UFZ-UMWELTFORSCHUNGSZENTRUM LEIPZIG-HALLE GMBH

UFZ-Bericht

Nr. 17/2001

Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthegebietes

Ergebnisse des Workshops "Stickstoffmodellierung" vom 8. bis 10. Juni 1999

Jens Dreyhaupt (Hrsg.)

UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH,
Sektion Bodenforschung

ISSN 0948-9452

Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes

Ergebnisse des Workshops **„Stickstoffmodellierung“**

vom 08.06.1999 bis 10.06.1999

am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	3
Teil I: Lysimeterdaten der Station Brandis als Datenbasis für Modellrechnungen	4
1. Einleitung	4
2. Aufbau und Betrieb der Lysimeterstation Brandis	5
3. Charakterisierung der modellierten Böden	8
3.1 Naturräumliche Beschreibung der Herkunftsflächen	8
3.2 Angaben zu den Profilen	9
3.3 Klimatische Bedingungen im Simulationszeitraum	11
4. Ausgewählte Meßergebnisse zur Bewertung des Bodenwasser- und Stickstoffhaushaltes der modellierten Böden	13
4.1 Heterogenität der Böden und Streuung der Meßergebnisse	13
4.2 Nutzbarer Bodenwasservorrat und Wurzeltiefen	14
4.3 Verdunstung (Evapotranspiration)	14
4.4 Sickerwasser in 3 m Tiefe	17
4.5 Ausgewählte Kennzahlen des Stickstoffhaushaltes	19
5. Literatur	22
Teil II: Modellanwendungen-Konzepte und Simulationsergebnisse	25
1. Einleitung	25
2. Entwicklungsstand der Modelle	26
3. Material und Methoden	38
3.1 Datenbasis der Modellrechnungen	38
3.2 Ableitung modellspezifischer Inputdaten	39
3.3 Simulation	43
4. ausgewählte Kennzahlen zum Konzeptvergleich	43
5. Diskussion der Ergebnisse und Modellvergleich	48
6. Literatur	52
Autorenverzeichnis	58

Vorwort

Die Modellierung hat als Methode in der Wissenschaft einen festen Platz: Computersimulationen zur vorausschauenden oder retrospektiven Nachbildung des zeitlichen Ablaufes von Vorgängen sind ein unentbehrliches Werkzeug für den weiteren Erkenntnisprozeß. Mit Modellen wird in einem begrenzten Kontext ein Ausschnitt der Realität abgebildet. Wichtigste Grundlage einer jeden Modellanwendung ist jedoch die Validierung: anhand von Vergleichsdatensätzen realer Objekte können Modelle für spezielle Anwendungen angepaßt werden. Nur nach einer sachgemäßen Validierung ist es möglich, mit einem Modell Prozesse realitätsnah abzubilden.

Zur Untersuchung der Stoffausträge aus dem Wurzelraum agrarisch genutzter Flächen wurden verschiedene Modelle entwickelt, die wichtige Umsatz- und Transportprozesse der ungesättigten Zone des Bodens beschreiben. Im Rahmen eines vom UFZ Leipzig - Halle organisierten Workhops zur Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthegebietes haben einige von ihnen ihr Leistungspotential unter Beweis gestellt. Ziel war es, die Modelle hinsichtlich der Simulationsergebnisse wichtiger Größen des Wasser- und Stoffhaushalts zu vergleichen.

Im ersten Teil des Papers wird das verwendete Datenmaterial vorgestellt, welches von der Lysimeterstation Brandis zur Verfügung gestellt wurde. Der zweite Teil beschreibt den Entwicklungsstand der Modelle sowie Material und Methodik der Modellierung einschließlich einiger Kennzahlen zum Modellvergleich.

Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes

Teil I: Lysimeterdaten der Station Brandis als Datenbasis für Modellrechnungen

Ulrike Haferkorn und Siegfried Knappe

1. Einleitung

Veranlassung für die langjährigen Wasserhaushaltsuntersuchungen im Parthegebiet und für den Bau der Lysimeterstation Brandis waren Probleme bei der Trinkwassergewinnung in stark beanspruchten Einzugsgebieten (MORITZ ET AL. 1991). Deshalb zielt die Datengewinnung auf die Ermittlung langjähriger Reihen der Bodenwasserhaushaltsgrößen typischer Böden Mitteldeutschlands, um das jährliche und innerjährliche Schwankungsverhalten der Verdunstung und Grundwasserneubildung infolge von Trocken- und Feuchtjahren beurteilen zu können. Um gesicherte Daten in hoher zeitlicher Auflösung gewinnen zu können, wurden die Bodenmonolithe von den teils sehr weit entfernt liegenden Herkunftsflächen (SPENGLER, 1973, 1975; MORITZ ET AL. 1991) am Standort Brandis zusammengeführt.

Mit der Lysimeteranlage wurden folgende wissenschaftliche Ziele verfolgt:

- Bestimmung der Grundwasserneubildung und der realen Verdunstung unter gebietstypischen Klimabedingungen und bei gebietstypischer landwirtschaftlicher Nutzung.
- Detailierte Erfassung der Bodenparameter, der Bewirtschaftungsmethoden und der Phänologie. Beobachtung der Witterungsbedingungen am Lysimeterstandort als Grundlage für die Interpretation der Lysimetermessungen
- Ermittlung der Effizienz der mineralischen N-Düngung und der Höhe der Stickstoff-Entzüge durch die Pflanze.
- Aussagen zum Stickstoff-Auswaschungspotential der verschiedenen Böden und zur davon ausgehenden Gefahr für das Grundwasser.
- Lösung spezieller wissenschaftlicher Fragestellungen über die im Bodenprofil ablaufenden Prozesse. Dazu wurden Tensiometer, Saugkerzen, TDR-Sonden, Temperaturfühler und Sonden zur Entnahme von Bodenluft in jeweils drei Lysimeterebenen eingebaut.
- Validierung von Standort- und Einzugsgebietsmodellen mit Meßreihen aus der Lysimeterstation und aus dem Parthegebiet.

Zu letzterer Fragestellung fand ein Workshop in Leipzig statt, dessen Ergebnisse in CEPUDER ET AL. (2001) dargestellt sind. Die Kalibrierung und Validierung der unterschiedlichen Modelle zum Bodenwasserhaushalt und zur Stickstoffumsetzung in der ungesättigten Zone wurde anhand von konkreten Meßwerten aus der Lysimeterstation Brandis vorgenommen. Dazu wurden Datensätze zur Bodenbeschreibung (Textur und weitere ausgewählte physikalische Kennwerte) und Einzelwerte dreizehnjähriger Meßreihen (1981-1992) zum Wasser- und Stickstoffhaushalt von zwei Lysimetergruppen (Lysimetergruppe 5 und 7 mit jeweils drei Wiederholungen) zur Verfügung gestellt.

2. Aufbau und Betrieb der Lysimeterstation Brandis

Die Lysimeterstation Brandis liegt 136 m über NN etwa 15 km südöstlich von Leipzig am südlichen Ortsrand der Stadt Brandis bei Leipzig.

Es werden insgesamt 24 wägbare Lysimeter betrieben. Für die Lysimeter wurden an acht verschiedenen Herkunftsflächen einheitlich Bodenmonolithe mit einer Mächtigkeit von 300 cm gewonnen. Alle Lysimeter haben eine Oberfläche von $1m^2$ und eine Tiefe von 3m. Die Entnahme der Bodenmonolithe erfolgte "ungestört" nach der Methode von FRIEDRICH-FRANZEN.

Bei der Wahl der Herkunftsflächen für die Bodenmonolithe wurde angestrebt, daß sowohl aus bodenkundlicher Sicht als auch hinsichtlich der Hydrologie der Grundwasserleiterdeckschichten durch die Lysimetermessungen möglichst große Gebiete (SPENGLER 1975) mit gleichem Versickerungsverhalten (Hydrotope) repräsentiert werden (Tabelle 1). Dabei handelt es sich ausschließlich um Standorte mit flurfernen Grundwasserständen.

Tabelle 1: Zusammenstellung der in Brandis untersuchten Böden

Lysimeter-gruppe	Bodentyp	Hydromorphie	Schichtung	Typ
5	erodierte Braunerde	Sickerwasser-beeinflußt	Sandlöß über Schmelzwassersanden (locker)	**a**
4 und 8	Braunerde-Fahlerde, Parabraunerde-Braunerde	Sickerwasser-beeinflußt	Sandlöß über Schmelzwassersanden (lehmig)	**b**
1, **7** und 11	(lessivierter) Braunerde-Pseudogley, pseudovergleyte Braunerde-Fahlerde	Stauwasser-beeinflußt, früher teils grundwasser beeinflußt	Sandlöß (Geschiebedecksand) über Geschiebelehm, -mergel (teils stark verdichtet)	**c**
9 und 10	Parabraunerde, Schwarzerde	starke Aufwärts-bewegung infolge hoher Verdunstung	Löß über Schmelzwassersanden (sehr homogen)	**d**

Die Böden sind mehrschichtig, wie für Altpleistozänlandschaften typisch. Die Auswahl aller Gewinnungsorte erfolgte so, daß an der Sohle der Lysimeter von Natur aus mindestens 50 cm gut durchlässiges Lockergestein ansteht. In einem Bereich von 10 bis 20 cm über der Sohle wurde horizontal ein geschlitztes, mit Glaswolle gefülltes, doppeltes Stahlfilterrohr eingebaut. Auf diese Weise wird ein ungestörtes Abfließen des im Bereich des Lysimeterbodens eintreffenden Sickerwassers ermöglicht und verhindert, daß Wasser aus dem Staubereich am Lysimeterboden wieder kapillar in die verdunstungsbeeinflußte Zone gehoben wird (LÜTZKE 1965; DVWK, 1980).

In Anlehnung an die Richtlinien des Deutschen Wetterdienstes beginnt ein Meßtag im Lysimeterkeller um 7.30 Uhr und endet um 7.30 Uhr des folgenden Tages. Die mengenmäßige Erfassung der Sickerwassermengen erfolgt täglich, die Analytik der Sickerwässer in der Regel monatlich.

Die Station und das Lysimeterfeld mit dem Lysimeterkeller befinden sich inmitten einer landwirtschaftlichen Nutzfläche. Die Konstruktion der Kellerdecke erlaubt eine 1,2 m mächtige Kulturbodenüberdeckung und damit die gleiche Art der Bewirtschaftung auf den Lysimetern und den umgebenden Flächen.

Die kontinuierlich geführten Meßreihen beginnen im November 1980. Zum Meßprogramm auf dem Lysimeterfeld gehören Pflanzenbonituren und die jährliche Beprobung des oberen Bodenhorizontes. Der Niederschlag wird täglich sowohl bodengleich als auch in einem HELLMANN-Messer in 1m Aufstellhöhe ermittelt. Die Standardwetterhütte und die Bodenthermometer wurden 1992 durch eine automatische Klimastation ersetzt. Ergänzt wird das Meßprogramm durch Wetterbeobachtungen und Meßgeräte zur Ermittlung der atmosphärischen Deposition.

Die reale Evapotranspiration (ETR) der 24 wägbaren Lysimeter wird täglich auf Basis der Meßwerte korrigierter Niederschlag (P_{korr}), Sickerwassermenge (GWN) und Gewichtsänderung = Bodenwasservorratsänderung (ΔSB) berechnet:

$$ETR = P_{korr} - GWN \pm \Delta SB \text{ [mm]}$$

Die landwirtschaftliche Bewirtschaftung die Lysimeter und des umliegenden Schlages erfolgte in ortsüblicher Weise (Tabelle 2)

Tabelle 2: Fruchtfolge, Stickstoff-Einträge und Niederschläge der Jahre 1980-92

Kalender-jahr	**Fruchtart** (Lysimeter und Feld)	**mineralische N-Düngung** [kg/ha/a]	**N-Immission als nasseDeposition** [kg/ha/a]	**Niederschlag** (n.HELLMANN) [mm/a]
1980	Mais	140	44	657
1981	Zuckerrüben	160	53	727
1982	Winterweizen	120	28	390
1983	Wintergerste	120	33	672
1984	Weidelgras	175	42	536
1985	Kartoffel	100	69	477
1986	Winterweizen	120	35	581
1987	Kartoffel	100	37	629
1988	Winterweizen	140	46	574
1989	Wintergerste	120	46	546
1990	Zuckerrüben	140	44	579
1991	Winterweizen	140	37	417
1992	Wintergerste	120	29	583

Die landwirtschaftliche Bearbeitung, Bestellung und Ernte des Lysimeterfeldes wird mit Kleintraktor, Anhängegeräten und Kleintechnik durchgeführt. Die Bewirtschaftung der Lysimeter selbst erfolgt per Hand. Auf den Herkunftsflächen der Lysimeter wurde für alle Feldarbeiten schweres Bewirtschaftungsgerät eingesetzt. Über die dadurch hervorgerufenen Bodenverdichtungen und die damit verbundenen, möglichen Fehler bei der Übertragung von Lysimeterergebnissen auf die Fläche finden sich Angaben bei KEESE UND KNAPPE 1996, KNAPPE UND KEESE 1996 und KEESE ET AL. 1997. Mit dem Hinweis auf den hohen Grad der Pflege und die geringen Ernteverluste auf den Lysimetern wird gelegentlich empfohlen, die Hektarerträge der einzelnen Kulturpflanzen zu korrigieren. So empfiehlt z.B. GLUGLA 1989, bei der Übertragung von Ernteerträgen auf landwirtschaftliche Schläge für Getreide minus 5 %, für Feldgras, Grünland und Hackfrüchte minus 10 % der Lysimetererträge anzusetzen. In Bezug auf die Pflanzenentwicklung und Bestandsdichte auf den Brandiser Lysimetern konnte durch die phänologischen Beobachtungen von SÄMISCH 1990 allerdings eine weitgehende Übereinstimmung von Lysimeter und Vergleichsfläche festgestellt werden.

Nach der langjährigen Nutzung der Lysimetermonolithe ergab sich die Frage, inwieweit Oaseneffekte sowie nutzungs- und lysimeterspezifische Einflüsse zu Veränderungen im Boden und damit zu Problemen bei der Verwendung der Lysimeterergebnisse führen. Deshalb wurden 1994 drei der langjährig genutzten Lysimetermonolithe zerlegt. Parallel dazu wurden auf den Herkunftsflächen der Lysimeterböden Profile aufgenommen und mit gleichem Untersuchungsprogramm analysiert. Von besonderen Interesse für die im Rahmen der Modellierung zu beachtenden Unterschiede, soll hier nur auf die dabei ermittelte Heterogenität der physikalischen Merkmale (vor allem Lagerungsdichte, z.T. Textur) der Ausgangsprofile im

Vergleich zur Profilbeschreibung zum Zeitpunkt der Lysimeterzerlegung und den erneut untersuchten Profilen auf den Herkunftsflächen hingewiesen werden (nähere Angaben dazu bei KEESE UND KNAPPE 1996 und KEESE ET AL. 1997).

3. Charaterisierung der modellierten Böden

3.1 Naturräumliche Beschreibung der Herkunftsflächen

Für die Modellierung wurden folgende zwei Böden ausgewählt:

Erodierte Braunnerde geringer Entwicklungstiefe aus Sandlöß über kiesführendem Fluvisand (Lysimetergruppe 5).

Diese Herkunftsfläche befindet sich im Bereich eines spornartigen Ausläufers des breiten Geschiebesandrückens zwischen Beucha und Brandis, einem Teilgebiet der staunässebeeinflußten Altmoränenplatte Borsdorf - Wurzen.

Den angeschnittenen Grundwasserleiter (GWL) 1.6 (Bezeichnung nach PESTER 1978) bilden fluviatile bis glazifluviatile spätelsterkaltzeitliche Sande und Kiese, die im Zusammenhang mit dem Abschmelzen des Inlandeises der Elsterkaltzeit (letzter Vorstoß) zur Ablagerung kamen. Die Sedimente des GWL 1.6 sind sehr inhomogen. Sie bestehen hauptsächlich aus feinkiesigen Mittel- und Grobsanden bzw. grobsandigen Feinkiesen mit vereinzelten Steinen. Häufig wurden Schlufflagen nachgewiesen (LfUG und IBGW, 1994). Die darüberliegenden Schichten wurden aus umgelagerten Geschiebesanden wechselnder Mächtigkeit gebildet.

Der oberste Horizont besteht aus solifluidal umgelagertem Sandlöß, wobei auch Material aus der darunterliegenden Schicht eingearbeitet wurde. Aus diesem vorwiegend sandhaltigem Ausgangssubstrat entstanden durch Verbraunung und Tonbildung Sandlöß-Braunerden.

Braunerde-Pseudogley mittlerer Entwicklungstiefe aus Sandlöß über kiesführendem Moränenlehm (Lysimetergruppe 7). Im Bereich der Herkunftsfläche der Lysimetergruppe 7 (Südostausläufer der Brehnaer Platte) wurde der GWL 1.5 angetroffen. Er ist hier durch geschichtete Sande wechselnder Korngrößenzusammensetzung gekennzeichnet. Darüber lagert in diesem Fall bis zu 2,70 m mächtiger Geschiebelehm der Saalegrundmoräne. Kennzeichnend für die Geschiebelehmschicht ist ihre Inhomogenität, die durch wiederholte Entmischung, Auffrieren und Entwässerung entstanden ist. Typisch sind kleine Sandlinsen und Eisrißwerke (Klüfte). Abgedeckt wird dieser Komplex durch eine solifluidal und periglazial umgelagerte kies- und sandhaltige Sandlößdecke. Typisch für das sächsische Mittelgebirgsvorland sind die

darauf entstandenen Sandlößtieflehm-Staugley-Böden, die durch temporär und periodisch auftretendes Stauwasser geprägt sind.

Die Herkunftsflächen der beiden zur Modellierung ausgewählten Böden – wie auch die der anderen in Brandis untersuchten Böden - liegen im "Norddeutschen Tiefland" (MEYNEN ET AL. 1953) und repräsentieren aus hydrogeologischer Sicht die komplizierten Lagerungsverhältnisse des Randpleistozäns (EISSMANN 1970).

Diese äußerst inhomogenen Bildungen erhielten dann im oberflächennahen Bereich während des periglazialen Milieus der Weichsel-Kaltzeit im wesentlichen ihre heutige Prägung. Die Dauerfrostböden unterlagen durch wechselndes Gefrieren und Auftauen, Umlagerung (Bodenfließe), Abtrag und Akkumulation nochmals entscheidenden Veränderungen. Zeugen davon sind Sandbänder, Sandkeile (ehemalige Eiskeile) und Sandlinsen bis zu einer Tiefe von mindestens 2 bis 3 m unter Flur. Eingelagerten Sandkeile und Sandlinsen wirken insbesondere in den Geschiebelehmpaketen als natürliche Dränagen (EISSMANN 1970).

In der Weichsel-Warmzeit folgten dann vor allem äolische Ablagerungen (Sandlöß). Diese sind z. T. von geringerer Mächtigkeit (im Mittel knapp 1 m, oft nur 0,6 m und weniger, selten 2 m) und bestehen aus einem Gemenge von Treibsand und Flugstaub, auch mit Feinschluff- und Tonanteilen. Sie bestimmen auch für die beiden Herkunftsflächen der modellierten Böden weitgehend die Fruchtbarkeit der heutigen Bodendecke.

