

Umweltmonitoring mit Hilfe von Lysimetern - Stand und Perspektiven

R. MEISSNER, H. RUPP und J. SEEGER

Zusammenfassung

Es wird eine zusammenfassende Übersicht zum Einsatz von Lysimetern gegeben. Nach der Analyse des Anwendungsumfangs der Lysimeter in Deutschland werden neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Lysimetrie vorgestellt und diskutiert. Dabei handelt es sich sowohl um Verfahren zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen als auch um neue Lysimetertypen.

Es wird vorgeschlagen, die vorhandenen Erfahrungen in einem neuen Regelwerk über den Bau und Betrieb von Lysimetern zu bündeln.

Abstract

The paper gives a review about the using of the lysimeter-technique in Germany. The German lysimeter sites are displayed and new developments in this field are presented. However, this contents methods to obtain large undisturbed soil cores and new types of lysimeters as well. It is recommended to gather the available experiences and to develop a new compendium about construction and use of lysimeters.

Einleitung

Im Rahmen des Umweltmonitoring werden Lysimeter unterschiedlicher Bauart seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt. Lysimeter stellen naturnahe Mess- und Experimentalanlagen dar, die den Witterungsbedingungen ausgesetzt sind und mit Pflanzen besiedelt werden können. Sie bestehen aus einem mit Erdboden gefüllten Behälter sowie Einrichtungen zur Messung der sich in und durch die Bodensäule bewegenden Luft, des Wassers sowie der darin enthaltenen Nähr- und Schadstoffe. Grundsätzlich wird zwischen geschütteten und monolithisch gestochenen sowie wägbaren und nicht wägbaren Lysimetern unterschieden. Da

nur mit Hilfe von Lysimetern eine direkte Bestimmung der durch den Boden perkolierenden Wassermenge einschließlich der darin gelösten Inhaltsstoffe möglich ist, gestatten derartige Messungen eine im Vergleich zu anderen Methoden wesentlich zuverlässigere Kalkulation der aus dem Oberboden in Richtung Grundwasser transportierten Stofffrachten. Sind die Lysimeter wägbare, dann kann aus der Registrierung der Gewichtsveränderung die aktuelle Evapotranspiration direkt bestimmt werden. Aufgrund der genannten Eigenschaften sind Lysimeter hervorragend zur Ableitung und Kalibrierung von mathematischen Modellen zum Wasser- und Stoffhaushalt geeignet. In Verbindung mit einem bestehenden Grundwassermessnetz stellen sie eine sinnvolle Ergänzung zur objektiven Erfassung des Gebietswasserhaushaltes dar.

Es wird eine Übersicht über neu entwickelte technische Lösungen auf dem Gebiet der Lysimetrie sowie deren Einsatzspektrum in Wissenschaft und Praxis gegeben. Schlussfolgerungen für weitere Entwicklungsarbeiten und Einsatzbereiche für Lysimeter werden abgeleitet.

Lysimeteereinsatz

Ogleich Lysimeter sowohl im Inland als auch im 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 angese-

hen. Zu nennen sind hierbei vor allem neue Methoden zum Stechen von großvolumigen Bodenmonolithen und die Entwicklung von Container-Lysimetern. Diese Innovationen führten zu erheblichen finanziellen Einsparungen. So kann beispielsweise auf den kostenintensiven Lysimeterkeller, der meist in Stahlbetonbauweise ausgeführt wurde, verzichtet werden. Auch ist es möglich, Container-Lysimeter in situ auf Problemstandorten (z.B. mit hohem Grundwasserstand, aggressiven Medien wie in Bergbaufolgelandschaften, Altlasten-Standorten etc.) einzusetzen. In Kombination mit einer neu entwickelten Wägetechnik und der zusätzlichen Ausstattung mit verschiedenen Temperatur- und Feuchtesonden sowie Saugkerzen im Lysimeterkörper gewährleisten derartige Anlagen kontinuierliche und hochauflösende Messungen zu relevanten Wasser- und Stoffhaushaltsparametern. Eine zusammenfassende Darstellung über die in den letzten Jahren patentierten Neuerungen auf dem Gebiet der Lysimetrie enthält *Tabelle 1*.

