

# Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers hinsichtlich Menge und Beschaffenheit - Modellierung und Lysimeterbeobachtungen

Beate Klöcking<sup>1</sup>, Ulrike Haferkorn<sup>2\*</sup>, Frank Reinicke<sup>3</sup> und Heiko Ihling<sup>4</sup>

## Zusammenfassung

Die Nitratbelastung von Gewässern und Grundwasserkörpern in der mitteldeutschen Trockenregion erfordert adäquate Maßnahmen zur Verringerung der Stickstoffeinträge. Voraussetzung dafür ist das Verständnis der Stickstoffausbreitung in der ungesättigten und gesättigten Zone. Mittels einer gekoppelten Wasser- und Stoffhaushaltsmodellierung auf Einzugsgebietsebene sollen Belastungspfade detektiert und Maßnahmen zur Stickstoffreduktion hinsichtlich ihrer Wirksamkeit überprüft werden. Zur Aufklärung der Prozesse in der ungesättigten Bodenzone (Wurzel- und Dränwasserzone) sowie zur Validierung und Parametrisierung dieses Modells werden die langjährigen Messreihen der Großlysimeteranlage Brandis verwendet. Der Vergleich der an den Lysimetern gemessenen N-Frachten mit den Ergebnissen eines einfachen Bilanzierungsansatzes, der nur die Wurzelzone in die N-Bilanzierung einbezieht, zeigte die Grenzen dieses Verfahrens. Mit dem deterministischen Wasserhaushaltsmodell konnten die beobachteten Sickerwasserläufe deutlich besser abgebildet werden.

*Schlagwörter:* Wasser- und Stickstoffhaushalt, Lysimeter, Landwirtschaft

## Summary

The high nitrate contamination of the water bodies of the central German dry region makes adequate measures for the reduction of the Nitrogen input necessary. This requires understanding of nitrogen fluxes in the saturated and unsaturated zones. In order to detect contamination pathways and to study the effectiveness of N-reduction strategies a coupled water and nitrogen budget model is being developed at catchment scale. Observations from the lysimeter station Brandis help to understand the processes in the unsaturated soil profile. The data collected here are used to parameterise and validate parts of the model. The limits of simple mass-balance models that neglect the drain water zone become apparent when comparing their predictions to the N-loads measured at the lysimeters. The deterministic water budget model examined here fits the observations more closely.

## Einleitung

Im Ergebnis der Bewertung der Grundwasserkörper (GWK) nach EU-WRRL befanden sich siebzehn GWK in Sachsen auf Grund der hohen Nitratbelastung in einem schlechten chemischen Zustand. Die Ableitung kosteneffizienter Maßnahmen zur Verringerung von Stickstoffbelastungen der Gewässer erfordert das Verständnis der Stickstoffausbreitung in der ungesättigten und gesättigten Zone. Besonders in Regionen mit vergleichsweise geringen Niederschlägen stellt der Nachweis der Entlastung der Gewässer von diffusen Stickstoff-Einträgen durch Änderung der Landnutzung erhebliche Anforderungen an die Entwicklung prognosefähiger Einzugsgebietsmodelle. Ursachen dafür sind die langen Verweilzeiten des Wassers in der Boden- und Grundwasserzone sowie die dortigen chemischen und mikrobiellen Umsatzprozesse (HAFERKORN et al. 2003). Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde vom LfULG ein Konzept für die gekoppelte Stofftransportmodellierung

im Sicker- und Grundwasser besonders belasteter Gebiete erstellt (PFÜTZNER et al. 2010). Dieses beinhaltet neben dem Aufbau des Modellverbundes ReArMo auch dessen Validierung an geeigneten Beobachtungsdaten. Für die Parametrisierung und den Test der Modellkomponenten zur Abbildung der Prozesse im System Atmosphäre-Vegetation-Boden werden zunächst die langjährigen Messreihen der Großlysimeteranlage Brandis verwendet. Auf Grund der Auswahl der Böden und der im Verlauf von mehr als 30 Jahren realisierten praxisnahen Bewirtschaftung sind die hier gewonnenen Messdaten zum Wasser- und Stickstoffhaushalt in der ungesättigten Bodenzone bis 3 m Tiefe als repräsentativ für Ackerstandorte der mitteldeutsche Trockenregion anzusehen.