3.2 Angaben zu den Profilen

Bei der Lysimetergewinnung in den Jahren 1978/79 wurden auf den Lysimeterherkunftsflächen Profilbeschreibungen und Untersuchungen zu den physikalischen Eigenschaften der Böden durchgeführt. Zur Modellkalibrierung wurden davon die in Tabelle 3 aufgeführten Datensätze zur Textur, der Humusgehalt, k_f-Wert und Lagerungsdichte für die ermittelten Horizonte der Profile verwendet.

Tabelle 3: Zur Modellkalibrierung verwendete Ergebnisse der Profilaufnahnen aus der Zeit der Lysimetergewinnung

Bodenform: Sandlößtieflehm-Staugley (sö/lS) **NstE:D4** **Lysimetergruppe 7** **Bodentyp: Bleichstaugley**												
Horizont	**Tiefe**	**Körnung (% vom Feinboden)**							**Skelett**	**Humus**	**k_f-Wert**	**Lagerungsdichte**
	Cm	gS	MS	fS	gU	mU	fU	Ton	%	%	m/d	g/cm^3
Ap	0-35	5	25	14	25	13	8	10	2	2,2	0,104	1,68
BvEg	35-50	3	23	15	25	15	9	10	2	0,9	0,897	1,58
Bg1	50-135	8	26	19	11	6	5	25	4	0,2	0,001	1,83
Bg2	135-220	2	23	18	17	8	7	25	2	0	0,002	1,87
C	220-300	33	56	5	3	1	1	1	24	0	12,56	1,68
Bodenform: gekappte Decksandlöß-Braunerde (sö/lS) **NstE:D3** **Lysimetergruppe 5** **Bodentyp: erodierte Braunerde**												
Horizont	**Tiefe**	**Körnung (% vom Feinboden)**							**Skelett**	**Humus**	**k_f-Wert**	**Lagerungsdichte**
	Cm	gS	MS	fS	gU	mU	fU	Ton	%	%	m/d	g/cm^3
Ap	0-30(35)	11	29	22	13	11	6	8	16	2,1	15,24	1,56
C1	35-175	38	57	1	0	1	1	2	26	0	18,79	1,69
C2	175-300	4	57	32	1	1	1	4	2	0	9,40	1,57

Um möglicher Unterschiede zwischen Böden in langjährig genutzten Lysimetern und ihren Herkunftsflächen einschätzen zu können, wurden im September 1994 jeweils ein Lysimeter des Braunerde-Pseudogley aus Sandlöß über Geschiebelehm (Lysimeter 7/4) und der Erodierten Braunerde aus Sandlöß über Schmelzwassersanden (Lysimeter 5/6) vollständig zerlegt und schichtweise beprobt. Gleichzeitig erfolgte auch auf den Herkunftsflächen der Bodenmonolithe eine erneute Profilansprache und schichtweise Beprobung (KEESE UND KNAPPE, 1996). Die Labormethoden und bodenphysikalischen Ergebnisse dieser Untersuchungen sind ausführlich in KEESE ET AL. 1997 beschrieben.

Die ermittelten Unterschiede in der Korgrößenzusammensetzung der Schichten der Profile widerspiegeln die hohe räumliche Variabilität der Böden der untersuchten Flächen. Im Lysimeter 5/4 und dessen Herkunftsfläche wurden 1994 deutlich höhere Schluff- und Tonanteile als im Profil zum Zeitpunkt der Lysimetergewinnung gefunden

Vergleiche der Bodendichten zeigten, daß im oberen Bereich bis ca. 30cm Tiefe erhebliche Dichteunterschiede sowohl zwischen Lysimeter und Herkunftsfläche als auch zwischen den Profilen von 1978 und 1994 zu verzeichnen sind. Die Dichtewerte bis 30cm sind auf den zerlegten Lysimetern auf einem zur Herkunftsfläche niedrigeren Niveau. Diese Tatsache wird auf die jahrelange Bewirtschaftung der Lysimeter per Hand zurückgeführt.

Die Dichteunterschiede zwischen Lysimeter und Herkunftsfläche und die extrem hohen Dichten und erhöhten Ton- und Schluffgehalte im Lysimeter 7/6, die unterhalb des Bewirt-

schaftungshorizontes auftreten, sind auf natürliche Inhomogenitäten der Herkunftsflächen zurückzuführen

3.3 Klimatische Bedingungen im Simulationszeitraum

Für die Modellierung wurden die Tageswerte für die meteorologischen Größen Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung und Sonnenscheindauer für die Jahre 1981-1992 verwendet. Der Einfluß der Witterung einzelnen Jahre im Untersuchungszeitraum auf den Wasserhaushalt kann mittels der klimatischen Wasserbilanz (KWB = Differenz von Niederschlag und potentieller Verdunstung) beschrieben werden. Die Aussagefähigkeit der ermittelten KWB (Tab. 4) wird wesentlich beeinflußt durch die Genauigkeit der Niederschlagsmessung (korrigiert ja/nein) und die Art des verwendeten Verfahrens zur Berechnung der potentiellen Verdunstung (ETP).

Tabelle 4: Niederschlag, potentielle Verdunstung, reale (gemessene) Verdunstung und klimatische Wasserbilanz der Reihe 1981-97 am Standort Brandis [mm/a]

	Niederschlag (Hellmann-Messung) [mm]			**$ETP_{Gras\text{-}Ref.}$** [mm]	**$ETP_{gemessen}$** [mm]		**KWB_{unkorr}** [mm]	**kWB_{korr}** [mm]
	unkorrigiert		**Korrigiert**		**Lys.Gr.**			
	1 m Höhe	**bodengleich**			**5**	**7**		
Winter	259	283	302	153	149	160	109	149
Sommer	313	332	353	470	344	413	-157	-117
Jahr	**572**	**615**	**655**	**623**	**493**	**573**	**-47**	**32**

Um die entsprechenden Vergleiche zu den Lysimetermessungen herstellen zu können, wurde der Verlauf der kWB nachfolgend auf Basis der korrigierten Niederschläge ermittelt. Als ETP wurde die Gras-Referenzverdunstung verwendet.

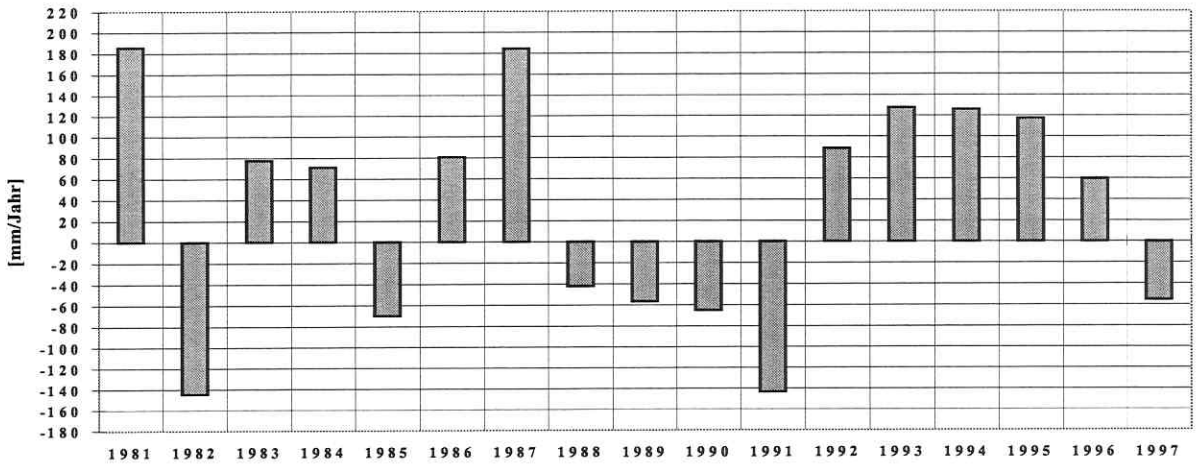


Abbildung 1: Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz am Standort Brandis [mm/a] für den Versuchszeitraum 1981-1997

Wie aus Abbildung 1 zu ersehen ist, reicht die Spannbreite von sehr feuchten (1981 und 1987) bis zu sehr trockenen Jahren (1982 und 1991). Für den Wasserhaushalt sind vor allem eine Folge von trockenen bzw. feuchten Jahren und die Verteilung des Niederschlages auf die Winter- und Sommerhalbjahre von Bedeutung. Abbildung2 zeigt, daß die Trockenheit im Verlauf der Jahre 1988-91 vorwiegend aus zu geringen Sommerniederschlägen und einem überdurchschnittlich hohen Strahlungsangebot (ETR) resultiert.

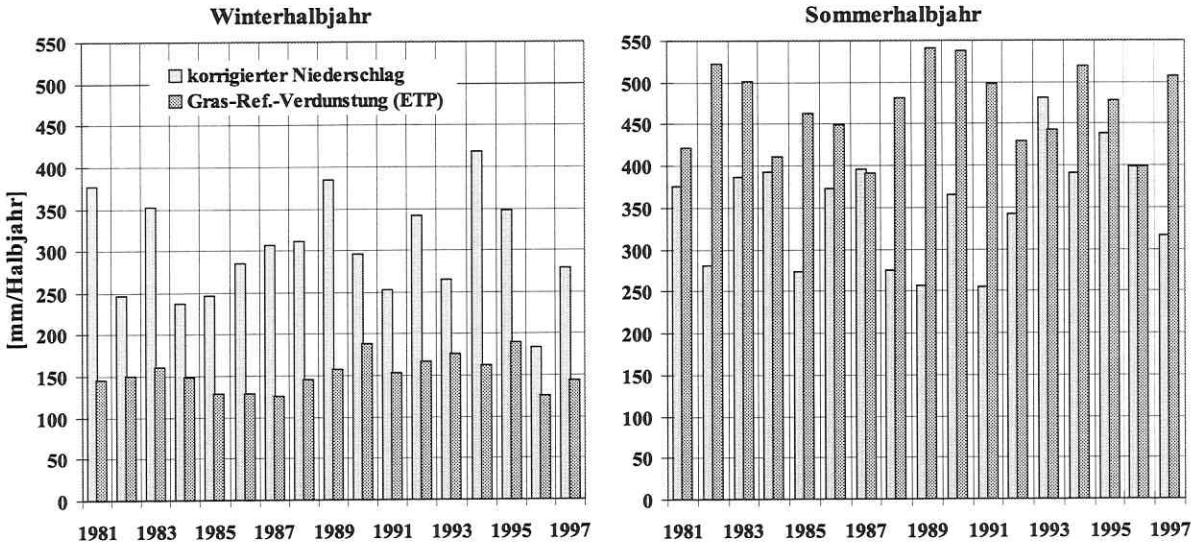


Abbildung 2: Gegenübertstellung von Niederschlag und Gras-Referenzverdunstung (ETP) zur Einschätzung der klimatischen Wasserbilanz der hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahre am Standort Brandis

Es fällt auf, daß die Beobachtungsreihe kaum ein Jahr enthält, das dem "klimatischen Normaljahr" entspricht (vergl. Tab. 4). Typisch für diese Beobachtungsreihe sind eine große Anzahl von zu feuchten Winter- und zu trockenen Sommerhalbjahren.

4. Ausgewählte Meßergebnisse zur Bewertung des Bodenwasser- und Stickstoffhaushaltes der modellierten Böden

4.1 Heterogenität der Böden und Streuung der Meßergebnisse

Aufgrund der Kenntnisse über die natürlichen Inhomogenitäten der Böden, wurden auf jeder Herkunftsfläche statt einem jeweils drei Bodenmonolithe gewonnen. Damit wird es möglich, die Streuung zu beschreiben, die diese drei Wiederholungen einer Herkunftsfläche bei der Verdunstung und Abflußbildung bewirken (Tab. 5).

Tabelle 5: Jahresmittelwerte der Grundwasserneubildung (GWN), der Verdunstung, der Trockenmasse-Erträge, Stickstoffentzüge durch die Pflanze und Höhe der Stickstoffausträge über das Sickerwasser der Einzellysimeter (Abflußjahre 1981-94)

Lysimeter Nr.	GWN [mm/Jahr]	Verdunstung [mm/Jahr]	Trockenmasse [dt/ha/Jahr]	N-Entzug [kg/ha/Jahr]	N-Austrag [kg/ha/Jahr]
7/6*	51	605	107	134	9
7/5	118	552	100	127	17
7/4	120	557	103	131	20
5/4*	162	493	79	106	34
5/5	184	486	63	86	48
5/6	198	478	57	83	49

*Diese Lysimeter wurden im September 1994 zerlegt.

Erwartungsgemäß zeigt sich der größte "Ausreißer" (Lysimeter 7/6) auf dem Braunerde-Pseudogley (Herkunftsfläche der Lysimetergruppe 7). Der Boden der Saalegrundmoräne ist sowohl hinsichtlich der primären (Korngröße von tonig-schluffig bis sandig) als auch hinsichtlich der sekundären Durchlässigkeit (Klüftigkeit aufgrund glazigener Überprägung) sehr variabel. Hier wirken insbesondere übergeordnete Strukturelementen (z.B. Eiskeile, Sandbänder), deren Wiederholungsdistanzen größer sind, als die der Lysimeter.

Die Abweichungen bei den Jahresmittelwerten der Einzellysimeter der Lysimetergruppe 5 verweisen darauf, daß auch die Böden über den Schmelzwassersanden der Elster- und Saale-Kaltzeit aufgrund ihrer glazifluviatilen Entstehung zu starken Inhomogenitäten neigen. Da Kornform und Korngröße erheblich variieren, wirkt sich dies auch auf die Porosität und Durchlässigkeit aus.

Daß der abweichende Verlauf der Meßreihen dieser Lysimeter nicht auf Geräte- oder Meßfehlern beruht, sondern ausschließlich eine Folge der Variabilität der bodenphysikalischen Eigenschaften ihrer Herkunftsflächen ist, zeigten die Untersuchungsergebnisse der Lysimeterzerlegung (KEESE UND KNAPPE 1996).

Zusätzlich zum Einfluß der Heterogenität der Böden, weisen die Bodenwasserhaushaltsgrößen infolge der hohen Variabilität des jährlichen Wasser- und Energieangebotes am Untersuchungsstandort eine hohe Spannweite bei den Jahreswerten und im innerjährlichen Verlauf auf. Die nachfolgende Ergebnisdarstellung basiert meist auf den arithmetischen Mittelwerten aus den drei Einzelwerten einer Lysimetergruppe. Damit werden die Ergebnisse der Lysimetergruppe 7 wesentlich durch den „Ausreißer" 7/6 und die der Lysimetergruppe 5 teilweise durch das Lysimeter 5/4 beeinflußt.

4.2 Nutzbarer Bodenwasservorrat und Wurzeltiefen

Untersuchungen zur Ausschöpfung des nutzbaren Bodenwasservorrates durch die Pflanzen und die daraus abzuleitenden Wurzeltiefen wurden auf den in Brandis vorhandenen acht Bodenformen durchgeführt (HAFERKORN UND KNAPPE, 1998). Dabei wurde ermittelt, daß, in Abhängigkeit von Witterung und Fruchtfolge die Erodierte Braunerde im Mittel der Jahre 1981-97 eine Bodenwassermenge von 64 mm für die Verdunstung zur Verfügung stellt. Maximal möglich ist eine Entnahme von 75 mm, wie sich in den Jahren 1981, 1982 und 1989 zeigte. Die mittlere jährliche Inanspruchnahme von Bodenwasser beträgt beim Braunerde-Pseudogley 132 mm, maximal möglich sind 175 mm (1988 bei einem Bestand mit Winterroggen).

Eine Abschätzung der effektiven Wurzeltiefen (HAFERKORN 1999) ergab für die Erodierte Braunerde maximal 32 cm (1981 bei Zuckerrüben). Die Pflanzenwurzeln wuchsen damit kaum unter die nur ca. 35cm mächtige Sandlößdecke in die darunterliegenden Horizonte aus Schmelzwassersanden und -kiesen. Auf dem Braunerde-Pseudogley wird 1988 eine effektive Wurzeltiefe von 84 cm erreicht. Die Pflanzenwurzeln verlassen die ca. 45cm tiefe Sandlößdecke und wachsen in den darunterliegenden Geschiebelehm.

4.3 Verdunstung (Evapotranspiration)

Die Ermittlung der Verdunstung mittels Lysimeter ist ein indirektes Meßverfahren. Deshalb resultiert die Genauigkeit der Verdunstung aus der Meßgenauigkeit der Meßgrößen Nieder-

schlag, Versickerung und Bodenwasservorratsänderung (Gewicht der Lysimetersäule des Vortages minus Gewicht des Meßtages).

Die zufälligen Meß- und Schreibfehler, die bei der Messung des Sickerwassers am Lysimeterauslauf und bei der Messung der Bodenwasservorratsänderung sporadisch auftraten wurden korrigiert. Die Korrektur des systematischen Fehlers des bodengleichen Niederschlages nach RICHTER 1995 bewirkte eine durchschnittliche jährliche Erhöhung des bodengleichen Niederschlages (der bisher unkorrigiert zur Berechnung der Lysimeterverdunstung verwendet wurde) um rd. 40 mm (6%).

Nach Abschluß dieser Korrekturen wurde die Verdunstung erneut berechnet. Es traten dann in den Wintermonaten immer noch zahlreiche fehlerhafte (meist negative) Verdunstungswerte auf. Diese wurden nach JANKIEWICZ 1998 korrigiert. Alle Korrekturen bewirkten insgesamt eine durchschnittliche jährliche Erhöhung der Verdunstung um rd. 50 mm im Vergleich zu den unkorrigierten Werten.

Zusätzlich zu den beschriebenen zufälligen und systematischen Meßfehlern beeinflussen Heterogenitäten im Aufwuchs des Pflanzenbestandes auf den landwirtschaftlich genutzten Lysimetern die Genauigkeit der Verdunstungsermittlung. So ist hinsichtlich der Repräsentativität der mittels Lysimeter ermittelten Verdunstung sicherzustellen, daß Pflanzenentwicklung, Bestandsdichte und Ernteergebnisse mit denen auf den Herkunftsflächen weitgehend übereinstimmen.

So sollte die Pflanzenentwicklung und Bestandsdichte auf den jeweils drei Lysimetern mit gleichem Boden keine wesentlichen Unterschiede aufweisen. Es wurde angestrebt, dies durch sorgfältige Bewirtschaftung zu gewährleisten. Trotzdem zeigte sich infolge kleinräumiger Bodenunterschiede sowie unterschiedlicher Vegetationsentwicklung und Reaktion der Pflanzenbestände auf Krankheiten und Schädlingsbefall eine Abweichung der Einzelwerte der Verdunstung vom Gruppenmittel.

Zur Beschreibung dieser zufälligen Reststreuung (als Ausdruck der Versuchsgenauigkeit) wurde für die Lysimetergruppen 5 und 7 die Standardabweichung der Dekaden- und Monatswerte von 1981-97 berechnet, wobei diese erwartungsgemäß bei allen Böden einen Jahresgang zeigte (Tab. 6). Insbesondere während der Vegetationsperiode steigt der Wert der Standardabweichung unter dem Einfluß der wachsenden Pflanzenbestände an. Die Standardabweichung der hier nicht aufgeführten Dekadenwerte ist erwartungsgemäß höher als die der Monatswerte.

