgrund der aufgebrauchten Mengen nur Anthracen, Acenaphthen,

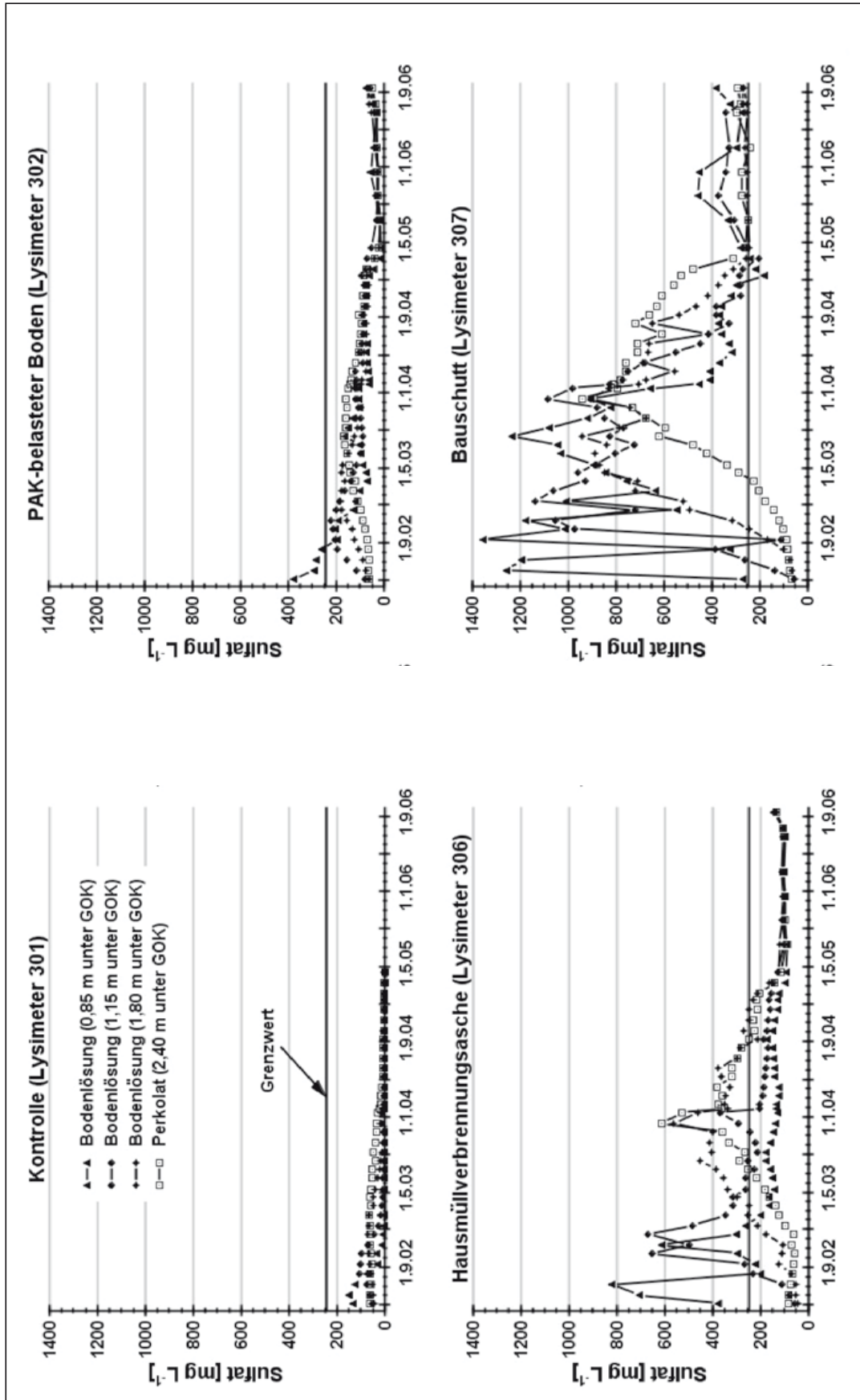


Fig. 5.4: Sulfatkonzentrationen in der Bodenlösung und im Sickerwasser der Lysimeter.  
Sulphate concentrations of the soil solution and the leachate.