## Modellverbund ReArMo

Der Modellverbund ReArMo hat die Abschätzung künftiger Entwicklungen des Grundwassers nach Menge und

<sup>1</sup> Büro für Angewandte Hydrologie (BAH), Murnauer Str. 102a, D-81379 MÜNCHEN

<sup>2</sup> Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), Kleinsteinerger Str. 13, D-04821 BRANDIS

<sup>3</sup> Institut für Nachhaltige Landbewirtschaftung (INL), Reilstr. 128, D-06114 HALLE/SAALE

<sup>4</sup> Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), PF 540137, D-01311 DRESDEN

\* Ansprechpartner: Dr. Ulrike Haferkorn, ulrike.haferkorn@smul.sachsen.de



Beschaffenheit unter geänderten Randbedingungen (Klima, Landnutzung, Bewirtschaftung) zum Ziel.

Er besteht aus den Komponenten

- REPRO für die Auswertung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten auf Betriebsebene und Bilanzierung der Stickstoffsalden auf Teilschlagebene,
- ArcEGMO-PSCN für die deterministische Simulation der Sickerwasserbildung und des daran geknüpften Stoffaustauschs aus der Bodenzone sowie des Eintrags von anorganischen Stickstoffkomponenten in das Grundwasser,
- MODFLOW/MT3D für die Abbildung der zeitlichen Entwicklung und räumlichen Verteilung der Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen im Grundwasser.

Das Modell REPRO (HÜLSBERGEN 2003) ist ein Instrument zur Abbildung eines landwirtschaftlichen Betriebes als Gesamtsystem und zur Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion in Bezug auf die Schutzgüter Boden, Wasser und Luft. Im Mittelpunkt steht die detaillierte Abbildung betrieblicher Stoff- und Energieflüsse auf verschiedenen Ebenen. Die benötigten Produktionsdaten ergeben sich aus den konkreten Betriebsdaten der zu betrachtenden Bereiche des Pflanzenbaus, der Tierhaltung und der Lagerwirtschaft und umfassen alle zeitlich konkret definierten Bewirtschaftungsmaßnahmen incl. der Abbildung der Mengen (Düngung, Energie, Pflanzenschutz und Ertrag). Im Rahmen der Modellkopplung dient REPRO primär der Bereitstellung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsdaten an das Modell ArcEGMO.

Mit dem GIS-gestützten ökohydrologischen Modell ArcEGMO-PSCN (PFÜTZNER 2002, BECKER et al. 2002, KLÖCKING 2009) können räumlich und zeitlich hoch

aufgelöst alle wesentlichen Komponenten des Gebietswasser- und C/N-Haushaltes von den Wechselbeziehungen zwischen Atmosphäre-Vegetation-Boden bis hin zu den ober- und unterirdischen Abflusskonzentrationsprozessen bei Berücksichtigung von anthropogenen Steuerungen und natürlichen Störungen beschrieben werden. ArcEGMO ist als hydrologische Toolbox konzipiert. Das bedeutet, dass neben unterschiedlichen Modellansätzen in der internen Modulbibliothek Schnittstellen zu externen Modellen und Datenbanken existieren bzw. unterstützt werden (s. *Abbildung 1*). Innerhalb des Modellverbundes ReArMo übernimmt ArcEGMO-PSCN die Simulation der Wasser-, Wärme-, Kohlenstoff- und Stickstoffdynamik im System Pflanze-Boden bei Einbeziehung der gesamten Bodenzone in täglicher Auflösung.

Zur Simulation der 3D-Grundwasserströmung wird das Programmsystem MODFLOW (MC DONALD und HARBAUGH 1988) eingesetzt. MODFLOW basiert auf der Finite-Differenzen-Methode zur räumlichen Diskretisierung der systembeschreibenden Differentialgleichung. MODFLOW ist das mit Abstand am häufigsten eingesetzte Programmsystem zur Simulation der Grundwasserströmung weltweit und weist einen entsprechend hohen Grad der Verifizierung auf.