Tabelle 6: Standardabweichung der Verdunstung [mm/Monat] der Einzellysimeter vom Gruppenmittel als mittlerer Jahresgang

Monat	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Jahr
Lys.Gr.5	1,4	1,9	1,6	1,5	2,7	2,5	5,8	6,0	4,5	2,7	2,5	1,5	**2,9**
Lys.Gr.7	1,3	1,3	1,8	2,4	4,0	5,2	8,7	7,9	5,5	4,3	2,7	2,5	**4,0**

Eine Beeinflussung der Verdunstung infolge der Lysimetertechnik, z.B. durch den „Blumentopfeffekt" oder eine bessere Wasserversorgung der Pflanzen infolge kapillaren Aufstieges von Stauwasser, wie es bei zu flachen Lysimetern zu erwarten wäre, ist im vorliegenden Fall auszuschließen (KEESE UND KNAPPE 1996).

Um sicherzustellen, daß die Meßwerte nicht aus anderen Gründen einem signifikante Trend unterliegen, wurde mittels Doppelsummenkurve getestet. Dazu wurden die Monatswerte der Verdunstung der Einzellysimeter aufsummiert und über die Summenkurve des Niederschlages aufgetragen (Abb.3). Da sich alle Kurven um eine Gerade bewegen, kann ein Trend der Meßreihen ausgeschlossen werden. Unterschiede der Verdunstungsleistung der Einzellysimeter einer Gruppe, wie sie sich in der Endbilanz für die in die Zerlegung einbezogenen Einzellysimeter 7/6 und 5/4 zeigen, sind Wirkungen von Inhomogenitäten der Böden zuzuordnen (siehe Pkt. 3.2 und 3.3).

Die Unterschiede in der jährlichen Höhe der Verdunstung, die durch Witterung und verschiedene Fruchtarten im Verlauf von 17 Beobachtungsjahren hervorgerufen werden, sind bei Variationskoeffizienten zwischen 8 und 12 % auf allen Böden ähnlich. Das Jahresmittel (Reihe 1981-97) der realen Verdunstung der Erodierten Braunerde beträgt rd. 493 mm und die des Braunerde-Pseudogleys rd. 573 mm. Die Verdunstungsleistung beider Böden liegt damit deutlich unter der (potentiellen) Gras-Referenzverdunstung von rd. 623 mm (Tab. 2).

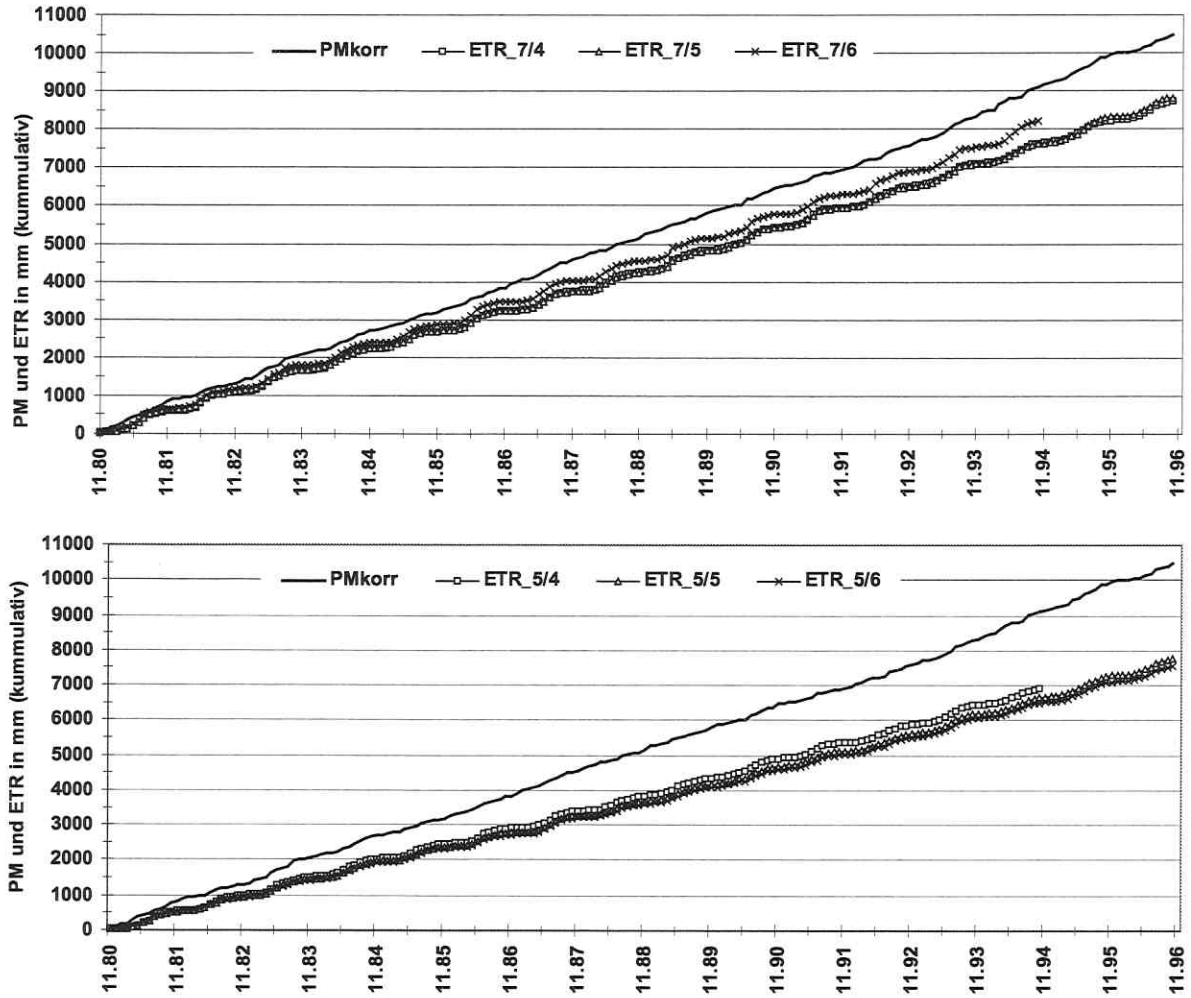


Abbildung 3: Summenkurven des Niederschlages (PM) und der gemessenen Evapotranspiration (ETR) der jeweils drei Wiederholungen der Lysimetergruppen 7 und 5

4.4 Sickerwasser in 3 m Tiefe

Unter den klimatischen Bedingungen am Standort Brandis ist die Sickerwasserbildung (Abb.4) der untersuchten Böden durch drei Merkmale gekennzeichnet:

- einen typischen jahreszeitlichen Gang mit relativ hohen Werten im Winter und sehr geringen oder keinen Neubildungsraten im Sommer
- einen mehrjährigen Rhythmus von Jahren mit überdurchschnittlich hoher bzw. niedriger-Sickerwasserbildung und
- eine sehr hohen Abweichung der Einzelwerte vom langjährigen Mittelwert.

Der Variationskoeffizient der jährlichen Sickerwasserhöhe beträgt bei der Erodierten Braunerde rd. 40 % und beim Braunerde-Pseudogley rd. 70 %. Der Variationskoeffizienten des Jahresniederschlages und der Verdunstung liegen dagegen nur bei 14 % bzw. max. 12 %. Die jährliche Höhe der Bodenwasserausschöpfung hat den größten Einfluß auf die Variabilität der Sickerwasserbildung. Je geringer die Bodenwasserdefizite am Ende des Sommerhalbjah-

res und je höher die Niederschläge in den darauffolgenden Herbst- und Wintermonaten, um so eher beginnt die Neubildungsperiode und um so höher sind die Neubildungsmengen. Aus diesem jährlichen Wechselspiel zwischen Niederschlagshöhe und Bodenwasserdefizit resultiert die hohe Variabilität der Sickerwassermengen. Die jeweils angebaute Fruchtart spielt dabei nur eine untergeordnete Rolle.

Als mittlere jährliche Sickerwasserbildung der Jahre 1981-97 waren bei der Erodierten Braunerde 175 mm und beim Braunerde-Pseudogley 98 mm zu verzeichnen. Das sind 27 % bzw. 15 % des mittleren korrigierten Jahresniederschlages von 655 mm.

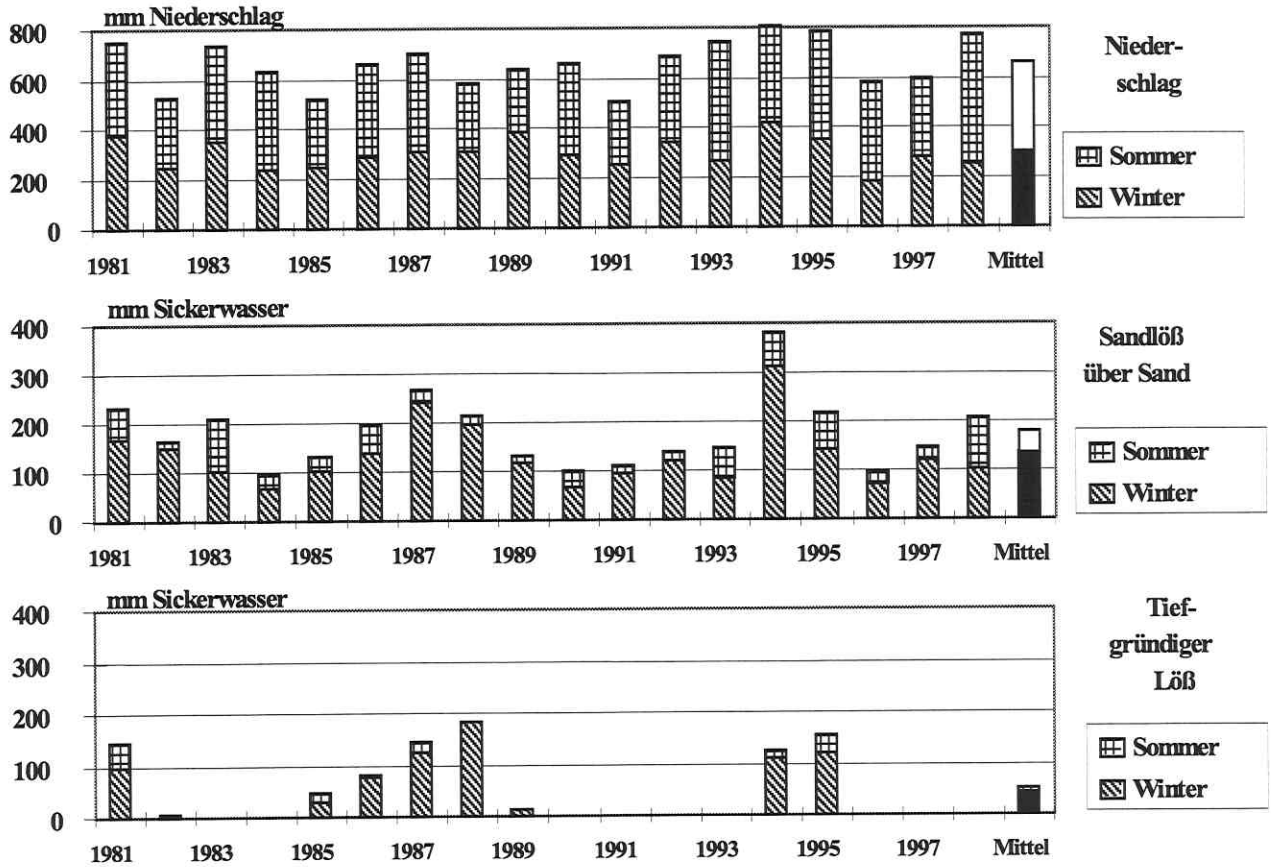


Abbildung 4: Korrigierter Niederschlag und Grundwasserneubildung der Erodierten Braunerde (Lys.Gr.5) und des Braunerde-Pseudogleys (Lys.Gr.7)

Analog zur Darstellung der Ergebnisse der Evapotranspiration, wurden die Monatswerte der Sickerwasserbildung der Einzellysimeter aufsummiert und über eine Summenkurve gegen die Zeit aufgetragen (Abb.5). Differenzen in der Sickerwasserbildung der Einzellysimeter einer Gruppe lassen sich, analog zur Evapotranspiration, auch hier für die in die Zerlegung einbezogenen Einzellysimeter 7/6 und 5/4 zeigen und sind der Wirkung von Inhomogenitäten der Böden zuzuordnen (siehe Pkt. 3.2).

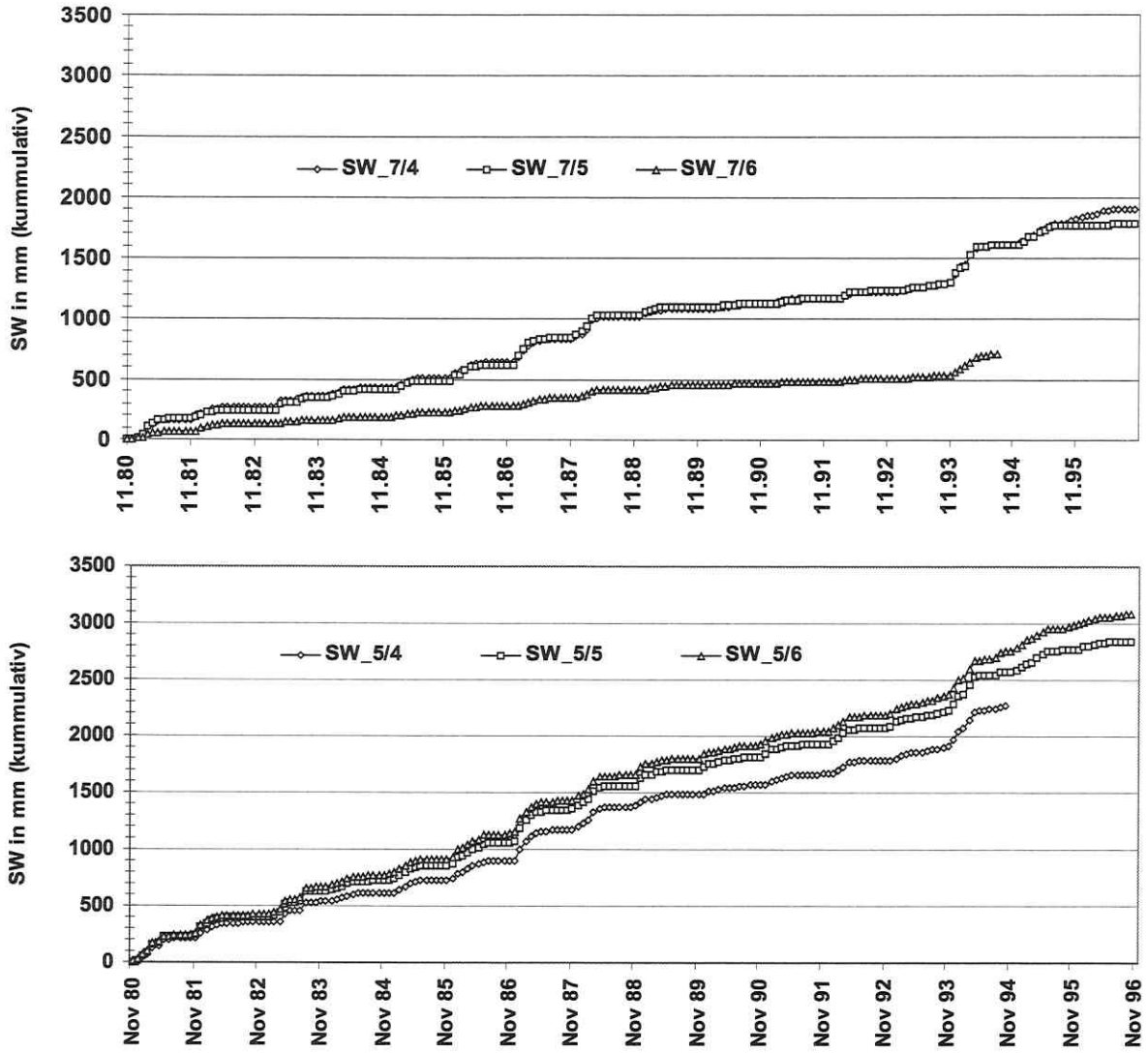


Abbildung 5: Summenkurven der Sickerwasserbildung für den Zeitraum November 1980 bis November 1996 (mm, kumulativ)

4.5 Ausgewählte Kennahlen des Stickstoffhaushaltes

Auf der Grundlage von N-Eintrag (nasse Deposition + mineralische Düngung) und N-Entzug über die Pflanzen werden in Tab. 7 für die Fruchtfolge im Zeitraum von 1980-92 mittlere N-Salden für die beiden Böden zusammengestellt. Meßergebnisse zur Nettomineralisation bzw. Immobilisierung konnten nicht berücksichtigt werden, da keine Untersuchungen zur Veränderung der organischen Substanz (Humusgehalt) vorliegen.

Tabelle 7: Mittlere N-Salden (N-Eintrag - N-Entzug über die Pflanzen) im Vergleich zu den mittleren N-Frachten (N-Austrägen) mit Sickerwasser in [kg/ha/Jahr]

Lysimeter-gruppe	**Bodentyp**	Jahre 1980-92 N-Fracht [kg/ha*Jahr]	Jahre 1980-92 N-Saldo [kg/ha*Jahr]
5	Erodierte Braunerde	50	70
7	Braunerde-Pseudogley	18	26

Von den N-Überhängen (N-Salden) und der nicht bekannten Nettomineralisation von Stickstoff aus dem Bodenvorrat der Jahre 1981-92 wurden aus der weniger ertragreichen Erodierten Braunerde 71 % (50 kg/ha*Jahr) mit dem Sickerwasser ausgetragen. Der fruchtbarere, mit einer höheren Wasserkapazität über das gesamte Profil versehene Braunerde-Pseudogley dagegen zeigt niedrige N-Frachten (18 kg/ha*Jahr) bei insgesamt niedrigeren N-Salden. Mit einem Anteil des N-Austrages von 69% am N-Saldo liegen beide Böden jedoch nahezu auf gleichem Niveau.

Die niedrigeren Werte der N-Fracht auf dem Braunerde-Pseudogley werden neben höheren N-Entzügen (=hohes Ertragspotential) auch als Folge von verstärkt in dieser Bodenform auftretenden anaeroben Zonen angesehen. Die daraus resultierenden Denitrifikationsverluste sind nach RUSSOW ET AL. 1999 nicht zu vernachlässigen.

Für die untersuchte Fruchtfolge der Jahre 1981-92 (Phase des intensiven Landbaues) besteht bei allen Böden ein enger Zusammenhang zwischen Höhe der Verdunstung, mittleren Erträgen und dem mittleren Stickstoff-Saldo. Die N-Zufuhr (Düngung + nasse Deposition) von durchschnittlich 172 kg/ha*Jahr mineralischem Stickstoff wurde erwartungsgemäß in Abhängigkeit vom Ertragsniveau der einzelnen Böden recht unterschiedlich verwertet. Auf dem Standort mit dem leichten Sandboden (Lys.Gr.5) wird nur 60% der mineralischen Stickstoff-Einträge über den N-Entzug der Pflanzen genutzt (KNAPPE ET AL 1994; KNAPPE UND KEESE 1997 a und b). Auf den ertragreicheren, höhere nutzbare Feldkapzitäten aufweisenden Böden der Lys,Gr.7 erhöht sich die N-Ausnutzung auf 84%.

