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) Braun-erde-Pseudogley, pseudovergleyte Braunerde-Fahlerde	Stauwasser-beeinflußt, früher teils grund-wasser 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 Untersuchnungsprogramm 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** $_{\text{Gras-Ref.}}$ [mm]	**ETP**$_{\text{gemessen}}$ [mm]		**KWB**$_{\text{unkorr}}$ [mm]	**kWB**$_{\text{korr}}$ [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.

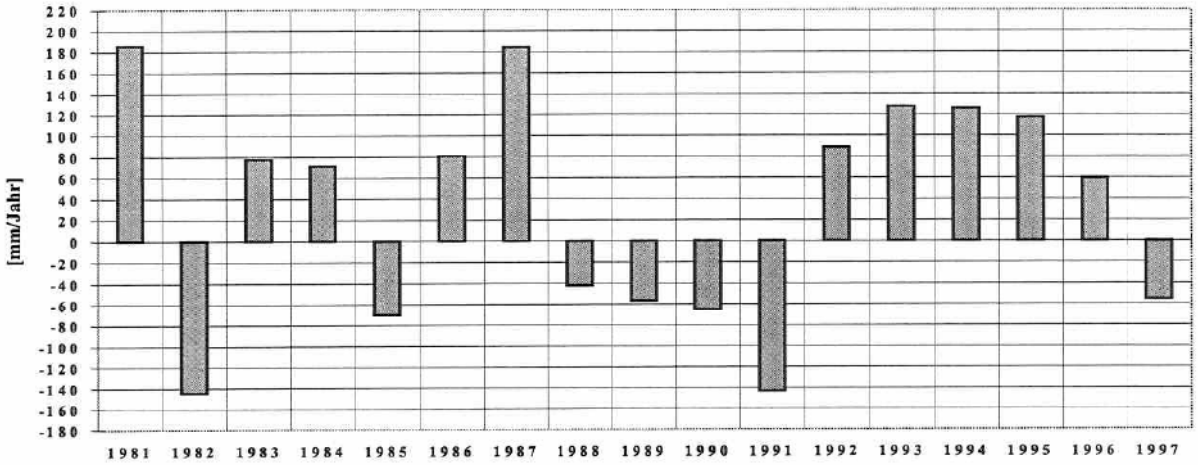

Abbildung 1: Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz am Standort Brandis [mm/a] für den Versuchszeitraum 1981-1997

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.

