Stellungnahme

Grundwasser als Quelle für die Phosphor-Belastung des Arendsees

Karin Meinikmann[1], Michael Hupfer[1], Gunnar Nützmann[1,2] & Jörg Lewandowski[1,2]

Stellungnahme zur Publikation von Hannappel, Köpp & Rejman-Rasinska mit dem Titel „Aufklärung der Ursachen zur Phosphorbelastung des oberflächennahen Grundwassers im hydraulischen Zustrom zum Arendsee in der Altmark" in Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 62, (1), 25 - 38; DOI: 10.5675/HyWa_2018,1_2

Der kürzlich erschienene Artikel von HANNAPPEL et al. (2018) widmet sich dem wichtigen Thema des Beitrages des Grundwassers zur Eutrophierung von Seen und bereichert damit die aktuelle Diskussion zu diesem Thema. Neuere Publikationen zeigen nämlich, dass das Grundwasser (GW) als Eintragspfad für Phosphor (P) eine deutlich größere Rolle spielt als bisher angenommen und damit eine unterschätzte Größe in der P-Bilanz von Seen darstellen kann (z. B. LEWANDOWSKI et al., 2015; MEHL et al., 2016). Unser Kommentar nimmt die oben genannte Veröffentlichung zum Anlass, um die bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss des Grundwassers auf die trophische Situation im Arendsee einer erneuten kritischen Diskussion zu unterziehen. Die Messergebnisse von HANNAPPEL et al. (2018) bestätigen im Wesentlichen bisherige Untersuchungsergebnisse zur hohen P-Belastung des GW im Stadtgebiet am Südufer des Sees, die in Fachzeitschriften publiziert wurden (MEINIKMANN et al., 2013; MEINIKMANN et al., 2015; HUPFER et al., 2016). Bei der Auswertung der Messdaten in der Publikation von HANNAPPEL et al. (2018) wurden allerdings einige Aspekte nicht oder nur ungenügend berücksichtigt, was erhebliche Auswirkungen auf die Ergebnisse und Schlussfolgerungen hat.

Grundwasserbürtige P-Fracht

HANNAPPEL et al. (2018) berechnen für den Arendsee eine mit dem Grundwasser (GW) in den See transportierte P-Fracht von 313 kg pro Jahr, was deutlich unter dem von MEINIKMANN et al. (2015) ermittelten Wert von 830 kg pro Jahr liegt. Die Publikation von MEINIKMANN et al. (2015) wurde von HANNAPPEL et al. (2018) nicht berücksichtigt. Sie ist die wissenschaftliche Veröffentlichung der von HANNAPPEL et al. (2018) zitierten Untersuchungsberichte des IGB und enthält gegenüber diesen geringfügig aktualisierte Daten. Dass die von HANNAPPEL et al. (2018) berechnete P-Fracht geringer ausfällt, ist darauf zurückführen, dass die Autoren von einem gleichmäßigen GW-Zustrom in allen Seetiefen ausgehen. Tatsächlich erfolgt die GW-Exfiltration in Seen (auch im Arendsee) überwiegend ufernah und nimmt mit zunehmender Uferentfernung (und somit Seetiefe) deutlich ab. Dies ist ein weithin bekanntes und durch theoretische Arbeiten, Modellierungen und Messungen belegtes Phänomen. GW fließt immer in Richtung der größten Druckentlastung (MCBRIDE & PFANNKUCH, 1975; PFANNKUCH & WINTER, 1984). Die Druckentlastung beim Auftreffen des GW-Spiegels auf den Seespiegel führt dazu, dass die Fließpfade bereits im GW-Anstrom eines Sees leicht nach oben abknicken, so dass vor allem das oberflächennahe Grundwasser das exfiltrierende Grundwasser ist (Abb. 1). Im Fall des Arendsees ist vor allem dieses oberflächennahe Grundwasser ausgesprochen stark mit P belastet und es gibt in Seenähe auch keinen ausgeprägten Aquitard, der ein Abknicken der Fließpfade verhindern würde.

Außerdem wird in hochproduktiven Seen wie dem Arendsee die ufernahe Exfiltration zusätzlich durch mächtige Muddeauflagen in größeren Wassertiefen verstärkt. Im ufernahen Flachwasserbereich wird feines Material durch windinduzierte Turbulenz resuspendiert und sedimentiert letztendlich in tiefen Seearealen. MEINIKMANN et al. (2013) zeigten, dass auch im Arendsee die GW-Exfiltration mit zunehmender Uferentfernung (bereits nach wenigen Metern) deutlich abnimmt oder gar nicht mehr messbar ist. Lokale Zutritte, aber auch flächenhafter Zutritt von GW in größeren Seetiefen können durch Messungen mit der sogenannten DTS-Technik (distributed temperature sensing; MEINIKMANN et al., 2016; SELKER et al., 2006) ausgeschlossen werden (unveröffentlichte Daten IGB).

