

# Alternativlösung zur Quantifizierung der Tiefensickerung in situ

Uwe Schindler<sup>1\*</sup>, Johann Fank<sup>2</sup> und Lothar Müller<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Lysimeter sind sehr aufwendig in Installation, Betrieb und Unterhaltung. Bodenhydrologische Messungen bieten auf Sickerwasserstandorten eine flexible und kostengünstige Alternative zur Quantifizierung des Bodenwasser- und Stoffhaushaltes in situ. Die vorgeschlagene Methode ermöglicht die Abschätzung der Tiefensickerung auf Standorten wo der Bodenwasserfluss unterhalb der Wurzelzone als Matrixfluss und rückstaufrei auftritt. Grundlagen sind kontinuierliche Bodenwassergehaltmessungen unterhalb der hydraulischen Scheide und eine an der Wasserbilanz kalibrierte hydraulische Leitfähigkeitsfunktion. Die Beurteilung der Eignung dieser Methode erfolgte im Vergleich mit Ergebnissen aus Lysimetermessungen der Anlagen in Dedelow und in dem Versuchsfeld Wagna. Für die Prüfung der Übereinstimmung der Ergebnisse wurde der Willmott Index of Agreement herangezogen. Die d-Werte variierten zwischen  $d = 0,64$  und  $d = 0,97$  und bestätigten die grundsätzliche Eignung dieser alternativen Feldmethode zur Abschätzung von Sickerwasserflüssen aus bodenhydrologischen Messungen.

## Summary

Lysimeters are extensive in installation, operation and maintenance. Soil hydrological measurements provide a flexible and cost saving alternative for quantifying soil water and solute balance in situ. The proposed method enables the estimation of ground water recharge at sites with matrix flow conditions beneath the root zone and without perched water influence. Basics are continually soil water content measurements beneath the zero flux plane and a hydraulic conductivity function calibrated to the soil water balance. The evaluation of this method occurred in comparison with discharge measurements of lysimeters of Dedelow and Wagna lysimeter stations. The Willmott Index of Agreement was used for the comparison of measured with calculated data. The d-values varied between  $d = 0.64$  and  $d = 0.97$  and confirmed the principle applicability of this alternative field method for estimation seepage fluxes from soil hydrological measurements in situ.

## Einleitung

In der Agrar- und Umweltforschung werden Lysimeter zur Erfassung und Aufklärung von Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanze, Wasser und Atmosphäre unter Berücksichtigung des Bewirtschaftungsmanagements verwendet. In Abhängigkeit von der Konstruktion, der Bewirtschaftung und der Lage der Lysimeter im Gelände können die Ergebnisse mit so genannten „Lysimeterfehlern“ behaftet sein (KASTANEK 1995, FANK und UNOLD 2005, SCHINDLER et al. 2008). Monolithisch entnommene, wägbare, mit bodenhydrologischer Messtechnik ausgerüstete und im Schlag integrierte Lysimeter liefern die sichersten Ergebnisse im Vergleich zu den unter natürlichen Verhältnissen ablaufenden Prozessen (FANK und UNOLD 2005, KNOBLAUCH und SWATON 2007).

Bei der Entwicklung und Validierung von Modellen (Wachstumsmodelle, Modelle zum Bodenwasser- und Stoffhaushalt) und Messmethoden wird häufig auf Lysimeterergebnisse zurückgegriffen. Aufgrund der geringen Flexibilität und des hohen Preises von Lysimetern ist die Datenbasis bezüglich Landnutzung, Bewirtschaftung, Boden, Klima u.a. jedoch eingeschränkt.

Bodenhydrologische Feldmessungen (RICE 1975, KASTANEK 1995, SCHINDLER und MÜLLER 1998) können eine kostengünstige und flexible Alternative zur Quantifizierung von Wasser- und Stoffflüssen unter natürlichen Boden- und Landnutzungsbedingungen bieten. Ihre Eignung soll nachfolgend im Vergleich mit Lysimeterergebnissen geprüft werden

## Material und Methode

### *Konzept zur Abschätzung der Sickerwasserdynamik aus bodenhydrologischen Feldmessungen*

Die Bodenwasserdynamik in der durchwurzelten Bodenzone ist sehr variabel. In Abhängigkeit von den Niederschlags- und Verdunstungsbedingungen ist ein ständiger Wechsel von Infiltration, Sickerwasserfluss, kapillarem Wasseraufstieg und Pflanzenwasserentzug vorhanden. Mit zunehmender Bodentiefe laufen diese Prozesse langsamer und gedämpft ab (VOIGT 1980, KUTILEK und NIELSEN 1994).

