

# Sickerwasserforschung mit Lysimetern und ihre Eignung zur Messung von „Climate Change“ Effekten

R. MEISSNER, J. SEEGER, H. RUPP, H. XIAO und H. BORG

## Summary

Groundwater is the main source of drinking water in Germany. Starting from the hypothesis that climate change may significantly influence the amount of seepage water and thus groundwater recharge, strategies for monitoring this process are presented and discussed. Results from lysimeters, some of which already cover long periods, are particularly well suited to register changes in the amount and quality of seepage water. Here, newly developed weighable gravitation lysimeters are introduced and discussed. Examples of their high weighing precision are given. These devices can be used to simulate climate scenarios. Together with existing long term records they are an important tool for the validation of models.

## Zusammenfassung

Ausgehend von der Hypothese, dass Klimaänderungen die Sickerwasserbildung und damit die Grundwasserneubildung als Hauptquelle der Trinkwasserversorgung in Deutschland signifikant beeinflussen können, werden Strategien zur messtechnischen Überwachung dieses Phänomens vorgestellt und diskutiert. Lysimetermessergebnisse, die zum Teil bereits langjährig vorliegen, erscheinen besonders geeignet, um Veränderungen bei der Sickerwasserbildung nach Menge und Beschaffenheit zu registrieren. Neu entwickelte wägbare Gravitationslysimeter werden vorgestellt und diskutiert. Anhand von Beispielen wird die hohe Genauigkeit der mit diesen Lysimetern messbaren Parameter erläutert. Die Geräte können genutzt werden, um Klimaszenarien zu simulieren. In Verbindung mit längerfristig vorliegenden Messreihen stellen sie eine wesentliche Stützstelle zur Validierung von entsprechenden Modellen dar.

## Einleitung

Das Grundwasser stellt die Hauptquelle für die Trinkwasserversorgung in

Deutschland dar. Neben echtem Grundwasser (etwa 62,9%) werden dafür auch Uferfiltrat (ca. 6%) und künstlich angereiches Grundwasser (ca. 9,5%) verwendet. Der Schutz des Grundwassers ist daher von hoher gesellschaftlicher Relevanz. Grundwasserneubildung findet überwiegend auf den in den letzten Jahrzehnten durch immer umfassendere Intensivierungsmaßnahmen und weitere anthropogene Einträge belasteten land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (ca. 83% der Bodenfläche der Bundesrepublik Deutschland) statt. Ein seit vielen Jahren in Deutschland bestehendes Lysimetermessnetz trägt zur Aufrechterhaltung der Grundwasserneubildungsfunktion des Bodens bei. Das Ziel des Beitrages besteht darin, auf die Möglichkeiten zur Nutzung von langjährig aus Lysimeteruntersuchungen vorliegenden Messreihen über die Sickerwasserbildung bei sich verändernden Klimabedingungen hinzuweisen. Es werden neue Techniken zur ungestörten monolithischen Entnahme von großvolumigen Bodenkörpern und deren Einbau in wägbaren Lysimetern vorgestellt. Anhand von Beispielen wird die Messgenauigkeit der mit diesen Geräten erfassbaren Parameter dargestellt. Abschließend werden Möglichkeiten zur Simulation von Klimaänderungen mit Hilfe von Lysimetern diskutiert und Schlussfolgerungen zum zukünftigen Forschungsbedarf abgeleitet.

## Sickerwasserrichtlinie und Lysimeter

Die Bedeutung der Sickerwasserforschung wird an der gegenwärtig von der LAWA initiierten Bearbeitung der SICKERWASSERRICHTLINIE (2003) sichtbar. Auch zukünftig ist es notwendig, die bereits seit vielen Jahren laufenden Untersuchungen zur Ermittlung der Sickerwasserbildung nach Menge und Beschaffenheit fortzusetzen. Hierzu gibt

es unterschiedliche Möglichkeiten. Neben indirekten Verfahren (hydrologische Messplätze, ausgestattet mit Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte, Tracermethoden) kommen auch direkte Messverfahren zum Einsatz.