Eine kostenmäßige Zusammenstellung über die Effizienz verschiedener Verfahren zur Kontrolle von Maßnahmen zur grundwasserschonenden Bodennutzung gegenüber erhöhten Stickstoffeinträgen aus der landwirtschaftlichen Produktion findet sich bei den Materialien der ATV-DVWK (2004). Interessant ist vor allem der Vergleich mit den ebenfalls häufig im Einsatz befindlichen bodenhydrologischen Messplätzen, die mit Saugsonden zur Entnahme von Sickerwasser ausgestattet sind. Danach sind wägbare Lysimeter bereits mit einem Investitionsaufwand von ca. 30.000,- Euro lieferbar. Auch für tensionsgesteuerte Saugsondenanlagen muss man mit Kosten um 15.000,- Euro rechnen. Ogleich die Kosten für beide Messverfahren nicht gering sind zeigt sich, dass bei sorgfältiger Planung der Einsatz von wägbaren

Autoren: Univ.-Prof. Dr. Ralph MEISSNER, Dr. Holger RUPP und Dr. Juliane SEEGER, UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle, Department Bodenforschung, Lysimeterstation Falkenberg, Dorfstraße 55, D-39615 FALKENBERG

Tabelle 1: Zusammenstellung von rezenten Lysimeter-Patentanmeldungen

Bezeichnung der Erfindung	Name der Erfinder	Patenterteilung und Patentnummer
Meßeinrichtung und Verfahren zur Untersuchung des Migrationsverhaltens von Gasen in Böden	Meißner, R., Rupp, H., Seyfarth, M., Schubert, M., Freyer, K.	Deutsches Patent erteilt am 13.02.1999 mit der Nummer 199 07 461
Lysimeterstation	Meißner, R., Rupp, H., Sefarth, M., Bräutigam, R.	Deutsches Patent erteilt am 28.12.2000 mit der Nummer 19907463; Europäisches Patent erteilt am 14.08.2002 mit der Nummer EP 1 153 293 B1
Verfahren zum automatischen Betrieb eines wägbaren Grundwasserlysimeters	Meißner, R., Rupp, H., Seyfarth, M., Punzel, J.	Deutsche Patent erteilt am 21.06.2000 mit der Nummer 19902462
Verfahren und Vorrichtung zur monolithischen Entnahme von Bodensäulen	Meißner, R., Seyfarth, M., Friedrich, H., Rupp, H. Beuter, M., Keßler, K.	Deutsches Patent erteilt am 04.11.2002 mit der Nummer 10048089
Bodenplatte für Lysimeter sowie Verfahren zum Verschließen von Lysimetern mit einer Bodenplatte	Pütz, T., Wolff, W.	Deutsches Patent, Offenlegungstag am 05.09.2002 mit der Nummer 10106906
Vorrichtung und Verfahren zur horizontalen Entnahme von Bodenkörpern	Meißner, R., Seyfarth, M., Friedrich, H., Rupp, H. Seeger, J.	Deutsches Patent erteilt am 30.06.2004 mit der Nummer 10353485

Lysimetern ebenfalls in nicht ausschließ-lich auf Forschungsfragen spezialisier-ten Einrichtungen möglich ist.

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass aufgrund der in den letzten Jahren zu verzeichnenden Innovationen und der langjährig vorliegenden positiven Erfah-rungen wieder vermehrt neue Lysimeter-anlagen in Deutschland gebaut worden sind. Um einen Überblick über den Stand der Lysimeter-technik in Deutschland zu erhalten, wurde bereits in den Jahren 1996 und 1997 eine entsprechende Fra-gebogenaktion bei allen bekannten Ly-simeterbetreibern vorgenommen (da-mals als Initiative des DVWK-FA 4.3 "Bodennutzung und Nährstoffaustrag", Vorgänger des heutigen ATV-DVWK FA GB 6 "Bodennutzung, Stoffeinträge und Wirkungen auf das Grundwasser"). Es wurden 42 Lysimeterstandorte mit mehr als 1.050 Lysimetergefäßen recherchiert. Eine detaillierte Auswertung des außer-ordentlich umfangreichen Materials ist bislang noch nicht erfolgt. Es liegt je-doch eine Zusammenstellung der einge-gangenen Materialien in Form einer in-ternen Studie zum Thema "Erfassung von Wasser-, Stoff- und Wärmehaus-haltsgrößen von Böden, Standorten und

