

# SEMINAR

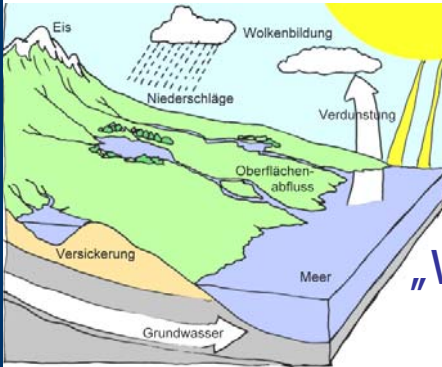
Kurzfassungen der Vorträge und Posterbeiträge des

Seminars

„Wasserkreislaufparameter“

von 31. 3. bis 1. 4. 2008

im Schloss Seggau bei Leibnitz



## **Redaktion des Seminarbandes:**

Christine Lanthaler

Die inhaltliche Verantwortung der Kurzfassungen der Vorträge sowie Poster liegt bei den Verfassern der jeweiligen Beiträge. Die Redaktion übernahm lediglich Korrekturen von etwaigen Rechtschreibfehlern sowie die Vereinheitlichung der Formatierungen, des Seitenlayouts, zum Teil der Literaturangaben und Zitate, wobei aber nicht alle Angaben vereinheitlicht werden konnten.

## **Titelblatt:**

Die Grafik des Wasserkreislaufs wurde der Internetseite <http://www.oekosystem-erde.de/html/wasser.html> (Zugriff 1. März 2008) entnommen.

Die drei Fotos der Forschungsstation Wagna (Lysimeter und Niederschlagsmessgeräte) wurden am 31. 5. und 14. 6. 2007 von Christine Lanthaler aufgenommen.

## **Wir bedanken uns bei den Veranstaltern und Sponsoren des Seminars:**

**JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH Graz**  
**UMS GmbH München umwelt-monitoring-systeme measure to know**  
**Eijkelpark Agrisearch Equipment**  
**Kompetenznetzwerk Wasserressourcen GmbH**



# Vortrags- und Posterprogramm

## 1. Tag: 31. 3. 2008

ab 09.00: Registrierung

- 10.00: **Begrüßung** und Vorstellung der Veranstalter und Sponsoren:  
JOANNEUM RESEARCH (Johann Fank)  
Eijkelkamp Agrisearch Equipment (Markus Reißig)  
UMS GmbH München (Georg von Unold)  
Kompetenznetzwerk Wasserressourcen GmbH; **Eröffnung** (Hans Zojer)  
Organisatorisches (Christine Lanthaler)

Vorsitz: Cepuder Peter (Universität für Bodenkultur, Wien)

- 10.30: **Gattermayr Wolfgang (Hydrographischer Dienst Tirol, Innsbruck):**  
Zielsetzungen und Vorgangsweise bei der Erhebung des Wasserkreislaufes und seiner Parameter  
11.00: **Sprenger Wolfgang (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof):**  
Der Gewässerkundliche Dienst in Bayern  
11.30: **Fank Johann (JOANNEUM RESEARCH Graz):**  
Messdatengewinnung an der Forschungsstation Wagna

12.00: *Mittagessen (Buffet)*

- 13.30: **Abfahrt zur Exkursion nach Wagna**  
Führungen in vier Gruppen durch das Versuchsfeld und die Forschungsstation  
(Georg Fastl, Johann Fank, Georg von Unold, Christine Lanthaler)  
17.00: **Rückfahrt ins Schloss Seggau**

18.30: *Abendessen (Buffet)*

- 20.00: **Abendveranstaltung:** Führung durch den barocken bischöflichen Weinkeller mit Weinverkostung (Dauer: ca. 1 Stunde, warme Kleidung wird empfohlen!)

## 2. Tag: 1. 4. 2008

Vorsitz: Feichtinger Franz (IKT Petzenkirchen)

- 09.00: **von Unold Georg (UMS GmbH München):**  
Lysimetertechnik  
09.30: **Steins Andreas (UMS GmbH München):**  
Spezielle Messtechnik für Lysimeteranlagen  
10.00: **Rock Gerhard & Plieschnegger Markus (JOANNEUM RESEARCH Graz):**  
Datenmanagement der Forschungsstation Wagna

10.30: *Kaffeepause*

Vorsitz: Durner Wolfgang (Technische Universität Braunschweig)

- 11.00: **Kammerer Gerhard, Loiskandl Willibald, & Klepsch Sabine (Universität für Bodenkultur Wien und Austrian Research Centers GmbH Seibersdorf):**  
Analyse der Lysimeterrandbedingungen
- 11.30: **Schindler Uwe, Verch Gernot, Wolff Maren & Müller Lothar (Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung Müncheberg):**  
Bedeutung der unteren Randbedingung in Lysimetern für die Sickerwassermessung
- 12.00: **Fank Johann (JOANNEUM RESEARCH Graz):**  
Parameter des Wasserkreislaufs an der Forschungsstation Wagna (Auswertung und Ergebnisse)

13.00: *Mittagessen (Buffet) und Kaffeepause*

Vorsitz: Sprenger Wolfgang (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof)

- 14.00: **Durner Wolfgang (Technische Universität Braunschweig):**  
Parametrisierung hydraulischer Funktionen zur Modellierung des Wassertransports in der ungesättigten Bodenzone
- 14.30: **Böttcher Norbert, Fank Johann, Liedl Rudolf & Reimann Thomas (Technische Universität Dresden und JOANNEUM RESEARCH Graz):**  
Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala - ein Modellvergleich
- 15.00: **Feichtinger Franz (IKT Petzenkirchen):**  
Regionale Modellierung des Wasser- und Stoffkreislaufes
- 15.30: **Bittersohl Jochen & Foullois Nicole (Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof):**  
Langfristige Stoffdynamik in kleinen Wassereinzugsgebieten - Messkonzept und Ergebnisse
- 16.00: **Fank Johann (JOANNEUM RESEARCH Graz):**  
Abschlussdiskussion

Poster:

- **Messdatenerfassung im agrarwirtschaftlichen und hydrogeologischen Umfeld**  
(Johann Fank, JOANNEUM RESEARCH Graz)
- **Wasser- und Stoffbilanzen aus den Lysimetern in Wagna**  
(Johann Fank, JOANNEUM RESEARCH Graz)
- **Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Feldmessungen - ein Vergleich mit Lysimeterergebnissen/Evaluation of a field method of deep seepage estimation based on soil hydrological measurements**  
(Uwe Schindler & Lothar Müller, Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung Müncheberg)
- **Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven**  
(Michael Herbst, Andre Peters & Wolfgang Durner, Technische Universität Braunschweig)
- **Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala - ein Modellvergleich**  
(Norbert Böttcher, Johann Fank, Rudolf Liedl & Thomas Reimann, Technische Universität Dresden und JOANNEUM RESEARCH Graz)

Aussteller:

- UMS GmbH München umwelt-monitoring-systeme measure to know
- Eijkelkamp Agrisearch Equipment

## Inhaltsverzeichnis (Vorträge und Poster)

|  |    |
|--|----|
| Zielsetzungen und Vorgangsweise bei der Erhebung des Wasserkreislaufes und seiner Parameter .....                    | 7  |
| Der Gewässerkundliche Dienst in Bayern .....   | 10 |
| Messdatengewinnung an der Forschungsstation Wagna .....  | 14 |
| Lysimetertechnik .....   | 18 |
| Spezielle Messtechnik für Lysimeteranlagen .....   | 19 |
| Datenmanagement der Forschungsstation Wagna .....  | 23 |
| Analyse der Lysimeterbedingungen .....   | 27 |
| Bedeutung der unteren Randbedingung in Lysimetern für die Sickerwassermessung .....                                  | 31 |
| Parameter des Wasserkreislaufs an der Forschungsstation Wagna (Auswertung und Ergebnisse) .....                      | 35 |
| Parametrisierung hydraulischer Funktionen zur Modellierung des Wassertransports in der ungesättigten Bodenzone ..... | 43 |
| Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala – ein Modellvergleich .....             | 47 |
| Regionale Modellierung des Wasser- und Stoffkreislaufes .....  | 51 |
| Langfristige Stoffdynamik in kleinen Wassereinzugsgebieten – Messkonzept und Ergebnisse .....                        | 55 |
| Messdatenerfassung im agrarwirtschaftlichen und hydrogeologischen Umfeld .....                                       | 60 |
| Wasser- und Stoffbilanzen aus den Lysimetern in Wagna .....  | 62 |
| Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Feldmessungen – ein Vergleich mit Lysimeterergebnissen .....         | 64 |
| Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven .....                                    | 66 |
| Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala – ein Modellvergleich .....             | 68 |
| Ergänzung zur Exkursion: Der Großparzellenversuch Wagna und dessen Bewirtschaftung (1987 – 2003) .....               | 70 |

## Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| <b>Abb. 1.</b> Aufgaben des Gewässerkundlichen Dienstes .....   | 10 |
| <b>Abb. 2.</b> Hydro-meteorologische und bodenphysikalische Messeinrichtungen sowie Probenahmesysteme am landwirtschaftlichen Versuchsfeld in Wagna (FANK & VON UNOLD, 2007 – verändert) .....  | 15 |
| <b>Abb. 3.</b> Deformation der Wägezelle unter Last .....   | 19 |
| <b>Abb. 4.</b> Aufbau Wägezelle und Stahlträger .....   | 20 |
| <b>Abb. 5.</b> Pumpenregulierung der Bodenwasserspannung im AGROLY .....  | 21 |
| <b>Abb. 6.</b> Fernanbindung von Datenlogger und Sensoren über Internet .....   | 22 |
| <b>Abb. 7.</b> Übersicht über die Module der ZrDB .....   | 25 |
| <b>Abb. 8.</b> Matrixpotenzialverläufe für zwei Trockenstandorte a) Tensiometer-Werte Raasdorf (FREYER et al., 2005). b) Watermark-Werte – Groß-Enzersdorf (SOKOL, 2008) .....  | 29 |
| <b>Abb. 9.</b> Lysimeteranlage Dedelow .....  | 32 |
| <b>Abb. 10.</b> Kolmatierte und regenerierte Sinterplatten .....  | 33 |
| <b>Abb. 11.</b> Wasserdurchlässigkeitsmessung .....   | 33 |
| <b>Abb. 12.</b> Hydraulische Leitfähigkeit der Zinn-Bronze-Sintermetallplatten .....  | 33 |
| <b>Abb. 13.</b> Beziehung aus Druckhöhe und Abfluss aus dem Lysimeter .....   | 33 |
| <b>Abb. 14.</b> Sickerwasserabfluss aus den Lysimetern .....  | 34 |
| <b>Abb. 15.</b> Parameter der Wasser (blau)- und Stoffbilanzgleichung (rot) für ungesättigten vertikalen Fluss und Transport auf einem ebenen Standort für einen beliebigen Zeitschritt (Erläuterungen der Abkürzungen im Text) ..... | 36 |
| <b>Abb. 16.</b> Ablaufdiagramm zur Ermittlung der Wasserkreislaufparameter aus den Wiegedaten von Präzisionslysimetern .....  | 37 |
| <b>Abb. 17.</b> Tagesauswertung des organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeters vom 10.07.2006 .....   | 39 |

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| <b>Abb. 18.</b> | Wasserbilanzparameter des Lysimeters auf der organisch-biologisch bewirtschafteten Parzelle am Versuchsfeld Wagna im Zeitraum 01.01.2005 bis 31.12.2007 .....   | 39 |
| <b>Abb. 19.</b> | Vergleich der Summenkurven der berechneten Gras-Referenzverdunstung (c. ET <sub>0</sub> ) nach ALLEN et al. (2006) mit der gemessenen Gesamtverdunstung (c. ET <sub>c</sub> ) aus dem Gras-Lysimeter bei unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen ..... | 40 |
| <b>Abb. 20.</b> | Vergleich der Summenlinien der Verdunstungskomponenten Evaporation, Transpiration und potentielle Pflanzenverdunstung in der Vegetationsperiode 2007 bei Mais auf unterschiedlichen Standorten .....  | 41 |
| <b>Abb. 21.</b> | Massenbilanz für Bromid im Rahmen eines Markierungsversuchs am organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeters basierend auf der aus den Gewichtsmessungen abgeleiteten Wasserbilanz .....   | 41 |
| <b>Abb. 22.</b> | Beispiel für die Anpassung von 14 verschiedenen Funktionstypen an Datensatz 2432 der UNSODA Datenbank .....   | 44 |
| <b>Abb. 23.</b> | Mit dem vereinfachten Verdunstungsverfahren nach Schindler (1980) ermittelte Messdaten für die Retentionsfunktion und Verdunstungsfunktion eines Schluffs, sowie an die Daten angepasstes parametrisches Modell (nach PETERS und DURNER, 2008 b) .....          | 45 |
| <b>Abb. 24.</b> | Simulierte und gemessene kumulierte Sickerwassermengen für den gesamten Simulationszeitraum .....   | 48 |
| <b>Abb. 25.</b> | Mittelwerte der täglichen Sickerwasserflüsse über den gesamten Simulationszeitraum von 50 Jahren für das Klimaszenario S2 .....   | 49 |
| <b>Abb. 26.</b> | Lage des Projektgebietes .....  | 53 |
| <b>Abb. 27.</b> | Wasserflüsse im Boden eines Hydrotops in zeitlicher und räumlicher Dynamik .....  | 53 |
| <b>Abb. 28.</b> | Mittlere Grundwasserneubildung (GWNb) auf den Agrarflächen eines Teilgebietes des Unteren Murtals für den Zeitraum 1.1.1993-31.12.2006 .....  | 54 |
| <b>Abb. 29.</b> | Messebenen .....  | 56 |
| <b>Abb. 30.</b> | Messschacht Straubing .....   | 56 |
| <b>Abb. 31.</b> | Lage der Messgebiete in Bayern .....  | 57 |
| <b>Abb. 32.</b> | Sulfat-Schwefel-Bilanz der Jahre 1988 – 2005 im Untersuchungsgebiet Fichtelgebirge/ Lehstenbach .....   | 58 |
| <b>Abb. 33.</b> | Jahresverlauf 2003 der Wasserhaushaltsparameter im Untersuchungsgebiet Bayerischer Wald Nationalpark/ Markungsgraben .....  | 58 |
| <b>Abb. 34.</b> | Vergleich der im Lysimeter gemessenen mit aus bodenhydrologischen Messungen berechneten Sickerwasserraten .....   | 64 |

## Tabellenverzeichnis

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| <b>Tab. 1.</b> | Zusammenstellung der unteren Randbedingungen .....  | 29 |
| <b>Tab. 2.</b> | Tagessummen der Grundwasserneubildung am Gras-Referenzlysimeter der Forschungsstation Wagna im Jahr 2007 mit Monats- und Jahressummenwerten und grafischer Darstellung der Tageswerte .....   | 38 |
| <b>Tab. 3.</b> | Zusammenfassender Modellvergleich (++ sehr gut, + gut, 0 keine Angabe möglich, - mäßig, -- schlecht, ↑ hoch, → mittel, ↓ niedrig) .....   | 50 |
| <b>Tab. 4.</b> | Versuchsplan 1 - 1987 bis 1997 .....  | 71 |
| <b>Tab. 5.</b> | Versuchsplan 2 - 1998 bis 2003 .....  | 72 |
| <b>Tab. 6.</b> | Ertragsergebnisse in kg/ha Kornertrag im Versuchsplan 1: GD für den Vergleich aller Körnermaisvarianten 413 kg/ha <sup>**</sup> ; GD für den Vergleich von KM3 und KM6 (Mais in Monokultur und in Fruchtfolge) 620 kg/ha <sup>**</sup> (EBERDORFER, 1998) ..... | 73 |
| <b>Tab. 7.</b> | Ertragsergebnisse in kg/ha im Versuchsplan 2: GD 5 % für die Mittelwerte der Bewirtschaftungsvarianten von Körnermais über alle Jahre: 399 kg/ha (Statistische Berechnungen mit: PLABSTAT Version 20; PFERSCHER, 2006) .....                                    | 73 |

# **Zielsetzungen und Vorgangsweise bei der Erhebung des Wasserkreislaufes und seiner Parameter**

Wolfgang Gattermayr

Amt der Tiroler Landesregierung  
Sachgebiet Hydrographie und Hydrologie  
Herrengasse 1-3  
A-6020 Innsbruck

## **Zusammenfassung**

Der Hydrographische Dienst in Österreich arbeitet seit mehr als 100 Jahren an der Erfassung des Wasserkreislaufes. Der organisatorische 3-Standbeine-Ansatz (Hydrographisches Zentralbüro/Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft – hydrographische Landesabteilungen – Beobachter) war seit jeher das bewährte Erfolgsrezept, bei dem auch der Beobachter vor Ort eine bedeutende Rolle spielt. Er beobachtet das Messgerät an der Messstelle und kontrolliert die Funktionstüchtigkeit der automatisierten Zusatzmesseinrichtungen. Der Betrieb von Handmessgeräten und die Durchführung von Augenbeobachtungen sind auch in einem modernen Messnetzkonzept unverzichtbare Einrichtungen.

## **Einleitung**

Die Erhebung des Wasserkreislaufes war in Österreich seit jeher Aufgabe des Hydrographischen Dienstes, der in den Jahren 1893/94 gegründet wurde.

War es über achtzig Jahre lang das Organisationsstatut (SCHREIBER, 1994), das die Aufgaben des Hydrographischen Dienstes regelte, so wurde dieses im Jahre 1979 (NOBILIS, 2000) mit Inkrafttreten des 58. Bundesgesetzes über die Erhebung des Wasserkreislaufes vom „Hydrographiegesetz“ abgelöst.

Mit der Wasserrechtsgesetz-Novelle 2003 wurden die grundlegenden Inhalte des Hydrographiegesetzes im siebenten Abschnitt „Erhebung des Zustandes von Gewässern – Wasserkreislauf und Wassergüte (Hydrographie)“ in das Wasserrechtsgesetz aufgenommen.

## **Gesetzlicher Auftrag**

Die 478. Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Erhebung des Wasserkreislaufes in Österreich (Wasserkreislaufferhebungsverordnung – WKEV) – ausgegeben am 14. Dezember 2006 – enthält nähere Bestimmungen zum Messnetz, zum sachlichen und räumlichen Geltungsbereich, zum Thema Daten sowie Regelungen betreffend die Beobachtung und Messung des Wassers über, auf und unter der Erdoberfläche.

Der sachliche Geltungsbereich erstreckt sich auf

1. das Oberflächenwasser
2. das unterirdische Wasser
3. die Quellen
4. den Niederschlag
5. die Verdunstung
6. die Feststoffe in den Gewässern
7. die Temperatur von Luft und Wasser
8. die Eisbildung in den Gewässern und im Hochgebirge sowie
9. die den Wasserkreislauf beeinflussenden oder durch ihn ausgelösten Nebenerscheinungen.

## Organisation

Die Organisation des Hydrographischen Dienstes gleicht seit seiner Gründung vor mehr als 100 Jahren dem Aufbau einer Pyramide.

- I. Das Hydrographische Zentralbüro im Ministerium des Inneren, heute: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII-Abteilung 3-Wasserhaushalt (Hydrographisches Zentralbüro)
- II. Die hydrographischen Landesabteilungen
- III. Die in den Ländern zu bestellenden Hilfsorgane für die Beobachtungen (die Messstellenbeobachter vor Ort).

Auf diesen 3 Standbeinen fußt auch heute noch die Organisation und das hydrographische Messwesen in Österreich.

## Messnetz und Beobachtung

Das staatliche Messnetz setzt sich aus dem Basismessnetz und dem Sondermessnetz zusammen. Zur Erstellung detaillierter Wasserbilanzen in deren räumlicher und zeitlicher Variabilität sowie zum Nachweis von natürlichen oder vom Menschen verursachten Änderungen des Wasserkreislaufes dient das Basismessnetz mit seinen ortsfesten Messstellen. Hierfür sieht die WKEV den Einsatz registrierender Messsysteme vor, die die Wasserkreislaufparameter zeitlich hochauflösend erfassen.

Die ergänzende Ausstattung der Messstellen des Basismessnetzes mit Datenfernübertragungseinrichtungen – sei es für den Zweck der raschen Datenübermittlung oder der Fernüberwachung – deckt sich ebenfalls mit den Intentionen der WKEV.

Automatisierte Registriereinrichtungen stellen aber jeweils nur Zusatzeinrichtungen an einer Messstelle dar, die primär mit Messgeräten ausgestattet werden muss, mit denen regelmäßige Kontrollmessungen bzw. Überprüfungen der Sensorik zu erfolgen haben. Diese Messgeräte wie Ombrometer, Lattenpegel, Stationsthermometer und dergleichen, die vom Beobachter vor Ort abgelesen werden und auf die die Registriergeräte einzustellen sind, gelten als das Kernstück fast einer jeden hydrographischen Messstelle.

Für Planungs- und Versuchszwecke oder zur Erreichung bestimmter wasserwirtschaftlicher Ziele können auch Sondermessnetze eingerichtet werden.

Die Bearbeitung der Beobachtungs- und Messwerte erfolgt weitgehend durch Personal des Hydrographischen Dienstes.

Damit österreichweit eine einheitliche Datenprüfung, Plausibilisierung und Bearbeitung gewährleistet ist, bedarf es allgemeingültiger Richtlinien, die auch immer wieder zu überarbeiten sind (NOBILIS, 2000). Unter Federführung des Hydrographischen Zentralbüros wurden unter Mitwirkung von Vertretern der hydrographischen Landesdienste, der via donau und zum Teil externer Experten verschiedene Anleitungen und Richtlinien erstellt, wie die Anleitungen über den Grundwasserstand und die Grundwassertemperatur für die Beobachtung und für die Aufbereitung der Daten (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 1989 a und b), für die Vorprüfung von Niederschlagsregistrierungen (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 1992 b), für die Bearbeitung von meteorologischen Parametern zur Erfassung des Wasserkreislaufes im Rahmen des Hydrographischen Dienstes in Österreich (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 1992 a und 1996), für die Messungen an Pegeln oberirdischer Gewässer (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 2001) und für die Beobachtung und Messung von meteorologischen Parametern (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 2007).

Ein Leitfaden für die Erfassung des Schwebstofftransportes steht kurz vor der Fertigstellung (HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO, 2008, in Vorbereitung).



## Literatur

- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (1989 a): Grundwasserstand-Richtlinie für die Beobachtung und Aufbereitung der Daten, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (1989 b): Grundwassertemperatur-Richtlinie für die Beobachtung und Aufbereitung der Daten, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (1992 a): Anleitung zur Beobachtung und Messung von meteorologischen Parametern zur Erfassung des Wasserkreislaufes im Rahmen des Hydrographischen Dienstes von Österreich, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (1992 b): Interne Richtlinie für die Vorprüfung von Niederschlagsregistrierungen, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (1996 a): Anleitung zur Bearbeitung von meteorologischen Parametern zur Erfassung des Wasserkreislaufes im Rahmen des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (2001): Richtlinie für Messungen an Pegeln oberirdischer Gewässer, Wien.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (2007): Anleitung zur Beobachtung und Messung von meteorologischen Parametern.
- HYDROGRAPHISCHES ZENTRALBÜRO (2008): Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes, Wien (in Vorbereitung).
- NOBILIS, F. (2000): Der Hydrographische Dienst in Österreich im 21. Jahrhundert. – Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 79, S 1-24, Wien 2000.
- SCHREIBER, H. (1994): Der Hydrographische Dienst in Österreich – Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. – Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 67, Wien.

# Der Gewässerkundliche Dienst in Bayern

Wolfgang Sprenger

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT  
Referat 83 – Hydrologie des Grundwassers  
Hans-Högn-Str. 12  
D-95030 Hof/Saale

## Zusammenfassung

Der Gewässerkundliche Dienst existiert in Bayern seit der Gründung des Hydrotechnischen Bureaus im Jahr 1898. Am Bayerischen Landesamt für Umwelt umfasst der Gewässerkundliche Dienst die Beobachtung des gesamten Wasserkreislaufs, vom Niederschlag über Bodensickerwasser und Grundwasser bis zum Abfluss. Neben diesen quantitativen Aspekten ist hier auch das Monitoring bezüglich Qualität der Fließgewässer und Seen sowie des Grundwassers angesiedelt. Es wird ein Überblick gegeben über den aktuellen Aufgabenzuschnitt, das Messwesen (inkl. Messnetze) und gewässerkundliche Auswertungen. Im Ausblick wird Bezug genommen auf aktuelle Entwicklungstendenzen und zukünftige Herausforderungen. Hier sind v. a. die EG-Wasserrahmenrichtlinie und der Klimawandel zu nennen.

## Einführung

Das landesweite Monitoring der Wasserwirtschaft wird in Bayern durch den Gewässerkundlichen Dienst durchgeführt. Wesentliches Ziel ist die quantitative Beschreibung des Wasserhaushalts sowie die Bewertung anthropogener Einflüsse im Hinblick auf eine nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Wasserressourcen. Im Einzelnen befasst sich der Gewässerkundliche Dienst mit den nachfolgend aufgeführten und in Abb. 1 dargestellten Teilaufgaben:

- Ermittlung von Wasser- und Stoffflüssen
- Untersuchung hydrologischer Prozesse
- Weiterentwicklung der Monitoring-Methoden
- Erstellung von Fachgutachten zu hydrologischen Fragestellungen
- Datenhaltung und -bereitstellung für die Öffentlichkeit und das Fachpublikum
- Datenaustausch mit nationalen und internationalen Umweltverwaltungen

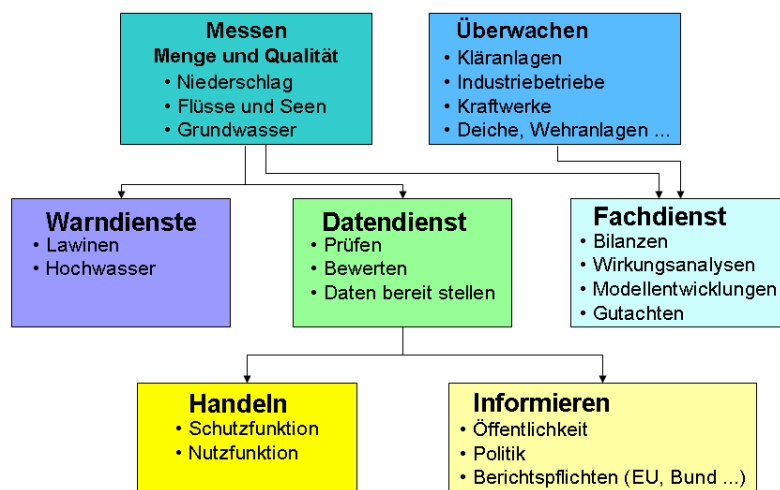


Abb. 1. Aufgaben des Gewässerkundlichen Dienstes

## **Landesmessnetze – Aufgaben, Instrumente, Produkte**

### **Hydrometeorologie**

Die Hydrometeorologie befasst sich mit dem Kreislauf des Wassers in der Atmosphäre und insbesondere mit der Verdunstung, dem Wasserdampftransport und dem Niederschlag. Dabei ist der Niederschlag der zentrale Parameter, da er im Wasserhaushalt den betragsmäßig größten Anteil einnimmt und die gewässerkundlichen Arbeitsfelder im gesamten Skalenbereich zwischen Trockenheit (Niedrigwasser) und Starkregen (Hochwasser) maßgeblich beeinflusst.

Der große Bedarf an zeitlich hoch aufgelösten Niederschlagsdaten erforderte eine Erneuerung des bestehenden Messnetzes, weshalb in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) ein automatisches Niederschlagsmessnetz (Messnetz 2000-Standard) errichtet wird, um aktuelle sowie genaue Niederschlagsintensitäten von repräsentativen Standorten mit schneller Verfügbarkeit zu bekommen. Derzeit sind 287 von 326 Stationen im operationellen Abrufbetrieb. Weitere Niederschlags- und Klimadaten in allerdings geringerer zeitlicher Auflösung werden aus Fremdmessnetzen bezogen.

Die hoch aufgelösten Daten geben einen Überblick über das aktuelle Niederschlagsgeschehen, dienen der Aneichung von Wolkenradarmessungen, gehen in die Vorhersagemodelle bei den Wetterdiensten und Hochwasservorhersagezentralen ein (Niederschlags-, Schneeschmelz- und Hochwasservorhersage, Speichersteuerung) und werden für gewässerkundliche Auswertungen genutzt (z. B. Ereignis-, Monats- und Jahresberichte).

Es besteht weiterer Bedarf an hoch aufgelösten hydrometeorologischen Daten, da zunehmend Wasserhaushaltsmodelle in der Hochwasservorhersage und bei der Klimafolgenbetrachtung zur Anwendung gelangen. Neben dem Bezug von zusätzlichen Klimadaten aus Fremdmessnetzen, sind auch eigene Messnetzerweiterungen vorgesehen. Für eine bessere Aneichung der Schneeschmelzvorhersagen werden auch noch weitere Stationen mit einer automatischen Schneeerfassung (Gesamtschneehöhe, Wasseräquivalent) installiert. Daneben soll der Zugriff, die Qualität und die Aufbereitung hydrometeorologischer Daten weiter verbessert werden.

### **Quantitative Hydrologie der Fließgewässer**

Zentrale Aufgabe der Gewässerkunde an den Fließgewässern ist die Kenntnis der hydrologischen Basisdaten – Wasserstand und Abfluss. Sie sind nicht nur für sämtliche Planungsleistungen in der Wasserwirtschaft, sondern auch für ein Hoch- und Niedrigwassermanagement von außerordentlicher Bedeutung. Ziel ist eine langjährige lückenlose Erfassung des Abflussgeschehens – vom Niedrigwasser bis zum Hochwasser – an den rund 600 gewässerkundlichen Pegeln mit möglichst geringem Aufwand, hoher Zuverlässigkeit und hydrologischer Qualität. Dazu setzt man in Bayern verstärkt auf den Einsatz neuer Technologien in der Datengewinnung von Wasserstand und Abfluss. Im Mittelpunkt stehen dabei Messmethoden, die eine kontinuierliche Aufzeichnung des Wasserstandes und der Fließgeschwindigkeit und somit des Abflusses ermöglichen. Eingesetzt werden derzeit neben den altbekannten Druckpegeln vor allem Radar- und Ultraschallsysteme. Die traditionellen Messflügel werden immer mehr von Ultraschall-Doppler-Systemen (z. B. ADCP, Q-Liner) abgelöst. Auch hydraulische Verfahren (z. B. SIMK) kommen immer mehr zur Anwendung. Zudem wurden seit dem Jahr 2000 nahezu alle Pegel (95 %) mit Datensammler und Datenfernübertragung ausgestattet. Durch diese Investitionen und Entwicklungen stehen die Daten der quantitativen Gewässerkunde in Bayern dem Bürger online zur Verfügung.

Neben Wasserstand und Abfluss wird an rund 70 Messstellen die Wassertemperatur und an rund 40 Pegeln der Schwebstoffgehalt der Fließgewässer ermittelt. Beide Messnetze werden derzeit einer Revision unterzogen und an neue Fragestellungen – v. a. EG-WRRL, Niedrigwasserinformationsdienst und Wärmelastplanungen – angepasst.

### **Beschaffenheit der Fließgewässer und Seen**

Zur Beobachtung der Qualität von Fließgewässern und Seen werden chemisch-physikalische und biologische Untersuchungen durchgeführt. Im Zuge der Umsetzung der EG-WRRL fand 2006 eine Neuordnung der landesweiten Untersuchungsprogramme statt. Das Biomonitoring berücksichtigt alle geforderten Biokomponenten (Makrozoobenthos, Makrophyten/Phytobenthos, Phytoplankton

und Fische). Untersucht werden ca. 850 Oberflächenwasserkörper und somit alle Fließgewässer mit Einzugsgebieten > 10 km<sup>2</sup> und alle Seen mit EZG > 50 ha. Pro Fließgewässerkörper gibt es eine repräsentative Messstelle, die mindestens im dreijährlichen Turnus untersucht wird. Pro Seewässerkörper gibt es eine Messstelle im Freiwasser und je nach Art und Größe des Sees mehrere Messstellen im Uferbereich (Transekte). Für einige Biokomponenten, z. B. Fische, sind für eine belastbare Bewertung mehrere Untersuchungsjahre erforderlich. An größeren Gewässern sind zusätzlich automatische Messstationen installiert.

Die neu entwickelten biologischen Bewertungsverfahren sind grundsätzlich modular aufgebaut, d. h. unterschiedliche Module liefern Aussagen bzw. Bewertungen für spezifische Belastungssituationen. Nährstoffbelastungen werden mittels Phytoplankton und Makrophyten/Phytobenthos bewertet, Belastungen durch leicht abbaubare organische Stoffe mittels Makrozoobenthos (Saprobiemodul), Belastungen in Zusammenhang mit hydromorphologischer Degradation mit Fischen und Makrozoobenthos (Modul „Allgemeine Degradation“). Regional bzw. auf spezielle Gewässerstrecken beschränkt sind Belastungen aus dem Bereich Versauerung.

Die Beurteilung der chemischen Belastung konzentriert sich auf die prioritären Stoffe in Oberflächenwasserkörpern unterhalb potenzieller Einleiter. Zur Bewertung spezifischer Schadstoffe werden die in der Bayerischen Gewässerbestandsaufnahme- und Zustandseinstufungsverordnung genannten Stoffe und Qualitätsnormen herangezogen, und zwar für den Großteil der Stoffe auf einer Überblicksebene mit ca. 20 Messstellen für Bayern. Für diffus eingetragene Stoffe (Schwermetalle, Pflanzenschutzmittel) werden weitere Programme durchgeführt.

Neben den Untersuchungen nach EG-WRRL werden landesweit weitere Untersuchungen durchgeführt (z. B. Screenings auf „neue“ Schadstoffe wie perfluorierte Tenside oder Arzneimittel).

## **Hydrologie des Grundwassers**

Der Landesgrundwasserdienst-quantitativ muss für staatliche Planungs- und Überwachungstätigkeiten und zur Weitergabe an nichtstaatliche Stellen Daten über Grundwasserstände und Quellschüttungen kontinuierlich sammeln, aufbereiten und bereitstellen. Für diese Aufgabe wurde das Landesmessnetz Grundwasserstand neu geordnet. Ungeeignete Grundwassermessstellen (GWM) wurden ausgemustert und seit 1992 rund 330 GWM – überwiegend in tieferen Aquiferen – neu gebaut. Ca. 70 GWM sind bis 2010 noch neu zu bauen. Das Landesmessnetz Quellen in den Teilen Bayerns ohne zusammenhängende regional bedeutsame Grundwasserleiter – wie dem Kristallin des Bayerischen und Oberpfälzer Waldes, dem Gipskeuper in Mittel- und Unterfranken sowie dem voralpinen Moränengürtel und alpinen Raum – befindet sich im Neuaufbau.

Die Wasserwirtschaftsverwaltung betreibt gegenwärtig rund 2000 Messstellen im Landesmessnetz (Grundnetz) Grundwasserstand, in Verdichtungsnetzen und Sondernetzen sowie im Landesmessnetz Quellen. Das mit rund einer Messstelle auf 100 km<sup>2</sup> weitmaschige Grundnetz zur Dauerbeobachtung erfasst alle wasserwirtschaftlich bedeutsamen Grundwasserleiter Bayerns. Das Grundnetz Grundwasserstand ist nahezu komplett mit Datensammlern ausgestattet. Ein Teil der GWM in Südbayern sind für den Online-Dienst „Aktuelle Grundwasserstände“ mit Datenfernübertragung ausgerüstet. Zielrichtung dieses Messnetzes ist die zeitnahe Information des Bürgers über hohe Grundwasserstände in den Talaquiferen und demzufolge die Gefährdungslage besiedelter Bereiche.

Der Landesgrundwasserdienst-qualitativ stellt analog Daten zur Grundwasserbeschaffenheit zur Verfügung und bereitet sie in diversen Berichten auf. Aktuell sind rund 500 Messstellen (rund eine Messstelle auf 140 km<sup>2</sup>) in Beobachtung, davon ca. 40 % Brunnen, ca. 30 % GWM und ca. 30 % Quellen vorwiegend aus der Wasserversorgung. Es werden Basismessstellen für das Monitoring der weitgehend natürlichen Grundwasserbeschaffenheit und Trendmessstellen für das Monitoring zivilisationsbedingter Veränderungen unterschieden. Die Überwachung konzentriert sich auf das oberflächennahe Grundwasserstockwerk (ca. 90 % der GWM), die übrigen GWM erfassen tiefere Aquifere. Das Messnetz wurde deutlich erweitert, um alle wasserwirtschaftlich bedeutsamen Grundwasserleiter zu repräsentieren. Zusätzliche Auswahlkriterien waren Belastungstyp (Hintergrund, Landnutzung, integrierende Einzugsgebiete), Trinkwasserschutz und Messstellentyp.

Für das überblicksweises Monitoring des mengenmäßigen Grundwasserzustands nach EG-WRRL wurde eine Auswahl von 230 Messstellen aus dem Landesmessnetzen Grundwasserstand und Quellen getroffen. Ein operatives Grundwassermonitoring ist nach aktueller Datenlage nicht vorgesehen. Für die überblicksweises Überwachung des chemischen Zustands wird das komplette Landesmessnetz Grundwasserbeschaffenheit herangezogen. In den gefährdeten Grundwasserkörpern (ca. 25 % der GWK) ist zusätzlich eine operative Überwachung vorgesehen, die auf die Maßnahmenprogramme abzustimmen ist.

Medienübergreifende, integrative Fragestellungen werden in den sieben Typgebieten des Messnetzes Stoffeintrag–Grundwasser behandelt. Hier sind u. a. der Transport und die Mobilisierung von Nährstoffen, Säurebildnern und Schwermetallen, die Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasser, Abfluss, Grundwasserneubildung und Stoffaustrag sowie Stoffumsatz und Belastungsrisiken in Trinkwassereinzugsgebieten zu nennen (siehe Vortrag J. BITTERSOHL & N. FOULLOIS).

## **Ausblick – Aktuelle Themen**

Dem Klimawandel wird momentan in einer Reihe von Aktivitäten Rechnung getragen. Im Projekt KLIWA wird ein Klima-/Langzeitmonitoring zur Dokumentation möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt eingerichtet. In diesem Zusammenhang wurden und werden u. a. Untersuchungen zum Langzeitverhalten der Niederschläge, der Hoch-/Mittel-/Niedrigwasserabflüsse und der Grundwasserstände und Quellschüttungen durchgeführt. Ziel ist die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Anpassung an den Klimawandel, z. B. bei Hochwasser (HW-Sicherheitszuschlag) oder für die Wasserversorgung. Weitere fachspezifische Fragestellungen sind die Entwicklung der Grundwasserneubildung und die Einwanderung von Neobiota in die bayerischen Gewässer unter sich verändernden klimatischen Bedingungen.