Langjährig bewährt hat sich der Einsatz von Lysimetern unterschiedlicher Bauart. Obgleich sie im In- und Ausland vielfach im Einsatz sind, gelten sie aufgrund der mit ihrer Errichtung verbundenen Aufwendungen als vergleichsweise teure Versuchsanlagen. Jedoch ist in den letzten Jahren wieder ein verstärkter Trend zum Einsatz von Lysimetern zu verzeichnen. Als Ursachen werden hierfür die bei alternativen Messverfahren nicht exakt erfassbaren Kenngrößen des Wasserhaushaltes und die daraus resultierenden Fehlermöglichkeiten für weitere Berechnungen sowie technische Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Lysimetrie angesehen.

Im Rahmen der Sickerwasserforschung werden Lysimeter unterschiedlicher Bauart seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Als Lysimeter wird nach DIN 4049 (1994) eine Anlage zum Erfassen von Sickerwasser als Grundlage zur Mengen- und Stoffbilanz in Abhängigkeit von Boden, Gestein, Bewuchs, lokalem Klima und anderen Randbedingungen bezeichnet. Im Allgemeinen bestehen Lysimeter aus einem mit Erdboden gefüllten Behälter und einer Auffang- und Messvorrichtung für das am Boden austretende Wasser (DVWK, 1980). Da nur mit Hilfe von Lysimetern eine direkte Bestimmung der durch den Boden perkolierenden Wassermenge einschließlich der darin enthaltenen Nähr- und Schadstoffe möglich ist, gestatten derartige Messungen eine im Vergleich zu anderen Methoden relativ zuverlässige Kalkulation der in Richtung Grundwasser transportierten Stofffrachten (KLOCKE et al., 1993; HILLEL, 2004). Sind die Lysimeter wägbar, kann

**Autoren:** Prof. Dr. Ralph MEISSNER, Dipl.Chem. Juliane SEEGER, Dr. Holger RUPP, Huijie XIAO, Helmholtzzentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, Department Bodenphysik, Lysimeterstation, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG und Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrartechnik und Landeskultur, ralph.meissner@ufz.de, Prof. Dr. Heinz BORG, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

aus der Gewichtsveränderung die Evapotranspiration direkt bestimmt werden (YOUNG et al., 1996). Aufgrund der genannten Eigenschaften werden Lysimeterversuchsergebnisse häufig zur Ableitung und Kalibrierung von Wasser- und Stoffhaushaltsmodellen genutzt (MEISSNER et al., 1999, 2000a; WRIEDT, 2004). Unter Bezug auf die hier abgehandelte Thematik ist speziell darauf hinzuweisen, dass in Europa, vor allem in Deutschland, ein gut ausgebautes Lysimetermessnetz existiert (KRETZSCHMAR, 1999; LANTHALER und FANK, 2005). In der Regel werden an diesen Standorten auch relevante meteorologische Parameter regelmäßig erfasst. Da Lysimeteranlagen langfristig betrieben werden, erscheinen sie für die Erfassung von Klimaänderungen ebenfalls geeignet. Hierzu trägt auch der besonders in den letzten Jahren zu verzeichnende technische Fortschritt beim Bau und Betrieb von Lysimetern bei.

### Technologie zur Entnahme von ungestörten Bodensäulen

Für detaillierte Untersuchungen des Wasser- und Stoffhaushalts an Böden in Lysimetern ist die Gewinnung von ungestörten Bodensäulen zu empfehlen. Um Kosten zu sparen und Bodenmonolithe ungestört in situ entnehmen zu können, wurde ein Entnahmeverfahren basierend auf einem Fräsverfahren entwickelt und patentiert (KESSLER et al., 2001; MEISSNER et al. 2005). Eine in Einzelteilen zerlegbare Rahmenkonstruktion in Form eines Dreibecks wird verwendet, um das Lysimetergefäß am Entnahmestandort lotrecht auszurichten und während des Schneidevorgangs in seiner Lage vertikal zu fixieren. Diese Entnahmetechnologie wurde bereits mehrfach erfolgreich auf unterschiedlichen Entnahmestandorten (von Sandböden über Schotter- bis Tonböden) und für Lysimeter unterschiedlicher Dimension (Oberfläche 0,5 bis 2 m<sup>2</sup>, Tiefe 1,0 bis 3,0 m) eingesetzt. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie besteht darin, dass der Entnahmestandort nur geringfügig beschädigt wird (kleine Baugrube, keine Baustraße erforderlich). Die Zeit zur Gewinnung eines Bodenmonolithen ist abhängig von der Größe und der Bodenart. In der Regel benötigt man 1 bis 2 Werkzeuge, um ein Lysimeter monolithisch zu befüllen.

