

Messsystem zur Beprobung und Überwachung des gesamten Bereiches der ungesättigten und gesättigten Zone einschließlich des Kapillarsaums

Marc Walther^{1*}, Johann Fank², Thomas Reimann¹ und Rudolf Liedl¹

Zusammenfassung

Das Monitoring und die Beprobung des Boden-, Kapillar- und Grundwassers stellt eine der primären Aufgaben im Bereich der Grundwasserwirtschaft dar. So liefern Messungen im Übergangsbereich der ungesättigten und gesättigten Zone (Saturated-unsaturated interface region – SUIR; RONEN et al. 2000) nicht nur grundlegende Daten zur Modellierung oder der Ableitung von aquiferspezifischen Parametern, sondern sind bei der Beobachtung, Erfassung und Quantifizierung von Einträgen in das Grundwasser, natürlichen oder anthropogenen Ursprungs, unentbehrlich. Eine neuartige Anlage zur Messung des gesamten Bereiches der SUIR wurde am Institut für WasserRessourcenManagement der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Graz, in Kooperation mit der Firma UMS GmbH, München, entwickelt und wird seit Herbst 2007 auf dem Messfeld Wagna in der Südsteiermark, Österreich, im Testbetrieb gefahren. Die Anlage, bestehend aus um ein Gestänge radialsymmetrisch angeordneten Saugkerzen, ermöglicht eine zeitlich kontinuierliche Messung und Beprobung der SUIR über eine Tiefe von 2 - 8 m unter Geländeoberkante mit einer tiefendifferenzierten Auflösung von ca. 11 cm, wodurch der gesamte Bereich von der Unterkante monolithischer Lysimeter bis unter den NGW-Wert überwacht wird. Auf Basis einer dreidimensionalen Modellierung mit dem Programm HYDRUS konnte die konzeptionelle Eignung der Anlage zur nahezu störungsfreien Beprobung der SUIR nachgewiesen werden sowie Modifikationen zur Optimierung der Messergebnisse identifiziert und weitere Anwendungsmöglichkeiten erarbeitet werden.

Schlagwörter: SUIR, Saugkerzenbaum, tiefendifferenzierte Probenahme im Übergangsbereich ungesättigte/gesättigte Zone, HYDRUS-3D, Monitoring, Modellierung

Summary

One of the primary tasks of groundwater management are the monitoring and sampling of soil, capillary and ground water. Measurements in the saturated-unsaturated interface region (SUIR; RONEN et al. 2000) yield basic data for modeling or specific aquifer parameters, which are crucial for the observation, acquisition and quantification of groundwater polluting sources of natural or anthropogenic origin. In cooperation between the Institute for Water Resources Management at the JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, Graz, and the UMS GmbH, München, two instruments for depth specific sample drawing were installed in fall 2007 at the test field Wagna, Austria. The multi-layer-sampling devices (SKB "Saugkerzenbaum") are equipped each with several suction cups arranged one below the other for the purpose of achieving samples from the whole extend of the aquifer, i.e. the saturated zone, the SUIR and the unsaturated zone with a vertical resolution of about 11 cm. Using a 3D-model (HYDRUS), the SKB's conceptual applicability of a nearly undisturbed sampling within the SUIR could be shown. Modifications of the existing device for an optimized sampling were identified and possible enhanced applications presented.

Keywords: SUIR, multi-layer-sampling devices, depth specific sampling in the transition area unsaturated/saturated zone, HYDRUS-3D, monitoring, modeling

Einleitung

Das Monitoring des gesamten Bereiches der SUIR (saturated-unsaturated interface region (RONEN et al. 2000) im Feld, d.h. von der ungesättigten Bodenzone über den Kapillarsaum bis hinein in das Grundwasser, ist bis dato nur in unbefriedigendem Maße möglich. Einige Varianten zur Beprobung der SUIR sind dokumentiert (TWARDOWSKA 1995, EINARSON et al. 2002 oder BEHERA et al. 2003), liefern allerdings aufgrund des jeweiligen Einbaus oder der Konzeption der Messsysteme nur selten hinreichend repräsentative Werte und sind zum Teil mit erheblichem

Aufwand bei Einbau und Wartung verbunden. Schon frühzeitig zeigten Tank-Experimente (LIPPOK 1966) die Relevanz des Kapillarsaums für den Stofftransport in diesem Bereich. Aktuelle Forschungsbestrebungen (DUNN et al. 2003, RONEN et al. 2005, ABIT et al. 2008) verstärken die Bedeutung dieser chemisch und biologisch hochvariablen Zone und zeigen den noch ausstehenden Forschungsbedarf auf. Dabei ist eine vertikal hochaufgelöste Probenahme im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone zu deren detaillierter Erkundung, dem intensiven Prozessstudium biologischer und chemischer Stoffumsatzvorgänge oder der Identifikation des hydraulischen

¹ TU Dresden, Institut für Grundwasserwirtschaft, Karcherallee 8, D-01277 DRESDEN

² Joanneum Research, Institut für WasserRessourcenManagement, Elisabethstraße 16, A-8010 GRAZ

* Ansprechpartner: grundwasser@mailbox.tu-dresden.de

Fließverhaltens und des Stofftransports innerhalb der SUIR anzustreben. Gleichwohl ist das beprobte System durch die Eingriffe der Probenahme möglichst geringen Störungen zu unterwerfen und die Messung repräsentativ für das Gesamtsystem zu gestalten.