Landschaften unter weitgehend natürli-chen Bedingungen" vor. Leider konnten diese von dem ehemaligen Fachaus-schussmitglied und Pensionär Herrn Dr. Kretzschmar initiierten Arbeiten nicht weitergeführt werden, da er zwischen-zeitlich verstorben ist. Jedoch zeigte die-se Vorauswertung bereits, dass sehr um-fangreiches Wissen über Lysimeter vor-handen ist und eine Fortschreibung der vorliegenden Erkenntnisse in Form der Überarbeitung eines bestehenden und in der Praxis bewährten Regelwerkes drin-gend notwendig erscheint. Hinzu kommt, dass auch international zunehmendes Interesse an Neuentwicklungen auf dem Gebiet der Lysimeter-technik bekundet wird (z.B. des Vereins "Österreichische Arbeits-gruppe Lysimeter" - www.lysimeter.at) und durch die Vorgabe von wissenschaftlich fundierten Empfehlungen zum Bau und Betrieb verbesserte Chancen zum Ein-satz von Neuentwicklungen auf diesem Gebiet bestehen. Speziell die aus dem Jahre 1980 stammenden DVWK-Regeln 114 "Empfehlungen zum Bau von Lysimetern" waren über viele Jahre eine wis-senschaftliche Grundlage für den Bau und den Betrieb von Lysimetern. Jedoch entsprechen die darin enthaltenen Emp-

fehlungen nicht mehr dem aktuellen Ent-wicklungsstand, so dass eine Überarbei-tung unter Berücksichtigung der vorher genannten Aspekte für dringend erfor-derlich angesehen wird. Auch die gegen-wärtig von Frau Ch. Lanthaler, Univer-sität Graz, unter Betreuung von Herrn Doz. Dr. J. Fank, Joanneum Research Graz, in Bearbeitung befindliche Di-plomarbeit über "Lysimeter und boden-hydrologische Stationen in Europa - Zie-le, Ausstattung, Ergebnisse, Perspekti-ven" wird neue Erkenntnisse über den Einsatz der hier diskutierten Untersu-chungstechnik liefern und wichtige Im-pulse für die vorgeschlagene Weiterent-wicklung eines entsprechenden Regel-werkes - ggf. im europäischen Rahmen - geben. Hinzuweisen ist vor allem auf in den letzten Jahren gebaute Neuanlagen in Deutschland. So wurden in Nieder-sachsen vor wenigen Jahren Feldlysime-terstationen in typischen intensiv land-wirtschaftlich genutzten Regionen als Maßnahme zur Überwachung von land-wirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaß-nahmen auf die Belastung der Grund-wasserressourcen eingerichtet. In Sach-sen wurde auf einem Kippenstandort eine neue Grundwasser-Lysimeteran-lage errichtet, um die bei der Rekultivie-rung von ehemaligen Braunkohlentage-baustandorten ausgehenden Gefährdun-gen für die Umwelt besser untersuchen zu können. Vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft in Wielenbach wur-de eine neue Lysimeteranlage zur Unter-suchung der von Altlastenstandorten aus-gehenden Gefährdung auf das Grund-wasser gebaut. Während man in Nieder-sachsen und Sachsen die Stationen in situ auf entsprechenden Problemstandorten einrichtete, wurden in Bayern Bodenmo-nolithe an unterschiedlichen Altlasten-standorten entnommen und in einer Sta-tion zusammengeführt. Anhand dieser Beispiele zeigt sich bereits, dass es viel-fältige Möglichkeiten beim Einsatz von Lysimetern und bei der Konzipierung von Anlagen gibt. Dabei hängt die Kon-zeption einer Lysimeteranlage maßgeb-lich von der zu bearbeitenden Fragestel-lung ab. Die Diskussion über Vor- und Nachteile der einzusetzenden Lysimeter und die Gestaltung der Anlage sollte innerhalb des Vereins der "Österreich-ischen Arbeitsgruppe Lysimeter" erfolgen.