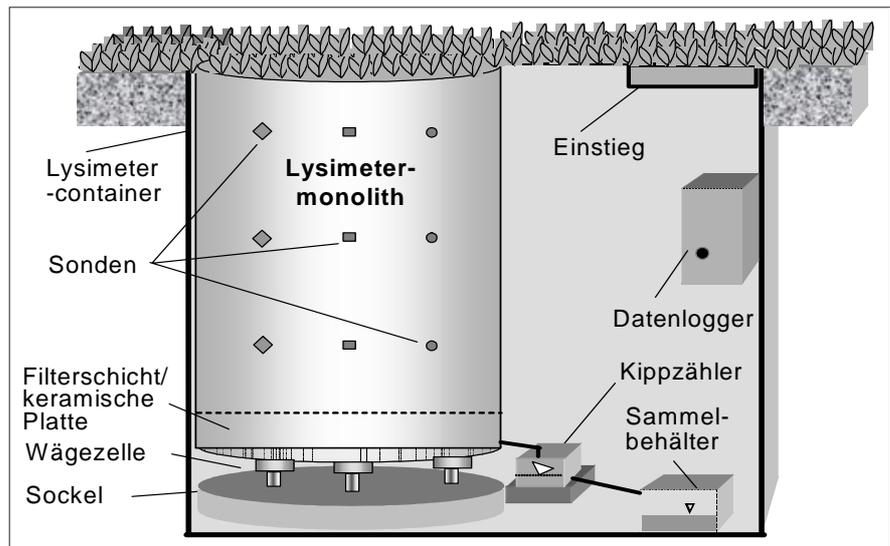


Abbildung 1: Prinzipskizze eines wägbaren Gravitationslysimeters.

### Gravitationslysimeter

Gravitationslysimeter bestehen aus dem mit Boden gefüllten Lysimetergefäß und einer am unteren Ende eingebauten Filterschicht zur Verhinderung der Ausbildung von tragenden Menisken (Abbildung 1). Es gibt auch Bautypen, bei denen ein Unterdruck angelegt wird, um das Sickerwasser zu gewinnen (ROTH et al., 2005). Die Ermittlung der Sickerwassermenge erfolgt häufig über einen Kippzähler.

Bei neueren Gravitationslysimetern werden Wägezellen verwendet, um die Gewichtsveränderung (als Voraussetzung zur genauen Bestimmung der Evapotranspiration) mit hoher Präzision zu messen. Des Weiteren ist es möglich, innerhalb des Lysimeters in verschiedenen Tiefenstufen zusätzliche Messinstrumente wie TDR-Sonden, Tensiometer, Saugkerzen, Temperaturfühler etc. einzubauen. Hierdurch erhält man weitere Informationen über Quantität und Qualität des Bodenwassers beim Durchlauf durch die Bodensäule. Sämtliche Messdaten werden in einem Datenlogger gespeichert.

### Messgenauigkeit

Anhand eines Beispiels soll die Messgenauigkeit eines Gravitationslysimeters neuer Bauart demonstriert werden. In Abbildung 2 sind die Gewichtsveränderungen eines solchen Lysimeters für eine sechstägige Messperiode im August 2004 und die in dieser Zeit gefallenen Niederschläge dargestellt. Bis zum Abend des 18. August fiel kein Niederschlag. Es zeigt sich die Tendenz einer Gewichtsabnahme aufgrund von Evapotranspiration. Beim

Einsetzen des Niederschlags ist ein sofortiger Gewichtsanstieg zu erkennen. Es folgen weitere 15 Niederschlagsereignisse, die zu einem Gewichtsanstieg von insgesamt 19,3 kg bis zum Ende der dargestellten Messperiode führen.

Die hier dargestellten Werte beruhen auf einem Wägerhythmus von 6 Minuten. Aus den pro Stunde anfallenden 10 Einzelwägungen wurde ein Mittelwert berechnet.