Die Grundidee für die Abschätzung der Sickerwasserdynamik aus bodenhydrologischen Messungen bestand deshalb

<sup>1</sup> Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF), Institut für Landschaftswasserhaushalt, Eberswalder Str. 84, D-15374 MÜNCHENBERG

<sup>2</sup> Joanneum Research GmbH, Institut für Wasser Ressourcen Management, Elisabethstraße 16, A-8020 GRAZ

\* Ansprechpartner: uschindler@zalf.de

darin, in Bodentiefen zu messen, wo keine Pflanzenwasserentnahme, direkt oder aus kapillarem Wasseraufstieg, mehr erfolgt und damit Messwertänderungen (Saugspannung und Wassergehalt) ausschließlich auf Veränderungen des Sickerwasserflusses zurückzuführen sind (SCHINDLER und MÜLLER 1998). Diese Bedingungen sind unterhalb der hydraulischen Scheide (RENGER et al. 1970) erfüllt. Auf den meisten Acker- und Grasstandorten befindet sich die hydraulische Scheide gewöhnlich dauerhaft oberhalb 3m,

auf Waldstandorten oberhalb 5 m Tiefe (SCHINDLER et al. 2008). Entsprechend wurden die Messtiefen gewählt.

Vorgehensweise (Abbildung 1 Position A bis H):

Wassergehalt ( $\Theta$ ) und Druckhöhe (h) werden unterhalb der hydraulischen Scheide kontinuierlich gemessen und aufgezeichnet (Abbildung 1, A). Auf Acker- und Grasstandorten wird gewöhnlich in 3m Tiefe und auf Waldstandorten in 5m Tiefe gemessen. Die Tensiometer sind frostsicher. Aufgrund