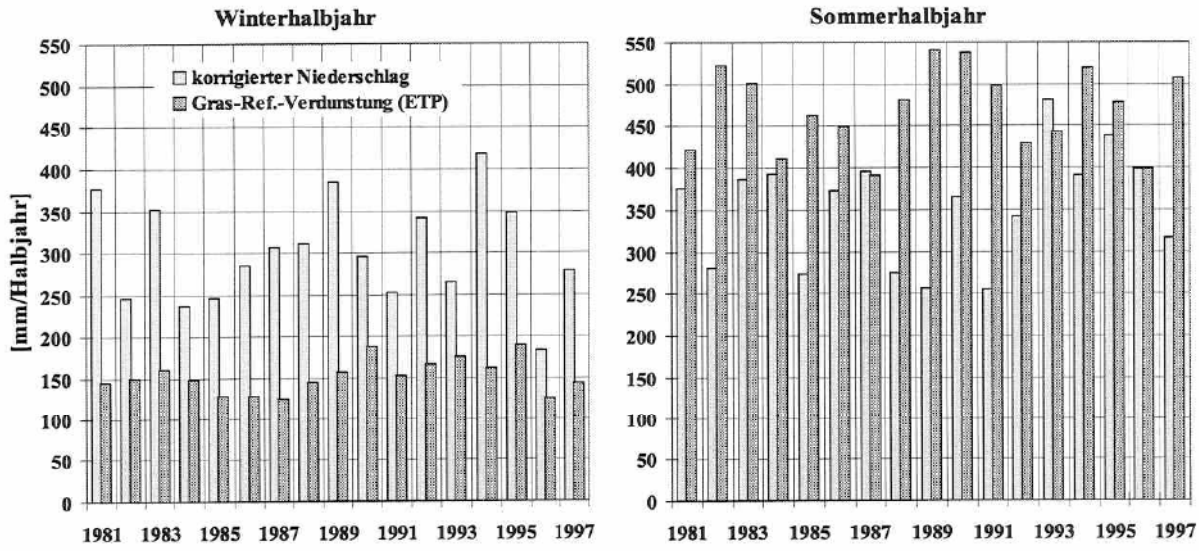

Abbildung 2: Gegenübertstellung von Niederschlag und Gras-Referenzverdunstung (ETP) zur Einschätzung der klimatischen Wasserbilanz der hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahre am Standort Brandis

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).

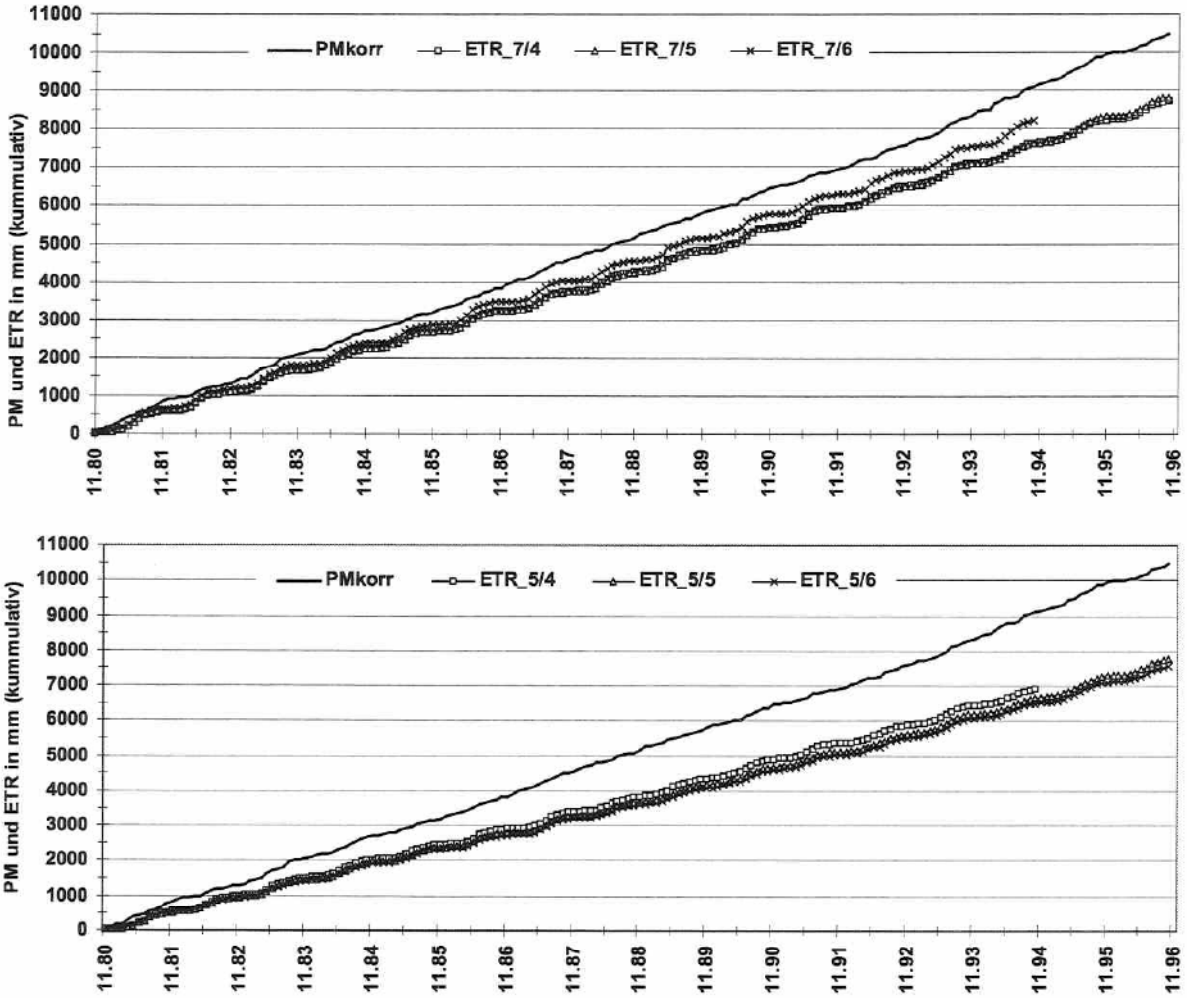

Abbildung 3: Summenkurven des Niederschlages (PM) und der gemessenen Evapotranspiration (ETR) der jeweils drei Wiederholungen der Lysimetergruppen 7 und 5

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.