### Lysimeteranlage Brandis

In der von der BfUL betriebenen Großlysimeteranlage Brandis wird seit 1980 kontinuierlich der Wasser- und Stoffhaushalt regionstypischer Böden mittels 24 wägbarer Lysimeter beobachtet (LfUG 2001). Brandis und die Herkunftsflächen der Lysimeterböden liegen in der nördlichen gemäßigten Zone in der Übergangszone zwischen maritimem und kontinentalem Klima in der mitteldeutschen Trockenregion des Norddeutschen Tieflandes (Jahresmitteltemperatur 9,3°C; korrigierter Jahresniederschlag 673 mm/a). Insbesondere

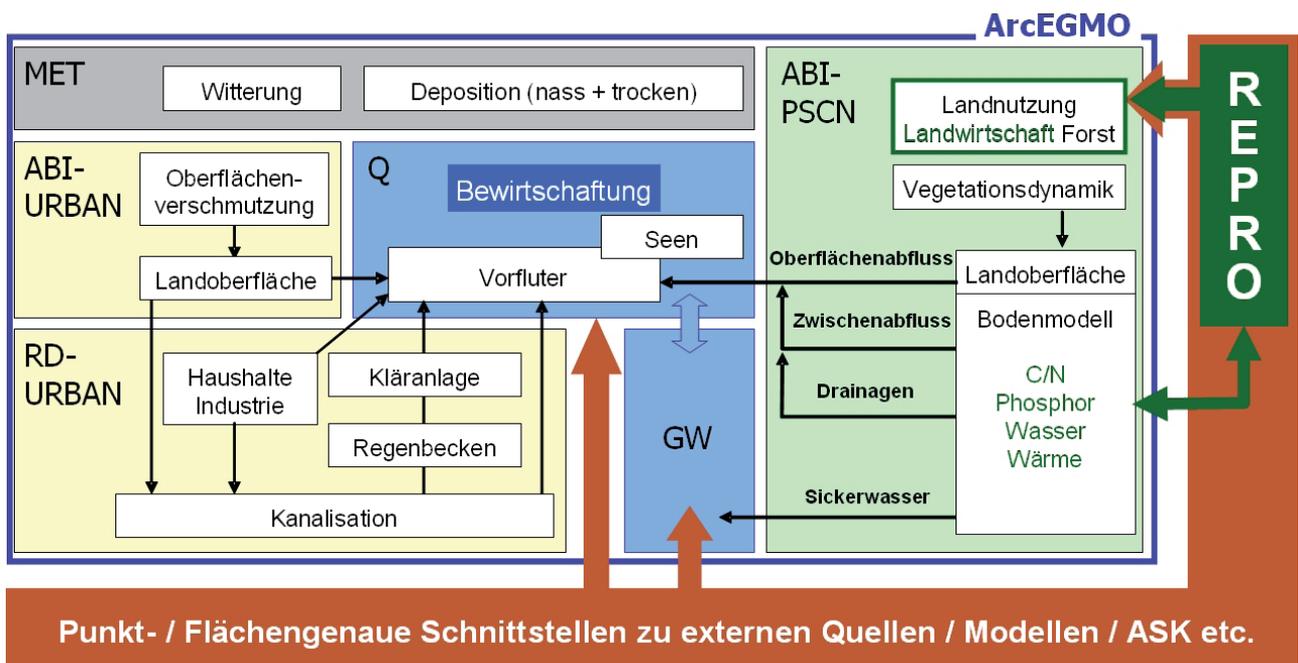


Abbildung 1: Baukastenprinzip der Toolbox ArcEGMO mit Schnittstellen

**Tabelle 1: Bodenformen mit Profilaufbau und Entnahmeorte der ausgewählten Lysimetergruppen (LG), aus LfUG (2001)**

LG	Bodenform	Tiefe [cm] Profilaufbau	Entnahmeort
1	<b>lessivierter Braunerde-Pseudogley</b> mittlerer Entwicklungstiefe über fossilem Gley im nahen Untergrund aus Sandlöß über kiesführenden Moränenlehm	0 - 50 Sandlöß 50 - 120 Geschiebelehm 120-300 kiesiger Mittel-/Grobsand	Naunhof, Muldentalkreis
4	<b>Braunerde-Fahlerde</b> mittlerer Entwicklungstiefe aus Sandlöß über kiesführendem Fluvisand	0 - 30 Sandlöß, schwach kiesig 30 - 130 lehmiger Sand, kornverkittet 130 - 300 Schmelzwassersande und -kiese	Pomßen, Muldentalkreis
5	<b>Erodierte Braunerde</b> geringer Entwicklungstiefe aus Sandlöß über kiesführendem Fluvisand	0 - 35 Sandlöß 35 - 170 kiesiger Mittel-/Grobsand 170 - 300 Schmelzwassersand, locker	Brandis, Muldentalkreis
7	<b>Braunerde-Pseudogley</b> mittlerer Entwicklungstiefe aus Sandlöß über kiesführendem Moränenlehm	0 - 50 Sandlöß 50 - 220 Geschiebelehm 220 - 300 Schmelzwassersand	Beucha, Muldentalkreis
8	<b>Parabraunerde-Braunerde</b> mittlerer Entwicklungsstufe aus Sandlöß über tiefem kiesführendem Moränenlehm	0 - 70 Sandlöß 70 - 150 Fließerde (sandiger Lehm) 150 - 300 Mittel- und Feinsand	westl. Brandis, Muldentalkreis
9	<b>Parabraunerde</b> mittlerer Entwicklungstiefe aus Löß	0 - 205 fahlbrauner lehmiger Schluff 205 - 300 Schmelzwassersand	Sornzig, Kreis Oschatz