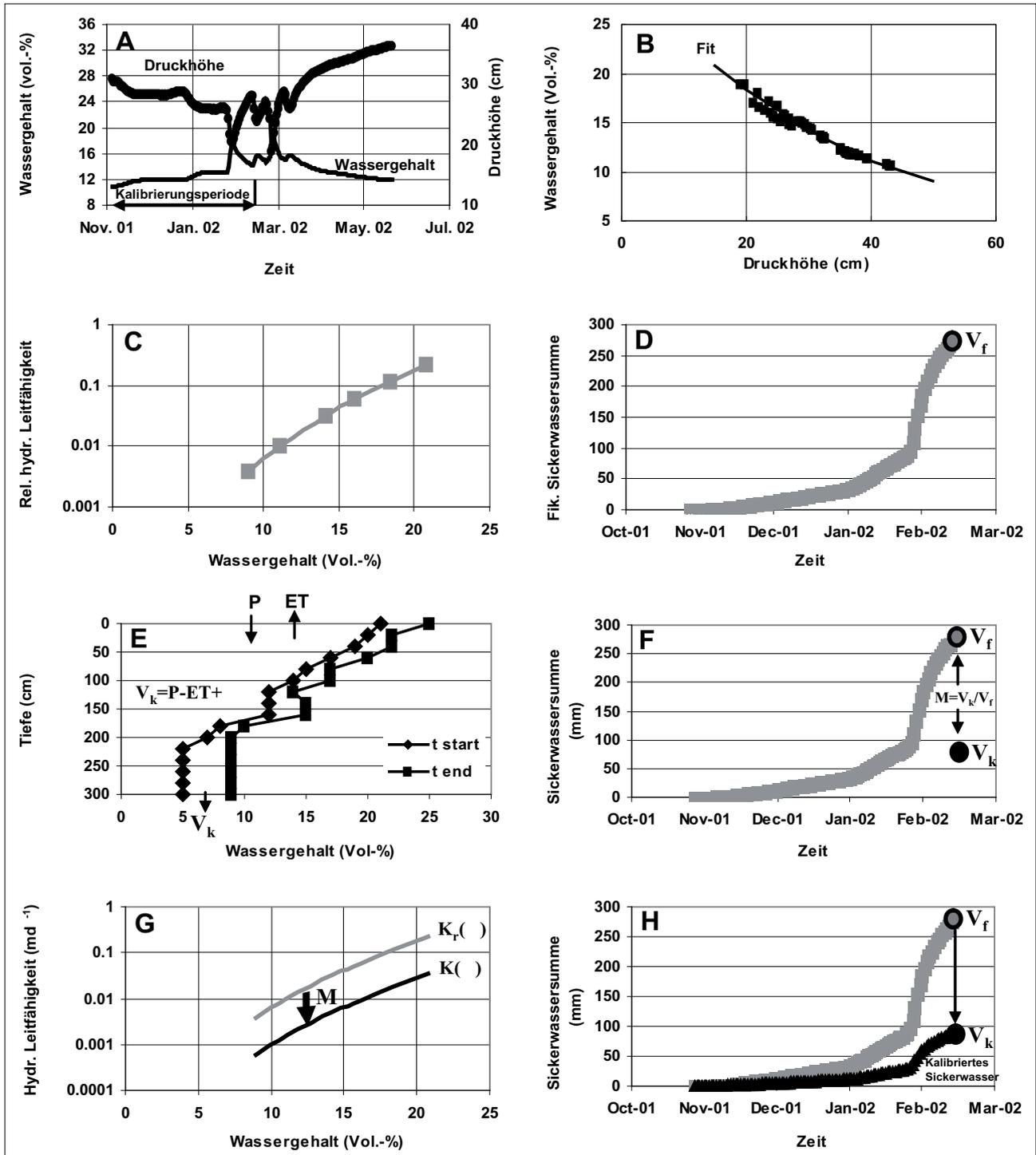


Abbildung 1: Prozedur zur Sickerwasserberechnung aus bodenhydrologischen Messungen.

der langsamen und kontinuierlichen Änderung der Messwerte sind Messintervalle in Tagesintervallen ausreichend (SCHINDLER et al. 2008). Die zusätzliche Messung der Druckhöhe in geringer Höhenentfernung von der Messtiefe (10 oder 20 cm) ermöglicht die Berechnung des hydraulischen Gradienten ( $i$ ) und erlaubt den konkreten Nachweis, ob sich die Messtiefe zu dem jeweiligen Zeitpunkt unterhalb der hydraulischen Scheide befunden hat. Die hydraulische Scheide grenzt die Bodenzone mit Pflanzenwasserentnahme (oberhalb) von der Sickerwasserzone (unterhalb) ab. An der hydraulischen Scheide ist der hydraulische Gradient  $i=0$ , darunter ist  $i < 0$ , darüber  $i > 0$ . Gegebenenfalls können so Perioden mit aufwärts gerichteter Wasserbewegung und Pflanzenwasserentnahme ausgegrenzt werden.

Die Wasserretentionsfunktion - Beziehung zwischen Druckhöhe und Bodenwassergehalt - wird an Gl. 1 (VAN GENUCHTEN 1980) gefittet (Pos. B in *Abbildung 1*), und die relative hydraulische Leitfähigkeitsfunktion (Gl. 2) wird unter Verwendung des Mualem-Modells (MUALEM 1976) berechnet.

$$\Theta(h) = \Theta_r + \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^m} \quad (1)$$

$\Theta$  - Wassergehalt,  $\Theta_r$  - Restwassergehalt,  $\Theta_s$  - Sättigungswassergehalt,  $h$  - Druckhöhe,  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$  ( $m=1-1/n$ )- Funktionsparameter

$$\frac{K(h)}{K_s} = K_r(h) = \frac{\left\{1 - (\alpha h)^{n-1} \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha h)^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (2)$$

$K(h)$  - hydraulische Leitfähigkeit als Funktion der Saugspannung,  $K_s$  - gesättigte hydraulische Leitfähigkeit,  $K_r$  - relative hydraulische Leitfähigkeit

Durch Substitution von  $h$  in Gl. 2 durch Gl. 3 erhält man die hydraulische Leitfähigkeit als Funktion des Wassergehaltes  $K(\Theta)$  (Pos. C). Durch die Verwendung der  $K(\Theta)$ -Funktion wird der Einfluss von Hysterese minimiert. Eine Extrapolation der  $K(\Theta)$ -Funktion in Richtung Sättigung ist unzulässig.