Betrachtet man den in Abbildung 2 dargestellten Verlauf der Gewichtsänderung in der niederschlagslosen Periode detaillierter, sind geringfügige Schwankungen im Tag-Nacht-Verlauf sichtbar (Abbildung 3a). Aus dem Verlauf der zusätzlich dargestellten Lufttemperatur ist erkennbar, dass am 22. August zunächst mit steigender Temperatur eine Gewichtsabnahme einhergeht. Die maximale stündliche Evapotranspiration von 0,36 mm wurde im Zeitraum zwischen 14.00 und 15.00 Uhr gemessen. Sie geht einher mit der zu diesem Zeitpunkt herrschenden höchsten Tagestemperatur von 20,2 °C. Während in den Abend- und Nachtstunden die Temperatur weiter zurück ging, wurde zwischen 22.00 und 6.00 Uhr eine Gewichtszunahme von 400 g ermittelt, die einer Wassermenge von 0,4 l m<sup>-2</sup> (0,4 mm) entspricht; das sind 14,6 % der vom 22. August zum 23. August (von 11.00 bis 11.00 Uhr) gemessenen Evapotranspiration von 2,73 mm. Die im Stundenmittel höchste Gewichtszunahme von 90 g (0,09 mm) wurde am 23. August zwischen 5.00 und 6.00 Uhr gemessen. Sie fällt zusammen mit der um diese Zeit herrschenden niedrigsten Temperatur von 4,8 °C.

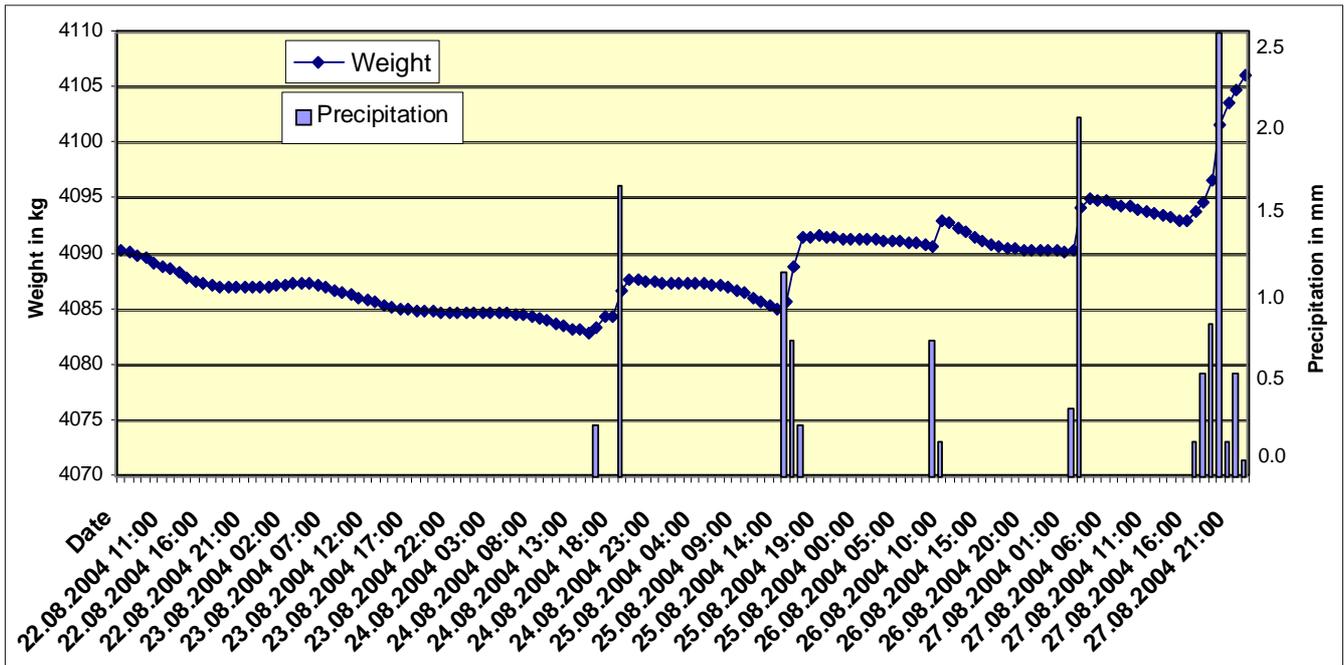


Abbildung 2: Beispiel für den Niederschlagsverlauf und die Änderung des Gewichtes eines mit Mais bepflanzten Gravitationslysimeters innerhalb einer Messperiode von 6 Tagen.

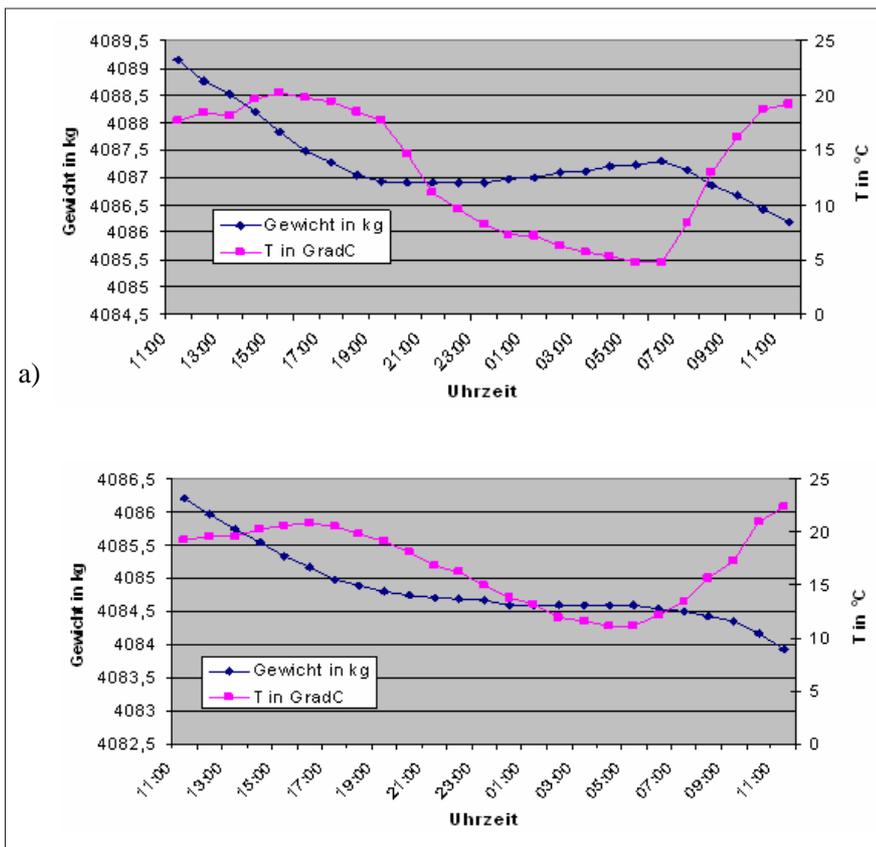


Abbildung 3: Gewichtsänderung eines mit Mais bepflanzten Gravitationslysimeters und Verlauf der Lufttemperatur. a) vom 22.08.2004 11:00 Uhr bis zum 23.08.2004 11:00 Uhr; b) vom 23.08.2004 11:00 Uhr bis zum 24.08.2004 11:00 Uhr

In *Abbildung 3b* sind die Messergebnisse für den Folgetag vom 23. August zum 24. August, wiederum um 11.00 Uhr be-

ginnend, dargestellt. Die zwischen 15.00 und 16.00 Uhr gemessene maximale Tagestemperatur von 20,8 °C war wieder

mit der die höchsten stündlichen Evapotranspiration von 0,18 mm verbunden. In den Abend- und Nachtstunden sank die Temperatur ab. Jedoch war im Unterschied zur vorangegangenen Nacht (vgl. *Abbildung 3a*) keine Gewichtszunahme, sondern nur eine Gewichtskonstanz zwischen 0.00 Uhr und 5.00 Uhr zu verzeichnen. Die niedrigste Tagestemperatur mit 11,1 °C wurde zwischen 4.00 und 5.00 Uhr gemessen. Die gesamte für den zweiten Tag gemessene Evapotranspirationshöhe betrug 2,04 mm. Sie war damit aufgrund der im Vergleich zum Vortag geringeren Windgeschwindigkeit und niedrigeren Globalstrahlung um etwa 25% geringer.

Als Ursache für die in der Nacht vom 22. August zum 23. August (vgl. *Abbildung 3a*) gemessene Gewichtszunahme wird Taubildung angesehen. Voraussetzung für die Bildung von Tau ist, dass die Temperatur der Oberfläche soweit absinkt, bis sie den so genannten Taupunkt erreicht. In der warmen Jahreszeit geschieht das vornehmlich am frühen Morgen bei klarem Himmel und schwacher Windbewegung. Durch die Berechnung des Taupunktes nach der Magnus-Formel (SONNTAG und HEINZE, 1982) konnte gezeigt werden, dass der Taupunkt unterschritten wurde, Taubildung also stattfinden konnte.