sechs der untersuchten Bodenformen treten dominant in den kritischen Grundwassereinzugsgebieten auf. Deshalb bieten sich die Messreihen dieser Lysimetergruppen (*Tabelle 1*) sowohl für die Kalibrierung der Modellparameter von ArcEGMO zum Kohlen- und Stickstoffhaushalt als auch zur Validierung der Schnittstelle zwischen REPRO und ArcEGMO im Modellverbund Re-ArMo an.

Die Klima- und Wasserhaushaltsdaten werden auf Tagesbasis erhoben, die Boden- und Sickerwasseranalytik erfolgt auf Basis von Monatssammelproben.

Durch die Lysimetertiefe von 3 m wird neben der Wurzelzone auch die obere Dränzone der Böden erfasst, was Hinweise auf die in dieser Zone ablaufenden Prozesse wie N-Umsatz, N-Akkumulation und N-Verlagerung liefert. Im Verlauf des mehr als 30jährigen Untersuchungszeitraumes wurden auf den Lysimetern und dem umliegenden Feld nacheinander drei verschiedene, für Mitteleuropa typische Bewirtschaftungsformen realisiert:

### 1. Periode: 1981 bis 1992 - Intensive landwirtschaftliche Nutzung

In diesem Zeitraum wurden alle Lysimeter (bzw. Bodenformen) gleich behandelt. Es wurden im Mittel der Jahre 1981-92 rd. 133 kg/ha N mineralisch gedüngt. Hinzu kommen eine N-Deposition von 49 kg/ha/a und eine organische Düngung mit hohen Einzelgaben (1980 als Sediment, 1982 als Torfmull, 1986 als Humussediment, 1988 als Humustat und 1989 als Humustan). Es verblieb kein Erntegut auf den Lysimetern (bzw. Feld). Bedarfswise wurden Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel aufgebracht.

### 2. Periode: 1993-1998 Stilllegungs- und Brachemaßnahmen sowie ökologischer Landbau

Diese begann mit der Selbstbegrünung nach Stoppelumbruch im September 1992. Anschließend folgten winterliche Schwarzbrache und zwei Jahre Weidelgras. Als Beginn des ökologischen Landbaues wurde im Frühjahr 1995 Rotklee angebaut, danach Kartoffeln, Winterweizen und

Winterroggen. In diesen Jahren erfolgte keine mineralische Düngung, nur 1996 je Lysimeter mit der Herbstfurche eine Stallunggabe von 200 dt/ha, die im Folgejahr mit 60 kg N/ha angerechnet wurde. Die symbiotische N-Bindung bei Rotklee wurde mit 170 kg/ha berücksichtigt.

### 3. Periode: seit 1999 „Umweltgerechte Landwirtschaft in Sachsen“ (empfehlungskonforme Düngung)

Die Bewirtschaftung erfolgt auf Grundlage der Empfehlungen der ehemaligen Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (SMUL 1995). Auf Grund des geringen Tierbestandes in der Region wird ausschließlich mineralisch gedüngt. Parallel dazu ist in den vergangenen Jahren ein intensiver Marktfruchtanbau mit deutlichem Trend zur Fruchtartenkonzentration, insbesondere auf Winterweizen und Winterroggen, zu verzeichnen. Der jährliche, fruchtarten- und bodenspezifische Düngbedarf wird auf Basis der  $N_{min}$ -Untersuchungen und weiterer Bodenuntersuchungen mit Hilfe des Düngungsberatungsprogramms „BEFU“ ermittelt. Je nach Fruchtart wird ein Teil des Erntegutes auf der Fläche (Lysimeter) belassen. Bedarfswise werden Pflanzenschutz- und Schädlingsbekämpfungsmittel aufgebracht.