Mit dieser Zielvorgabe wurde in Zusammenarbeit von JO-ANNEUM RESEARCH, Graz und der Fa. UMS, München, ein innovatives Messinstrument entwickelt, um die Bereiche ungesättigte Zone, SUIR und gesättigte Zone in zeitlich und räumlich hoher Auflösung beproben zu können. Bis dato kann kein vergleichbares System zur tiefengestaffelten Probenahme in der bekannten Fachliteratur verzeichnet werden (WALTHER 2008).

Material und Methoden

Das Testfeld Wagna in der Steiermark, Österreich, befindet sich im Murtal etwa 50 km südlich von Graz auf 266 m über Adria, welches im Zuge des Rückgangs der eiszeitlichen Vergletscherung in den Alpen durch Ablagerungen verschiedener, fluviatil verlagertes glazialer Sedimente mit hoher räumlicher Variabilität geprägt ist. Der seichtliegende,

mehrere Meter mächtige Aquifer im Bereich des Testfeldes besteht hauptsächlich aus grobsandigem bis kiesigem Material mit geringen Feinsandanteilen (*Abbildung 1*) und wird im Untergrund durch Tertiärsedimente begrenzt (FANK 1999). Auf dem Testfeld Wagna wurden im Herbst 2007 zwei sogenannte Saugkerzenbäume (SKB, *Abbildung 2*), jeweils unterhalb einer nachhaltig-biologischen und einer konservativ bewirtschafteten Ackerfläche installiert. Mit den 24, in einem vertikalen Abstand von ca. 11 cm an einem Gestänge befestigten Saugkerzen werden mit einem konstanten Unterdruck von $p = -600$ hPa Wasserproben der unterschiedlichen Horizonte genommen und auf verschiedene chemische Parameter analysiert. Die Proben werden in einer nahezu temperaturkonstanten, dunklen Kelleranlage in direkter Nähe der Probenahmeverrichtungen bis zur wöchentlich durchgeführten Analyse aufbewahrt. Der weitere Aufbau der Anlage gestaltet sich folgendermaßen: Im äußeren Ring um die Anlage ($0.20 \text{ m} < d < 0.30 \text{ m}$) ist ein üblicher Industriefilterkies ($d_k \approx 2 \text{ mm}$) verfüllt. Im inneren Bereich ($d < 0.20 \text{ m}$) befindet sich der SKB und das ausgehobene, gesiebte Material; die Siebung war nötig, um die Anbindung der Saugkerzen an das Bodenmaterial

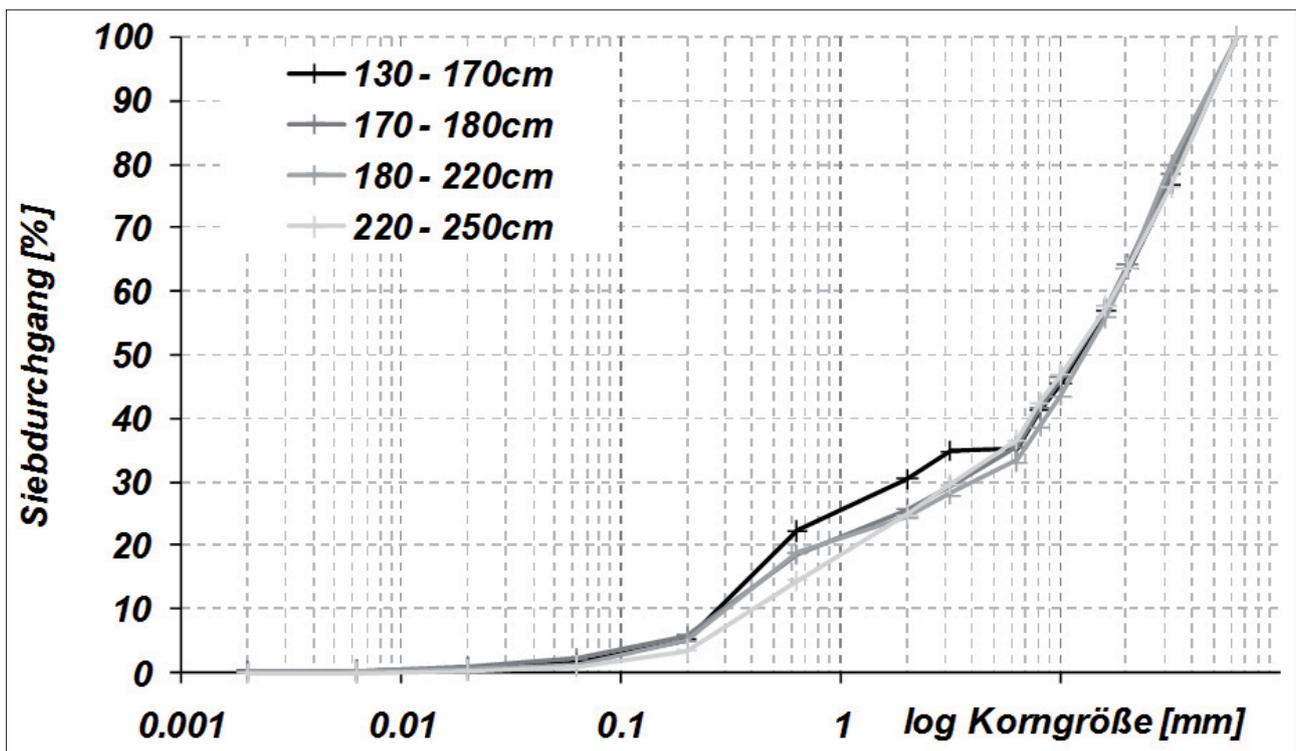


Abbildung 1: Kornsummenlinie aus unterschiedlichen Tiefen des seichtliegenden Aquifers im Testfeld Wagna; Ergebnisse der Profilaufnahmen des Standortes Wagna Ost (2005)