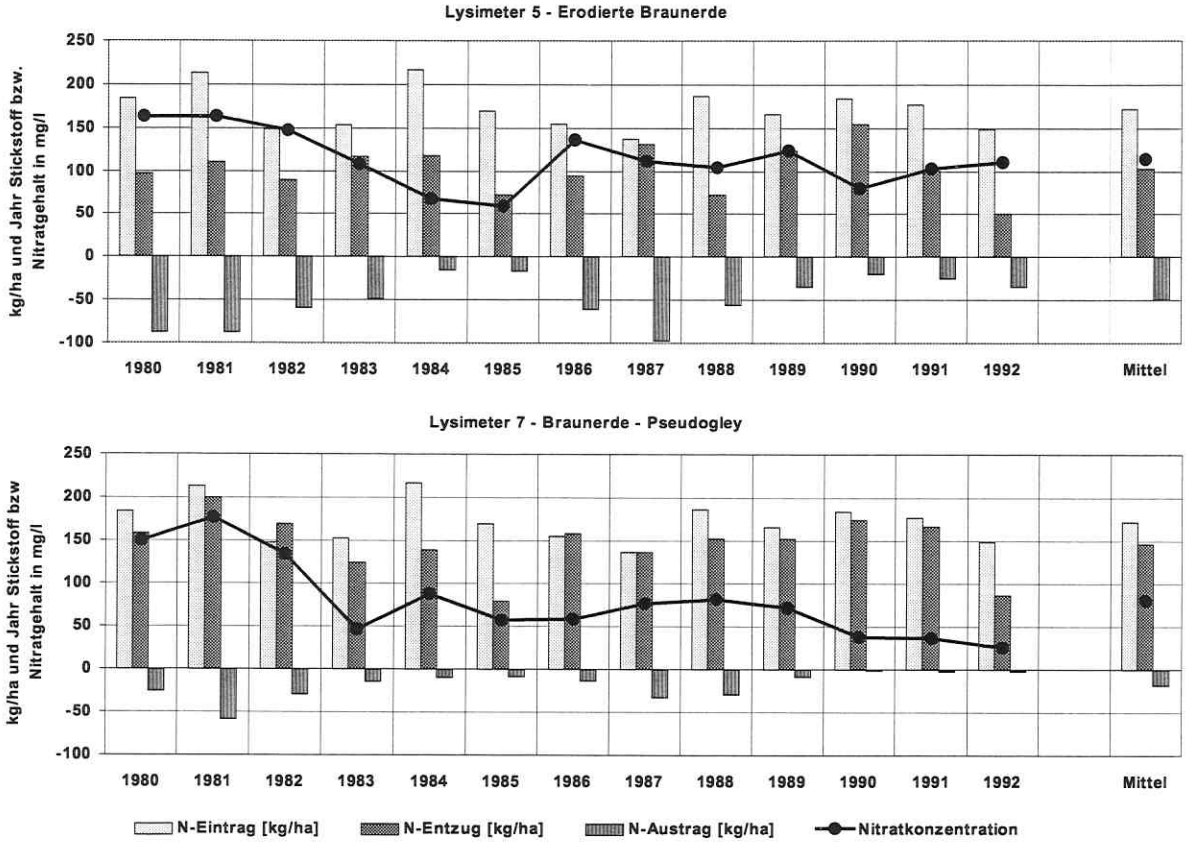


Abbildung 6: N-Eintrag über Düngung und nasse Deposition, N-Entzug durch die Pflanze, N-Austrag durch Sickerwasser und Nitratgehalt im Sickerwasser als Monatsmittel bzw. Monatssummen der Lysimetergruppe 5 und 7

Dabei besteht (Abb.6) kein eindeutiger kurzzeitiger Zusammenhang zwischen jährlichem Stickstoff-Saldo (Differenz zwischen N-Eintrag und N-Entzug) und Höhe der Stickstoff-Austräge über das Sickerwasser und dem Nitratgehalt im Sickerwasser im Folgejahr (HAFERKORN UND KNAPPE 1998). In Abhängigkeit von den entsprechenden Bodeneigenschaften wirken vor allem Immobilisierung und Mineralisation als auch Denitrifikation in unterschiedlichen Anteilen. Die Austauschhäufigkeit des Bodenwassers bestimmt, wie lange das Nitrat in der verdunstungsbeeinflußten Zone diesen Prozessen unterliegt. Die Höhe der jährlichen Bodenwasserausschöpfung und der Zeitpunkt der Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers beeinflussen in ihrer Wechselwirkung mit dem Pflanzenwachstum darüber hinaus, ob in der durchwurzelten Zone verbliebener Stickstoff ausgewaschen oder im Folgejahr durch die Pflanzen noch genutzt, und damit nicht ausgewaschen wird (HAFERKORN UND KNAPPE 1999).

5 Literatur

CEPUDER, P., DREYHAUPT, J., FANK, J., FEICHTINGER, F., FRANKO, U., HABERLANDT, U., KERSEBAUM, K.C., KRYSANOVA, V. UND U. STEINHARDT (2001): Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes. Teil II: Modellanwendungen- Konzepte und Simulationsergebnisse. In: Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes. UFZ- Bericht Nr. 17. Leipzig.

EISSMANN, L. (1970): Geologie des Bezirkes Leipzig, Eine Übersicht. Natura regionis Lipsiensis. Naturwissenschaftliches Museum Leipzig. Heft 1.

Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern. DVWK-Regeln zur Wasserwirtschaft 114 (1980) Verlag P.Parey, Hamburg und Berlin.

GLUGLA, G. UND B. KÖNIG (1989): Der mikrorechnergestützte Arbeitsplatz Grundwasserdargebot. Wasserwirtschaft-Wassertechnik 39 Heft 8.

HAFERKORN, U. UND S. KNAPPE (1998): Austrag von Wasser und gelösten Inhaltsstoffen aus natürlich gelagerten Böden in Lysimetern in Abhängigkeit vom Grad der Wassersättigung des Bodens. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch. 88, 367-370.

HAFERKORN, U. UND S. KNAPPE (1999): Höhe und Beschaffenheit der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit vom Bodenwasserspeicher und der Bewirtschaftung. Bericht über die 8. Lysimetertagung. Stoffflüsse und ihre regionale Bedeutung für die Landwirtschaft. BAL Gumpenstein, 149-150.

HAFERKORN, U. (2000): Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes – Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Dissertation. Universität Göttingen.

JANKIEWICZ, P. (1998): Erläuterung der an Lysimeterdaten durchzuführenden Korrekturen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, AS Berlin. unveröff. Bericht.

KEESE, U. UND S. KNAPPE (1986): Problemstellung und allgemeine Angaben zu vergleichenden Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. Arch. Acker-Pfl. Boden, 40, 409-429.

KEESE, U., NITSCHE, C., KNAPPE, S. UND U. WALDSCHMIDT (1997): Vergleichende bodenphysikalische Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. I. Mitteilung: Ermittlung bodenphysikalischer Kenngrößen. Arch. Acker-Pfl. Boden, 41, 209-231.

KNAPPE, S., MORITZ, CH. UND U. KEESE (1994): Grundwasserneubildung und N-Austrag über Sickerwasser bei intensiver Landnutzung – Lysimeteruntersuchungen an acht Bodenformen in der Anlage Brandis. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkd. 38, 393-403.

KNAPPE, S. UND U. KEESE (1996): Untersuchungen zu ausgewählten chemischen Eigenschaften langjährig landwirtschaftlich genutzter Böden von Lysimetern im Vergleich zu Profilen auf deren Herkunftsflächen. Arch. Acker-Pfl. Boden, 40, 431-451.

KNAPPE, S. UND U. KEESE (1997): Lysimeteruntersuchungen zur Wirkung von Flächenstillegungsmaßnahmen auf den Stickstoff- und den Wasserhaushalt von vier Bodenformen. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch. 85, 937-940.

KNAPPE, S. UND U. KEESE (1997): Untersuchungen zum Einfluß von N-Bilanzen auf den N-Austrag und den Nitratgehalt im Sickerwasser bei ackerbaulicher Nutzung und Flächenstillegung - Lysimeteruntersuchungen an vier Bodenformen. VDLUFA-Schriftenreihe 46, Kongreßband Leipzig, 587-590.

LÜTZKE, R. (1965): Über die Tauglichkeit der Lysimetermethode für Wasserhaushaltsuntersuchungen und Vergleichsmessungen mit Groß- und Kleinlysimetern. Bes. Mitt. z. Gewässerkdl. Jahrb. der DDR,4.

MEYNEN, E. UND J. SCHMITHÜSEN , J.: Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. (1953-1962). Bundesanstalt für Landeskunde und Raumforschung, Selbstverlag - Bad Godesberg.

MORITZ, CH., SÄMISCH, G. UND R. SPENGLER (1991): Die Basislysimeterstation Brandis bei Leipzig —Einrichtung und erste Untersuchungsergebnisse. Deutsche. Gewässerkundliche Mitteilungen 35, 149-160.

PESTER, L. (1978): Idealprofile für geotechnische Arbeiten in der Braunkohlenindustrie. Neue Bergbautechnik 8, Heft 6.

RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Bericht des Deutschen Wetterdienstes, Nr. 194.

RUSSOW, R, KNAPPE, S. UND U. HAFERKORN (1999): Vergleichende Untersuchung von N_2O-Gehalt in der Bodenluft und N_2O-Transport mit dem Sickerwasser an landwirtschaftlich genutzten Böden in Lysimetern. Mitt. Deutsche Bodenkundl. Gesellsch. 91/92.

Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (LFUG), Ingenieurbüro für Grundwasser (IBGW) Leipzig GmbH (1994): Hydrogeologisches Modell für den Raum des Parthegebietes (PART).

SPENGLER, R. (1973): Beiträge zur Ermittlung des Grundwasserneubildung und des Grundwasserdargebotes im Lockersteinsbereich, dargestellt am Parthegebiet. Diss. A Martin-Luther-Universität Halle.

SPENGLER, R. (1975): Beiträge zur Ermittlung des Grundwasserhaushaltes im Lockergesteinsbereich. Wiss. Zeitschr. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg 24, 65-76.

Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes

Teil II: Modellanwendungen – Konzepte und Simulationsergebnisse

Andreas Beblik, Peter Cepuder, Jens Dreyhaupt,
Johann Fank, Franz Feichtinger,Uwe Franko,
Uwe Haberlandt, Kurt Christian Kersebaum,
Valentina Krysanova,Uta Steinhardt

1. Einleitung

Simulationsmodelle sind im Bereich der Umweltwissenschaften ein wichtiges Arbeitsmittel, dienen sie doch neben dem Erkenntnisgewinn als Hilfe bei Entscheidungsfindungen. Zur Untersuchung der Stoffausträge aus dem Wurzelraum agrarisch genutzter Flächen wurden verschiedene Modelle entwickelt, die wichtige Umsatz- und Transportprozesse der ungesättigten Zone des Bodens beschreiben. Im Rahmen eines vom UFZ Leipzig - Halle organisierten Workhops zur Stickstoffmodellierung haben einige von diesen ihr Leistungspotential unter Beweis gestellt. Ziel war es, die Modelle hinsichtlich der Simulationsergebnisse wichtiger Größen des Wasser- und Stoffhaushalts zu vergleichen. Dazu wurden Datensätze zur Bodenbeschreibung und Landnutzung sowie umfangreiche Meßreihen wichtiger Größen des Wasser- und Stoffhaushalts von der Lysimeterstation Brandis zur Verfügung gestellt. Die erforderlichen Wetterdaten konnten von der Klimastation Brandis bereitgestellt werden, siehe dazu HAFERKORN UND KNAPPE 2001.

In diesem Beitrag wird der erreichte Entwicklungsstand der beteiligten Modelle vorgestellt sowie Material und Methodik zur Durchführung der Simulationsrechnungen erläutert. Abschließend erfolgt eine Darstellung von Kennzahlen zum Modellvergleich und eine Diskussion der Ergebnisse.

2. Entwicklungsstand der Modelle

In Tabelle 1 sind die beteiligten Modelle und Ansprechpartner genannt.

Die Wasserhaushalts- und Stickstoffumsatzprozesse werden von den Modellen zum Teil auf unterschiedliche Art beschrieben. In den Tabellen 2 bis 8 sind wesentliche Eigenschaften der Modelle zusammengefaßt. Im Anschluß erfolgt eine kurze Charakterisierung jedes Modells.

Tabelle1: Modelle und Ansprechpartner

Modell	Ansprechpartner
CANDY	U. Franko, UFZ Leipzig - Halle GmbH
EPIC	P. Cepuder, Universität f. Bodenkultur Wien
MINERVA	A. Beblik, BTU Cottbus
HERMES	K.-C. Kersebaum, ZALF Müncheberg
STOTRASIM	F. Feichtinger, BAW Petzenkirchen, J. Fank JOANNEUM Wien
SWIM	V. Krysanova, A. Becker, PIK Potsdam

Tabelle 2: Prozesse des Wasserhaushalts

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
		Wasserhaushalt			
* Versickerung von Bodenwasser * Interzeption von Niederschlags-Wasser * Schneeakkumu-Lation und Tauen * potentielle Evapo-Transpiration * Einfluss Pflanzen-Bestand * aktuelle Evapo-Transpiration	* Versickerung von Bodenwasser * Schneeakkumu-lation und Tauen * potentielle Evapo-Transpiration * aktuelle Evapo-Transpiration	* Bodenwasserflüsse Sickerung/ kapil-larer Aufstieg * potentielle Evapo-transpiration *aktuelle Evapotrans-piration abhängig von Kulturart, BFI, Wurzelverteilung und Wasserverfüg-barkeit	* Versickerung von Bodenwasser * Niederschlag * Schneedeckenak-kumulation und Tauen * potentielle Evapo-Transpiration * aktuelle Evapo-Transpiration * Einfluss d. Grenz-flurabstandes auf versickerungs-wirksames Poren-volumen * Kapillaraufstieg	* Transpiration * Interzeption * Evaporation vom Boden * Wasserbilanz in den einzelnen Bodenschichten (Wurzelentzug, ver-tikaler Zu- und Ab-fluss, Änderung des Wassergehaltes) * Sickerwasserbil-dung bzw. kapillarer Grundwasserauf-stieg an Profiluntergrenze * Schneeakkumula-tion und -ablation	* Schneeakkumula-tion und -schmelze * Potentielle Evapo-transpiration * Pflanzentranspirati-on und Evaporation * Oberflächenabfluß * Versickerung zwi-schen den Boden-schichten * Interflow * Versickerung ins Grundwasser * Grundwasserabfluß * Gesamtabfluß im Fließgewässer

Tabelle 3: Prozesse des Stickstoffhaushalts

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
Stickstoffum satz					
* Mineralisierung * Gasförmige Verluste * Nitrifizierung * Einwaschung * Verlagerung und Auswaschung * NH_4-Verlust	* Mineralisierung * Immobilisierung * Gasförmige Verluste * Nitrifizierung * Verlagerung und Auswaschung * NH_4-Verlust	* Mineralisierung * Denitrifikation * NH_4-Verlust * N-Deposition * Verlagerung und Auswaschung	* Netto-Mineralisierung * Nitrifizierung * Denitrifikation * NH_4-Verlust * Harnstoff-Hydrolyse * Immobilisierung * Verlagerung (getrennt für NO_3-N und NH_4-N) * Auswaschung aus der Wurzelzone	* Mineralisierung * Nitrifizierung * Immobilisation * Denitrifikation * N-Aufnahme der Pflanzen: Entzug aus Bodenlösung und Bindung von Luftstickstoff * Eintrag an der Bodenoberfläche * Verlagerung und Auswaschung * NH_4-Verlust	* Eintrag mit dem Niederschlag * Mineralisierung durch Humus * Mineralisierung aus frischer organischer Substanz * Pflanzenaufnahme * Denitrifikation * Nitratverlust durch Oberflächenabfluß * Nitratauswaschung * Stickstoffverlust durch Erosion

Tabelle 4: Prozesse des Pflanzenwachstums

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
Pflanzenwachs tum					
* N-Entzug durch Pflanze * Wurzeltiefe * Bestandeshöhe * Ernteertrag: Frisch-masse, Trocken-masse	* N-Entzug durch Pflanze * Wurzeltiefe * Bestandeshöhe * Erntertrag * Biomasse	* Trockenmasse-bildung (Photo-synth/Respiration) * Phänologische Ent-wicklung * Partitionierung TM * Durchwurzelungs-verteilung * Wasser- und N-Stress * N-Entzug durch Pflanze	* N-Entzug durch Pflanze * Nettoprimärproduk-tion * organspezif. TM und N-Konzentra-tionen (Erträge) * Respiration * dynamisches Wur-zeldichteprofil * frostbedingter Blattabfall * Re-Mineralisation von Pflanzenmasse während Wachstum * Wurzelexudate	* Pflanzenent-wicklung * Assimilation * Aufteilung der Trok-masse in Blätter, Pflanzenkörper, Wurzeln und Blatt-fläche * Pflanzenhöhe * Wurzeltiefe * Tiefenverteilung der Wurzelmasse * Ernteertrag	* Gesamtbiomasse * Wurzelanteil von Biomasse * Wurzeltiefe * N-Entzug durch Pflanze * Wasser, Tempera-tur, N- und P- Stressfaktoren für Wachstum * Erntertrag * Pflanzenrück-stände

Tabelle 5: Modelleingangsdaten: Klima

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
		Eingangsdaten	***Klima***		
Tageswerte für * Lufttemperatur in 2 m Höhe * Niederschlag * Sonnenschein-dauer oder Global-strahlung	Tageswerte für * min. u. max. Lufttemperatur in 2 m Höhe * Niederschlag * Globalstrahlung * rel. Luftfeuchtigkeit * Windgeschwindig-keit	Tageswerte für * Lufttemperatur in 2 m Höhe * Niederschlag * Sonnenschein-dauer oder Global-strahlung * Wassersättigungs-defizit 14 Uhr	Tageswerte für * Lufttemperatur in 2 m Höhe * Niederschlag 2 m über Grund * Sonnenschein-dauer oder Global-strahlung * HAUDE-Verdun-stung * Ergänzend: Minimumtemperatur	Tageswerte für * Lufttemperatur (Tmax,Tmin,T07, T14,T21) * Luftfeuchte (F07,F14,F21) * Windgeschwindig-keit in 2 m Höhe * Niederschlag * Globalstrahlung Bei grundwasser beeinflussten Stand-orten: täglicher GW-Flurabstand	Tageswerte: * tiefste und höchste Lufttemperatur und Mittelwert * Niederschlag * Globalstrahlung Monatswerte: * Niederschlagsinten-sität: Zehnjahres-frequenz von halb-stündigem Regen * Niederschlagsinten-sität: Zehnjahres-frequenz von sechs-stündigem Regen