### Beobachtungsergebnisse

In Folge der beschriebenen Bewirtschaftung zeigten sich auf den untersuchten Standorten sowohl die N-Salden als auch die ausgetragenen N-Frachten auf sehr unterschiedlichem Niveau. So ergaben sich für die Jahre der Intensivperiode (1. Periode) mittlere jährliche N-Austräge (N-Frachten), die zwischen 8 kg/ha auf den ertragreichen, sorptionsstarken Löß-Parabraunerden (Lys.-Gr.9/Lö3) und 46 kg/ha auf den wenig ertragreichen sandigen Braunerden (Lys.-Gr.5/D3) lagen. Während der Jahre 1993-98 mit ökologischem Landbau, Stilllegungs- und Brachemaßnahmen (2. Periode) waren die Auswaschungsverluste erwartungsgemäß geringer, lagen dann aber im Mittel der Jahre der 3. Periode (1999-2010) über dem Niveau der 1. Periode (*Tabelle 2*).

**Tabelle 2: N-Saldo, N-Auswaschungsverluste (Fracht) über das Sickerwasser (SW), SW-Menge und Nitrat-Konzentration in 3 m Tiefe als Mittelwerte für die Lysimetergruppen und Perioden**

Lysimetergruppe Standorteinheit		5 D3	4 D3	8 D5	1 D6	7 D4	9 L63
1. Periode: 1981-1992	N-Saldo [kg/ha/Jahr]	107	79	87	67	64	25
	N-Fracht [kg/ha/Jahr]	46	41	32	33	17	8
	Fracht/Saldo [%]	43	52	38	49	27	32
	SW [mm/a]	166	131	140	107	82	57
	SW/Niederschlag [%]	26	21	22	17	13	9
	NO <sub>3</sub> -Konz. 1985-92 [mg/l]	104	-	90	95	70	22
2. Periode: 1993-1998	N-Saldo [kg/ha/Jahr]	-9	-36	-15	-37	-26	-60
	N-Fracht [kg/ha/Jahr]	33	18	6	12	8	1
	SW [mm/a]	200	141	161	121	127	47
	SW/Niederschlag [%]	28	19	22	17	18	6
	NO <sub>3</sub> -Konz. [mg/l]	83	57	60	36	18	4
3. Periode: 1993-1998	N-Saldo [kg/ha/Jahr]	94	68	65	59	49	13
	N-Fracht [kg/ha/Jahr]	74	56	41	41	56	2
	Fracht/Saldo [%]	80	82	63	69	120	15
	SW [mm/a]	199	159	158	139	130	75
	SW/Niederschlag [%]	29	23	23	27	19	11
	NO <sub>3</sub> -Konz. [mg/l]	142	147	116	108	79	8

## Simulationsergebnisse

Die Standort- und Bewirtschaftungsdaten 1980 bis 2011 aller Lysimetergruppen (einschließlich der Wiederholungen) wurden in das Bilanzierungsmodell REPRO aufgenommen und über eine Schnittstelle dem ökohydrologischen Modell ArcEGMO-PSCN übergeben.

Neben der Anwendung des gekoppelten Modells (s. Ausblick) wurden mit REPRO für alle Lysimeter über den gesamten Versuchszeitraum die jährlichen Humus- und Stickstoffbilanzen sowie die Nitratausträge aus der ungesättigten Wurzelzone ermittelt. Diese Werte sind jedoch nicht direkt mit den Beobachtungswerten an der Basis der Lysimeter in 3 m Tiefe vergleichbar, da hier auch die Dränwasserzone unterhalb der durchwurzelten Zone mit erfasst wird. Die Unterschiede können vielmehr zur Quantifizierung des Puffervermögens dieses Bodenbereiches genutzt werden.