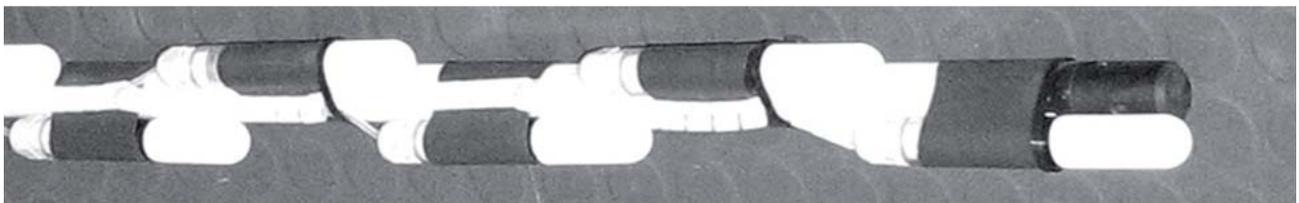


Abbildung 2: Spitze SKB, Länge des dargestellten Ausschnitts ca. 60 cm; Einbau erfolgt vertikal

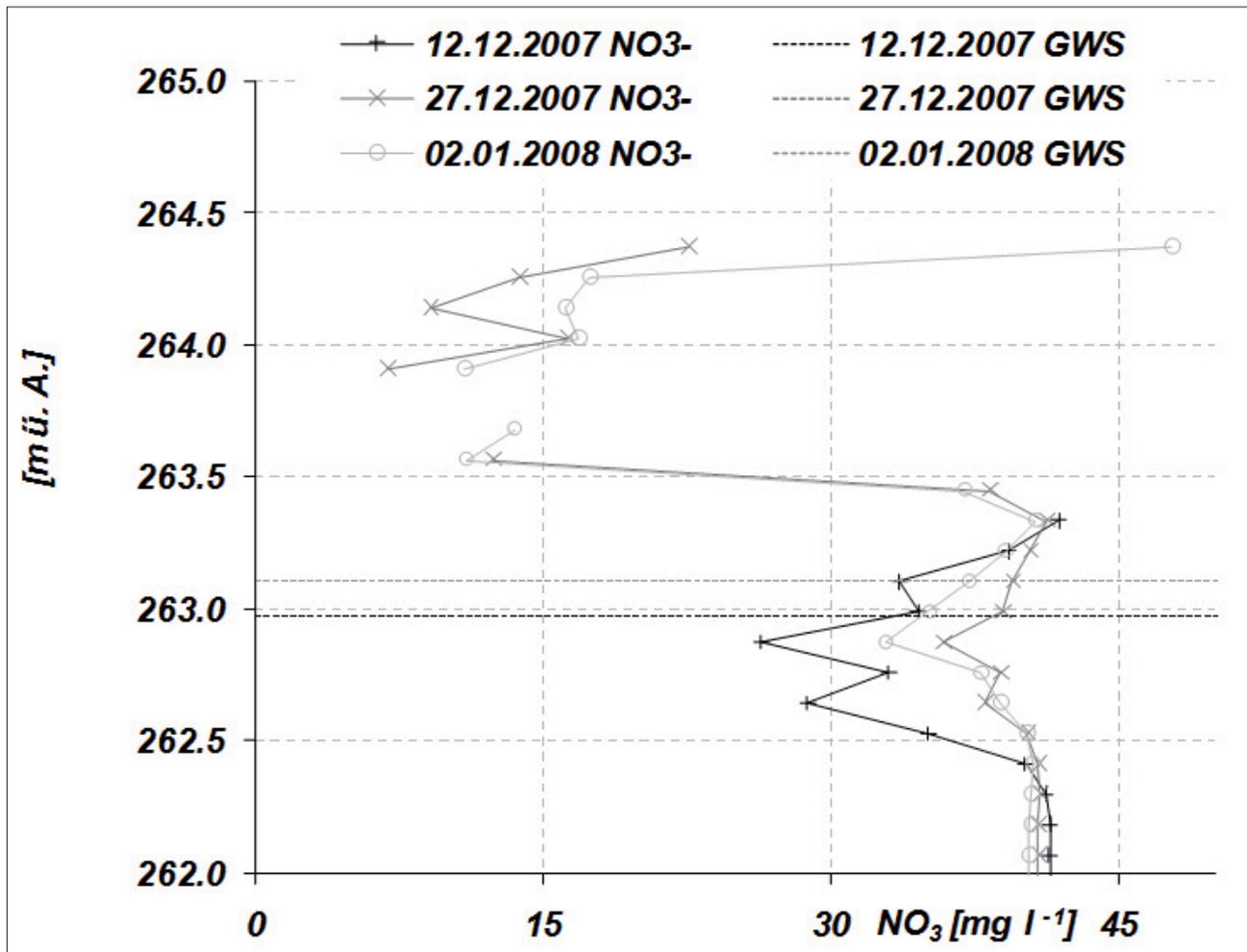


Abbildung 3: Grundwasserstand (GWS) und Nitratkonzentrationen (NO_3^-) in unterschiedlicher Beprobungstiefe

zu gewährleisten und Beschädigungen durch größere Skelettanteile zu vermeiden. Zusätzlich ist ein Filterrohr ($d = 0.20 \text{ m}$) zwischen Filterkies und wiederverfülltem Material eingebracht. Der Aufwand beim Einbau eines Saugkerzenbaums ist mit dem der Errichtung einer normalen Brunnenanlage vergleichbar.