$$h = f(\Theta) = \left\{ \left[ \left( \frac{\Theta_s - \Theta_r}{\Theta - \Theta_r} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^{-\alpha} \quad (3)$$

Die Berechnung fiktiver Sickerwasserraten ( $v_r$ ) erfolgt nach DARCY ( $v_r = K_r(\Theta)$ ) zunächst mit einem fiktiven  $K_{s^*}$ -Wert  $=1$  ( $LT^{-1}$ ) aus den gemessenen Wassergehaltswerten und der  $K_r(\Theta)$  Funktion unter Zugrundelegung eines Einheitsgradienten. Die Zulässigkeit dieser vereinfachten Verfahrensweise wird bestätigt durch KUTILEK und NIELSEN (1994) und wurde im Fall der Sickerwasserabschätzung aus bodenhydrologischen Messungen von SCHINDLER und MÜLLER (1998) geprüft. Durch Summation der täglichen

fiktiven Sickerwasserraten ergibt sich die fiktive Sickerwassersumme ( $V_f$ , Pos. D).

Durch Kalibrierung an der Wasserbilanz wird im folgenden die fiktive Sickerwassersumme ( $V_f$ ) in ein reales Niveau transformiert. Dazu wird die Wasserbilanz (Sickerwasserabfluss ( $V_k$ ) = Niederschlag (P) - Verdunstung (ET) + Bodenwasserspeicheränderung ( $\Delta\Theta$ )) in einer möglichst frostfreien Herbst/Winterperiode ermittelt (Pos. E). Eine Herbst/Winterperiode wird gewählt, um den Fehler bei der Verdunstungsberechnung (nach IVANOV in WENDLING et al. (1991)) möglichst gering zu halten. Der Niederschlag wird am Messplatz erfasst und der Bodenspeicher durch Bodenwassergehaltsmessungen im Profil zum Beginn ( $t_{\text{start}}$ ) und Ende ( $t_{\text{end}}$ ) der Kalibrierungsperiode quantifiziert (Pos. E). Der Quotient aus  $V_k$  und  $V_f$  ergibt den Matchingfaktor Gl. 4 (Pos. F) zur Transformation der relativen hydraulischen Leitfähigkeitsfunktion  $K_r(\Theta)$  in ein reales Niveau  $K(\Theta)$  (Pos. G). Die so kalibrierte  $K$  Funktion auf der Basis von Gl. 2, jedoch unter Substitution von  $h = f(\Theta)$  entsprechend Gl. 3, wird dann schließlich verwendet für die Berechnung der gesuchten täglichen Sickerwasserraten (Gl. 5, Pos. H).

$$M = \frac{V_k}{V_f} \quad (4)$$

$$v = M \cdot K_r(\Theta) = \frac{V_k}{V_f} \frac{\left\{1 - (\alpha \cdot f(\Theta))^{n-1} \left[1 + (\alpha \cdot f(\Theta))^n\right]^{-m}\right\}^2}{\left[1 + (\alpha \cdot f(\Theta))^n\right]^{\frac{m}{2}}} \quad (5)$$

### Standort und Lysimeter

Basis für die Beurteilung der Methode zur Sickerwasserberechnung aus bodenhydrologischen Messungen war der Vergleich mit gemessenen Lysimeterabflüssen. Dafür wurden Ergebnisse von Lysimetern der Anlage in Dedelow (SCHINDLER et al. 2001) und des Versuchsfeldes Wagna (FANK und UNOLD 2005) herangezogen. Als Basis für die Kalibrierung wurde der Lysimeterabfluss direkt und nicht der Umweg über die Wasserbilanz (*Abbildung 1*, E) gewählt. Das ist legitim, da es zunächst um die Prüfung der Verfahrensweise (*Abbildung 1*, A,B,C,D,F,G,H) geht und nicht um die Ermittlung einer Sickerwassersumme aus der Wasserbilanz (*Abbildung 1*, E). Der Bodenaufbau der Lysimeter und Bodenkennwerte sind in *Tabelle 1* zusammengestellt.