In der ersten Messperiode vom 22. August zum 23. August wurde die berech-

**Tabelle 1: Gegenüberstellung von errechneten Taupunkttemperaturen mit am Gravitationslysimeter gemessenen meteorologischen Kennwerten.**

Messperiode	Maximale Temperatur	Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit (bei Tmax) %	Taupunkt (berechnet)	Tiefsttemperatur und damit korrespondierende relative Luftfeuchtigkeit (gemessen)	
	°C		°C	°C	%
22.08.2004 - 23.08.2004	20,2	40,3	6,3	4,8	100,0%
23.08.2004 - 24.08.2004	20,8	40,6	6,9	11,1	97,5%

nete Taupunkttemperatur deutlich unterschritten. Somit kann die einer Wassermenge von 0,4 mm entsprechende Gewichtszunahme mit großer Sicherheit als Taubildung identifiziert werden. Demgegenüber lag in der zweiten Messperiode vom 23. August zum 24. August die nächtliche Tiefsttemperatur erheblich über dem berechneten Taupunkt. Folglich lag die relative Luftfeuchtigkeit deutlich unter 100% und es konnte keine Taubildung erfolgen. Die zwischen 0.00 und 5.00 Uhr gemessene Gewichtskonstanz zeigt an, dass auch keine messbare Evapotranspiration zu verzeichnen war.

## Forschungs- und Handlungsbedarf

- Aufrechterhaltung der Grundwasserneubildungsfunktion von land- und forstwirtschaftlich genutzten Flächen (trotz Zunahme der Nutzungsintensität) als Grundlage zur Sicherung einer nachhaltigen Trinkwasserversorgung in Deutschland
- Weiterführung von Langzeituntersuchungen mit Lysimetern zur Erkennung von Trends hinsichtlich einer veränderten Sickerwasserbildung nach Menge und Qualität
- Prüfung der Eignung von langjährig in Lysimeterstationen erhobenen bodenhydrologischen und meteorologischen Daten zur Validierung und Kalibrierung von Modellen zur Abschätzung von Klimaänderungen
- Testen der neu entwickelten Lysimeter bezüglich ihrer Eignung als Experimentalforschungsbasis zur Untersuchung von Phänomenen des Klimawandels (z.B. Simulation von Extremhochwässern mit Grundwasserlysimetern oder Untersuchung von monolithisch entnommenen Bodensäulen aus unterschiedlichen Klimaregionen hinsichtlich der Veränderung des Wasser- und Stoffhaushaltes)

## Literatur

- ATV-DVWK-Themen, 2004: Möglichkeiten der Effizienzkontrolle von Maßnahmen zur grundwasser-schonenden Bodennutzung am Beispiel des Stickstoffs, Hrsg. ATV-DVWK, 27 S.
- BARDOSSY, A. und S. PAKOSCH, 2005: Wahrscheinlichkeiten extremer Hochwasser unter sich ändernden Klimaverhältnissen, Wasserwirtschaft 95, Heft 7-8, S. 58-62.
- BETHGE-STEFFENS, D., R. MEISSNER und H. RUPP, 2004: Development and practical test of a weighable groundwater lysimeter for floodplain sites, J. Plant Nutr. Soil Sci., 167, No. 4, S. 516-524.
- DERBY, N.E., R.E. KNIGHTON und B.R. MONTGOMERY, 2002: Construction and performance of large soil core lysimeters, Soil Sci. Soc. Am. J. 66, S. 1446-1453.
- DIN 4049-3, 1994: Hydrologie, Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin.
- DVWK, 1980: Empfehlungen zum Bau und Betrieb von Lysimetern, DVWK-Regeln, Heft 114.
- HANTSCHEL, R., 1993: Neubau einer Lysimeteranlage am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 71, S. 135-138.
- HILLEL, D., 2004: Introduction to Environmental Soil Physics, Elsevier Academic Press, San Diego., 494 S.
- KESSLER, K., R. MEISSNER und H. RUPP, 2001: Untersuchungen des Wasser- und Nährstoffhaushaltes von Grünlandstandorten in der Elbaue mit Hilfe von neu entwickelten Grundwasserlysimetern. In: Proceedings 9. Lysimetertagung "Gebietsbilanzen bei unterschiedlicher Landnutzung", BAL Gumpenstein (Österreich), S. 135-138.
- KLOCKE, N.L., R.W. TODD, G.W. HERGERT, D.G. WATTS und A.M. PARKHURST, 1993: Design, installation, and performance of percolation lysimeters for water-quality sampling, Transactions of the American Society of Agricultural Engineers 36, S 429-435.
- KLOTZ, D. und H. STEINDL, 1998: Die Entnahme von ungestörten Bodenmonolithen. In: Die GSF-Lysimeteranlage Neuherberg (eds. D. Klotz & K.-P. Seiler), GSF Bericht, Heft 23, S. 33-39.
- KRETZSCHMAR, R., 1999: Lysimetermessungen - Erfassung von Stoff-, Wasser- und Wärmehaushaltsgrößen von Böden, Standorten und Landschaften unter weitgehend natürlichen Bedingungen, Selbstverlag, 22 S.