Die mit REPRO bilanzierten Humussalden schwankten vor allem in den Anfangsjahren (1981-1990) zwischen den Lysimetergruppen in einem weiten Bereich von -2.000 bis 5.300 kg C/ha. Diese Schwankungen wurden über die Jahre hin kleiner, so dass sich zum Ende des Bilanzierungszeitraums Werte zwischen -93 und 191 kg C/ha zeigten. Die Stickstoffbilanz war durch unterschiedliche Salden gekennzeichnet. Unter der Berücksichtigung gleicher Bewirtschaftung der Lysimetergruppen schlägt sich in den Ergebnissen das Ertragsniveau der einzelnen Böden nieder.

Entsprechend der N-Salden wurde mit REPRO im Vergleich zur ersten Periode (konventionelle Bewirtschaftung 1981-1992) eine deutlich geringere Nitratkonzentration im Sickerwasser aus der Wurzelzone bei Flächenstilllegung/ökologischer Landbau (1993-1998) und unter umweltgerechter Landbewirtschaftung (ab 1999) simuliert (Abbildung 2, links).

Wie der Vergleich der REPRO-Ergebnisse für die Wurzelzone mit den Beobachtungswerten in 3 m Tiefe zeigt (Abbildung 2, rechts), können diese Bilanzierungsergebnisse nicht

pauschal auf die Grundwasserneubildung und die daran gebundenen N-Frachten übertragen werden. Entsprechend der großen Diskrepanz zwischen N-Salden und beobachteten N-Austrägen in der ersten Bewirtschaftungsperiode ist von einer Stickstoff-Akkumulation sowohl in der Wurzel- als auch der Dränzone auszugehen. In der folgenden ökologischen Bewirtschaftungsperiode mit den realisierten negativen N-Salden konnten zwar die Überhänge in der Wurzelzone reduziert werden. Die Überhänge in der Dränwasserzone waren jedoch nicht mehr pflanzenverfügbar und wurden mit dem Sickerwasser weiter tiefenverfrachtet bzw. ausgewaschen. In der 3. Periode mit empfehlungskonformer Düngung konnten die N-Salden im Vergleich zur ersten Bewirtschaftungsperiode deutlich gesenkt werden. Bedingt durch die um rd. 60 mm höheren Niederschläge sind in diesem Zeitraum aber höhere Sickerwassermengen zu verzeichnen, die zu einer weiteren Auswaschung der N-Überhänge in der Dränzone bei gestiegenen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser (Tabelle 2) führten. Die Größe der absoluten N-Austräge und auch deren prozentuale Anteil am N-Saldo hängen jedoch von den spezifischen Bodeneigenschaften ab. Aufgrund der sehr guten Durchwurzelbarkeit und des großen Wasserhaltevermögens des Lößstandortes (Lys.-Gr. 9/L63) lagen sowohl die N-Salden als auch die N-Austräge in den ersten beiden Perioden deutlich unter denen der anderen Lysimetergruppen. Hier kann von einer geringeren Befruchtung der Dränzone mit Nitrat ausgegangen werden. Diese Annahme wird durch das abnehmende Verhältnis zwischen Fracht und Saldo bei gestiegenen Sickerwassermengen gestützt. Demgegenüber lagen bei den übrigen Böden die Anteile der N-Austräge am N-Überschussaldo zwischen 63 % (Lys.-Gr.8/D3) bis hin zu 120 % (Lys.-Gr.7/D4) deutlich über den Werten der vorangegangenen Bewirtschaftungsperioden, was diese These stützt (Tabelle 2).

Inwieweit mikrobielle Um- und Abbauprozesse eine bilanzwirksame Rolle spielen, kann allein aus den vorliegenden Messreihen und REPRO-Bilanzierungen nicht geklärt