### Lysimeter Dedelow (Uckermark, Deutschland)

Von den 32 Lysimetern (geschützt, Gravitationsabfluss, Grundfläche  $1 \times 1$  m, Tiefe 2 m) wurde ein Lysimeter (Sandbraunerde, *Tabelle 1*) für die Vergleichsuntersuchungen ausgewählt. Die Messung der Bodenfeuchte erfolgte mit einer TDR Sonde in 1,85 m Tiefe. Die Druckhöhe wurde mit Tensiometern in 1,6 und 1,85 m Tiefe erfasst. Der Abfluss wurde täglich gemessen. Bei geringen Abflüssen erfolgte die Messung 2 mal wöchentlich. Kalibrierungsperiode war der Zeitraum vom 1. November 2001 bis 15. Februar 2002. Die Validierung erfolgte vom 16. Februar 2001 bis 7. Mai 2008.

Tabelle 1: Schichtung und Bodeneigenschaften der Lysimeter

Standort	Horizont	Tiefe cm	OS %	DBD g cm <sup>-3</sup>	Ton %	Schluff %	Sand %	Grus %
Dedelow	Ap	0 - 35	1,1	1,52	4	24	71	1
	Bv	35 - 115	0,1	1,63	9	28	62	1
	C	115 - 200	0,1	1,65	1	4	93	2
Wagna, KON	Ap	0 - 30	1,8	1,51	20	33	44	3
	B	30 - 70	0,9	1,53	18	28	54	0
	C	70 - 190	0,1		1	2	33	64
Wagna, BIO	A	0 - 30	2,2	1,53	19	34	45	2
	B	30 - 110	1,3	1,55	14	28	57	1
	C	110 - 190	0,1		0	1	30	69

Ton - < 0,002 mm, Schluff - 0,2 - 0,63 mm, Sand - 0,63 - 2 mm, Grus - 2 - 63 mm

### Lysimeter Versuchsfeld Wagna (Steiermark, Österreich)

Von den beiden wägbaren Lysimetern (rund, monolithisch, Grundfläche 1 m<sup>2</sup>, Tiefe 1,9 m, Abfluss unterdruckgesteuert mit Saugkerzen) wurde der gesamte Messzeitraum von Oktober 2004 bis März 2008 (Lysimeter BIO) und Januar 2005 bis März 2008 (Lysimeter KON) für den Vergleich herangezogen. Die Lysimeter unterschieden sich hinsichtlich der Bewirtschaftung (konventionell -KON und biologisch -BIO) und dem Bodenaufbau (Tabelle 1). Unter einer Lockersediment-Braunerde beginnt auf dem konventionell bewirtschafteten Lysimeter die Schotterunterlagerung bereits in 0,7 m Tiefe, während auf dem Lysimeter mit biologischer Bewirtschaftung die Feinbodenschicht bis 1.1 m reicht. Tensiometer und TDR Sonden befinden sich in 35, 60, 90 und 180 cm Tiefe. Für die Sickerwasserberechnung wurden ausschließlich die Messwerte in 180 cm Bodentiefe verwendet. Für die Kalibrierung wurde jeweils die Anfangsperiode gewählt. Bei Lysimeter BIO war das der Zeitraum vom Oktober 2004 bis März 2005 und bei Lysimeter KON vom 1. Januar bis 30. April 2005.

Für den Vergleich der gemessenen mit den aus Bodenwassergehaltswerten berechneten Sickerwasserraten wurde der Willmott Index of Agreement Gl. 6 (LEGATES and McCABE 1999) herangezogen. Der Index d variiert zwischen 0 (schlechte Übereinstimmung) und 1 (perfekte Übereinstimmung)

$$d = 1 - \frac{\sum(O_i - P_i)^2}{\sum(|P_i - O_m| + |O_i - O_m|)^2} \quad (6)$$

O<sub>i</sub> - observed values, P<sub>i</sub> - predicted values, O<sub>m</sub> - mean observed value

## Ergebnis

### Vergleich von gemessenen und berechneten Sickerwasserraten

Die Ergebnisse (Abbildung 2) zeigen eine unterschiedlich gute Übereinstimmung der gemessenen mit den aus Wassergehaltswerten berechneten Sickerwasserraten. Während im Lysimeter Dedelow die gemessenen Sickerwasserraten, sowohl in seiner Dynamik als auch in der Höhe der Ein-

zelereignisse gut mit den aus den bodenhydrologischen Messungen berechneten übereinstimmen (d = 0,97), zeigte sich bei den Lysimetern des Versuchsfeldes Wagna ein differenziertes Bild. Bei Sickerwasserraten zwischen 1 bis etwa 4 mm d<sup>-1</sup> war die Übereinstimmung von gemessenen mit berechneten Werten auch hier gut. Bei höheren Sickerwasserabflüssen traten jedoch teilweise deutliche Unterschiede auf, die auch dann zu Abweichungen der Summenkurve führten. Das ist insbesondere im Lysimeter Wagna KON zu erkennen (Abbildung 2, links unten), wo in der Kalibrierungsperiode vom 1. Januar 2005 bis 30. April 2005 einige Sickerwasserflüsse aufgetreten sind, die nicht durch charakteristische Wassergehaltsänderungen abgebildet wurden. Insgesamt betrachtet wurden die Sickerwasserraten bei Werten des Willmott Index of Agreement von d = 0,64 (Lysimeter, KON) und d = 0,91 (Lysimeter, BIO) jedoch auch für die Lysimeter vom Versuchsfeld Wagna mit Schotterunterlagerung in befriedigender Güte abgebildet.

Die Messtiefe in den Lysimetern war gegenüber den bodenhydrologischen Messungen in situ geringer. Die Prüfung durch den hydraulischen Gradienten ergab jedoch, dass die Messtiefe in allen Lysimetern dauerhaft unterhalb der hydraulischen Scheide lag.

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Vergleichsuntersuchungen zeigten, dass auch diese sehr einfache und kostengünstige Verfahrensweise durchaus Potential für die Anwendung zur Sickerwasserabschätzung in situ hat. Der Bodenwassergehalt ist dafür als Indikator geeignet, vorausgesetzt, der Sickerwasserabfluss erfolgt als Matrixfluss und rückstaufrei wie in dem Dedelower Lysimeter. Die Wagna Lysimeter sind schotterunterlagert. Trotzdem erfolgte der Abfluss im wesentlichen als Matrixfluss. Unter diesen Bedingungen war auch hier der Wassergehalt als Indikator für die Sickerwasserberechnung geeignet. Die bei hohen Abflüssen aufgetretenen Unterschiede zwischen gemessenen und aus Wassergehaltsänderungen berechneten Sickerwasserraten sind aber sehr wahrscheinlich in der Beteiligung präferenzialer Flüsse am Abflussgeschehen zu vermuten. Daraus resultiert, dass die Kalibrierung nicht zuverlässig ist. Die folgende Abflussberechnung kann dadurch fehlerbehaftet sein, wie die Ergebnisse der Lysimeter vom Versuchsfeld Wagna und hier besonders vom Lysimeter KON zeigten.