Um Informationen zur Oberflächenwasser- und Grundwassersituation während Trockenperioden zeitnah zur Verfügung zu stellen, wird aktuell ein Niedrigwasserinformationsdienst (NID) aufgebaut. Ziel ist es, frühzeitig auf eine sich anbahnende Problemsituation bei relevanten wasserwirtschaftlichen Nutzungen (insbesondere Kühlwasserthematik, Abwassereinleitungen, Trinkwasserversorgung) aufmerksam zu machen. Neben dem quantitativen Aspekt ist auch an die Bereitstellung von Daten zur Qualität von Fließgewässern und Seen gedacht. Neben der Datenplattform für den NID wird ein Gewässerkundliches Informationssystem mit Kartendiensten aufgebaut, in dem z. B. auch die Bewertungsergebnisse nach EG-WRRL enthalten sein werden. Auch die Qualitätssicherung aller bereitgestellten Informationen soll forciert werden.

Die Messnetze für das Monitoring nach EG-WRRL wurden in Betrieb genommen. Momentan läuft eine erste Zustandsbewertung der Oberflächenwasser- und Grundwasserkörper. Anschließend wird das operative Monitoring in Abstimmung mit den künftigen Maßnahmenprogrammen festgelegt.

Weiterführende Informationen zum Gewässerkundlichen Dienst, zu fachlichen Grundlagen und Produkten sind unter <http://www.lfu.bayern.de/wasser/fachinformationen/index.htm>, Online-Daten zu Niederschlag und Hochwasser unter <http://www.hnd.bayern.de/>, Online-Daten zu Grundwasser unter [http://www.lfu.bayern.de/wasser/daten/grundwasserstand\\_messdaten/index.htm](http://www.lfu.bayern.de/wasser/daten/grundwasserstand_messdaten/index.htm) abrufbar.

# Messdatengewinnung an der Forschungsstation Wagna

Johann Fank

JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

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 wägbaren Präzisionslysimeter und einem bodenhydrologischen Messprofil ausgestattet. Ein „Gras“-Referenz-Lysimeter befindet sich an der Grenze des Versuchsgeländes von Wagna. Wetterdaten werden an der teilautomatischen Wetterstation der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, die auch auf dem Versuchsfeld platziert ist, sowie an zwei weiteren Messplätzen im Versuchsgelände erfasst. Im Jahre 2007 wurden in Ergänzung zu den beiden existierenden Grundwasserpegeln zwei neu entwickelte Probenahmestellen unter den beiden Lysimeter-Versuchspartzellen installiert. Hier wird die Grundwasserspiegellage gemessen und Wasserproben aus dem tieferen Teil der ungesättigten Zone, dem Kapillarsaum und dem Grundwasserspiegelschwankungsbereich gewonnen.

## Einleitung

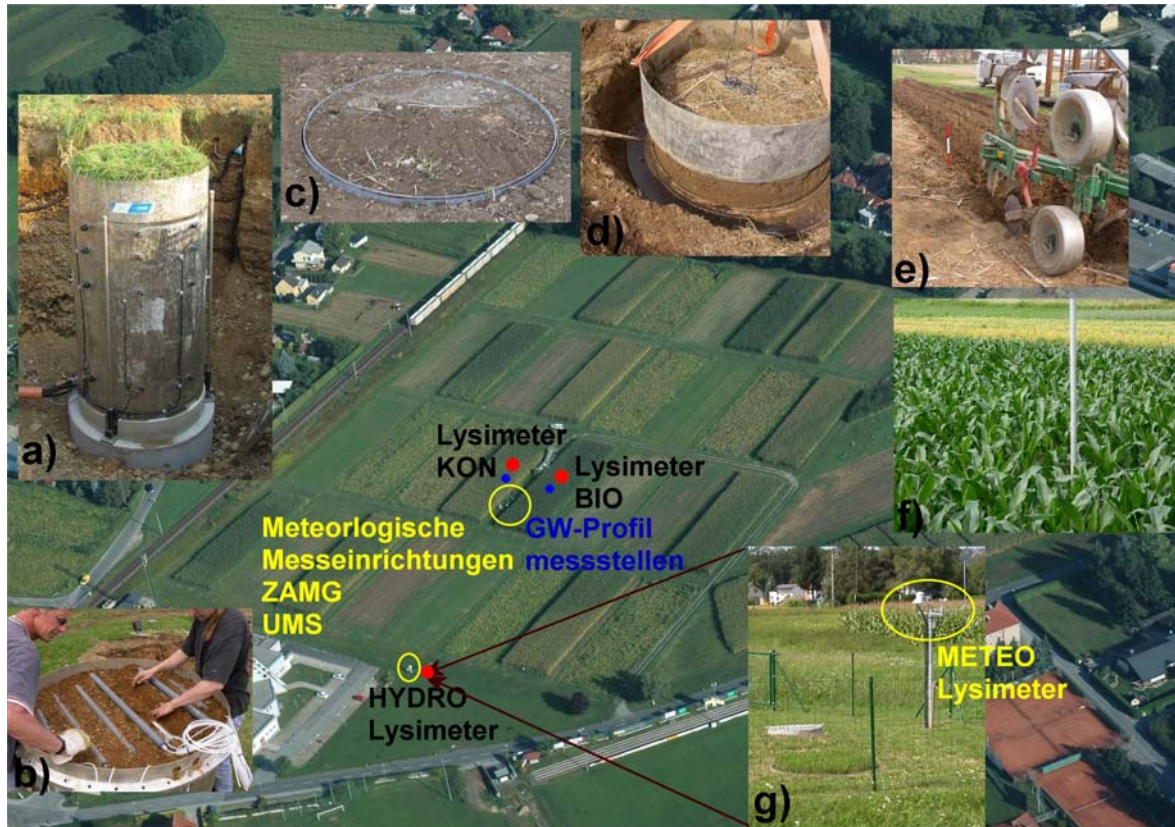
Im Jahr 1987 wurde in der Gemeinde Wagna (Steiermark, Österreich) ein Großparzellenversuch angelegt, um unter ortsüblichen Bewirtschaftungsbedingungen die Auswirkung unterschiedlicher Kulturführungen und Düngeniveaus auf die Ertragssituation untersuchen zu können. Der Feldversuch Wagna befindet sich im Grundwasserschongebiet des Leibnitzer Feldes. Das Ausgangsmaterial bildet eine silikatische Lockersedimentbraunerde auf sandig-schottrigem Terrassenmaterial. Der Tongehalt beträgt im Mittel 14,6 %, der Sandanteil 51,8 %. Der Humusgehalt schwankt zwischen 1,3 und 2,2 %. Die Mächtigkeit des Feinbodens reicht von 25 cm bis 150 cm und mehr. In Summe handelt es sich um leichte Böden mit geringem Wasserspeichervermögen. Das Versuchsfeld ist in sich sehr heterogen und es wechseln Trockenklemmen mit tiefgründigen Stellen im engen Raum. Hinsichtlich der Bodenartenverteilung und auch der Gründigkeit ist das Versuchsfeld repräsentativ für große Teile der quartären Schotterterrassen des Murtales. Der Grundwasserspiegel des seichtliegenden gering mächtigen Aquifers liegt im Mittel in einer Tiefe von etwa 4 m und weist eine Spiegelschwankung von ca. 1,5 m auf. Der Grundwasserstauer in Form von sehr schlecht bis undurchlässigen Sedimenten des Neogens liegt in einer Tiefe von etwa 8 m.

Im Jahr 1991 wurde als Reaktion auf die steigenden Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Murtal-Aquifers auf dem landwirtschaftlichen Versuchsgelände von Wagna eine Forschungsstation errichtet, an der der Wasser- und Stofffluss von der Atmosphäre über das Boden-Pflanze-Kontinuum und die wasserungesättigten Sande- und Kiese bis in das Grundwasser umfassend untersucht wurde (siehe beispielsweise FANK, 1999). Im Jahre 2004 wurde die Bewirtschaftung des Versuchsfeldes vollständig umgestellt. Ziel der derzeitigen Versuchsanlage ist es, einen Vergleich der Auswirkungen von ackerbaulichen Maßnahmen einer konventionellen Bewirtschaftung unter Befolgung der Maßnahmen des Gewässerschutzprogramms mit jenen der organisch biologischen Bewirtschaftung auf das Grundwasser unter dem Aspekt einer ökonomischen Verträglichkeit versuchstechnisch zu ermöglichen. Wie aus der wissenschaftlichen Literatur eindeutig nachvollzogen werden kann, sind Messungen zur Erfassung der Sickerwassermenge und der Stofffrachten in Richtung Grundwasser immer fehlerbehaftet. Die Werkzeuge zur Prognose der Auswirkungen von Maßnahmen werden aber an derartigen Messdaten geeicht. Dies bedeutet aber auch, dass die Modellergebnisse umso weniger Fehler aufweisen, je besser die gemessenen Daten den „wahren“ Verhältnissen entsprechen. Es war – gerade in Bereichen, in denen Prognosen mit immer größerer Genauigkeit gefordert werden – notwendig, innovative Messeinrichtungen zu entwickeln und zu implementieren, um Messungenauigkeiten zu minimieren.



## Messeinrichtungen zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern und zur Probengewinnung am Versuchsfeld Wagna

In Abb. 2 ist das Versuchsfeld Wagna mit den 32 je etwa 1000 m<sup>2</sup> großen Versuchsparzellen und die Lage der Messeinrichtungen zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern und zur Grundwasser-Probennahme dargestellt. Die eingebildeten Bilder a) bis f) zeigen Details der monolithischen Feldlysimeter sowie ein Detailbild (Abb. 2 g) des Standardlysimeters HYDROLYS (VON UNOLD & FANK, 2007) und der Erweiterung zur Erfassung der meteorologischen Messgrößen zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung (ALLEN et al., 1998).



**Abb. 2.** Hydro-meteorologische und bodenphysikalische Messeinrichtungen sowie Probenahmesysteme am landwirtschaftlichen Versuchsfeld in Wagna (FANK & VON UNOLD, 2007 – verändert)

### Lysimeter zur Erfassung von Wasserkreislaufparametern

Zur Erfassung von Parametern der Wasserbilanzgleichung  $P - ET - D - \Delta S = 0$  ( $P$  = Niederschlag,  $ET$  = Evapotranspiration,  $D$  = Grundwasserneubildung,  $\Delta S$  = Änderung des im Boden gespeicherten Wasservolumens) werden schon seit langem Lysimeter eingesetzt. Üblicherweise dienen sie zur Ermittlung der Sickerwassermenge, sind sie wägbar, kann auch die Verdunstung und die Änderung des gespeicherten Bodenwassers gemessen werden. Meist sind Lysimeter mit unterschiedlichen Böden in einer Lysimeterstation zusammengefasst.

Am Versuchsfeld Wagna wurden monolithisch gestochene wägbare Lysimeter in das Versuchsfeld direkt eingebaut, um Oaseneffekte möglichst zu vermeiden (Abb. 2 f). Um Messfehler aufgrund unterschiedlicher Bodenbearbeitungsart zu minimieren, wurden die Lysimeter mit einem abnehmbaren Bewirtschaftungsring ausgestattet (Abb. 2 d), wodurch die Bearbeitung mit ortsüblichen Geräten auf gewohnte Weise durchgeführt werden kann (Abb. 2 e). Aufgrund des nur etwa 0,5 cm breiten Ringspalts (Abb. 2 c) zwischen dem Lysimeterkörper und dem äußeren Lysimeterzylinder können atmosphärische Einflüsse auf die Bodentemperatur weitgehend vermieden werden. Üblicherweise verwendete Filterkörper an der Unterseite des Lysimeters verfälschen den natürlichen Wasserfluss in der ungesättigten Zone. Zur Vermeidung dieser Unsicherheiten wurde

die Lysimeterunterseite in Form eines Saugkerzenrechs (Abb. 2 b) ausgebildet. An diese Saugkerzen wird der in einem ungestörten Bodenprofil gemessene Druck in seinem zeitlich variablen Verlauf als Saugspannung angelegt.

Die beiden im Versuchsfeld angelegten Lysimeter weisen bei einer Oberfläche von 1 m<sup>2</sup> eine Tiefe von 2 m auf. Die Unterkante des Lysimeters liegt damit bei den am Versuchsfeld Wagna herrschenden Verhältnissen deutlich unterhalb der hydraulischen Wasserscheide. Dadurch ist gewährleistet, dass an dieser nur noch vertikale Flüsse in Richtung Grundwasser auftreten. Das HYDRO-Lysimeter im Grünlandbereich am Rande des Versuchsfeldes (Abb. 2 g) weist nur eine Tiefe von 1 m auf. Um die hier möglicherweise auch vertikal nach oben gerichteten Flüsse abbilden zu können, wird die Steuerung des angelegten Unterdruckes mittels einer bidirektionalen Vakuumpumpe durchgeführt, die bei höheren Saugspannungen im Lysimeter (im Vergleich zum Freiland) auch Wasser in das Lysimeter zurück fördern kann.

Die beiden Lysimeter auf den unterschiedlich ackerbaulich bewirtschafteten Versuchsflächen sind in Abstimmung mit den unterschiedlichen Bodenhorizonten mit zusätzlichen Sensoren zur Erfassung der Bodentemperatur, des Bodenwassergehaltes (TDR-Sonden) und des Matrixpotentials (Tensiometer und SIS-Sensoren) ausgestattet. Die gleichen Parameter werden in denselben Tiefen auch in einem bodenhydrologischen Messprofil im durch die Errichtung der Anlage ungestörten Bodenprofil erfasst (Abb. 2 a).

### **Meteorologische Messeinrichtungen**

Seit November 2003 betreibt die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) am Versuchsfeld Wagna eine teilautomatische Wetterstation. Der Datensammler dieser Wetterstation ist mit dem Rechner in der Forschungsstation Wagna online geschaltet, die Minutenmittelwerte bzw. -summen der beobachteten Parameter werden dort gespeichert und dienen zur Überprüfung der an den Wetterstationen der Lysimeter erfassten Wetterparameter.

Zur Erfassung des Niederschlags ist neben der Niederschlagswippe der ZAMG eine Niederschlagswaage des Hydrografischen Dienstes des Landes Steiermark, eine bodeneben eingebaute Niederschlagswippe von JOANNEUM RESEARCH und ein Totalisator von Umweltanalytische Messsysteme GmbH (UMS) zur manuellen Kontrolle der automatisch registrierten Niederschlagsdaten sowie zur Niederschlagsbeprobung eingerichtet. Niederschlagsdaten werden auch aus den Gewichtsmessungen der Lysimeter ermittelt.

In der Fahrgasse zwischen den beiden Lysimeterparzellen des Versuchsfeldes Wagna ist eine Wetterstation von UMS eingerichtet, an der die Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in 2 m über Gelände und die Windgeschwindigkeit in 2 und 4 m über Gelände erfasst wird. Zentral über den beiden Lysimetern in den Versuchsfeldern sind Netto-Strahlungsmessgeräte in einer Höhe von 2 m installiert.

Am METEO-Lysimeter werden die Parameter zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung nach PENMAN-MONTEITH – Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit – in einer Messhöhe von 2 m gemessen.

### **Probenahmesysteme zum Grundwassermonitoring**

Im Eingangsbereich zum Lysimeterkeller und im Bereich der meteorologischen Station in der Fahrgasse zwischen den beiden Lysimeterparzellen wurden bereits Anfang der 90er Jahre zwei Bohrungen bis in den Grundwasserstauer niedergebracht und diese als 4"-Pegel ausgebaut. Der Pegel im Eingangsbereich ist seit 2007 auch im Monitoringnetz der österreichischen Grundwasserzustandsüberwachung (GZÜ) integriert. In diesem Pegel wird die Höhenlage des Grundwasserspiegels mittels Drucksonde registriert. Der Pegel im Bereich der Wetterstation dient zur kontinuierlichen Registrierung der Grundwassertemperatur und der elektrolytischen Leitfähigkeit des Grundwassers. Aus der monatlichen Beprobung des Grundwassers und der hydrochemischen Analyse liegt eine inzwischen 15-jährige Reihe der Nitratbelastung des Grundwassers vor.

Die Auswertung von Modellberechnungen der Nitratverteilung im Grundwasser auf Basis einer sequentiellen Kopplung von Wasserfluss- und Stickstofftransportberechnung der ungesättigten Zone mit dem 2D-Grundwassermodell zeigte Unterschiede zu den Grundwasser-Messwerten. Um



die dafür möglichen Ursachen – notwendige Verbesserungen in der Modellkopplung oder detaillierte Messungen an der Schnittstelle ungesättigte und gesättigte Zone – experimentell abklären zu können, wurden im Oktober 2007 zwei Grundwasser-Profilmessstellen (Abb. 2) errichtet: In den beiden Lysimeterparzellen wurden je eine Bohrung bis zum Grundwasserstauer abgeteuft, die Bohrung von 2 m unter Gelände bis zur Endteufe mit einem Schlitzbrückenfilterrohr versehen und der Ringraum verkiest. In das Filterrohr wurde ein „Saugkerzenbaum“ eingebaut, an dessen unterem Ende ein Tensiometer sitzt. Entlang des Führungsrohres des Tensiometers wurden in Abständen von 11,5 cm Keramik-Saugkerzen angebracht und die Kapillaren sowie das Kabel zur Tensiometer-Druckaufzeichnung in einer Tiefe von 2 m unter Gelände in den Lysimeterkeller geführt. Im nächsten Schritt wurde das Filterrohr mit gesiebttem Material aus dem Bohrgut wieder unter Einarbeitung der Saugkerzen verfüllt. Nach der Verfüllung des Grubenaushubes und Wiederherstellung der ursprünglichen Bodenverhältnisse können durch diese Vorrichtung im Bereich zwischen 2 m unter Gelände und dem Grundwasserstauer in Abständen von 11,5 cm Wasserproben zur hydrochemischen Analytik entnommen werden. Im Gegensatz zu Pegelrohren stellt die Bohrung aufgrund der Wiederverfüllung keine hydraulische Störung dar, sodass durch Anlegen eines Unterdrucks an die Saugkerzen tiefenorientierte Proben aus den tieferen Bereichen der ungesättigten Zone, aus dem Grundwasserkapillarsaum, dem Grundwasserspiegel-Schwankungsbereich und dem dauernd wassergesättigten Bereich entnommen werden können. Durch das am unteren Ende des Saugkerzenbaumes installierte Tensiometer wird der darüber lagernde Wasserdruck registriert und in der automatischen Vakuumstation in variablem Intervall gespeichert. Aufgrund der Vermessung der geodätischen Höhenlage des Tensiometers werden dadurch die Grundwasserspiegellage und deren zeitliche Variabilität mit hoher Genauigkeit (0,1 cm) registriert. Dadurch ist gewährleistet, dass das Probenahmesystem in Abhängigkeit von der Änderung der Grundwasserspiegellage in der Zeit für eine etwaige Ereignisbeprobung in Betrieb genommen werden kann. Die dazu erforderliche Steuerungssoftware ist in der Vakuumsteuerung integriert.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Im Bereich der Lysimetertechnik wurde durch die Arbeiten am Versuchsfeld Wagna ein international anerkannter Standard zur Untersuchung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern geschaffen. Diese neue Lysimetertechnologie liefert bei der Präzision von Laboruntersuchungen Grundlagen für die Regionalisierung von Wasserbilanzparametern und stellt damit ein Bindeglied zwischen der Labor- und der Feldskala dar (FANK, 2008). Aufgrund seiner modularen Konzeption (VON UNOLD & FANK, 2007) sind die entwickelten Lysimeter und die Einrichtung zur tiefengestaffelten Grundwasser-Probennahme kostengünstig für eine Vielzahl von Fragestellungen einsetzbar.

## 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 S.
- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). Beiträge zur Hydrogeologie, 49/50, 101-388, Graz.
- FANK, J. (2008): Monolithic field Lysimeter – a precise tool to close the gap between laboratory and field scaled investigations. Presentation at the EGU-conference 2008, Vienna (accepted).
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. International Water & Irrigation, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.
- VON UNOLD, G. & J. FANK (2007): Modular Design of four standardized field lysimeter solutions. Water, Air & Soil Pollution: Focus (in print).

# Lysimetertechnik

Georg von Unold

UMS Umweltanalytische Mess-Systeme GmbH  
Gmunder Str. 37  
D-81379 München

## Zusammenfassung

Wie können Wasserflüsse in Böden exakt gemessen werden?

Wie können Modelle zur Grundwasserneubildung kalibriert werden?

Welche Stoffe werden im Boden wie gespeichert, umgesetzt und in welcher Menge in das Grundwasser ausgewaschen?

Um diese zentralen Fragen der Wasserwirtschaft, der Agrarforschung und der Bodenkunde zu beantworten, werden unsere monolithischen Lysimeter eingesetzt. Sie verbinden die Präzision von Laborversuchen unter Beibehaltung der natürlichen Umgebungsbedingungen.

Durch die physikalisch und zeitlich hochaufgelöste Messung des Gewichtes und des Sickerwassers können die Inputparameter bestimmt werden:

- Regen
- Tau
- Reif
- Wasseräquivalent der Schneedecke

Gewichtsverlust bedeutet:

- tatsächliche Verdunstung (ET)
- ETo bei Grasland und gesättigtem Boden - über Tensiometer gemessen
- Sickerwasserbildung. Diese wird mit einer zweiten Waage oder einem Kippzähler gemessen.

Die Kenntnis dieser Messgrößen ist für die Klimaforschung bzw. den Einfluss der Erderwärmung auf den Wasserhaushalt und Landbewirtschaftung ebenfalls von Bedeutung. Das **Meteo-Lysimeter** wurde dafür konfiguriert.

Die Wasserbilanzgleichung lässt sich vollständig lösen:  $P + I - ET - D - \Delta S = 0$

Sofern die Düngegaben protokolliert und die Sickerwässer analysiert werden, ebenso die Stoffbilanz:  $Dep + F - V - L - \Delta M = 0$

Dep = atm. Deposition

F = Düngung

V = Vegetationsentzug und gasförmige Verluste

L = Auswaschung

$\Delta M$  = Änderung des Masseinhalts

$$Dep = P \cdot Pc + I \cdot IcL = D \cdot \Delta c$$

D = Sickerwasser

P = Niederschlag

c = Stoffkonzentration

Daher eignen sich Lysimeter besonders zur Bestimmung der Grundwasserneubildung, zur Modellkalibrierung sowie für alle bodenwasserabhängigen Untersuchungen. Im Beitrag werden die dazu notwendigen Techniken im Detail vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Konstruktion, Matrixpotentialübertragung zur Definition der unteren Randbedingung und dem UMS-Stechverfahren.

# Spezielle Messtechnik für Lysimeteranlagen

Andreas Steins

UMS Umweltanalytische Mess-Systeme GmbH  
Gmunder Str. 37  
D-81379 München

## Zusammenfassung

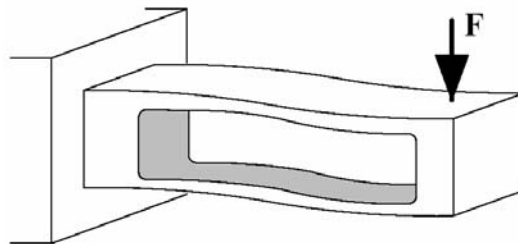
Moderne Wägemesstechnik ermöglicht die hochgenaue Messung und Bestimmung der Wasserbilanz in Lysimeterbehältern. Durch die hohe Auflösung können aufwändige und kostspielige mechanische Lösungen entfallen. Die messtechnischen Möglichkeiten beschränken sich nicht nur auf die passive Erfassung von Sensoren. Über Aktoren wie beispielsweise bidirektionale Pumpen, gesteuert über einen Messrechner oder erweiterte Datensammler, kann aktiv in das System eingegriffen werden, um Tensionen innerhalb des Lysimeterbehälters mit einem Referenzwert zu synchronisieren. Systembedingte Fehler von Lysimetern können somit minimiert werden. Per Fernanbindung kann die gesamte Anlage überwacht und gewartet werden. Über das Internet können Daten schnell an beliebig viele Standorten zur Verfügung gestellt werden.

Dieser Vortrag gibt einen kurzen Einblick über die heutigen technischen Möglichkeiten der Messtechnik in Lysimeteranlagen.

## Lysimeter- Messtechnik

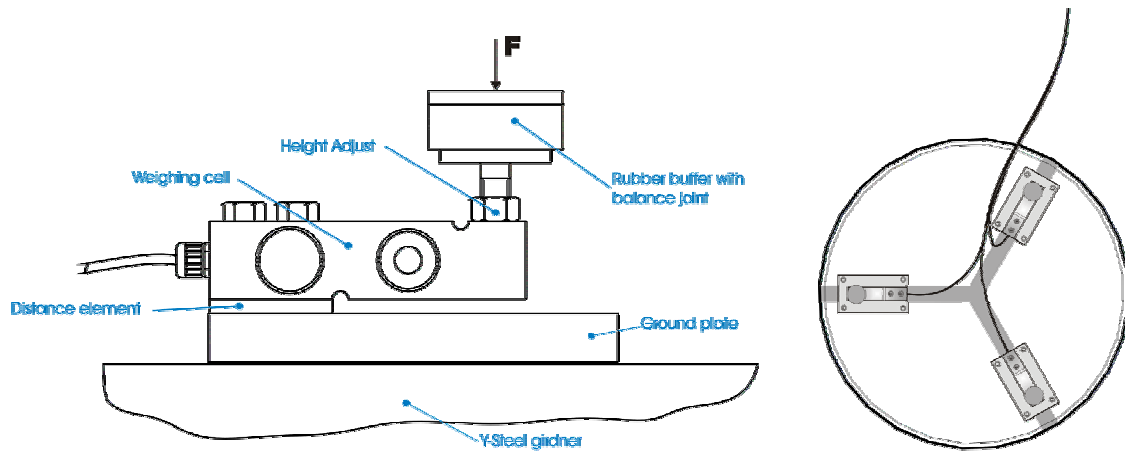
Für die elektronische Erfassung von Gewicht werden überwiegend so genannte Wägezellen eingesetzt. Dabei nutzt man das physikalische Wirkprinzip des Dehnungsmessstreifens (DMS).

Durch die Deformation der Wägezelle und somit der DMS werden resistive Änderungen elektronisch erfasst. Die hohe Auflösung heutiger Messgeräte ermöglicht es, das gesamte Gewicht des Lysimeterbehälters auf wenige Gramm aufzulösen und somit die Verdunstung und Wasseraufnahme am Lysimeter genau zu beobachten.



**Abb. 3.** Deformation der Wägezelle unter Last

UMS verwendet drei Wägezellen für die Auflage des Lysimeterbehälters. Diese werden analog parallel verschalten und dann digitalisiert. Diese Technik ist kostengünstig und minimiert die Fehlerkette. Die Wägezellen sind aufgrund ihrer hohen Genauigkeit austauschbar – vorausgesetzt das Lysimeterdesign lässt einen Wartungs-Zugang zu dem Wägeaufbau zu.



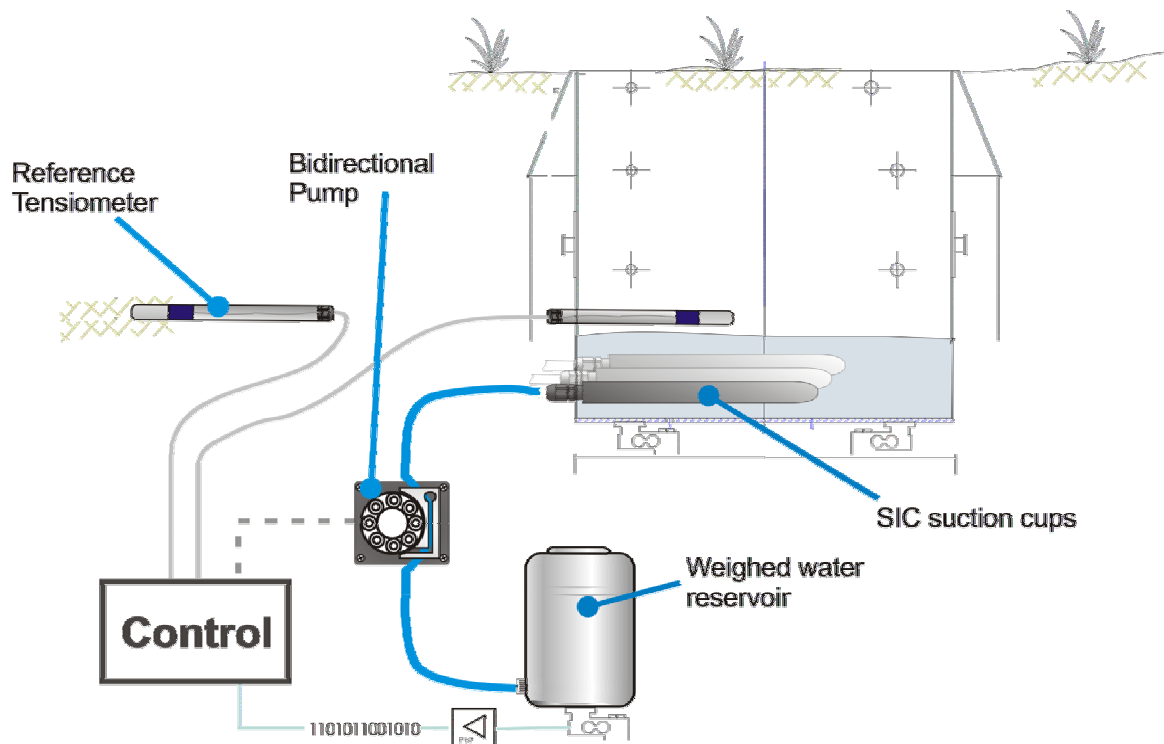
**Abb. 4.** Aufbau Wägezelle und Stahlträger

Ein anderer Ansatz erfasst nur die Änderung des Lysimetergewichtes in einem geringen Bereich elektronisch. Das Gesamtgewicht des Lysimeters wird über eine mechanische Konstruktion mit einem Gegengewicht (Waagenprinzip) neutralisiert. Dieser Aufwand wurde früher betrieben, da die Genauigkeit und Auflösung der Messgeräte noch nicht hoch genug war.

## Steuern und Regeln

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 können systembedingte Fehler von Lysimetern minimiert werden.

Das HYDROLY und das AGROLY verfügen über eine Simulation der Bodenwasserspannung bzw. des Grundwasserpegels. Über eine bidirektionale Pumpe wird bei Bedarf Wasser vom Saugkerzenrechen in einen Auffangbehälter gepumpt oder wieder zurück. Die Implementierung erfolgt über einen auf die Verhältnisse optimierten Regel-Algorithmus (z. B. diskret PI).



**Abb. 5.** Pumpenregulierung der Bodenwasserspannung im AGROLY

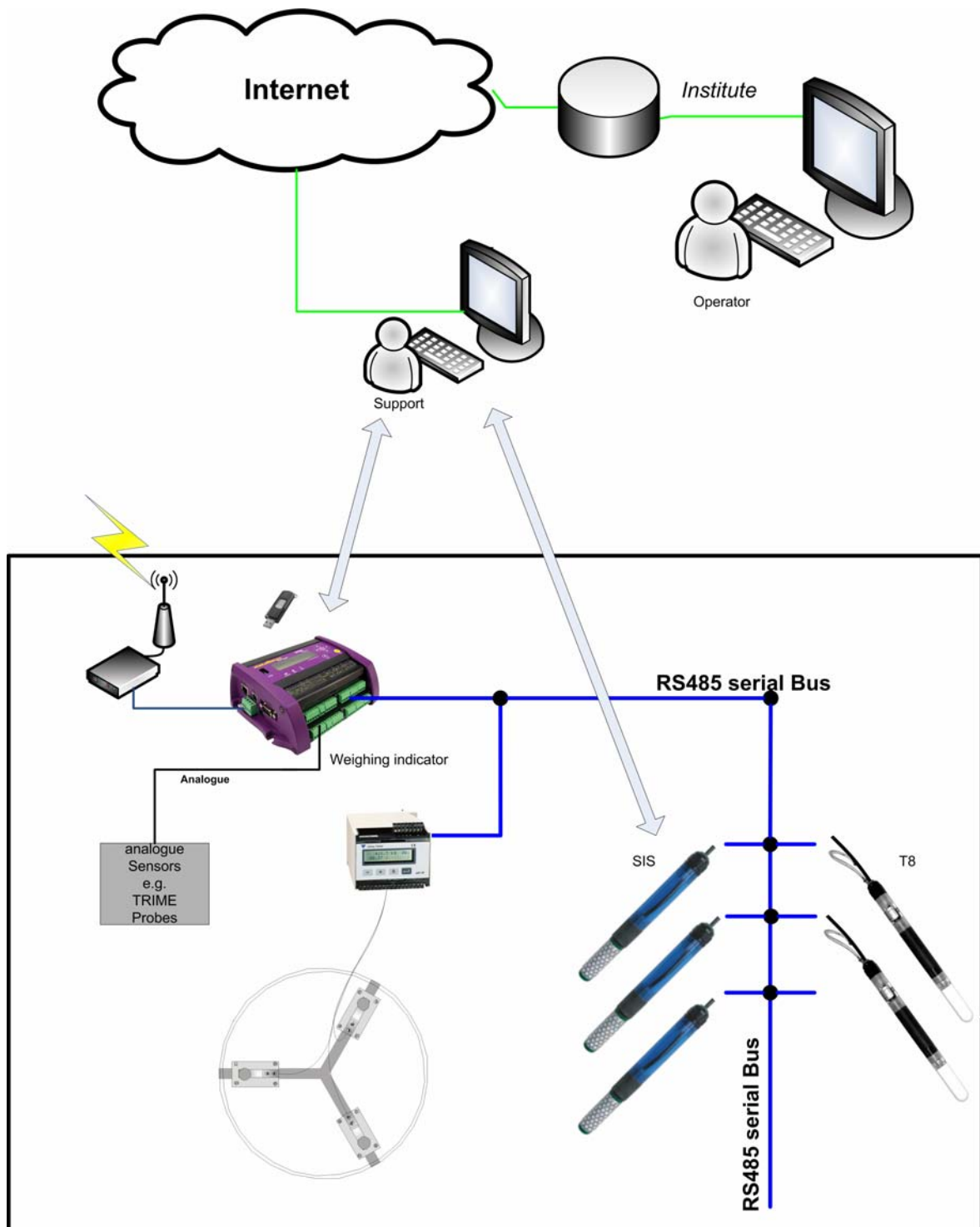
## Fernwartung

Mobilfunktechnologie und das Internet erlauben es 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 angebundenen 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 zeitnahe Datenübertragung und den Fernzugriff werden Datenausfälle schnell festgestellt. Fehler können im Vorfeld lokalisiert und schnell behoben werden.



**Abb. 6.** Fernanbindung von Datenlogger und Sensoren über Internet

## Literatur

UMS GmbH: <http://www.ums-muc.de/produkte> Meteo-Lysimeter und Hydro-Lysimeter  
 PESSL INSTRUMENTS (2006): <http://www.metos.at> Metos Klimastationen mit GPRS Internet Datenbank  
 Anbindung.

# Datenmanagement der Forschungsstation Wagna

Gerhard Rock & Markus Plieschnegger

JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

In Wagna wurden 2004 zwei monolithische, wägbare Präzisionslysimeter mit parallel geschalteten, bodenhydrologischen Messprofilen und zusätzlich im Frühjahr 2006 ein wägbares „Gras-Lysimeter“ zur Erfassung der Referenzverdunstung installiert (siehe FANK et al., 2007). Aufgrund des enorm großen Datenanfalls aus insgesamt 102 Online-Sensoren (4 Messinstrumente mit 1-Minuten-Werten, an den übrigen 10-Minuten-Werte) sowie zusätzlichen Informationen aus bodenphysikalischen, isopenhydrologischen und hydrochemischen Untersuchungen war es notwendig, ein effizientes Datenmanagementsystem zu erstellen, um einen kontinuierlichen Überblick über die Datenlage des Versuchsfeldes zu gewährleisten. Wesentlichster Bestandteil dieses Managementsystems ist eine Datenbank, in der alle zeitabhängigen Daten erfasst und verwaltet werden. Diese Zeitreihendatenbank bildet in Verbindung mit zusätzlichen Datenbanken die Basis für unterschiedlichste Auswertungen. Beispiele dafür sind die Ableitung der Wasserbilanzgrößen aus den verfügbaren Wiegeinformationen und die FAO-PENMAN-MONTEITH Verdunstungsberechnung.

## Einleitung

1991 wurde als Reaktion auf die steigenden Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Murtalaquifers auf dem landwirtschaftlichen Versuchsgelände von Wagna eine Lysimeterstation errichtet. Diese wurden im Sommer 2004 durch zwei wägbare, monolithische Präzisionslysimeter ersetzt. 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 mit einer Größe von 1000 m<sup>2</sup> wurden Messstellen in der ungesättigten Zone eingerichtet, um detaillierte Informationen über Wasserfluss und Stofftransport zu gewinnen. 2006 wurde zusätzlich ein wägbares, monolithisches Lysimeter für die Ermittlung der Wasserbilanzparameter unter Wiese errichtet. Die Gewinnung der Daten dient vor allem der Evaluierung der Wasserhaushalts- und Stofftransportmodellierung. Der enorm große Datenanfall machte es notwendig, ein effizientes Datenmanagementsystem zu erstellen, um eine kontinuierliche Überwachung und Auswertung der gewonnenen Daten zu ermöglichen.

## Methoden

Für das Datenmanagement an der Forschungsstation Wagna wird zusätzlich zur EDV-Struktur für die Erfassung und zentralen Speicherung der erfassten Daten vor Ort für die Korrektur und Auswertung der enorm großen Datenmengen eine speziell für Zeitreihen entwickelte Datenbank samt Software eingesetzt und laufend weiterentwickelt. Diese Zeitreihendatenbank wird ausschließlich über eine speziell dafür entwickelte Anwendung bedient, sodass der Benutzer kaum Kenntnisse über das Arbeiten mit Datenbanken benötigt. Diese Anwendung stellt bereits eine Vielzahl an Methoden für das Arbeiten mit Zeitreihen bereit. Zusätzliche, spezielle Module zur Auswertung von Lysimeterdaten wurden entwickelt, um die notwendigen Arbeiten mit den gewonnenen Daten zu erleichtern und den daraus erzielbaren Erkenntnisgewinn unter sparsamem Zeiteinsatz zu steigern.

## Datenerfassung

Die große Anzahl an online erfassten Daten (im 1-Minuten oder 10-Minuten-Intervall) werden im Messraum der Station auf unterschiedlichen Datensammlern zwischengespeichert oder direkt auf dem zentralen Messrechner gespeichert. Die Online-Daten des so genannten „Hydrolysimeters“

zur Ermittlung der Gras-Referenzverdunstung (der in etwa 100 m Entfernung steht) werden mittels Richtfunkstrecke auf diesen Messrechner übertragen. Zusätzlich wird eine Kopie der von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) auf dem Versuchsgelände gemessenen meteorologischen Parameter ebenfalls am Messrechner abgelegt. Der Messrechner der Station Wagna ist in das firmeninterne Netzwerk eingebunden und kann über PC-Anywhere vom Büro in Graz aus gesteuert werden. Über diese Datenanbindung werden die Datensammler in regelmäßigen Intervallen ausgelesen, am Messrechner abgelegt und ins Büro übertragen. Diese Daten liegen nun in einzelnen, zerstückelten Dateien (je nach Ausleseintervall) im jeweils datensammlerspezifischen Format vor. Aber wie kann man nun mit diesen Daten arbeiten? Schon die Visualisierung der Messreihe einzelner Parameter für größere Zeiträume ist ein Problem. Mit einem Messintervall von 1 Minute erhält man in 1 Jahr für einen einzigen Parameter 525600 Messwerte. Misst man 5 Jahre sind das schon mehr als 2,5 Millionen Messwerte. In Excel zum Beispiel kann derzeit eine Messreihe aus maximal 65536 Messwerten bestehen, das ergibt gerade einmal 45 Tage. Derzeit befinden sich in der Wagna-DB für die Lysimeter unter den Versuchsflächen etwas über 20 Millionen Primär-Messwerte (unkorrigierte) und in der DB für den Hydrolysimeter etwa 6 Millionen Messwerte. Um eine effiziente Kontrolle, Visualisierung, Bearbeitung und Auswertung durchführen zu können, ist daher der Einsatz spezieller Software notwendig (siehe Rock et al., 2007).