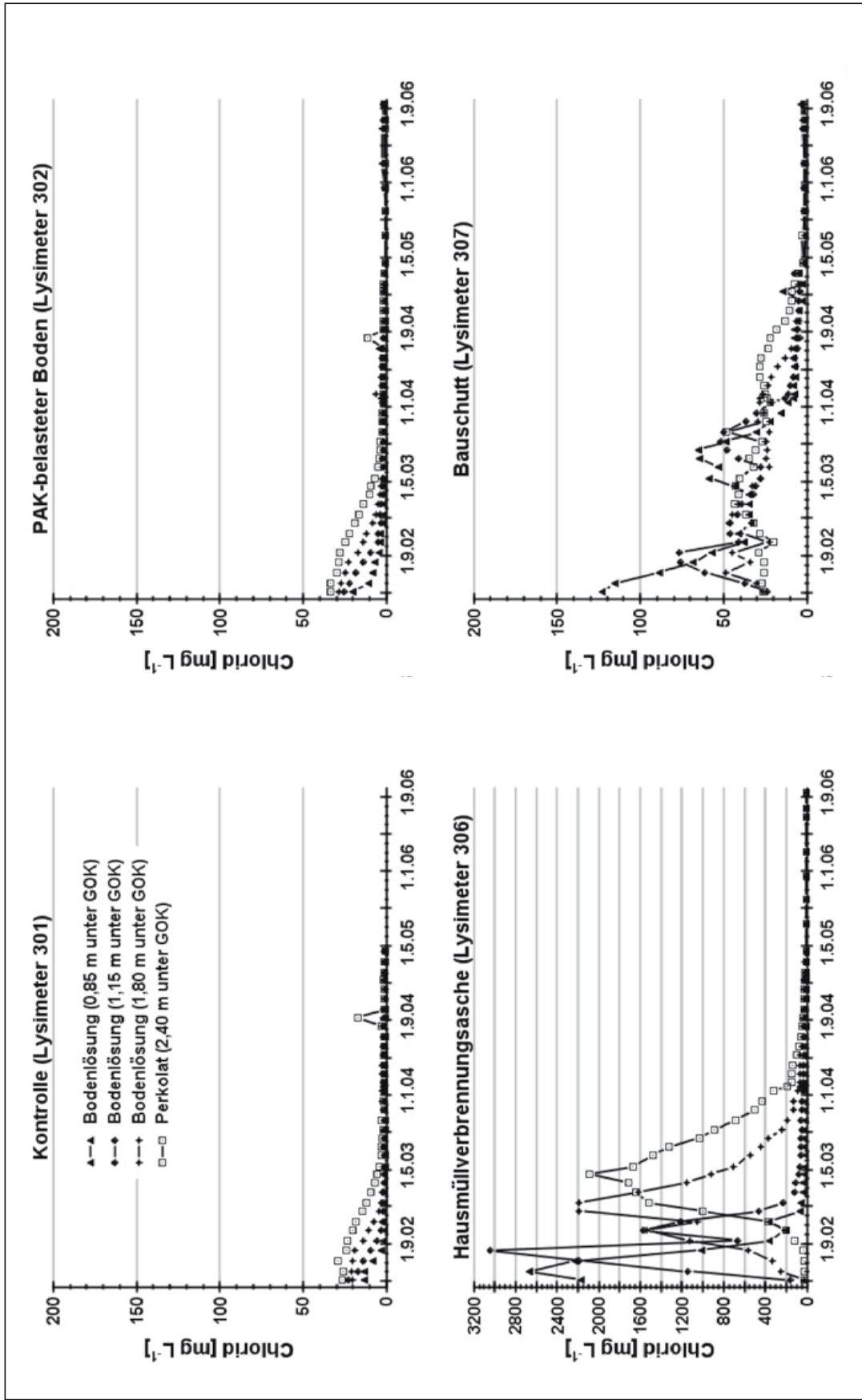


Fig 5.5: Chloridkonzentrationen in der Bodenlösung und im Sickerwasser der Lysimeter.  
Chloride concentrations of the soil solution and the leachate.



Phenanthren und Fluoren in den Bodenlösungen bzw. in den Perkolaten zu erwarten. Alle vier Substanzen wurden bei den ersten Probenahmen in der ersten Saugkerzenebene nachgewiesen. Nur im Lysimeter „Boden“ wurde Phenanthren in deutlich erhöhten Konzentrationen in der ersten Saugkerzenebene detektiert. In den übrigen Proben wurde Phenanthren entsprechend der Hintergrundkonzentration bestimmt.

Als Vertreter für Ionen in den Bodenlösungen und in den Perkolaten wurden  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  und  $\text{Cl}^-$  bestimmt. In Fig. 5.4 und 5.5 sind beispielhaft die Sulfat- bzw. Chloridkonzentrationen dargestellt. Bezogen auf die Referenzmaterialien wurden in den Lysimetern „Asche“ und „Bauschutt“ erhöhte Gehalte gemessen. Mit Ausnahme von  $\text{K}^+$  entsprachen die Konzentrationsverläufe Durchbruchkurven, wobei dies für alle Beprobungstiefen beobachtet wurde. Je nach Beprobungsebene und Ion waren die Konzentrationen in den Bodenlösungen der ersten Beprobungsebene bis zu einem Faktor 100–200 höher als die Konzentrationen des Kontrolllysimeters. Aber auch für die Perkolate wurden noch um den Faktor 50 höhere Konzentrationen gemessen.

Von den Schwermetallen wurden Kupfer, Cadmium, Blei, Nickel, Chrom und Zink analysiert. Cadmium und Blei wurden in allen Bodenlösungen im Ultrapurenbereich  $< 0,5 \mu\text{g L}^{-1}$  detektiert, lediglich im Lysimeter „Asche“ wurden Cadmiumkonzentrationen in den Bodenlösungen aus der ersten Beprobungsebene bis  $2,0 \mu\text{g L}^{-1}$  beobachtet. Für die übrigen untersuchten Schwermetalle betragen die gefundenen Konzentrationen in den Bodenlösungen bis zu  $200 \mu\text{g L}^{-1}$  (Chrom, Zink und Nickel) in der obersten Beprobungsebene, bis  $140 \mu\text{g L}^{-1}$  (Zink) in der mittleren Beprobungsebene und bis  $60 \mu\text{g L}^{-1}$  (Zink) in der untersten Beprobungsebene. Die Schwermetallkonzentrationen in den Perkolaten lagen um ein Vielfaches über den Bodenlösungskonzentrationen. Wahrscheinlich wurden hier produktionstechnische Rückstände aus den Edelstahlintermetallplatten ausgespült, denn in allen Lysimetern wurden vergleichbare Konzentrationen gemessen. Folglich ist ein Austrag mit den Perkolaten aus den Referenzsubstanzen nicht zu beantworten, da es sich hier um einen systemimmanenten Fehler handelt.

