

MESSDATEN UND MODELLKALIBRATION AN DER FORSCHUNGSSTATION WAGNA UND DARAUS ABZULEITENDE ANFORDERUNGEN AN MESSSTELLEN ZUR KALIBRATION VON BODENWASSERHAUSHALTS- UND STOFFTRANSPORTMODELLEN

Johann Fank¹⁾, Elmar Stenitzer²⁾, Franz Feichtinger²⁾, Peter Cepuder³⁾

¹⁾ JOANNEUM RESEARCH, Institut für WasserRessourcenManagement Hydrogeologie und Geophysik, A-8010 Graz

²⁾ Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, A-3252 Petzenkirchen

³⁾ Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, A-1190 Wien

Abstract: An der Forschungsstation Wagner werden seit 1992 Daten zur Wasser- und Stoffbewegung in der ungesättigten Zone gewonnen. Gerade langfristige Messungen zeigen Effekte auf, die eine Diskussion der Datenerfordernisse für die Modellkalibration immer wieder neu eröffnen. Auf Basis des bisherigen Datenbestandes sowie der Ergebnisse von Modellrechnungen zum Wasser- und Stofftransport werden Anforderungen an Messstellen für die Kalibration von Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodellen in landwirtschaftlich genutzten Bereichen definiert.

1 Einleitung

Für das Grundwasser der quartären Lockersedimente des Murtales führte die intensive Landwirtschaft zu Qualitätsproblemen im Grundwasser. Durch kooperative Management-Maßnahmen konnten die landwirtschaftsspezifischen Belastungen soweit reduziert werden, dass derzeit in nahezu allen Teilbereichen die Förderung von Trinkwasser erfolgen kann. Einen entscheidenden Beitrag dazu lieferten die Forschungs- und Umsetzungsarbeiten an der Forschungsstation Wagner. Die Bewertung der Auswirkung unterschiedlicher Nutzungen auf Grundwassermenge und -qualität erfolgte dabei häufig über die numerische Modellierung und Szenario-Simulation, wobei Bodenwasserhaushaltsmodelle und Modelle zur Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone an den an der Forschungsstation Wagner gewonnenen Messdaten (1992 – 2001) kalibriert wurden. Das bedeutet aber auch, dass Mängel bei den Messdaten ihre Fortsetzung in den Modellergebnissen finden. Über die Problematik der Wechselwirkung zwischen Modellkalibration und Datenlage und die dabei auftretenden Unsicherheiten soll hier berichtet und zukünftige Notwendigkeiten der Datengewinnung diskutiert werden.

2 Material/Methoden

2.1 Versuchsanlage Wagner

Die Forschungsstation Wagner wurde im Jahre 1991 errichtet, um Daten über die Wechselwirkung Atmosphäre – Landwirtschaft – Boden – Sickerwasser unter ortsüblichen Bewirtschaftungsbedingungen und unterschiedlichen Fruchtfolgen gewinnen zu können. Sie liegt auf den Versuchsflächen des land- und forstwirtschaftlichen Versuchswesens des Landes Steiermark, wo seit den 80er Jahren in Großparzellenversuchen die Auswirkung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maßnahmen auf die Ertragssituation und auch auf den Stickstoffhaushalt im Boden untersucht wird. Die Forschungsanlage wurde in einer Fahrgasse zwischen zwei Parzellen unterschiedlicher landwirtschaftlicher Bewirtschaftung, einerseits einer Maismonokultur und andererseits einer definierten Fruchtfolge errichtet. Die Lysimeteranlage Wagner liegt auf der Niederterrasse (Würm) des Leibnitzer Feldes. Die Niederterrasse wird von einem mächtigen Kieskörper mit einer unruhig-welligen Oberkante aufgebaut, der von

einer lehmig-sandigen Deckschicht reliefnivellierend überlagert wird. Die Bodenverhältnisse sind durch die Dominanz silikatischer Braunerden geprägt. Charakteristisch ist die engräumige Schwankung der Gründigkeit. Die Messbereiche beiderseits der Lysimeteranlage werden durch zwei unterschiedlich mächtige Bodenprofile (Feinbodenmächtigkeit 70 cm bzw. 110 cm und daran gekoppelt ein unterschiedliches Wasserspeichervermögen) charakterisiert. Detaillierte Informationen über die Ausstattung der Forschungsstation, die bodenkundlichen und bodenhydrologischen Rahmenbedingungen und die Bewirtschaftungsbedingungen sind Fank, 1999 zu entnehmen.