### **Daten-Management (Zeitreihen-Datenbank)**

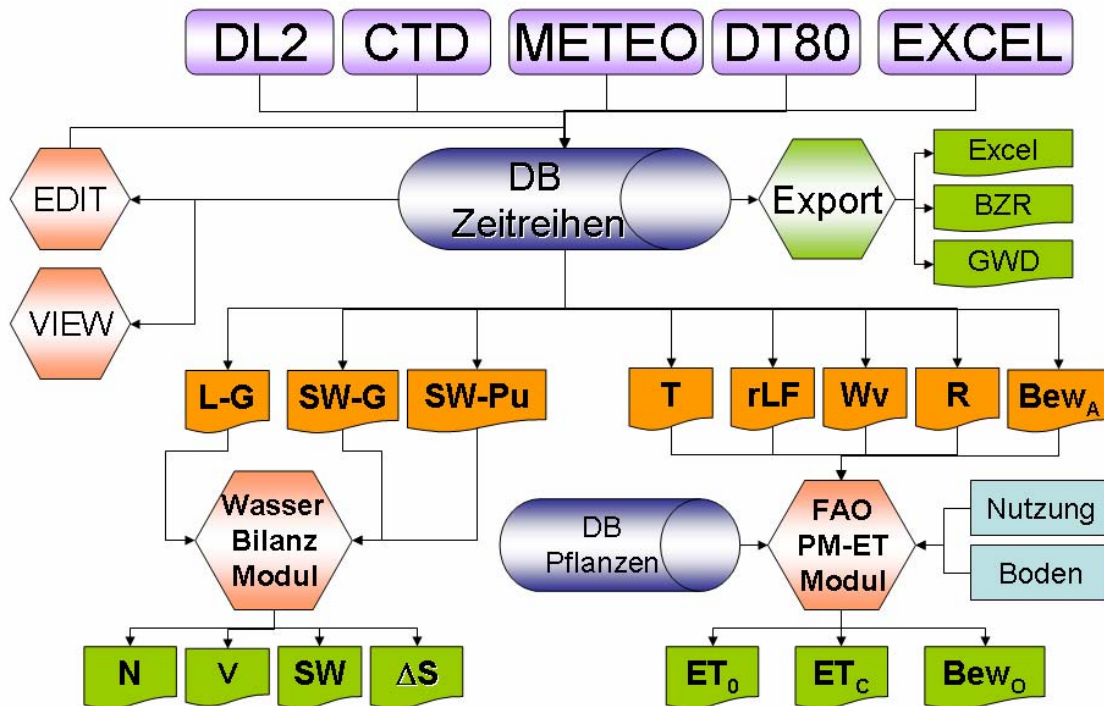
Am Institut für Wasserressourcenmanagement der JOANNEUM RESEARCH wurde eine Datenbank für die flexible Speicherung von zeitabhängigen Daten entwickelt, welche nicht nur für die Anwendung im Zusammenhang mit Lysimetern geeignet ist, sondern auch als Basis für ein regionales Informationssystem oder die Verwaltung der Datengewinnung von regional verteilten Messstationen einsetzbar ist. Die Datenbank ist derzeit als MS-ACCESS-Datenbank realisiert. Alle Messdaten werden über spezielle Anwendungsprogramme verwaltet. Die Zugriffe auf die Datenbank erfolgt ausschließlich über SQL-Befehle, was bedeutet, dass mit geringem Aufwand die Datenbank auch auf anderen Datenbanksystemen (MS-SQL-Server, ORACLE) lauffähig ist. Der Anwender hat den Vorteil, dass alle Standard-Funktionen über die Software unter einer einfachen Benutzerschnittstelle zur Verfügung stehen und kaum Kenntnisse über die Bedienung von Datenbanken notwendig sind. Die Anwendung ist mittels der Softwaretechnologie der ActiveX-Code-Komponenten erstellt. Dies bedeutet, dass die erstellten Funktionen leicht in andere Anwendungen integriert werden können.

Die Datenbank 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“. Es ist möglich unterschiedliche Varianten einer Messreihe zu verwalten (z. B. Primärdaten, korrigierte Daten). Zusätzlich zur Möglichkeit eine Messreihe als unterschiedliche Varianten zu speichern ist ein Versionsmanagement realisiert. Jede Veränderung einer Messreihe wird als eigene Version gespeichert. Dabei werden nur jene Messwerte gespeichert, die sich verändert haben. Mit jeder Version werden der Benutzer, der Zeitpunkt der Änderung sowie ein vom Benutzer definierter Informationstext gespeichert. Auf Grund dieses Versionsmanagements kann die Nachvollziehbarkeit aller vorgenommenen Korrekturen erleichtert werden. Für eine Speicherung der Analysenergebnisse isotopenhydrologischer und hydrochemischer Untersuchungen ist eine spezielle Datenstruktur implementiert, die es erlaubt, einzelne Parameter als Zeitreihe zu behandeln, aber trotzdem den Zusammenhang zwischen Probe, Analyse und Analysewerten zu erhalten und anzuzeigen.

Die Softwareanwendung umfasst zusätzlich zum Hauptmodul „ZrDB“ diverse Import-Module zur Konvertierung der Daten von Daten-Logger-Dateien in die Datenbank, das EDIT-Modul zum Verändern der Daten, das VIEW-Modul zum Visualisieren der Daten sowie spezielle Auswertemodule, wie zum Beispiel die Lysimetergewichtsauswertung und die FAO-PENMAN-MONTEITH Verdunstungsberechnung (siehe Abb. 7). Die Importmodule (DL2, CTD, Meteo, DT80, Excel) lesen die Daten unterschiedlicher Datenformate der Logger-Dateien und fügen diese in der definierten Struktur der Zeitreihendatenbank hinzu. Beim Import wird die Zuordnung des jeweiligen Datenlogger-Kanals (bzw. Sensor-Codes) zu Station und Parameter in der Datenbank mittels einer



Konfigurationsdatei definiert. Die Auswertemodule lesen die benötigten Messreihen direkt aus der Datenbank, die Berechnungsergebnisse werden jedoch nicht in der Datenbank abgelegt, sondern auf externen, speziell für Zeitreihen entwickelte Dateien im Binär-Format (so genannte BZR-Dateien) gespeichert. Dieses Format ist besonders für das schnelle Lesen und Schreiben von Zeitreihen mit großer Anzahl an Messwerten geeignet. Mittels Exportmodul können die Messreihen zusätzlich in das GWD-Format (einfaches ASCII-Format) und nach Excel konvertiert werden.



**Abb. 7.** Übersicht über die Module der ZrDB

L-G = Lysimetergewicht, SW-G = Sickerwassergewicht, SW-Pu = Sickerwasser-Pumpen, N = Niederschlag, V = Verdunstung, SW = Sickerwasser,  $\Delta S$  = Speicheränderung, T = Temperatur, rLF = rel. Luftfeuchte, Wv = Windgeschwindigkeit, R = Globalstrahlung, Bew<sub>A</sub> = aktuelle Bewässerung, ET<sub>0</sub> = Referenzverdunstung, ET<sub>C</sub> = Pflanzenverdunstung, Bew<sub>O</sub> = optimale Bewässerung

## Datenauswertung

Für die Auswertung der Daten sind eine Reihe von Standardzeitreihenauswertungen (Jahresdokumentation, Mehrjahresdokumentation) sowie Funktionen zur automatisierten Mittelwertbildung und Akkumulierung auf unterschiedliche Zeiträume (Tage, Monate, Jahre) implementiert.

Für so genannte „Hydrolysimeter“ (Lysimeter mit Messung der Gewichte von Lysimeter und Sickerwasser und Aufzeichnung der Pumpzeiten zur Angleichung des Wassergehaltes zwischen Lysimeter und natürlichem Boden) ist die „Hydrolysimeter-Gewichtsauswertung“, ein spezielles Modul zur Berechnung der Wasserbilanz implementiert (siehe Abb. 7). Bei der Hydrolysimeter-Gewichtsauswertung werden die Lysimetergewichte um die Gewichtsänderungen des Sickerwasserbehälters bei Pumpbetrieb korrigiert und daraus die Wasserbilanzkomponenten Niederschlag, Verdunstung, Sickerwasser und Speicherung berechnet.

Das Evapotranspirations-Modul der Zeitreihendatenbank berechnet neben der Verdunstung (ET<sub>0</sub>, ET<sub>C</sub>, ET<sub>C ADJ</sub>) die Grundwasserneubildung und die optimale Bewässerung. Hierzu werden die Methoden und Formeln nach FAO-PENMEN-MONTEITH (siehe ALLEN et al., 1998) eingesetzt.

Zusätzlich wurde die Möglichkeit geschaffen Fruchtfolgen zu definieren. Für die Regionalisierung der Fruchtfolgen besteht sowohl die Möglichkeit eine Mischung aus mehreren Fruchtfolgen als auch die Rotation der Fruchtfolgen im Berechnungszeitraum zu definieren (siehe FANK et al., 2008). Zusätzlich zu den landwirtschaftlichen Nutzungsarten stehen spezielle Berechnungsverfahren für Wald, Oberflächengewässer und besiedelte Gebiete zur Verfügung. Das Modul ermöglicht die Berechnung und Verwaltung unterschiedlicher Varianten (Berechnungsläufe). Für jeden einzelnen Berechnungslauf können alle Eingangsdaten (Wetterdaten, Bodendaten, Nutzungsangaben, Bewässerungsangaben und Pflanzendaten) unterschiedlich definiert werden. Die Zeitreihen für Wetterdaten und Bewässerung (Abb. 7) können sowohl aus der Zeitreihendatenbank als auch aus externen BZR-Dateien geladen werden. Die Pflanzenkennwerte sind in einer zusätzlichen Datenbank gespeichert. Sämtliche Berechnungsergebnisse der einzelnen Varianten werden als Dateien gespeichert und können jederzeit mittels VIEW-Tool visualisiert und weiterverwendet werden. Für die Berechnung auf regionaler Ebene existiert ein externes Modul, welches über eine Projektdatei (mit Definition der Varianten) im Batch-Modus eine Vielzahl von Varianten berechnet. Diese Projektdatei kann mittels eines GIS-Moduls aus der GIS-Verschneidung von Wetterzonen, Nutzungsgebieten, Bewässerungsangaben und Bodenformen automatisiert erstellt werden.

## Schlussfolgerungen

Um die enorm großen Datenmengen, die beim Betrieb von komplexen Lysimeteranlagen wie in Wagna gemessen werden, managen und auswerten zu können, ist es notwendig spezielle, für diese Zwecke optimierte, Software einzusetzen. Die dadurch erreichbaren Erleichterungen im Umgang mit den gemessenen Daten hilft Probleme bei der Datengewinnung schneller zu erkennen und Arbeitszeit für die Datenpflege einzusparen, um diese für die Auswertung besser einsetzen zu können. Durch die Möglichkeit der Visualisierung auch längerer Messreihen mit kleinen Messintervallen mit den Möglichkeiten des Zooming auch auf kleinste Zeiträume kann das Verständnis über die Zusammenhänge der gemessenen Parameter erhöht werden. Trotz allem darf der Aufwand für das Datenmanagement beim Betrieb komplexer Lysimeteranlagen, wie in Wagna, nicht unterschätzt werden.

## 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 S.
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. International Water & Irrigation, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.
- ROCK, G. & J. FANK (2007): Lysimeter – ein Werkzeug zur genauen Erfassung von Wasser- und Stoffkreislaufparametern./3.1. Wägbare monolithische Feldlysimeter in Wagna: Messdatenerfassung und Auswertekonzepte.– In: FANK, J. & CH. LANTHALER (Hrsg., 2007): Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management. Landwirtschaft und Wasserwirtschaft im Fokus zu erwartender Herausforderungen.– Beiträge z. Hydrogeologie, 56, (in Druck), Graz.
- FANK, J., J. C. DRAXLER, M. PLIESCHNEGGER & G. ROCK (2008): Die klimatische Wasserbilanz des Marchfelds.– In: MARSCHALLINGER, R. & WANKER, W. (Eds): Computeranwendungen in Hydrologie, Hydrogeologie und Geologie. Beiträge zur COG-Fachtagung Salzburg 2007, Wichmann Verlag, 13-27.

# Analyse der Lysimeterrandbedingungen

Willibald Loiskandl<sup>1</sup>, Gerhard Kammerer<sup>1</sup> & Sabine Klepsch<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)  
Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt  
Institut für Hydraulik und landeskulturelle  
Wasserwirtschaft  
Muthgasse 18, A-1190 Wien

<sup>2</sup> Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)  
Department für Wald- und Bodenwissenschaften  
Institut für Bodenforschung  
Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien  
<sup>3</sup> Austrian Research Centers GmbH – ARC  
A-2444 Seibersdorf

## Zusammenfassung

Lysimeter sind Vorrichtungen zur Bestimmung von Stoffverlagerungen bzw. Wasserbilanzgrößen unter möglichst naturidenten Bedingungen. Je nach der Ausführung, dem Betrieb und den bodenphysikalisch-hydrologischen Bedingungen treten mehr oder weniger große Abweichungen zu den natürlichen Verhältnissen auf – insbesondere bei den älteren Schwerkraftlysimetern.

Im Rahmen dieser Arbeit werden für einige Fälle Fehlerquellen aufgezeigt und zum Teil mit Hilfe einer numerischen Simulation abgeschätzt, wobei Messungen von Zustandsgrößen im ungestörten Boden benutzt werden, die im Zuge von verschiedenen Feldmonitorings gesammelt wurden. Während die Abweichungen bei den älteren Gravitationslysimetern erheblich sein können, zeigen die in-situ-Daten für modernere Lysimeterbauarten nur in Trockengebieten mögliche Probleme auf.

## Einleitung

Lysimeter verdanken ihre Beliebtheit den gut definierten Randbedingungen. Sie ermöglichen es, Prozesse und Prozesskomponenten eindeutig zu beschreiben und die aktuelle Evapotranspiration als fehlendes Glied in der Wasserbilanz zu bestimmen. Das klassische Lysimeter stellt ein hydrologisch vollkommen getrenntes System dar und könnte theoretisch auch im Labor stehen, nur müssten dann die realen Umweltbedingungen künstlich erzeugt werden.

Im Feld führen wir bodenphysikalische, hydrologische Messungen (im weitesten Sinne) durch zur

- Bestimmung von Bilanzgrößen (Oberflächenabfluss, Infiltration, aktuelle (reale) Evapotranspiration, Grundwasseranreicherung, Pflanzenwasserbedarf);
- Langzeitbeobachtung (Monitoring), z. B. um Veränderungen durch den Klimawandel zu erfassen;
- Identifikation and Quantifizierung von Migrationsprozessen, z. B. bei der Zulassungsprüfung von Pflanzenschutzmitteln (OECD, 2000);
- Bestimmung von Bodeneigenschaften (nötigenfalls in Verbindung mit Laborversuchen) – überwiegend durch Experimente, bei günstigen Gegebenheiten auch durch Monitoring;
- Kalibrierung und Verifizierung von Simulationen.

Für diese Untersuchungen werden im hohen Maße auch Lysimeter herangezogen. Eine Zusammenstellung der Anwendungen ist unter anderem in der Arbeit von BERGER (2006) oder in der EUROPEAN LYSIMETER PLATFORM (2008) zu finden.

## Fehlerquellen verschiedener Lysimeterformen

Die Nachbildung der Messbedingungen im Feld ist von entscheidender Bedeutung. Vorweg können in Anlehnung an das DVWK-Merkblatt 238 (1996) folgende grundsätzliche Anmerkungen gemacht werden:

- Um negative Auswirkungen eines Staueffekts (Lysimeterbedingung am unteren Rand) zu minimieren, muss der Lysimeterkörper so tief sein, dass der geschlossene Kapillarsaum nicht bis in die wechselfeuchte, verdunstungsbeeinflusste Bodenzone reicht (effektive Wurzeltiefe).

- Die Bodenwasserbewegung im Lysimeter ist zumindest an der Umrandung streng eindimensional-vertikal. Für Standorte mit ausgeprägtem ober- oder unterirdischem Lateralfloss ist ein Lysimeter ungeeignet.
- Randeffekte – bevorzugte Wasserwegigkeit zwischen Bodenkörper und Lysimeterwand (Quellen und Schrumpfen bei tonigen Böden) – können nicht ausgeschlossen werden.
- Durch den Ringspalt bei wägbaren Lysimetern treten thermische Effekte auf.
- Die natürliche Bodenstruktur ist bei geschütteten Lysimetern schwierig nachzubilden.
- Bei nicht einheitlichem Bewuchs auf dem Lysimeter und in der Umgebung treten Oasen-effekte auf.
- Die Bodenbearbeitung ist bei konventioneller maschineller Bodenbearbeitung nur bei spezieller Behälterausführung möglich.
- Die Bodenbiologie im Lysimeter – Mikro-, Meso- und Makrofauna – kann verändert sein und einen Einfluss auf die Bodenparameter haben.

Die beschriebenen Fehlerquellen sind auf hydrologisch vollkommen getrennte Lysimeter bezogen. Für vergrabene Lysimeter geringer Bauhöhe – auch als Sickerwassersammler bezeichnet – sind unter Umständen zusätzliche Effekte einer nicht mehr rein vertikalen Wasserbewegung zu beachten (KASTANEK, 1995).

### **Einschränkungen von Lysimetermessungen**

Neben den eher baulich bedingten Fehlerquellen sind auch methodische Einschränkungen zu berücksichtigen. Lysimeter liefern keine unmittelbaren physikalischen Zustandsgrößen; eine Abschätzung erfordert ein Strömungsmodell und ist nur durch Ermittlung der bodenhydraulischen Eigenschaften mit inversen Verfahren möglich. Direkte Ergebnisse aus dem Monitoring mit Lysimetern können nur in Kombination mit stochastischen Methoden für Simulationen z. B. zur Ermittlung der Bilanzgrößen unter geänderten Umweltbedingungen (Klimawandel) verwendet werden.

Demgegenüber eignet sich eine direkte Messung (virtuelles Lysimeter) gut zur Ermittlung von physikalischen Zustandsgrößen im Boden, zu der inversen Bestimmung von Parametern bodenhydraulischer und stofflicher Eigenschaften und als Grundlage für numerische Simulationen der Wasserbewegung und von Migrationsprozessen. Wesentlich schwieriger und im Allgemeinen weniger genau sind Bilanzgrößen (aktuelle Evapotranspiration, Grundwasseranreicherung) zu ermitteln. Nicht unerwähnt soll bleiben, dass für eine erfolgreiche Umsetzung dieses Konzeptes einige Voraussetzungen erfüllt sein müssen: Diese sind

- die sorgfältigste Kalibrierung der Sensoren, am besten im Feld;
- eine ausreichende räumliche und zeitliche Diskretisierung;
- Wiederholungen für Repräsentativität in der Lysimeter-Größenordnung;
- eine Matrixenergiemessung im Bereich  $< -1$  bar; mit aufwändiger Laborkalibrierung und Temperaturkompensation.

Darüber hinaus ist die inverse Parameterbestimmung aus den Felddaten numerisch sehr anspruchsvoll und die Identifikation vieler Parameter oft kaum möglich. Die beschriebenen Lysimeter-Fehlerquellen treten bei einer direkten Erfassung der Bodenparameter im Feld nicht auf; deshalb wurde auch eine Kombination der Vorteile der beiden Methoden im so genannten Scientific-Field-Lysimeter umgesetzt (VON UNOLD, 2007).

### **Lysimeterrandbedingungen**

Ausgangspunkt der Analyse ist ein klassisches, hydrologisch getrenntes Lysimeter. Zur Festlegung des Strömungsproblems sind die obere Randbedingung, die seitliche Begrenzung und die untere Randbedingung notwendig. Beim Lysimeter am natürlichen Standort kann die obere Randbedingung formal als ident mit der Umgebung angesehen werden. Die oben beschriebenen Fehlerquellen führen nur bei einer wenig sorgfältigen konstruktiven Ausführung zu Störungen.

Durch die bis zur Geländeroberfläche reichende Behälterwand als seitliche Berandung wird eine vertikale Wasserbewegung erzwungen, d.h. Wasser kann nur an der oberen und unteren Begrenzung ein- oder ausströmen. An der Unterseite kann Wasser nur zuströmen, wenn baulich

ein reversibler Fluss möglich ist. Das ist bei einem Saugkerzenlysimeter verwirklicht und auch beim Grundwasserlysimeter, an dessen früher Entwicklung FEDDES (1971) maßgeblich beteiligt war.

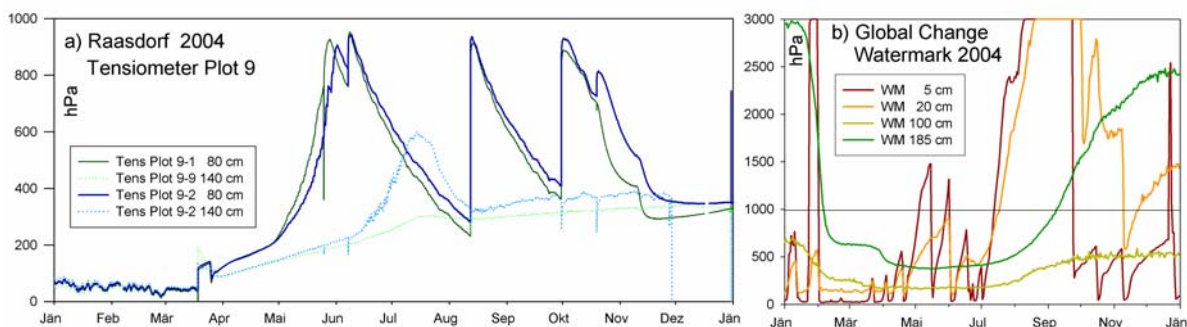
Eine alternative Variante für die seitliche Berandung ist eine Kiespackung, durch die eine seitliche Beeinflussung der Wasserbewegung möglich ist. Solange keine hydrostatischen Drücke auftreten, wird kein Wasser entlang der Sickerlinie austreten. Durch die Kiespackung kann der Gasaustausch und damit die Verdunstung gefördert werden. Die in Bezug auf die Anpassung an natürliche Verhältnisse sensitivste Randbedingung ist sicher die untere (Tab. 1).

**Tab. 1.** Zusammenstellung der unteren Randbedingungen

| Natürliche Berandung      | Potenzial                                    | Anmerkung   |
|---------------------------|--|---|
| Schotter oder Dränschicht | $\Phi = p = 0$                               | Wasseraustritt nur bei lokalem Überdruck                              |
| Grundwasser               | $\Phi = p = 0$                               | Wasserbewegung in und aus GW  |
| Matrixpotenzial           | $\Phi = \text{konstant}$<br>oder nachgeführt | Keramikplatte oder -kerze, Umgebungspotenzial gesteuert oder geregelt |
| Einheitsgradient          | $\Phi = \Phi_g$                              | Schwerkraftentwässerung   |
| Tiefenlysimeter           | GW oder $\Phi_p$                             | Randbedingungseinfluss vermindert                                     |

Sofern ein Oberflächenabfluss verhindert wird, kann bei einem vollständig hydrologisch getrennten Lysimeter garantiert werden, dass der auf die Oberfläche gefallene Niederschlag aufgenommen wird. Die Frage ist nur, ob die Wasserdynamik gleich der der Umgebung ist – bei Lysimetern mit gestörter Bodenbefüllung ist dies kaum zu erwarten. Zu beachten ist auch, dass durch ein geändertes Matrixpotenzial das kapillare Leitvermögen beeinflusst wird, mit unmittelbarer Folge auf die Wasserbewegung.

Direkter ist der Einfluss durch eine Fixierung des Matrixpotenzials mit  $p = 0$  am Lysimeterboden, wodurch ein unterschiedlicher Potenzialgradient im Lysimeterkörper und im umgebenden ungestörten Boden entstehen kann und als Folge wieder eine veränderte Wasserbewegung. Unter natürlichen Feldbedingungen kann mehr Wasser schneller in tiefere Schichten gelangen und weniger für die Verdunstung zur Verfügung stehen, d. h. die untere Randbedingung ist nicht dynamisch an die Umgebung angepasst. Neue Entwicklungen versuchen dieses Manko durch den Einbau einer porösen Platte bzw. von Saugkerzenrechen, über die ein Potenzial angelegt werden kann, auszumerzen. Im optimalen Fall wird das eingestellte Potenzial mit einer externen Messung gekoppelt und entsprechend nachgeführt. Eine Einflussgröße, die es noch zu berücksichtigen gilt, ist der Widerstand der porösen Platte. Der Saugkerzenhorizont bzw. die Messung sollte daher oberhalb der porösen Platte erfolgen. Die Regelung der unteren Randbedingung über eine poröse Platte funktioniert nur bis zu einem maximal anlegbaren Unterdruck von ca. 0,8 bar bis 0,9 bar. Dieser Wert wird in Trockengebieten wie dem Marchfeld häufig überschritten (Abb. 8).



**Abb. 8.** Matrixpotenzialverläufe für zwei Trockenstandorte a) Tensiometer-Werte Raasdorf (FREYER et al., 2005). b) Watermark-Werte – Groß-Enzersdorf (SOKOL, 2008)

Eine eigene Betrachtung erfordern Miniaturlysimeter, die vielfach auch als Sickerwassersammler bezeichnet werden. Durch den meist gestörten Einbau und die nicht vollständige hydrologische Trennung kann es zu einer sehr unterschiedlichen Wasserdynamik im Vergleich zum ungestörten Boden kommen (KASTANEK, 1995).

## Simulationsanalyse

Für die Simulationen stehen Hydrus-1D (ŠIMŮNEK et al., 2005) und Hydrus-2D (ŠIMŮNEK et al., 1999) zur Verfügung. Um realistische Verhältnisse zu repräsentieren, werden Monitoring-Daten von Feldstandorten herangezogen. Ein Vorteil von HYDRUS-1D gegenüber der 2D-Version ist die Möglichkeit der Berücksichtigung des Wurzelwachstums. Mit den gemessenen Werten der Wasserspannung und des Wasseranteils ist eine Plausibilitätskontrolle der Simulationen möglich. Durch die Vorgabe unterschiedlicher unterer Randbedingungen kann der Einfluss auf die Wasserdynamik dargestellt werden. Es kann dadurch die Größenordnung von auftretenden Fehlern abgeschätzt werden.

Ein besonderer Punkt ist der Vergleich von Lysimetern mit einem und mit zwei Meter Tiefe. Die Messungen in Trockengebieten zeigen, dass gerade in einer Tiefe von rund einem Meter Matrixenergiehöhen auftreten, die eine Nachführung nicht mehr ermöglichen. Damit kann die Entscheidung für die standortgebundene Ausführung eines Lysimeters unterstützt werden.

## Schlussfolgerungen

Ohne Zweifel konnten zahlreiche Verbesserungen in der Lysimetrie erreicht werden. Gewisse Effekte, die bei quellenden und schrumpfenden Böden auftreten, können minimiert, aber nicht gänzlich verhindert werden. Eine Anwendungslimitierung kann in den Trockengebieten gegeben sein. Die Ergebnisse von Schwerkraftlysimetern und Anlagen in Trockengebieten können durch eine Simulation wesentlich besser interpretiert werden. Die Simulation ist hierzu mit Hilfe der Lysimetermessungen auf den Standort zu kalibrieren; sie erlaubt dann eine Abschätzung der Unterschiede zum natürlichen Boden oder die Analyse unterschiedlicher Szenarien.

Neben der Kombination der Lysimetrie und der direkten Messung der Bodenwasserkennwerte kann als drittes Glied die Simulation die Interpretation der Wasserkreislaufparameter unterstützen.

## Literatur

- BERGER, S. M. (2006): Lysimeter in Forschung und Lehre: Ergebnisse aus 15 Jahren „Arbeitsgruppe Lysimeter“- Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- DVWK-MERKBLATT 238 (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen.- Hrsg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.
- EUROPEAN LYSIMETER PLATFORM (2008): <http://www.lysimeter.at> → Research stations in Europe (last updated: February 15, 2008).
- FEDDES, R. A. (1971): Water, heat and crop growth.- In: Mededeling Landbouwhogeschool Wageningen S. 71-12, Niederlande.
- FREYER, B., TH. RINNOFNER, J. K. FRIEDEL, R. FARTHOFFER, G. PIETSCH, CH. GABLER, E. LANG, H. WAGENTRISTL, W. LOISKANDL & A. STRAUSS-SIEBERTH (2005): Stickstoffaufnahme und Biomasseertrag von Zwischenfrüchten und deren Auswirkungen auf Ertrag und Qualität der Folgekultur und Nitratgehalt in der Bodenlösung unter den Bedingungen des Ökologischen Landbaus im pannonischen Klimagebiet.- Endbericht Projekt 1246, Institut für Ökologischen Landbau, Universität für Bodenkultur, Wien.
- KASTANEK, F. (1995): Kritische Bemerkungen zur Anwendung von Lysimeter.- In: 5. Lysimetertagung „Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesättigten Zone“, BAL Gumpenstein, 25.- 26. April, 1995, S. 93-102.
- OECD (2000). Guidance Document for the Performance of Out-door Monolith Lysimeter Studies.- ENV/JM/MONO(2000)8, OECD, Paris
- ŠIMŮNEK, J., M. SEJNA & M. TH. VAN GENUCHTEN (1999): The HYDRUS-2D software package for simulating two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media. Version 2.0, IGWMC - TPS - 53, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 251 pp.
- ŠIMŮNEK, J., M. TH. VAN GENUCHTEN & M. SEJNA (2005): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1, Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 270 pp.
- SOKOL, W. (2008): Unveröffentlichte Messwerte von „15 Jahre Global Change Messstelle Groß-Enzersdorf“. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur, Wien.
- VON UNOLD, G. (2007): Kontakt Lysimeter.- UMS GmbH, Gmunder Str. 37, München.

# Bedeutung der unteren Randbedingung in Lysimetern für die Sickerwassermessung

Uwe Schindler, Gernot Verch, Maren Wolff & Lothar Müller

Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V.  
Institut für Bodenlandschaftsforschung  
Eberswalder Str. 84  
D-15374 Müncheberg

## Zusammenfassung

Es war zu klären, ob die geringen Sickerwasserabflüsse aus den Lysimetern der Anlage in Dedelow (Unterdrucklysimeter) sachlich begründet sind oder durch Lysimetereffekte beeinflusst sein können. Dafür wurden die hydraulischen Eigenschaften der Zinn-Bronze-Sintermetallplatten (zur Unterdruckübertragung und Wasserableitung) quantifiziert. Des Weiteren wurden Tensiometer und TDR-Geräte zur Analyse der bodenhydrologischen Verhältnisse im Inneren der Lysimeter eingebaut. Die verwendeten Zinn-Bronze-Sintermetallplatten sind im neuen bzw. regenerierten Zustand geeignet, Sickerwasser unter möglichst naturnahen Bedingungen abzuführen. Da sie jedoch schon nach kurzer Zeit durch Kalkauswaschung kolmatiert waren, war der Sickerwasserabfluss gehemmt. Die Umgestaltung der Lysimeter zu Gravitationslysimetern erbrachte deutlich höhere Abflüsse.

## Einleitung und Problemstellung

Lysimeter (von griech. *lysis* = Lösung, Auflösung und *metron* = Maß) sind Geräte mit definierten Randbedingungen zur Ermittlung von Bodenwasserhaushaltsgrößen (Versickerungsrate, Verdunstung) und zur Beprobung von Bodensickerwasser, um dessen Quantität und Qualität zu bestimmen. In der Agrar- und Umweltforschung werden Lysimeter zur Erfassung und Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Boden, Pflanze und Wasser unter Berücksichtigung vom Bewirtschaftungsmanagement verwendet. Lysimeter sind daher ein wichtiges Hilfsmittel bei der Entwicklung und Validierung von Modellen (Wachstumsmodelle, Modelle zum Bodenwasser- und Stoffhaushalt) und Messmethoden.

Aufgrund der Exposition (Oaseneffekte), der Bewirtschaftung (Bearbeitung, Düngung, Ernte) und der Konstruktion und Befüllung (Bodenstruktur, Randeffekte, Schichtung, Durchmesser, Höhe, untere Randbedingung u. a.) können Lysimeterergebnisse eingeschränkt in ihrer Übertragbarkeit auf natürliche Verhältnisse sein (KASTANEK, 1995, FANK & VON UNOLD, 2005)

Ergebnisse von Untersuchungen in der Lysimeteranlage Dedelow (Uckermark) zum Einfluss von Düngung und Bewirtschaftung auf die Ertragsbildung, den Wasserhaushalt und die Nährstoffauswaschung ergaben im Zeitraum 1992 bis 1998 einen gemessenen mittleren jährlichen Sickerwasserabfluss von 13,7 mm (SCHINDLER et al., 2001). Die Lysimeter waren mit einem typischen Boden der Uckermark befüllt worden. Langjährige Abflussmessungen aus dem Gesamtgebiet (Pegel Pasewalk, Einzugsgebiet 1455 km<sup>2</sup>) zeigten hingegen eine mittlere jährliche Abflusshöhe von 111,5 mm (SCHINDLER et al., 2007). Nachfolgend war zu klären, ob diese großen Unterschiede sachlich begründet sind oder durch Lysimetereffekte beeinflusst sein können.

## Methodik

### Lysimeteranlage Dedelow

Die Lysimeteranlage wurden in Dedelow am Forschungsstandort des ZALF in der Uckermark errichtet und 1990 in Betrieb genommen. Sie besteht aus 32 nicht wägbaren Unterdrucklysimetern mit einer Grundfläche von 1\*1 m und 2 m Tiefe (Abb. 9). Der Boden (Haplic Luvisol, Arenic, nach WRB 2006, Normparabraunerde nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (KA5) 2005, Horizontierung: Ap (SI4), Al (SI3), Bt (LS3), Cc (Su3) war in allen Lysimetern gleich.



Die Unterdruckübertragung und Sickerwasserabführung erfolgte über fünf Zinn-Bronze-Sintermetallplatten (Durchmesser: 25 cm, Dicke: 5 mm).



**Abb. 9.** Lysimeteranlage Dedelow

### Technische Prüfung und Rekonstruktion

Im Jahr 2000 wurde die Lysimeteranlage rekonstruiert. In ausgewählte Lysimeter wurden zur Überprüfung der bodenhydrologischen Verhältnisse im Lysimeterinneren Tensiometer und Wassergehaltssensoren (TDR) eingebaut. Um sicherzustellen, dass durch die Zinn-Bronze-Sintermetallplatten kein Wasserstau verursacht wird, wurde deren Wasserdurchlässigkeit quantifiziert. Schon beim Ausbau der Sinterplatten zeigte sich, dass diese stark kolmatiert waren (Abb. 10, links). Der mit dem Sickerwasser ausgespülte Kalk hatte sich mit dem Bodenmaterial an der Lysimeterbasis verbunden. Der Kalk und die dabei entstandene und verhärtete Boden-Kalk-Auflage (Mörtel) lagerten sich fest auf der Plattenoberfläche und in den Poren ab. Ein starkes Aufbrausen nach aufträufeln von 10 %iger Salzsäure zeigte den hohen Kalkgehalt an.

Die Messung der Wasserdurchlässigkeit erfolgte zunächst für die gealterten Sinterplatten (10 Jahre in Betrieb). Danach wurden die Sinterplatten mechanisch gereinigt, mit 10 %iger Salzsäure gespült (Abb. 10 rechts) und erneut bemessen. Auf die Sinterplatten wurden jeweils zwei Stechzylinder (40 cm<sup>2</sup> Grundfläche) aufgeklebt. Die Sinterplatte wurde gesättigt, auf die Stechzylinder wurde eine Haube mit skaliertem Messrohr aufgesetzt (für große Druckhöhen wurde zusätzlich ein Schlauch verwendet) und die hydraulische Leitfähigkeit ( $k_s$ ) nach der Methode der fallenden Druckhöhe (Gl. 1, MÜLLER, 1980) gemessen (Abb. 11).

$$k_s = \frac{A_1 * l}{A * \Delta t} * \ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} \quad (\text{Gl. 1})$$

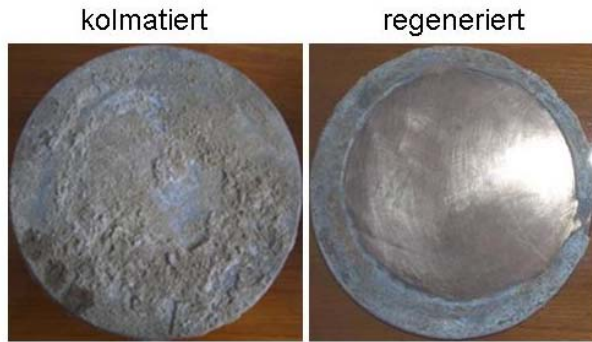
$k_s$  - Durchlässigkeitsbeiwert,  $A_1$  - Querschnittsfläche des Messrohres,  $l$  - Dicke der Sinterplatte,  $\Delta t$  - Messzeit,  $\Delta h_1$  - hydraulische Druckhöhendifferenz zu Messbeginn,  $\Delta h_2$  - hydraulische Druckhöhendifferenz zu Messende

### Ergebnis

#### Hydraulische Eigenschaften

Wie in Abb. 12 zu erkennen ist, unterscheiden sich die hydraulischen Leitfähigkeitswerte der kolmatierten deutlich von der regenerierten Sinterplatte. In beiden Fällen sind die Werte jedoch gering. Es ist eine Abhängigkeit des Durchlässigkeitsbeiwertes vom Potentialgradienten zu erkennen. Damit ist der Wasserfluss gehemmt und folgt nicht mehr dem DARCY Gesetz (BUSCH et al., 1993). Die Strömung erfolgt im prälinearen Bereich. Es ist ein hydraulischer Mindestgradient erforderlich, um das durch Adhäsion und Adsorption gebundene Haftwasser zu bewegen. Ferner sind bestimmte Mindestquerschnitte von Poren notwendig, um eine Durchströmung zu erlauben. Im Fall der Sinterplatten war dies nicht mehr vollständig gegeben. Als Folge trat ein Rückstau ein. Auch der während der Sickerwassererfassung angelegte Unterdruck von 60-100 hPa konnte bei den kolmatierten Sinterplatten eine Abflusshemmung nicht dauerhaft vermeiden.