#### 5.2.4. Diskussion

Die Verlagerungssituation in den Großlysimetern entsprach einem „worst case“-Szenario, da aufgrund der intensiven zusätzlichen Beregnung und der bewuchsfreien Lysimeteroberfläche ein rascher abwärtsgerichteter Transport beobachtet wurde. Dies wurde durch die Wassertracer Bromid sowie  $\text{D}_2\text{O}$  und den Indikatorstoff DFB verifiziert. Ein vergleichbarer Bromiddurchbruch nach Applikation auf die Oberfläche eines 1,10 m tiefen Lysimeters dauert bei einem Jahresniederschlag von etwa 700 mm ohne Zusatzberegnung und ohne Pflanzenbewuchs mindestens zwei Jahre (J. DRESSEL, 2004).

Für die in der Gruppe der Ionen untersuchten Beispiele wurden die aus der Pflanzenernährung bekannten Mobilitäten beobachtet, wobei die Frachten von der Applikationsmenge abhängig waren (H. MARSCHNER, 1995). Für die untersuchten Schwermetalle kann eine grobe Klassifizierung in die Gruppen „immobil“, „wenig mobil“ und „mobil“ vorgenommen werden. In die Gruppe „immobil“ wird Blei, in die Gruppe „wenig mobil“ werden Kupfer, Nickel sowie Zink und in die Gruppe „mobil“ werden Cadmium sowie Chrom eingestuft. Die untersuchten PAKs wiesen für den Beobachtungszeitraum keinerlei grundwassergefährdende Verlagerungstendenzen auf. Diese vorsichtigen Bewertungen basieren auf einem relativ kurzen Beobachtungszeitraum und bedürfen der weiteren Validierung.

## Zusammenfassung (J. FANK, Zusammenstellung)

Böden spielen wegen ihrer vielschichtigen Funktionen eine Schlüsselrolle bei den meisten ökosystemaren Forschungsprojekten und Umweltmonitoringaufgaben. Das Bodenwasser ist dabei das hauptsächliche Transportmedium für die Stoffverlagerung und der hauptsächliche Energieträger. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, Bodenwasser in seinem komplexen Verhalten zu kennen. Flüsse und Frachten, Retentions- oder Bindungspotentiale sind maßgebend für Untersuchungen zur Wasser-, Stoff- und Energiebilanz, zur Bewirtschaftungsoptimierung, zur Bewässerung, in der Forstwissenschaft, dem Grundwasserschutz und Grundwassermanagement, der Abschätzung von Altlastengefahren sowie dem Umweltmonitoring. Moderne Lysimeter bilden eine neue Skala zwischen Laborversuchen und Freilandstationen. Sie kombinieren die aus den Laborversuchen bekannte Präzision mit echten Feldbedingungen.

Moderne Datenerfassungssysteme ermöglichen es uns heutzutage, komplexe Mess- und Steuerungssysteme mit überschaubarem Aufwand zu realisieren. Die verfügbare Technik kann dabei nicht nur einfach Daten von Sensoren erfassen, sondern auch aktiv in das System einwirken. Durch die autark arbeitenden Mess- und Regelsysteme lassen sich vor Ort Simulationsmodelle realisieren, mit denen Wissenschaftler in situ theoretische Modelle überprüfen können. Präzision, Stabilität und Integrität der Messdaten können durch den Einsatz von intelligenten Sensoren verbessert werden.

Wie in vielen Bereichen der Naturwissenschaften werden auch zur Erklärung der Wasserbewegungs- und Stofftransportprozesse in der ungesättigten Zone Modelle eingesetzt, die versuchen, die physikalischen Zusammenhänge der untersuchten Kompartimente eines realen Umweltsystems mit mathematischen Gleichungen zu beschreiben. Diese Modelle müssen anhand von Messdaten validiert und die Parameter der Gleichungssysteme regionalspezifisch kalibriert werden, um sie in weiterer Folge für die Übertragung von punktuellen Messinformationen auf größere Flächeneinheiten verwenden zu können.

Aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen an der Lysimeterstation Wagna aus den Jahren 1992 bis 2003 wurden im Sommer 2004 zwei monolithische wägbare Präzisionslysimeter mit parallel geschalteten bodenhydrologischen Messprofilen installiert. Im Frühjahr 2006 wurde die Messumgebung durch ein wägbares „Gras-Lysimeter“ zur Erfassung der Referenzverdunstung ergänzt. Wesentlichster Bestandteil des Datenmanagementsystems ist eine Datenbank, in der alle zeitabhängigen Daten und die Ergebnisse der Analytik erfasst und verwaltet werden. Die Onlinedaten werden auf mehreren Datensammlern in der Forschungsstation gespeichert und via Internetverbindung in die Datenbank eingelesen. Visualisierungs- und Editierwerkzeuge lassen eine rasche Überprüfung und erste Korrektur der Messwerte zu. Dabei wird auf ein Versionsmanagement Wert gelegt, sodass jeder Datensatz von seiner Entstehung über unterschiedliche Bearbeitungsstufen jederzeit verfolgbar und auch wieder herstellbar ist. Programmierschnittstellen versorgen verschiedene Datenbanken von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen mit den erforderlichen Informationen. Spezifische Programme erlauben die Auswertung der Messdaten selbst: beispielsweise die Ableitung von Wasserbilanzgrößen aus den Lysimetergewichten bzw. die Berechnung der Evapotranspiration auf der Basis von Wetterdaten.