Auswertungen früher Messergebnisse (Abbildung 3, dargestellt am Beispiel der Nitratkonzentration) zeigen deutlich die vertikale Heterogenität der gemessenen Parameter. Um die Funktionsweise der SKBs zu überprüfen und das Einzugsgebiet der Probenahme jener einzelnen, in den unterschiedlich gesättigten Bereichen befindlichen Saugkerzen abgrenzen zu können, wurde mit der Software HYDRUS 2D/3D (ŠIMŮNEK et al. 2007) ein dreidimensionales Modell der Feldsituation realisiert. Unter der Maßgabe, einen hohen Modelldetailgrad bei gleichzeitig überschaubarem Informationsgehalt zu erreichen, wurde ein etwa $4 \times 2 \times 1 \text{ m}^3$ großer Ausschnitt des Grundwasserkörpers inklusive eines Saugkerzenbaums mit zwölf Saugkerzen adaptiert. Das generierte, numerische Modell besteht aus 69 Layern unterschiedlicher Höhe und einer Zellgröße im Bereich des Saugkerzenbaums von $d < 0.5 \text{ cm}$. Vier verschiedene Szenarien wurden entwickelt, um hohen und niedrigen Grundwasserstand abzubilden sowie

das aus darüberliegenden Schichten nachfließende Sickerwasser zu simulieren. Die Auswertung erfolgte visuell anhand verschiedener zweidimensionaler Querschnitte und ausgewählter dreidimensionaler Detaildarstellungen. Zur Abgrenzung des Einzugsgebiets einer Saugkerze (SK) wurde ausgehend von der an der jeweiligen SK gemessenen Eintrittsgeschwindigkeit in den Saugkörper die Geschwindigkeit bestimmt, die ein Partikel im nahen Umfeld der SK besitzen muss, um die SK innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls noch zu erreichen; alle anderen, langsameren Partikel wurden nicht zum Einzugsgebiet der SK gezählt.

Die Parametrisierung des Bodenwassermodells nach Mualem-van-Genuchten (MUALEM 1976, GENUCHTEN 1980) erfolgte durch Lysimeter- und Labormessdaten ungestörter Stechzylinderproben. Als oberstromige Randbedingung wurde eine Neumann-Randbedingung (constant flux) auf Basis des vorhandenen Grundwasserstroms angesetzt; als unterstromige Randbedingung diente die sogenannte „seepage-face“ Randbedingung, welche der Dirichlet-Randbedingung ähnelt (constant head). Der Einfluss beider Randbedingungen war im untersuchten Gebiet nahe des SKB nicht mehr erkennbar.

Ergebnisse

Dreidimensionale Darstellungen der Geschwindigkeitsvektoren im Anstrom an die Saugkerzen im ungesättigten Bereich innerhalb des wiederverfüllten Materials zeigen das abzuschätzende Einzugsgebiet der Saugkerzen auf den unterschiedlichen Niveaus:

- oberliegende SK werden von nachfließendem Sickerwasser versorgt,
- grundwassernahe SK von aufsteigendem Kapillar- oder Grundwasser gespeist;
- dazwischenliegende SK weisen ein nur sehr kleines Einzugsgebiet auf.

In diesem Bereich mittlerer Höhe bilden sich stark negative Matrixpotentiale und geringe Sättigungswerte bei der Probenahme aus. Im Bereich des Filterkieses treten dabei aufgrund äußerst niedriger Werte der hydraulischen Leitfähigkeit sehr geringe Fließgeschwindigkeiten auf, eine Wasserbewegung durch den Filterkies - um die stark negativen Werte des Matrixpotentials zu reduzieren - ist praktisch nicht vorhanden. Eine vergleichbare Wirkung wird von dem eingebauten Filterrohr erwartet. Weitere Simulationen zeigen, dass sich der Zustrom zur Anlage im ungesättigten Bereich sowie die geringen Potentiale im Boden erhöhen ließen, würde der Filterkies durch wiederverfülltes Material ersetzt; die dann auftretenden Matrixpotentiale lägen innerhalb von Wertebereichen, welche in nahegelegenen Lysimetern bei langjährigen Messreihen aufgezeichnet werden.

Die im ungesättigten Bereich begrenzende Wirkung des Filterkieses tritt in der gesättigten Zone nicht auf, eine Beeinflussung der Probenahme kann nicht beobachtet werden. *Abbildung 4* zeigt die aktiven Saugkerzen als

dreidimensionale Darstellung sowie im Querschnitt und lässt erkennen, dass sich die Einzugsgebiete der tiefendifferenzierten Saugkerzen sich ähnlich den Ausführungen von GRAHAM (2006) ausbilden: der Zustrom zu den einzelnen Saugkerzen ist im Bereich des Grundwasserleiters horizontal ausgebildet, weder Filterrohr noch Filterkies bewirken eine signifikante Ablenkung der Strömungsrichtung. Die Strömungsgeschwindigkeit und auch die Wassersättigung variiert naturgemäß in Abhängigkeit von den durchströmten Sedimentkomponenten.

Das Einzugsgebiet der Saugkerzen kann demnach im ungesättigten Bereich auf wenige Dezimeter bis einige Zentimeter (je nach Grundwasserabstand und Sickerwasserzustrom) geschätzt werden und ist als Sickerwasser der direkten Umgebung der Saugkerze innerhalb eines Probeintervalls von sieben Tagen zu charakterisieren; im gesättigten Bereich bildet sich das Einzugsgebiet abhängig von der Grundwasserfließgeschwindigkeit aus und entspricht den jeweiligen Probenahmetiefen der Saugkerzen.