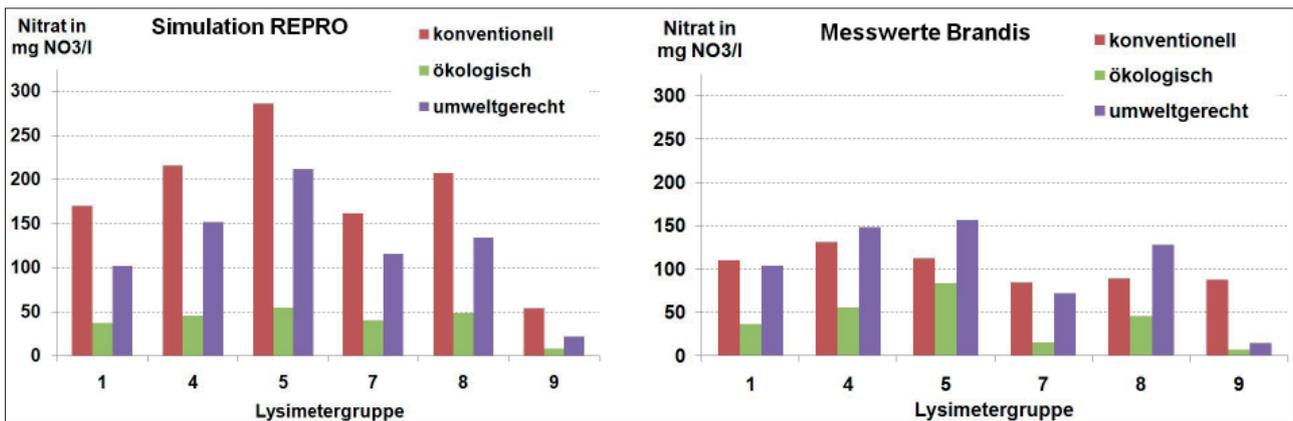


Abbildung 2: Gemessene Nitratkonzentrationen in 3 m Tiefe (rechts) und bilanzierte Werte am unteren Rand der Wurzelzone bei unterschiedlicher Flächenbewirtschaftung

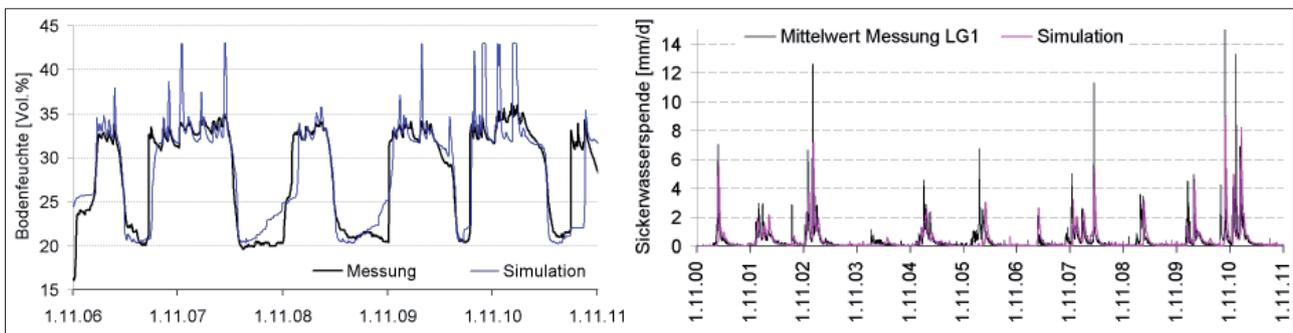


Abbildung 3: Lysimetergruppe 1: Bodenfeuchte in 50 cm und Sickerwasser aus 3 m Tiefe, Simulation und Messung

werden. Eine Möglichkeit stellt hier eine begleitende deterministische Simulation des C/N-Umsatzes und der Stickstoffpassage in der Wurzel- und Dränzone bis zum Erreichen der Grundwasseroberfläche (bzw. der Lysimeterbasis) dar, die die veränderlichen Randbedingungen detailliert berücksichtigt. Dazu werden die vertikalen Komponenten des Modellverbundes ReArMo (RE-PRO & ArcEGMO-PSCN) genutzt. Da hierbei neben den Bodenprozessen auch die Vegetationsdynamik auf der Basis der Witterung, des Bewirtschaftungsregimes und der Bodeneigenschaften simuliert wird, ist zunächst von einer großen Unsicherheit der Berechnungen auszugehen. Deshalb ist eine detaillierte Überprüfung der einzelnen Simulationsergebnisse anhand der Beobachtungswerte erforderlich, bevor belastbare Aussagen zum C/N-Haushalt getroffen werden können.

Als erster Schritt erfolgte mit dem Modell ArcEGMO-PSCN die Simulation des Wasserhaushaltes und der Vegetationsentwicklung auf allen Lysimetergruppen. Die täglichen Simulationsergebnisse standen i. A. in guter Übereinstimmung zu den beobachteten Vegetationsdaten (Phänologie und Erträge). Auch die gemessenen Temperatur- und Bodenfeuchteverläufe in den instrumentierten Tiefen sowie die Sickerwassermengen wurden gut abgebildet.