Die Forschungsstation besteht aus fünf Haupteinheiten: (a) Meteorologische Messstation (Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Strahlung, Luftdruck, Windrichtung und Windgeschwindigkeit), (b) 2 Messprofile zu je 5 Messtiefen mit automatischer Registrierung der Bodentemperatur, der Saugspannung und des Wassergehaltes in der ungesättigten Zone. Saugkerzen zur Gewinnung von Bodenlösung sind in der gleichen Tiefe wie die Tensiometer eingebaut, (c) monolithische Lysimeter unterschiedlicher Mächtigkeit (40, 70, 110 cm unter Gelände) und unter gestörten Bedingungen eingebaute Sickerwassersammler (150, 250 cm unter Gelände) im Schotter zur Erfassung der Sickerwassermenge und der Sickerwasserqualität unter Feldbedingungen, (d) 2 Gefäßlysimeter (Schwerkraftlysimeter) mit 1 m² Oberfläche und 1.5 m Fülltiefe mit denselben Landnutzungsbedingungen wie auf den beiden Versuchsflächen, von denen jeder mit einer hydrologischen Wippe zur automatischen Registrierung des Sickerwasserflusses ausgestattet ist, (e) Ein Grundwasserpegel, an dem der Grundwasserspiegel, die elektrische Leitfähigkeit in zwei Tiefen und die Grundwassertemperatur in 5 Messtiefen erfasst wird. An einem weiteren Grundwasserpegel werden auch Proben für die hydrochemische und isotopehydrologische Analyse gezogen.

Ergänzend wurde im Jahr 1997 im Bereich der Maismonokulturparzelle ein Bodenprofil mit TDR-Sonden und Gipsblöcken in 10, 20, 30, 40, 60, 80, 100 und 120 cm Tiefe ausgestattet. Mit einem EASY TEST TDR- Messgerät (STENITZER, 2003) wurde der Wassergehalt, mit kalibrierten Gipsblöcken die Saugspannung manuell gemessen und in die EDV-Strukturen der automatisch registrierten Daten implementiert.

2.2 Modellkonzepte

Es wurden drei Modelle zur Simulation von Sickerwasser und Stoffaustrag verwendet nämlich das Modell SIMWASER (STENITZER, 1988), das Modell STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998) und das Modell EPIC (WILLIAMS et al., 1984; CEPUDER et al., 2002a). SIMWASER und STOTRASIM verwenden pF und ku-Werte zur Berechnung der Wasserbewegung, wohingegen in EPIC die Wasserbewegung kaskadenartig über die Feldkapazität ermittelt wird.

Mit dem Modell SIMWASER (STENITZER 1988) wird die tägliche Bilanz zwischen Niederschlag, Verdunstung, Bodenspeicherung und Oberflächenabfluss auf der Basis von täglichen Wetterdaten (Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Niederschlag) für eine durch ihren Profilaufbau gekennzeichnete "Bodenform" bei Berücksichtigung des jeweiligen Pflanzenbestandes und seines Entwicklungsstandes bzw. seiner Pflanzenarchitektur berechnet. Dazu müssen der Bodenaufbau (also die Schichtabfolge) und die Bodenarten der einzelnen Schichten bekannt sein. Für die Berechnung der Wasserbewegung werden die pF- und die Ku-Kurven der jeweiligen Bodenart benötigt; für die Abschätzung der Wurzelentwicklung bei Feldfrüchten und Grünlandbeständen wird darüber hinaus die Kurve des Penetrometerwiderstandes als Funktion des Matrixpotentials benötigt. Die genannten Bodenkennwerte müssen entweder anhand von Feldmessungen abgeleitet oder an ungestörten Bodenproben im Labor ermittelt werden; für Überschlagsrechnungen stehen eine Reihe von typischen "Standardbodenkennwerten" als Datenbank zur Verfügung. Für die Berechnung der Pflanzenentwicklung und des Pflanzenwachstums sowie des damit verbundenen Wasserverbrauchs werden sogenannte "Pflanzenkennwerte" für die unterschiedlichen landwirtschaftlichen Kulturen verwendet, womit der Einfluss der jeweiligen Fruchtfolge auf den Bodenwasserhaushalt erfasst werden kann.

STOTRASIM (FEICHTINGER, 1998) errechnet den Stickstoffhaushalt im Boden auf Tagesbasis. An der Bodenoberfläche werden Stickstoffeinträge durch Düngung, Niederschlag, Beregnung und Bindung von Luftstickstoff durch Leguminosen berücksichtigt. Der Stickstoffentzug durch die Pflanze und die Rückfuhr von Pflanzenmasse (Blatt, Stroh Wurzeln) gehen ebenfalls in die Rechnung ein.

Mineralisation, Nitrifikation, Immobilisation, und Denitrifikation prägen den systeminternen Stickstoffumsatz zwischen verschiedenen Pools. Der Stickstofftransport im Boden wird durch Konvektion und Diffusion/Dispersion beschrieben. Das Hauptaugenmerk wird auf die Nitratauswaschung in den Untergrund gelegt, die untrennbar an die Tiefensickerung/Grundwasserneubildung gebunden ist. Entsprechend dem Potentialgefälle ergibt sich eine Nitratversickerung/Grundwasserbefruchtung oder ein kapillarer Aufstieg. Der Bodenwasserhaushalt wird mit dem oben skizzierten Modell SIMWASER berechnet, welches Bestandteil von STOTRASIM ist.

Mit dem in den USA entwickelten mathematischen Simulationsmodell EPIC (Environmental Policy Integrated Climate) können neben der Bodenerosion auch eine Reihe physikalischer und chemischer Prozesse simuliert werden. Es basiert im wesentlichen auf Teilbereichen zur Beschreibung von Wasserhaushalt, Stofftransport, Pflanzenwachstum und Bodenerosion die von verschiedenen Forschergruppen erarbeitet und laufend verbessert wurden. Die Verknüpfung dieses Modells mit klimatischen, bodenphysikalischen, hydrologischen und pflanzenphysiologischen Daten ergibt die Möglichkeit den gesamten vertikalen Wasser- und Stickstofftransport in Verbindung mit dem Pflanzenwachstum darzustellen. Mit den wie in den oben angeführten Programmen täglichen Eingangsparametern und Daten der Bodenkartierung können im wesentlichen Sickerwasser und Stickstoffaustrag berechnet werden. Grundsätzlich eignet sich EPIC für die Betrachtung verschiedener Bewirtschaftungsszenarien, da dafür nur die relativen Veränderungen zu vergleichen sind (CEPUDER et al, 1997a). Ist eine absolute Beurteilung betreffend Sickerwasser und Stoffaustrag notwendig, ist eine Kalibrierung mit entsprechenden Kontrollwerten, wie z.B. Lysimeter- und Ertragsresultaten, notwendig. Auch eine Kombination mit GIS ist bereits großflächig umgesetzt worden (CEPUDER et al., 1997b).

3 Ergebnisse

3.1 Messdaten

Zu folgenden Parametern konnten großteils lückenlose Messreihen über 10 Jahre (1992 – 2001) erhoben werden:

- Wetterdaten (Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Global- und Reflexionsstrahlung, Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung)
- Bodenwassergehalte mittels TDR-Sonden und Bodenwasserpotentiale über Tensiometer und kalibrierte Gipsblöcke in ihrem zeitlichen und tiefengestaffelten Verlauf
- Bodentemperatur in unterschiedlichen Tiefen
- Tiefendifferenzierte Sickerwassermenge und -qualität, Grundwasserstand- und -qualität

Bodenkundliche Detailkartierungen wurden im Versuchsfeld durchgeführt. Dabei erfolgte Probenahmen führten zu einer bodenphysikalischen Parametrisierung der einzelnen Horizonte der Profile der Lysimeter-Versuchspartellen sowie weiterer Standorte im Versuchsfeld. Für einen großen Teil des Untersuchungszeitraumes liegen detaillierte Bewirtschaftungsdaten hinsichtlich Fruchtfolgen, Bodenbearbeitungsmaßnahmen, Bewirtschaftungs- und Düngungsmaßnahmen und Ernteerträge für das Versuchsfeld vor.

Aus der Auswertung der Daten konnte die Abhängigkeit der Grundwasserneubildung vom Niederschlagsgeschehen, die zeitliche Variabilität im Langzeitverhalten und das jahreszeitliche Verhalten des Sickerwasseranfalls und der Stickstoffkonzentration erarbeitet werden. Aufgrund der Abhängigkeit von der unterschiedlichen Bodenausprägung und der Bewirtschaftungsart liegt die mittlere Sickerwasserrate auf der Maismonokulturparzelle bei etwa 37 % des Jahresniederschlags, auf der Fruchtfolgeparzelle liegt der entsprechende Wert bei 25 % (bei einer mittleren Jahresniederschlagshöhe von etwa 950 mm). Der aus den Nitratkonzentrationen berechnete Stickstoffaustrag liegt zwischen 61 und 87 kg N je Hektar und Jahr.

Die Verlagerung von Wasser und Stoffen in der ungesättigten Zone wurde auch mittels Markierungsversuchen zu unterschiedlichen hydrometeorologischen Rahmenbedingungen erfasst: im Frühjahr 1993 bei Beginn der Vegetationszeit und im Dezember 1997 bei nahezu fehlender Evapotranspiration. Die mittlere Verlagerungsgeschwindigkeit des Wassers ist in beiden Fällen nahezu ident, die Verweilzeit in der ungesättigten Zone mit einer mittleren Mächtigkeit von 4.5 m ist aufgrund der größeren Mächtigkeit des Feinbodens bei der Fruchtfolge mit 3.2 Jahren höher als bei der Maismonokultur

(2 Jahre). Die Verlagerungsgeschwindigkeiten werden auch durch die Auswertung der Langzeit – Isotopenmessungen sowie die Auswertung von Einzelereignissen (FANK, STICHLER & ZÖJER, 1998) bestätigt. Markierungsversuche wurden auch eingesetzt, um zwischen unterschiedlichen Fließ- und Transportprozessen (Matrixfluss – Makroporenfluss) unterscheiden zu können. Zur Untersuchung der Transportdynamik wurden auch die Ergebnisse der hydrochemischen und isotohydrologischen Analysen herangezogen.

Untersuchungen über mikrobiologische Umsetzungsprozesse im – den Feinboden unterlagernden – Sand – Kiesbereich führten zu Ergebnissen, die die vorherrschende Lehrmeinung, dass Nitrifikationsprozesse auf den Oberboden begrenzt sind, nicht belegen. Obwohl im Widerspruch zu den derzeitigen Vorstellungen vom Stickstofftransport im Boden, sollte besonders an seichtgründigen Standorten auch die Möglichkeit einer Ammonium - Verlagerung in Betracht gezogen werden (FANK & LEIS, 1995; LEIS, 1996; LEIS, 1998; LEIS & STUHLBACHER, 1997).

3.2 Modellkalibrierung

Die Kalibrierung von SIMWASER erfolgte anhand der 1997 ergänzten Bodenfeuchte- (EASY TEST TDR) und Saugspannungsmessungen (Gipsblöcke; siehe Kap. 2.1). Der in Abb. 1 dargestellte Vergleich zwischen simuliertem und gemessenem Profilwassergehalt zeigt eine gute Übereinstimmung, die auch bei den einzelnen Bodenschichten festgestellt werden kann. Wird jedoch die simulierte Sickerwasserbildung in 150 cm mit der aus der Grundwasserstandsanalyse abgeleiteten Grundwasserneubildung im Bereich der Forschungsstation bzw. mit der in 150 cm mit einem Sickerwassersammler (FANK, 1999) in etwa 15 m Entfernung auf der Maismonokultur-Parzelle gemessenen Versickerung verglichen (Abb. 2), so zeigt die Simulation einen höheren Wert, der vermutlich auf die Bodenunterschiede im Bereich der Forschungsstation zurückzuführen sein dürfte.

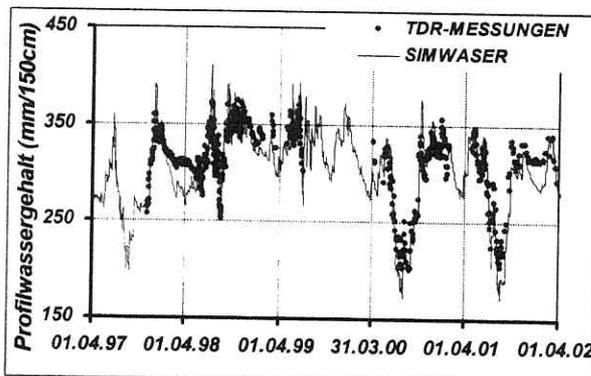


Abb. 1: Vergleich des simulierten mit dem gemessenen Profilwassergehalt

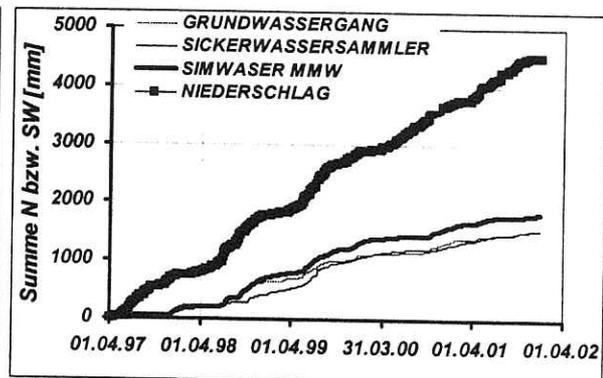


Abb. 2: Vergleich der simulierten mit der abgeleiteten Grundwasserneubildung

Die Kalibrierung von STOTRASIM wurde an Messwerten von der „Maismonokultur“ vorgenommen. Versickernde Stickstofffrachten und Nitratkonzentrationen im Sickerwasser wurden dazu verwendet. Details zu den Messsystemen, zu den Messwerten und zu den Synonymen (LSMR07, LSWR15, LSRR15) sind FANK, 1999 zu entnehmen. Um eine Übereinstimmung von gemessenem und berechnetem Stickstoffaustrag (Abb. 3) zu erzielen, sind die genaue Kenntnis der Ausgangssituation (Ausgangskonzentrationen, Größen der N-Pools) und exakte Angaben zur Bewirtschaftung erforderlich, was für den Zeitraum 9.10.1995 bis 26.9.1997 nicht gegeben war. In Abb. 4 sind gemessene und berechnete Nitratkonzentrationen im Sickerwasser verglichen. Bereits zu den gemessenen Nitratkonzentrationen aus 70 cm (LSMR07) und 150 cm (LSWR15, LSRR15) verwundert, dass die tiefer liegenden Messwerte auf einem höheren Niveau sind als die darüber liegenden Ergebnisse, was bis in das Jahr 1995 der Fall ist. Ob die unterschiedlichen Messsysteme, die Erschließung unterschiedlicher Bereiche der Bodenporen (Feichtinger, 2002) oder die teilweise Bodenstörung beim Einbau Ursache sind, bleibt vorläufig offen. Eine Kalibrierung an diesem Datensatz erforderte ein Bemühen um ein Mittelmaß

zwischen 70 und 150 cm und bedurfte einer Justierung der Diffusions- und Dispersionsbeiwerte, um das abgebildete Modellergebnis zu erzielen.