Ferner wurden mit Hilfe des erstellten Modells die fiktiven Probenahmeholumina der einzelnen Saugkerzen nach einer Pumpzeit von 60 Tagen, einem Zeitraum, nach welchem sich annähernd stationäre Verhältnisse ausgebildet hatten, mit realen Messwerten verglichen. *Abbildung 5* zeigt den Vergleich der Entnahmeholumina mehrerer, repräsentativer Aufzeichnungen der Anlage in Wagna sowie einige Szenarios mit unterschiedlicher Grundwasserspiegellhöhe und Sickerwassermenge. Der Verlauf der simulierten Probeholumina über die Tiefe kann die auftretenden Heterogenitäten in der Realität zwar nicht abbilden, ist allerdings in der Ausprägung mit den Messwerten vergleichbar. Gründe für die auftretenden Schwankungen der Messwerte sind

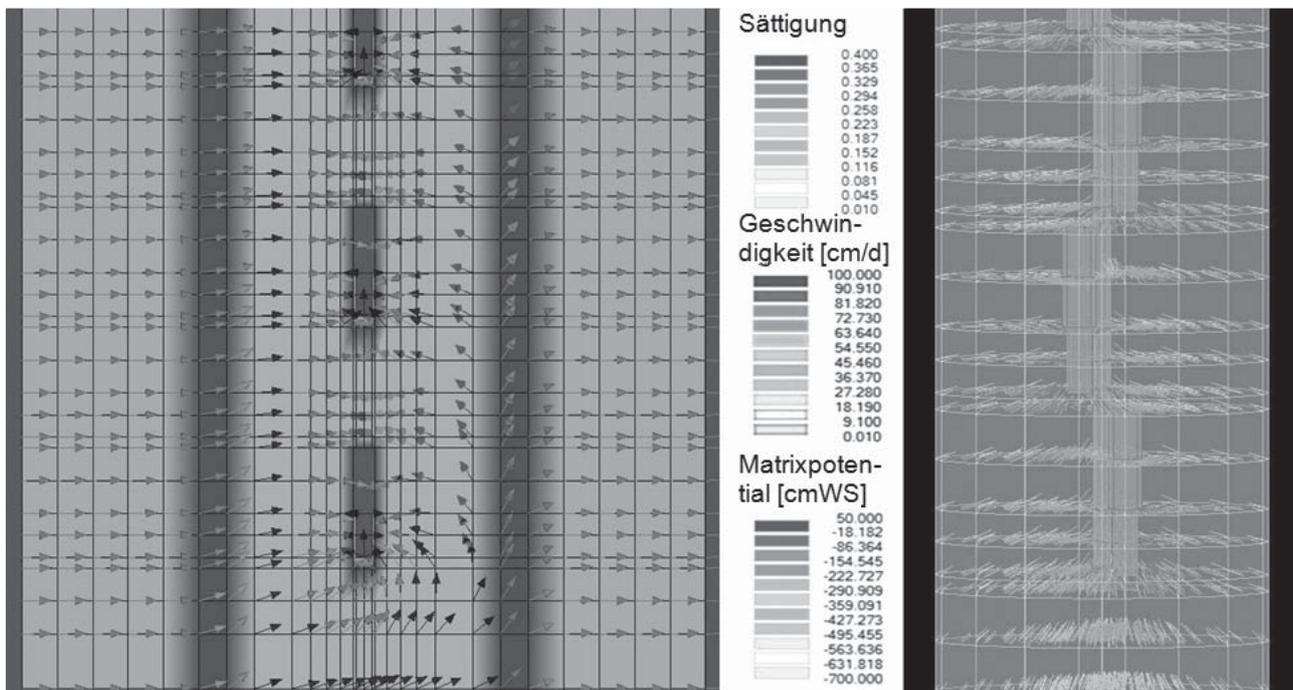


Abbildung 4: Fließfeld im Bereich Grundwasser; links: 2D vertikaler Schnitt in Grundwasserfließrichtung (Fließvektoren, Sättigung als Füllung Matrixpotential als Zellbegrenzung), rechts: 3D Ansicht in Grundwasserfließrichtung (Fließvektoren, Matrixpotential als Zellbegrenzung)