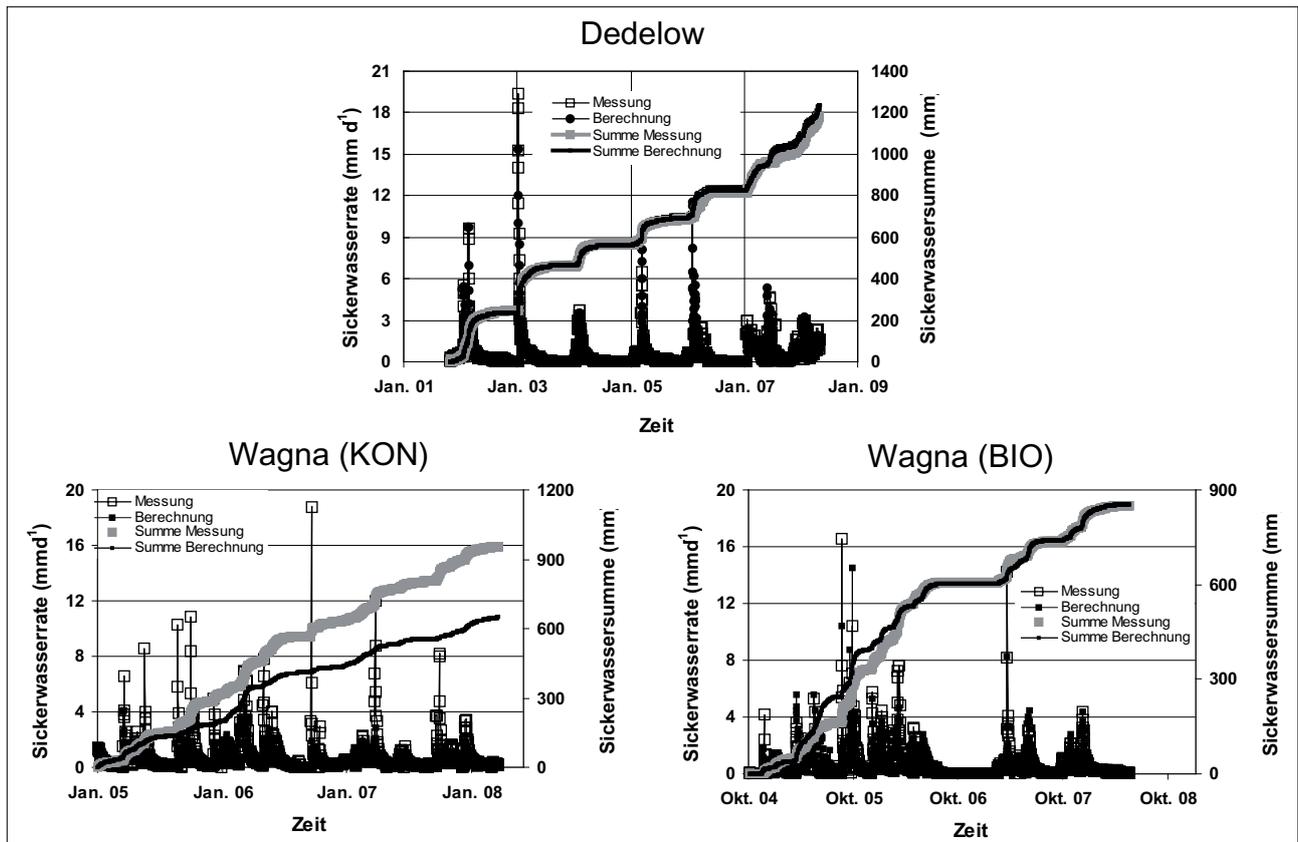


Abbildung 2: Sickerwasserverlauf gemessen und berechnet des Lysimeters Dedelow und der Lysimeter KON und BIO des Versuchsfeldes Wagna.

Der Boden ist ein sehr komplexes und variables System. Boden- oder Sickerwasserverhältnisse können kleinräumig heterogen sein (JURY et al. 1991). Das ist die Regel, nicht die Ausnahme. Für die Anwendbarkeit der vorgestellten Methodik ist diese Tatsache jedoch nicht entscheidend. Bedeutsam ist jedoch, dass die relative Sickerwasserdynamik in der Messtiefe durch die Bodenwassergehaltsänderungen auch unter Bedingungen kleinräumiger Heterogenität vergleichbar abgebildet wird, und sich die bodenhydrologischen Eigenschaften am Messpunkt im Zeitverlauf nicht ändern. Damit ist gemeint, dass nicht die absoluten Wassergehaltswerte und Wassergehaltsänderungen entscheidend sind, sondern dass die Dynamik der relativen Wassergehaltsänderungen vergleichbar sein muss. Der Beleg dafür wurde bei SCHINDLER et al., 2008 gegeben. Zeitreihenanalysen werden zukünftig weitere Klarheit bringen. Die Anpassung an für den Messpunkt „reale“ Sickerwasserraten erfolgt dann über die Kalibrierung an der Wasserbilanz.

Bodenhydrologische Messungen zur Sickerwasserabschätzung sollten als Langzeituntersuchungen betrieben werden. Die Kalibrierung ist ein zentraler Punkt der Methoden-anwendung. Zur Erhöhung der Ergebnissicherheit sollte sie in zeitlichen Abständen wiederholt erfolgen. Die relative Sickerwasserdynamik kann jedoch auch bei leicht fehlerhafter Kalibrierung wertvolle Informationen zu seiner zeitlichen Veränderung infolge Änderung der äußeren Randbedingungen (Klimaeinfluss, Landnutzungsänderung) liefern, vorausgesetzt die Messwerte sind fehlerfrei und nicht driftbehaftet.