Die Aufnahme bodenphysikalischer und bodenchemischer Parameter anhand von Proben, die im Zuge der Errichtung von Lysimetern gewonnen werden, wird durch die Onlineerfassung von Kenngrößen der ungesättigten Zone in den Bodenhorizonten der Lysimeter und in einem parallel geschalteten Freilandprofil ergänzt. Durch die Durchführung und Auswertung von Tracerversuchen können Unterschiede in den Stofftransport-

prozessen von konservativen Tracern, Mineral- und Wirtschaftsdünger untersucht werden. Aus der Auswertung dieser Tracerversuche sind auch Informationen über präferentielle Flüsse in den Lysimetern verfügbar. Zur Validierung und regionalspezifischen Kalibration von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen stehen als Ergebnis der Lysimetermessungen kurzintervallige Messdaten der Wasserkreislaufparameter, Pflanzenkoeffizienten der untersuchten Fruchtfolgeglieder aber auch detaillierte Informationen über die ackerbaulichen Bewirtschaftungs- und Düngemaßnahmen zur Verfügung. Daten aus einem Videoüberwachungssystem erlauben die Ableitung unterschiedlicher Pflanzenentwicklungsstadien und die Kontrolle des Wettergeschehens auf visuelle Weise. Numerische Modelle sollten jedenfalls in der Lage sein, die Messdaten des Wasser- und Stoffkreislaufs von Lysimetern nachzuvollziehen, bevor sie für regionale Fragestellungen mit wesentlich geringerer Datenverfügbarkeit eingesetzt werden.

Die Berechnung des Wasser- und Stofftransports in der ungesättigten Zone benötigt Informationen über die hydraulischen Parameter, deren Beschreibung ist meist beschränkt auf homogene Fließbedingungen. Tatsächlich sind Böden aber sehr heterogen. Eine Methode, die die mathematische Modellierung mit Umweltisotopen und hydrologischen Daten verbindet, erlaubt es, die Heterogenität im Wassertransport der ungesättigten Zone unter atmosphärischen Bedingungen zu bestimmen. Dabei werden Verweilzeitverteilungen des präferentiellen und Matrixflusses berechnet und in Gefährdungsdiagrammen dargestellt.

Die Messung der Sickerwassermenge mit Schwerkraftlysimetern ist mit einem grundsätzlichen Fehler aufgrund der Ausformung der Unteren Randbedingung behaftet. Dieser Fehler wird mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell SIMWASER abgeschätzt und die Ergebnisse zweier unterschiedlicher Klimaregionen bewertet. Die vorliegenden ersten Auswertungen und Simulationen lassen vermuten, dass in niederschlagsreichen Gebieten die Messung der Grundwasserneubildung für praxisorientierte Anwendungen durchaus mit vergleichsweise billigen Schwerkraftlysimetern durchgeführt werden kann, da der damit verbundene Fehler gering bleibt. In Trockengebieten jedoch sollten für eine realistische Erfassung der Grundwasserneubildung Unterdrucklysimeter zur Anwendung kommen.

Die Auswertung von instationären Fließexperimenten durch inverse Modellierung mit Hilfe numerischer Simulation hat sich als genaue und schnelle Methodik zur Gewinnung von hydraulischen Parametern zunehmend bewährt. Die Anwendung dieser auf der Laborskala entwickelten und validierten Methode ist jedoch auf der Feldskala nicht ohne weiteres möglich. Offene Fragen ergeben sich insbesondere für große Bodenkörper, die intern heterogen aufgebaut sind. Dies betrifft die Existenz, die Eindeutigkeit, die geeigneten Funktionstypen und die Unsicherheiten der effektiven hydraulischen Eigenschaften. Zur näheren Untersuchung dieser Fragen bieten sich Lysimeterstudien an. Der entscheidende Vorteil im Vergleich zum freien Bodenkörper liegt darin, dass in Lysimetern die Randflüsse genau kontrolliert werden können.

Der Wasserstatus von Böden beeinflusst ökosystemare Stoff- und Energieumsetzungen auf allen Skalen. Zur Quantifizierung der Ausbreitung von Schadstoffen im Boden ist daher eine korrekte Beschreibung des ungesättigten Wassertransportes erforderlich, welches die Kenntnis der bodenhydraulischen Eigenschaften voraussetzt. Um die bestehende Skalenlücke zwischen Labor und Feld zu schließen, wurde die Lysimeterskala gewählt. Zur Identifikation der bodenhydraulischen Eigenschaften bzw. zur Quantifizierung des Tracertransportes wurde die Methode der inversen Modellierung unter Einbeziehung des global konvergenten Shuffled-Complex-Evolution(SCE-UA)-Algorithmus angewandt. Die Schwierigkeiten der Anwendung der inversen Modellierung auf der Lysimeterskala liegen vor allem in der Heterogenität der Böden und der damit verbundenen Nichtexistenz eindeutiger effektiver bodenhydraulischer Eigenschaften begründet.

In Untersuchungen zur Sickerwasserprognose wurden mit 24 kontaminierten Bodenproben Vergleichsuntersuchungen von verschiedenen Elutionsverfahren durchgeführt und Ergebnissen aus Großlysimeteruntersuchungen gegenübergestellt. Der Vergleich der Laborverfahren mit Lysimetersickerwasser zeigte häufig eine Überschätzung der mittleren Sickerwasserkonzentration am Ort der Probenahme durch die Gewinnung des Bodensättigungsextraktes. Recyclingmaterial besteht aus sehr stark variierenden Bestandteilen, die wasserlöslich sein und entsprechend eine Gefahr für das Grundwasser darstellen können. Das Ziel der vorgestellten Untersuchungen war, die mögliche Grundwassergefährdung von drei typischen Recyclingmaterialien im Lysimeterversuch abzuschätzen. Die verwendeten Recyclingmaterialien waren ein PAK-belasteter Boden, Hausmüllverbrennungsschlacke und Straßen- und Hausabbruchmaterial. Zur Gewinnung von Bodenlösung wurden Saugkerzen installiert. Bromid und Deuterium wurden als konservative Tracer und 2,6-Di-Fluorbenzoesäure wurde als reaktiver Tracer appliziert. Die Verlagerungssituation der Lysimeter entsprach einem „worst case“-Szenario bedingt durch die starke Zusatzberegnung und die unbewachsene Kiesoberfläche. Von den analysierten Schwermetallen ist Blei als immobil, Kupfer, Nickel und Zink als schwach mobil sowie Chrom und Cadmium als mobil einzustufen. Für die untersuchten PAKs wurde keine relevante Verlagerung beobachtet.

## Literatur

- ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES & M. SMITH (1998): Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements.– FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, 300 p., FAO, Rome.
- VAN BAVEL, C. H. M. (1961): Lysimetric measurements of evapotranspiration rates in the Eastern United States.– Soil Sci. Soc. Am. Proc., 25, 138–141, Madison.
- BBODSCHG (1998): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998).– BGBl. I Nr. 16, 502–510, Köln.
- BBODSCHV (1999): Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999.– BGBl. I Nr. 36, 1554–1582, Köln.
- BERGER, W. & U. KALBE (2003): Herstellung von Referenzmaterialien.– Zwischenpräsentation BMBF Förderschwerpunkt „Sickerwasserprognose“, 18.–19. 02. 2003, Langfassung der Vorträge, 1–10, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- BITTERLICH, S., W. DURNER, S. C. IDEN & P. KNABNER (2004): Inverse Estimation of the Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Column Outflow Experiments Using Free-Form Parameterizations.– Vadose Zone Journal, 3, 971–981, Madison, Wisconsin.
- BÖHM, K. & J. HÖSCH (2001): Der Zwischenfruchtbau als Instrument der Stoffkonservierung.– Bericht der BAL über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24. bis 25. April 2001, HBLA Raumberg, 51–56, Irdning.
- DIN 19730 (Juni 1997): Bodenbeschaffenheit – Extraktion von Spurenelementen mit Ammoniumnitratlösung.– 8 S., Berlin (Beuth Verlag).
- DIN 38414 (Oktober 1984): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung – Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Teil 4: Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S4).– 10 S., Berlin (Beuth Verlag).
- DIN EN ISO 10304-1 (April 1995): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung der gelösten Anionen Fluorid, Chlorid, Nitrit, Orthophosphat, Bromid, Nitrat und Sulfat mittels Ionenchromatographie – Teil 1: Verfahren für gering belastete Wässer (ISO 10304-1:1992); Deutsche Fassung EN ISO 10304-1:1995.– 21 S., Berlin (BeuthVerlag).
- DIN EN ISO 11885 (April 1998): Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von 33 Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ISO 11885:1996); Deutsche Fassung EN ISO 11885:1997.– 19 S., Berlin (Beuth Verlag).

- DIN EN 12457-4 (Januar 2003): Charakterisierung von Abfällen – Auslaugung, Übereinstimmungsuntersuchung für die Auslaugung von körnigen Abfällen und Schlämmen, Teil 4: Einstufiges Schüttelverfahren mit einem Flüssigkeits-/Feststoffverhältnis von 10 l/kg für Materialien mit einer Korngröße unter 10 mm (ohne oder mit Korngrößenreduzierung); Deutsche Fassung EN 12457-4:2002.– 32 S., Berlin (Beuth Verlag).
- DOWDELL, R. & C. P. WEBSTER (1980): A lysimeter study using Nitrogen-15 on the uptake of fertilizer Nitrogen by perennial Ryegrass swards and losses by leaching.– *J. Soil Sci.*, **31**, 65–75, Oxford (Clarendon Press).
- DRESSEL, J. (2004): Transport von Ethidimuron, Methabenzthiazuron und Wassertracern in einer Parabraunerde.– Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, 220 S., Bonn.
- DUAN, Q., V. K. GUPTA & S. SOROOSHIAN (1993): Shuffled Complex Evolution Approach for Effective and Efficient Global Minimization.– *Journal of Optimization Theory and Applications*, **76**, 501–521, New York.
- DURNER, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure.– *Water Resour. Res.*, **30**, 211–223, Washington D.C.
- DURNER, W. & H. FLÜHLER (2005): Soil Hydraulic Properties.– In: ANDERSON, M. G. (Ed., 2005): *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, Chapter 74.– 1<sup>st</sup> ed., 1103–1120, London (John Wiley & Sons, Ltd).
- DVWK (1980): Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern.– DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft, **114**, 52 S., Hamburg (Paul Parey, ISBN 3-490-11497-3).
- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefrachtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich).– *Beiträge zur Hydrogeologie*, **49/50**, 101–388, Graz.
- FANK, J. (2006a): Modellkalibration anhand von Lysimeterdaten.– Wissenschaftliche Tagung 2006 Sektion Lysimeter, Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen, H. **10/2006**, 37–49, Jena.
- FANK, J. (2006b): Monolithic field lysimeters for precise weighing – a basis for balancing water flow.– In: KAMMERER, G. & F. KASTANEK (Eds., 2006): *Proceedings of the International Symposium Sophywa, Soil Physics and Rural Water Management – Progress, Needs and Challenges*, September 28–29, 2006, Vienna/Austria.– 89–92, Vienna (ISBN 3-900962-65-0).
- FANK, J. & Ch. LANTHALER (2006): Water Flow and Water Transport in Lysimeters – an Essential Basis for the Investigation of Solute Transport Processes.– In: MUNCH, J.-C. (Ed., 2006): *Lysimeters for Global Change Research: Biological Processes and the Environmental Fate of Pollutants*, GSF–National Research Center for Environment and Health in Neuherberg, October 04–06, 2006.– Abstracts of the oral presentation, p. 31, Munich.
- FANK, J. & G. ROCK (2005): Tracer Experiments on Field Scale for Parameter Estimation to Calibrate Numerical Transport Models.– In: NÜTZMANN, G., P. VIOTTI & P. AAGAARD (Eds., 2005): *Reactive Transport in Soil and Groundwater – Processes and Models*, 239–250, Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2005): Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Freilandbewirtschaftung (Wagna – Austria).– Bericht der BAL über die 11. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen“ vom 5. bis 6. April 2005, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 55–60, Irdning.
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – tool to measure water and soluble balance parameters.– *International Water & Irrigation*, Vol. **27**, No **3**, 28–32, Tel Aviv.
- FANK, J., E. STENITZER, F. FEICHTINGER & P. CEPUDER (2004): Messdaten und Modellkalibration an der Forschungsstation Wagna und daraus abzuleitende Anforderungen an Messstellen zur Kalibration von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen.– In: KLOTZ, D. (Hrsg., 2004): *Untersuchungen zur Sickerwasserprognose in Lysimetern*.– GSF-Bericht, **02/04**, 79–86, Neuherberg.
- GAZIS, C. & X. FENG (2004): A stable isotope study of soil water: evidence for mixing and preferential flow paths.– *Geoderma*, **119** (1-2), 97–111 (Elsevier).
- VAN GENUCHTEN, M. Th., F. J. LEIJ & S. R. YATES (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 6.0. EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.– URL: [http://www.pc-progress.cz/\\_vti\\_bin/shtml.dll/Pg\\_Hydrus\\_Downloads\\_Form\\_RETC.htm](http://www.pc-progress.cz/_vti_bin/shtml.dll/Pg_Hydrus_Downloads_Form_RETC.htm) [April 2005].
- JANKER, G., D. KLOTZ, H. STEINDL & G. VON UNOLD (1998): Sensorik und Datenerfassung der GSF-Lysimeteranlage Neuherberg.– In: KLOTZ, D. & K.-P. SEILER (Hrsg., 1998): *Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg*.– GSF-Bericht, **23/98**, 41–48, Neuherberg.

- JANSEN, U. (2005): Bestimmung effektiver hydraulischer Eigenschaften geschichteter Böden auf der Lysimeterskala durch inverse Modellierung.– Unveröff. Diplomarbeit, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig, 151 S., Braunschweig.
- JANSSON, P.-E. & L. KARLBERG (Eds., 2004): Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems.– COUP manual, 453 p., Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stockholm, [online available: <ftp://www.lwr.kth.se/CoupModel/CoupModel.pdf>, 20. 07. 2008].
- JANSSON, P.-E. & L. KARLBERG (2004): CoupModel Version 2.5. Coupled heat and mass transfer model for soil- plant- atmosphere- systems.– URL: <http://www.lwr.kth.se/Vara%20Datorprogram/CoupModel/index.htm> [April 2005].
- KLAGHOFFER, E. (2002): Feldlysimeter: Methodik und Grenzen.– In: BUNDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (Hrsg., 1998): Monolithische Feldlysimeter.– Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 16, 6–11, Wien.
- KLOCKE, N. L., R. W. TODD, G. W. HERGERT, D. G. WATTS & A. M. PARKHURST (1993): Design, installation and performance of percolation lysimeters for water-quality sampling.– Transactions of the ASAE, 36, 429–435.
- KLOTZ, D., H. GAUDLITZ & G. HINREINER (2001): Wassergehalts-Saugspannungs-Beziehung – ein Vergleich von Labor- und Lysimeteruntersuchungen.– Bericht der BAL über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24. bis 25. April 2001, HBLA Raumberg, 181–183, Irdning.
- LEIS, A., H. THEURETZBACHER-FRITZ & G. VON UNOLD (2001): Zusammenfassung des Workshops „Lysimeter – Anforderungen, Erfahrungen, Technische Konzepte“ vom 25. bis 26. September 2000 in Graz, Österreich.– Bericht der BAL über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung „Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung“ vom 24. bis 25. April 2001, HBLA Raumberg, 7–9, Irdning.
- MACIEJEWSKI, S., P. MAŁOSZEWSKI, C. STUMPP & D. KLOTZ (2006): Modelling of water flow through typical Bavarian soils (Germany) based on lysimeter experiments: 1. Estimation of hydraulic characteristics of the unsaturated zone.– Hydrological Sciences Journal, 51 (2), 285–297 (IAHS Press).
- MAŁOSZEWSKI, P. & A. ZUBER (1996): Lumped parameter models for the interpretation of environmental tracer data.– In: Manual on mathematical models in isotope hydrology.– IAEA-TECDOC-910, 9–58, International Atomic Energy Agency Vienna, Austria.
- MAŁOSZEWSKI, P., W. STICHLER, A. ZUBER & D. RANK (2002): Identifying the flow systems in a karstic-fissured-porous aquifer, the Schnealpe, Austria, by modelling of environmental <sup>18</sup>O and <sup>3</sup>H isotopes.– Journal of Hydrology, 256 (1-2), 48–59 (Elsevier).
- MAŁOSZEWSKI, P., S. MACIEJEWSKI, Ch. STUMPP, W. STICHLER, P. TRIMBORN & D. KLOTZ (2006): Modelling of water flow through typical Bavarian soils based on lysimeter experiments: 2. Environmental deuterium transport.– Hydrological Sciences Journal, 51 (2), 298–313 (IAHS Press).
- MARSCHNER, H. (1995): Mineral Nutrition of Higher Plants.– 2<sup>nd</sup> ed., 889 p., London (Academic Press).
- NORDMEYER, H. & D. ADERHOLD (1994): Aufbau und Betrieb einer Lysimeterstation zur Erfassung der Verlagerung von Pflanzenschutzmitteln im Bodenprofil.– Z. Pflanzenernähr. Bodenkd., 157, 93–98, Weinheim (VCH Verlagsgesellschaft).
- ROCK, G. (2003): Das instationäre numerische Grundwassermodell als Basis für die Erstellung von Planungsgrundlagen.– Tagungsband Workshop Porengrundwasser – Ressourcenmanagement: „Wassergewinnung in Tal-Grundwasserleitern: vom Experiment zur Planungsgrundlage“, Graz; 09. 12. 2003, 32–47, JOANNEUM RESEARCH, Graz.
- SCHEITHAUER, M. & W. BERGER (2004): Vergleich verschiedener Elutionsmethoden der BBodSchV an ausgewählten bayerischen Altlastenstandorten mit Lysimeteruntersuchungen.– Altlastenspektrum, 04/2004, 203–213, Berlin (Erich Schmidt Verlag).
- SIMUNEK, J., K. HUANG, M. SEJNA & M. Th. VAN GENUCHTEN (1998): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 2.02.– U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.
- SIMUNEK, J., M. SEJNA & M. Th. VAN GENUCHTEN (2005): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Version 3.0.– U.S. Salinity Laboratory, Riverside, California.
- STENITZER, E., H. DIESTEL, Th. ZENKER & R. SCHWARTENGRÄBER (2007): Assessment of capillary rise from shallow groundwater by simulation model SIMWASER using either estimated pedotransfer functions or measured hydraulic parameters.– Water Resources Management, 21, 1567–1584, Heidelberg (Springer).

- STONE, W. W. & J. T. WILSON (2006): Preferential flow estimates to an agricultural tile drain with implications for glyphosate transport.– *Journal of Environmental Quality*, **35**, 1825–1835 (SCI).
- STUMPP, C., P. MAŁOSZEWSKI, W. STICHLER & S. MACIEJEWSKI (2007): Quantification of heterogeneity of the unsaturated zone based on environmental deuterium observed in lysimeter experiments.– *Hydrological Sciences Journal*, **52** (4), 748–262 (IAHS Press).
- SWENSEN, B. (1997): Unsaturated flow in a layered, glacial-contact delta deposit measured by the use of  $^{18}\text{O}$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{Br}^-$  as tracers.– *Soil Science*, **162** (4), 242–253 (Wolters Kluwer).
- THE MATH WORKS (2007): MATLAB® 7 Function Reference.– pp. 1298, The MathWorks, Inc., 3 Apple Hill Drive, Natick, MA 01760-2098.
- VON UNOLD, G. (2002): UMS-application note: Allgemeine Anforderungen an Lysimeterstationen und deren Betrieb.– Unveröff. Bericht, UMS Umweltanalytische Mess-Systeme GmbH.
- VON UNOLD, G. (2006): UMS measure to know. Boden, Wasser, Pflanze, Klima. Kapitel Lysimeter.– Ausgabe 2.0, 6–13, München, [online verfügbar: <http://www.ums-muc.de/fileadmin/files/Content/Katalog/3%20Lysimeter-DEU-V2.pdf>], 23. 06. 2008].
- VON UNOLD, G. & J. FANK (2006): Lysimeter Station Requirements and Techniques for Water Balance, Solute Flux and Bioremediation Investigations.– In: KAMMERER, G. & F. KASTANEK (Eds., 2006): Proceedings of the International Symposium Sophywa, Soil Physics and Rural Water Management – Progress, Needs and Challenges, September 28–29, 2006, Vienna/Austria.– 85–88, Vienna (ISBN 3-900962-65-0).
- WALTER, I. A., R. G. ALLEN, R. ELLIOTT, D. ITENFISU, P. BROWN, M. E. JENSEN, B. MECHAM, T. A. HOWELL, R. SNYDER, S. ECHING, T. SPOFFORD, M. HATTENDORF, D. MARTIN, R. H. CUENCA & J. L. WRIGHT (2005): The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation.– ASCE-EWRI Task Committee Report, 59 p.
- YOUNG, M. H., P. J. WIERENGA & C. F. MANCINO (1996): Large Weighing Lysimeters for Water Use and Deep Percolation Studies.– *Soil Science*, **161** (8), 491–501.
- ZURMÜHL, T. & W. DURNER (1996): Modelling transient water und solute transport in a biporous soil.– *Water Resour. Res.*, **32**, 819–829, Washington D.C.

## Summary (J. FANK, compilation)

Soils have a key role for most environmental research studies because of their multiple functions. Water is the main transport media in soils. Therefore, the knowledge of water retention and water flux behaviour in soils is the basic information needed for investigations on water – and energy balance, for food production, cultivation, irrigation, forestry, groundwater management and groundwater protection, waste risk assessment, ecosystem research and – monitoring. Modern lysimeters combine field conditions with the high accuracy known from laboratory setups, which enable us to measure precisely in natural, monolithic soils under true climatic, hydrologic and/or farming conditions.

Modern data acquisition systems with remote access are capable of building complex simulation models in the spot. Users can choose out of a large portfolio of measure and control functions. Intelligent sensors can improve the quality of the measuring data. Precision, stability and integrity can be improved by the use of intelligent sensors.

To determine water and nutrient transport processes in the unsaturated zone, models are employed to explain the physical relationships between the natural parts of the environment investigated; as in many other fields of research of natural sciences, models use mathematical equations. These models have to be validated according to measured data and parameters of equations have to be calibrated regionally when the calculated results of one point should be applied regionally to larger areas.

Based on the investigation results at the lysimeter station of Wagna from 1992 to 2003 in summer 2004 two weighable monolithic field lysimeters combined with soil hydrologic measuring profiles have been constructed. In spring 2006 the measurement equipment has been supplemented with an additional weighable lysimeter for measuring grass reference evapotranspiration ( $\text{ET}_0$ ). The main part of the data management system is a time series database for storing and managing the time dependent data and analyses results. Online data are stored at different data loggers in the research station, transferred to the office via internet and imported into the database. Tools for visualisation and editing offer efficient methods for data check and editing. A version management system allows tracing of all the correction

steps. Programming interfaces serve the needs of soil water balance and solute transport modelling data bases. Specific software is available to evaluate measured data; for example the determination of water balances out of lysimeter weight information, calculation of evapotranspiration on the base of weather parameters respectively. Water balance parameters are recorded in short time steps and agricultural management systems are well documented. A video surveying systems is installed to check the weather and fertilisation data. The combination of lysimeter, meteorological, and agricultural data allows for a precise recording of water and nutrient balances of crop rotations that are tilled either conventionally or with the organic-farming system.

The determination of water and solute transport using numerical modelling needs information about soil hydraulic parameters and is in general limited to homogeneous flow conditions. But in reality, soils are very complex systems of high heterogeneity. Therefore, a method which combines mathematical modelling with environmental and hydrological data was investigated to estimate the heterogeneity of water transport through the unsaturated zone under natural atmospheric conditions. The transit time distribution functions of preferential and matrix flow were used to construct vulnerability diagrams.

The error in measuring percolation by tension free lysimeters is estimated for two climatic different sites using the simulation model SIMWASER. It is assumed, that in high rainfall regions the error in measuring percolation with cheap tension free lysimeters will be acceptable, but in dry areas suction lysimeters are needed for reliable measurement of groundwater recharge.

Inverse modelling of water and solute transport in unsaturated soils is a modern, accurate and fast method to calculate hydraulic and transport parameters on the lab scale. But the application of the inverse methodology to field scale processes is non-trivial, in particular for large soil volumes with internal heterogeneities. Questions arise with respect to the existence, the uniqueness, adequate function types, and the uncertainties of the effective hydraulic properties. To solve these problems lysimeter studies are helpful. An important advantage, in comparison to free soil bodies, lies in the controlled experiment design, in particular in the control of the boundary conditions.

Water in soils affects solute and energy transformation processes in ecosystems at all scales. To quantify the transport and fate of chemicals in soils, a correct identification of unsaturated water transport is needed which requires the knowledge of the soil hydraulic properties. Currently, there is a particular interest in investigating the transferability of soil hydrological processes to larger scales. To close the existing gap between laboratory and field scale, the lysimeter scale was chosen. The aim of the presented study was to identify the soil hydraulic properties and to quantify the tracer transport by the method of inverse simulation using the global convergent Shuffled-Complex-Evolution-Algorithm. Difficulties of applying the inverse method on the lysimeter scale arose due to the heterogeneity of soils and the non-existence of unique effective soil hydraulic properties.

At investigations in context to the seepage water determination project different and partly normed leaching tests were compared using 24 differently contaminated soil samples. They were furthermore partly compared with experiments performed in large-scaled lysimeters. Comparison of the bench-scaled methods with the gaining of lysimeter seepage water resulted in many cases in overestimation of the concentrations in the soil saturation extract compared with lysimeter seepage water. Recycling materials are mixtures of varying components and possibly contain water soluble components which are dangerous for the groundwater. The aim of the presented study was to test the leaching potential of three typical, widely used recycling materials in lysimeters filled with soil monolith. The three tested recycling materials were a PAHs contaminated soil, ash of domestic waste and material of road and house demolition. For soil solution sampling, suction candles were installed. Bromide and deuterium were applied as conservative water tracers and 2,6-di-fluorobenzoic acid was applied as a reactive tracer. The leaching situation of the lysimeters reflected a worst case scenario, because a rapid vertical transport was induced by high amounts of irrigation and the bare gravel surface. Among the analyzed heavy metals, lead was immobile, copper, nickel and zinc were less mobile and chromium and cadmium were mobile. As for the PAHs contaminated soil, no relevant leaching of PAHs was observed.

Schlüsselwörter: Präzisionslysimeter, Messtechnik, Datenmanagement, Wasser- und Stoffbilanz, Modellierung

Keywords: precision lysimeter, measuring techniques, data management, water and solute balance, modelling