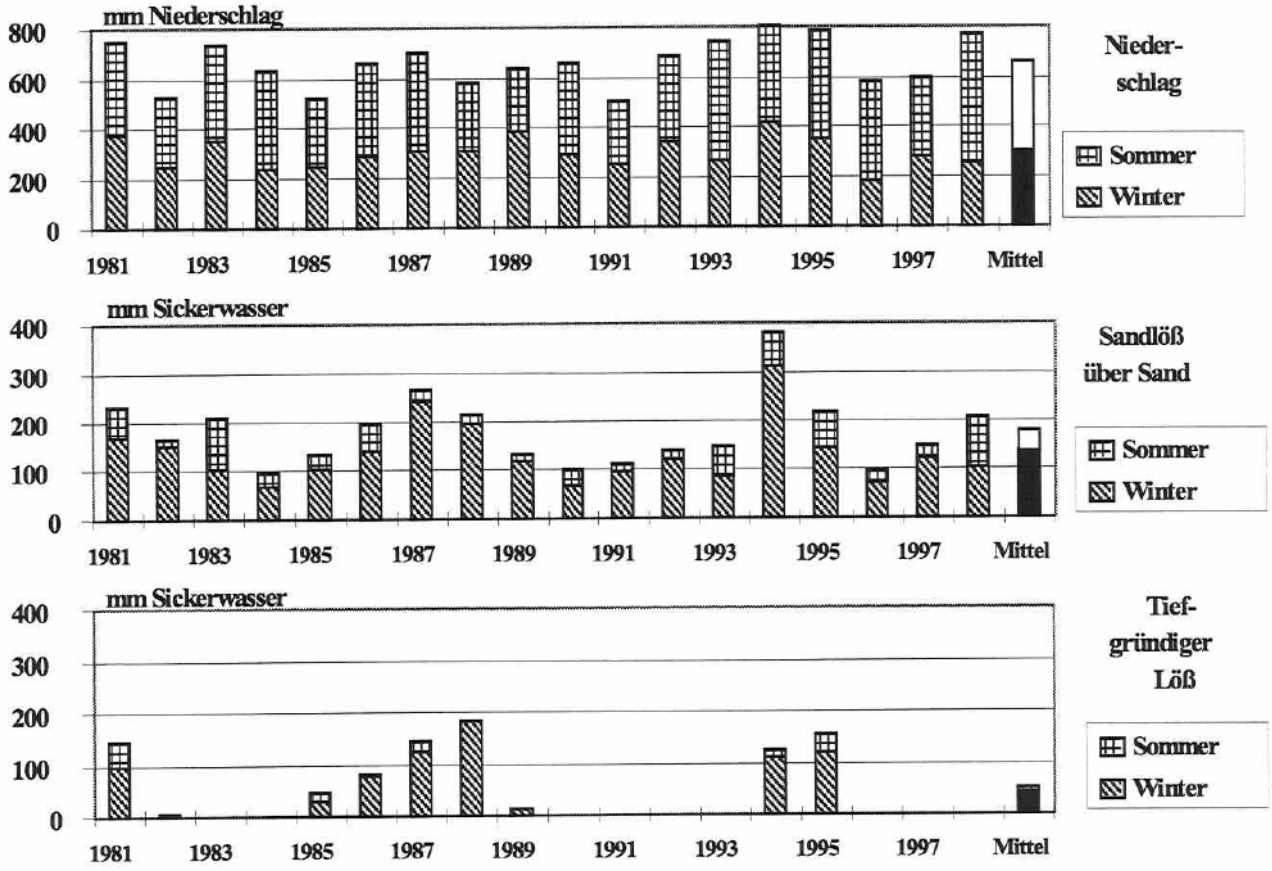

Abbildung 4: Korrigierter Niederschlag und Grundwasserneubildung der Erodierten Braunerde (Lys.Gr.5) und des Braunerde-Pseudogleys (Lys.Gr.7)

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).