Neuentwicklungen

Monolithische Entnahmeverfahren von großvolumigen Bodensäulen

Vertikale Entnahme

Für detaillierte Untersuchungen des Wasser- und Stoffhaushalts an Böden in Lysimetern oder in Säulenapparaturen ist die Gewinnung von ungestörten Bodensäulen zu empfehlen. Ziel der monolithischen Entnahme von Bodenkörpern ist es, die natürliche Bodenstruktur möglichst weitgehend zu erhalten, so dass die Wasserbewegung und der Stofftransport in gleicher Weise erfolgen wie in der ursprünglichen, natürlich gewachsenen Bodenstruktur am Standort. In den letzten Jahren wurden einige Verfahren entwickelt, die entweder für den praktischen Einsatz sehr teuer sind (Spindelverfahren, z.B. HANTSCHHEL, 1993) oder unzulässige Beeinflussungen der Bodensäule verursachen (Rammverfahren, z.B. PÜTZ et al., 1997; DERBY et al.; 2002). Deshalb wurde ein horizontales Entnahmeverfahren, basierend auf einem Fräsverfahren, entwickelt (vgl. *Tabelle 1* Patent-Nr. 10048089). Dabei wird das Lysimetergefäß, das den Bodenmonolithen aufnehmen soll, mittels einer Stütztraverse exakt lotrecht zur Bodenoberfläche ausgerichtet und mittels Lysimeterführung bis zur vollständigen Entnahmetiefe in dieser Ausrichtung fixiert. An der bodenzugewandten Seite des Lysimetergefäßes ist eine Fräseinrichtung angeordnet, die das Lysimetergefäß konzentrisch umschließt. Die Fräsvorrichtung schneidet die Kontur des zu gewinnenden Monolithen vor, so dass das nachrückende Lysimetergefäß die Endkontur des Monolithen ausbildet. Der Monolith füllt beim Erreichen der Entnahmetiefe das Lysimetergefäß vollständig aus. Das Verfahren hat bereits seine Praxistauglichkeit unter differenzierten Standortbedingungen (von Sandböden bis Lehmböden über Schotterböden bis hin zu Kippenböden und Altlastenstandorten) bewiesen. Bisher wurden Monolithen mit 1 m² Oberfläche und 2 bis 3 m Tiefe ausgefräst. Vorgesehen ist demnächst die Entnahme von Monolithen mit einer Oberfläche von 2 m² und 2,5 m Tiefe.

Horizontale Entnahme

Um laterale Stoffflüsse mit Hilfe eines Lysimeters untersuchen zu können, ist die experimentelle Nachbildung einer möglichst langen Fließstrecke erforderlich. Zur Untersuchung der Fließvorgänge in Niedermoorböden wurde deshalb ein Kasten-Lysimeter mit folgenden Abmessungen konstruiert: Länge 4 m, Breite 1 m und Tiefe 1,5 m (Details siehe Beitrag von Rupp et al. in diesem Heft). Um einen Bodenkörper von 6 m³ monolithisch zu entnehmen, wurde aufgrund fehlender Technologien ein spezielles Verfahren zur horizontalen Entnahme von großvolumigen Bodenkörpern entwickelt (vgl. *Tabelle 1* Patent-Nr. 10353485). Hierbei wird die Kontur des Lysimetergefäßes seitlich ausgehend von einer Startgrube mit Hilfe von hydraulisch angetriebenen Schneidwerkzeugen ausgeschnitten. Die gegenläufigen Messerbalken werden an der Stirnseite des Lysimetergefäßes angeflanscht. Beim Befüllungsvorgang wird das an Profilträger geführte Lysimetergefäß (inklusive Arbeitswerkzeug) seitlich in den ausgeschnittenen Bodenkörper hineingeschoben. Der erforderliche Vortrieb wird über die Hydraulik der eingesetzten Bagger erzeugt. Nach dem das Lysimetergefäß vollständig gefüllt ist, wird es aus der Entnahmegrube herausgehoben und durch die Montage der Stirnwände komplettiert.