Als problematisch erwies sich die Modellierung der Geschiebelehm Böden der Grundmoräne (Lysimetergruppen 1 und 7). Ursache dafür sind die primären Korngrößen (von tonig-schluffig bis sandig) aber vor allem die sekundären Durchlässigkeiten der Geschiebelehme. Diese sehr hetero-

gene Klüftigkeit resultiert aus der glazigen Überprägung und tritt in Form von Eiskeilen und vertikalen Sandbändern auf, die messtechnisch kaum zu erfassen sind. Die Auswirkungen auf den Nährstoffumsatz und den Lösungstransport im Boden sind jedoch nicht vernachlässigbar. Es ist von temporären Rückstauzonen innerhalb eigentlich als homogen kartierter Bodenhorizonte und präferentiellen Fließbahnen auszugehen. Entsprechend dieser Bodeneigenschaften muss auch mit einer räumlich und zeitlich sehr heterogenen Wurzel ausbreitung gerechnet werden.

Die Bodensäulen der Lysimetergruppe 7 sind heterogen so geklüftet, dass hier auf eine weitere Einbeziehung dieser Lysimetergruppe für die Modellkalibrierung zum Kohlen- und Stickstoffhaushalt verzichtet wurde. Mit der Berücksichtigung von präferentiellen Fließbahnen konnte die Anpassung der Simulationsergebnisse an die beobachteten Wasserhaushaltsgrößen der Lysimetergruppe 1 verbessert werden (Abbildung 3), ohne jedoch die für diese Bodenform beobachteten, untypischen Abflussspitzen abbilden zu können. Dazu wäre eine Veränderung der hydraulischen Parametrisierung der Bodenmatrix erforderlich, für die es keine messtechnische Basis gibt.

## Ausblick

Nachdem mit der Modellierung des Wasserhaushaltes wesentliche Voraussetzungen für die Abbildung des Kohlen-/ Stickstoffhaushaltes gegeben sind, erfolgt in der nächsten Bearbeitungsphase die standortspezifische Ableitung der Modell-Parameter zum C/N-Umsatz im System Pflanze

– Boden. Nach Abschluss der Modellparametrisierung und Validierung anhand der Beobachtungen unter den definierten Rahmenbedingungen einer Großlysimeteranlage erfolgt die Modellanwendung im Verbund mit der Grundwasserströmungsmodellierung in zwei gut beobachteten Grundwassereinzugsgebieten. Zurzeit erfolgt hierfür die Datenrecherche, die sowohl die detaillierte Erfassung der Bewirtschaftungsdaten als auch Profiluntersuchungen und Analysen des Boden- und Grundwassers umfasst.

## Danksagung

Das Projekt ReArMo wird vom Freistaat Sachsen, Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie finanziert.

## Literatur

- BECKER, A., B. KLÖCKING, W. LAHMER and B. PFÜTZNER, 2002: The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology* (Eds.: Singh, V.P. and Frevert, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384. ISBN 1-887201-34.
- HAFERKORN, U., K. MÜLLER, U. MELLENTIN und J. FAHL, 2003: Möglichkeiten und Grenzen der Stofftransportmodellierung (Nitrat) am Beispiel des Parthegebietes, UFZ-Bericht, Nr. 14, 87 Seiten. ISSN 0948-9452.
- HÜLSBERGEN, K.J., 2003: Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Habilitation. shaker Verlag, Aachen.
- KLÖCKING, B., 2009: Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO, [online verfügbar: <http://www.arcegmo.de/PSCN.pdf>].
- LfUG, 2001: Bodenmonitoring in Sachsen, Materialien zum Bodenschutz 2001, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden, 58-72.
- MCDONALD, M.G. and A.W. HARBAUGH, 1988: MODFLOW - A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. - U.S. Geological Survey.
- PFÜTZNER, B. (Hrsg.), 2002: Modelldokumentation ArcEGMO. Online 2002. <http://www.arcegmo.de>. ISBN 3-00-011190-5.
- PFÜTZNER, B., H. IHLING, B. KLÖCKING, G. KNAB, K. KUHN, M. STEININGER, B. WAGNER und D. WENSKE, 2011: Konzept zur Erstellung eines gekoppelten Stofftransportmodells als Prognoseinstrumentarium für die Beschaffenheitsentwicklung im Grundwasser, Schriftenreihe des LfULG, Heft 41/2011 ([http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/5297\\_1.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/5297_1.pdf)).