- LANTHALER, C. and J. FANK, 2005: Lysimeter stations and soil hydrology measuring sites in Europe - results of a 2004 survey, Proceedings 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, S. 19-24.
- MEISSNER, R., J. SEEGER, H. RUPP und H. BALLA, 1999: Assessing the impact of agricultural land use changes on water quality, Water Science and Technology, 40, S. 1-10.
- MEISSNER, R., H. RUPP und M. SCHUBERT, 2000a: Novel lysimeter techniques - a basis for the improved investigation of water, gas, and solute transport in soils, J. Plant Nutr. Soil Sci., 163, No. 6, S. 603-608.
- MEISSNER, R., H. RUPP, M. SEYFARTH und R. BRÄUTIGAM, 2000b: Lysimeterstation, Europäisches Patent erteilt mit der Nummer 19907463.
- MEISSNER, R., H. RUPP, M. SEYFARTH und J. PUNZEL, 2000c: Verfahren zum automatischen Betrieb eines wägbaren Grundwasserlysimeters, Deutsches Patent erteilt mit der Nummer 19902462.
- MEISSNER, R., H. RUPP, J. SEEGER, 2001: Sickerwassermonitoring mit Hilfe von Lysimetern unterschiedlicher Bauart, Zbl. Geol. Paläont. Teil 1, Heft 1/2, S. 33-50.
- MEISSNER, R., M. SEYFARTH, H. RUPP, M. BEUTER und K. KESSLER, 2005: Vorrichtung zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen, Deutsches Patent DE 100480896.
- MESHKAT, M., R.C. WARNER und L.R. Walton, 1999: Lysimeter design, construction, and instrumentation for assessing evaporation from a large undisturbed soil monolith, Applied Engineering in Agriculture 15, S. 303-308.
- MÜLLER, J., 2005: 30 Jahre forsthydrologische Forschung auf der Großlysimeteranlage in Britz - Zielstellung und Ergebnisse, Proceedings 11. Gumpensteiner Lysimetertagung, S. 29-32.
- PÜTZ, T., A. STORK und F. FÜHR, 1997: Lysimeter - a comprehensive Approach of Environmental Research, Druckschrift Forschungszentrum Jülich.
- ROTH, D., R. GÜNTHER, S. KNOBLAUCH und H. MICHEL, 2005: Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen - Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation, Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 1, 159 S.
- SICKERWASSER, 2003: Richtlinie für Beobachtung und Auswertung, Länderebeitsgemeinschaft Wasser, 70 S. (Gelbdruck).
- SONNTAG, D. und D. HEINZE, 1982: Sättigungsdampfdruck- und Sättigungsdampfdichtetafeln für Wasser und Eis, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 305 S.
- SRU, 1998: Der Rat von Sachverständigen für Umwelt: Flächendeckend wirksamer Grundwasserschutz - ein Schritt zur dauerhaft umweltgerechten Entwicklung, Sondergutachten, Metzler-Poeschel Verlag Stuttgart, 207 S.
- WRIEDT, G., 2004: Modelling of nitrogen transport and turnover during soil and groundwater passage in a small lowland catchment of Northern Germany, Dissertation, Universität Potsdam, 123 S.
- YOUNG, M.H., P.J. WIERENGA und C.F. MANCINO, 1996: Large weighing lysimeters for water use and deep percolation studies, Soil Science 161, S. 491-501.