Lysimetertypen

Gravitationslysimeter

Gravitationslysimeter werden seit vielen Jahren zur Bearbeitung von wissenschaftlichen und praktischen Fragestellungen eingesetzt. Innovativ ist hierbei vor allem die Entwicklung einer Container-Einheit, die das Einsatzspektrum von Lysimetern auf schwer zugänglichen Standorten wesentlich erweitert und die Baukosten senkt (vgl. *Tabelle 1* Patent-Nr. 19907463 und Europäisches Patent mit der Nr. EP 1 153 293 B1). Wesentliche Fortschritte sind auch bei der Verbesserung der Wägetechnik zu verzeichnen. Aufgrund der hochauflösenden Messtechnik ist es möglich, sowohl die Evapotranspiration als auch die Kondensation in Form der Taubildung zu erfassen. Es ist vorgesehen, derartige Lysimeter in ariden bzw. semi-ariden Gebieten

zur Ermittlung der Tau- und Nebelbildung zu testen. Interessant sind auch die Neuentwicklungen zur exakteren Quantifizierung der unteren Randbedingung beim Betrieb von Lysimetern durch Anlage eines Unterdruckes an einer speziell konstruierten Bodenplatte (vgl. *Tabelle 2* Patent-Nr. 10106906).

Grundwasserlysimeter

Grundwasserlysimeter sind ebenfalls seit vielen Jahren erfolgreich im Einsatz. Neu ist jedoch die Entwicklung eines wägbaren Grundwasserlysimeters (vgl. *Tabelle 1* Patent-Nr. 19902462). Das Kernstück dieses Lysimeters stellt die automatische Grundwassersteuerung dar (BETHGE-STEFFENS et al., 2004). Der Grundwasserstand wird am Entnahmestandort der Bodenmonolithe kontinuierlich gemessen und per Funk an die Regelungseinheit des Lysimeters übertragen. Die Einstellung des Grundwasserstandes erfolgt im Lysimetergefäß über das Prinzip der kommunizierenden Röhren, wobei die erforderliche Wassermenge über einen Ausgleichsbehälter zugeführt wird. Dieser ist mit einem Pegelsensor zur Messung des aktuellen Wasserstandes ausgestattet. Das für Grundwasserzu- bzw. -abfluss zu speichernde Wasser wird in einem Vorratsbehälter vorgehalten. Weicht der Wasserstand im Ausgleichsbehälter vom vorgegebenen Zielwasserstand um mehr als einen Zentimeter ab, wird das Ventil zwischen Lysimeter und Ausgleichsbehälter geschlossen und über eine Pumpe der Wasserstand im Ausgleichsbehälter reguliert. Anschließend wird das Ventil zwischen Ausgleichsbehälter und Vorratsbehälter geschlossen und das Ventil zum Lysimeter geöffnet. Der Wasserstand kann sich ausgleichen. Anschließend wird das Ventil wieder geschlossen, es erfolgt eine erneute Regulierung des Wasserstandes im Ausgleichsbehälter, solange, bis der Wasserstand dem vorgegebenen Zielwasserstand entspricht. Über die Aufsummierung der Wasserstandsunterschiede kann ermittelt werden, wie viel Wasser dem Lysimeter zugeflossen ist bzw. wie viel Wasser entnommen werden musste, um den Zielwasserstand einzustellen.

Moorlysimeter

Es liegen zahlreiche Ergebnisse über mit Moorböden gefüllte Lysimeter vor. Jedoch sind keine Informationen über wäg-

bare Moorlysimeter bekannt. Basierend auf dem in diesem Beitrag bereits beschriebenen horizontalen Entnahmeverfahren wurde ein spezielles Lysimeter entwickelt und mit einem Niedermoor-körper bestückt. Das Lysimetergefäß steht auf einem Rahmen aus Stahlprofilträgern. Zwischen dem Rahmen und den Fundamentstützen aus Stahlbeton befindet sich unter den vier Auflagepunkten jeweils eine elektronische Wägezelle, die über einen Wägemonitor, der mit dem Datalogger verbunden ist, ausgelesen werden. Diese Messanordnung ermöglicht es, das Gewicht des etwa 8 t schweren Moorlysimeters (Bodenmonolith, Wasser, Lysimetergefäß und Rahmen) mit einer Auflösung von ± 100 g zu bestimmen.