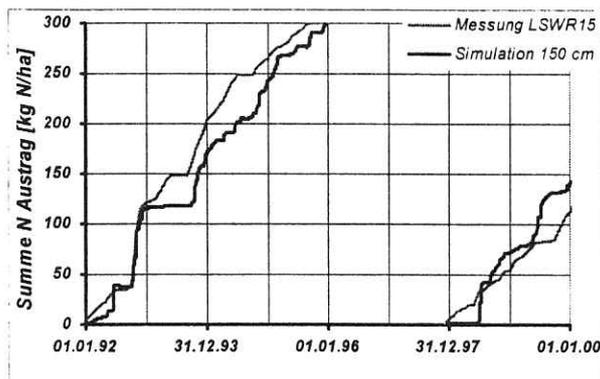


Abb. 3: Vergleich der gemessenen und berechneten Stickstoffausträge

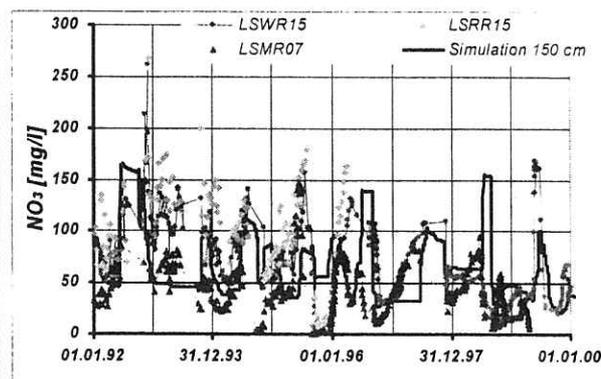


Abb. 4: Gemessene und berechnete Nitratkonzentrationen

Die Kalibrierung für EPIC erfolgte durch Vergleich der gemessenen mit den simulierten Daten. Dabei wurde versucht die Sickerwassermenge, den Stickstoffaustrag und die Erträge zu optimieren. Es ergab sich dabei auch wie bei den anderen Simulationsmodellen eine etwas höhere simulierte Sickerwassermenge als die mit dem Sickerwassersammler in 150 cm gemessenen Werte. Der Stickstoffaustrag wurde etwas geringer ermittelt, aber bei den Erträgen konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden. Es scheint mit EPIC eine nicht so gute Übereinstimmung wie bei den anderen Modellen zu erzielen zu sein. Aber wegen der bereits angedeuteten und auch bei anderen Untersuchungen festgestellten Variabilität in Bodenprofilen und der damit möglichen Verfälschung der Messergebnisse wird eine exakte Übereinstimmung auch nicht als vordringlich angesehen, wenn die Tendenzen des Wasser- und Stoffflusses klar erkennbar sind.

4 Diskussion - Schlussfolgerungen

Aus obigen Ergebnissen zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes ist ersichtlich, dass erhebliche Unsicherheiten zur „tatsächlichen“ Sickerwassermenge vorliegen. Diesbezügliche Werte der mittleren Jahressumme sind: Maismonokultur SIMWASER 460 mm EPIC 420 mm, Messung 371 mm – Fruchtfolge SIMWASER 369 mm EPIC 404 mm, Messung 258 mm. Auch die Auswertung der Grundwasserstandsganglinie bringt keine Klarheit: Auswertung Stenitzer: 455 mm bei einem Porenvolumen von 17 % aus den winterlichen Anstiegen, Auswertung Fank: 338 mm bei einem Porenvolumen von 13 % aus einzelnen Ereignissen (FANK, 1999), Auswertung Fank: 355 mm bei einem Porenvolumen von 15 % aus dem Neubildungsereignis von Dezember 2002. Es bleibt offen, ob die Unsicherheiten aus Fehlern in der Sickerwassererfassung, durch unzulängliche Erfassung der Niederschlagsmengen oder aus bisher unbedachten „Fehlerquellen“ herrühren.

Aus obiger Simulation der standörtlichen Stickstoffdynamik sind folgende Erfordernisse an die Datenbereitstellung für eine Modellkalibrierung zu nennen:

- Die bestmögliche Beschreibung des Bodenwasserhaushaltes ist eine entscheidende Grundlage für die Simulation von wassergebundener Stoffdynamik
- Genaue Kenntnis der Ausgangssituation, wie Tiefenprofil der Konzentration im Bodenwasser und Verteilung der Bodenvorräte in unterschiedlichen Pools
- Bei Einsatz von Messsystemen, die eine Störung des Messmediums Boden(Wasser) beim Einbau bedingen, ist eine Simultanmessung in ungestörtem Medium erforderlich, um allfällige „Priming-Effekte“ zeitlich einschätzen zu können
- Der Wahl des Messsystems soll die Vorgabe, welche Bereiche der Bodenporen erfasst werden sollen, zugrunde liegen
- Eine Konzentrationserhebung soll – egal mit welchem Messsystem – immer in mehreren Tiefen des Bodenprofils kontinuierlich erfolgen, um einen Beleg der Konzentrationsfortpflan-

zung, Hinweise für Umsetzungsvorgänge und/oder bevorzugte Fließbahnen, aber auch Grundlagen für eine Einschätzung von Diffusion/Dispersion zu erhalten.