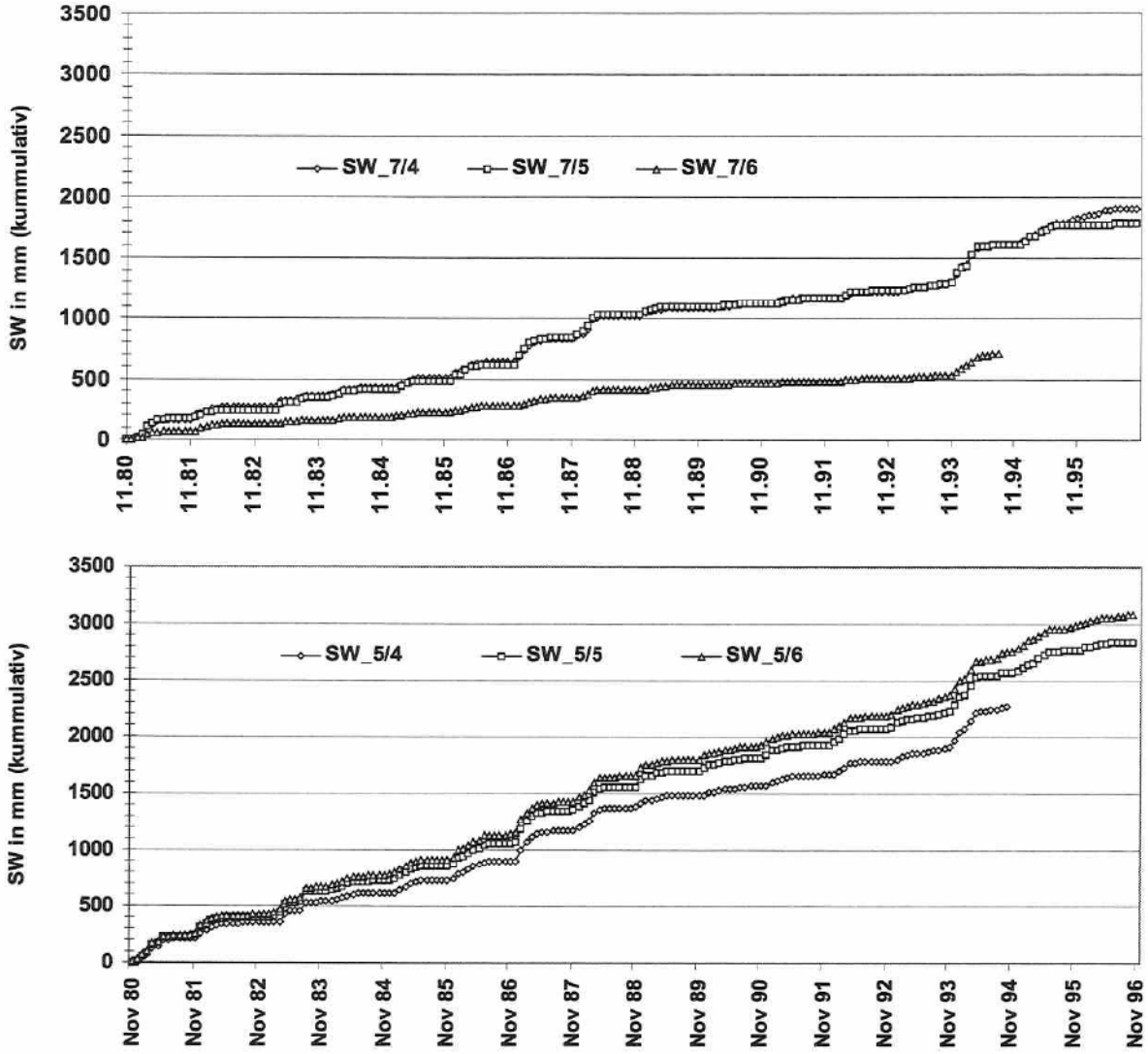

Abbildung 5: Summenkurven der Sickerwasserbildung für den Zeitraum November 1980 bis November 1996 (mm, kumulativ)

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%.