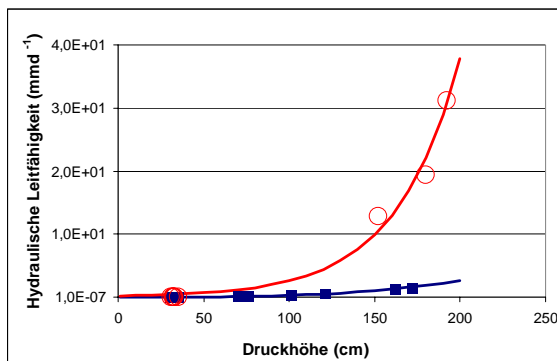


**Abb. 10.** Kolmatierte und regenerierte Sinterplatten

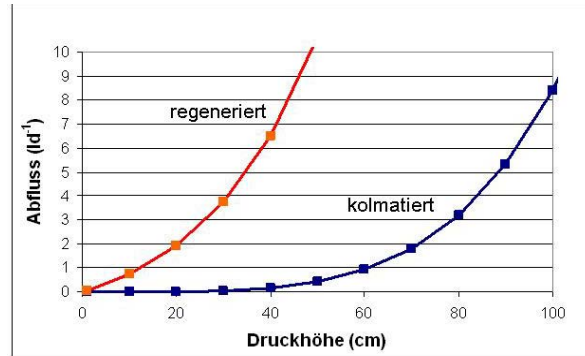


**Abb. 11.** Wasserdurchlässigkeitsmessung

Unter Berücksichtigung, dass jedes Lysimeter mit fünf Sinterplatten ausgerüstet war, ergibt sich die in Abb. 13 dargestellte Druck-Abflussbeziehung für die Lysimeter. Danach wären neue, bzw. die regenerierten Sinterplatten bei Unterdrücken zwischen 60 und 100 hPa in der Lage, das Sickerwasser ohne Rückstau abzuführen. Vorausgesetzt die Druckübertragung auf den Lysimeterboden ist gegeben. Bei den kolmatierten Sinterplatten wäre mit Staueffekten zu rechnen gewesen.



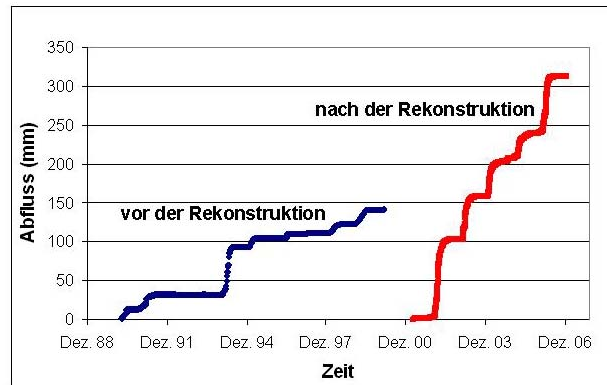
**Abb. 12.** Hydraulische Leitfähigkeit der Zinn-Bronze-Sintermetallplatten



**Abb. 13.** Beziehung aus Druckhöhe und Abfluss aus dem Lysimeter

### Sickerwasserabfluss nach Rekonstruktion

Nachdem durch die hydraulischen Untersuchungen nachgewiesen werden konnte, dass das Abflussverhalten der Lysimeter durch die Sintermetallplatten beeinflusst wird, wurden alle Lysimeter zu Gravitationslysimetern umgerüstet. Dazu wurde in alle Lysimeter an der Basis ein Dränrohr mit freiem Ausfluss eingebaut. Der Abfluss über die Sinterplatten wurde zusätzlich genutzt. Die Richtigkeit der Entscheidung wird durch den Sickerwasserabfluss in den Folgejahren bestätigt (Abb. 14). Obwohl der mittlere Jahresniederschlag im Zeitraum von 2000 bis 2006 mit 438 mm deutlich geringer war als von 1992 bis 1998 (501 mm), war der mittlere jährliche Sickerwasserabfluss nach der Rekonstruktion mit 42,8 mm deutlich höher als vorher (13,7 mm a<sup>-1</sup>). Sowohl die Sauspannung als auch der Bodenwassergehalt zeigten keine Rückstauereffekte mehr an.



**Abb. 14.** Sickerwasserabfluss aus den Lysimetern

## Schlussfolgerungen

Der Einsatz von Unterdruckelementen an der Lysimeterbasis ist eine sinnvolle Lösung, um die Sickerwasserbedingungen an natürliche Verhältnisse anzupassen (FANK & VON UNOLD, 2005). Die verwendeten Zinn-Bronze-Sintermetallplatten wären im neuen Zustand geeignet gewesen, Sickerwasser unter möglichst naturnahen Bedingungen abzuführen. Da sie jedoch schon nach kurzer Zeit durch Kalkauswaschung kolmatiert waren, war der Sickerwasserabfluss gehemmt. Um einen reibungslosen und dauerhaften Betrieb von Unterdrucklysimetern zu gewährleisten, muss sicher gestellt sein, dass

1. Der Unterdruck auf den Boden übertragen werden kann. Das Bodenmaterial an der Lysimeterbasis darf dafür nicht zu grob sein, da durch die Entwässerung über den Unterdruck sonst eine kapillare Sperre erzeugt werden würde.
2. Die Unterdruckelemente keinen hydraulischen Widerstand bilden (auch nach Alterung), wodurch der Sickerwasserabfluss beeinträchtigt wird. Sinnvoll wäre, dass die Unterdruckelemente ggf. gewechselt und regeneriert werden können.
3. Die Bodenwasserverhältnisse im inneren der Lysimeter sollten durch Messtechnik (Tensiometer und TDR) beobachtet werden können.

## Literatur

- Bodenkundliche Kartieranleitung, KA5. (2005): E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 438 p.
- BUSCH, K.-F., L. LUCKNER & K. TIEMER (1993): Geohydraulik: Lehrbuch der Hydrogeologie Band 3, Gebr. Borntr., Berlin und Stuttgart, 497 pp.
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2005): Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Feldbewirtschaftung (Wagna- Austria). Bericht über 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, 55-60.
- MÜLLER, G. (1980): Bodenkunde. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin. 392 pp.
- KASTANEK, F. (1995): Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern. Bericht über 5. Gumpensteiner Lysimetertagung. BAL Gumpenstein 25.-26. April 1995. 93-102.
- SCHINDLER, U., M. WOLFF & G. KÜHN (2001): Lysimeterstudie zum Einfluss von Düngung und Bewirtschaftung auf die Ertragsbildung, den Wasserhaushalt und die Nährstoffauswaschung im Trockengebiet der Uckermark. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, (164) 697-703.
- SCHINDLER, U., J. STEIDL & L. MÜLLER (2007): Influence of regional-scale soil heterogeneity and land use on water discharge formation in the „Stettiner Haff“ catchment in North-East Germany. Archives of Agronomy and Soil Science. 53 (1). 63-73.
- WRB World Reference Base for Soil Resources (2006): FAO, World Soil Resources Reports No. 103, Rome, 128 pp.

# Parameter des Wasserkreislaufs an der Forschungsstation Wagna (Auswertung und Ergebnisse)

Johann Fank

JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

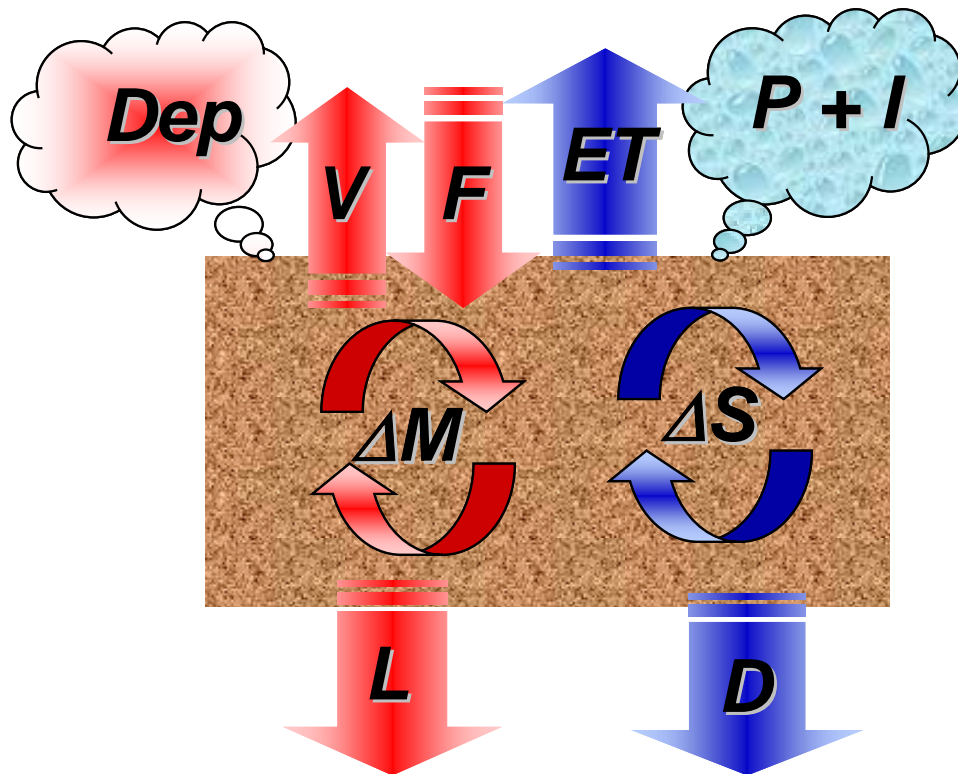
Bereits seit Langem werden zur Erfassung der standörtlichen Wasserbilanz Lysimeter eingesetzt. Aufgrund der technischen Entwicklung kann ein Großteil der „Lysimeterfehler“ in modernen Lysimetern vermieden werden. An Präzisionslysimetern, an denen das Gewicht in kurzen Zeitabständen erfasst wird, können alle Parameter der Wasserbilanzgleichung erfasst werden: der Sickerwasserfluss durch das Lysimeter wird eigens gemessen, die ansteigenden Teile der Gewichtskurve des Lysimeters repräsentieren den Bestandsniederschlag, die fallenden Teile die Gesamtverdunstung, die Änderung des Bodenwasserhaushaltes kann bilanziert werden. Am landwirtschaftlichen Versuchsfeld Wagna wurden 2004 bzw. 2006 drei monolithische Präzisionslysimeter unter unterschiedlichen Bewirtschaftungsformen eingebaut. Die Auswertung und Dokumentation nun vorliegender mehrjähriger Messdaten wird vorgestellt.

## Einleitung

Ein wesentliches Tätigkeitsfeld der angewandten Hydrologie ist die Erfassung von Wasserkreislaufparametern als Grundlage für die Erstellung von Wasser- und Stoffbilanzen. Während die Erfassung und Dokumentation des Niederschlags sowie von meteorologischen Parametern durch öffentliche Einrichtungen (Hydrografischer Dienst, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) an Standard-Messstationen durchgeführt wird, sind Messnetze zur Ermittlung und Darstellung der Grundwasserneubildung aus infiltrierenden Niederschlägen sowie der Änderung des Bodenwasserhaushaltes erst im Aufbau begriffen.

Für einen ebenen Standort in ungesättigten porösen Medien lautet die eindimensionale vertikale Wasserbilanzgleichung (Abb. 15) für einen beliebigen Zeitschritt  $P + I - ET - D \pm \Delta S = 0$ , wobei  $P$  = Niederschlag,  $I$  = Bewässerung,  $ET$  = Evapotranspiration,  $D$  = Grundwasserneubildung und  $\Delta S$  = Änderung des Bodenwasserhaushaltes im untersuchten Volumen (alle Einheiten in mm Wasserhöhe). Durch Messung der Konzentration von relevanten gelösten Stoffen kann auf Basis dieser Wasserbilanzgleichung eine Bilanzierung des Stoffflusses erfolgen. Für Ackerbaustandorte lautet die Bilanzgleichung (Abb. 15) für einen beliebigen Zeitschritt dazu:  $Dep + F - V - L - \Delta M = 0$ , wobei  $Dep$  = Zufuhr aus der Deposition (nass und trocken),  $F$  = Düngierzufuhr,  $V$  = Verlust durch Vegetationsentzug und gasförmige Verluste,  $L$  = Verlust durch Auswaschung ins Grundwasser,  $\Delta M$  = Änderung der im untersuchten Volumen gespeicherten Stoffmasse. Dabei werden die Parameter des Massentransportes meist durch die Multiplikation von Stoffkonzentrationen mit dem Wasserfluss ermittelt.

Bereits seit langer Zeit werden Lysimeter eingesetzt, um an Referenzstandorten die Grundwasserneubildung und deren zeitliche Variabilität experimentell zu erfassen. Zielgröße ist dabei in erster Linie die Sickerwassermenge als Abbild der lokalen Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von der Pflanzenbedeckung, den meteorologischen und pedologischen Verhältnissen. Sind die Lysimeter wägbar, kann auch die Gesamtverdunstung des Boden-Pflanze-Kontinuums im Lysimeter erfasst werden (YOUNG et al., 1996). Wie MEISSNER et al. (2007) zeigen, erlauben moderne Präzisionslysimeter aufgrund der hohen Genauigkeit der Wiegeeinrichtungen auch die Messung von Tau-, Nebel- und Reifniederschlag.



**Abb. 15.** Parameter der Wasser (blau)- und Stoffbilanzgleichung (rot) für ungesättigten vertikalen Fluss und Transport auf einem ebenen Standort für einen beliebigen Zeitschritt (Erläuterungen der Abkürzungen im Text)

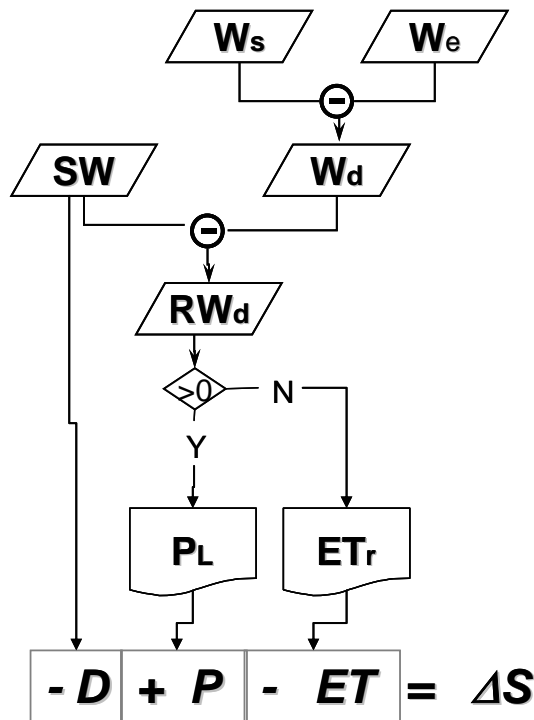
Basierend auf den Anforderungen an bodenhydrologische Messstellen (FANK et al., 2004) wurden im Sommer 2004 am Versuchsfeld Wagna zwei monolithische Präzisions-Feldlysimeter (FANK & VON UNOLD, 2007) auf Versuchsparzellen mit unterschiedlicher ackerbaulicher Bewirtschaftung errichtet. Im Jahr 2006 wurde die Anlage durch ein weiteres Lysimeter im Grünland und eine daran gekoppelte Wetterstation erweitert, um die Ergebnisse der Berechnung der Gras-Referenzverdunstung (ALLEN et al., 1998) mit gemessenen Verdunstungswerten vergleichen und gegebenenfalls die Parameter der Verdunstungsgleichung regionalspezifisch kalibrieren zu können. Die Bewertung der Unterschiede der Berechnung der Verdunstungswerte auf Tagesbasis im Vergleich zu Ergebnissen aus der Messung meteorologischer Parameter in kurzen Zeitintervallen (FANK, 2007; ALLEN et al., 2006) sollte eine messtechnische Grundlage erhalten.

### Auswertemethodik zur Messung von Wasserkreislaufparametern mittels Präzisions-Wiegelysimetern

Die Grundlage für die Messung von Wasserkreislaufparametern mittels wägbarer Lysimeter ist eine hohe Wiegegenauigkeit, die es erlaubt, die Änderungen des Gewichtes des Lysimeterkörpers in kurzen Zeitintervallen aufzuzeichnen. Heutige Wiegeeinrichtungen erlauben dabei eine Auflösung von 0,035 kg bei einem Gesamtgewicht von bis zu 6.000 kg. Der Nachweis dazu erfolgt im Feld durch eine Überprüfung mittels exakter, im Labor hergestellter Auflagegewichte (FANK, 2006).

Wird in einem Lysimeterkörper die Masse der Durchsickerung und die Änderung des Gewichtes zeitlich hoch aufgelöst erfasst, kann aus der um die Sickerwassermenge korrigierten Gewichtsganglinie der Niederschlag aus den steigenden Ganglinienteilen und die Verdunstung aus den fallenden Ganglinienteilen berechnet werden. Die Auswertung der Wasserkreislaufparameter aus den Wiegedaten der Lysimeter folgt dann dem Ablaufschema wie in Abb. 16 dargestellt. Für einen Auswertezeitschritt wird die Gewichtsänderung von Endgewicht minus Anfangsgewicht gebildet und von dieser das Sickerwassergewicht im Auswertezeitraum abgezogen. Ist diese reduzierte Gewichtsänderung  $> 0$  resultiert sie aus auf den Lysimeter im Auswertezeitraum aufgetroffenen Niederschlag, ist sie  $< 0$  aus der Verdunstung. Die resultierenden Größen Sickerwassergewicht, Lysimeterdurchsickerung und Lysimeterverdunstung können dann für den ausgewerteten Zeitschritt

direkt den Wasserbilanzparametern Grundwasserneubildung, Niederschlag und Verdunstung zugeordnet und die Änderung des Bodenwassergehaltes bilanziert werden.



**Abb. 16.** Ablaufdiagramm zur Ermittlung der Wasserkreislaufparameter aus den Wiegedaten von Präzisionslysimetern

Parameter in Abb. 16:

|            |   |
|------------|---|
| $W_s$      | Lysimetergewicht zum Auswertestart      |
| $W_e$      | Lysimetergewicht zum Auswerteende       |
| $W_d$      | Gewichtsdifferenz                       |
| $SW$       | Sickerwassergewicht im Auswertezeitraum |
| $RW_d$     | reduzierte Gewichtsdifferenz            |
| $P_L$      | Niederschlag aus Lysimeterdaten         |
| $ET_r$     | Lysimeterverdunstung                    |
| $D$        | Grundwasserneubildung                   |
| $P$        | Niederschlag                            |
| $ET$       | Evapotranspiration                      |
| $\Delta S$ | Änderung des Bodenwassergehaltes        |

Voraussetzung für diese hier vorgestellte Auswertung ist:

- eine Gewichtsganglinie des Lysimeters, die von externen Einflüssen im Vorfeld bereinigt wurde,
- eine Aufzeichnung der Sickerwassermenge in gleicher zeitlicher Auflösung wie das Lysimetergewicht,
- ein Aufzeichnungsintervall, das garantiert, dass zu Zeiten mit Niederschlag die gleichzeitig stattfindende Verdunstung vernachlässigbar ist. Vergleichende Auswertungen der Messdaten der Lysimeter an der Forschungsstation in Wagna mit Niederschlagsdaten aus der Wetterstation der ZAMG sowie mit Messungen des Niederschlags mittels einer Niederschlagswaage haben gezeigt, dass diese Bedingung bei einem Aufzeichnungsintervall von 1 Minute hinreichend erfüllt ist.

## Dokumentation von Auswerteergebnissen

Das Ergebnis der Auswertung der Wiegedaten wägbarer Lysimeter sind Wasserbilanzgrößen in gleicher zeitlicher Auflösung wie das Wiegeintervall. Diese Zeitreihen können wie auch andere hydrologische Zeitreihen bearbeitet und dokumentiert werden:

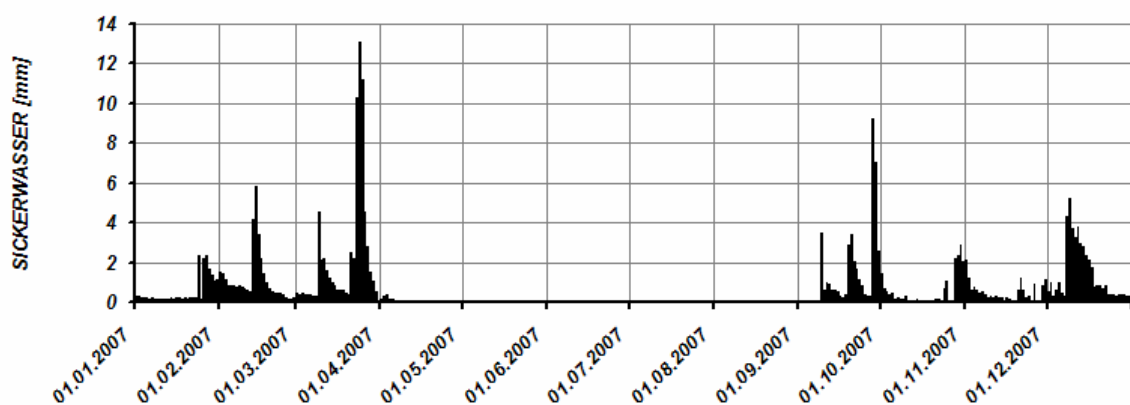
- Erstellung von Tagesmittelwerten (bzw. -summen wie in Tab. 2 beispielsweise anhand der Tages-, Monats- und Jahressummenwerte der Grundwasserneubildung am Gras-Referenzlysimeter der Forschungsstation Wagna für das Kalenderjahr 2007 – inkludierend eine grafische Darstellung der Tagessummenwerte – dargestellt),
- Dokumentation von Jahresübersichten und Zusammenführung der
- Kennwerte langjähriger hydrologischer Reihen.

**Tab. 2.** Tagessummen der Grundwasserneubildung am Gras-Referenzlysimeter der Forschungsstation Wagna im Jahr 2007 mit Monats- und Jahressummenwerten und grafischer Darstellung der Tageswerte.

Station: SICKERWASSER [mm]

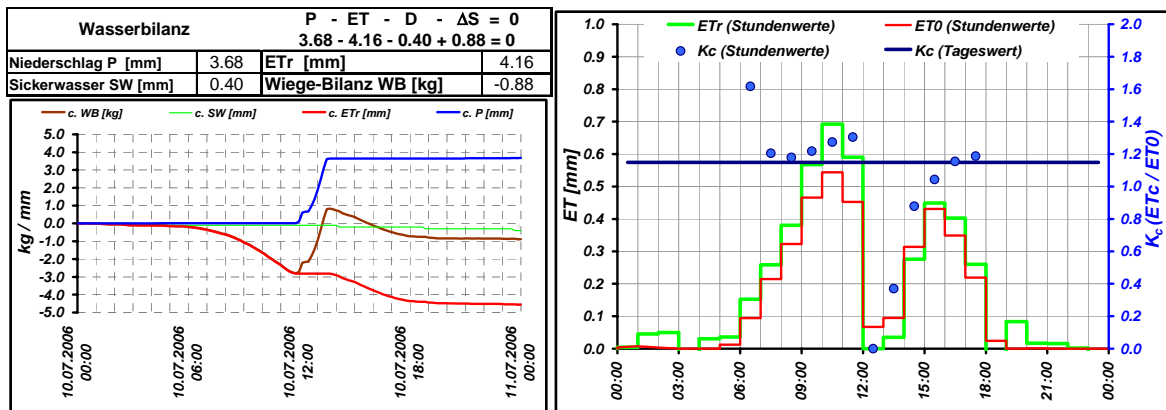
Jahr: 2007

| Tag              | Jan   | Feb   | Mar   | Apr    | Mai  | Jun  | Jul    | Aug  | Sep          | Okt   | Nov   | Dez   |
|------------------|-------|-------|-------|--------|------|------|--------|------|--------------|-------|-------|-------|
| 1                | 0.31  | 1.50  | 0.48  | 0.13   | 0.04 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 1.42  | 2.09  | 0.56  |
| 2                | 0.31  | 1.42  | 0.39  | 0.32   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.66  | 1.21  | 1.00  |
| 3                | 0.24  | 1.11  | 0.42  | 0.34   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.56  | 0.63  | 0.28  |
| 4                | 0.26  | 0.85  | 0.36  | 0.19   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.40  | 0.73  | 0.61  |
| 5                | 0.21  | 0.83  | 0.35  | 0.13   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.46  | 0.64  | 0.98  |
| 6                | 0.19  | 0.81  | 0.34  | 0.08   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.17  | 0.42  | 0.45  |
| 7                | 0.20  | 0.75  | 0.32  | 0.10   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.23  | 0.52  | 0.34  |
| 8                | 0.19  | 0.85  | 0.32  | 0.07   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.15  | 0.40  | 4.33  |
| 9                | 0.18  | 0.74  | 4.56  | 0.07   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.02 | 3.47         | 0.16  | 0.25  | 5.20  |
| 10               | 0.17  | 0.71  | 2.12  | 0.09   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 0.63         | 0.27  | 0.31  | 3.73  |
| 11               | 0.18  | 0.61  | 2.22  | 0.02   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 0.95         | 0.00  | 0.20  | 3.22  |
| 12               | 0.14  | 0.56  | 1.55  | 0.03   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.03 | 0.90         | 0.11  | 0.30  | 3.79  |
| 13               | 0.16  | 4.14  | 1.24  | 0.02   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 0.62         | 0.00  | 0.22  | 2.97  |
| 14               | 0.19  | 5.82  | 0.95  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.03 | 0.62         | 0.16  | 0.22  | 2.82  |
| 15               | 0.18  | 3.39  | 0.85  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 0.54         | 0.00  | 0.00  | 2.33  |
| 16               | 0.22  | 2.19  | 0.64  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 0.31         | 0.00  | 0.23  | 2.11  |
| 17               | 0.20  | 1.47  | 0.59  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.07 | 0.20         | 0.00  | 0.13  | 1.73  |
| 18               | 0.17  | 0.97  | 0.58  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.05 | 0.37         | 0.00  | 0.08  | 0.79  |
| 19               | 0.19  | 0.70  | 0.47  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 2.87         | 0.00  | 0.00  | 0.82  |
| 20               | 0.15  | 0.50  | 0.39  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.05 | 3.38         | 0.00  | 0.59  | 0.85  |
| 21               | 0.22  | 0.45  | 2.51  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 2.08         | 0.12  | 1.23  | 0.71  |
| 22               | 0.19  | 0.43  | 2.23  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.04 | 1.66         | 0.17  | 0.63  | 0.81  |
| 23               | 0.22  | 0.45  | 10.27 | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.02 | 1.10         | 0.00  | 0.25  | 0.37  |
| 24               | 2.37  | 0.41  | 13.13 | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.80         | 0.71  | 0.28  | 0.38  |
| 25               | 0.14  | 0.25  | 11.21 | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.36         | 1.05  | 0.00  | 0.37  |
| 26               | 2.21  | 0.19  | 4.53  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.27         | 0.02  | 0.89  | 0.29  |
| 27               | 2.36  | 0.15  | 2.79  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.27         | 0.00  | 0.00  | 0.37  |
| 28               | 1.66  | 0.20  | 1.50  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 9.21         | 2.16  | 0.00  | 0.36  |
| 29               | 1.40  | ----  | 1.09  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 7.06         | 2.34  | 0.80  | 0.41  |
| 30               | 1.10  | ----  | 0.51  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 2.58         | 2.90  | 1.17  | 0.31  |
| 31               | 1.15  | ----  | 0.09  | ----   | 0.00 | ---- | 0.00   | 0.00 | ----         | 2.05  | ----  | 0.31  |
| MS               | 17.05 | 32.44 | 69.02 | 1.60   | 0.04 | 0.00 | 0.00   | 0.60 | 40.24        | 16.27 | 14.43 | 43.60 |
| am               | 25    | 27    | 31    | 14     | 2    | 1    | 1      | 1    | 1            | 11    | 15    | 3     |
| NTS              | 0.14  | 0.15  | 0.09  | 0.00   | 0.00 | 0.00 | 0.00   | 0.00 | 0.00         | 0.00  | 0.00  | 0.28  |
| HTS              | 2.37  | 5.82  | 13.13 | 0.34   | 0.04 | 0.00 | 0.00   | 0.07 | 9.21         | 2.90  | 2.09  | 5.20  |
| am               | 24    | 14    | 24    | 3      | 1    | 1    | 1      | 17   | 28           | 30    | 1     | 9     |
| Jahreskennzahlen |       |       |       | JS     |      | NTS  | HTS    |      | Bemerkungen: |       |       |       |
| Werte            |       |       |       | 235.28 |      | 0.00 | 13.13  |      |              |       |       |       |
| am               |       |       |       | ----   |      |      | 24.03. |      |              |       |       |       |



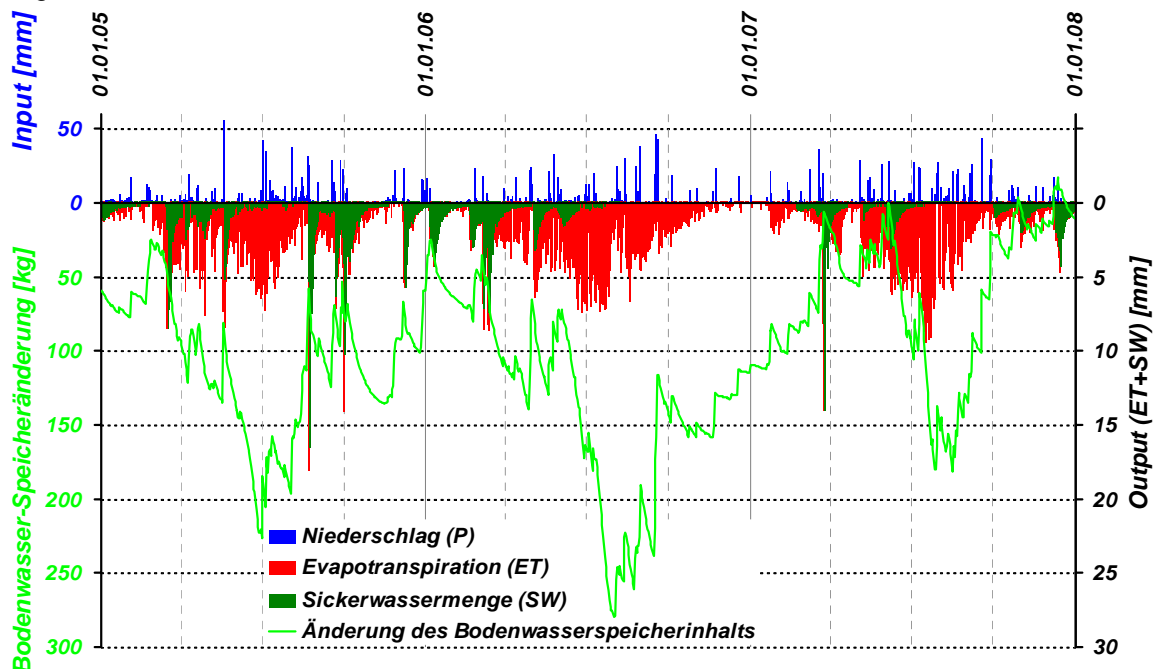
Die hohe zeitliche Auflösung der aus den Wiegedaten abgeleiteten Wasserbilanzparameter ermöglicht die Erstellung von Wasserbilanzen für beliebige Zeiträume und die Dokumentation des zeitlichen Verlaufes. In Abb. 17 ist die Tageswasserbilanz des organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeters für den 10.07.2006 dargestellt. Dieser Schönwetter-Sommertag ist während der Mittagsstunden (12:00–14:00) durch ein Gewitterereignis charakterisiert, das sich durch einen

Anstieg der Niederschlags-Summenlinie und der Wiegebilanz im zeitlichen Verlauf darstellt (Abb. 17 links). Für diesen Tag ergibt die Auswertung bei einer Niederschlagstagesumme von 3,68 mm. An der ZAMG-Wippe wurden 3,9 mm, an der Niederschlagswaage 3,2 mm registriert. In Abb. 17 rechts ist der zeitliche Verlauf der aus den meteorologischen Daten berechneten Gras-Referenzverdunstung (ET<sub>0</sub>) im Vergleich zu der aus den Wiegedaten abgeleiteten Lysimeterverdunstung (ET<sub>r</sub>) dargestellt. Sehr deutlich erkennbar ist der Einbruch der Stundenwerte der Verdunstung während des Niederschlagsereignisses. Für detaillierte Untersuchungen der Dynamik meteorologischer Größen bieten die Auswertungen von zeitlich hoch aufgelösten Lysimetermessungen eine in sich geschlossene Datenbasis.



**Abb. 17.** Tagesauswertung des organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeters vom 10.07.2006  
 links: Tages-Wasserbilanz mit zeitlichem Verlauf der Wasserbilanzgrößen in 10'-Werten  
 rechts: Vergleich von Stundenwerten der gemessenen Verdunstung mit der berechneten Gras-Referenzverdunstung sowie zeitlicher Verlauf des Pflanzenkoeffizienten (K<sub>c</sub>)

In Abb. 18 sind auf Tageswertbasis die Wasserbilanzparameter des Lysimeters auf der organisch-biologisch bewirtschafteten Parzelle am Versuchsfeld Wagna für die Jahre 2005 bis 2007 dargestellt.



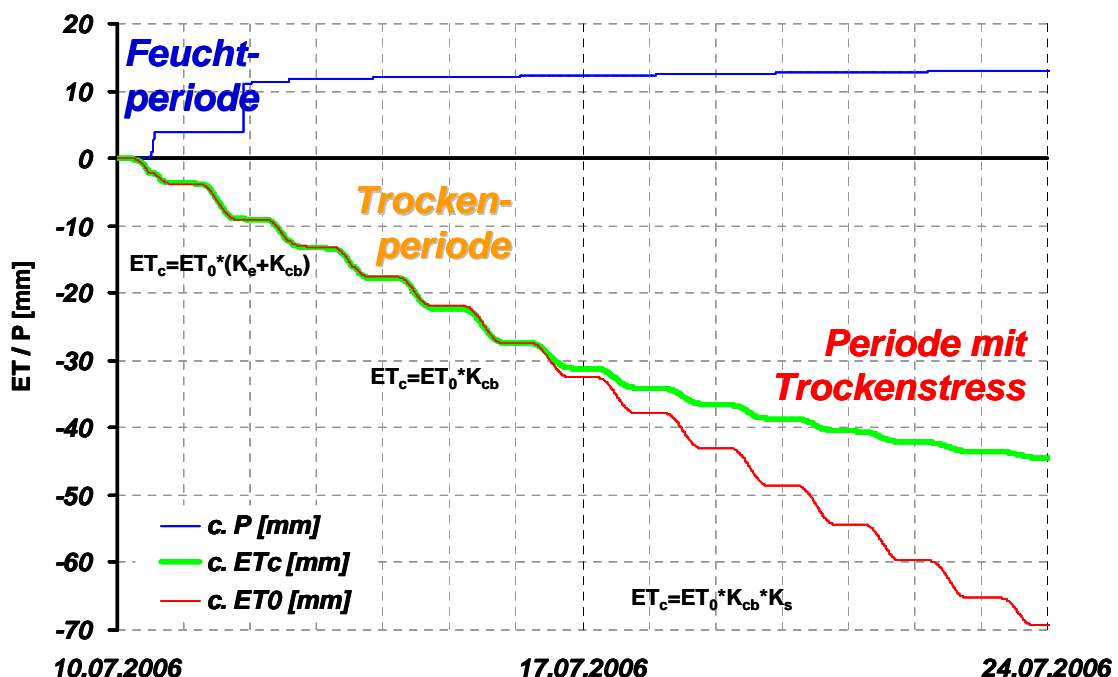
**Abb. 18.** Wasserbilanzparameter des Lysimeters auf der organisch-biologisch bewirtschafteten Parzelle am Versuchsfeld Wagna im Zeitraum 01.01.2005 bis 31.12.2007

Während die Verdunstung aufgrund der hohen Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung einen deutlichen Jahresgang aufweist, ist die Grundwasserneubildung neben den meteorologischen



Verhältnissen auch stark von der Pflanzenbedeckung und deren Wasserverbrauch abhängig. Diese steuert auch die Ganglinie der Bodenwasser-Speicheränderung, die durch Defizite in den Sommermonaten charakterisiert ist.

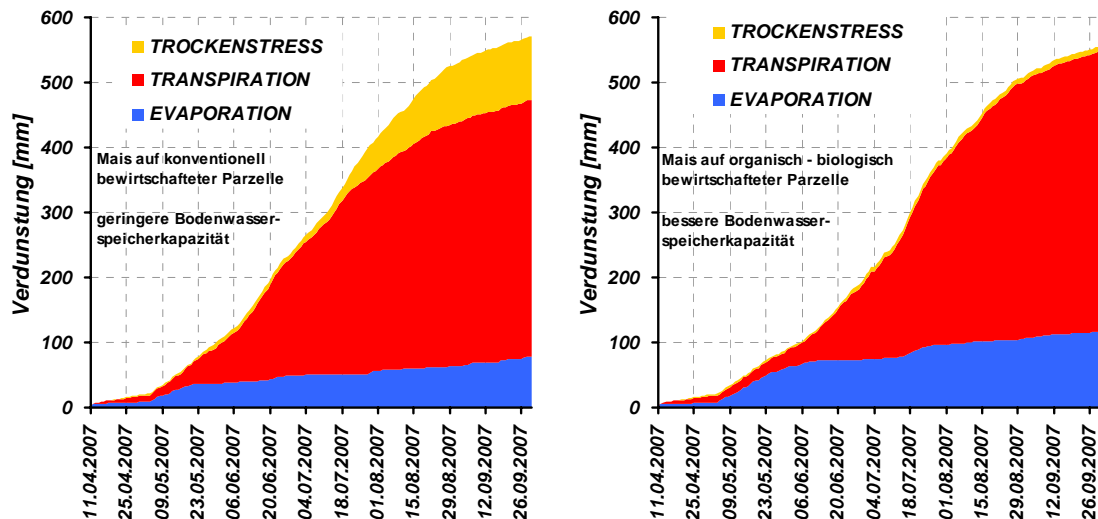
Der Vergleich der gemessenen Gras-Verdunstung am Lysimeter mit der aus meteorologischen Daten berechneten Gras-Referenzverdunstung (ALLEN et al., 2006) zeigt in Zeiträumen, in denen eine ausreichende Wasserversorgung entweder durch Niederschläge oder durch die Verfügbarkeit aus dem gespeicherten Bodenwasser gegeben ist, eine hervorragende Übereinstimmung sowohl in der Menge als auch im zeitlichen Verlauf (Abb. 19). Durch die Messungen am Gras-Lysimeter konnte der der FAO-PENMAN-MONTEITH Berechnung zugrunde liegende Transpirationskoeffizient für Gras mit einer Schnittlänge von 12 cm ( $K_{cb}$ ) von 1 bestätigt werden. In Zeiträumen, in denen der Grasbestand am Lysimeter ausschließlich aus dem Bodenwasservorrat versorgt wird, stimmen die gemessenen Gesamtverdunstungswerte mit den berechneten Werten überein. Die Pflanzenverdunstung errechnet sich für diese Zeiträume demnach zu  $ET_c = ET_0 * K_{cb}$  (Trockenperiode in Abb. 19). In Zeiten während bzw. kurz nach Niederschlagsereignissen erfolgt zusätzlich zur Pflanzentranspiration eine Evaporation von der Boden- bzw. Pflanzenoberfläche. Unter der Annahme eines  $K_{cb}$  Wertes von 1 kann aus dem Vergleich des gemessenen Verdunstungsverlaufes mit dem Verlauf der berechneten Verdunstung der Evaporationskoeffizient ( $K_e$ ) ermittelt werden. Für Feuchtperioden errechnet sich dann die Gesamtverdunstung zu  $ET_c = ET_0 * (K_e + K_{cb})$ , wie in Abb. 19 dargestellt. Reicht die Wassernachlieferung aus dem Boden in Zeiten längerer Niederschlagsfreiheit nicht mehr aus, um die Pflanzen ausreichend mit Wasser zu versorgen, tritt Trockenstress auf (Abb. 19). Der Trockenstressfaktor  $K_s$  kann aus dem Vergleich der gemessenen Gesamtverdunstung mit der berechneten Gras-Referenzverdunstung für diese Zeiträume nach der Gleichung  $K_s = ET_c / (ET_0 * K_{cb})$  berechnet werden (Abb. 19). Wie hier dargestellt, können zeitlich hoch aufgelöste Messungen der Pflanzenverdunstung im Vergleich mit der berechneten Referenzverdunstung unter Anwendung des „Double Coefficient“-Verfahrens (ALLEN et al., 1998) zur Aufteilung der Gesamtverdunstung in ihre Komponenten Evaporation und Transpiration verwendet werden. Voraussetzung dafür ist die Verfügbarkeit der entsprechenden Daten: zeitlich hoch aufgelöste und sehr genaue Messdaten des Lysimetergewichtes sowie kurzintervallig erfasste meteorologische Parameter. Eine Überprüfung der Korrektheit dieser Daten im Vorfeld der Auswertung ist eine Grundvoraussetzung für deren Anwendung. Automatisierte Routinen können bei dieser Prüfung ein wesentliches Hilfsmittel darstellen.