Weiters waren die Nitratkonzentrationen im Sickerwasser von den beiden Schwerkraftlysometern der Forschungsstation Wagna im Vergleich zu den Feldmessungen extrem niedrig (FANK, 2002). Die Ursachen für die unterschiedlichen Stickstofffrachten sind bis dato unklar, belegen aber das Erfordernis, Lysimeter in eine möglichst natürliche Umgebung einzubauen.

Ergebnisse von Modellberechnungen mittels HYDRUS 2D für monolithische, homogene und isotrope Bodenkörper (FANK, 2003) zeigten die enorme Bedeutung der Bauart von Sickerwassersammlern und der an der unteren Randbedingung anzulegenden Saugspannung in Abhängigkeit von der untersuchten Bodenart für die Sickerwassergewinnung und in verstärktem Maß für den Erhalt realitätsnaher Konzentrationskurven.

Um künftig bestmögliche Datensätze zur Modellentwicklung und Modellvalidierung über Bodenwasserhaushalt und Umsetzungs- und Transportprozesse in der ungesättigten Zone von seichtliegenden Grundwassersystemen bereitzustellen, sind neben den bereits angeführten Erfordernissen hinsichtlich der Erfassung des Inputs auch an die Messung des Sickerwassers mittels Lysimeter spezifische Anforderungen zu definieren. Ohne Anspruch auf Vollständigkeit seien folgende Aspekte angesprochen:

- Entwicklung wägbarer Lysimeter, die im Versuchsfeld betrieben werden können.
- Gewinnung der Lysimeter in monolithischer Art bis in eine Tiefe, in der die Wasserausschöpfung durch Pflanzen auch in Extremsituationen nicht erfolgt – im Versuchsfeld Wagna bedeutet dies eine Stechtiefe von 2 m
- Vermeidung von Oaseneffekten durch Einbau der Lysimeter im Feld und Bewirtschaftung in ortsüblicher maschineller Weise
- Vermeidung von lateralen Flüssen an der Oberfläche bzw. an der Pflugsohle – d.h. Führung der Berandung des Lysimeters bis an die Oberfläche und gleichzeitig Schaffung einer Vorrichtung, die es erlaubt, diese Berandung für die Bewirtschaftung abzusenken
- Anpassung der unteren Lysimeter - Randbedingung an die Verhältnisse im Feld, d.h. Ausbildung der unteren Berandung in Form eines porösen Mediums und Anpassung der angelegten Saugspannung an gemessene Potentiale im Feld
- Erfassung von Wassergehalt- und Potentialverteilung im Lysimeter und im Versuchsfeld
- Automatische Registrierung der Sickerwassermenge und automatisierte Probenahme in einem geschlossenen System
- On-line Registrierung relevanter hydrochemischer Parameter und darauf aufbauend Steuerung des Intervalls der Probenahme
- Überprüfung der Messeinrichtungen hinsichtlich korrekter Erfassung des Stofftransportes durch die Durchführung von Tracerversuchen

Hinsichtlich der Erfassung des Niederschlags wird die Verwendung eines bodengleichen Niederschlagsmessers bzw. einer äquivalenten Methode für erforderlich gehalten, wobei die Mengenerfassung - wie auch für das Sickerwasser - zeitlich hoch aufgelöst erfolgen sollte.

5 Literatur

CEPUDER, P., & Aus der SCHMITTEN, V., (2002a): Calibration of a nitrogen leaching model, In: Lefèvre, J., Dazin, V. (Eds), 11th Nitrogen Workshop, 9.-12.9.2002, Reims, Frankreich, 425, Frankreich

CEPUDER, P., M. TULLER, F. KASTANEK, K., REFENNER (1997b): Der Einsatz des Simulationsmodells EPIC zur Reduzierung des Stickstoffeintrages in das Grundwasser am Beispiel eines Sanierungsgebietes. Stoffbilanzierung in der Landwirtschaft, Workshop Umweltbundesamt, Tagungsberichte Umweltbundesamt, Wien. 190 – 200. ISBN 3-85457-350-2.