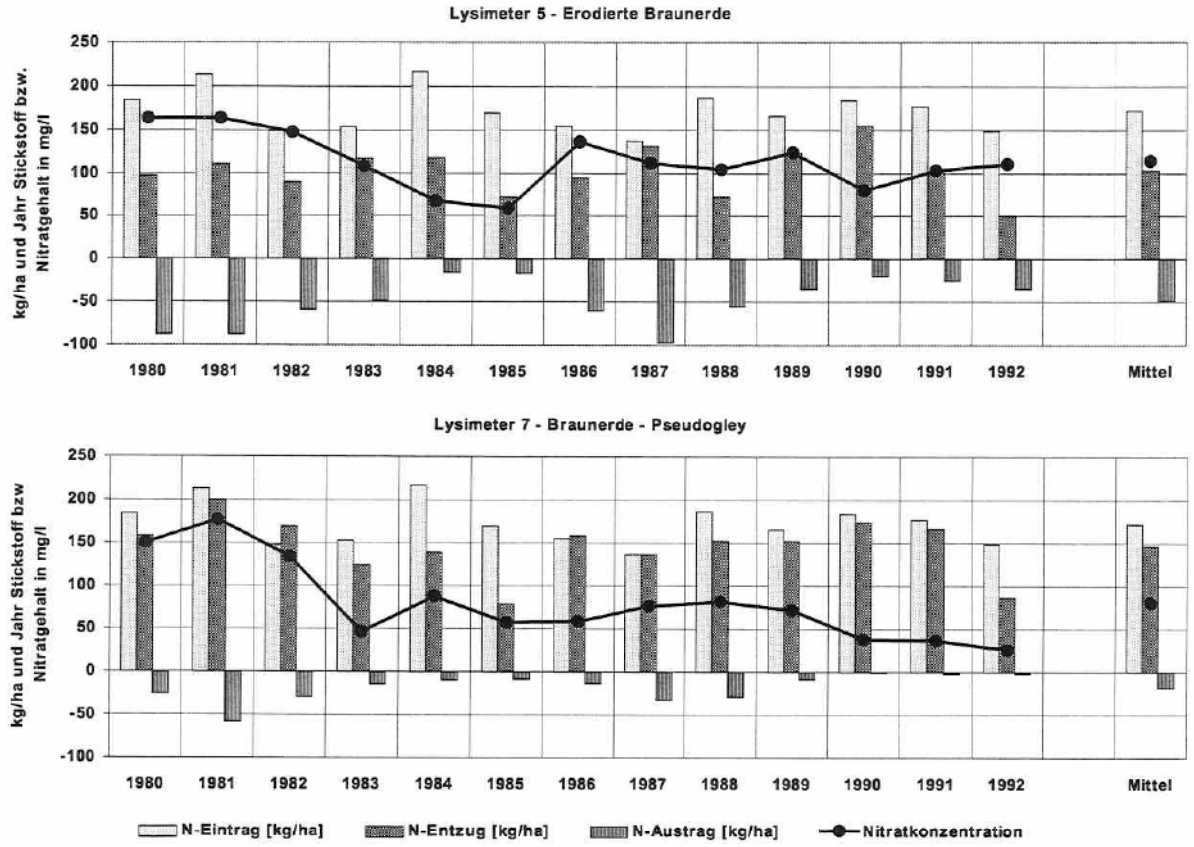

Abbildung 6: N-Eintrag über Düngung und nasse Deposition, N-Entzug durch die Pflanze, N-Austrag durch Sickerwasser und Nitratgehalt im Sickerwasser als Monatsmittel bzw. Monatssummen der Lysimetergruppe 5 und 7

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

Ergebnisse des Workshops **„Stickstoffmodellierung“**

vom 08.06.1999 bis 10.06.1999

am Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH