

Anforderungen an Gefäßlysimeter

D. KLOTZ

Abstract

Bei der Auswertung/Modellierung von Lysimeteruntersuchungen benötigt man reale Anfangs- und naturnahe Randbedingungen. Es wird über die Bestimmung des auf die Lysimeteroberfläche auftretenden Niederschlagsinput sowie auftretende natürliche und beim Lysimeteraufbau induzierte Störungen berichtet, die eine inhomogene Durchströmung des Lysimeterkörpers zur Folge haben.

Überblick und Aufgabenstellung

Beim Aufbau von Gefäßlysimetern werden **ideale Bedingungen** vorausgesetzt:

- Die in großskaligen Lysimetergefäßen aus inertem Material eingebauten Böden stellen einen Abriss der natürlichen Böden bis einige Meter Mächtigkeit dar.
- Die Horizontsedimente der Lysimeterböden weisen homogene Strukturmerkmale auf, sodass sich im Lysimeterkörper ein Parallelstrom einstellt. Auch beim Einbau des Bodens in das Gefäßlysimeter und beim Einbau der Sensorik durch die Lysimeter-Mantelfläche treten keine Störungen auf.
- Die klimatischen Bedingungen an der Lysimeteroberfläche entsprechen den natürlichen Schwankungen, der mittlere Wassergehalt im Lysimeterboden und die mittlere Sickerwassergeschwindigkeit sind bodenspezifisch und in Näherung über einen größeren Zeitraum konstant.
- Der Pflanzenbestand und die Pflanzenentwicklung auf der Lysimeteroberfläche und dem umgebenden Lysimeterfeld sind gleich.

Diesen Anforderungen stehen die Gegebenheiten der **Praxis** gegenüber:

- Die Dimensionen der Gefäßlysimeter sind aus Kosten- und Gewichtsgründen begrenzt.
- Da die Struktur- und Texturparameter der Horizontsedimente natürlicher Bö-

den variieren, wird der Lysimeterboden i. a. inhomogen durchströmt. Die monolithische Entnahmemethode der Lysimeterböden (insbesondere nach "Rotationsverfahren") und der nachträgliche Einbau der Sensorik kann zu Störungen der bodenphysikalischen Parameter führen und Strömungsinhomogenitäten schaffen.

- Die klimatischen Bedingungen sind als Folge des beginnenden globalen Wandels durch Extremas gekennzeichnet, der Wasserhaushalt der Böden und damit die Sickerwassergeschwindigkeit variieren stark.
- Da i. a. in den Lysimetern und im umgebenen Lysimeterfeld verschiedene Böden anstehen, sind der Pflanzenbestand und die -entwicklung unterschiedlich, d. h. die auf das Lysimeter einwirkenden äußeren Bedingungen werden verfälscht. Unterschiede in der Temperatur und im Niederschlagsinput verändern aber die hydraulischen Parameter und das Transformationspotenzial (gegenüber organischen Wasserinhaltsstoffen) des Lysimeterkörpers.

In den letzten Jahrzehnten wurden beim Aufbau und beim Betrieb von Lysimetern und der notwendigen Lysimeter-Peripherie viele Erfahrungen gesammelt (Zusammenfassungen s. z. B. KLOTZ & SEILER, 1998, BÖHM et al., 2002). Im Folgenden wird deshalb nur über die Bestimmung der bei der Modellierung der Lysimeterergebnisse notwendigen realen Anfangs- (Niederschlags-Input) und Randbedingungen am und im Gefäßlysimeter (bestimmt durch die Beschaffenheit des Lysimeterkörpers und dem folgenden Lysimeter-Output) berichtet.

Niederschlags-Input

Wasser in Böden ist Lösungs- und Transportmittel von Stoffen. Es wird diskontinuierlich durch die Niederschläge, die sich stark in der Intensität und der Dau-

er unterscheiden, laufend aufgefüllt. Nur in den seltensten Fällen tritt ein Beharrungszustand in den Böden ein, nämlich dann, wenn das Gravitations- und das Matrixpotenzial gleich sind.