Tabelle 6: Modelleingangsdaten: Pflanze

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
		Eingangsdaten	***Pflanze***		
* Pflanzenart * Aussattermin * Pflanzenaufgang * Erntetermin * angestrebter Gesamtentzug * max. Durchwurzelungstiefe * Zwischenernten: Datum und Menge	* Pflanzenart * Aussattermin * Erntetermin * max. Durchwurzelungstiefe * LAI	* Pflanzenart * Aussaattermin * Ernte bzw. Schnitttermine	* Pflanzenart * Aufgangs- und Erntedatum * Erntemenge * Zwischenernten: Datum und Menge	* Lichtabschwächungskoeffizient * Blattflächengewicht *Max Pflanzenhöhe *Min. Stomatawiderstand * Maximale. Assimilationsleistung * Code für Wurzeltyp * Temperatursumme für Abreife * Blattflächenindex bei Entwicklungsstadium 0.4 * Max. Wurzeltiefe	* Verhältnis Biomasse - Energie * Ernteindex * Temperaturkennw. f. Wachstumsphas. * Max. des pot. LAI * Anteil der Wachsphase mit abnehmender Blattfläche * Stickstoff:normaler Anteil zum Zeitpkt. der Emergenz, Halbreife und Reife Anteil am Ertrag * Max. Wurzeltiefe

Tabelle 7: Modelleingangsdaten: Bewirtschaftung

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
		Eingangsdaten	***Bewirtschaf tung***		
* Pflanzenart * Aufgangs- und Erntedatum * Zwischenernten: Datum und Menge * Datum u. Tiefe der mech. Bodenbearb. * Beregnungsmenge und -zeitpunkt * min. Düngung und Düngetermine * Menge und Art organischer Dünger * Zusammensetzung der org. Düngung (C/N-Verhältnis) * Düngetermine	* Pflanzenart * Aufgangs- und Erntedatum * Datum u. Tiefe der mech. Bodenbearb. * Beregnungsmenge und -zeitpunkt * min. Düngung * org. Düngung * Zusammensetzung der Dünger * Düngetermine	* Pflanzenart * Aufgangs- und Erntedatum * Datum u. Tiefe der mech. Bodenbearb. * Beregnungsmenge und -zeitpunkt * min. Düngung und Düngetermine * Menge, Art und Termin organischer Dünger * Verbleib Ernterück-stände	* Pflanzenart * Aufgangs- und Erntedatum * Erntemenge * Zwischenernten: Datum und Menge * Abfuhr von Nicht-erntegut:Ja / Nein * Termin und Tiefe der Einarbeitung von Nichterntegut * Beregnung: Termin und Menge * min. Düngung und Düngetermine * Menge, Art und Termin organischer Dünger * Datum u. Tiefe der mech. Bodenbearb.	* Pflanzenart * Anbaudatum * Erntedatum * Abfuhr von Nicht-erntegut:Ja / Nein * Bodenbearbeitung: Zeitpunkt und Tiefe * Beregnung: Datum Menge, NO3-N Konzentr. * Mineraldüngung: Datum, Menge, Art * Organ. Dünger: Datum und Menge * Trockenmasse(TM) C/N der TM, NO3-N und NH4-N der TM	* Pflanzenart * Pflanzdatum * Erntedatum * Min. Düngung: Menge u. Zeitpkt. * Org. Düngung: Menge u. Zeitpkt. * Bewässerung: Dauer und Menge

Tabelle 8: Modelleingangsdaten: Boden

CANDY	EPIC	HERMES	MINERVA	STOTRASIM	SWIM
		Eingangsdaten	***Boden***		
Für jede Bodenschicht: * Feldkapazität * Permanentwelke-punkt * Trockenrohdichte * Trockensubstanz-dichte * Feinanteilgehalt * Versickerungs-parameter nach GLUGLA	Für jede Bodenschicht: * Feldkapazität * Permanentwelke-punkt * Trockendichte * Feinanteil * Versickerungs-parameter	Für jede Bodenschicht: * Bodenart n. KA4 * Skelettanteil * Trockenrohdichte * Ct und Nt - Gehalt * Horizontierung * Grundwasserflur-abstand ggf. Amplitude * ggf. Staumerkmale	Für jede Bodenschicht: * Bodenart n. KA4 * Humus- oder Koh-lenstoffgehalt * ggf. Lagerungs-dichte * ggf. Grenzflur-abstand * geographische Breite	Für jede Bodenschicht: * Bodenkennwerte (pF-, Ku-, PE-Kurve) aus Messungen er-arbeitet oder aus Datensammlung entsprechend der Profilbeschreibung des Standortes an-gesetzt * Diffusions-/Disper-sionskoeffizient * Humusgehalt (OM) * C/N-Humus	Für jede Bodenschicht: * Schichttiefe * Ton, Schluff, Sand * Lagerungsdichte * Porosität * Nutzb. Feldkapazität * Feldkapazität * Gehalt an org. Kohlen-stoff und Stickstoff * Gesättigte hydrau-lische Leitfähigkeit * Bodenerosivität

CANDY:

Das Modell CANDY (CArbon and Nitrogen DYnamics) ist eindimensional und betrachtet den Bodenabschnitt von der Erdoberfläche bis zu einer Tiefe von 2 m gedanklich aufgeteilt in 20 homogene Bodenschichten von je 10 cm Dicke. Rechnungen für tiefere Schichten sind ebenfalls möglich (CANDY IV Anwenderdokumentation 1997, FRANKO ET AL. 1995 a und 1995 b). CANDY arbeitet in Tagesschritten und beschreibt die Dynamik von Kohlenstoff und Stickstoff sowie die Bodenfeuchte und Bodentemperatur. Lateralfluß und Grundwasseranbindung sind nicht realisiert (KARTSCHALL 1986, KOITZSCH UND GÜNTHER 1990).

Wichtige Anwendungen des Modells CANDY:

-Parzellen des Versuchsstandorts Bad Lauchstädt (FRANKO ET AL. 1995 a),

-Berechnung der Humusdynamik der weltweit wichtigsten Dauerversuche (FRANKO 1997),

-Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Stickstoff für 2 Standorte in Norddeutschland (FRANKO ET AL. 1995 b),

-Kerngebiet der Querfurter Platte (FRANKO ET AL. 1995 a, FRANKO ET AL. 1997),

-Lysimeterversuche in Brandis (RAMSBECK 1998).

EPIC:

EPIC besteht aus einer Anzahl von Teilmodellen, die sich auf folgende Hauptaspekte beziehen: Hydrologie, Wetter, Erosion, Nährstoffe, Pflanzenwachstum, Bodentemperatur, Bearbeitung, Kontrolle der wachstumsbestimmenden Faktoren am Pflanzenstandort und Wirtschaftlichkeit. Es werden Phosphor- und Stickstoffkreislauf simuliert. Das Modell für die N-Mineralisierung basiert auf dem PAPRAN Mineralisierungsmodell. Es berücksichtigt zwei Quellen der Mineralisierung: Den frischen organischen Stickstoff, vorhanden in Pflanzenrückständen und mikrobieller Biomasse und den organischen Stickstoff des Bodenhumus.

Die Stickstoffaufnahme der Pflanze wird durch die Verwendung eines Näherungsverfahrens über Angebot und Nachfrage ermittelt. Dabei spielt die optimale Stickstoffkonzentration in der Pflanze, welche mit fortschreitendem Wachstum sinkt, eine bedeutende Rolle.

Der für die Bearbeitungsmaßnahmen zuständige Teil des Rechenmodells simuliert unter anderem die Dichteänderungen und die damit verbundenen veränderten Bodeneigenschaften, hervorgerufen durch das Einarbeiten von Nährstoffen und Pflanzenrückständen innerhalb der Pflugtiefe.

Weitere Einzelheiten und wichtige Anwendungen des Modells sind der Literatur zu entnehmen: JONES UND O'TOOLE 1987, JONES ET AL. 1989, WILLIAMS 1985, WILLIAMS ET AL. 1994.

HERMES:

Das Modell HERMES ist eindimensional und betrachtet den Bodenabschnitt von der Erdoberfläche bis zu einer Tiefe von 4,2 m aufgeteilt in homogene Bodenschichten von je 10 cm Dikke (KERSEBAUM 1995). Der Standardzeitschritt beträgt 1 Tag, bei sehr leichten Böden 0.5 Tag. Beschrieben wird der Wasserhaushalt, die Netto-Mineralisation von organisch gebundenem Stickstoff, der Transport von Nitrat mit dem Bodenwasser, Denitrifikation sowie Pflanzenwachstum und N-Aufnahme durch Pflanzen. NH_4-Verluste werden durch einen einfachen empirischen Ansatz abgeschätzt. Der dynamische Wachstumsansatz für Pflanzen kann durch eine logistische N-Aufnahmefunktion und eine Ertragsschätzfunktion ersetzt werden, um das zu behandelnde Kulturartenspektrum zu erweitern, z. B. bei regionalen Anwendungen.

Der kapillare Aufstieg aus dem Grundwasser wird entsprechend den Angaben der Bodenkundlichen Kartieranleitung (4. Auflage) in Abhängigkeit von Bodenart und Abstand zum Grundwasser als steady state Fluß bis zur tiefsten Bodenschicht, die 70% nFK unterschreitet ermittelt. Lateralfluß wird nicht realisiert.

Wichtige Anwendungen des Modells HERMES:

- -Wasser- und N-Dynamik, Pflanzenwachstum für 73 Standorte in Norddeutschland (KERSEBAUM 1989),
- -Wasser- und N-Dynamik, Pflanzenwachstum für 2 Standorte in Norddeutschland (KERSEBAUM 1995),
- -Wasser- und N-Dynamik, Pflanzenwachstum unter Berücksichtigung der schlaginternen Variabilität in Lüttewitz/Sachsen (KERSEBAUM ET AL. 1999),
- -GIS gestützte N-Auswaschungssimulation für eine 7 jährige landwirtschaftliche Bodennutzung und Nutzungsszenarien in einem Trinkwassergewinnungsgebiet in Norddeutschland (KERSEBAUM 2000),
- -Simulation des Nitrataustrags für die Gemeinden Brandenburgs bei derzeitiger Nutzung sowie nach Umstellung auf ökologischen Landbau (KERSEBAUM 1999),
- -Regionale Simulation des Nitrataustrags bei unterschiedlicher Datenaggregation für 3 Gemeinden Nordostdeutschlands (KERSEBAUM UND WENKEL 1998),

MINERVA:

Das Modell beschreibt die vertikalen Flüsse am Standort (BEBLIK ET AL. 1997, BEBLIK UND GRÜNEWALD 1998). Im Falle definierter Nachbarschaftsverhältnisse erfolgt am Hang bzw. im Einzugsgebiet die laterale Kopplung dieser Modellsäulen in der mesoskaligen Modellvariante *MesoN*. Die Konstellation der Teilmodelle kann entsprechend der Datenlage und in Abhängigkeit des betrachteten Ökosystems konfiguriert werden, so dass verschiedene Prozessketten auch mit unterschiedlichen Lösungsansätzen möglich sind. Angetrieben durch tagesgenaue Witterungsdaten und Bewirtschaftungsangaben erfolgt die Simulation des Wasserhaushalts, der Stickstoffdynamik und des Pflanzenwachstums für konkrete Standortbedingungen bzw. Leitprofile. Als Ergebnisse stehen Tageswerte verschiedener Modellzustandsvariablen zur Verfügung, die ggf. zeitlich und/oder räumlich aggregiert werden können. Bei Verwendung prognostischer Wetterszenarios kann das Modell zur Vorausberechnung des Stickstoffbedarfs (Düngeprognose) eingesetzt werden.

Wichtige Anwendungen des Modell MINERVA:

-Praxisflächen in niedersächsischen Wasserschutzgebieten,

-Versuchsflächen der Landwirtschaftskammer Hannover (Niedersachsen),

-Musterbetriebe der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein,

-Festgesteinsbereich des oberen Elbe-Einzugsgebiet (Mittleres Erzgebirge),

-chinesische Lößhügellandschaft.

Weitere Anwendungen sind der Literatur zu entnehmen: (RICHTER ET AL. 1998, KERSEBAUM UND BEBLIK 2001, RICHTER UND BEBLIK 1996):

STOTRASIM und **SIMWASER**:

Das Modell STOTRASIM (*STO*ff*TRA*nsport auf Basis *SIM*WASER) beschreibt vertikal eindimensional die Stickstoff- und partiell die Kohlenstoffdynamik eines landwirtschaftlich genutzten Bodens auf Tagesbasis. Neben Stickstoffeinträgen (Atmosphäre, Düngemittel, Bindung von Luftstickstoff durch Leguminosen) werden Pflanzenentzug, Ammoniumausgasung, Mineralisation, Nitrifikation, Immobilisation und Denitrifikation berücksichtigt (FEICHTINGER 1998 a). Das Hauptaugenmerk wird auf die Nitratauswaschung in den Untergrund gelegt, die untrennbar an die Grundwasserneubildung gebunden ist. Die dazu benötigte Simulation des Bodenwasserhaushaltes erfolgt mit SIMWASER (STEINITZER 1988).

Wichtige Anwendungen von STOTRASIM:

-Standörtliche Bewirtschaftungsanalysen hinsichtlich Nitrataustrag (FEICHTINGER

1998 b),

-N-Belastung aus der Landnutzung für Grundwassergebiete (FANK 1999),

-projektbezogene Grund- bzw. Trinkwasserobsorge (FEICHTINGER 1998 c).

Mit dem Modell SIMWASER (*SIM*ulation des *WAS*erhaushaltes und des Pflanzen*ER*trages eines Standortes) wird der Zusammenhang zwischen dem Bodenwasserhaushalt und dem Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von Klima-, Pflanzen- und Bodenfaktoren simuliert (STEINITZER 1988, STENITZER & MÜLLER 1996, STEINITZER 2000). Die tägliche Bilanz zwischen Niederschlag, Evaporation von der Bodenoberfläche und Transpiration durch die Blätter ergibt die Randbedingung für die Wasserbewegung an der Profilobergrenze bzw. für den Wasserentzug durch die Wurzeln in den einzelnen jeweils durchwurzelten Bodenschichten. Die Randbedingungen an der Untergrenze des betrachteten Profils werden von den Grundwasserverhältnissen bestimmt: Bei grundwasserbeeinflussten Standorten werden die Berechnungen über das gesamte Bodenprofil bis zur Grundwasseroberfläche durchgeführt, während bei einem grundwasserfernen Standort die letzte Schicht des Bodenmodells in einer Tiefe angesetzt wird, in welcher kein Einfluss des Wurzelentzuges zu erwarten ist. Mit SIMWASER können grundsätzlich beliebige Fruchtfolgen über einen beliebig langen Zeitraum hindurch simuliert werden.

Wichtige Anwendungen des Modells SIMWASER:

-Wasserhaushaltsuntersuchungen im Gelände (STEINITZER 1997),

-Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Fruchtfolgen auf die Grundwasserneu bildung (STEINITZER 1998),

-Abschätzung der Auswirkung von Grundwasserabsenkungen auf den Pflanzenertrag (STEINITZER 1999),

-Bereitsstellung des flächenhaften Ganges der Grundwasserneubildung für Grundwassermodelle (STEINITZER ET AL. 1998).

SWIM

Das Modell SWIM (Integriertes Boden- und Wasser-Modell) ist ein zeitlich kontinuierliches, räumlich verteiltes Flußeinzugsgebietsmodell, welches Hydrologie, Vegetation, Erosion und Nährstoffe (Stickstoff N und Phosphor P) simuliert. Das Modell kann auf Flußeinzugsgebiete mit einer Fläche von 100 bis 10000 km^2 angewendet werden, oder -nach Validierung in reprä-

sentativen Teileinzugsgebieten- auf Regionen in dieser Größenordnung. SWIM wurde im Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung auf der Basis zweier anderer Modelle entwickelt: SWAT und MATSALU. Das Modell wird ausführlich in KRYSANOVA ET AL 1998 beschrieben.

Wichtige Anwendungen des Modells SWIM

-Buckener Au/ Innien (Niedersachsen) (KRYSANOVA ET AL. 1998),

-Dahme/ Märkisch Buchholz (Brandenburg) (KRYSANOVA ET AL. 1998),

-Stepenitz/Wolfshagen (Brandenburg) (KRYSANOVA UND BECKER 1999)

-Weiße Elster/ Zeitz (Sachsen-Anhalt) (KRYSANOVA ET AL 1998),

-Regionalstudie Feldfruchtwachstum (Brandenburg) (KRYSANOVA ET AL. 1999),

-Glonn/ Hohenkammer (Bayern) (KRYSANOVA ET AL. 2000).

3. Material und Methoden

3.1 Datenbasis der Modellrechnungen

Als Grundlage für die Simulationen wurden folgende Daten bereitgestellt:

- Angaben zur realen Bewirtschaftung der Lysimeterstation Brandis von 1980 bis 1992 (Tabelle 2 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001),
- Horizontfolge sowie Angaben zur Feinbodentextur und Bodenphysik der Herkunftsflächen für die Bodenformen Sandlößtieflehm-Staugley und Gekappte Decksandlöß-Braunerde (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001) sowie Untersuchungsergebnisse des geschlachteten Lysimeters 7/6 (siehe KEESE ET AL. 1997),
- Wetterdaten für den Simulationszeitraum: Tageswerte für Niederschlag, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer und Globalstrahlung der Jahre 1980 bis 1992 von der Wetterstation Brandis.

Beide Bodenformen werden durch jeweils eine Lysimetergruppe repräsentiert, welche aus je drei einzelnen Lysimetern besteht, (vergleiche HAFERKORN UND KNAPPE 2001, Kapitel 2 und 3).

Zur Modellkalibrierung und -bewertung wurden für jedes einzelne Lysimeter der beiden Gruppen umfangreiche Meßreihen der Monatswerte von aktueller Evapotranspiration (AET), der Sickerwassermengen (GWB) und des Stickstoffaustrages (N-Austrag) zur Verfügung gestellt, siehe HAFERKORN UND KNAPPE 2001, Kapitel 4.

3.2 Ableitung modellspezifischer Inputdaten

Zum Durchführen der Simulationsrechnungen waren für jedes Modell neben den gegebenen Daten noch spezifische Inputgrößen herzuleiten, was im Folgenden beschrieben ist.

CANDY

Für die Horizonte der beiden Bodenprofile waren noch folgende Angaben erforderlich: Feldkapazität (FKAP), Permanentwelkepunkt (PWP), Feinanteilgehalt (FAT), Versickerungsparameter nach GLUGLA (LAMBDA), Trockensubstanzdichte (TSD), Richtwert für Nmin – Gehalt je dm Bodensäule und Änderung des Nmin - Gehaltes.

Diese Modellparameter wurden für die Lysimetergruppe 5 und die Lysimeter 7/4 und 7/5 aus den Untersuchungsergebnissen der Textur (Tabelle 3 Teil I) abgeleitet, für das Lysimeter 7/6 wurden die Daten der Schlachtung verwendet (KEESE ET AL. 1997).

FKAP und PWP wurden mit der Bodenkundliche Kartieranleitung (4. Auflage 1994) hergeleitet. Dazu wurde die Bodenart wurde aus der Textur abgeleitet. Mit Tabelle 19 (Einstufung der Trockenrohdichte), Tabelle 10 (organische Substanz im Boden), Tabelle 56 (Feldkapazität und Nutzbare Feldkapazität in Abhängigkeit von Bodenart und Trockenrohdichte) und Tabelle 58 sowie der Formel auf Seite 295 zur Berücksichtigung des Skelettanteils der Horizonte) wurden FKAP und PWP bestimmt. FAT ist Summe aus Ton und Feinschluff (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001). Die Trockensubstanzdichte wurde aus Porenvolumen (PV) und Trockenrohdichte (TRD) mit PV=1-(TRD/TSD) bestimmt. Der Versickerungsparameter LAMBDA wurde aus dem Feinanteilgehalt geschätzt.