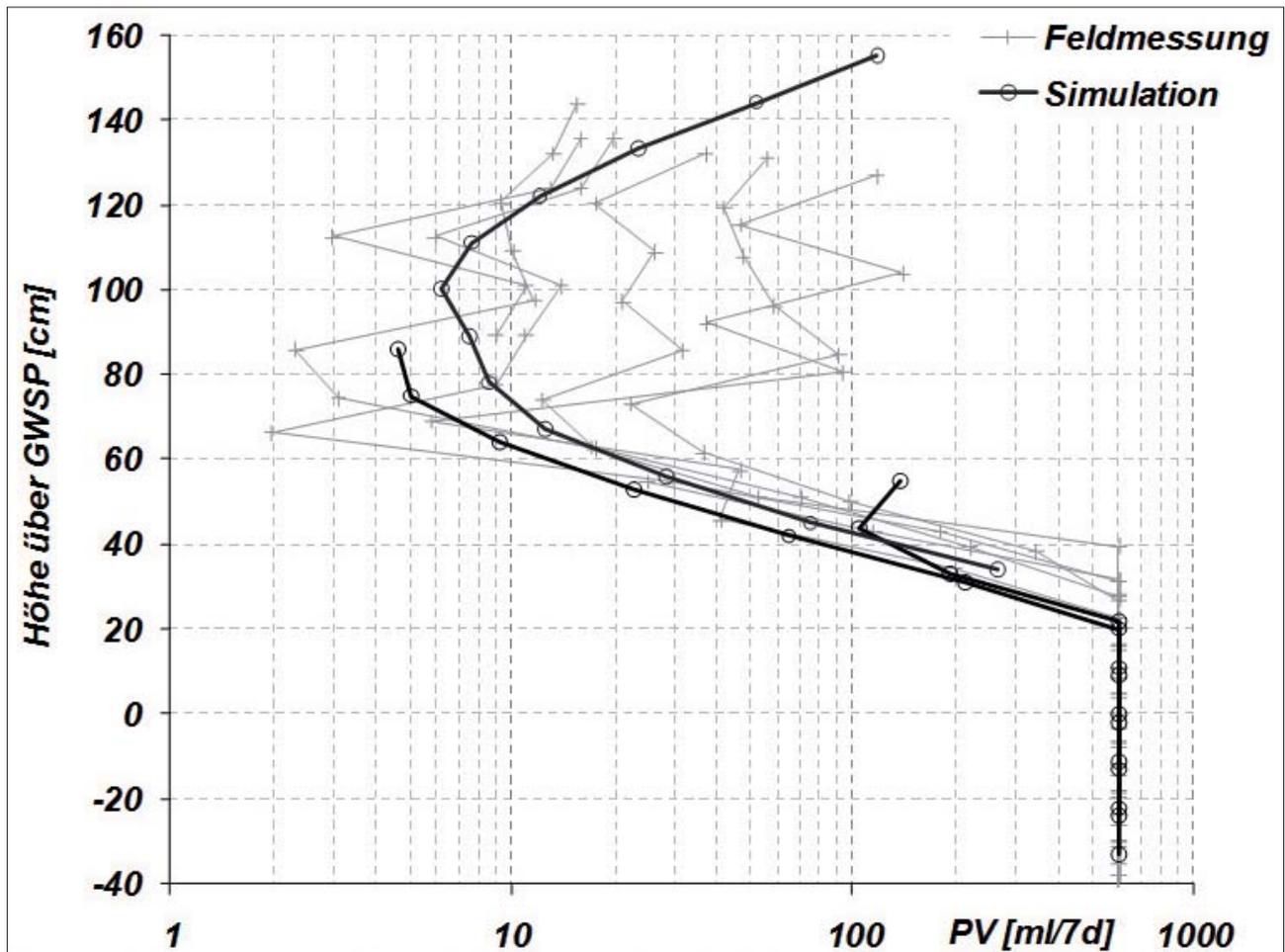


Abbildung 5: Tiefenspezifisches Probevolumen PV, Vergleich Simulationswerte und Feldmessungen über Grundwasserspiegel GWSP

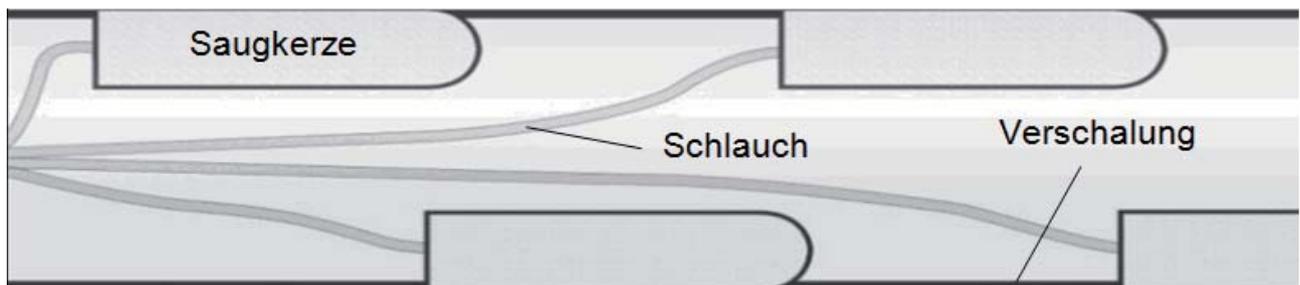


Abbildung 6: Querschnitt durch ein Modellkonzept für ein verschaltes, tiefendifferenziertes Probenahmesystem (Einbau vertikal)

u.a. die heterogene Verteilung der Bodenmatrix und der Sickerwasserbewegung (Menge und Lokalität) sowie eine möglicherweise nicht vollständig gegebene Anbindung einer Saugkerze an den Bodenkörper.

Die bisherigen Messungen der Stoffverteilung in Tiefenprofilen des Grundwassers am Versuchsfeld Wagna über einen Zeitraum von mehr als einem Jahr belegen die Bedeutung der tiefengestaffelten Erfassung der Nährstoffkonzentrationen zur Beurteilung der Auswirkung ackerbaulicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die örtliche Grundwasserqualitätssituation. In *Abbildung 7* ist der Vergleich der Ganglinien der Nitratkonzentration an der Grundwasser-

oberfläche und in einer Tiefe die dem langjährigen niedersten Grundwasserspiegel (NGW) entspricht dargestellt. Der Verlauf des Grundwasserspiegels zeigt im Dezember 2007 einen raschen und deutlichen Anstieg, der auf Neubildungsereignisse aus infiltrierenden Niederschlägen zurückzuführen war. Dieses Sickerwasserereignis war am Versuchsfeld Wagna mit einem Austrag von Nitrat aus den Versuchsfeldern verbunden, was durch die rasche Reaktion der Nitratwerte an der Grundwasseroberfläche erkennbar ist. In der tiefer liegenden Saugkerze (auf Höhe NGW) ist – gleich wie auch in den Ergebnissen der Standard-Grundwasserbeprobung durch Abpumpen – keine Veränderung