**Abb. 19.** Vergleich der Summenkurven der berechneten Gras-Referenzverdunstung (c.  $ET_0$ ) nach ALLEN et al. (2006) mit der gemessenen Gesamtverdunstung (c.  $ET_c$ ) aus dem Gras-Lysimeter bei unterschiedlichen meteorologischen Verhältnissen

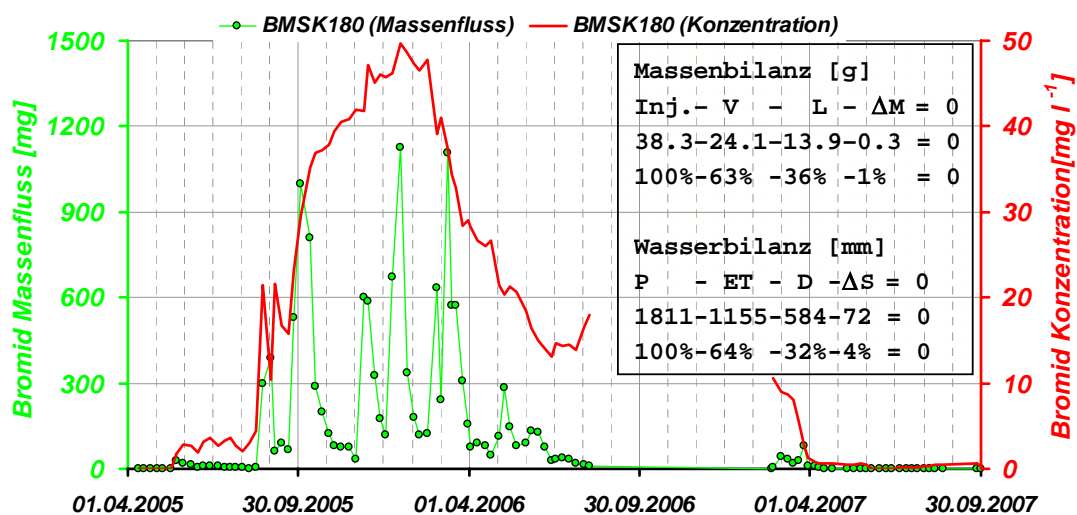


Die Bedeutung unterschiedlicher Bodenwasserspeicherverhältnisse für die Verdunstungsleistung der Pflanzen (Mais) in ihrem zeitlichen Verlauf ist in Abb. 20 dargestellt. Während der Standort mit niedrigerem Bodenwasserspeichervermögen ab den Sommermonaten durch einen erheblichen Anteil an Trockenstress charakterisiert ist, zeigt der Boden mit höherem Speichervermögen praktisch keine Auswirkung sommerlicher Trockenperioden. Der unterschiedliche Verlauf der Evaporation an den beiden Standorten resultiert aus der unterschiedlichen Entwicklung des Pflanzenbestandes zu Beginn der Vegetationsperiode. Diese unterschiedliche Entwicklung wurde gerade im Jahr 2007 mit einem sehr trockenen April durch die Wahl des Anbauzeitpunktes entscheidend gesteuert.



**Abb. 20.** Vergleich der Summenlinien der Verdunstungskomponenten Evaporation, Transpiration und potentielle Pflanzenverdunstung in der Vegetationsperiode 2007 bei Mais auf unterschiedlichen Standorten

Basierend auf der detaillierten Wasserbilanz eines Lysimeterstandortes kann bei Vorliegen entsprechender Messungen der Konzentration gelöster Stoffe eine geschlossene Massenbilanz erstellt werden. Beispielhaft ist dies in Abb. 21 für einen Markierungsversuch am organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeter dargestellt.



**Abb. 21.** Massenbilanz für Bromid im Rahmen eines Markierungsversuchs am organisch-biologisch bewirtschafteten Lysimeters basierend auf der aus den Gewichtsmessungen abgeleiteten Wasserbilanz

Im Rahmen dieses Markierungsversuches, der zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Lysimeters, der Erkundung eventuell vorhandener präferentieller Transportpfade aufgrund des Lysimetereinbaues und zur Ermittlung von Stofftransportgeschwindigkeiten im Lysimeter als Basis

für die Validierung von Stofftransportmodellen durchgeführt worden war, wurden am 12.04.2005 auf der Oberfläche des Lysimeters 38,3 g Bromid gelöst in 1 Liter Wasser in wenigen Minuten aufgesprüht. Am Lysimeterabfluss wurde die Konzentration von Bromid im Sickerwasser in wöchentlichen Sammelproben gemessen. Zusätzlich wurde in den vom Lysimeter geernteten Pflanzenbeständen der Gehalt an Bromid nach jedem Erntevorgang analysiert.

Das Ergebnis der Auswertung des Markierungsversuches zeigt eine außerordentlich gute Übereinstimmung der Massenbilanzparameter mit der Wasserbilanz des Lysimeters: 64 % Verdunstung stehen im Zeitraum des Tracerversuches 63 % des Stoffentzuges durch die Vegetation gegenüber, etwas mehr als 30 % des Bromids wurde durch 36 % an Grundwasserneubildung in Richtung Grundwasser ausgewaschen. Durch diesen Versuch konnte somit auch das konservative Verhalten von Bromid im Boden-Pflanze-Wasser-Kontinuum dokumentiert werden. Eine bevorzugte Aufnahme oder ein Aufnahmearrhalt von Bromid durch die Pflanzen war nicht erkennbar.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Erfassung der standörtlichen Parameter des Wasserkreislaufes ist mit Hilfe moderner wägbare Präzisionslysimeter mit hoher Genauigkeit möglich. Durch entsprechende Auswertungsmethoden zeitlich hoch aufgelöster Messdaten sind sowohl der Bestandsniederschlag, die Verdunstung und die Grundwasserneubildung mit einem einzigen Messinstrument abzuleiten. Durch Anbindung von Berechnungsergebnissen der Gras-Referenzverdunstung aus der zeitlich hoch aufgelösten Messung meteorologischer Parameter ist eine Aufsplittung der Gesamtverdunstung in ihre Komponenten Evaporation und Transpiration und die Erfassung des Wasserstressfaktors möglich. Gerade letzteres wird in Zeiten zunehmender Dauer von Trockenperioden für die Steuerung von Bewässerungsmaßnahmen von steigender Relevanz werden. Liegen zusätzlich zu den Messungen der Wasserkreislaufparameter auch Messungen der Input- und Outputkonzentration von gelösten Stoffen vor, kann basierend auf der detaillierten Wasserbilanz auch eine geschlossene Massenbilanz erstellt werden.

Wie am Beispiel der Lysimeter der Forschungsstation in Wagna dokumentiert wurde, stellen moderne monolithische wägbare Präzisionslysimeter ein geeignetes Instrumentarium dar, um an ausgewählten Referenzstandorten die Parameter des Wasser- und Stoffkreislaufs in einer sich verändernden Umwelt exakt erfassen zu können. Sie liefern damit die bestmögliche Basis für die Erstellung und Validierung von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen, die zur Übertragung von Punktdaten in die Fläche auf einer regionalen Skala unerlässlich sind.

## 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 S.
- ALLEN, R. G., W. O. PRUITT, J. L. WRIGHT, T. A. HOWELL, F. VENTURA, R. SNYDER, D. ITENFISU, P. STEDUTO, J. BERENGENA, J. B. YRISARRY, M. SMITH, L. S. PEREIRA, D. RAES, A. PERRIER, I. ALVES, I. WALTER & R. ELLIOTT (2006): A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1–22, Elsevier.
- FANK, J. (2006): Monolithic field lysimeters for precise weighing – a basis for balancing water flow. *Proceedings of the international Symposium „Soil physics and rural water management – Progress needs and challenges“*, September 28–29, 2006, 89–92, Vienna / Austria.
- FANK, J. (2007): Die Gras-Referenzverdunstung: Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit von Messgeräten und Messintervall. Bericht zur 12. Gumpensteiner Lysimetertagung „Lysimetrie im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken“, 19.–20. April 2007, 53–56 Irdning.
- 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.): *Untersuchungen zur Sickerwasserprognose in Lysimetern*. GSF-Bericht 02/04, 79–86, München.
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. *International Water & Irrigation*, Vol. 27, No. 3, 28–32, Tel Aviv.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP, M. SEYFARTH & H. BORG (2007): Measurement of dew, fog, and rime with a high-precision gravitation Lysimeter. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 2007, 170, 335–344.
- YOUNG, M. H., P. J. WIERENGA & C. F. MANCINO (1996): Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies. *Soil Sci.* 161, 491–501.

# **Parametrisierung hydraulischer Funktionen zur Modellierung des Wassertransports in der ungesättigten Bodenzone**

Wolfgang Durner

Institut für Geoökologie  
Technische Universität Braunschweig  
Bodenphysik  
Langer Kamp 19c  
D-38106 Braunschweig

## **Zusammenfassung**

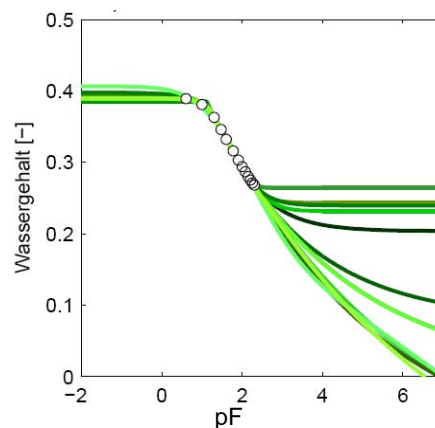
Die Übertragung von Labormessungen der bodenhydraulischen Eigenschaften auf die Feldskala stellt ein Schlüsselproblem der gegenwärtigen Bodenhydrologie dar. Natürliche Böden sind in der Regel strukturiert, und die Konsequenzen daraus für den effektiven Transport von Wasser und Inhaltsstoffen sind zwar qualitativ bekannt, aber im konkreten Anwendungsfall schwer quantitativ vorherzusagen. Wir gehen davon aus, dass die genaue Bestimmung effektiver hydraulischer Eigenschaften eine Schlüsselrolle bei der Charakterisierung strukturierter Böden darstellen kann, und somit für weitere Fortschritte notwendig ist. Es zeigt sich jedoch, dass die traditionellen Messverfahren zu unsensitiv für diese Fragestellung sind, und ein vereinfachtes, in den wichtigen Feuchtebereichen nahe Sättigung und zur Austrocknung hin sogar falsches Bild der hydraulischen Eigenschaften vermitteln. Dieser Beitrag zeigt diese Problematik beispielhaft auf. Die Bestimmung hydraulischer Parameter muss somit auf Mess- und Auswerteverfahren basieren, welche systematische Fehler im Prozessmodell und dem Modell der hydraulischen Eigenschaften vermeiden und eine höhere Genauigkeit aufweisen. Mit Multi-Step-Ausflussexperimenten und mit Verdunstungsexperimenten im Labor unter Nutzung inverser Simulation und vereinfachter Auswertungstechniken stehen inzwischen Werkzeuge bereit, mit welchen effektive hydraulische Eigenschaften von uni-, bi- oder mehrmodalen Porensystemen erstaunlich präzise bestimmt werden können. Weitere Herausforderungen für die Zukunft bestehen in der optimalen Auswertung von Daten zur Feuchtedynamik unter natürlichen Bedingungen, wie sie an Präzisionslysimetern oder direkt im Freiland erfasst werden können.

## **Einleitung und Problemstellung**

Die Simulation des Wasser- und Stofftransports in Böden hat sich in den letzten Jahren zu einem unverzichtbaren Werkzeug der Grundwasserbewirtschaftung und des Trinkwasserqualitäts Managements entwickelt. Basis jeder Simulation sind begründete und genügend präzise Annahmen über die hydraulischen Funktionen, spezifisch über die Fähigkeit des Bodens, Wasser aufzunehmen (Retentionsfunktion) und seine Fähigkeit, Wasser zu leiten (Leitfähigkeitskurve). Zur Verwendung in Simulationsprogrammen auf Basis der RICHARDS-Gleichung werden diese Beziehungen traditionell als einfache parametrische Funktionen dargestellt. In den letzten 50 Jahren wurde eine Vielzahl von Vorschlägen für den „geeignetsten“ Funktionstyp publiziert. Diese unterscheiden sich einerseits nur wenig voneinander, missachten andererseits aber ganz grundlegende Erkenntnisse. Hierzu gehören (i) die Frage nach dem „richtigen“ Verlauf der Funktionen nahe Sättigung und im Bereich stärkerer Austrocknung, (ii) die Frage der Übertragbarkeit der ermittelten hydraulischen Eigenschaften von einem kleinen Labor- auf ein großes Freilandsystem, (iii) die Frage nach der Berücksichtigung von Lufteinschlüssen nahe Sättigung sowie Phänomenen des Zweiphasenflusses im allgemeinen, und (iv) die Frage nach der Notwendigkeit und der geeigneten Art der Berücksichtigung von Hysterese und „dynamischen Effekten“. Mit diesen Fragen untrennbar gekoppelt ist die Frage nach der besten Mess- oder Abschätztechnik zur Bestimmung der hydraulischen Funktionen (DURNER et al., 1996). Die Behandlung aller genannten Problembereiche würde den Rahmen dieses Beitrags sprengen. Unser Ziel ist deshalb, den derzeitigen Stand der Bestimmungs- und Parametrisierungstechnik für hydraulische Eigenschaften an Laborsystemen vorzustellen.

## Parametrisierung unimodaler Retentionsfunktionen

HERBST (2008) recherchierte unlängst 32 Vorschläge für die mathematische Beschreibung von Retentionskurven aus der Literatur, die sämtlich auf der Annahme einer unimodalen Porengrößenverteilung basieren. Zu einem Vergleichstest wählte er 14 Funktionstypen aus, die in vorherigen Studien ihre grundsätzliche Eignung zur Beschreibung von Messdaten gezeigt hatten. Diese Funktionen wurden an 202 Datensätze aus der Messdatenbank UNSODA angepasst, welche Mindestanforderungen in Hinblick auf die Vollständigkeit der Messverfahrensbeschreibung und Datenanzahl entsprachen. Die Parameterbestimmung für die Funktionen erfolgte durch Anpassung an die Datensätze mit der Software SHYFIT 2.0 (PETERS und DURNER, 2007 a). Die Optimierung der bis zu 5 Parameter je Funktionstyp basierte auf einer Least-Squares-Anpassung der Modelle an die Daten mittels eines robusten nichtlinearen Optimierungsalgorithmus. Entgegen bisherigen Studien verwendete HERBST (2008) eine verbesserte Anpassungsmethodik, welche systematische Fehler aufgrund von Linearisierungen des Wassergehalts im gemessenen System vermied („integrale Methode“; PETERS und DURNER, 2006). HERBST fand, dass die Anpassungsgüten der Modelle sich zwar unterschieden, die Unterschiede bei den besten Modellen (VAN GENUCHTEN, 1980; KOSUGI, 1994; GLOBUS, 1987) aber sehr gering ausfielen. Ein wichtiges Ergebnis war, dass der Verlauf der Funktionen im Gebiet, in dem Messdaten vorliegen, oft fast identisch ist, im extrapolierten Bereich jedoch sehr große Unterschiede auftreten können (Abb. 22).



**Abb. 22.** Beispiel für die Anpassung von 14 verschiedenen Funktionstypen an Datensatz 2432 der UNSODA Datenbank

## Flexible Parametrisierung von Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen

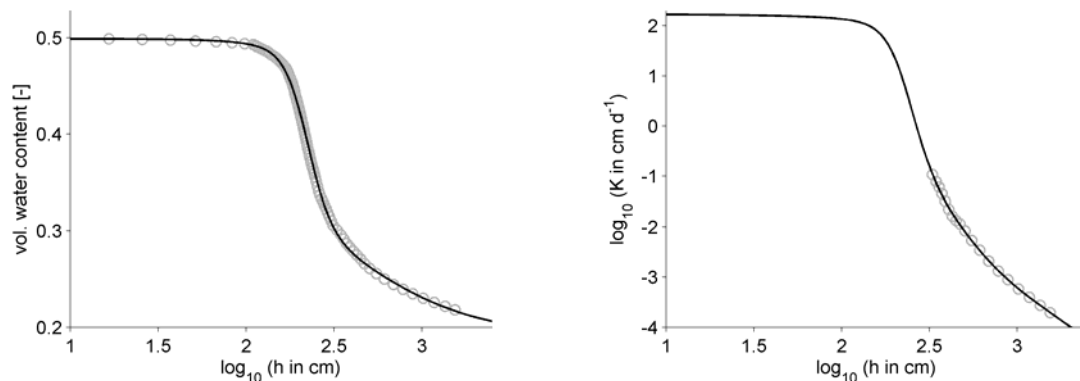
Abb. 22 verdeutlicht, dass die klassische Bestimmungsmethodik, welche auf der hydrostatischen Equilibrierung von Stechzylindern mit definierten hydraulischen Potentialen basiert, im Bereich nahe Sättigung und im Bereich zur Austrocknung hin häufig nicht genügend Daten bereitstellt. Der Bereich nahe Sättigung ist aber entscheidend für das hydraulische Verhalten von fein texturierten Böden. Diese sind aller Regel nach aggregiert, was sich in Verläufen der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion niederschlägt, welche durch keines der etablierten unimodalen Modelle richtig wiedergegeben werden kann (DURNER, 1994). Zur Austrocknung hin hat sich gezeigt, dass „richtige“ Verläufe von Retentionsfunktionen in der Lage sein müssen, einen Abfall des Wassergehalts über den typischen „Restwassergehalt“ hinaus wiederzugeben (z. B. FAYER und SIMMONS, 1995; KHLOSI et al., 2006). Um die nötigen Informationen für diese Funktionstypen zu erhalten werden Messungen sowohl im sehr feuchten als auch im trockenen Bereich benötigt. Dies erfordert gegenüber verbesserte Mess- und Auswerteverfahren.

## Geeignete Mess- und Auswertungsverfahren

Multi-Step-Ausfluss-Experimente, welche durch inverse Simulation ausgewertet werden, sind als geeignetste Labormethodik zur Bestimmung hydraulischer Eigenschaften für den feuchten Bereich anzusehen (DURNER et al., 1999; HOPMANS et al., 2002). Es lassen sich damit nicht nur die Verläufe hydraulischer Funktionen nahe Sättigung sehr sensitiv beschreiben, sondern darüber

hinaus Retentions- und Leitfähigkeitsfunktionen simultan und in konsistenter Weise gewinnen. Anwendungen dieser Methodik an ungestörten Bodensäulen haben gezeigt, dass meist flexible Funktionstypen eingesetzt werden müssen, um experimentelle Verläufe widerspruchsfrei beschreiben zu können. Neben der Verwendung bimodaler Funktionen (ZURMÜHL und DURNER, 1998) besteht neuerdings die Möglichkeit, frei geformte hermitesche Spline-Funktionen zur Beschreibung zu verwenden (BITTERLICH et al., 2004). Damit ist nicht nur eine optimale Beschreibung der beobachteten Wasser-Fließdynamik möglich, sondern auch eine unproblematischere Bestimmung der Funktionskoeffizienten, da diese schwächer miteinander korrelieren als bei den üblicherweise verwendeten global parametrisierten Funktionen (IDEN und DURNER, 2007). Einschränkung muss zur inversen Simulation gesagt werden, dass ihre Verwendung allerdings mit einem hohen Maß an Expertenwissen verbunden ist und somit geschulte und erfahrene Bearbeiter benötigt.

Mit der Verdunstungsmethode steht demgegenüber eine vergleichsweise einfache und robuste Messmethodik bereit, mit deren Hilfe in kurzer Messzeit ebenfalls mit hoher Präzision der Verlauf der Retentions- und der Leitfähigkeitsfunktion simultan bestimmt werden können. Abb. 23 verdeutlicht die damit erzielbare Datengüte im mittleren bis moderat trockenen Feuchtebereich, anhand derer parametrische Modelle weitaus besser abgeschätzt werden können, als dies bei den hydrostatischen Messverfahren möglich ist.



**Abb. 23.** Mit dem vereinfachten Verdunstungsverfahren nach Schindler (1980) ermittelte Messdaten für die Retentionsfunktion und Verdunstungsfunktion eines Schluffs, sowie an die Daten angepasstes parametrisches Modell (nach PETERS und DURNER, 2008 b)

Zur Durchführung der Verdunstungsmethode ist fertig konfigurierte Hard- und Software verfügbar. So stellt die Fa. Umweltanalytische Messsysteme München (UMS) z. B. das Gerät HYPROP® bereit, in dem die Methodik nach SCHINDLER (1980) gerätetechnisch robust umgesetzt ist und mit dem Auswerteverfahren von PETERS und DURNER (2007, 2008 a) kombiniert wird. Im Ergebnis ergibt das Verfahren die hydraulischen Funktionen nach BROOKS and COREY (1964), VAN GENUCHTEN (1980) oder DURNER (1994). IDEN und DURNER (2008) haben für das etwas aufwändigere Verdunstungsverfahren nach WIND gezeigt, dass damit selbst frei geformte Funktionen mit höchster Präzision und Verlässlichkeit bestimmt werden können.

## Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Bestimmung und Parametrisierung bodenhydraulischer Eigenschaften hat in den letzten Jahren signifikante Fortschritte gemacht, die heute erlauben, unnötige systematische Fehler zu vermeiden und bessere Pedotransferfunktionen zur Beschreibung der Prozesse auf größerer Skala abzuleiten. Unabhängig davon bleibt allerdings die Frage nach der Übertragung gemessener Eigenschaften von der Labor- auf die Freilandskala eine große Herausforderung für die Zukunft. Der Auswertung von an Präzisionslysimetern erhobenen Messdaten (FANK und VON UNOLD, 2005) über inverse Simulation dürfte hierbei eine entscheidende Rolle zukommen (DURNER et al., 2007; 2008 a, b; JANSEN et al., 2007; JANSEN und DURNER, 2008).

## Literatur

- 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.
- BROOKS, R. H. & A. T. COREY (1964): Hydraulic properties of porous media. *Hydrol. Pap. No. 3.*, – Colorado State Univ., Fort Collins, 1–27.
- DURNER, W. (1994): Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure, – *Water Resour. Res.* 30, 211-223.
- DURNER, W., J. HALBERTSMA, & M. CISLEROVA (ed.) (1996): European Workshop on Advanced Methods to Determine Hydraulic Properties of Soils, Thurnau, June 10–12, 1996, Department of Hydrology, University of Bayreuth.
- DURNER, W., B. SCHARNAGL, S. IDEN, L. WEIHERMÜLLER, & H. VEREECKEN (2007): Übertragbarkeit hydraulischer Eigenschaften aus Laborversuchen auf ein Testlysimeter, – *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 110, Heft 1, S. 87-88.
- DURNER, W., B. SCHULTZE, & T. ZURMÜHL (1999): State-of-the-art in inverse modeling of inflow/outflow Experiments, – In: M. TH. VAN GENUCHTEN, F. J. LEIJ, & L. WU (ed.) *Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*, University of California, Riverside, CA., 661-681.
- DURNER, W., U. JANSEN, & S. C. IDEN (2008 a): Effective Hydraulic Properties of Layered Soils at the Lysimeter Scale Determined by Inverse Modelling, – *European Journal of Soil Science*, 59, 114-124. doi: 10.1111/j.1365-2389.2007.00972.x.
- DURNER, W., U. JANSEN, & S. C. IDEN (2008 b): Bestimmung effektiver Parameter für die Modellierung des Wassertransports auf der Lysimeterskala. – In: FANK, J. & CH. LANTHALER (Hrsg., 2007): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management.* – Beiträge z. Hydrogeologie, 56, (in Druck)
- FANK, J. & G. VON UNOLD (2005). Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Freilandbewirtschaftung (Wagna, Austria), – In: 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, *Lysimetrie im Netzwerk der Dynamik von Ökosystemen*, April 5-6, 2005, Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, Raumberg-Gumpenstein, S. 55-60. A-8952 Irdning.
- FAYER, M. J. & C. S. SIMMONS (1995): Modified soil water retention functions for all matric suctions. – *Water Resour. Res.* 31, 1233–1238.
- GLOBUS, A. M. (1987): Soil hydrophysical description of agroecological mathematical models (in Russian). – *Gidrometeoizdat*, St. Petersburg, Russia.
- HERBST, M. (2007): Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven. – Diplomarbeit, Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenphysik und Bodenkunde, TU Braunschweig.
- HOPMANS, J. W., J. ŠIMUNEK, N. ROMANO & W. DURNER (2002): Simultaneous determination of water transmission and retention properties - Inverse methods. p 963-1008. – In: J. H. DANE & G. C. TOPP (Eds.): *Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods*. 4th Edition. SSSA Book Series No. 5, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, 2002.
- IDEN, S. C. & W. DURNER (2007): Free-Form estimation of the unsaturated soil hydraulic properties by inverse modelling using global optimization, – *Water Resour. Res.* 43, W07451, doi:10.1029/2006 WR005845.
- IDEN, S. C. & W. DURNER (2008): Free-Form estimation of soil hydraulic properties using Wind's method. – *European Journal of Soil Science*, accepted.
- JANSEN, U. & W. DURNER (2008): Modellierung des Bodenwasserhaushaltes und des Tracertransports auf der Lysimeterskala. – In: FANK, J. & CH. LANTHALER (Hrsg., 2007): *Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management.* – Beiträge z. Hydrogeologie, 56, (in Druck)
- JANSEN, U., W. DURNER & J. FANK (2007): Effektive bodenhydraulische Eigenschaften von Großlysimetern, In: *'Lysimetrie im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken'* – 12. Gumpensteiner Lysimetertagung am 17. und 18. April 2007, HBFL Raumberg-Gumpenstein, S. 47-52, A-8952 Irdning.
- KHLOSI, M., W. M. CORNELIS, D. GABRIELS & G. SIN (2006). Simple modification to describe the soil water retention curve between saturation and oven dryness. – *Water Resour. Res.* 42.
- KOSUGI, K. (1994). Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention. – *Water Resour. Res.* 30, 891–901.
- PETERS, A. & W. DURNER (2006): Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments, – *Water Resour. Res.*, 42, W11401, doi:10.1029/2006WR004952.
- PETERS, A. & W. DURNER (2007): Optimierung eines einfachen Verdunstungsverfahrens zur Bestimmung bodenhydraulischer Eigenschaften, – *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft*, Band 110, Heft 1, S. 125-126.
- PETERS, A. & W. DURNER (2008 a): Simplified evaporation method for determining soil hydraulic properties – *J. Hydrol.*, accepted.
- PETERS, A. & W. DURNER (2008 b): A simple model for describing hydraulic conductivity in unsaturated porous media accounting for film and capillary flow, – *Water Resources Research*, submitted.
- SCHINDLER, U. (1980): Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben, – *Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd.*, 24, 1-7.
- ZURMÜHL, T. & W. DURNER (1998): Determination of parameters for bimodal hydraulic functions by inverse modeling, – *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 874-880.

# Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala – ein Modellvergleich

Norbert Böttcher<sup>1</sup>, Johann Fank<sup>2</sup>, Rudolf Liedl<sup>1</sup> & Thomas Reimann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden  
Institut für Grundwasserwirtschaft  
Karcherallee 8  
D-01277 Dresden

<sup>2</sup> JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern leicht verfügbare Bodenwasserhaushalts, Wärme- und Stofftransportmodelle geeignet sind, um die Wechselwirkungen der Systeme Boden, Pflanze und Atmosphäre über lange Zeiträume hinweg zu simulieren. Aus diesem Grund werden hier drei numerische Transportmodelle miteinander verglichen.

Die drei Modelle wurden dafür auf der Basis von Lysimeterdaten der hydrologischen Forschungsstation Wagna einheitlich kalibriert, soweit geringfügige Unterschiede in den Modellansätzen dies zuließen. Im Anschluss daran wurden auf Grundlage realer Wetterdaten verschiedene mögliche Klimaszenarien generiert und die kalibrierten Modellprogramme in Form von Langzeitsimulationen damit konfrontiert. Bei dem anschließenden Vergleich der Ergebnisse zeigte sich, dass die Modelle trotz nahezu einheitlicher Kalibrierung bei den Langzeitsimulationen zu abweichenden Resultaten führten.

## Einleitung und Zielsetzung

Anfang des Jahres 2007 veröffentlichte die Zwischenstaatliche Sachverständigengruppe über Klimaänderungen (IPCC) einige beunruhigende Fakten über das globale Klima. So hat sich innerhalb der letzten 100 Jahre die Durchschnittstemperatur der Erde um 0,74 K erhöht, der Meeresspiegel stieg zwischen 1963 und 2003 um mehr als 7 cm an. Die IPCC sieht es als gesichert an, dass sich das Klima im 21. Jahrhundert weiterhin verändern wird und dass der Meeresspiegel weiter ansteigt (IPCC, 2007).

Diese Entwicklung hat auch Auswirkungen auf lokale Prozesse im System der ungesättigten Zone und beeinflusst unter anderem durch veränderte bodenhydraulische Eigenschaften auch die Ausbildung von Vegetation. Mit Hilfe von Lysimetern können die hydraulischen, thermodynamischen, biologischen und chemischen Prozesse, die in der ungesättigten Zone ablaufen, untersucht werden. Zur mathematischen Beschreibung dieser Prozesse ist eine Vielzahl von Wasser-, Wärme- und Stofftransportmodellen entwickelt worden, von denen einige zur freien Verfügung stehen. Die Genauigkeit dieser Modelle kann mit Lysimeterdaten verifiziert werden.

Inwiefern diese leicht verfügbaren Bodenwasserhaushaltsmodelle in der Lage sind, den Einfluss von relativ geringen, langfristig wirkenden Parameteränderungen des Klimas in Form von Langzeitsimulationen zu berücksichtigen, soll in diesem Beitrag untersucht werden.

## Material und Methoden

### Modellauswahl

Bei der Auswahl der zu vergleichenden Modellprogramme war deren leichte Verfügbarkeit ein entscheidendes Kriterium. Es sollte getestet werden, ob auch frei erhältliche Programme in der Lage sind, die an einem Präzisionslysimeter erfassten Vorgänge mit hoher Genauigkeit nachzubilden. Die zu vergleichenden Bodenmodelle sollten den eindimensionalen Transport von Stoffen und Energie simulieren und dabei zeitlich variable Randbedingungen unterstützen. Die Auswahl fiel auf die folgenden drei Modellprogramme:



- Hydrus 1D (ŠIMŮNEK und VAN GENUCHTEN, 2005) beschreibt den Wasser-, Wärme und Stofftransport in Böden mit variabler Sättigung.
- CoupModel (JANSSON und KARLBERG, 2001) simuliert alle relevanten Prozesse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre.
- STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998) beschreibt den Wasser- und Stickstofftransport sowie die Pflanzenentwicklung an einem landwirtschaftlich genutzten Standort.

## Datengrundlage

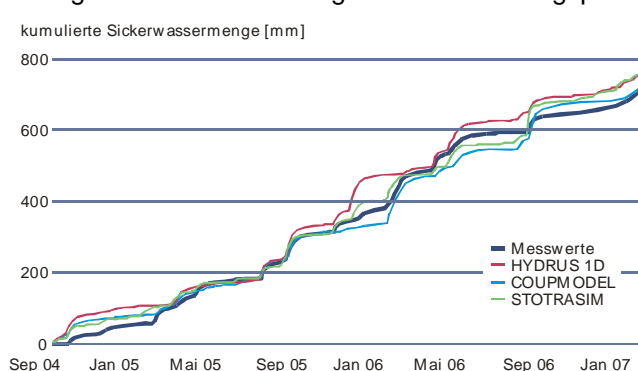
Die zur Modellkalibrierung und -validierung benötigten Daten wurden in einem Präzisionslysimeter der hydrologischen Forschungsstation Wagna, Steiermark (Österreich) gesammelt. Das Lysimeter ist in eine landwirtschaftlich genutzte, konventionell bewirtschaftete Parzelle integriert. Die gesammelten Daten umfassen:

- Bodenwassergehalt
- Bodentemperatur
- Saugspannung
- Sickerwassermenge
- Klimadaten
- chemische Analysen des Sickerwassers sowie des geernteten Pflanzenmaterials.

Der verwendete Datensatz umfasste einen Zeitraum von September 2004 bis April 2007. Mithilfe dieser Daten kann eine vollständige Bilanzierung aller auftretenden Wasser- und Stoffflüsse aufgestellt werden.

## Modellkonzept und -kalibration

Das Modell wurde als eine fünf Meter mächtige Bodensäule von der Geländeoberkante bis zu einem gedachten, invarianten Grundwasserspiegel realisiert. Um den heterogenen Aufbau des Lysimeterkörpers zu beschreiben, wurde das Modellprofil in vier Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften unterteilt. Die hydraulischen Parameter der Bodenhorizonte wurden ausgehend von den gemessenen Wassergehalts- und Saugspannungswerten definiert, welche mit Hilfe von



**Abb. 24.** Simulierte und gemessene kumulierte Sickerwassermengen für den gesamten Simulationszeitraum

mengen mit den Simulationsergebnissen verglichen (Abb. 24). Trotz einer nahezu einheitlichen Kalibrierung zeigten die Modelle beim Vergleich der Simulationsergebnisse unterschiedlich gute Anpassungen. Insbesondere bei Bodenfrostd wichen die simulierten Sickerwassermengen stark voneinander ab.

Der Wärmetransport wurde nur von den Programmen CoupModel und Hydrus 1D simuliert. Coupmodel liefert zeitlich gut übereinstimmende, jedoch etwas gedämpfte Temperaturganglinien. Bei Hydrus 1D scheint die Simulation zu schnell auf Temperaturänderungen an der Oberfläche zu reagieren, was von einer zu hohen Wärmeleitfähigkeit oder von zu starkem Sickerwasserfluss verursacht werden kann.

Die Genauigkeit der Stickstoffumsatzmodelle konnte mit Hilfe der gemessenen Gesamtstickstoffgehalte des geernteten Pflanzenmaterials überprüft werden. Die Menge des durch die Ve-

Pedotransferfunktionen in VAN GENUCHTEN-Funktionen umgewandelt wurden. Die Kalibrierung des Wassertransportmodells erfolgte in erster Linie anhand der VAN GENUCHTEN-Parameter  $\alpha$  (Kehrwert des Lufteintrittspunktes) und  $n$  (Porengrößenverteilungsparameter).

Die gesammelten meteorologischen Daten wurden an der oberen Modellgrenze als variable Randbedingungen angesetzt. Aus ihnen konnten die Modelle tägliche Werte der Evapotranspiration ermitteln.

Zur Modellvalidierung wurden die Tagessummen der gemessenen Sickerwassermengen

getation aufgenommenen Stickstoffs konnte bei der STOTRASIM-Simulation bei beiden Vegetationsperioden annähernd erreicht werden. Bei CoupModel stand nach dem Ende der ersten Vegetationsperiode im Boden nicht mehr genügend Stickstoff zur Verfügung, um die gemessenen Stickstoffgehalte zu erreichen.

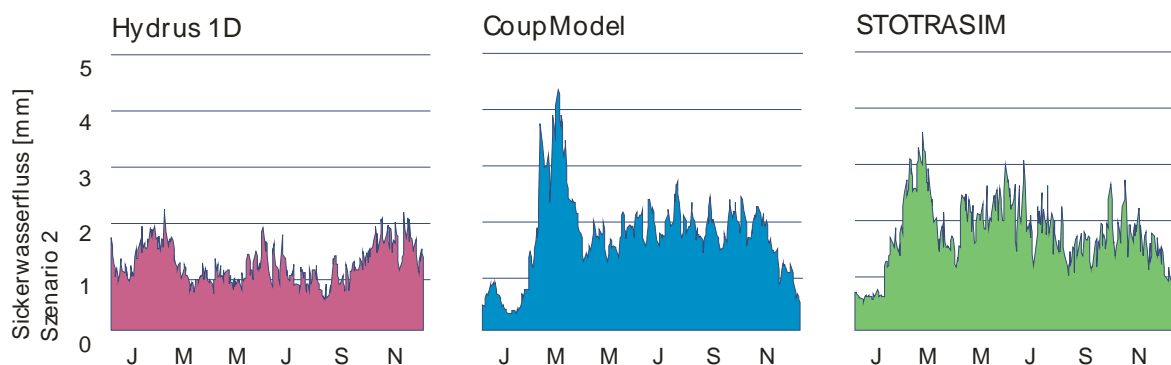
## Klimavariation

Um die Reaktion der kalibrierten Modelle auf veränderte klimatische Bedingungen zu untersuchen, wurden sechs Klimaszenarien generiert, welche sowohl den Klimawandel als auch klimatische Bedingungen anderer Standorte berücksichtigen.

Die Zeitreihen wurden auf der Basis realer meteorologischer Daten von 1978 bis 2006 mit Hilfe eines Klimagenerators erstellt. Die so erzeugten Datensätze enthalten jeweils Tageswerte für Niederschlag und Windgeschwindigkeit, minimaler sowie maximaler Lufttemperatur, Globalstrahlung und der relativen Luftfeuchte. Die Zeitreihen erstrecken sich über einen relativ langen Zeitraum von 50 Jahren von 2050 bis 2099, um das Verhalten der Modelle bei langzeitlichen Simulationen zu untersuchen.

## Ergebnisse

Der Bodenwasserhaushalt ist in dieser Arbeit die einzige Größe, welche von allen drei verglichenen Modellen simuliert wurde. Um die Modellergebnisse der unterschiedlichen Klimaszenarien für die gesamte Simulationszeit von 50 Jahren vergleichen zu können, wurden die Bodenwassergehalte bzw. die Sickerwassermengen auf monatliche bzw. tägliche Durchschnittswerte umgewandelt. Deutliche Abweichungen zeigen sich insbesondere in Klimaszenario S2 (Abb. 25). Dieses zeichnet sich durch besonders tiefe Temperaturen im Winter aus. CoupModel und STOTRASIM zeigen eine deutliche Zunahme der Sickerwassermenge im Frühjahr; bei Hydrus 1D ist kein signifikanter Anstieg des Sickerwasserflusses zu erkennen.