Für die Startwerte und Änderungsraten des Mineralstickstoffs (NIN0 und K_NIN) wurden die Werte von vergleichbaren Profilen aus der Datenbank verwendet.

Weiterhin waren die N-Immision für den Standort Brandis und das Niveau des reproduktionswirksamen Kohlenstoffs für beide Lysimetergruppen zu bestimmen. Für den Stickstoffeintrag aus der Luft wurde der Mittelwert der gemessenen Deposition für den Gesamtzeitraum (1980 bis 1992) verwendet: 41 kg N/ha pro Jahr. Das Niveau des reproduktionswirksamen Kohlenstoffs wurde anhand von vergleichbaren Profilen aus der Datenbank abgeleitet.

EPIC:

Für die Simulation waren für die Bodenhorizonte noch folgende modellspezifische Daten zu schätzen: Feldkapazität, Permanenter Welkepunkt, Trockenrohdichte.

Diese Daten wurden mit Schätzmethoden aus Textur, Skelettanteil und der organischen Substanz abgeleitet.

HERMES:

Für die HERMES-Simulationen wurden für die Bodenhorizonte folgende modellspezifische Parameter modellintern abgeleitet: Wassergehalt bei Feldkapazität, Wassergehalt bei Permanentwelkepunkt, Gesamtporenvolumen, potentiell mineralisierbarer Stickstoff in langsam mineralisierbarer Fraktion und potentiell mineralisierbarer Stickstoff in schnell mineralisierbarer Fraktion.

Die Modellparameter werden aus den Angaben der Textur und der organischen Substanz für die Lysimeter 5 und 7 (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001) abgeleitet. Grundlage für die Ableitung ist die Bodenkundliche Kartieranleitung (4. Ausgabe). Die Bodenart wurde aus der Textur abgeleitet Tab 26/27: mit Tabelle 18 (Einstufung der effektiven Lagerungsdichte), Tabelle 10 (organische Substanz im Boden), Tabelle 55 (Gesamtporenvolumen, Feldkapazität und nutzbare Feldkapazität in Abhängigkeit von Bodenart und effektiver Lagerungsdichte) und Tabelle 58 sowie der Formel auf Seite 295 zur Berücksichtigung des Skelettanteils der Horizonte.

Ferner ist eine Annahme über die Höhe und Anfangsverteilung der Wasser- und Nmin-Gehalte zu treffen. Diese Modellparameter wurden für die Lysimetergruppen 5 und 7 aus den Untersuchungsergebnissen der Textur (Tabelle 3 HAFERKORN UND KNAPPE 2001) abgeleitet, das geschlachtete Lysimeter wurde entsprechend mit den nach der Schlachtung ermittelten Bodendaten gerechnet.

Weiterhin waren die N-Immision für den Standort Brandis und das Niveau des reproduktionswirksamen Kohlenstoffs für beide Lysimetergruppen zu bestimmen. Für den Stickstoffeintrag aus der Luft wurde jeweils der Jahreswert der gemessenen Deposition verwendet und gleichmäßig über die Tage des Jahres verteilt. Für die Verdunstungsberechnung wird das Sättigungsdefizit der Luft um 14 Uhr der Station Leipzig-Schkeuditz verwendet (Grundlage HAUDE Formel). Die Höhe des potentiell mineralisierbaren Stickstoffs der langsamen Fraktion wird aus dem Humusgehalt des Bodens als feststehender Prozentsatz von Nt (13%) abgeleitet. Hinzu wird fruchtartspezifisch aus dem Ertrag der ersten Frucht die Menge an langsam und schnell mineralisierbarem Stickstoff aus Ernterückständen berechnet.

Das Modell ist nicht an den Datensätzen kalibriert worden. Lediglich für Zuckerrüben und Wintergerste wurde auf Grundlage der 1981 bzw. 1983 Daten die notwendige Vernalisationsdauer korrigiert, sowie bei Wintergerste die maximale C-Assimilation bei Lichtsättigung.

MINERVA:

Die Bodenprofile für die MINERVA-Simulationen wurden aus den Profilbeschreibungen der Lysimetergewinnung (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001) sowie für das Lysimeter 7_6 aus KEESE ET AL. 1997 (Lysimeterzerlegung) abgeleitet. Dazu dienten die Korngrößenanteile auf Basis der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 4) zur Einordnung in die Bodenarten. Sonstige Angaben (Humus-,Steingehalt, Lagerungsdichte, pH-Werte) wurden unklassifiziert als Meßwert übernommen. Anhand der Jahresniederschlagssummen (korrigierte Tageswerte) und der dokumentierten N-Immissionen wurde ein jährlicher Mittelwert der N-Konzentration im Niederschlag errechnet und jeweils zum 1. Januar als Randbedingung in der Ackerschlagkartei (Standortbeschreibung und Managementdaten) vermerkt. Für die Simulationen ‚Lysimetergruppe 7' wurden bei Zuckerrüben und Silomais die Assimilationsleistung angepaßt, bei Winterweizen und Kartoffeln darüber hinaus noch die Temperatursummen der generativen Phasen. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgte nachTURC/IVANOV auf Basis von Globalstrahlung und relativer Luftfeuchte. Anstelle von 4 oberirdischen Wasserspeichern wurde hier nur mit dem Aufbau und Abtauen der Schneedecke (nach KOITZSCH) gerechnet. Laterale Abflüsse und Grundwasserzehrung (Auensättigung) wurden nicht modelliert. Aufgrund des im Lysimeter liegenden Kiesbetts kann ein vom Grundwasserstand freier Versickerungsverlauf angenommen werden. Die Bodensäule wird eindimensional in 10 cm mächtige gleichabständige Kompartimente untergliedert. In der Tiefe von 290 cm (Ablaufhahn) wurde die Bilanzierungstiefe für Sickerwasser und Nitrataustrag festgelegt.

STOTRASIM und **SIMWASER:**

Für die SIMWASER-Simulation wurden für die Bodenhorizonte folgende modellspezifische Daten hergeleitet: Saugspannungs-Wassergehalts-Funktion („pF-Kurven"), ungesättigte Wasserleitfähigkeit als Funktion der Saugspannung („Ku-Kurven"), Penetrometerwiderstand als Funktion der Saugspannung („PE-Kurven").

Die Saugspannungs-Wassergehalts-Funktion wurde aus den Angaben über die Bodendaten von KEESE ET AL. 1997 abgeleitet. Für die Anschätzung der Ku-Kurve stand die gesättigte Wasserdurchlässigkeit zur Verfügung: Der für die Simulation erforderliche Verlauf der kapillaren Wasserleitfähigkeit wurde nach dem Verfahren von Millington & Quirk (BOUWER UND JACKSON 1974) vorgenommen. Der Verlauf der PE-Kurve wurde anhand von vergleichbaren Böden aus der Bodenkennwerte-Datensammlung des IKT angeschätzt.

Für die Modellberechnungen mit SIMWASER werden tägliche Wetterdaten benötigt, vergleiche Tabelle 3. Von dem zur Verfügung gestellten Datenmaterial konnten nur die Werte der Niederschläge und der Globalstrahlung sowie die Terminwerte der relativen Luftfeuchte direkt übernommen werden. Die erforderlichen Maximal- und Minimal-Temperaturen sowie die Terminwerte der Temperaturen wurden aus der zur Verfügung gestellten Tagesmitteltemperatur mit Relationen geschätzt, die anhand von vorliegenden Daten vergleichbarer Klimastationen ermittelt wurden. Für die fehlenden Windmessungen wurden in erster Näherung die Windverhältnisse von Greven herangezogen, die für den Simulationszeitraum aus Windmessungen der Station Potsdam ergänzt werden mußten.

Weitere wesentliche Eingabedaten stellen die sogenannten „Pflanzenkennwerte" dar. Diese wurden zunächst aufgrund von Literaturangaben angesetzt und anhand von Messwerten angepasst. Bei Pflanzen bzw. landwirtschaftlichen Kulturen, für welchen keine oder nur ungenügende Messwerte für eine Eichung vorliegen, wurden die Kennwerte vergleichbarer Pflanzenbestände herangezogen und im Zuge der Modellkalibrierung gegebenenfalls angepaßt. Für die STOTRASIM-Simulation waren für die Bodenhorizonte nachfolgende modellspezifische Daten herzuleiten bzw. anzunehmen: C/N-Verhältnis des Humus, Beiwerte zum Stickstofftransport infolge Diffusion/Dispersion, Startwerte zu Menge an NO_3, NH_4 und frischer organischer Substanz (FOM) und zum C/N-Verhältnis von FOM.

Das C/N-Verhältnis des Humus entspricht den Untersuchungsergebnissen von KNAPPE UND KEESE 1996.

Die in die Sofftransportgleichung eingehende scheinbare Diffusion und die dazu benötigten Beiwerte wurden nach einem Ansatz von DUYNISVELD 1983 beschrieben:

Die Startwerte für NO_3, NH_4, FOM und C/N von FOM wurden einerseits nach einem ersten Programmlauf auf ein für den Simulationszeitraum gültiges Mittelmaß angepaßt und haben andererseits als Größen mit deutlich zeitlichem Wandel durch mehrjährige „Vorlaufzeit" in der Simulation vor der Ergebnisbewertung eine „Stabilisierung" erfahren. Als atmosphärischer Stickstoffeintrag wurden über den gesamten Simulationszeitraum 41 kg N/ha und Jahr in Rechnung gestellt.

SWIM

Das Modell SWIM benötigt neben dem Mittelwert der Lufttemperatur noch die täglichen Maxima und Minima. Es wurden für die Modellrechnungen die Werte der Wetterstation Leipzig-West verwendet.

3.3 Simulation

Die Rechnungen wurden für den Zeitraum 1980 bis 1992 durchgeführt. Die Jahre 1980 bis 1986 waren zur Kalibrierung der Modelle vorgesehen, die Jahre 1987 bis 1992 für den Modellvergleich. Kalibrierung und Bewertung erfolgten auf Basis der Meßwerte von AET, GWB und N-Austrag. Für den Modellvergleich wurden die hydrologischen Jahre verwendet, d. h. der Zeitraum von November 1986 bis Oktober 1992.

Wegen der starken Unterschiede in der Textur des zerlegten Lysimeters 7/6 und der Herkunftsfläche (vergleiche HAFERKORN UND KNAPPE 2001, Abschnitt 3.2 und KEESE ET AL. 1997) wurden für die Lysimetergruppe 7 zwei separate Simulationsrechnungen durchgeführt: eine Rechnung auf Basis der Bodendaten der Herkunftsfläche (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001) mit Validierung am Mittelwert der Meßwerte der Lysimeter 7/4 und 7/5, eine weitere Simulation mit Validierung an den Meßwerten des Lysimeter 7/6, wobei Texturuntersuchungsergebisse des geschlachteten Lysimeters zugrunde lagen (KEESE ET AL. 1997).

Für die Lysimetergruppe 5 wurde eine Simulationsrechnung mit den Bodendaten der Herkunftsfläche (Tabelle 3 in HAFERKORN UND KNAPPE 2001) durchgeführt, die Modellvalidierung erfolgte am Mittelwert der Meßwerte der 3 einzelnen Lysimeter.

4. Ausgewählte Kennzahlen zum Konzeptvergleich

Der Modellvergleich erfolgt für jede der 3 Simulationen separat. Unter Verwendung der Rechenergebnisse der 72 Monate (November 1986 bis Oktober 1992) werden jeweils die Zustandsgrößen AET, GWB und N-Austrag bewertet.

Zur Beschreibung der Kennzahlen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

Meßwerte: $y_{obs,k}$, k=1, 2,... ,72, Simulationswerte: $y_{sim,k}$, k=1, 2,... ,72,

Summe der Meßwerte bis zum k-ten Monat: $Y_{obs,k} = \sum_{i=1}^{k} y_{obs,i}$, k=1, 2,... ,72 und

Summe der Simulationswerte bis zum k-ten Monat: $Y_{sim,k} = \sum_{i=1}^{k} y_{sim,i}$, k=1, 2,... ,72.

Für den Modellvergleich sind in den Abbildungen 1 bis 3 drei Vergleichsmaße angegeben:

* der Anstieg a der Regressionsgeraden aus der linearen Regression zwischen Rechenwert und Meßwert bezogen auf die summierten Werte für den Zeitraum November 1986 bis Oktober 1992:

$$Y_{sim,k} = a * Y_{obs,k} + b \text{, k=1, 2,... , 72,} \tag{4.1}$$

* die mittlere Abweichung ΔY der Meßwerte von den Rechenwerten, bezogen auf die Monatswerte:

$$\Delta Y = \frac{1}{72} \cdot \sum_{i=1}^{72} \left(y_{obs,i} - y_{sim,i} \right) = \frac{1}{72} \cdot \left(\sum_{i=1}^{72} y_{obs,i} - \sum_{i=1}^{72} y_{sim,i} \right) = \frac{1}{72} \cdot \left(Y_{obs,72} - Y_{sim,72} \right) \tag{4.2}$$

* die normierte totale Fehlersumme TE als Maß für die totale Modellabweichung im Bewertungszeitraum:

$$TE = \frac{\sum_{i=1}^{72} \left| y_{obs,i} - y_{sim,i} \right|}{\sum_{i=1}^{72} \left| y_{obs,i} \right|} \tag{4.3}.$$

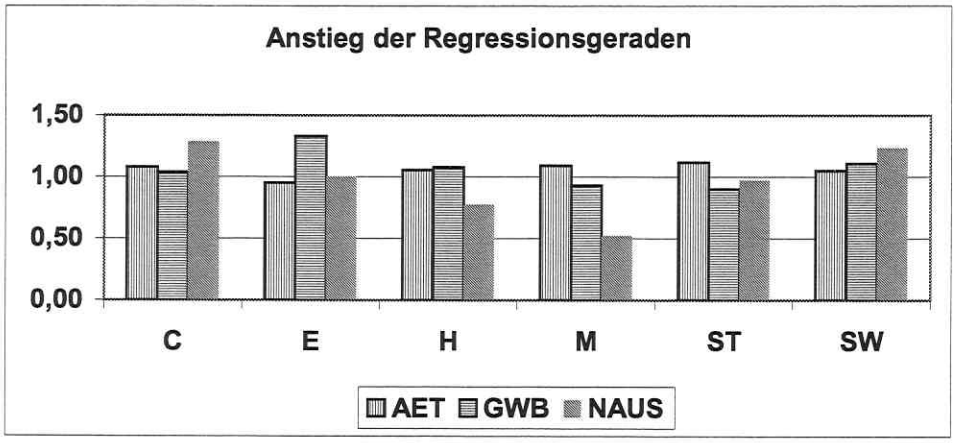
Damit können für jede der 3 Zustandsgrößen sowohl das qualitative als auch das quantitative Modellverhalten eingeschätzt werden.

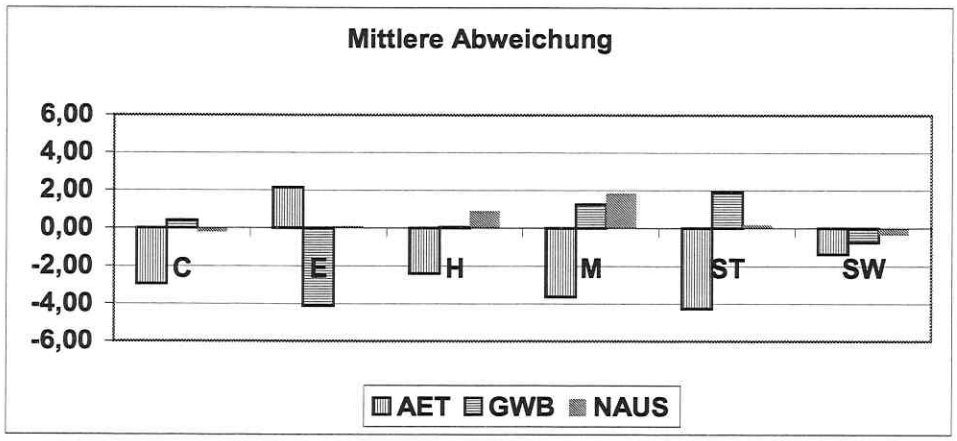
Der Anstieg a der Regressionsgeraden kann als Maß für die Modellqualität in Bezug auf die jeweiligen summierten Meßwerte interpretiert werden: ein Anstieg nahe 1 belegt eine gute Nachbildung der Realität, je stärker der Anstieg von 1 abweicht, desto schlechter ist die Qualität.

Mit (4.2) und (4.3) kann festgestellt werden, wie stark ein Modell quantitativ von den Meßwerten abweicht: ist ΔY betragsmäßig groß, bedeutet das quantitativ schlechtes Modellverhalten, betragsmäßig kleine mittlere Abweichungen zeigen hingegen eine bessere Quantität. Dazu ist ΔY immer in Zusammenhang mit TE zu interpretieren: ein Modell ist hinsichtlich der Quantität um so besser, je kleiner TE. Eine gute Modellquantität ist also erreicht, wenn bei betragsmäßig kleiner mittlerer Abweichung auch die totale Fehlersumme klein ist. Die mittlere Modellabweichung am Ende des Bewertungszeitraums (Oktober 1992) erhält man durch Multiplikation von ΔY mit 72. Ist diese positiv, so bedeutet das eine allgemeine Unterschätzung der Meßwerte, ein negativer Wert deutet hingegen auf eine allgemeine Überschätzung der Meßwerte durch das Modell.

Eine Zustandsgröße wird also von dem Modell am besten beschrieben werden, für welches der Anstieg der Regressionsgeraden sehr nahe 1 **und gleichzeitig** die mittlere Abweichung des Meßwertes vom Rechenwert sowie der normierte totale Fehler möglichst nahe null sind.

Abbildung 1 zeigt die drei Vergleichskennzahlen für jede der Zustandsgrößen AET, GWB und N-Austrag der Lysimetergruppe 5. In Abbildung 2 und 3 sind diese für die Simulationsrechnungen der Lysimetergruppe 7 dargestellt.





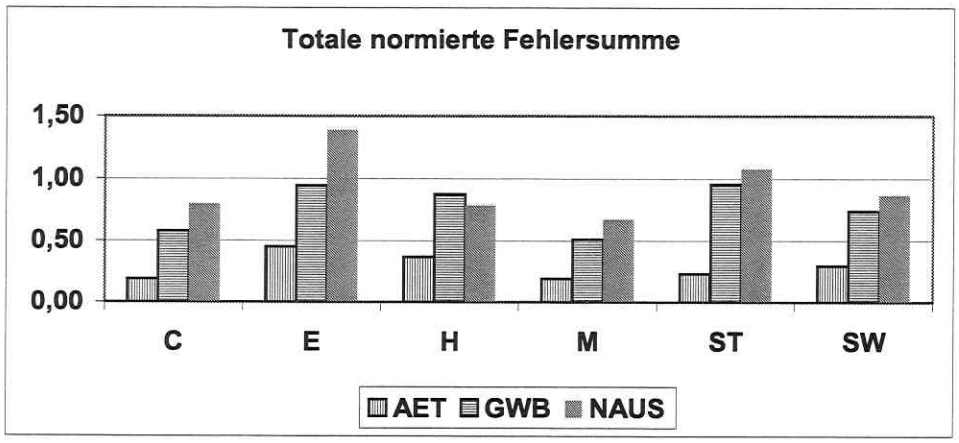
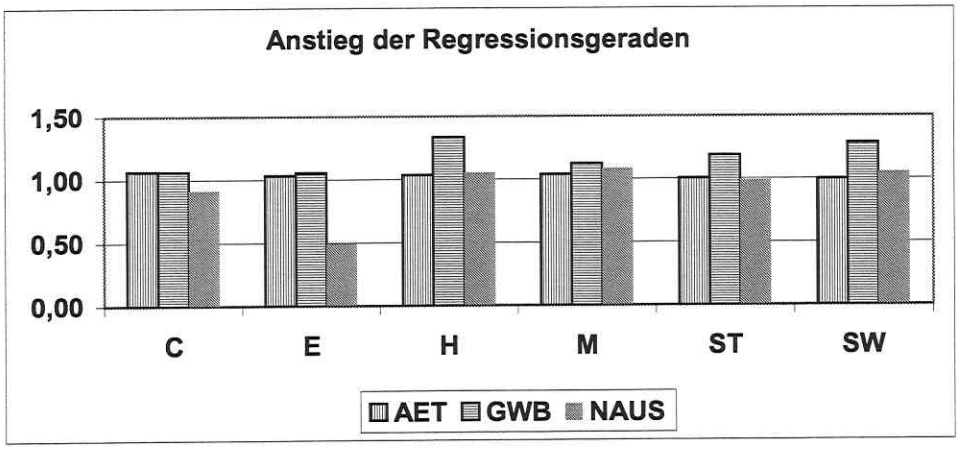
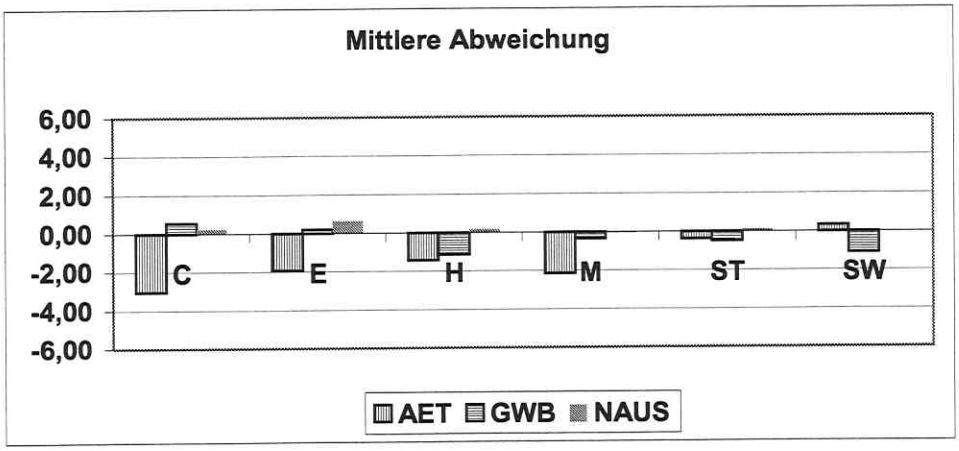


Abbildung 1: Kennzahlen zum Modellvergleich für Lysimetergruppe 5
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM
AET: aktuelle Evapotranspiration, GWB: Sickerwassermenge, N-Austrag: Stickstoffaustrag





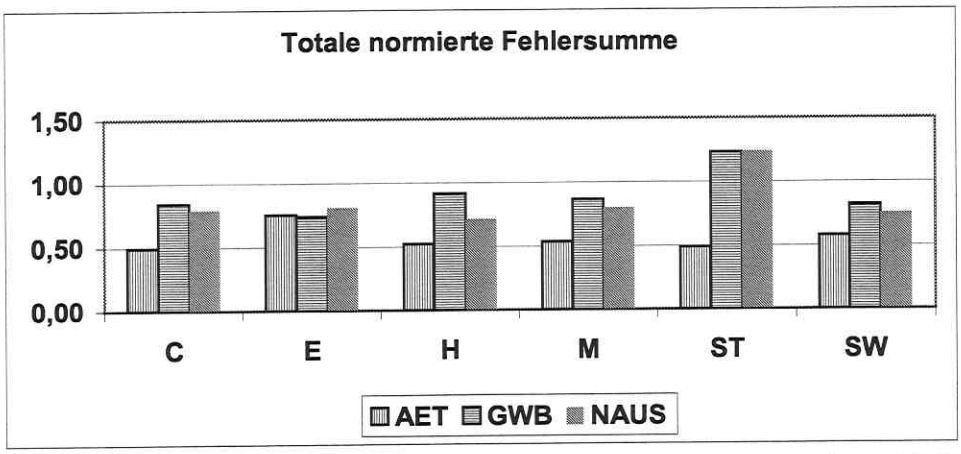
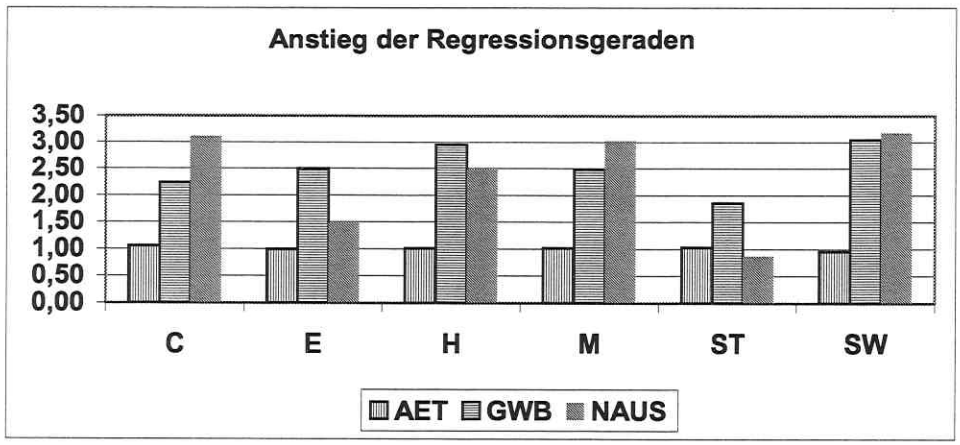
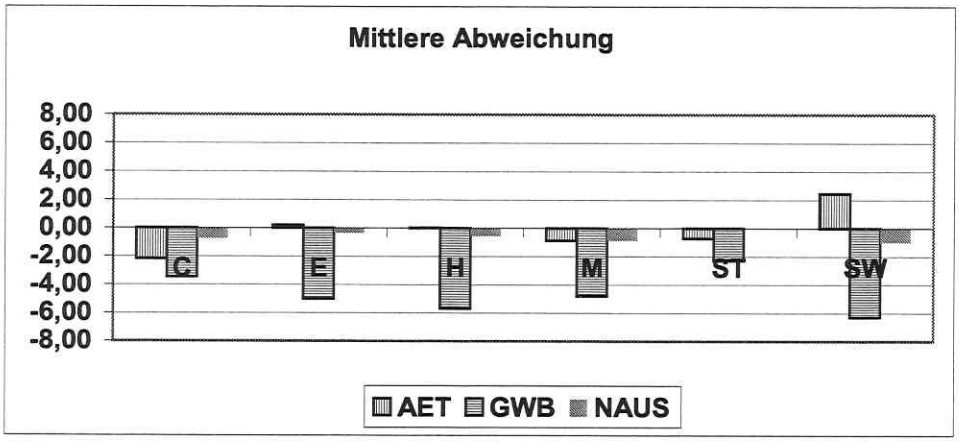


Abbildung 2: Kennzahlen zum Modellvergleich für Lysimeter 7/4 und 7/5
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM
AET: aktuelle Evapotranspiration, GWB: Sickerwassermenge, N-Austrag: Stickstoffaustrag





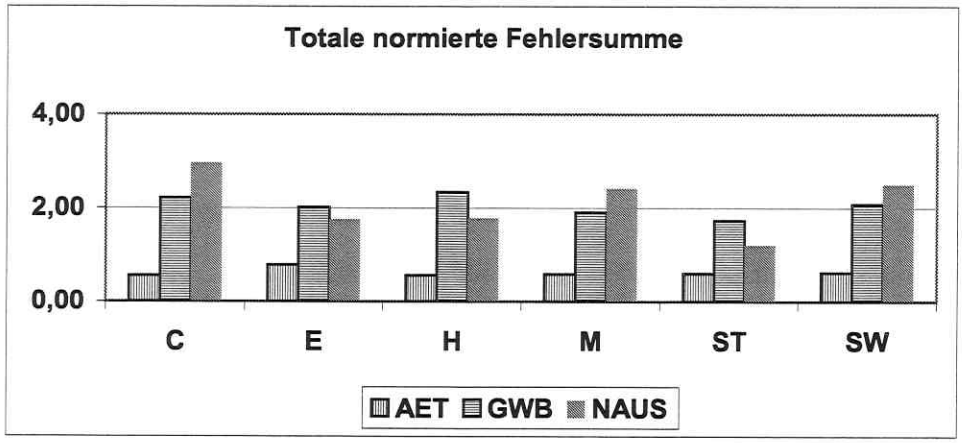


Abbildung 3: Kennzahlen zum Modellvergleich für Lysimeter 7/6
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM
AET: aktuelle Evapotranspiration, GWB: Sickerwassermenge, N-Austrag: Stickstoffaustrag

5. Diskussion der Ergebnisse und Ermittlung einer Modellreihenfolge für Prognosefähigkeit von Stoffausträgen

Abbildungen 1 bis 3 verdeutlichen die Modellunterschiede, welche bei den Simulationsrechnungen für beide Bodenformen auftraten. Insgesamt wurden für die Lysimetergruppe 5 die besseren Modellanpassungen erreicht. Für Lysimetergruppe 7 war es aufgrund der Heterogenität der Bodentextur schwierig, aus dem zur Verfügung stehenden Material modellspezifische Inputdaten abzuleiten (vergleiche Abschnitt 3.2, HAFERKORN UND KNAPPE 2001). Eine Kalibrierung der Modelle ist nur für Lysimeter 7/4 und 7/5 gelungen, wobei der Mittelwert aus den Meßwerten beider Lysimeter verwendet wurde. Für Lysimeter 7/6 wurden mit keinem Modell zufriedenstellende Simulationsergebnisse erzielt, siehe hierzu in den die Abbildungen 1 bis 3 den Anstieg der Regressionsgeraden. Eine Ursache kann in der unzureichenden Spezifikation der Bodenhorizonte liegen, die aus KEESE ET AL. 1997 entnommen wurden.

Die Ergebnisse des Workshops belegen, daß es zur Durchführung von Modellrechnungen einerseits sehr wichtig ist, die Eingangsparameter der Modelle mit großer Sorgfalt zu ermitteln. Andererseits besitzen aber Parameter in der Realität natürliche Schwankungsbreiten, die das Systemverhalten beeinflussen. Das Beispiel der Lysimetergruppe 7 zeigt, daß derartige Phänomene (hier: Heterogenität der Bodentextur) die Modellkalibrierung erschwert: sensible Inputparameter können nicht exakt bestimmt werden, was ein von der Realität abweichendes Modellverhalten zur Folge hatte.

Ein Vergleich der Simulationsergebnisse wird zusätzlich dadurch erschwert, daß jedes Modell neben den gegebenen Daten noch zusätzliche spezifische Inputparameter benötigt, die nicht verfügbar waren und mit zum Teil verschiedenen Methoden hergeleitet werden mußten bzw. zusätzlichen Datenquellen entnommen wurden, vergleiche Abschnitt 3.2.

Trotzdem soll abschließend für die im Rahmen des Workshops durchgeführten Simulationen eine relative Reihenfolge der Modelle angeben werden, zum einem in Bezug auf die Prognosegenauigkeit von Stoffausträgen, zum anderen zur Vorhersage der mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten. Dazu können als Vergleichsgrößen

„Mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert des jährlicher Stickstoffaustrages“ und

„Mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert der jährlichen Grundwasserneubildungsraten“

für die 3 Simulationen „Lysimetergruppe 5“, „Lysimter 7/4 und 7/5“ und „Lysimeter 7/6“ verwendet werden, jeweils im Zeitraum November 1986 bis Oktober 1992 (Tabelle 9).

Tabelle 9: Zahlenwerte der Vergleichsgrößen
„Meßwert-Rechenwert des jährlicher Stickstoff-Austrages“ (kg N/ha*a) und
„Mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert der jährlichen Grundwasserneubildungsraten“ (mm/a) (Zeitraum November 1986 bis Oktober 1992)
für die Simulationen „Lysimetergruppe 5“ (LG5) , „Lysimter 7/4 und 7/5“ (L74&75) und „Lysimeter 7/6“ (L76)
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM

Modell-größe	Simula-tion	C	E	H	M	ST	SW
NAUS	LG5	-2,43	1,29	11,04	22,17	2,18	-4,03
	L74&75	2,61	7,46	1,92	-0,58	1,34	0,10
	L76	-8,53	-4,17	-6,49	-10,37	0,37	-11,53
GWB	LG5	4,84	-49,41	0,57	15,18	22,98	-9,03
	L74&75	6,43	2,32	-13,79	-4,14	-5,85	-13,11
	L76	-41,56	-60,01	-68,12	-57,64	-27,52	-75,44

Bildet man für jedes Modell über alle 3 Rechnungen die Mittelwerte und Streuungen der in Tabelle 9 enthaltenen Zahlen, kann daraus das spezifische Modellverhalten für die Workshop – Rechnungen abgeleitet werden (Tabelle 10).

Tabelle 10: Mittelwerte und Streuungen der Vergleichsgrößen
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM

Modell-größe	Kenn-zahl	C	E	H	M	ST	SW
NAUS	Mittelwert	-2,78	1,53	2,16	3,74	1,30	-5,15
	Streuung	5,58	5,82	8,77	16,70	0,91	5,89
GWB	Mittelwert	-10,10	-35,70	-27,11	-15,54	-3,46	-32,53
	Streuung	27,26	33,35	36,23	37,72	25,33	37,22

Mit diesen Zahlen können bezüglich der Größen
„Mittlerer Abweichung Meßwert-Rechenwert des jährlicher Stickstoffaustrages“
und
„Mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert der jährlichen Grundwasserneubildungsraten“
relative Vergleiche der Modelle erfolgen. Dazu werden für beide Zustandsgrößen noch zusätzlich bestimmt:

- Durchschnitt der betragsmäßigen mittleren Abweichungen der Modelle:

$$D_AB_NAUS := \frac{1}{6} \cdot (2{,}78 + 1{,}53 + 2{,}16 + 3{,}74 + 1{,}30 + 5{,}15) = 2{,}78$$

und

$$D_AB_GWB := \frac{1}{6} \cdot (10{,}10 + 35{,}70 + 27{,}11 + 15{,}54 + 3{,}46 + 35{,}53) = 20{,}74$$

sowie

- Durchschnitt der Streuungen aller Modelle

$$D_ST_NAUS := \frac{1}{6} \cdot (5{,}58 + 5{,}82 + 8{,}77 + 16{,}70 + 0{,}91 + 5{,}89) = 7{,}28$$

und

$$D_ST_GWB := \frac{1}{6} \cdot (27{,}26 + 33{,}35 + 36{,}23 + 37{,}72 + 25{,}33 + 37{,}22) = 32{,}85 .$$

Als Maß zur Festlegung von Modellreihenfolgen kann die euklidische Norm N verwendet werden, die für zwei beliebige Zahlen a und b definiert ist als $N = \sqrt{a^2 + b^2}$, wobei N>=0.
N wird bei jedem Modell für beide Zustandsgrößen berechnet, in dem die in Tabelle 10 angegebenen Zahlen eingesetzt werden (Tabelle 11).
Für eine Zustandsgröße besitzt das Modell die beste Prognosefähigkeit, welches für diese Größe die kleinste Norm hat. Eine Anwendung der Norm auf die oben berechneten Größen *D_AB_NAUS* und *D_ST_NAUS* bzw. *D_AB_GWB* und *D_ST_GWB* liefern relative Grenzwerte: Modelle, bei denen für eine Zustandsgröße die Norm größer ist als der entsprechende Grenzwert, sind für eine Prognose dieser Größe weniger geeignet. Die eingangs getroffenen Bemerkungen über Verfügbarkeit aller notwendigen Inputdaten für jedes Modell sind hierbei jedoch unbedingt zu beachten, die Modellreihenfolgen sind nur für die im Rahmen des Workshops durchgeführten Rechnungen zu sehen.

Tabelle 11: Euklidische Normen und Grenzwerte der Normen für die Vergleichsgrößen „Meßwert-Rechenwert des jährlicher Stickstoff-Austrages“ (kg N/ha*a) und „Mittlere Abweichung Meßwert-Rechenwert der jährlichen Grundwasserneubildungsraten“ (mm/a) (Zeitraum November 1986 bis Oktober 1992)
Legende: C CANDY, E EPIC, H HERMES, M MINERVA, ST STOTRASIM, SW SWIM

Modell-größe	C	E	H	M	ST	SW	Grenz-wert
NAUS	6,24	6,01	9,03	17,11	1,58	7,83	7,79
GWB	29,07	48,85	45,25	40,80	25,57	49,43	38,85

Interpretation: Als Ergebnis des Workshops kann festgestellt werden:

Das Modell STOTRASIM ist sowohl für die Vorhersage der mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten als auch zur Prognose der Stickstoff-Austrage am besten geeignet. Für die Prognose der Stickstoff-Austräge folgen die Modelle EPIC, CANDY, SWIM und HERMES und MINERVA, wobei SWIM, HERMES und MINERVA die Grenznorm (7,79) überschreiten. Die Ursachen liegen im spezifischen Modellverhalten: bei HERMES und MINERVA sind die Streuungen der 3 Einzelwerte zu groß, bei SWIM der Mittelwert der Abweichungen (Abbildung 4).

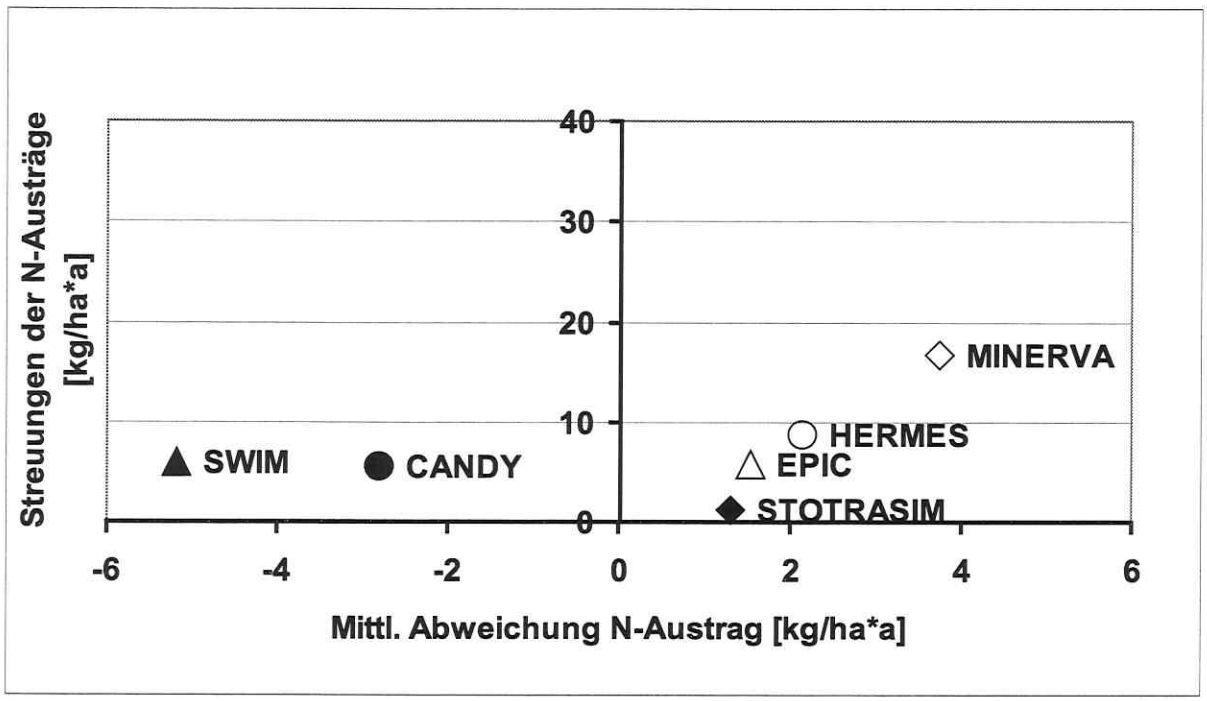


Abbildung 4: Streuungen und Mittelwerte der berechneten Modellabweichungen der Zustandsgröße „mittlere jährliche Stickstoff-Auswaschung"

Zur Vorhersage der mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten folgen nach STOTRASIM die Modelle CANDY, MINERVA, HERMES, EPIC und SWIM in dieser Reihenfolge (Abbildung 5), wobei nur CANDY die Grenznorm (38,85) unterschreitet. Bei allen Modellen kann für die Grundwasserneubildung eine Tendenz zur Überschätzung der Meßwerte festgestellt werden, welche durch die Simulation „Lysimeter 7/6" bedingt ist (vergleiche Tabelle 9).

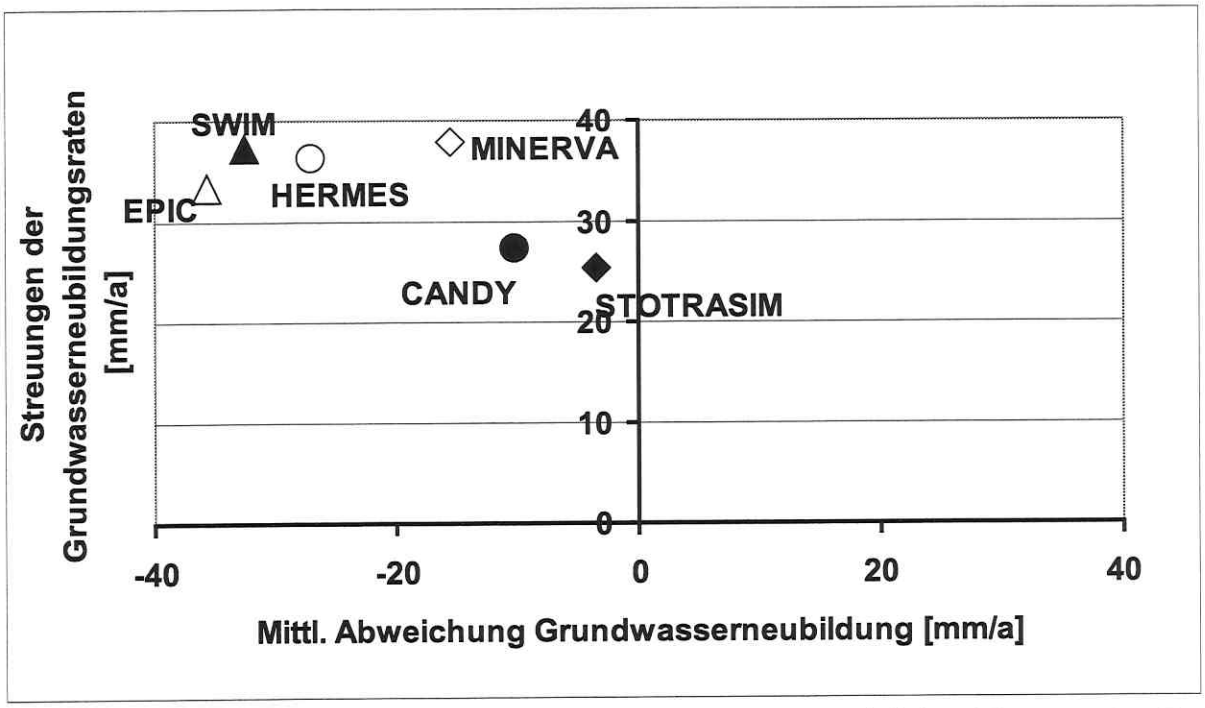


Abbildung 5: Streuungen und Mittelwerte der berechneten Modellabweichungen der Zustandsgröße „mittlere jährliche Grundwasserneubildung"

Die Vergleiche bezüglich der Prognosegenauigkeit von Stoffausträgen und der mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsmengen belegen deutliche Unterschiede im Verhalten der einzelnen Modelle. Mögliche Ursachen liegen in der Art und Weise der Kalibrierung und in der zum Teil verschiedenen Abbildung der Umsatz- und Transportprozesse. Die Ergebnisse des Modellvergleichs sind nur im Kontext mit den Workshop – Simulationen zu interpretieren und keinesfalls als allgemeingültige Aussage anzusehen.

6. Literatur

ARBEITSGRUPPE BODENKUNDE (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung 4. Auflage. Hannover.

ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., SRINIVASAN, R., KING, K.W. AND R. H. GRIGGS (1994): SWAT, Soil and Water Assessment Tool. USDA, Agriculture Research Service, Temple, TX 76502.

BEBLIK, A. J. UND U. GRÜNEWALD (1998): Modellkonzept zum Stickstoff-Haushalt im mesoskaligen Gebietsmaßstab. in: Forum der Forschung (BTU Cottbus), 48-53.

BEBLIK, A. J., KERSEBAUM, K. C. UND J. Richter (1997): MINERVA. in: H. G. Starck, B. Göbel, E. W. Reiche & P. Widmoser [Ed.], Darstellung und Bewertung von mesoskaligen Stickstoffmodellen, Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz, Berlin, 63-75.

BEBLIK, A. J., WILLENBOCKEL, A. UND J. RICHTER (1997): Modellrechnung: Nitratauswaschung aus dem Boden, iBUG Braunschweig. 66 S..

BOUWER AND JACKSON (1974): Determining Soil Properties. In: SCHILFGAARDE: Drainage for Agriculture. Agronomy Series 17, S. 651 ff, Amer. Soc. Agron. Inc., Madison, U.S.A.

CABELGUENNE, M., JONES, C. A., MARTY, J. R., DYKE, P. T. AND WILLIAMS, J. R. (1990): Calibration and validation of EPIC for crop rotations in Southern France. Agric. Systems 33,153-171.

CANDY IV Anwenderdokumentation (1997) (unveröffentlicht).

DUYNISVELD, W.H.M. (1993): Entwicklung von Simulationsmodellen für den Transport von gelösten Stoffen in wasserungesättigten Böden und Lockersedimenten. Umweltbundesamt, Texte 17/83, Berlin.

FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefrachtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). Aus: Sonderdruck aus Beiträge zur Hydrogeologie, Band 49/50. Joanneum Research.

FEICHTINGER, F. (1998 a): STOTRASIM – Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. Aus Schriftenreihe BAW, Band 7, 14-41.

FEICHTINGER, F. (1998 b): Simulationsrechnungen zur Auswirkung unterschiedlicher landwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Nitrataustrag. Aus: Schriftenreihe BAW, Band 7, 75-88.

FEICHTINGER, F. (1998 c): Bericht „Nitratausträge aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen des vorgesehenen Schongebietes WG St. Georgen, Salzburg und Vorschläge von Maßnahmen zur Austragsminderung“, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt Petzenkirchen. (unveröffentlicht).

FRANKO, U., OELSCHLÄGEL, B. UND SCHENK, ST. (1995 a): Modellierung von Bodenprozessen in Agrarlandschaften zur Untersuchung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen. UFZ-Bericht Nr. 3. Leipzig.

FRANKO, U., OELSCHLÄGEL, B. UND SCHENK, ST. (1995 b): Simulation of temprature-, water- and nitrogen dynamics using the model CANDY. Ecol. Modell. 81, 213-222.

FRANKO, U., SCHENK, ST., DEBEVC, D., PETERSOHN, P., SCHRAMM, G. (1997 a): Einfluß von Standort und Bewirtschaftung auf den N-Austrag aus Agrarökosystemen. UFZ-Bericht Nr. 10. Leipzig.

FRANKO, U. CROCKER, G.J., GRACE, P.R., KLIR, J., KÖRSCHENS, M., POULTON, P.R. AND D.D. RICHTER. (1997 b): Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the CANDY model. Geoderma, 81, 109-120.

HAFERKORN, U. UND S. KNAPPE (2001): Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes, Teil I: Lysimeterdaten der Station Brandis (Leipzig) als Datenbasis für Modellrechnungen. In: Stickstoffmodellierung für Lysimeter des Parthe-Gebietes. UFZ- Bericht Nr. 17. Leipzig.

JONES, C. A. AND O'TOOLE, J. C. (1987): Application of crop production models in agro-ecological characterization: Simulation models for specific crops. Chapter 20, 199-209. In: Proc. Workshop on Agro-Ecological Characterization, Classification, and Mapping.

JONES, C. A., WEGENER, M. K., RUSSEL, J. S., McLEOD, I. M. AND WILLIAMS, J. R. (1989): AUSCANE - Simulation of Australian Sugarcane with EPIC. CSIRO, Div. Tropical Crops and Pastures Tech. Paper No. 29.

KARTSCHALL, T. (1986): Simulationsmodell der Stickstoffdynamik. Dissertation A. AdL Berlin.

KEESE, U., NITSCHE, C., KNAPPE, S. UND U. WALDSCHMIDT (1997): Vergleichende bodenphysikalische Untersuchungen zwischen Lysimetern und ihren Herkunftsflächen am Beispiel von drei typischen Böden Mitteldeutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung. Arch. Acker-Pfl. Boden, 41, 209-231.

KERSEBAUM, K. C. (1989): Die Simulation der Stickstoffdynamik in Ackerböden. Dissertation Universität Hannover.

KERSEBAUM, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. Ecol. Modell. 81, 145 - 156.

KERSEBAUM, K. C. (1999): Simulation standortspezifischer Effekte unterschiedlicher Fruchtfolge- und Anbausysteme im ökologischen und konventionellen Landbau auf den Wasser- und Stickstoffhaushalt als Grundlage für regionale Szenarienrechnungen. Beiträge zur 5. Wissenschaftstagung zum Ökologischen Landbau. Verlag Dr. Köster, Berlin, 337 -340.

KERSEBAUM, K. C. (2000): Model based evaluation of land use and management strategies in a nitrate polluted drinking water catchment in North-Germany. In: R. Lal (ed.): Integrated Watershed Management in the Global Environment. CRC Press, Boca Raton. 223-238 .

KERSEBAUM, K. C. UND K.-O. WENKEL (1998): Modelling water and nitrogen dynamics at three different spatial scales - influence of different data aggregation levels on simulation results. Nutrient Cycling in Agroecosystems 50, 313-319.

KERSEBAUM, K. C., P. JÜRSCHIK AND O. WENDROTH (1999): Modellierung der schlaginternen Ertragsvariabilität auf der Basis räumlich variabler Bodenkennwerte am Beispiel eines Lößschlages. Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 91/II, 799 - 802.

KERSEBAUM, K. C. UND A. J. BEBLIK (2001): Performance of a nitrogen dynamics model applied to evaluate agricultural management practices [Chapter 20], in: M. Shaffer, L. Ma & S. Hansen [Ed.], Modelling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management, Lewis.

KNAPPE, S. UND U. KEESE (1996): Untersuchungen zu ausgewählten chemischen Eigenschaften langjährig landwirtschaftlich genutzter Böden von Lysimetern im Vergleich zu Profilen auf deren Herkunftsflächen. Arch. Acker-Pflanzenbau. Bodenkunde 40, S. 431-451

KOITZSCH, R. UND R. GÜNTHER (1990):Modell zur ganzjährigen Simulation der Verdunstung und der Bodenfeuchte landwirtschaftlicher Nutzflächen mit und ohne Bewuchs. Arch. Acker-Pflanzenbau Bodenkunde 24 S. 717-725.

KRYSANOVA, V., MÜLLER-WOHLFEIL, D. I. AND A. BECKER (1998): Development and test of a spatially distributed hydrological / water quality model for mesoscale watersheds. Ecological Modelling 106 (1-2), 261-289.

KRYSANOVA, V., AND A. BECKER (1999) Integrated Modelling of Hydrological Processes and Nutrient Dynamics at the River Basin Scale, Hydrobiologia, 410, 131-138.

KRYSANOVA, V., F. WECHSUNG, A. BECKER, W. POSCHENRIEDER AND J. GRÄFE (1999) Mesoscale ecohydrological modelling to analyse regional effects of climate change, Environmental Modelling and Assessment, 4, 4, 259-271.

KRYSANOVA, V., WILLIAMS, J., BÜRGER, G. AND H. ÖSTERLE (2000) Linkage between hydrological processes and sediment transport at the river basin scale - a modelling study. UNESCO Technical Report on Hydrological Processes and SoilErosion (accepted).

RAMSBECK, M.(1998): Modeling of water and nitrogen flow in the watershed of the Parthe river. Landscape Ecological Papers, 11, Roskilde University.

RICHTER, G. M. UND A. J. BEBLIK: (1996): Nitrataustrag aus Ackerböden ins Grundwasser unterschiedlich belasteter Trinkwasser-Einzugsgebiete Niedersachsens. TU Braunschweig, IfGG, 235 S..

RICHTER, G. M., BEBLIK, A. J., SCHMALSTIEG, K. UND O. RICHTER (1998): N-dynamics and nitrate leaching under rotational and continuous set-aside - a case study at the field and catchment scale. Agriculture, Ecosystems and Environment, S. 125-138.

SHARPLEY, A. N. AND J. R. WILLIAMS (eds.): EPIC Erosion/Productivity Impact Calculator. USDA Tech. Bull. No. 1768.

STENITZER, E. (1997): Assessment of Deep Percolation into a Gravelly Aquifer Simulation and experimental verification. International Symposium on Soil System Behaviour in Time and Space, Vienna 1997. Mittlg. Österr. Bodenkundl. Ges., Heft 55, S. 125–128.

STENITZER E. (1988): SIMWASER – Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mittlg. der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt Nr. 31, A-3252 Petzenkirchen.

STENITZER, E. (1998): Die Abschätzung der Grundwasserneubildung mit dem Modell SIMWASER auf Basis der österreichischen Bodenkarte 1:25.000, Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, Band 7, 104-112.

STENITZER, E. (1999): Simulation der Auswirkung einer geplanten Grundwasser-absenkung auf den Wiesenertrag am Beispiel „Mittleres Drautal", Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben KB 1.3/98, IKT Petzenkirchen

STENITZER, E.(2000): Ein physikalisches Kompartimentmodell zum Bodenwasser-haushalt. In: Sickerwassermodellierung. Institut für Hydrologie. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit. In Vorbereitung.

STENITZER, E. AND U. MÜLLER, (1996): Wasserhaushalts- und Ertragsmodell SIMWASER – 4. Version. Arbeitshefte Boden, Nds. Landesamt für Bodenforschung, Hannover, 3-28.

STENITZER, E., FANK, J., POLTNIG, W. AND G. ROCK (1998): Wasserwirtschaftliche Rahmenuntersuchung Salzach: Grundwassersimulation – Endbericht. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Joanneum Research – Institut für Hydrogeologie und Geothermie Graz.

WECHSUNG, F., V.KRYSANOVA, M.FLECHSIG AND S.SHAPHOFF (2000): May land use change reduce the water deficiency problem caused by reduced brown coal mining in the state of Brandenburg? Landscape and Urban Planning, (in print).

WILLIAMS, J. R., JONES, C. A. AND P. T. DYKE (1994): The EPIC model and its application. pp. 111-121. IN: Proc. Intl. Symp. on Minimum Data sets for Agrotechnology Transfer, 21 - 26 March 1983, ICRISAT Center, India.

WILLIAMS, J. R. (1985): The EPIC model an overview. pp. 23-30. In: D. G. DeCoursey (ed.), Proc. of the Natural Resources Modeling Symp., Pingree Park, CO, Oct. 16-21, 1983. USDA, ARS, ARS-30. April 1985.

WILLIAMS, J. R. AND RENARD, K. G. (1985): Assessments of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). pp. 67-103. In: R. F. Follett and B. A. Stewart (eds.), Soil Erosion and Crop Productivity. Am. Soc. Agron., Inc., Crop Sci. Soc. Am., Inc., Soil Sci. Soc Am., Inc., Madison, WI. p. 533.

WURBS, A., K. C. KERSEBAUM AND C. MERZ (2000): Quantification of leached pollutants into the groundwater caused by agricultural land use - scenarios as a method for quantitative risk assessment of groundwater pollution. In: R. Lal (ed.): Integrated Watershed Management in the Global Environment. CRC Press, Boca Raton. 239-250.

Autorenverzeichnis

Andreas Beblik
Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft,
Theodor -Neubauer - Straße 6, D-03046 Cottbus
Beblik@TU-Cottbus.DE

Peter Cepuder
Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft,
Muthgasse 18, A-1190 Wien
h522t9@edv2.boku.ac.at

Jens Dreyhaupt
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH, Sektion Bodenforschung,
Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 Halle
dreyh@bdf.ufz.de

Johann Fank
Joanneaum Research Institut für Hydrogeologie und Geothermie,
Elisabethstraße 16/II, A-8010 Graz
johann.fank@joanneum.ac.at

Franz Feichtinger
Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt,
Pollnbergstraße 1, A-3252 Petzenkirchen
franz.feichtinger@baw.at

Uwe Franko
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH, Sektion Bodenforschung,
Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 Halle
ufranko@bdf.ufz.de

Uwe Haberlandt

PIK-Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Abteilung Natürliche Systeme,
Telegrafenberg C4 Postfach 601203, D-14412 Potsdam
uhaber@pik-potsdam.de

Ulrike Haferkorn
Staatliche Umweltbetriebsgesellschaft, Lysimeterstation Brandis
Kleinsteinberger Straße 3, D-04821 Brandis
ulrike.haferkorn@ubg.smul.sachsen.de

Kurt Christian Kersebaum
ZALF-Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung, Institut für Landschaftssystemanalyse,
Eberswalder Straße 84, D-15374 Müncheberg
ckersebaum@zalf.de

Siegfried Knappe
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH, Sektion Bodenforschung,
Theodor-Lieser-Straße 4, D-06120 Halle
knappe@bdfl.ufz.de

Valentina Krysanova
PIK-Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Abteilung Natürliche Systeme,
Telegrafenberg C4 Postfach 601203, D-14412 Potsdam
krysanova@pik-potsdam.de

Uta Steinhardt
UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle GmbH, Sektion Angewandte Landschaftsökologie,
Permoserstraße 15, D-04318 Leipzig
stein@alok.ufz.de