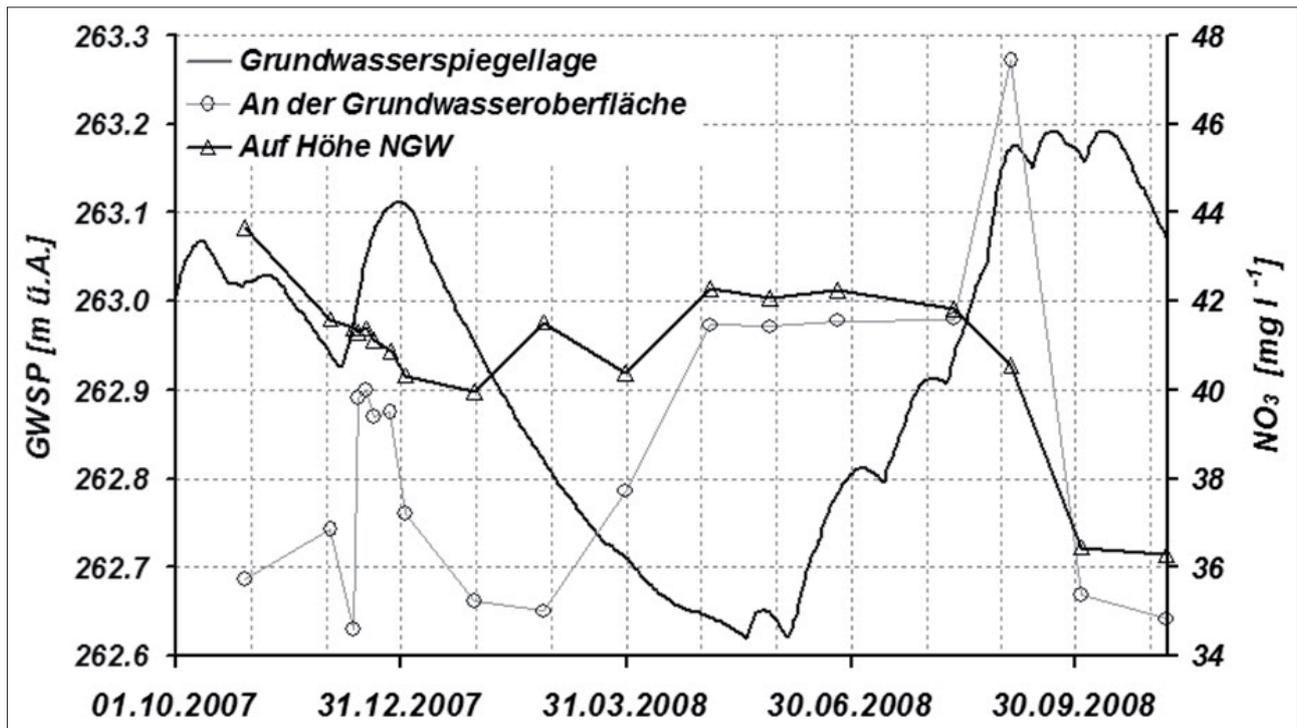


Abbildung 7: Vergleich der Ganglinien der Nitratkonzentration in zwei unterschiedlichen Tiefen des Grundwassers am Versuchsfeld Wagna in Abhängigkeit von der Grundwasserstandsentwicklung

der Nitratwerte im Grundwasser detektierbar. Der Anstieg des Grundwasserspiegels in den Sommermonaten des Jahres 2008 hingegen war auf Neubildungsvorgänge im dem Versuchsgelände vorgelagerten Stadtgebiet von Leibnitz sowie auf die Wechselwirkung mit Oberflächengewässern zurückzuführen – in den Nitratwerten ist praktisch keine Reaktion auf die Grundwasserspiegeländerung zu erkennen. Erst die Auffüllung des Bodenwasserkörpers aufgrund der Niederschläge im August bei Fehlen stark wasserzehrender Vegetation nach der Ernte des Getreides führte wieder zu lokaler Sickerwasserbildung, was sich in einer deutlichen Spitze der Nitratkonzentration an der Grundwasseroberfläche widerspiegelt. Dieser kurzfristigen Spitze folgt danach ein generelles Absinken der Nitratwerte des Grundwassers aufgrund der Zufuhr von gering belasteten Neubildungsereignissen unterschiedlicher Genese.

Diskussion

Die durchgeführten Simulationen zeigen, dass die bestehenden Anlagen der Saugkerzenbäume in der Lage sind, innerhalb der ungesättigten Zone, der SUIR und der gesättigten Zone tiefendifferenziert die Beprobung des Bodenwasserkörpers zu erlauben. Die horizontspezifische Probenahme im gesättigten Bereich ist ohne Einschränkung möglich und kann, bei entsprechender Verwendung von speziellen Saugkerzen, auch in größeren Tiefen durchgeführt werden.

Bei geringer Modifikation des bestehenden Designs kann außerdem die Probenahme innerhalb des ungesättigten Bereiches verbessert werden. Bei Verzicht auf Filterkies und -rohr ist ein signifikant höherer Zustrom zu den Saugkerzen gegeben; auch ist auf eine Siebung des aufgehobenen und wiederverfüllten Materials zu verzichten,

damit sich die Höhe des Kapillarsaums nach Einbau dem Originalzustand wieder angleichen kann und nur geringe Unterschiede zwischen umliegenden und wiederverfüllten Material auftreten.