CEPUDER, P.; M. TULLER; M.K. SHUKLA; H. MÜLLER, E. KORTSCHAK, P. LIEBHARD, H. HAGER, S. HUBER, R. HABERL (1997a): Estimation of ground-water contamination by various land uses with the simulation model EPIC and GIS. Proceedings of the 11th World Fertilizer Congress. Gent, Belgium, Vol. 2, p 451 - 465.

- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbe-frachtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Fel-des (Steiermark, Österreich). Beiträge zur Hydrogeologie, 49/50, 101-388.
- FANK, J. (2002): Die Bedeutung von Herkunftsflächen von Lysimeterböden und der gestörten Befül-lung für den Nitrataustrag aus "Schwerkraftlysimetern". - In: Klotz, D. [Hrsg.]: Untersuchungen zur Schadstoff-Migration in Lysimetern, GSF-Bericht 05/02,17-23.
- FANK, J. (2003): Die Aktivitäten des Arbeitsausschusses „Sickerwasserprognose“. Bericht der BAL über die 10. Lysimetertagung vom 29. bis 30. April 2003, 21-22.
- FANK, J. & A. LEIS (1995): Untersuchungen zur Stickstoffdynamik in unterschiedlichen Tiefenbe-reichen der ungesättigten Zone des Leibnitzer Feldes am Beispiel der Lysimeteranlage Wagna.- Be-richt der BAL über die 5. Lysimetertagung „Stofftransport und Stoffbilanz in der ungesättigten Zone“ vom 25.-26. April 1995, 25-27.
- FANK J., W. STICHLER & H. ZOJER (1998): Die Schneeschmelze 1996 als ¹⁸O-Tracerversuch an der Lysimeteranlage in Wagna.- In: Klotz, D. & K.-P. Seiler [Hrsg.]: Bestimmung der Sickerwasser-geschwindigkeit in Lysimetern.- GSF-Bericht, 1/99, 11-18.
- FEICHTINGER, F. (1998): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. Schriftenreihe des Bundesamtes f. Wasserwirtschaft Bd. 7, 14-41.
- FEICHTINGER, F. (2002): Erfassung von Wasserinhaltsstoffen mittels Lysimeter. Beiträge zur Hyd-rogeologie, 53, 128- 132.
- LEIS, A. (1996): Sickerwasser und Bodenuntersuchungen zur Tiefenverteilung wasserlöslicher orga-nischer Substanzen in der ungesättigten Zone des Leibnitzer Feldes.- Bericht der BAL über die 6. Ly-simetertagung „Lysimeter im Dienste des Grundwasserschutz“ vom 16.-17. April 1996, 65-69.
- LEIS, A. (1998): Mikrobiologische und chemische Untersuchungen in der ungesättigten Zone von sechs verschiedenen Bodenstandorten des Leibnitzer Feldes.- In: Klaghofer, E. [Hrsg.]: Modelle für die gesättigte und ungesättigte Bodenzone.-Schriftenreihe BAW, 7, 118-130.
- LEIS, A. & A. STUHLBACHER (1997): „Vergleichende chemische und mikrobiologische Untersu-chungen in der ungesättigten Bodenzone von verschiedenen Bodenstandorten des Leibnitzer Feldes - erste Ergebnisse“.- Bericht der BAL über die 7. Lysimetertagung „Lysimeter und nachhaltige Land-nutzung“ vom 7.-9. April 1997, 65-69.
- STENITZER, E. (1988): SIMWASER - Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasser-haushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mittlg. der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt Nr. 31, A-3252 Petzenkirchen
- STENITZER, E. (2003): Practical experiences with the EASY TEST FOM Field Operated Meter in assessing the soil water balance of a Maize field. Transmitted for publication to ACTA AGROPHYSICA
- WILLIAMS, J. R., JONES, C. A., DYKE, P. T. (1984): A modeling approach to determining the rela-tionship between erosion and soil productivity. Transactions, American Society of Agricultural Engi-neers 27, p 129 – 144