**Abb. 25.** Mittelwerte der täglichen Sickerwasserflüsse über den gesamten Simulationszeitraum von 50 Jahren für das Klimaszenario S2

Als wichtigste Ursache für diese Abweichung kann hier der fehlende Bodenfrostansatz im Modell Hydrus 1D genannt werden. Die tiefen Temperaturen des Klimaszenarios S2 führen zu einer Immobilisierung des Bodenwassers bei CoupModel, bei Hydrus 1D liegt das Bodenwasser auch bei Minusgraden in flüssiger Form vor.

Auch bei den Langzeitsimulationen wurden die von den Pflanzen aufgenommenen Stickstoffmengen als Vergleichsparameter herangezogen. Das Modell STOTRASIM eignet sich besonders gut, um klima- und fruchtartabhängiges Pflanzenwachstum zu simulieren. Mit CoupModel konnten auf einfachem Wege keine Fruchtfolgen parametrisiert werden, darum ist ein direkter Vergleich hier nicht möglich.

## Vergleich und Schlussfolgerungen

Abschließend soll ein zusammenfassender Vergleich der drei untersuchten Modelle in Hinsicht auf allgemeine Kriterien angestellt werden. In Tab. 3 erfolgt eine übersichtliche Darstellung des Vergleichsergebnisses.

**Tab. 3.** Zusammenfassender Modellvergleich (++ sehr gut, + gut, 0 keine Angabe möglich, - mäßig, -- schlecht, ↑ hoch, → mittel, ↓ niedrig)

|                               | Hydrus 1D | CoupModel | STOTRASIM |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Anwendbarkeit für</b>      |           |           |           |
| Langzeitsimulationen          | -         | +         | ++        |
| Klimawandelprognosen          | +         | ++        | +         |
| Landwirtschaftliche Prognosen | -         | +         | ++        |
| Pflanzenentwicklung           | 0         | +         | ++        |
| <b>Modell</b>                 |           |           |           |
| Komplexität                   | →         | ↑         | ↓         |
| Übertragbarkeit               | +         | +         | -         |
| Parametrisierungsaufwand      | ++        | --        | ++        |
| Notwendige Datengrundlage     | +         | --        | +         |
| Transparenz der Teilprozesse  | +         | ++        | --        |
| <b>Software</b>               |           |           |           |
| Programmstabilität            | +         | --        | -         |
| Benutzerfreundlichkeit        | ++        | --        | +         |
| Einarbeitungszeit             | +         | --        | +         |
| Dokumentation                 | +         | +         | -         |
| Darstellung der Ergebnisse    | -         | +         | -         |
| Support                       | ++        | +         | +         |
| Verfügbarkeit                 | +         | +         | 0         |

Hydrus 1D ist in der Lage, Wasser-, Wärme- und Stofftransportprozesse ohne hohen Datenaufwand mit einer hohen Genauigkeit zu simulieren. Das Programm selbst arbeitet sehr stabil auf den meisten Systemen und bedarf keiner langen Einarbeitungszeit. Ohne einen hinreichenden Ansatz zur Beschreibung der Pflanzenentwicklung ist Hydrus 1D jedoch für landwirtschaftliche Langzeitszenarien eher ungeeignet.

Mit CoupModel lassen sich nahezu alle relevanten Prozesse zwischen Pflanze und Boden beschreiben. Diese hohe Modellkomplexität erfordert jedoch auch eine sehr detaillierte Datengrundlage und eine verhältnismäßig lange Einarbeitungszeit für den Benutzer. Durch die Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse können sich Parameterfehler leicht fortpflanzen und zum Teil sehr große Fehler in den Endergebnissen verursachen.

Das Modell STOTRASIM liefert auf einfache Weise Ergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit. Alle notwendigen Ausgangsdaten und Parameter werden in Datenbanken verwaltet und können somit bequem zu beliebig langen Modellszenarien zusammengefasst werden. Damit ist STOTRASIM besonders zur Simulation von landwirtschaftlichen Fragestellungen geeignet.

## Literatur

- FEICHTINGER, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik der ungesättigten Zone eines Ackerbodens. In: Modelle für die ungesättigte und gesättigte Bodenzone. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 7, Petzenkirchen.
- IPCC (2007): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. International Panel on Climate Change, Working Group III.
- JANSSON, P. E. & L. KARLBERG (2001): Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stockholm.
- ŠIMÚNEK, J. & 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. University of California, Riverside.

# Regionale Modellierung des Wasser- und Stoffkreislaufes

Franz Feichtinger

Bundesamt für Wasserwirtschaft  
Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt  
Pollnbergstraße 1  
A-3252 Petzenkirchen

## Zusammenfassung

Die Bewirtschaftung von Grundwasser erfordert häufig die regionale Bewertung der Wasser- und Stoffflüsse in der ungesättigten Zone. Dies geschieht vielfach mit Rechenmodellen, wozu ein Modellkonzept, dessen regionale Anpassung und der Datenbedarf erläutert werden. Am Beispiel der Tal- und Beckenlagen der Südoststeiermark werden die regionale Anwendung solcher Werkzeuge und die Anbindung an die Grundwassermodellierung skizziert.

## Einleitung

Die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser stellt eine weltweite Herausforderung dar, was mit unterschiedlichem Schwerpunkt sowohl die Wassermenge als auch die Wasserqualität betrifft. Steht in ariden Gebieten die Mengenbewirtschaftung im Vordergrund, so ist in Zentraleuropa die Qualität des Wassers mehrfach Anlass der Diskussion. So auch in manchen Regionen Österreichs, wo die Nitratkonzentration im Grundwasser geltende Grenzwerte übersteigt. Davon sind primär der Osten des Bundesgebietes, der Zentralraum Oberösterreichs und der Südosten der Steiermark betroffen. Die Problematik ergibt sich vorwiegend aus der Art der jeweils regionalen landwirtschaftlichen Bodennutzung. Für diesbezügliche Problemanalysen und Lösungsvorschläge werden zur Beurteilung der ungesättigten Zone häufig Rechenmodelle verwendet, die das Zusammenwirken von Luft, Wasser, Boden und Landnutzung beschreiben. Nachfolgend wird die Anwendung des Rechenmodells STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998), welches die Wasser- und Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes bewertet, für Bereiche der Südoststeiermark dargelegt.

## Material und Methoden

Für die Modellierung des Wasser- und Stoffkreislaufes einer Region ist ein geeignetes Modell die Arbeitsgrundlage, dessen regionale Funktionalität möglichst auf lokale Messdaten abgestimmt sein soll. Erforderlich sind auch die regionalen Datensätze, um ein solches Modell betreiben zu können. Im Anschluss werden das Modellkonzept, die regionale Modelanpassung und die Aufbereitung regionaler Modelldaten für Bereiche der Tal- und Beckenlagen der Südoststeiermark skizziert, was ein Teilprojekt im Rahmen des Netzwerkes WATERPOOL (<http://www.waterpool.org>) war.

## Modellkonzept STOTRASIM

STOTRASIM berechnet die Wasser- und Stickstoffdynamik im Bodenprofil eines Ackerstandortes in vertikaler Richtung. Dabei werden die Wasserflüsse und die Vegetationsentwicklung mit dem Modell SIMWASER (STENITZER, 1988) kalkuliert, welches integraler Bestandteil von STOTRASIM ist.

SIMWASER berechnet die Wasserbilanz und das Pflanzenwachstum für eine beliebig lange Fruchtfolge einer Agrarfläche auf Tagesbasis. An der Bodenoberfläche werden Niederschlag und Beregnung als Eintrag und die Evapotranspiration als Wasserentzug in Rechnung gestellt. Interzeption wird berücksichtigt. Die Kalkulation der Wasserbewegung im Boden folgt dem DARCY-Gesetz. Die Untergrenze des Bodenprofils ist durch die Grundwasseroberfläche festgelegt oder wird bei einem grundwasserfernen Standort in einer Tiefe angesetzt, in der kein Einfluss durch Wurzelentzug gegeben ist. Der Wasserfluss an der Profiluntergrenze ergibt die Tiefensickerung oder Grundwasserneubildung bzw. kapillaren Aufstieg. Im erwähnten Projekt wurden für tief

liegende Grundwasserspiegel das Eintreffen einer berechneten Sickerfront und der gemessene Grundwasseranstieg zeitlich verglichen. Um zu einer zeitlichen Harmonisierung von berechneter und gemessener Dynamik zu gelangen, wurde für die Beschreibung der Tiefensickerung der Ansatz der „kinematischen Welle“ (GERMANN, 1985) in stark vereinfachter Form ergänzt. LARSBO und JARVIS, 2003 führen dazu für Makroporenfluss ähnlich, jedoch wesentlich differenzierter aus. Diese durch Einzelbeispiele initiierte Ergänzung ist bereits Gegenstand weiterer Überprüfungen.

STOTRASIM beschreibt die Stickstoff- und partiell die Kohlenstoffdynamik eines landwirtschaftlich genutzten Bodens. Als Stickstoffeinträge an der Bodenoberfläche werden Düngung, Niederschlag, Beregnung und die Bindung aus der Luft durch Leguminosen berücksichtigt. Pflanzenaufnahme, Denitrifikation und Ammoniumausgasung sind entsprechende Stickstoffausträge. Mineralisation und Immobilisation gehen in die Berechnung des bodenbürtigen Stickstoffumsatzes ein. Der an die Wasserbewegung gebundene, vertikale Stickstofftransport erfolgt ausschließlich als Nitrat. Der an der Untergrenze des Bodenprofils berechnete Nitratfluss formuliert somit die Stickstoffversickerung bzw. kapillaren Aufstieg.

### **Regionale Modellanpassung**

Die Nutzung regionaler Messergebnisse für die Justierung von Beiwerten in der Modellformulierung SIMWASER/STOTRASIM ist bereits in FEICHTINGER (2007) näher ausgeführt. Dabei wurden die Ergebnisse von mehreren Lysimeterstationen und auch bodenhydrologischen Stationen verwendet, die zu einem erheblichen Teil in der Südoststeiermark gelegen sind. Für die angesprochene Region der Südoststeiermark bildet die Lysimeterstation Wagna mit ihren Ergebnissen einen wesentlichen Anhaltspunkt für den regionalen Abgleich. Dabei werden Beiwerte, die z. B. die Verdunstung bzw. den Kohlenstoff-/Stickstoffumsatz steuern, dermaßen angepasst, dass die berechneten Versickerungen den Messwerten aus der Region möglichst entsprechen. Jedoch muss ergänzt werden, dass derartige Parametrisierungen gelegentlich Einschränkungen erfahren müssen, um bei flächendeckender Anwendung Grenzen der Plausibilität nicht zu überschreiten. Dies war zu einem die Verdunstung steuernden Beiwert jedenfalls erforderlich.

### **Regionale Modelldaten**

Im Teilprojekt „Prognosemodelle, Murtal-Aquifer“ des Netzwerkes WATERPOOL sollen für Teile der Tal- und Beckenlagen in der Südoststeiermark (Abb. 26), welche ausgiebige Grundwasservorkommen mit Nutzung durch mehrere Wasserversorgungsunternehmen darstellen, Werkzeuge für die nachhaltige Nutzung dieser Grundwasservorräte etabliert werden. Für die Agrarflächen dieses ~ 310 km<sup>2</sup> großen Areals wird die Grundwasserneubildung und die Nitratversickerung mit STOTRASIM bewertet, wozu die regionalen Daten zum Wetter, zum Management der Agrarflächen, zur Boden- und Untergrundbeschaffenheit und zur Grundwasserdynamik benötigt werden. Forstbereiche werden mit Hilfe einer jahreszeitlich variablen Relation zu einer Maismonokultur und angenommenen 10 mg NO<sub>3</sub> l<sup>-1</sup> im Sickerwasserstrom bewertet.

Die lokale Differenzierung zum Wetter ist durch die Daten von fünf Beobachtungsstationen (Andritz, Friesach, Graz-Thalerhof, Leibnitz und Radkersburg) und deren regionale Gültigkeit gegeben. Zum Management der Agrarflächen war für jede Katastralgemeinde die Agrarstatistik für die Jahre 1998-2005 verfügbar, womit Modelleingaben formuliert wurden, die die KG-Angaben mit einer Abweichung < 5 % treffen. Einzelne Schongebietsauflagen wurden mitberücksichtigt. Die Beschreibung der Bodeneigenschaften geht von den Unterlagen der Österreichischen Bodenkartierung (ÖBK) und den Ergebnissen einer Sonderkartierung aus. Der weitere Profilaufbau bis zum tiefsten Grundwasserstand wurde durch Verschnitt der Kartierangaben mit Aufschlüssen (Bohrungen, Schürfe, ...) aus der Region festgelegt. Die Ableitung bodenphysikalischer Modellparameter aus den Kartierangaben erfolgte nach einem Transferalgorithmus (MURER, 1988). Zur Grundwassersituation waren für die Modellierung der ungesättigten Zone die maximalen und minimalen Grundwasserflurabstände von Bedeutung, welche zu den im Untersuchungsgebiet gelegenen Pegeln vorlagen.

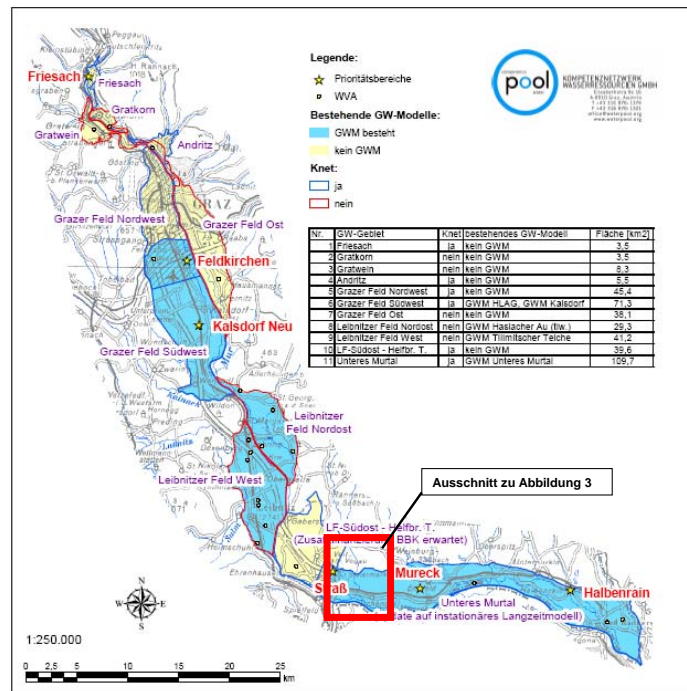


Abb. 26. Lage des Projektgebietes

## Ergebnisse

Aus der Überlagerung von Wetter-, Boden- und Management-Information ergeben sich für das Projektgebiet ~ 1230 Hydrotöpfe zur Bearbeitung. Da Hydrotopinhalte wiederholt für mehrere Flächenelemente gelten, waren die Hydrotopergebnisse auf ~ 4600 Einzelflächen umzulegen. Weiters beinhaltete ein Hydrotopergebnis bezüglich Management die gewichtete Einbindung mehrerer Fruchtfolgen und für die Anbindung der ungesättigten Zone an die Grundwassermodellierung (FANK et al., 2006) wurden die Wasser- und Stickstoffflüsse für stationäre Grundwasserspiegellagen, welche in 25 cm-Schritten zwischen höchstem und tiefstem Grundwasserspiegel abgestuft sind, errechnet. Zur Abarbeitung dieser Vielfalt waren über 100.000 Rechenläufe mit STOTRASIM (Zeitraum: 01.01.1980–31.12.2006) erforderlich. Die zusammengefassten Ergebnisse enthalten für jedes Hydrotop die täglichen Wasser- und Stickstoffflüsse am Übergang zum Grundwasser für die stationären Grundwasserspiegellagen in 25 cm-Abstufung. Abb. 27 verdeutlicht zu einem Hydrotopergebnis beispielhaft die errechneten Wasserflüsse in zeitlicher und räumlicher Auflösung, woraus die Grundwassermodellierung die tagesaktuellen Flüsse entsprechend der aktuellen Grundwasserspiegellage abnimmt.

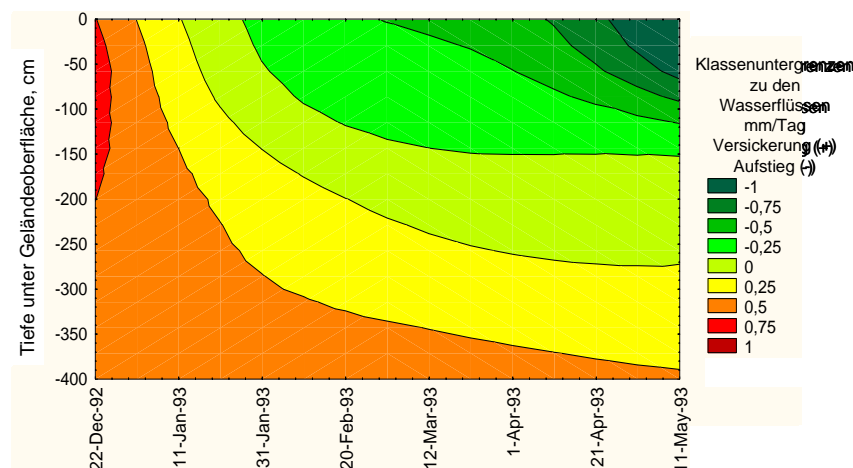
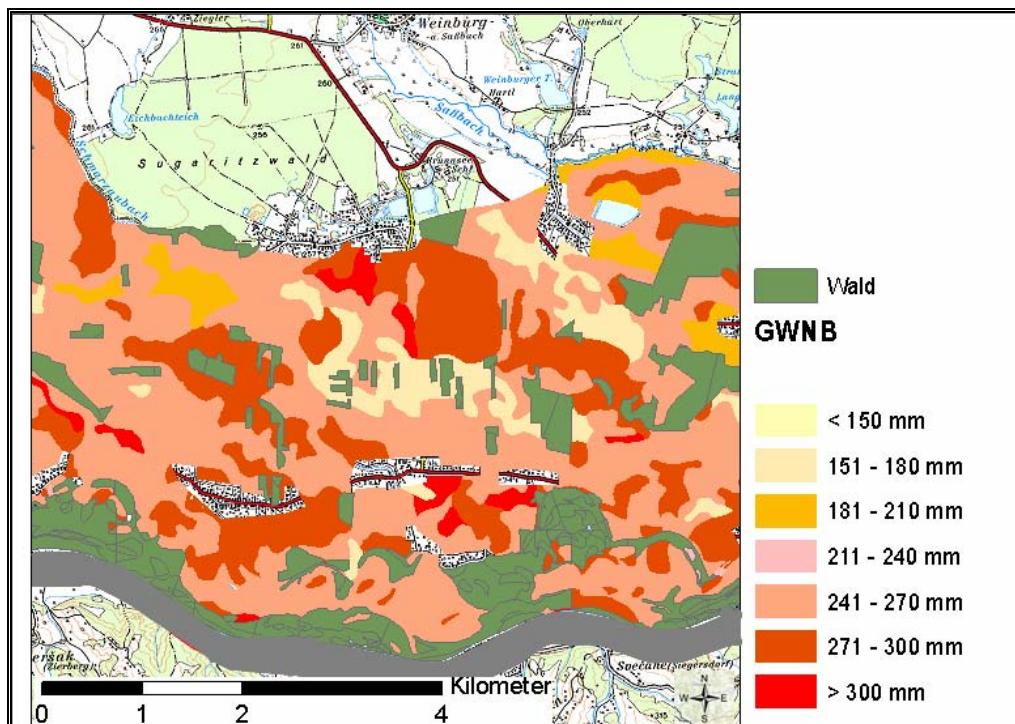


Abb. 27. Wasserflüsse im Boden eines Hydrotops in zeitlicher und räumlicher Dynamik



Weitere Ergebnisse sind die mittleren Flüsse (Grundwasserneubildung, Stickstoffversickerung) und die daraus resultierende Konzentration ( $\text{mg NO}_3 \text{ l}^{-1}$ ) über den Bewertungszeitraum. In Abb. 28 ist dies beispielhaft für die Wasserversickerung zu einem Ausschnitt des Unteren Murtals dargestellt.



**Abb. 28.** Mittlere Grundwasserneubildung (GWN) auf den Agrarflächen eines Teilgebietes des Unteren Murtals für den Zeitraum 1.1.1993-31.12.2006

## Schlussfolgerung

Die regionale Modellierung von Wasser- und Stoffkreislauf in der ungesättigten Zone ist mit den vorgestellten Werkzeugen und Modalitäten durchaus machbar. Die regionale Anwendung im genannten Projekt hat jedoch eine Dimension erreicht, die durchaus das gewünschte Ergebnis erbringt, jedoch in der operativen Durchführbarkeit einiges abverlangt.

## Literatur

- FANK J., G. FASTL, H. KUPFERSBERGER & G. ROCK (2006): Die Bewirtschaftung des Versuchsfeldes Wagna - Auswirkung auf die Grundwassersituation. – Bericht über das Seminar „Umweltprogramme für die Landwirtschaft und deren Auswirkung auf die Grundwasserqualität“, 7.-8. März 2006, 43-48, Irdning-Gumpenstein.
- FEICHTINGER, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. – Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 7, 14–41, Wien.
- FEICHTINGER, F. (2007): Lysimeterergebnisse als Basis wasserrelevanter Modellstudien. – BAL-Bericht über die 12. Lysimetertagung „Lysimetrie im Konnex zu nationalen und internationalen Regelwerken“ vom 17.-18.04.2007, 117-120.
- GERMANN, P. (1985): Kinematic wave approach to infiltration and drainage into and from macropores. – Transactions of the ASAE 28, 745-749.
- LARSBO, M. & N. J. JARVIS (2003): MACRO5.0 A model of water and solute transport in macroporous soil. Technical description. – Studies in the Biogeophysical Environment, Emergo 2003:6, Department of Soil Sciences, SLU, Uppsala, Sweden.
- MURER, E. (1998): Die Ableitung der Parameter eines Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodelles aus den Ergebnissen der Bodenkartierung. Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone. – Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 7, 89–103, Wien.
- STENITZER, E. (1988). SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. – Mitteilung aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, 31, 203 S., Petzenkirchen.



# **Langfristige Stoffdynamik in kleinen Wassereinzugsgebieten – Messkonzept und Ergebnisse**

Jochen Bittersohl & Nicole Foullois

BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT  
Referat 83 – Hydrologie des Grundwassers  
Hans-Högn-Str. 12  
D-95030 Hof/Saale

## **Zusammenfassung**

Das Integrierte Messnetz Stoffeintrag – Grundwasser (MSGw) im Gewässerkundlichen Dienst Bayern ergänzt die Informationsgrundlagen der Wasserwirtschaft durch ein langfristiges, prozessorientiertes Monitoring in derzeit sieben ausgewählten Wassereinzugsgebieten. MSGw ist das bislang einzige, weitgehend medienübergreifende Messnetz der bayerischen Umweltverwaltung. Die Untersuchungsgebiete sind kleine Wassereinzugsgebiete mit oberirdischem Abfluss bzw. Grundwassereinzugsgebiete einer Wasserversorgung. An Intensivmessflächen wird der Wasser- und Stofffluss in den Ebenen Niederschlag-Sickerwasser-Grundwasser, im Gebiet der Gesamtabfluss sowie das Rohwasser einer örtlichen Trinkwasserversorgung erfasst. Neben bekannten Fragestellungen des Grundwasser- und Gewässerschutzes, z. B. der Verlagerung von Nährstoffen und Säurebildnern oder der Abflussentstehung, bildet das langfristige Monitoring von klimagesteuerten Parametern einen neuen Schwerpunkt.

## **Einführung**

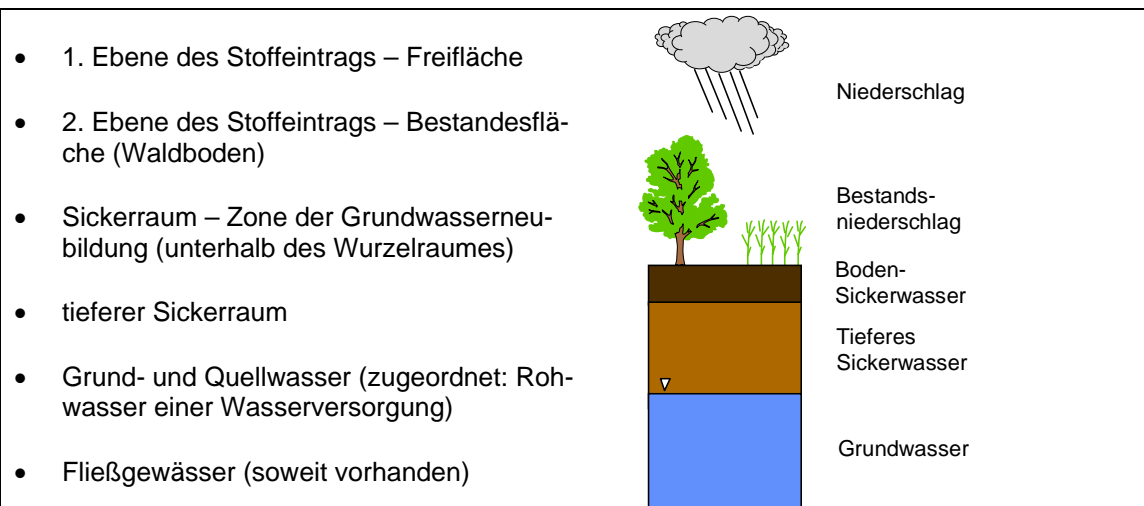
Für die Überwachung der Gewässer (Fließgewässer, Seen, Grundwasser) haben die Länder umfangreiche Messnetze eingerichtet und mit den Anforderungen der einschlägigen EU-Richtlinien abgestimmt. Neben der rein sektoralen Betrachtung ist es zunehmend erforderlich, die Messnetzdaten auch im medienübergreifenden Kontext zu bewerten um

- Ursache-Wirkungs-Beziehungen zu erkennen
- Wechselwirkungen mit anderen Umweltmedien aufzuklären
- Entscheidungsgrundlagen für Maßnahmen zu verbessern und letztlich
- Synergien im Bereich der aufwendigen Umweltüberwachung zu bilden.

Ein unmittelbar medienübergreifendes Monitoring komplexer Umweltprozesse kann diese Fragestellungen ganz wesentlich unterstützen. Dabei wird man sich wegen des höheren Aufwandes i. d. R. auf exemplarische, übertragbare Untersuchungen beschränken. In Bayern wurde, ausgehend von komplexen Fragen des Grundwasser- und Gewässerschutzes, ein medienübergreifendes Monitoring des Landschaftswasser- und Stoffhaushalts konzipiert (BLfW 2004, IHP/OHP-Berichte 1995, LAWA 1998, 2003). Das Integrierte Messnetz Stoffeintrag – Grundwasser (MSGw) ergänzt die Informationsgrundlagen der Wasserwirtschaft durch ein langfristiges, prozessorientiertes Monitoring in ausgewählten Wassereinzugsgebieten. Durch das übergreifende Messkonzept wird eine enge Verknüpfung mit weiteren Umweltthemen im System Luft – Boden – Wasser ermöglicht. MSGw ist auch nach unserer Ansicht im besonderen Maße geeignet zur langfristigen Beobachtung von bisher noch ungesicherten Klimafolgeprozessen in ausgewählten Naturräumen.

## **Methoden**

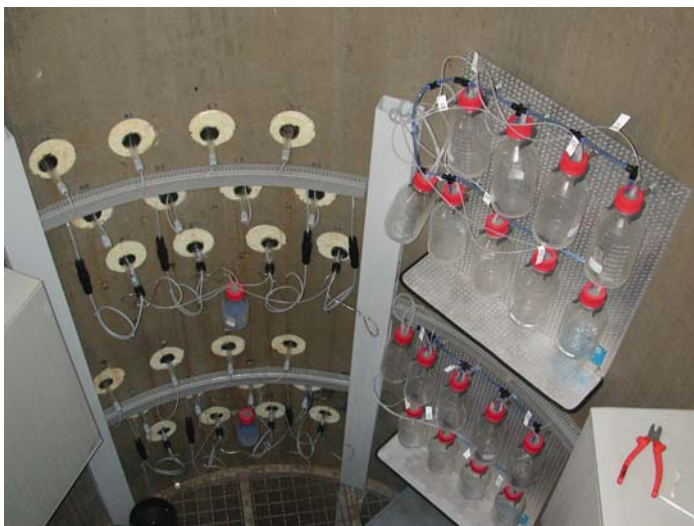
Die Untersuchungsgebiete sind kleine Wassereinzugsgebiete mit oberirdischem Abfluss oder Grundwassereinzugsgebiete eines Wasserversorgungsbrunnens. Im Untersuchungsgebiet wird der Wasser- und Stofffluss in den wichtigen Ebenen des Wasserkreislaufs erfasst.



**Abb. 29.** Messebenen

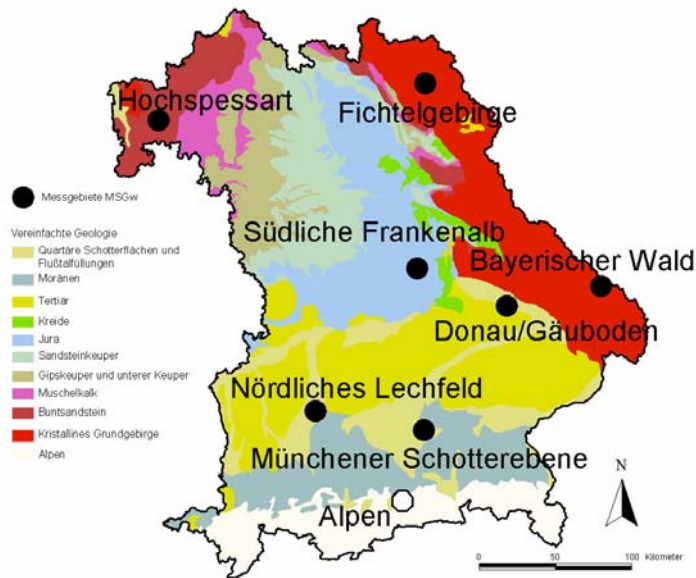
Standardmesseinrichtungen in den Untersuchungsgebieten sind:

- Klimastation: Niederschlagshöhe, Verdunstungsparameter, Bodentemperatur
- Depositionssammler für atmosphärischen Stoffeintrag: nass (Bulk/Freiland) und akzeptorabhängig (Bulk/Waldbestand)
- Sickerwassersammler (Saugkerzen)
- Bodenfeuchtesonden (Tensiometer)
- Grundwassermessstelle/Quellenmessstelle
- Messstelle Rohwasser/Wasserversorgung
- Abflussmessstelle (Pegel, 3 Gebiete)



**Abb. 30.** Messschacht Straubing  
Im Untersuchungsgebiet Donau/Gäuboden ist ein Messschacht zur Beobachtung der ungesättigten Zone unter Ackernutzung eingerichtet. Die Messsonden (Tensiometer, Saugkerzen) sind in Mess-tiefen bis 8 m seitlich in den Boden eingeführt.

Die Untersuchungsgebiete im Hochspessart, Bayerischen Wald, Fichtelgebirge und in der Münchener Schotterebene sind aus einem Vorlaufprojekt zu Fragen der Grund- und Trinkwasserversauerung hervorgegangen und seit 1987 in Betrieb. Hier sind Kleinpegel zur Abflussmessung eingerichtet. Ab 1995/96 wurden weitere vier Gebiete hinzugenommen und alle Gebiete mit Messeinrichtungen für den Bodenwasserhaushalt ergänzt.



**Abb. 31.** Lage der Messgebiete in Bayern

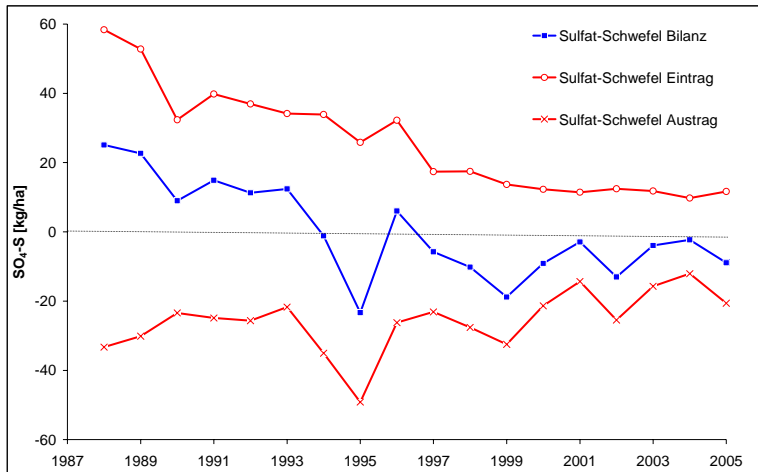
Durch die Zusammenlegung der Landesämter für Umweltschutz, Geologie und Wasserwirtschaft als Landesamt für Umwelt wurden die Entwicklungsmöglichkeiten dieses gewässerkundlichen Instruments in Richtung einer übergreifenden Umweltbeobachtung deutlich verbessert. Unterschiedlich enge Zusammenarbeit besteht in Bayern mit der Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft, der Landesanstalt für Landwirtschaft, der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald und der Universität Bayreuth (BayCEER). Die jedem Gebiet zugeordneten Wasserversorgungsunternehmen beteiligen sich im Einzelfall am Datenaustausch. In die Qualitätssicherung beim Betrieb der Messsysteme und der Datenübertragung ist eine einschlägige Fachfirma eingebunden.

## Ergebnisse

Das differenzierte Messkonzept ermöglicht eine Vielzahl von Prozessbeobachtungen, die vorwiegend der Grundlagenermittlung dienen. Vorrang haben jedoch robuste gewässerkundliche (bzw. wasserwirtschaftliche) Beobachtungen, u. a. zu folgenden Kernthemen:

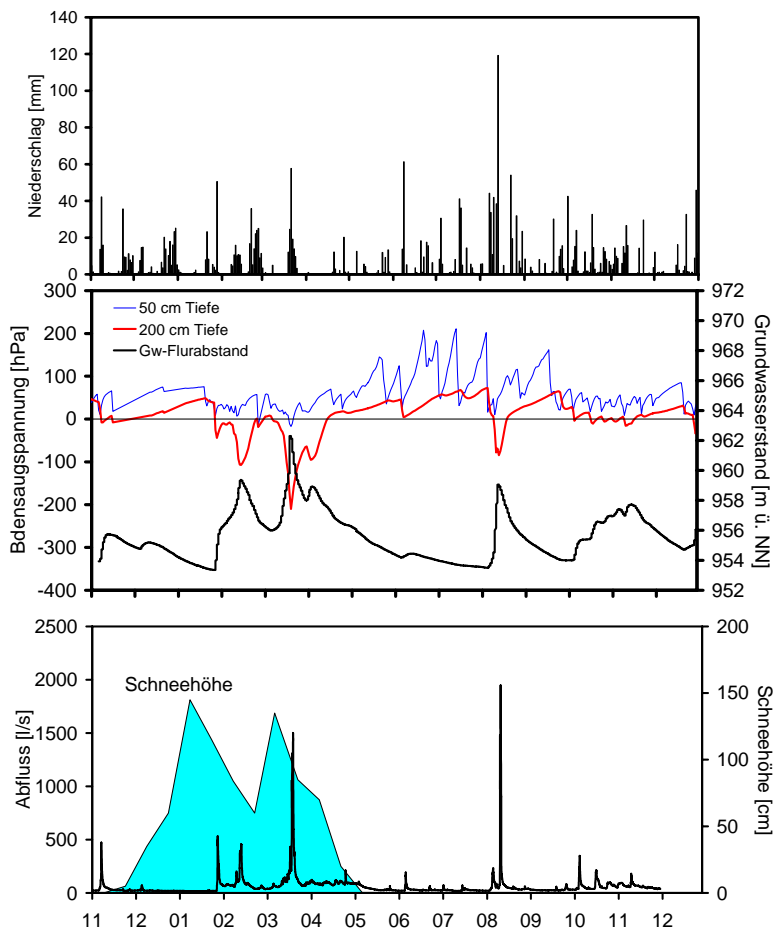
- langfristige Verlagerung von Nährstoffen, Säurebildnern und gelösten Metallen, Auswirkung auf Grund- und Trinkwasser sowie quellnahe Fließgewässer
- Schutz- und Filterwirkung der Böden bzw. Grundwasserüberdeckung
- Zusammenhang von Waldzustand, Landbewirtschaftung und Stoffverlagerung
- Boden- und Gebietswasserhaushalt, Abflussbildung.

Als Beispiel ist der langfristige Gebietshaushalt von Sulfat-Schwefel (als wesentlicher Faktor des Säurehaushalts) im Untersuchungsgebiet Fichtelgebirge/Lehstenbach dargestellt (Abb. 32). Die Messreihen beginnen in der Rückgangphase der einstmals extrem hohen atmosphärischen Schwefeleinträge. Aus der Entwicklung der jährlichen Eintrags-Austrags-Bilanz lässt sich ableiten, dass das Untersuchungsgebiet in den 1990er Jahren von einer Senke zu einer Quelle für Schwefel übergeht. Die Stoffbefrachtung der lateralen und vertikalen Abflusskomponenten wird nach Abschwächung des „Sauren Regens“ über den Sickerraum mit seinen Leit- und Speichereigenschaften gesteuert. Die Untersuchung des Sickerwassers bis 3 m Tiefe zeigt, dass sich das oberflächennahe Sicker- bzw. Hangwasser zügig erholt, während die tiefere Sickerzone längerfristig von Schwefelfreisetzung geprägt ist. Sehr langsam reagiert das versauerte Grundwasser.



**Abb. 32.** Sulfat-Schwefel-Bilanz der Jahre 1988 – 2005 im Untersuchungsgebiet Fichtelgebirge/Lehstenbach

Neben der Ermittlung von Stofffrachten dient das begleitende quantitative Monitoring eigenständigen hydrologischen Fragestellungen, z. B. zur Grundwasserneubildung oder zur Abflussbildung im Gebirge. Abb. 33 zeigt einen exemplarischen Jahresverlauf. Die Bodenfeuchte wird als Bodensaugspannung erfasst. 2003 wurden Spitzenwerte des Grundwasserstandes und des Abflusses im März (Regen mit Schneeschmelze) und im August (Starkregen) beobachtet. Beide Male staute sich das Sickerwasser in der tieferen Bodenzone (Saugspannungswerte negativ) mit der Folge massiver hangparalleler, Hochwasser bildender Direktabflüsse. Der ebenfalls starken Grundwasserneubildung folgt in diesem Granitgebiet keine anhaltende Verbesserung der Grundwasservorräte, was die bekannten Nachteile für die Sicherheit der ortsgebundenen Wasserversorgung zur Folge hat.



**Abb. 33.** Jahresverlauf 2003 der Wasserhaushaltsparameter im Untersuchungsgebiet Bayerischer Wald Nationalpark/Markungsgraben

## Ausblick

Die Erhebung von Daten und Grundlagen zur umfassenden Beschreibung des Wasserhaushalts bleibt gesetzlich verankerte Standardaufgabe, zu der das integrierte Messnetz beiträgt. Unbestritten ist der Klimawandel eine neue Herausforderung, dessen Auswirkungen möglichst gut erfasst und prognostiziert werden sollen. Zu diesem Zweck müssen insbesondere die als wichtig erkannten langen Messreihen der Umweltbeobachtung fortgeführt werden. Das integrierte Messnetz soll daher stärker als bisher

- im Aufgabenbereich des Gewässerkundlichen Dienstes vernetzt (s. Vortrag W. SPRENGER)
- auf die wichtigen qualitativen und quantitativen Umweltparameter konzentriert
- mit bestehenden Messprogrammen der umweltorientierten Verwaltungen in den Bereichen Luft/Klima und Boden abgestimmt und letztlich
- in Bezug auf Datenmanagement, Datenverfügbarkeit und Anbindung hydrologischer Modellstandards deutlich verbessert werden.

## Literatur

- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2004): 15 Jahre Integriertes Messnetz Stoffeintrag – Grundwasser, Methoden und Ergebnisse, Informationsberichte Heft 2/04 (als CD), München.
- BITTERSÖHL, J. (1998): Die Ermittlung diffuser Stofftransporte im Wasserkreislauf.- In: Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft: Der Gewässerkundliche Dienst Bayern, Informationsberichte Heft 3/98, S. 147-153, München.
- Deutsches IHP/OHP-Nationalkomitee (1995): Empfehlung zu Einrichtung und Betrieb kleiner hydrologischer Untersuchungsgebiete, IHP/OHP-Berichte, Heft 10, Koblenz 1995.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2003): Sickerwasser – Richtlinie für Beobachtung und Auswertung, Düsseldorf 2005, Kulturbuch-Verlag GmbH, Berlin.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1998): Atmosphärische Deposition – Richtlinie für Beobachtung und Auswertung der Niederschlagsbeschaffenheit 1998, Kulturbuchverlag GmbH, Berlin.

# Messdatenerfassung im agrarwirtschaftlichen und hydrogeologischen Umfeld

Johann Fank

JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

Das Grundwasser des Murtales wird bereits seit den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts intensiv zur Trinkwasserversorgung der ansässigen Bevölkerung aber auch der durch geringe Wasserressourcen geprägten Ost- und Weststeiermark erfasst. Der Grundwasserleiter ist ein gering mächtiger, sehr gut durchlässiger Aquifer, der von seicht bis mittelgründiger Lockersediment-Braunerde überdeckt wird. Die dominanten Bodenarten sind Sande, lehmige Sande und sandige Lehme. Die Grundwassererneuerung erfolgt aus der Infiltration von Niederschlagswasser und aus der Wechselwirkung des Grundwassers mit den Oberflächengewässersystemen – in erster Linie der Mur. Daraus ist ersichtlich, dass dieses Grundwasser einem hohen Kontaminationsrisiko in erster Linie aus diffusen Quellen ausgesetzt ist. Vor allem die Nitratbelastung des Grundwassers aus der ackerbaulichen Bewirtschaftung entwickelte sich mit zunehmender Wassernutzung zu einem stetig steigenden Problem.

Am landwirtschaftlichen Versuchsfeld Wagna, ein Großparzellenversuch mit 32 Parzellen zu je etwa 1000 m<sup>2</sup> unter ortsüblicher maschineller Bewirtschaftung werden seit 1987 verschiedene ackerbauliche Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Reduktion des Nitrataustrages unter Berücksichtigung ökonomischer Gesichtspunkte untersucht. Während in den ersten Jahren unterschiedliche Düngemengen zu Mais im Mittelpunkt des Interesses standen, wurden in den Jahren 1993 bis 2003 Maismonokulturvarianten und regionstypische Fruchtfolgen unter Einhaltung der Grundwasserschutz-Vorsorgemaßnahmen in einem Grundwasserschongebiet untersucht. Seit dem Jahre 2004 werden am Versuchsfeld Wagna konventioneller, regionstypischer Ackerbau auf Grundlage der Grundwasserschongebietsverordnung mit organisch-biologischem Ackerbau verglichen. Um die Heterogenität der Bodenverhältnisse auszugleichen wurde für die Bewirtschaftung das Feld in vier Versuchsstreifen zu je 8 Parzellen unterteilt. Diese Streifen werden abwechselnd unterschiedlich bewirtschaftet. Grundsätzlich sind die am Versuchsfeld intensiv erkundeten Bodenverhältnisse hinsichtlich ihrer Ausprägung und auch hinsichtlich der Gründigkeit typisch für große Teile der Niederterrasse des Murtales südlich von Graz.

Zur Untersuchung der Wechselwirkung von Atmosphäre – Pflanze – Boden – Ungesättigte Zone – Grundwasser wurde im Jahr 1991 als Reaktion auf die stetig steigenden Nitratgehalte im Grundwasser die Forschungsstation Wagna errichtet. Die Ergebnisse trugen zusammen mit den Maßnahmen von Verwaltung und Landwirtschaft und der Umsetzung der behördlichen Verordnungen dazu bei, die Nitratgehalte soweit zu reduzieren, dass eine Grundwasserentnahme aus dem Murtal – Grundwasserleiter zur überregionalen Wasserversorgung möglich ist.

Im Zuge der Umstellung des ackerbaulichen Versuches wurde im Jahr 2004 auch die Forschungsstation Wagna auf den technisch neuesten Stand gebracht. In zwei unterschiedlich bewirtschaftete Versuchsfelder wurden monolithische wägbare Präzisionslysimeter und bodenhydrologische Messprofile installiert, an denen die Wasserhaushaltsparameter an Referenz-Standorten detailliert gemessen und der hydrologische Zustand der ungesättigten Zone in seiner hochgradigen Instationarität mittels einer Vielzahl von Online-Sensoren horizontspezifisch in kurzen Zeitintervallen (10 Minuten) erfasst wird. Im Randbereich des Versuchsfeldes wurde 2006 unter Dauergrünland ohne Düngung (Mulchbewirtschaftung) ein Referenz-Präzisionslysimeter zur Messung der Wasserkreislaufparameter mit zugehöriger meteorologischer Station zur Erfassung der Parameter zur Berechnung der Gras-Referenzverdunstung errichtet.



Neueste wissenschaftliche Untersuchungen belegen die große Bedeutung der tieferen Teile der ungesättigten Zone, des Grundwasserkapillarsaums und des Grundwasserspiegelschwankungsbereiches und der dort ablaufenden Prozesse für eine Bewertung der Auswirkung von Maßnahmen an der Oberfläche auf die Grundwasserverhältnisse.

Univ. Doz. Dr. Johann Fank  
JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

Tel.: +43 (0) 316 / 876 1393  
Fax: +43 (0) 316 / 876 91393  
eMail: johann.fank@joanneum.at  
Internet: www.joanneum.at/WRM

**JOANNEUM RESEARCH**  
**Forschungsgesellschaft mbH**  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik



## Johann FANK : Messdatenerfassung im agrarwirtschaftlichen und hydrogeologischen Umfeld

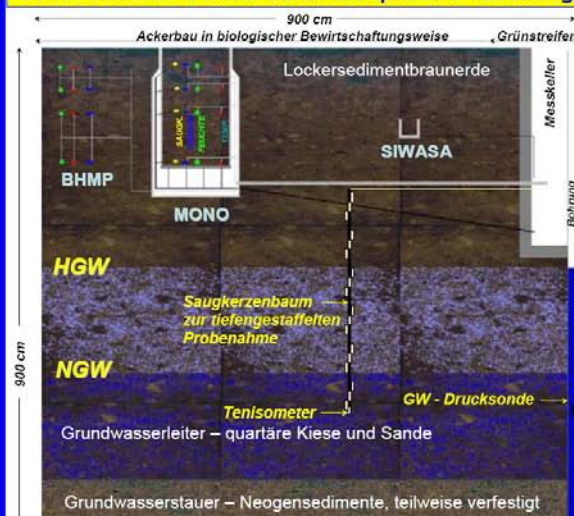
### Das landwirtschaftliche Versuchsfeld Wagna mit den hydrologischen Messeinrichtungen



Am landwirtschaftlichen Versuchsfeld Wagna werden seit 1987 ackerbauliche Kulturführungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Grundwassersituation untersucht. Im Jahr 1991 wurde die Forschungsstation Wagna mit Einrichtungen zur Untersuchungen von Wasserfluss und Transport von der Atmosphäre über Boden und ungesättigte Zone in das Grundwasser zentral in das Versuchsfeld eingebaut.  
Im Jahr 2004 wurden monolithische Präzisionslysimeter eingebaut und die Datengewinnung hochgradig automatisiert. Die Bewirtschaftung wurde umgestellt: konventionelle ackerbauliche Bewirtschaftung unter Einhaltung von Grundwasserschutzanforderungen wird mit organisch-biologischer Bewirtschaftung verglichen.  
Neben der detaillierten Registrierung von Kulturführung, Bewirtschaftung, Düngung, Verwendung von Pflanzenschutzmitteln und der Ertragssituation werden auch die Inhaltsstoffe in den Pflanzen analysiert. Bodenuntersuchungen ergänzen das Untersuchungsprogramm.  
Die Bodenverhältnisse des Versuchsfeldes wurden detailliert erkundet, diese sind repräsentativ für große Teile der quartären Niederterrasse des Murtales von Graz bis Bad Radkersburg.

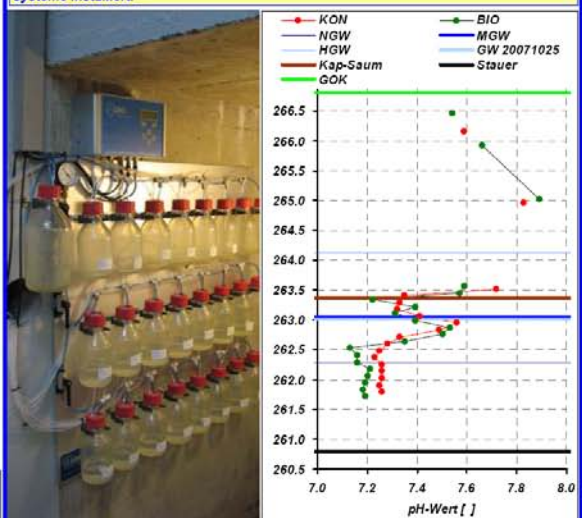
- Landwirtschaftliche Versuchsfelder mit organisch – biologischer Bewirtschaftung  
Fruchtfolge: Kürbis – Luzerne – Mais – Dinkel mit winterharter Grunddecke
- Landwirtschaftliche Versuchsfelder mit konventioneller Bewirtschaftung unter Berücksichtigung von Grundwasserschutzrichtlinien (winterharte Grunddecke)  
Fruchtfolge: Kürbis – Mais – Mais – Wintergerste
- Wissenschaftliches monolithisches wägbares Präzisions – Lysimeter unter konventioneller Bewirtschaftung mit gesteuertem Unterdrucksystem (unidirektionale Vakuumsteuerung und hydrologische Wippe zur Sickerwassermengenerfassung), abnehmbarer Bewirtschaftungsring (1 m<sup>2</sup> Oberfläche, 190 cm Tiefe, Sensorebenen in 0,35 m, 0,60 m, 0,90 m mit Saugkerzen, TDR-Sonden, Tensiometer, SIS – Sensoren, Temperatursensoren, )
- Wissenschaftliches monolithisches wägbares Präzisions – Lysimeter unter organisch-biologischer Bewirtschaftung mit gesteuertem Unterdrucksystem (unidirektionale Vakuumsteuerung und hydrologische Wippe zur Sickerwassermengenerfassung), abnehmbarer Bewirtschaftungsring und Messung der Strahlungsbilanz über dem Lysimeter, Erfassung von Wassergehalt und Saugspannung in den obersten Bodenschichten (1 m<sup>2</sup> Oberfläche, 190 cm Tiefe, Sensorebenen in 0,35 m, 0,60 m, 0,90 m mit Saugkerzen, TDR-Sonden, Tensiometer, SIS – Sensoren, Temperatursensoren, )
- HYDROLYS – monolithisches wägbares Präzisions – Lysimeter unter Grünland mit gesteuertem Unterdrucksystem (bidirektionale Vakuumpumpe und Wiegesystem zur Sickerwassermengenerfassung)
- Tiefengestaffelte Probenahmesysteme mit automatischer Unterdruckssteuerung zur Messung der Grundwasserspiegellage und zur Gewinnung von Wasserproben aus den tieferen Bereichen der ungesättigten Zone, dem Grundwasserkapillarsaum und dem Grundwasserspiegelschwankungsbereich unter konventioneller (rot) und unter organisch – biologischer Bewirtschaftung (grün)
- Grundwasserpegel zur Erfassung der Grundwasserspiegellage (Drucksensor) Grundwasserpegel zur Erfassung der Grundwassertemperatur und der elektrischen Leitfähigkeit (CTD – DIVER) sowie zur Standard – Grundwasserprobenahme
- UMS – Wetterstation (Lufttemperatur und relative Luftfeuchte in 2 m über GOK, Windgeschwindigkeit in 2 und 4 m über GOK, Niederschlags-Totalisator)
- ZAMG – teilautomatische Wetterstation (Niederschlagswippe, Niederschlagsdauer Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m über GOK, Luftdruck, Bodentemperatur in 5, 10 und 20 cm Tiefe, Lufttemperatur in 5 cm über GOK)
- PLUVIO – Niederschlagswaage des Hydrographischen Dienstes Steiermark
- METEOLYS – Wetterstation (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung in 2 m über GOK)

### Schematischer Schnitt durch die quartäre Talfüllung



Der quartäre Grundwasserleiter mit einer Mächtigkeit von ~4 m über Neogensedimenten wird von einer ~4 m mächtigen ungesättigten Zone überlagert. Die Lockersedimentbraunerde weist im Bereich der Lysimeterparzellen eine Grundtiefe von 70 - 110 cm auf.

Monolithische Lysimeter (MONO), bodenhydrologische Messprofile (BHMP) und Sickerwassersammler (SIWASA) erfassen neben einer Vielzahl von on-line Sensoren den hochgradig instationären Zustand der ungesättigten Zone, an zwei Bohrungen werden die Grundwasserverhältnisse untersucht (quantitativ und qualitativ). Im Jahr 2007 wurden zwei tiefengestaffelte Sicker- und Grundwasserprobenahmesysteme installiert.



# Wasser- und Stoffbilanzen aus den Lysimetern in Wagna

Johann Fank

JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

Die monolithischen Präzisionslysimeter<sup>1</sup> am Versuchsfeld Wagna erlauben die Ableitung der Wasserbilanzgrößen aus den Wiegedaten, sodass allein aufgrund der Lysimetermessungen die Erstellung geschlossener Wasserbilanzen möglich ist. Die Monats- und Jahreswasserbilanzgrößen für die beiden Feldlysimeter unter organisch-biologischer und unter konventioneller Bewirtschaftung sind für die Jahre 2005 bis 2007 dargestellt.

Im Vergleich zu sonstigen Auswertungen wird für die Bilanzierung als Inputgröße die aus den Wiegedaten abgeleitete Bestandsniederschlagsmenge am Lysimeter verwendet, die sich von den an den Standardmessereinrichtungen erfassten Niederschlagsdaten unterscheidet, da hierbei einerseits bekannte Messunsicherheiten der Niederschlagsmessung (Messung mit kleiner Auffangfläche, Windeinfluss der Messung in 1 bis 2 m über Gelände – v. a. bei der Schneemessung, Verdunstung bei beheizten Wippen etc.) wegfallen, andererseits in der Niederschlagserfassung auch Nebel-, Tau- und Reifniederschläge inkludiert sind. Die Verdunstung des Wassers aus dem Lysimeterkörper wird ebenfalls aus den Wiegedaten abgeleitet, die Sickerwassermenge eigens über hydrologische Wippen registriert. Aus diesen Daten lässt sich die Änderung des Bodenspeichereingehaltes geschlossen bilanzieren. Als Grundlage für die Ableitung von Pflanzenkennwerten und zur Auftrennung der Gesamtverdunstung in ihre Komponenten Evaporation, Transpiration und Trockenstress wird die Gras-Referenzverdunstung<sup>2</sup> aus den Wetterdaten der angeschlossenen meteorologischen Station berechnet.

In Kombination mit der hydrochemischen Analyse der Sickerwässer auf die Hauptinhaltsstoffe ist es möglich, die Nährstofffrachten in Richtung Grundwasser für beliebige Zeiträume zu bilanzieren. Um die Unterschiede zwischen konventioneller Bewirtschaftung unter Berücksichtigung von Grundwasserschutzrichtlinien im Vergleich zur organisch-biologischen Bewirtschaftung bei ähnlicher Fruchtfolgegestaltung in ihrer Auswirkung auf das Grundwasser bewerten zu können, ist jedenfalls die Bewirtschaftungsgeschichte auf den beiden Versuchspartzellen zu berücksichtigen. Besondere Bedeutung kommt dabei der Kenntnis der Verweilzeit des Sickerwassers im untersuchten Lysimeter zu. Um diese zu erfassen, wurde an beiden Lysimetern im April 2005 mit Beginn der ersten zu untersuchenden Kulturfolge ein Tracerversuch durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Versuches zeigen, dass das Wasser und darin gelöste konservative Stoffe unter den meteorologischen Bedingungen der Jahre 2005 bis 2007 von der Oberfläche des Lysimeters bis in eine Tiefe von 180 cm (Lysimeterunterkante) etwa 1,5 Jahre an Fließzeit benötigen. Nach Durchsickerung von etwa 250 bis 300 mm an Sickerwasser ist die Konzentrationsspitze des Tracers im Lysimeterabfluss erreicht, etwa 600 bis 700 mm an Sickerwasser werden benötigt, um einen eingebrachten Stoff wieder aus dem Lysimeter auszuwaschen.

Die Berechnung der Stickstoffaustragsbilanz aus den Lysimetern zeigte von Oktober 2005 bis Mai 2006 extrem hohe Konzentrationen von Nitrat im Sickerwasser. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Markierungsversuche belegt, dass diese Auswaschung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit eine

<sup>1</sup> FANK, J. & G. VON UNOLD (2007): High-precision weighable field Lysimeter – a tool to measure water and solute balance parameters. *International Water & Irrigation*, Vol. 27, No. 3, 28-32, Tel Aviv.

<sup>2</sup> ALLEN, R. G., W. O. PRUITT, J. L. WRIGHT, T. A. HOWELL, F. VENTURA, R. SNYDER, D. ITENFISU, P. STEDUTO, J. BERENGENA, J. B. YRISARRY, M. SMITH, L. S. PEREIRA, D. RAES, A. PERRIER, I. ALVES, I. WALTER & R. ELLIOTT (2006): A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman-Monteith method. *Agricultural Water Management* 81, 1–22, Elsevier.



Folge des Einbaus der Lysimeter und der dabei erforderlichen Bodenbearbeitung (Pflug) im August mit daran gekoppelter Mineralisierung von Nitratstickstoff ist. Für die Bewertung der Stickstoffausträge aus den unterschiedlich bewirtschafteten Lysimetern wurde daher erst der Zeitraum ab April 2006 herangezogen.

Univ. Doz. Dr. Johann Fank  
JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

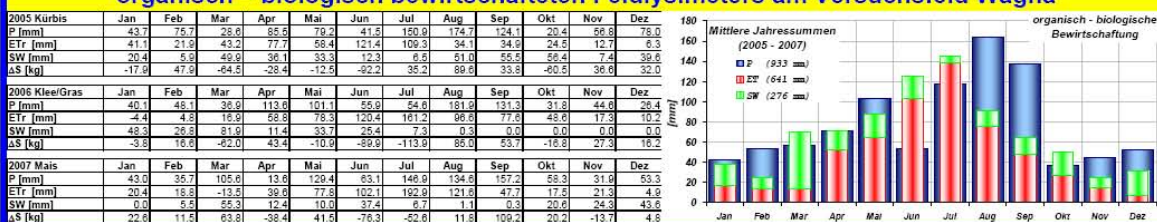
Tel.: +43 (0) 316 / 876 1393  
Fax: +43 (0) 316 / 876 91393  
eMail: johann.fank@joanneum.at  
Internet: www.joanneum.at/WRM

**JOANNEUM RESEARCH**  
**Forschungsgesellschaft mbH**  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik



## Johann FANK : Wasser- und Stoffbilanzen aus den Lysimetern in Wagna

### Monats - Wasserbilanzgrößen der Jahre 2005 bis 2007 abgeleitet aus den Wiegedaten des organisch - biologisch bewirtschafteten Feldlysimeters am Versuchsfeld Wagna



### Monats - Wasserbilanzgrößen der Jahre 2005 bis 2007 abgeleitet aus den Wiegedaten des konventionell bewirtschafteten Feldlysimeters am Versuchsfeld Wagna



### Jahres - Wasserbilanzgrößen der Jahre 2005 bis 2007 (Vergleich konventionelle und organisch - biologische Bewirtschaftung)

|                                  | 2005          |                      | 2006          |                      | 2007          |                      | Σ 2005 - 2007 |                      | JMW 2005 - 2007 |                      |
|----------------------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| ET <sub>g</sub> (mm) (ASCE - PM) | 682           |                      | 681           |                      | 741           |                      | 2104          |                      | 701             |                      |
|                                  | konventionell | organisch-biologisch | konventionell | organisch-biologisch | konventionell | organisch-biologisch | konventionell | organisch-biologisch | konventionell   | organisch-biologisch |
| Niederschlag (mm)                | 943           | 959                  | 907           | 866                  | 925           | 973                  | 2775          | 2798                 | 925             | 933                  |
| Evapotranspiration (mm)          | 628           | 586                  | 606           | 686                  | 586           | 651                  | 1820          | 1923                 | 607             | 641                  |
| Sickerwasser (mm)                | 318           | 374                  | 320           | 235                  | 296           | 217                  | 934           | 827                  | 311             | 276                  |
| Speicheränderung (mm)            | -3            | -1                   | -19           | -55                  | 43            | 104                  | 21            | 49                   | 7               | 16                   |

### Stoffaustrag in Richtung Grundwasser

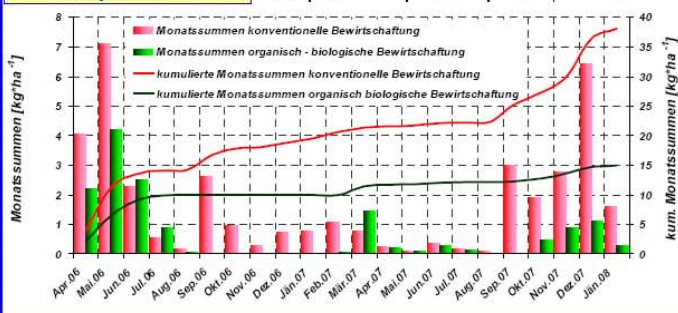
Ein Vergleich der berechneten Stickstoffausträge von Oktober 2005 bis Mai 2006 mit den Ergebnissen von Markierungsversuchen belegt, dass diese anfänglich extrem hohe Auswaschung eine Folge des Einbaus der Lysimeter und der dabei erforderlichen Bodenbearbeitung (Pflug) im August mit daran gekoppelter Mineralisierung von Nitratstickstoff im Boden ist. Für die Bewertung der Stickstoffausträge aus den unterschiedlich bewirtschafteten Lysimetern wird daher der Zeitraum ab April 2006 herangezogen.

01.04.2006 - 31.01.2008

| Parameter                    | Einheit             | Konventionelle Bewirtschaftung | Organisch - biologische Bewirtschaftung |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------|---|
| Sickerwassermenge            | mm                  | 497                            | 300                                     |
| Mittelwert el. Leitfähigkeit | μS cm <sup>-1</sup> | 280                            | 365                                     |
| Mittelwert pH-Wert           | -                   | 6.98                           | 7.24                                    |
| Auswaschung                  |                     |                                |   |
| Natrium                      | kg ha <sup>-1</sup> | 33.93                          | 14.60                                   |
| Kalium                       | kg ha <sup>-1</sup> | 3.56                           | 1.37                                    |
| Magnesium                    | kg ha <sup>-1</sup> | 21.08                          | 12.57                                   |
| Kalzium                      | kg ha <sup>-1</sup> | 252.49                         | 197.99                                  |
| Chlorid                      | kg ha <sup>-1</sup> | 38.24                          | 4.77                                    |
| Nitrat                       | kg ha <sup>-1</sup> | 168.69                         | 68.33                                   |
| Sulfat                       | kg ha <sup>-1</sup> | 174.70                         | 99.79                                   |
| Mittlere Konzentrationen     |                     |                                |   |
| Natrium                      | mg l <sup>-1</sup>  | 7.05                           | 5.19                                    |
| Kalium                       | mg l <sup>-1</sup>  | 0.76                           | 0.51                                    |
| Magnesium                    | mg l <sup>-1</sup>  | 4.08                           | 4.32                                    |
| Kalzium                      | mg l <sup>-1</sup>  | 47.47                          | 67.96                                   |
| Chlorid                      | mg l <sup>-1</sup>  | 7.59                           | 1.90                                    |
| Nitrat                       | mg l <sup>-1</sup>  | 30.25                          | 25.47                                   |
| Sulfat                       | mg l <sup>-1</sup>  | 36.44                          | 34.03                                   |

Rechts: Düngung, Abfuhr mit dem Erntegut und Ernterückstände der ackerbaulichen Kulturen. (Futtergrünland [Klee / Gras Gemenge] wird zum Stickstoffimport gemulcht, Grüncke ist Stickstoff in oberirdischer Pflanzenmasse)

Unten: Stickstoffauswaschung aus den Lysimetern



# Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Feldmessungen – ein Vergleich mit Lysimeterergebnissen

Uwe Schindler & Lothar Müller

Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V.  
Institut für Bodenlandschaftsforschung  
Eberswalder Str. 84  
D-15374 Müncheberg

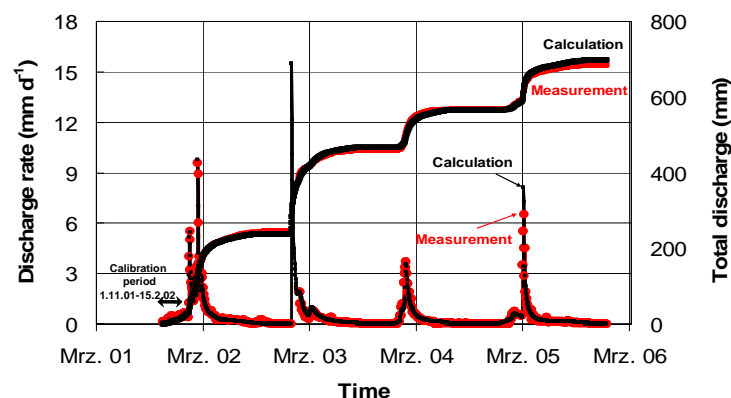
## Zusammenfassung

Lysimeter sind ein anerkanntes und geeignetes Instrumentarium zur Messung von Sickerwasser und Stoffaustrag. Bodenhydrologische Feldmessungen könnten eine kostengünstige Alternative bieten. Ihre Eignung sollte im Vergleich zu Lysimetermessungen geprüft werden.

Die Methode basiert auf kontinuierlichen Wassergehalts- und Saugspannungsmessungen unterhalb der hydraulischen Scheide. Auf Acker- und Grasstandorten wird gewöhnlich in 3 m, unter Wald in 5 m Tiefe gemessen. Die Quantifizierung der Sickerwasserdynamik erfolgt dann aus dem Wassergehaltsverlauf und einer aus den Feldmessungen abgeleiteten und an der Wasserbilanz in einem frostfreien Winterzeitraum kalibrierten hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion (K-Funktion). Kenntnisse vom Boden, Fruchtart und Niederschlag sind für die folgende Berechnung der Sickerwasserraten nicht erforderlich.

Die Prüfung der Methode erfolgte in der Lysimeteranlage in Dedelow durch Vergleich der gemessenen mit den berechneten Sickerwasserraten. In ein Sandlysimeter (Grundfläche 1 \* 1 m, Tiefe 2 m) wurden dazu im November 2001 Tensiometer und TDR Sensoren eingebaut. Die Kalibrierung der K-Funktion wurde im Zeitraum vom 1. November 2001 bis 15. Februar 2002 durchgeführt. Die weitere Sickerwasserberechnung erfolgte dann wie unter Feldbedingungen aus dem Wassergehaltsverlauf in 1,85 m Tiefe und der kalibrierten K-Funktion für den Zeitraum vom 16. Februar 2002 bis 22. Februar 2006.

Der Vergleich der gemessenen mit den berechneten Sickerwasserraten zeigt eine gute Übereinstimmung sowohl im Gesamtverlauf als auch in der Höhe der Einzelwerte. Das wird sowohl visuell (Abb. 34) wie auch durch den WILLMOTT's Index of Agreement ( $d = 0,97$ ) bestätigt.



**Abb. 34.** Vergleich der im Lysimeter gemessenen mit aus bodenhydrologischen Messungen berechneten Sickerwasserraten

Es konnte gezeigt werden, dass die Sickerwasserdynamik mittels zeitlich und räumlich hoch aufgelöster bodenhydrologischer Feldmessungen ermittelt werden kann. Gegenüber Lysimetern ist diese Verfahrensweise deutlich preisgünstiger und flexibler. Typische Lysimeterfehler (Oasen- und Struktureffekt, Randeinflüsse u. a.) können so vermieden werden.



# Evaluation of a field method of deep seepage estimation based on soil hydrological measurements

Schindler, U. and L. Müller

Leibniz Center for Agricultural Landscape Research (ZALF) Müncheberg  
Eberswalder Str. 84, D-15174 Müncheberg

## Objective:

Soil hydrological field measurements (virtual lysimeter), allow to obtain information on temporal variability of deep seepage and solute leaching. But measuring at various sites and with many sensors across the whole profile is expensive and not a feasible solution. A simplified method provides for the calculation of deep seepage based on water content and tension measurements only at one depth below the zero flux plane. The reliability of those deep seepage estimations was tested in comparison with real lysimeter measurements.

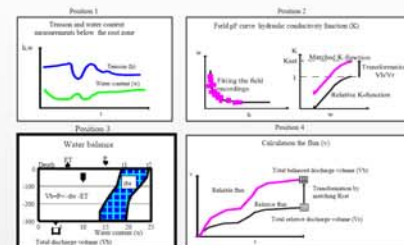
## Model concept

Quantifying deep seepage based on soil hydrological measurements in one depth below the zero flux plane.



## Procedure

Water content and tension are continually measured with a high temporal resolution at one depth below the zero flux plane (**Position 1**). The water retention function is fitted and the relative unsaturated hydraulic conductivity function ( $K_r(wv)$ ) in dependence on water content is predicted (**Position 2**). The relative deep seepage rates ( $v_r$ ) are calculated by the simplified Darcy Equation ( $v_r = K_r$ ) based on the water content dynamics, and the relative hydraulic conductivity function. The unit gradient 1 is assumed (**Position 4**). The water balance ( $V_b = P - ET \pm \Delta\theta$ ) at the soil hydrological plot is calculated based on precipitation and water content measurements for a calibration period (autumn/winter period) (**Position 4**). The period should be as long as possible (2-4 months) and have a relevant precipitation ( $> 100$  mm). The total discharge ( $V_b$ ) is divided by  $V_r$  (total relative deep seepage of the calibration period) to get the matching factor ( $M = V_b/V_r$ ) for transforming the relative hydraulic conductivity function into an effective level (**Position 2**).



## Lysimeter

Lysimeter cellar



One gravitational lysimeter (1\*1m; 2 m depth) from the Dedelow lysimeter station (Uckermark) was used for the comparison of deep seepage estimations based on the virtual lysimeter concept with the measured real lysimeter discharge. Winter wheat was grown in 2002.

| Horizon | Depth (cm) | $\rho_s$ (g cm <sup>-3</sup> ) | DBD (%) | C <sub>org</sub> (%) | SS (%) | Cl (%) |
|---------|------------|--------------------------------|---------|----------------------|--------|--------|
| Ap      | 0-17       | 0.88                           | 1.52    | 4                    | 29     | 72     |
| Bt      | 17-115     | 0.1                            | 1.83    | 8                    | 29     | 62     |
| C       | 115-200    | 0.1                            | 1.85    | 1                    | 4      | 95     |

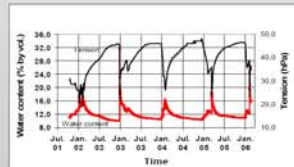
Instrumentation



## Results

### Measurement

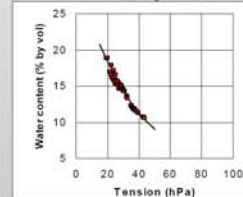
Water content and tension measurements



Both values had a comparable dynamics with regard to drainage and saturation processes. Water contents were found to vary between minimum 10.0 and maximum 31.5 % by vol. and tension values between minimum 19.1 and maximum 45.9 hPa.

### Fitting

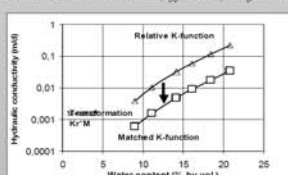
Water retention function



From TDR- and tension measurements a water retention curve was fitted.

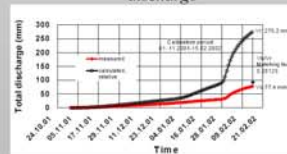
### Calibration procedure

Relative and matched (effective) K-function

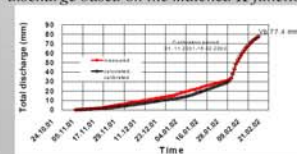


From TDR- and tension measurements a water retention curve was fitted. Based on the fitted water retention function, the relative unsaturated hydraulic conductivity function ( $K_r$ ) was derived and matched to the measured lysimeter discharge in the calibration period from 1 November 2001 to 15 February 2002.

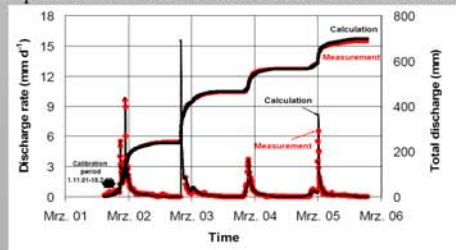
Measured and calculated, relative discharge



Measured and calculated, calibrated discharge based on the matched K-function



## Comparison between measured and calculated discharge



Deep seepage calculations were found to agree well with lysimeter measurements and show the potential of the virtual lysimeter method, when exact calibration data are available. Temporal dynamics of daily rates as well total seepage differed only negligibly from measured discharge in the calibration (1 November 2001 to 15 February 2002) and validation period (16 February 2002 to 22 February 2006).

## Conclusions

The virtual lysimeter concept was tested and found to be suitable for quantifying effective deep seepage dynamics in sandy soils. Preconditions are accurate water content and tension measurements with high temporal resolution below the zero flux plane and an error free water balance of the calibration period. The calibration procedure has resulted in an effective unsaturated hydraulic conductivity function which allow deep seepage calculations based on the measured water content dynamics only. The assumption of the unit gradient produced adequate results in sandy soils.

More important than the accuracy of absolute water content proved to be the measuring accuracy and long-term reproducibility of water content changes. The calculation results are exponentially sensitive to errors of water content measurements and linearly sensitive to water balance errors. However, one incorrect water content produces only one incorrect deep seepage value, whereas a water balance error sums up. The error of water balance estimation in the calibration period is linearly transformed into the discharge calculation error. Therefore, the quality of the water balance estimation proved to be of crucial importance.

# Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven

Michael Herbst, Andre Peters & Wolfgang Durner

Institut für Geoökologie  
Technische Universität Braunschweig  
Bodenphysik  
Langer Kamp 19c  
D-38106 Braunschweig

## Zusammenfassung

Die Kenntnis und Modellierung von Wasserbewegungen in der ungesättigten Bodenzone ist eine der wichtigsten Anforderungen an die Bodenhydrologie. Die Beschreibung der Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone erfolgt durch numerische Modellierung der RICHARDS-Gleichung. Hierzu werden die Retentions- und die Leitfähigkeitsfunktion benötigt. Experimentell gemessene Daten für diese Zusammenhänge werden dabei durch geeignete Funktionen beschrieben, deren Parameter durch Anpassung an die Messdaten optimiert werden.

PETERS und DURNER (2005, 2006) haben gezeigt, dass bei der bisherigen Vorgehensweise zur Anpassung von Retentionskurven an Daten systematische Fehler gemacht werden, die für manche Böden groß sein können. Sie können durch einen so genannten »Integralen Fit« vermieden werden. Ziel dieser Arbeit war, anhand von möglichst vielen Datensätzen aus der Literatur (i) ein Ranking von Funktionstypen in Hinblick auf ihre Eignung zur Beschreibung experimenteller Daten vorzunehmen, (ii) zu testen, ob dieses Ranking durch die Art der Fitting-Methode beeinflusst wird, und (iii) den Fehler zu quantifizieren, der durch die Verwendung der bisher üblichen Methodik gemacht wird. Zu diesem Zweck wurden zuerst möglichst viele Modelle für Retentionskurven aus der Literatur zusammengetragen. Aus über 30 Typen wurden die 14 wichtigsten Modelle für den Vergleich ausgewählt, und in die Anpassungs-Software SHYPPFIT 2.0 (PETERS und DURNER, 2007) implementiert. Die Software erlaubt die Anpassung aller 14 Modelle nach der bisher üblichen fehlerbehafteten sowie der fehlerkorrigierten integralen Methode.

Zur Prüfung der Modelleignung wurden 202 Datensätzen aus der UNSODA Datenbank ausgewählt. Die Anpassungsgüte wurde anhand des root mean square errors (RMSE), des Bestimmungsmaßes ( $R^2$ ), sowie über das Akaike Informationskriterium (AIC) quantifiziert. Wir fanden signifikante Unterschiede in der Anpassungsgüte der Modelle, allerdings unterscheiden sich die Besten oft nur marginal. Den besten Fit ergab am häufigsten das weitgehend unbekannte Modell von GLOBUS (1987). Den im Mittel besten Fit ergab die Funktion von KOSUGI (1994). Auch das weit verbreitete Modell von VAN GENUCHTEN (1980) schnitt in der Variante mit freiem Parameter  $m$  sehr gut ab. Das Ranking der Modelle war von der Fitting-Methode (klassisch oder integral) unbeeinflusst. Die klassische Fit-Methode ergab in manchen Fällen eine signifikante Abweichung von den wahren Daten. Weitere detaillierte Angaben sowie die Quellenangaben zu den verwendeten Funktionen finden sich in HERBST (2007) und HERBST et al. (2008).

## Literatur

- HERBST, M. (2007): Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven. – Diplomarbeit, Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenphysik und Bodenkunde, TU Braunschweig.
- HERBST, M., A. PETERS & W. DURNER (2008): Model comparison for unimodal water retention curves. – Soil Science Society of America Journal, in Vorbereitung.
- PETERS, A. & W. DURNER (2005): Verbesserte Methode zur Bestimmung der Retentionsfunktion aus hydrostatischen Säulenexperimenten, – Mitteilg. der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. 107, 83-84.
- PETERS, A. & W. DURNER (2006): Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments, – Water Resour. Res., 42, W11401, doi:10.1029/2006WR004952.
- PETERS, A. & W. DURNER (2007): SHYPPFIT 2.0 User's Manual, – Internal Report. Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig, unveröffentlicht.

# Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven

Michael Herbst, Andre Peters und Wolfgang Durner, Abteilung Bodenkunde und Bodenphysik, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig

## Einleitung

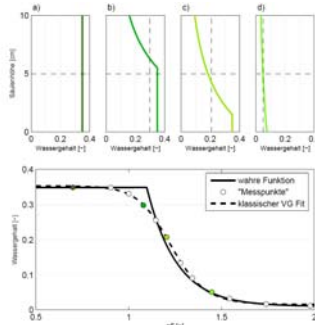
Die Kenntnis der Wasserbewegung und des daran gebundenen Stofftransports in der ungesättigten Bodenzone ist eine der wichtigsten Anforderungen an die Bodenhydrologie. Die Modellierung der Wasserbewegung in der ungesättigten Bodenzone erfolgt durch numerische Simulation auf Basis der Richards-Gleichung. Hierzu werden die Retentions- und die Leitfähigkeitsfunktion benötigt.

Experimentell gemessenen Daten für diese Zusammenhänge werden dabei durch geeignete Funktionen beschrieben, deren Parameter durch Anpassung an die Messdaten optimiert werden. Peters und Durner (2005, 2006) haben gezeigt, dass bei der bisherigen Vorgehensweise zur Anpassung von Retentionskurven an Daten systematische Fehler gemacht werden, für manche Böden groß sein können.

Ziel dieser Arbeit war, anhand von möglichst vielen Datensätzen aus der Literatur (i) ein Ranking von Funktionstypen in Hinblick auf ihre Eignung zur Beschreibung experimenteller Daten vorzunehmen, (ii) zu testen, ob dieses Ranking durch die Art der Fitting-Methode beeinflusst wird, und (iii) den Fehler zu quantifizieren, der durch die Verwendung der bisher üblichen Methodik gemacht wird.

## Theorie und Methodik

### Linearisierungsfehler bei Messdaten



Die oberen Grafiken zeigen die Wassergehaltsverteilung in einer 10 cm hohen Laborsäule im Gleichgewichtszustand (grüne Linien), wobei am unteren Säulenrand die Wasserspannung von 0, 7, 11 und 23 cm anliegt (von links nach rechts).

Die untere Grafik zeigt die Messpunkte, welche aus dem oben beschriebenen Versuchsaufbau resultieren würden. Die mit den verschiedenen Grüntönen gefüllten Kreise stellen die Messpunkte dar, die aus den in den oberen Grafiken gezeigten Schritten der Messreihe entstanden sind. Gezeigt sind weiter die wahre Retentionsfunktion des hypothetischen Bodens (Brooks & Corey-Typ), sowie eine Retentionsfunktion als Ergebnis eines klassischen Fits mit dem Modell von van Genuchten (1980). Es ist offenbar, dass das scheinbar „beste“ Modell falsch ist.

### Vermeidung des Fehlers durch integrale Anpassung

Exakte Lösung für gemessene Wassergehalte (Peters und Durner, 2006):

$$\bar{\theta}(h) = \frac{1}{L} \int_{h_0}^{h_k} \theta(h) dh$$

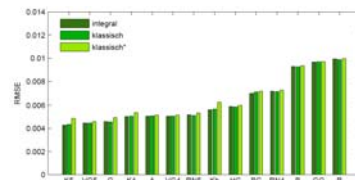
Dies führt zu folgender Zielfunktion im Parameter-Optimierungsalgorithmus

$$\Phi(\beta, h) = \sum_{i=1}^n w_i \left[ \bar{\theta}_i - \frac{1}{L} \int_{h_0}^{h_k} \hat{\theta}(\beta, h) dh \right]^2$$

Vierzehn Modelle für Retentionskurven wurden für einen Vergleich ausgewählt, und mittels der Anpassungs-Software SHYPPFIT 2.0 (Peters und Durner, 2007) an 202 Datensätze aus der Datenbank UNSODA angepasst. Die Anpassungsgüte wurde über den mittleren Fehler (RMSE) und das Akaike-Modellierungskriterium AIC quantifiziert. Alle Modelle repräsentieren unimodale Porengrößenverteilungen und besitzen drei bis fünf Parameter.

$$\begin{aligned} & \text{BC: Brooks and Corey (1984)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{VG: van Genuchten (1980)} \\ & \quad \theta_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{n} \left( \frac{u}{1+u} \right)^{2n}} \\ & \text{B: Brooks and Corey (1984)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ u^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{G: Ghafari (1987)} \\ & \quad \theta_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{n} \left( \frac{u}{1+u} \right)^{2n}} \\ & \text{HC: Haines and Cox (1967)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{Kb: Kosugi (1994)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{RN4: Renard (1984)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{RN5: Renard (1985)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \\ & \text{A: Anand et al. (1999)} \\ & \quad \theta_s = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{n} \left( \frac{u}{1+u} \right)^{2n}} \\ & \text{GG: Gao and Gao (2004)} \\ & \quad \theta_s = \frac{1}{1 + \frac{1}{n} \left( \frac{u}{1+u} \right)^{2n}} \\ & \text{Kb: Kosugi (1994)} \\ & \quad \theta_s = \begin{cases} 1 & \text{für } u \leq 1 \\ (u+1)^{-2} & \text{für } u > 1 \end{cases} \end{aligned}$$

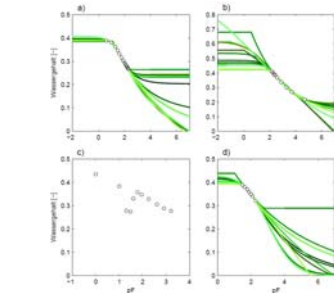
## Ergebnisse



Die Mittelwerte des RMSE aus 202 Datensätzen für die 14 ausgewählten Modelle ergeben die beste mittlere Anpassung für das Modell K5. Das Ranking ist für die integrale und klassische Anpassungsmethode nicht verschieden. Die klassische (Fehl-)Anpassung führt in geringem Ausmaß zu erhöhten Fehlern.

| Funktion | RMSE |    |    | R <sup>2</sup> |    |    | AIC |    |    |
|----------|------|----|----|----------------|----|----|-----|----|----|
|          | 1.   | 2. | 3. | 1.             | 2. | 3. | 1.  | 2. | 3. |
| K5       | 25   | 33 | 19 | 26             | 35 | 21 | 11  | 12 | 32 |
| VG5      | 30   | 37 | 20 | 30             | 36 | 20 | 7   | 19 | 22 |
| G        | 61   | 17 | 20 | 61             | 17 | 19 | 19  | 13 | 23 |
| K4       | 5    | 19 | 34 | 4              | 24 | 32 | 28  | 23 | 13 |
| A        | 15   | 16 | 6  | 15             | 16 | 6  | 21  | 14 | 13 |
| VG4      | 9    | 17 | 10 | 10             | 17 | 15 | 16  | 14 | 14 |
| RN5      | 6    | 6  | 7  | 6              | 6  | 7  | 18  | 14 | 14 |
| Kb       | 13   | 15 | 13 | 13             | 8  | 14 | 25  | 18 | 8  |
| HC       | 3    | 8  | 31 | 3              | 8  | 31 | 7   | 28 | 27 |
| RN4      | 1    | 7  | 10 | 1              | 7  | 10 | 9   | 8  | 9  |
| B        | 33   | 13 | 33 | 33             | 13 | 24 | 21  | 10 | 10 |
| GG       | 2    | 1  | 2  | 2              | 1  | 2  | 3   | 3  | 2  |
| R        | 3    | 3  | 3  | 3              | 3  | 3  | 13  | 8  | 6  |
| R        | 6    | 6  | 6  | 6              | 6  | 6  | 4   | 8  | 8  |

Ranking der gefitteten Modelle: Belegung der ersten drei Plätze der ausgewählten Modelle bei Verwendung der integralen Fitmethode jeweils für RMSE, R<sup>2</sup> und AIC. Die Plätze eins und zwei sind rot bzw. gelb markiert. Ein Drittel aller Datensätze wird am besten durch das Globus-Modell (G) gefittet, ein knappes Viertel durch RN4.



Spekulativer Verlauf der Retentionsfunktionen außerhalb des durch Messdaten abgedeckten Bereichs. Fits an die Datensätze 2432 (a), 4591 (b) und 3381 (d) sowie der nicht verwendete Datensatz 1114 (c).

## Fazit

Wir fanden signifikante Unterschiede in der Anpassungsgüte der unterschiedlichen Modelle, die Besten allerdings unterscheiden sich oft nur marginal. Das Modell von Kosugi (1994) war im Mittel der drei Gütekriterien das Beste. Am häufigsten den besten Fit ergab allerdings das Globus-Modell. Auch das Fünf-Parameter-van Genuchten-Modell (van Genuchten, 1980) sowie die Modelle von Kosugi (1996, 1997) schnitten sehr gut ab. Das Ranking der Modelle blieb von der Fitting-Methode (klassisch oder integral) unbeeinflusst.

Die Unterschiede der angepassten Retentionskurven im Bereich der Messdaten sind sehr gering im Vergleich zu den Unterschieden im Extrapolationsbereich zur Sättigung und zur Austrocknung hin. Dies hat Auswirkungen auf Simulationen des Wasserhaushalts mit den Modellen. Um Unsicherheiten zu vermindern sind Bestimmungsverfahren mit weitem Potentialbereich anzuwenden. Geeignet ist z.B. die vereinfachte Verdunstungsmethode nach Schindler in der integralen Implementierung durch HYPROP (Fa. UMS München).

## Literatur

Herbst, M. (2007) Modellvergleich für Funktionen zur Beschreibung von Wasser-Retentionskurven. – Diplomarbeit, Institut für Geoökologie, Abteilung Bodenphysik und Bodenkunde, TU Braunschweig.  
Peters, A., und W. Durner (2005): Verbesserte Methode zur Bestimmung der Retentionsfunktion aus statischen Säulensäulenexperimenten. – Mittlg. der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 107, 83-84.  
Peters, A., und W. Durner (2006): Improved estimation of soil water retention characteristics from hydrostatic column experiments. – Water Resour. Res. 42, W11401, doi:10.1029/2006WR004952.  
Peters, A. und W. Durner (2007): SHYPPFIT 2.0 User's Manual. – Internal Report. Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig.

# Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala – ein Modellvergleich

Norbert Böttcher<sup>1</sup>, Johann Fank<sup>2</sup>, Rudolf Liedl<sup>1</sup> & Thomas Reimann<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Technische Universität Dresden  
Institut für Grundwasserwirtschaft  
Karcherallee 8  
D-01277 Dresden

<sup>2</sup> JOANNEUM RESEARCH  
Institut für WasserRessourcenManagement  
Hydrogeologie und Geophysik  
Elisabethstraße 16/II  
A-8010 Graz

## Zusammenfassung

Lassen sich leicht verfügbare Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodelle einsetzen, um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenzone abzubilden? Unterscheiden sich die Ergebnisse gleich kalibrierter Modelle, wenn mit diesen Langzeitsimulationen durchgeführt werden? Lassen sich die Resultate dieser Langzeitsimulationen zur Prognose einsetzen?

Um Antworten auf diese Fragestellungen zu finden, wurden in dieser Arbeit drei leicht verfügbare, numerische Wasser-, Wärme und Stofftransportmodelle miteinander verglichen. Die Modelle wurden dafür anhand von Lysimeterdaten der hydrologischen Forschungsstation Wagna einheitlich kalibriert. In dem verwendeten Datensatz sind bodenphysikalische, meteorologische und landwirtschaftliche Messwerte und Angaben über einen Zeitraum von drei Jahren mit täglicher Auflösung zusammengefasst.

Da alle wesentlichen Transportvorgänge im Lysimeter vertikal gerichtet sind, wurden ausschließlich eindimensionale Modelle zum Vergleich ausgewählt. Ein weiteres Kriterium bei der Auswahl der Modelle war deren freie Verfügbarkeit. Folgende Modelle wurden untersucht:

- Hydrus 1D (ŠIMŮNEK und VAN GENUCHTEN, 2005)
- CoupModel (JANSSON und KARLBERG, 2001)
- STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998)

Zunächst wurden die Modelle kalibriert und erfolgreich validiert. Im Anschluss daran wurden sechs Klimaszenarien entwickelt, welche mögliche Klimaveränderungen beinhalteten. Die Szenarien wurden mithilfe eines Klimagenerators erzeugt und basieren auf realen Klimadaten. Die Zeitreihen erstrecken sich über einen relativ langen Zeitraum von 50 Jahren.

Die Ergebnisse der Langzeitsimulationen zeigen, dass alle Modelle realistische und nachvollziehbare Ergebnisse liefern. Die Resultate der Modellrechnungen weichen jedoch aufgrund unterschiedlicher Modellansätze und -komplexitäten zum Teil stark voneinander ab. Dennoch wird in dieser Arbeit ein umfangreicher Modellvergleich angestellt, bei dem sowohl eine Gegenüberstellung der erhaltenen Modellergebnisse als auch eine vergleichende Bewertung der Bedienbarkeit und der Anwenderfreundlichkeit der Benutzeroberflächen berücksichtigt wird.

## Literatur

- FEICHTINGER, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik der ungesättigten Zone eines Ackerbodens. In: Modelle für die ungesättigte und gesättigte Bodenzone. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Bd. 7, Petzenkirchen.
- IPCC (2007): Climate Change 2007. The Physical Science Basis. International Panel on Climate Change, Working Group III.
- JANSSON, P. E. & L. KARLBERG (2001): Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stockholm.
- ŠIMŮNEK, J. & 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. University of California, Riverside.





## SIMULATION VON WASSERFLUSS, WÄRME- UND STOFFTRANSPORT AUF DER LYSIMETERSKALA – EIN MODELLVERGLEICH

N. Böttcher<sup>1)</sup>, J. Fank<sup>2)</sup>, R. Lied<sup>1)</sup>, T. Reimann<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Technische Universität Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, 01062 Dresden  
grundwasser@mailbox.tu-dresden.de

<sup>2)</sup> JOANNEUM RESEARCH, Institut für WasserressourcenManagement, Elisabethstraße 16, 8010 Graz, Österreich  
johann.fank@joanneum.at

### EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Das Ziel dieser Arbeit ist die Beantwortung der Frage, ob und inwieweit leicht verfügbare, eindimensionale Bodenwasserhaushaltsmodelle in der Lage sind, die Auswirkungen des Klimawandels auf die ungesättigte Bodenzone abzubilden. Dafür werden drei ausgewählte Modellprogramme mittels Lysimeterdaten einheitlich kalibriert und anschließend Langzeitsimulationen mit veränderten Klimaszenarien durchgeführt. Danach werden die Ergebnisse der Modellkalibration und der Langzeitsimulationen für einen umfangreichen Modellvergleich gegenübergestellt, um die Anwendbarkeit der untersuchten Modelle für landwirtschaftliche Langzeitsimulationen zu bewerten.

### MODELLAUSWAHL

- Hydrus 1D (SIMONEK und VAN GENUCHTEN, 2005).
- CoupModel (JANSSON und KARLBERG, 2001).
- STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998).

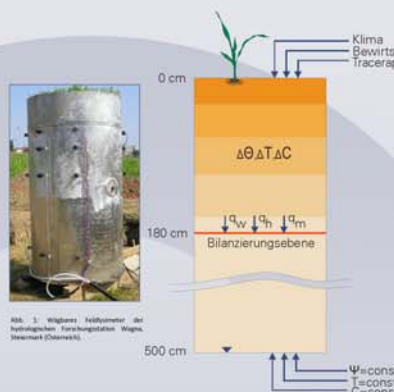
### DATENGRUNDLAGE

- Datensatz der hydrologischen Forschungsstation Wagna, Steiermark (Österreich)
- wägbares Präzisionslysimeter:
  - Wassergehalt, Bodentemperatur und Saugspannung in vier Tiefen
  - Sickerwassermenge und -beschaffenheit
  - Klimadaten



Abb. 1: Wägbares Präzisionslysimeter der hydrologischen Forschungsstation Wagna, Steiermark (Österreich).

Abb. 2 (links): 150 Messungen der Bodenfeuchte in den Tiefen 25, 50, 75 und 100 cm für das gesamte Simulationsintervall.



### MODELLKONZEPT

- vier homogene Horizonte
- Hydraulische Eigenschaften: van Genuchten-Parameter  $\alpha, n, m$
- Oberer Modellrand: variable Randbedingung ( $d_t = 1d$ )
- Unterer Modellrand: konstante Randbedingung

### KLIMAVARIATION

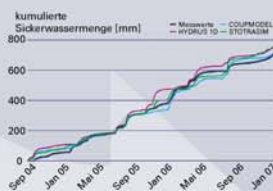


Abb. 3: Mit Hilfe eines Klimamodells wurde auf der Basis mehrerer Wetterdaten das Klimaszenario Rcp erstellt. Daraus entstehen sich über einen Zeitraum von 50 Jahren von 2010 bis 2059. Ausgehend von diesem Referenzszenario wurden weitere Szenarien mit möglichen Klimawandeländerungen bzw. klimatischen Bedingungen anderer Standorte generiert.

### ERGEBNISSE DER MODELLKALIBRATION

- Validierung durch Sickerwasserganglinie
- gute Anpassung an Messwerte
- Abweichungen: in Wintermonaten und nach Starkniederschlägen

Abb. 4 (rechts): Ergebnis der Modellkalibration am Beispiel des kumulierten Sickerwasserflusses. Trotz einheitlicher Kalibrierung reagieren die Modelle insbesondere bei Bodenfeuchteschwüngen sehr unterschiedlich. Die beste Anpassung an die gemessenen Sickerwassermengen zeigt das Modell STOTRASIM.



### ERGEBNISSE DER LANGZEITSIMULATIONEN



Abb. 5: Tägliche Mittelwerte des Sickerwasserflusses über das gesamte Simulationsintervall von 50 Jahren. Während bei Hydrus 1D kein nennenswerter jährlicher Verlauf erkennbar ist, zeigen die Modelle CoupModel und STOTRASIM deutlich ausgeprägte saisonale Schwankungen.

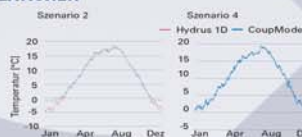


Abb. 6: Mit CoupModel und Hydrus 1D simulierte Bodenprofile zu 5 cm Tiefe. Während bei positiven Temperaturen beide Modelle nahezu deckungsgleiche Temperaturverläufe liefern, weichen die Ergebnisse bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt stark voneinander ab. Die Ursache für diese Abweichung ist in dem falschen Bodeneisumsatz bei Hydrus 1D zu sehen. Trotz negativen Temperaturen lag das Wasser in flüssiger Form vor und erstarrte. Dadurch wird die Wärmeabfuhr in tiefere Horizonte überhöht.

### MODELLVERGLEICH

|                               | Hydrus 1D | CoupModel | STOTRASIM |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Anwendbarkeit für</b>      |           |           |           |
| Langzeitsimulationen          | -         | +         | ++        |
| Klimawandelprognosen          | +         | ++        | +         |
| Landwirtschaftliche Prognosen | -         | +         | ++        |
| Pflanzenentwicklung           | 0         | +         | ++        |
| <b>Modell</b>                 |           |           |           |
| Komplexität                   | ++        | ?         | ?         |
| Übertragbarkeit               | +         | +         | -         |
| Parametereinsatz              | ++        | ++        | ++        |
| Notwendige Datengrundlage     | ++        | ++        | 0         |
| Transparenz der Teilprozesse  | +         | ++        | ++        |
| <b>Software</b>               |           |           |           |
| Programmierbarkeit            | +         | ++        | -         |
| Benutzerfreundlichkeit        | ++        | ++        | +         |
| Einarbeitungszeit             | +         | ++        | +         |
| Dokumentation                 | +         | +         | +         |
| Darstellung der Ergebnisse    | +         | +         | -         |
| Support                       | ++        | +         | +         |
| Verfügbarkeit                 | +         | +         | 0         |

Tab. 1: Zusammenfassender Modellvergleich (0 = sehr gut, + gut, ++ sehr gut, ? keine Aussage möglich)

### FAZIT

- Hydrus 1D ist in der Lage, Wasser-, Wärme- und Stofftransportprozesse ohne hohen Datenaufwand mit einer hohen Genauigkeit zu simulieren. Das Programm selbst arbeitet sehr stabil auf den meisten Systemen und bedarf keiner langen Einarbeitungszeit. Ohne einen hinreichenden Ansatz zur Beschreibung der Pflanzenentwicklung ist Hydrus 1D jedoch für landwirtschaftliche Langzeitszenarien ungeeignet.
- Mit CoupModel lassen sich nahezu alle relevanten Prozesse zwischen Pflanze und Boden beschreiben. Diese hohe Modellkomplexität erfordert jedoch auch eine sehr detaillierte Datengrundlage und eine verhältnismäßig lange Einarbeitungszeit für den Benutzer. Durch die Wechselwirkungen der einzelnen Teilprozesse können sich Parameterfehler leicht fortplanzen und zum Teil sehr große Fehler in den Endergebnissen verursachen.
- Das Modell STOTRASIM liefert auf einfache Weise Ergebnisse mit sehr hoher Genauigkeit. Alle notwendigen Ausgangsdaten und Parameter werden in Datenbanken verwaltet und können somit bequem zu beliebig langen Modellszenarien zusammengefasst werden. Damit ist STOTRASIM besonders zur Simulation von landwirtschaftlichen Fragestellungen geeignet.

### LITERATUR

- Böttcher, N. (2007): Simulation von Wasserfluss, Wärme- und Stofftransport auf der Lysimeterskala – ein Modellvergleich. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Grundwasserwirtschaft, Technische Universität Dresden.
- Feichtinger, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik der ungesättigten Zone eines Ackerbodens. In: Modelle für die ungesättigte und gesättigte Bodenzone. Bundesanstalt für Wasserwirtschaft, Pettenkirchen.
- IPCC. (2007): Climate Change 2007 The Physical Science Basis. International Panel on Climate Change, Working Group III.
- Jansson, P. E., Karlberg, L. (2001): Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. Royal Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Stockholm.
- Simonek, J., Van Genuchten, M. Th. (2005): The Hydrus-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. University of California, Riverside.

# **Ergänzung zur Exkursion: Der Großparzellenversuch Wagna und dessen Bewirtschaftung (1987 – 2003)**

Georg Fastl<sup>1</sup> & Johann Robier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Weinbauschule Silberberg  
Kogelberg 16  
A-8430 Leibnitz

<sup>2</sup> Versuchsreferat der steirischen Landwirtschaftsschulen  
A-8361 Hatzendorf 181

*Dieser Artikel wurde dem Tagungsband zur Konferenz „Diffuse Einträge in das Grundwasser: Monitoring – Modellierung – Management“ entnommen; Abdruck im Seminarband mit freundlicher Genehmigung der Autoren.*

## **Zusammenfassung**

Im Feldversuch Wagna, der sich auf leichten Böden mit sehr unterschiedlicher Mächtigkeit befindet, ergeben sich signifikante pflanzenbauliche Unterschiede. Der Versuch beschäftigt sich mit der Minderung des Nitrataustrages ins Grundwasser. Dementsprechend sind in der 17-jährigen Laufzeit verschiedenen Varianten vor allem in Bezug auf Düngung im Körnermaisbau untersucht worden.

Eine verminderte mineralische N-Düngung bei Körnermais ergab hochsignifikante Mindererträge, ebenfalls eine verminderte gemischte Düngung mit mineralischer N-Düngung und Gülle. Die mineralische N-Düngung bringt im Vergleich zur reinen Güllendüngung hochsignifikant bessere Erträge. Die einzelnen Parzellen sind sehr heterogen, dementsprechend die Erträge sehr unterschiedlich. Der jeweilige Standort der einzelnen Parzellen beeinflusst deutlich die Ertragshöhe, sodass in Jahren mit Sommertrockenheit die Ertragsunterschiede entscheidend vom Niederschlagsdefizit geprägt sind. Die pflanzenbaulichen Maßnahmen treten in solchen Jahren in den Hintergrund.

## **Einführung**

Der Feldversuch Wagna befindet sich im Grundwasserschongebiet des Leibnitzer Feldes. Das Ausgangsmaterial bildet eine silikatische Lockersedimentbraunerde auf sandig-schottrigem Terrassenmaterial. Der Tongehalt der beträgt im Mittel 14,6 % (Schwankung von 12,0 bis 17,8 %), der Sandanteil 51,8 % (Schwankung von 46,8 und 55,2 %). Der Humusgehalt schwankt zwischen 1,3 und 2,2 %. Die Mächtigkeit reicht von 25 cm bis 150 cm und mehr. In Summe handelt es sich um leichte Böden mit geringem Wasserspeichervermögen. Das Versuchsfeld ist in sich sehr heterogen und es wechseln Trockenklemmen mit tiefgründigen Stellen im engen Raum.

## **Fragestellung des Versuches**

Welche pflanzenbaulichen Maßnahmen eignen sich zur Verminderung des Nitratreintrages in das Grundwasser? Welche Auswirkungen üben diese Maßnahmen auf den Ertrag aus? Dabei wurden vier Düngungsvarianten in einer Körnermaismonokultur (Gülle und Mineraldüngung) und eine vierschlägige Fruchtfolge mit den Fruchtfolgegliedern Körnermais, Körnermais, Wintergetreide und Raps beziehungsweise ab 1998 Ölkürbis untersucht.

## **Versuchspläne und Bewirtschaftungsdaten**

Der Feldversuch in Wagna stellt einen langjährig geführten Großparzellenversuch (Parzellengröße 1000 m<sup>2</sup>) dar. Die Bewirtschaftung wird mit praxisüblichen Geräten durchgeführt. Der Versuch besteht seit 1987, ab 1992 ist eine Lysimeteranlage integriert. Zwischen 1987 und 1997 wurde nach dem Versuchsplan 1 (Tab. 4) und zwischen 1998 und 2003 wurde nach dem Versuchsplan 2 (Tab. 5) gearbeitet.



**Tab. 4.** Versuchsplan 1 - 1987 bis 1997

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b><u>Versuchsanlage:</u></b>  | mehrfaktoriell   |  |
|  | Parzellenzahl:   | 16 Varianten mit 2 Wiederholungen = 32 Parzellen |
| Der Versuch besteht aus 4 Düngungsvarianten in der Körnermaismonokultur und 4 Varianten in Fruchtfolge. Diese 8 Varianten wurden mit 2 verschiedenen Bodenbearbeitungssystemen (konventionell und alternativ) bearbeitet.  |  |  |
| <b><u>Düngungsvarianten in einer Körnermaismonokultur (KM = Körnermais):</u></b>   |  |  |
| <i>Der Güllestickstoff wird als feldfallender Stickstoff (Gesamt N * 0,75) gerechnet.</i>  |  |  |
| * KM1 in der Monokultur: verminderte mineralische N-Düngung  |  | <b>120 kg N/ha</b>                               |
| 60 kg N/ha aus Mineraldünger zum Anbau   |  |  |
| 60 kg N/ha aus Mineraldünger Ende Mai/Anfang Juni  |  |  |
| * KM2 in der Monokultur: mineralische N-Düngung  |  | <b>180 kg N/ha</b>                               |
| 60 kg N/ha aus Mineraldünger zum Anbau   |  |  |
| 60 kg N/ha aus Mineraldünger im Mai  |  |  |
| 60 kg N/ha aus Mineraldünger Anfang Juni   |  |  |
| * KM3 in der Monokultur: Güllegabe mit Herbstgüllung   |  | <b>180 kg N/ha</b>                               |
| 60 kg N/ha als Schweinegülle im Herbst zur Strohhrotte   |  |  |
| 60 kg N/ha als Schweinegülle vor dem Anbau   |  |  |
| 60 kg N/ha als Schweinegülle in den Bestand Anfang Juni  |  |  |
| * KM4 in der Monokultur: Güllegabe im Frühjahr und Juni  |  | <b>180 kg N/ha</b>                               |
| 90 kg N/ha als Schweinegülle vor der Saat  |  |  |
| 90 kg N/ha als Schweinegülle in den Bestand Anfang Juni  |  |  |
| <b><u>Fruchtfolgevarianten:</u></b>  |  |  |
| * Körnermais (KM5) in der Fruchtfolge nach Sommerzwischenfrucht mit Leguminosenanteil:   |  | <b>120 kg N/ha</b>                               |
| 60 kg N/ha als Schweinegülle vor der Saat  |  |  |
| 60 kg N/ha als Schweinegülle in den Bestand Anfang Juni  |  |  |
| * Körnermais (KM6) in der Fruchtfolge: nach KM5  |  | <b>180 kg N/ha</b>                               |
| Düngung wie KM3  |  |  |
| * Wintergetreide   | mit nachfolgendem Winterkörnerrapsanbau                      |  |
| 60 kg N/ha aus Schweinegülle (Güllegabe im Herbst zum Anbau und im zeitigen Frühjahr), mineralische Ergänzung nach Beobachtung   |  |  |
| * Winterkörnerraps   | mit nachfolgender Sommerzwischenfrucht mit Leguminosenanteil |  |
| 150 kg N/ha aus Schweinegülle (60 kg N/ha zum Anbau im Herbst und 90 kg N/ha im zeitigen Frühjahr) mineralische Ergänzung bis zu 180 kg N/ha   |  |  |
| <b><u>Konventionelle Bodenbearbeitung:</u></b> Herbstfurche mit Pflug und übliche Saatbeetbereitung  |  |  |
| <b><u>Alternative Bodenbearbeitung:</u></b> Frühjahrsfurche mit üblicher Saatbeetbereitung großteils nach einer Gründücke bei Körnermais. Bei Getreide und Raps erfolgte die Bodenbearbeitung mit dem Grubber, danach wurde die Saat mit einer zapfwellenbetriebenen, rotierenden Taumelscheibenegge (Fa. Safental) und Drillmaschine in einem Arbeitsgang durchgeführt. |  |  |

Versuchsplan 2: 1998 wurde der Versuch grundsätzlich umgestellt. Im Versuchsplan 2 (1998 bis 2003) wurden weitere Maßnahmen zur Reduktion des Nitratreintrages verwirklicht. Die Maßnahmen sind eine starke Reduzierung der N-Düngung, keine Leguminosen in den Zwischenfrüchten, winterharte Gründecken in allen Varianten, keine Herbstgüllung weder auf Gründecken noch vor Wintergetreide, Frühjahrsfurche bei Mais und Kürbis. Zusätzlich werden diese Varianten mit einer Standardvariante verglichen, und ein Sollwertsystem sollte abgetestet werden.

**Tab. 5.** Versuchsplan 2 - 1998 bis 2003

|  |   |   |
|--|---|---|
| <b>Versuchsanlage:</b>   | Parzellenzahl:  | 8 Varianten mit 4 Wiederholungen = 32 Parzellen |
| <u>Düngungsvarianten in einer Körnermaismonokultur (KM = Körnermais):</u>  |   |   |
| <i>Der Güllestickstoff wird als feldfallender Stickstoff (Gesamt N * 0,75) gerechnet.</i>  |   |   |
| * KM1 in der Monokultur: N-Düngung nach der Empfehlung der landwirtschaftlichen Umweltberatung   |   | <b>107 kg N/ha</b>                              |
|  | 50 kg N/ha als Schweinegülle vor der Saat                                   |   |
|  | 57 kg N/ha mineralisch zur Hacke Ende Mai/Anfang Juni                       |   |
| * KM2 in der Monokultur: N-Düngung nach der Sollwertmethode  |   | <b>(95) - 145 kg N/ha</b>                       |
|  | 0-50 kg N/ha aus Mineraldünger zum Anbau je nach $N_{min}$ -Gehalt im Boden |   |
|  | 35 kg N/ha aus Mineraldünger im Mai   |   |
|  | 60 kg N/ha aus Mineraldünger Ende Mai/Anfang Juni                           |   |
| * KM3 in der Monokultur: Standardvariante  |   | <b>175 kg N/ha</b>                              |
|  | 70 kg N/ha als Schweinegülle vor der Saat                                   |   |
|  | 50 kg N/ha mineralisch zum Anbau  |   |
|  | 55 kg N/ha mineralisch zur Hacke Ende Mai/Anfang Juni                       |   |
| * KM4 in der Monokultur: optimierte Gülleanwendung   |   | <b>107 kg N/ha</b>                              |
|  | 50 kg N/ha als Schweinegülle vor der Saat                                   |   |
|  | 57 kg N/ha als Schweinegülle in den Bestand Ende Mai/Anfang Juni            |   |
| <u>Fruchtfolgevarianten:</u>   |   |   |
| * Körnermais (KM5) in der Fruchtfolge nach Kürbis mit Untersaat  |   | <b>107 kg N/ha</b>                              |
|  | Düngung wie KM4   |   |
| * Körnermais (KM6) in der Fruchtfolge nach Körnermais 5  |   | <b>107 kg N/ha</b>                              |
|  | Düngung wie KM4   |   |
| * Wintergerste   | mit nachfolgender Gründüngung ohne Leguminosen                              |   |
|  | 50 kg N/ha aus Schweinegülle im Frühjahr                                    |   |
|  | mineralische Ergänzung nach Beobachtung                                     |   |
| * Ölkürbis   | mit Untersaat aus englischem Raygras  |   |
|  | 40 kg N/ha Gülle vor dem Anbau  |   |
|  | mineralische Ergänzung nach Beobachtung                                     |   |
| Ergänzung zu KM2:  |   |   |
| Da die gemessenen $N_{min}$ -Gehalte im Boden knapp vor dem Anbau sehr gering waren, empfahl die Sollwertmethode immer eine Anbaudüngung mit der maximalen Menge von 50 kg N/ha. Aus der Sollwertvariante wurde daher in den 6 Jahren eine Variante mit mineralischer N-Düngung mit einer Düngung von 145 kg N/ha. |   |   |

### Bewirtschaftungsintensitäten

Auf Grund der niedrigen N-Gehaltswerte der Gülle in den Jahren 1992 bis 1997 kam es zu Abweichungen der gedüngten N-Menge in der Praxis im Vergleich zum Versuchsplan. Daher ergeben sich im Versuchsplan 1 zwei Phasen mit unterschiedlicher N-Düngungsintensität. Eine dritte Phase ergibt sich mit dem Versuchsplan 2.

**Phase 1:** Versuchsplan 1 1987 bis 1991: mittlere Düngung aller Varianten 178 kg N/ha  
(mittlere N-Düngung aller Körnermaisvarianten 184 kg N/ha)

**Phase 2:** Versuchsplan 1 1992 bis 1997: mittlere N-Düngung aller Varianten 140 kgN/ha  
(mittlere N-Düngung aller Körnermaisvarianten 137 kg N/ha)

**Phase 3:** Versuchsplan 2 1998 bis 2003: mittlere N-Düngung aller Varianten 122 kg N/ha  
(mittlere N-Düngung aller Körnermaisvarianten 128 kg N/ha)

In den Phase 1 und Phase 2 wurde in einzelnen Varianten eine Herbstgüllegabe verabreicht und ein Leguminosenanteil in der Sommerzwischenfrucht angebaut. In der Phase 3 wurde auf diese Maßnahmen verzichtet.

## Ergebnisse

### Interpretation der Ertragsergebnisse Versuchsplan 1 - 1987 bis 1997

In den Jahren zwischen 1988 und 1997 ergab eine geminderte, mineralische N-Düngung bei Körnermais (Vergleich zwischen KM1 - 180 kg N/ha und KM2 - 120 kg N/ha) einen gesicherten Minderertrag von 935 kg Korn/ha (Tab. 6). Die reine Gülledüngung bei Körnermais bringt im ersten Versuchsplan 1 (1988 bis 1997) bei nahezu gleicher N-Düngungshöhe gesicherte Mindererträge gegenüber der reinen mineralischen N-Düngung. (Tab. 6 - Vergleich zwischen KM2 und KM3 oder KM4). Nach EBERDORFER (1998) bringt Körnermais in der Monokultur nach einer Herbstfurche im Vergleich zu einer Frühjahrsfurche signifikant höhere Erträge. Bei Körnermais in der Fruchtfolge trifft das nicht zu.

**Tab. 6.** Ertragsergebnisse in kg/ha Korn/ha im Versuchsplan 1: GD für den Vergleich aller Körnermaisvarianten 413 kg/ha<sup>\*\*</sup>; GD für den Vergleich von KM3 und KM6 (Mais in Monokultur und in Fruchtfolge) 620 kg/ha<sup>\*\*</sup> (EBERDORFER, 1998)

| Variante   | KM1  | KM2  | KM3  | KM4  | KM5  | KM6  | Wintergetreide | Winterraps |
|--|------|------|------|------|------|------|----------------|------------|
| Durchschnitt 1988 bis 1997 konventionelle und alternative Bodenbearbeitung | 8948 | 9883 | 8338 | 8707 | 8466 | 7881 | 4989           | 2024       |

### Interpretation der Ertragsergebnisse Versuchsplan 2 - 1998 bis 2003

Einen statistisch gesicherten Minderertrag von 462 kg bringt die Variante KM1 (107 kg N/ha) im Vergleich zur Variante KM3 (175 kg N/ha), beide wurden mit Gülle und Mineraldünger gemischt gedüngt. Körnermais in der Fruchtfolge hat bei gleicher Düngung den gesichert höheren Ertrag (807 kg/ha) als Körnermais in der Monokultur (Tab. 7 - Vergleichsvarianten KM4 und KM6), allerdings verhält sich dieses Ertragsverhalten im Versuchsplan 1 (1987 bis 1997) genau umgekehrt (Vergleichsvarianten KM3 und KM6 – Tab. 6). Die Variante KM5 liegt im Ertragsniveau bei gleicher Düngung sogar um 1597 kg besser als KM4, was die gute Nachwirkung von Kürbis mit einer Untersaat unterstreicht (Tab. 7).

**Tab. 7.** Ertragsergebnisse in kg/ha im Versuchsplan 2: GD 5 % für die Mittelwerte der Bewirtschaftungsvarianten von Körnermais über alle Jahre: 399 kg/ha (Statistische Berechnungen mit: PLABSTAT Version 20; PFERSCHER, 2006)

| Jahre/Varianten            | KM1  | KM2  | KM3  | KM4  | KM5  | KM6  | Wintergerste | Ölkürbis |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|--------------|----------|
| Durchschnitt 1998 bis 2003 | 8378 | 9086 | 8840 | 7331 | 8928 | 8138 | 4959         | 600      |

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Bei Körnermais entspricht die N-Düngung in den Varianten mit reduzierter Stickstoffgabe dem N-Entzug durch den Korn/ha. Dieser Zusammenhang lässt auf eine gute Grundwasserverträglichkeit schließen. Demnach sind die Varianten KM1, KM2 und KM4 grundwasserschonend, wobei die Variante KM2 an der Grenze liegt. Verschiedene Körnermaissorten sollten in weiteren Versuchen auf Stickstoffeffizienz geprüft werden. Die aktuellen Lysimeterergebnisse geben einen Hinweis darauf, dass bei Getreide und Raps weitere Untersuchungen im Interesse der Grundwasserverträglichkeit notwendig sind.

## Literatur

EBERDORFER, D., 1998: Land und forstwirtschaftlicher Versuchsbericht 1997.

PFERSCHER, J., 2006: Statistische Auswertung des Großparzellenversuchs. Versuchsreferat der steirischen Landwirtschaftsschulen (J. ROBIER)