Für Lysimeteruntersuchungen wird i. a. mit einem Messgefäß, das oberhalb der Vegetationsdecke (ca. 1,5 m über GOK) und in einer gewissen Entfernung vom Lysimeter angeordnet ist, wöchentlich die Niederschlagsmenge gemessen. Diese Art der Bestimmung des Niederschlagsinputs berücksichtigt nicht

1. die zeitliche Niederschlagsverteilung und damit Starkregenereignisse sowie die Niederschlagsdauer,
2. örtliche Niederschlagsdifferenzen auch im mesoskaligen (10 m) Bereich,
3. das Inputdefizit durch die Abdeckung der Lysimeteroberfläche durch die Bepflanzung,
4. Änderungen der Niederschlagsverteilung durch Stängelanschlüsse.

Zu 1: Dauer und Intensitätsverteilungen des Niederschlags sind mit einer handelsüblichen Niederschlags-Wippe zu bestimmen. Es ist jedoch zu beachten (*Tabelle 1*), dass diese Niederschlagsregistrierung von der Wassertemperatur (Viskosität) abhängig ist und durch geringe und sehr große Niederschlagsmengen begrenzt wird.

Zu 2: Die örtliche Niederschlagsverteilung ist auch kleinskalig nicht konstant (*Tabelle 1*). Die Niederschlagsregistrierung sollte deshalb in unmittelbarer Nähe des Lysimeters mit großflächigen Niederschlagssammlern erfolgen. An der GSF-Lysimeteranlage wird die Niederschlagsregistrierung mit einem zentral angeordneten, großflächigen Trichtersammler und vier an den Eckpunkten des eigentlichen Lysimeterfeldes angeordneten kleinflächigen Hellmann-Sammlern durchgeführt.

Zu 3: Durch Pflanzen wird ein Teil des Niederschlags zurückgehalten. Streng genommen müsste als Inputgröße im

Autor: Dipl.-Phys. Dietmar KLOTZ, GSF-Institut für Grundwasserökologie, Ingolstädter Landstraße 1, D-85764 NEUHERBERG, dietmar.klotz@t-online.de

Tabelle 1: Jährliche Niederschlagshöhen [mm], registriert mit verschiedenen Niederschlagssammlern NS; Parameter: Fläche F des NS, Anordnung (Höhe h über GOK) und Entfernung a vom Zentrum der GSF-Lysimeteranlage.

NS	1.1 - 1.4 (Hellmann-NS)	2 (Wippe)	3 (Trichter-NS)	5 (Trichter-NS)	6
F →	2 dm ²	2 dm ²	1,0 m ²	7 dm ²	
H →	1,5 m	1,5 m	0,0 m	0,0 m	
a →	ca. 10 m	ca. 10 m	0 m	ca. 100 m	ca. 2,5 km
1997	650 ± 10		666	699	709
1998	793 ± 10		835	842	878
1999	817 ± 14	739	900	973	964
2000	991 ± 17	864	1074	1036	954

Tabelle 2: Vergleich der registrierten Niederschlagshöhe N_k nach der klassischen Methode (Trichter-NS 3) und Bestandsniederschlagshöhen N_B (Dachrinnenanordnung NS 4) für Brache und verschiedene Getreidearten. Niederschlagsdifferenz $\Delta N = N_k - N_B$.

Angebaute Frucht	Zeitraum	NS 3 N_k [mm]	NS 4 N_B [mm]	ΔN [mm]
Wintergerste	15.06.-24.08.1998	177	126 [0,71 N_k]	51
Brache	31.08.-30.11.1998	337	299 [0,89 N_k]	38
Mais	12.07.-04.10.1999	147	87 [0,59 N_k]	60
Winterweizen	13.03.-14.08.2000	565	425 [0,75 N_k]	140

Tabelle 3: Vergleich der Grundwasserneubildung (Sickerwassermenge [mm]) einzel angeordneter Lysimeter (Lys. 44 bzw. 42) mit vier im Verband angeordneter Lysimeter (Lys. 9 - 12 bzw. 17 - 20) für zwei Böden: pseudovergleyte Braunerde/Schluffe (Standort SCHEYERN) und Rendzina/Kiese (Standort FELDKIRCHEN). Abstand der Anordnungen: ca. 15 m, *) ab 16.09.1996, () Wert: Störung im Lysimeterkörper (große Luftpfeilschlüsse).

Jahr	Standort SCHEYERN		Standort FELDKIRCHEN	
	Lys. 9 - 12	Lys. 44	Lys. 17 - 20	Lys. 42
1996	331 ± 13	402	151 ± 12*)	171*)
1997	333 ± 13	(121)	264 ± 20	236
1998	209 ± 13	268	261 ± 32	299
1999	379 ± 29	380	440 ± 19	422
2000	513 ± 35	455	537 ± 13	572
2001	450 ± 61	521	523 ± 15	574
2002	424 ± 71	493	515 ± 15	602
2003	94 ± 14	147	230 ± 10	253
2004	114 ± 67	259	322 ± 19	406
2005	418 ± 49	383	483 ± 17	475

Sommerhalbjahr der Bestandsniederschlag bestimmt werden, was aber mit einem sehr großen Aufwand verbunden ist. An der GSF wurden 1998 bis 2000 Bestandsniederschläge unter verschiedenen Getreidearten bestimmt (Tabelle 2). Danach reduzieren Gerste und Weizen den Niederschlag um 25 bis 30 %, Mais um ca. 40 %.

Zu 4: Niederschläge können durch Pflanzen mit großem Blattwerk (z. B. Mais) "gebündelt" werden. Durch diese Stängelabflüsse können schon auf der Lysimeteroberfläche punktförmig Bypassflüsse induziert werden (KLOTZ 2003).

Weiterhin sollten Lysimeter nicht in der Nähe von Gebäuden angeordnet sein und keine Aufbauten enthalten, die den Niederschlag beeinflussen. Die Mantelfläche des Lysimetergefäßes sollte aber ca. 5 cm über der Bodenoberkante überstehen, damit Starkregenereignisse in den Lysimeterkörper einsickern und nicht seitlich abfließen. Mehrere Lysimeter eines Bodens sollten im unmittelbaren Verband angeordnet sein, damit örtliche Differenzen im Niederschlagsinput (und weiteren Klimaparametern), die die Grundwasserneubildung beeinflussen, vernachlässigt werden können. Tabelle

3 zeigt die Unterschiede in den Sickerwassermengen von einem einzel angeordneten Lysimeter mit vier im Verband angeordneter Lysimetern (Abstand ca. 15 m).

Lysimeterkörper

Bodenhorizonte können kleinskalig in der Struktur (Lagerung und Körnung) und der Textur (feinkörnige Linsen) sehr inhomogen aufgebaut sein. Die Folge sind stark schwankende Wassergehalte und Inhomogenitäten in der Durchströmung.

Lysimeteraufbau

Die monolithische Entnahme von Gefäßlysimetern ist nach unserer langjährigen Erfahrung nur für schluffige und sandige Böden, die weiterhin einen gewissen Feuchtegehalt aufweisen müssen, mit der "Stechzylinder-Methode" naturnah möglich.

Eine Bodenmonolith-Entnahme mit einem rotierenden Herausschneiden des Lysimeterkörpers (insbesondere von Kiesen) bringt große Störungen an der Lysimeter-Mantelfläche und verändert stark die sedimentphysikalischen Parameter.

Die Störungen an der inneren Mantelfläche bei der Monolithgewinnung von Böden treten immer auf, es sind:

- Lagerungsverdichtung der Schluffe bzw. Sande bei der Stechzylinder-Methode,
- Lagerungsauflockerung und Körnungsveränderung (insbesondere bei Kiesen: Herausbrechen größerer Körner/Steine) bei der rotierenden Monolith-Entnahme.
- Waldböden mit starker Durchwurzelung sollten nicht monolithisch entnommen werden, da die abgetrennten Wurzeln im Lysimeter verrotten und undefinierte Hohlräume schaffen.

Bei der monolithischen Entnahme von Lysimetern wäre optimal

- eine Entnahme von mindestens drei Lysimetern, um bei den Untersuchungen gewisse Fehler durch Störungen (durch Struktur- und Texturunterschiede, Horizontveränderungen) besser beurteilen zu können,
- die Lysimeter auf einem kleinen Areal zu entnehmen und

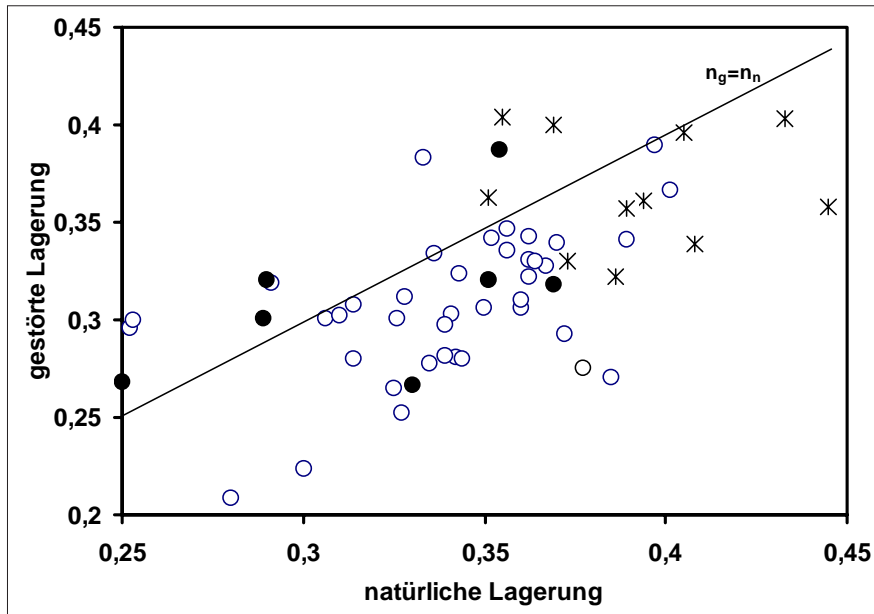


Abbildung 1: Totale Porosität n_g bei gestörter, versuchstechnisch dichter Lagerung in Abhängigkeit der totalen Porosität n_n bei natürlicher Lagerung für oberflächennah (bis 5 m Tiefe) entnommene Sande aus Bayern und aus Niedersachsen (Messpunkte o) sowie für aus größeren Tiefen (bis 200 m) entnommene Sande (•) und Schluffe/Tone aus Niedersachsen (*).

Tabelle 4: Wassergehalte der in das Lysimeter Nr. 27 eingebauten Materialien nach Versuchsende ("Momentanaufnahme"), bestimmt über den Querschnitt an den Orten N, O, S, W, Z und in Abhängigkeit der Tiefe.

Nr.	Tiefe [cm]	N	O	S	W	Z	Mittelwert
Quarzsand							
QS1	0-10	0,019	0,026	0,034	0,031	0,026	0,027 ± 0,005
QS2	10-20	0,043	0,056	0,035	0,040	0,034	0,042 ± 0,008
QS3	20-30	0,036	0,037	0,047	0,034	0,035	0,038 ± 0,005
Hausmüllverbrennungssasche							
MV1	30-40	0,147	0,158	0,135	0,139	0,149	0,146 ± 0,008
MV2	40-50	0,153	0,145	0,145	0,115	0,146	0,141 ± 0,013
MV3	50-60	0,150	0,138	0,149	0,131	0,145	0,143 ± 0,007
MV4	60-70	0,153	0,210	0,149	0,167	0,166	0,169 ± 0,022
MV5	70-80	0,183	0,182	0,136	0,159	0,176	0,167 ± 0,018
natürlicher Sand							
S1	80-90	0,077	0,075	0,070	0,091	0,071	0,077 ± 0,008
S2	90-100	0,082	0,087	0,069	0,086	0,080	0,081 ± 0,006
S3	100-110	0,083	0,089	0,071	0,083	0,069	0,079 ± 0,008
S4	110-130	0,068	0,060	0,056	0,071	0,056	0,062 ± 0,006
S5	130-150	0,050	0,071	0,063	0,066	0,073	0,065 ± 0,008
S6	150-170	0,061	0,095	0,060	0,074	0,078	0,074 ± 0,013
S7	170-200	0,083	0,094	0,068	0,079	0,075	0,080 ± 0,009

- im Areal und in unmittelbarer Umgebung der auszustechenden Lysimeter die Bodenhorizonte durch Sedimentmaterial und in der Lagerung ungestörte Proben zu überprüfen.

Der händische Aufbau von Gefäßlysimetern durch entnommene Horizont-Sedimente ist notwendig bei

- Böden, bestehend aus grobkörnigen Lockersedimenten (z. B. Rendzina),
- Waldböden (s. o.),
- unzugänglichen Böden (für die monolithische Entnahmeverrichtungen) und
- sehr trockenen feinkörnigen Böden.

Der Einbau der Horizont-Sedimente in das Gefäßlysimeter geschieht unter ver-

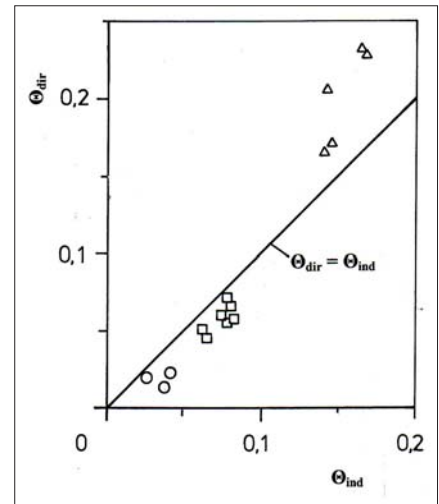


Abbildung 2: Wassergehalte, bestimmt mit einer Einstich-TDR-Sonde (θ_{dir}), in Abhängigkeit der indirekt an Stechzylindern bestimmten Wassergehalte (θ_{ind}) für einen Quarzsand (Messpunkte: □) für eine Hausmüllverbrennungssasche (Δ) und für einen Sand (o).

suchstechnisch dichter Lagerung (KLOTZ, 1992). Dabei ist zu beachten, dass

- bei bindigen Lockersedimenten der händische Einbau problematisch ist und das natürliche Aggregatgefüge sich erst nach einer längeren Durchströmzeit einstellt,
- bei sandigen Sedimenten der gestörte Einbau i. a. größere Lagerungsdichten als die natürliche Lagerung (Abbildung 1) liefert und
- bei ungleichförmigen Kiesen eventuell eine Entmischung von feinkörnigem Material und Steinen stattfinden kann.

Lysimeterdurchströmung

Die Durchströmung von Lysimeterböden ist indirekt durch Aufnahme der Wassergehaltsverteilung (KLOTZ, 2007) durch

- in das Lysimeter eingebaute Feuchte-sonden während der Betriebszeit (Methode A),
- durch scheinweisen Ausbau der Lysimeter nach Versuchsende und direkter (mit Einstich-TDR-Sonden) oder indirekter Messung (an kleinen Stechzylindern) (Methode B)

und direkt durch Messung des Durchflusses (Methode C) oder einer Tracerpassage (Methode D) über den Lysimeterquerschnitt zu bestimmen (s. Abschnitt 4).

Tabelle 5: Sickerwassermengen A [mm] in den Jahren 1997 bis 2004 und Verteilung der jährlichen Sickerwassermengen in den äußeren (a) und inneren Segmenten (i) der vier GSF-Intensivlysimeter. N = Niederschlagshöhe.

Jahr	N (mm)	SCH (Lys. 9)		KEH (Lys. 24)		HOH (Lys. 15)		FK (Lys. 18)	
		A	a/i	A	a/i	A	a/i	A	a/i
1997	725	219	0,62/0,38	289	0,40/0,60	257	0,69/0,31	266	0,56/0,44
1998	835	204	0,53/0,47	272	0,39/0,61	316	0,68/0,32	236	0,51/0,49
1999	900	339	0,55/0,45	418	0,41/0,59	368	0,69/0,31	419	0,49/0,51
2000	1121	507	0,50/0,50	618	0,44/0,56	449	0,79/0,21	527	0,53/0,47
2001	1085	341	0,56/0,44	549	0,45/0,55	450	0,81/0,19	535	0,52/0,48
2002	1086	344	0,59/0,41	501	0,41/0,59	476	0,82/0,18	502	0,5/0,50
2003	617	74	0,61/0,39	152	0,39/0,69	191	0,81/0,19	220	0,53/0,47
2004	856	67	0,64/0,36	419	0,39/0,61	350	0,71/0,29	395	0,53/0,47
97-04	7225	2095	0,56/0,44	3218	0,41/0,59	2857	0,75/0,25	3100	0,52/0,48

Tabelle 6: Die in den Segmenten 1 bis 8 des Lysimeters Nr. 18 registrierten Sickerwassermengen A und Bromid-Massen für den Zeitraum 08.05.2000 bis 01.07.2002. Σ = Gesamt-Sickerwassermenge bzw. Br-Masse im Auslauf des Lysimeters Nr. 18; W = Bromid-Wiedererhalt.

Segment	A [mm]	A [%]	Br ⁻ [g]	Br ⁻ [%]
1	125,5	13,2	1,409	11,3
2	131,3	13,8	1,372	11,0
3	78,2	8,2	1,335	10,7
4	84,5	8,9	1,465	11,8
5	94,0	9,9	1,650	13,2
6	147,5	15,5	1,917	15,4
7	104,0	11,0	0,986	7,9
8	188,2	19,7	2,321	18,6
Σ	953,9	100,0	12,45	(W = 62,3)

Methode A: Mit einer begrenzten Anzahl von einzubauenden TDR-Sonden (Erfahrungswert: maximal 6 pro m³ Boden), die zusätzliche Störungen im Lysimeterkörper verursachen, lassen sich aber keine exakten Aussagen über die Wassergehaltsverteilung machen. Dazu liefern (Einstich- und eingebaute) TDR-Sonden für Sande und Kiese zu geringe Wassergehalte (*Abbildung 2*).

Methode B: In *Tabelle 4* sind die Wassergehalte eines Altlastenlysimeters (Nr. 27) nach Beendigung der Berechnung aufgelistet:

- In den drei Horizonten liegen verschiedene Wassergehaltsbereiche vor: Quarzsand ca. 3 bis 4 %, Müllverbrennungsasche ca. 14 bis 17 %, Sand ca. 6 bis 8 %.
- In den einzelnen ausgebauten Schichten treten Wassergehaltsunterschiede bis ca. 20 % auf.

Lysimeterauslauf

Untersuchungen in großskaligen Laborsäulen mit zweifach unterteiltem Aus-

lauf, in die grobkörnige Sande homogen und versuchstechnisch dicht eingebaut waren, zeigten nur minimale Unterschiede (< 3 %) zwischen **äußerer und innerer Durchströmung**. Anders verhalten sich die Ergebnisse (*Tabelle 5*) in den vier GSF-Intensivlysimetern mit achtfach unterteilten, gleichflächigen Auslauf, in die monolithisch die Schluff- und Sand-Böden der Standorte SCHEYERN SCH, KELHEIM KEH und HOHENWART HOH und händisch der Kies-Boden des Standortes FELDKIRCHEN FK eingebaut waren:

- Die geringsten Unterschiede der außen und innen (jeweils in 0,5 m²) registrierten Sickerwassermengen treten beim Kies-Lysimeter (Nr. 18) auf,
- während bei den Bodenmonolithen (insbesondere beim Sand-Lysimeter Nr. 15) größere Unterschiede in den Sickerwassermengen außen und innen vorliegen, die dazu noch zeitlich stark schwanken.

Im händisch eingebauten Kies-Lysimeter Nr. 18 wurde im Zeitraum 08.05.2000 bis 01.07.2002 (112 Wochen) ein **Tracerversuch** mit KBr bei homogener Applikation auf der Lysimeteroberfläche durchgeführt. In den acht gleichflächigen Segmenten des Lysimeters Nr. 18 wurden wegen der inhomogenen Durchströmung verschiedene prozentuale Sickerwassermengen A und Bromidmassen registriert (*Tabelle 6*). Beide prozentuale Messgrößen unterscheiden sich, da während der Untersuchungszeit die Strömungsformen sehr unterschiedlich waren: an 48 Wochen traten nur langsame Matrixflüsse, an 64 Wochen dazu schnelle Bypassflüsse auf bei diskontinuierlicher Verteilung.

Literatur

- BÖHM, K.E., P. CEPUDER, G. EDER, J. FANK, F. FEICHTINGER, F. FÜHR, H. GAUDLITZ, M. GERZABEK, G. HINREINER, H. HOLZMANN, D. KLOTZ, S. KNAPPE, A. KRENN, A. LEIS, R. MEISSNER, W. MITTELSTADT, H.P. NACHTNEBEL, T. PÜTZ, J. RIESING, H. RUPP, J. SEEGER, G. v. UNOLD und H. VERECKEN, 2002: Lysimeter - Anforderungen, Erfahrungen, technische Konzepte. - Beiträge zur Hydrogeologie, Bd. 53, 118-232.
- KLOTZ, D., 1992: Erfahrungen mit Säulenversuchen zur Bestimmung der Schadstoffmigration. - GSF-Bericht 07/91, 118 S.
- KLOTZ, D., 2003: Können durch Stängelabflüsse an Getreidepflanzen Bypassflüsse entstehen? - Proceedings der 10. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL-Bericht, 193 - 194.
- KLOTZ, D., 2007: Durchströmung von Böden - Untersuchungen in Lysimetern. - In Vorbereitung.
- KLOTZ, D. und K.-P. SEILER, (Hrsg.), 1998: Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg. - GSF-Bericht 23/98, 56 S.