Die Vorzüge des Verfahrens liegen:

- in seiner einfachen und kostengünstigen Anwendung.
- in der Flexibilität.
- es sind nur bodenhydraulische Kennwerte der Messtiefe erforderlich. Diese werden aus den Messwerten selbst abgeleitet.
- ist das Verfahren kalibriert sind keine Informationen mehr erforderlich zum Niederschlag, zur Verdunstung, zum Boden, zur Landnutzung und zur Bewirtschaftung.
- bei Kenntnis des Niederschlages und der Bodenspeicheränderung kann die Verdunstung errechnet werden. Das gilt allerdings nur für Betrachtung über längere Perioden (> 1 Monat).

Einschränkungen und Erschwernisse:

- die Anforderungen an die Güte der Wassergehaltswerte sind hoch. Heutige Messsysteme (TDR, FDR) bieten jedoch die Möglichkeit der Qualitätssicherung.
- das Verfahren ist sensitiv gegenüber fehlerhaften Wassergehaltswerten und vor allem Messwertdrift.
- werden Wassergehaltssensoren ausgetauscht ist eine erneute Kalibrierung erforderlich.
- die Qualität der Kalibrierung ist ein sensitiver Part für die Güte der Sickerwasserabschätzung.
- die Anwendbarkeit ist begrenzt auf Sickerwasserstandorte.
- präferenzielle Flüsse können nicht abgebildet werden.

Eine automatische Messwertprüfung auf Absolutwert und Drift und die Erarbeitung von Plausibilitäts- und Prüfalgorithmen in Abhängigkeit vom Niederschlag und einer abgeschätzten Verdunstung würde die Sicherheit und Stabilität des Verfahrens erhöhen und eine Anwendung im Rahmen von Dauermessstellen für Landes- und Umwelteinrichtungen ermöglichen.

## Literatur

- FANK, J. und G. von UNOLD, 2005: Wägbare monolithische Lysimeter unter maschineller Feldbewirtschaftung (Wagna, Austria). Bericht 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 5.-6.4.2005, 55-60.
- JURY, W.A., W.R. GARDNER and W.H. GARDNER, 1991: Soil Physics. Wiley and Sons, 5<sup>th</sup> Edition, pp. 352.
- KASTANEK, F., 1995: Kritische Bemerkungen zur Verwendung von Lysimetern. Bericht 5. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 25.-26. April 1995, 93-102.
- KNOBLAUCH, S. und T. SWATON, 2007: Erweiterung der Lysimeteranlage Buttelstedt für die Bestimmung von standortabhängigen Schwellenwerten für N-Salden. Bericht 12. Gumpensteiner Lysimetertagung, BAL Gumpenstein, 17.-18. April 2007, 35-41.
- KUTILEK, M. and D.R. NIELSEN, 1994: Soil hydrology. GeoEcology textbook, Cremlingen-Destedt: Catena Verlag, pp 370.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12(3), 513-522.
- RENGER, M., W. GIESEL, O. STREBEL und S. LORCH, 1970: Erste Ergebnisse zur quantitativen Erfassung der Wasserhaushaltskomponenten in der ungesättigten Bodenzone. Z. f. Pflanzenern. und Bodenkd. 1.
- RICE, R.A., 1975: Diurnal and seasonal soil water uptake and flux within a bermudagrass root zone. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 39, 394-398.
- SCHINDLER, U. and L. MÜLLER, 1998: Calculating deep seepage from water content and tension measurements in the vadose zone at sandy and loamy soils in north-east Germany. Archives of Agronomy and Soil Science 43, 233-243.
- SCHINDLER, U., G. VERCH, M. WOLFF und L. MÜLLER, 2008: Bedeutung der unteren Randbedingung in Lysimetern für die Sickerwassermessung. Kurzfassung der Vorträge zur Tagung: Wasserkreislaufparameter, 31.03.-01.04.2008, Schloss Seggau bei Leibnitz (Österreich), 31-34.
- SCHINDLER, U., L. MÜLLER, F. EULENSTEIN and R. DANNOWSKI, 2008: A long-term hydrological soil study on the effects of soil and land use on deep seepage dynamics in northeast Germany. Archives of Agronomy and Soil Science 54, 451-463.
- VAN GENUCHTEN, M.Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 44, 892-898.
- VOIGT, H.J., 1999: Hydrogeochemie. Springer Verlag, Berlin, pp. 310.
- WENDLING, U., H.G. SCHELLIN und M. THOMÄ, 1991: Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Z. f. Meteorologie 41, H.6, 1-16.