Gas-Migrations-Simulator (GAMS)

Der prinzipiell mit dem Bauprinzip eines Gravitationslysimeters vergleichbare GAMS ermöglicht die detaillierte Untersuchung der Bodengasmigration bzw. der Abhängigkeit dieser Migrationsprozesse von verschiedenen Einflussgrößen (MEISSNER et al., 2000; SCHUBERT et al., 2002). Speziell handelt es sich um ein zylinderförmiges Gefäß mit 1 m² Grundfläche, welches die Aufnahme einer Bodensäule mit einem Volumen von 1,7 m³ erlaubt. Das die Bodensäule aufnehmende Gefäß ist vollständig aus PE-HD gefertigt und weist eine Wand-

stärke von 40 mm auf. Die in den GAMS eingebrachte Bodensäule kann mit einer Vielzahl von Sonden bestückt werden. Zur Gewährleistung eines natürlichen Temperaturgradienten in der Bodensäule wird der GAMS bis zu seiner Oberfläche in das natürliche Erdreich eingegraben. Die in die Bodensäule eingebrachten Sonden sind dabei über einen Probenahmeschacht zugänglich. Der GAMS wurde bisher zur Bestimmung der Radonmigration in Böden eingesetzt (SCHUBERT, 2000).

Perspektiven

Die neu entwickelten Lysimeter sollten umfassend getestet werden. Nur so ist es möglich, zuverlässige Schlussfolgerungen für den Praxisbetrieb abzuleiten. Es ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit mit unterschiedlichen Fachabteilungen anzustreben, um eine effektive Auslastung der Versuchsanlagen zu gewährleisten. Basierend auf den vorliegenden Erfahrungen sollten gemeinsam Initiativen zur Erstellung eines neuen bzw. zur Überarbeitung des bestehenden Regelwerkes über den Einsatz von Lysimetern ergriffen werden. Der Verein "Österreichische Arbeitsgruppe Lysimeter e.V." sollte aufgrund des hier vereinten Fachwissens eine Vorreiterrolle übernehmen. Anzustreben ist ferner die internationale Vernetzung der Lysimeterbetreiber auf europäischer Ebene und im

Rahmen der International Soil Science Society (ISSS).

Literatur

- ATV-DVWK-Themen, 2004: Möglichkeiten der Effizienzkontrolle von Maßnahmen zur grundwasserschonenden Bodennutzung am Beispiel des Stickstoffs, Hrsg. ATV-DVWK, 27 S.
- BETHGE-STEFFENS, D., R. MEISSNER and H. RUPP, 2004: Development and practical test of a weighable groundwater lysimeter for floodplain sites. In: J. Plant Nutr. Soil Sci., 167 No. 4, 516-524.
- DERBY, N.E., R.E. KNIGHTON and B.R. MONTGOMERY, 2002: Construction and Performance of Large Soil Core Lysimeters. Soil Sci. Soc. Am. J. 66, 1446-1453.
- HANTSCHHEL, R., 1993: Neubau einer Lysimeteranlage am GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, Band 71, S.135-138.
- MEISSNER, R., H. RUPP and M. SCHUBERT, 2000: Novel lysimeter techniques - a basis for the improved investigation of water, gas, and solute transport in soils. In: J. Plant Nutr. Soil Sci., 163 No. 6, 603-608.
- PÜTZ, T., A. STORK and F. FÜHR, 1997: Lysimeter - A comprehensive Approach of Environmental Research. Druckschrift Forschungszentrum Jülich vom 08.04.1997.
- SCHUBERT, M. et al., 2002: The Gas-Migration-Simulator (GAMS) - A new device for the simulation of soil gas migration processes. In: Geofisica Internacional 41, Num. 4, 429-432.
- SCHUBERT, M., 2000: Erfassung von Untergrundkontaminationen durch Non-Aqueous Phase-Liquids (NAPLs) mit Hilfe der Bestimmung des Radongehaltes der Bodenluft. Diss., Math.-Nat. Fak. Univ. Göttingen, 130 S.