Wenn der Einbau des SKB's durch entsprechende Einschläm- oder Vibrationstechniken unterstützt wird, kann die Anbindung der Saugkerzen an den Boden erhöht werden, was eine besser abgesicherte Probenahme gewährleistet. Unter Beachtung der genannten Modifikationen kann unter Umständen gar eine Reduktion des an den Saugkerzen angesetzten Potentials erwogen werden, wenn der Zustrom zur Anlage und damit die Probenahmemenge für die nachfolgende Analytik ausreichend groß wird.

Das Konzept der tiefengestaffelten Probenahme kann, je nach Anforderung, angepasst werden; Variationsmöglichkeiten bieten sich bei der Form und der Größe sowie dem porösen Material der Saugkerze, der erforderlichen Diskretisierung sowie der Ausrichtung am SKB; auch können Saugplatten oder Saugblöcke in tiefendifferenzierter Form in ähnlicher Form eingesetzt werden. Darüberhinaus ist ebenso eine Kombination des SKB's mit dem Direct-Push-Verfahren zu erwägen. Wenn die Konstruktion z.B. durch eine Verschalung (vgl. *Abbildung 6*) genügend Stabilität bietet, welche gleichzeitig einen Schutz für das poröse Material der Saugkörper darstellt, so ergibt sich damit eine flexible Einsatzmöglichkeit des SKB an unterschiedlichsten Orten für verschiedenste hydro(geo)logische, wasserwirtschaftliche und (bio-)chemische Fragestellungen. In Verbindung mit anderer Messtechnik, welche im SKB integriert werden könnte (TDR, Temperaturfühler etc.) erweitern sich zusätzlich die Anwendungsgebiete eines solchen Geräts. Neben der derzeitigen Verwendung der Anlage in Wagna

zur Überwachung des Eintrags von Düngemitteln offenbart sich ein großes Anwendungsfeld in Gebieten, bei denen das beprobte Grundwasser verschiedenen Ursprungs ist:

- Monitoring von künstlichen Grundwasseranreicherungsanlagen
- Überwachung von Süß-/Salzwassergrenzen
- Grundwasseruntersuchungen im Abstrom von Deponien
- Monitoring oder Sanierung von Schadensfällen
- Beobachtung und Systemverständnis der SUIR vor allem beim Stofftransport und der Einmischung von (Schad-) Stoffen
- Beobachtung verschiedener Abflusskomponenten nach Regenereignissen
- Untersuchungen der hyperheischen Zone und damit der Wechselwirkung von Oberflächengewässern mit dem Grundwasser
- Umsatzprozesse chemischer und biologischer Art.

Die Technologie der Saugkerzenbäume stellt damit eine kostengünstige, einfach und zeitnah zu installierende sowie gering zu wartende Alternative zu sonst für diesen Zweck speziell zu konzipierenden Lysimetern oder aufwendig anzulegenden Aufschlüssen dar. Wie am Beispiel Wagna dargelegt werden kann, stellen derartige tiefengestaffelte Messeinrichtungen unter ackerbaulich genutzten Flächen eine Möglichkeit dar, die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsweisen auf die aktuelle Grundwasserqualitätssituation in situ zu messen.

Literatur

- ABIT, S.M., A. AMOOZEGAR, M.J. VEPRASKAS and C.P. NIEWOEHNER, 2008: Solute Transport in the Capillary Fringe and Shallow Groundwater: Field Evaluation. *Vadose Zone Journal*, 7, 890-898.
- BEHERA, S., M.K. JHA and S. KAR, 2003: Dynamics of water flow and fertilizer solute leaching in lateritic soils of Kharagpur region, India. *Agricultural Water Management*, 63, 77-98.
- DUNN, A.M. and S.E. SILLIMAN, 2003: Air and water entrapment in the vicinity of the water table. *Ground Water*, Vol. 41, No. 6, 729-734.
- EINARSON, M.D. and J.A. CHERRY, 2002: A New Multilevel Ground Water Monitoring System Using Multichannel Tubing. *Ground Water Monitoring & Remediation*, 22, No. 4, 52-65.
- FANK, J., 1999: Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). *Beiträge zur Hydrogeologie*, 49/50, 101-388.
- GENUCHTEN, M.T., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.
- GRAHAM, W.D., 2006: An inexpensive device for multiple depth sampling of groundwater quality in cohesionless aquifers. Institute of Food and Agricultural Sciences, Agricultural and Biological Engineering Department. Gainesville, Florida, USA: University of Florida.
- INSTITUT FÜR KULTURTECHNIK UND BODENWASSERHAUSHALT, PETZENKIRCHEN, 2005: Prüfbericht, Bodenproben Wagna. Bundesamt für Wasserwirtschaft, Petzenkirchen.
- LIPPOK, W., 1966: Modellversuche über das Verhalten von Heizöl EL in porösen Medien. *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen*, Jg. 10, H. 5.
- MUALEM, Y., 1976: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12, 513-522.
- RONEN, D., H. SCHER and M. BLUNT, 2000: Field observations of a capillary fringe before and after a rainy season. *Journal of Contaminant Hydrology*, 44, 103-118.
- ŠIMŮNEK, J., M. ŠEJNA and M.T. van GENUCHTEN, 2007: The HYDRUS Software Package for Simulating the Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Prague, Czech Republic: PC Progress.
- TWARDOWSKA, I., 1995: Areas of long-lasting anthropoppression: assessment and monitoring of pollution potential to soil and ground water. *Proc. SPIE*, Vol. 2504, 253-264.
- WALTHER, M., 2008: Untersuchung von Wasserfluss und Stofftransport im Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Zone im Labor- und Feldmaßstab am Beispiel der SUIR-Beprobungsvorrichtung in Wagna, Österreich. Diplomarbeit, Bewertung ausstehend zum 15.12.2008, Technische Universität Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Grundwasserwirtschaft, Dresden.