Qualität und Quantität der Einträge aus oberirdischen Zuflüssen

Die Einträge aus oberirdischen Zuflüssen spielen eine große Rolle in der Wasserbilanz des Arendsees, allerdings sind sie nur von untergeordneter Bedeutung in der P-Bilanz. Wegen der deutlichen Abweichung bei den Berechnungen in HANNAPPEL et al. (2018) im Vergleich zu den bisher publizierten Ergebnissen soll hier auch auf diese Bilanzgröße eingegangen werden. Die drei (von vier) Drainagesysteme, die von HANNAPPEL et al. (2018) untersucht wurden, entwässern überwiegend intensiv-landwirtschaftlich genutztes Gebiet. Lange Zeit ist man davon ausgegangen, dass P überwiegend partikulär gebunden transportiert wird, so dass vor allem im Flachland dem P-Eintrag über Drainagen nur geringe Bedeutung

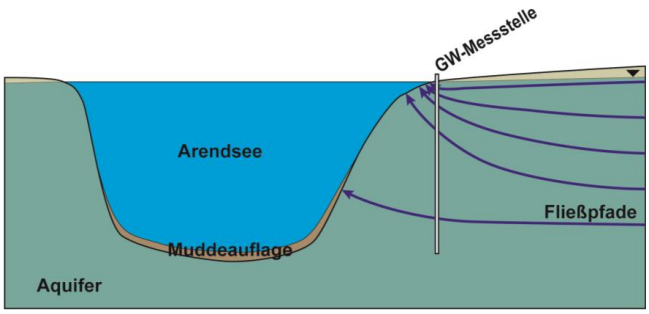

Abbildung 1
Typische GW-Fließpfade in einem homogenen Aquifer im Anstrom eines Sees. Die Fließpfade knicken in Seenähe nach oben ab. Dieser Effekt wird durch die im vorliegenden Fallbeispiel vorhandene Muddeauflage verstärkt. Der Abstand der Fließpfade zueinander repräsentiert die Intensität des GW-Fluxes. In Ufernähe ist die Position einer Grundwassermessstelle schematisch dargestellt. Tatsächlich sind die verschiedenen Messstellen in unterschiedlichen Tiefen verfiltert. Die Abbildung veranschaulicht, dass (1) der überwiegende Anteil des dem See zuströmenden GWs oberflächennah erfolgt, und dass (2) damit auch die P-Fracht durch das oberflächennahe GW bestimmt wird.

1 Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, Berlin

2 Humboldt Universität zu Berlin, Geographisches Institut, Berlin

beigemessen wurde. Allerdings hat sich das Bild in den letzten Jahren geändert. Viele Autoren bestätigen, dass P vor allem ereignisbezogen in signifikanten Mengen in die Gewässer gelangt (z. B. JORDAN et al., 2005). Anders als beispielsweise häufig für Nitrat beobachtet, verdünnen sich P-Konzentrationen bei Niederschlagsereignissen nicht notwendigerweise. Im Gegenteil, häufig kommt es zu kurzfristigen Konzentrationsspitzen, die mit den Abflussspitzen zusammen fallen. Auf diese Weise können einzelne kurzfristige (d. h. minuten- oder stundenweise) Niederschlagsereignisse einen Großteil der jährlichen P-Fracht eines Gewässers ausmachen. WADE et al. (2012) weisen zum Beispiel einen deutlichen Informationsverlust zwischen der stündlichen, täglichen, und wöchentlichen Erfassung von P-Konzentrationen nach. Andere Studien belegen, dass auch sogenannte „non-storm events" von großer Bedeutung für den P-Transport im Einzugsgebiet sein können (JORDAN et al., 2005), was zeigt, wie hoch die individuelle P-Dynamik von Einzugsgebieten sein kann.

Die Untersuchungen von MEINIKMANN et al. (2015) tragen diesen Tatsachen Rechnung, indem über einen Jahresverlauf hochaufgelöst P-Konzentrationen (24-stündlich) und Abflüsse (30-minütig) in den vier oberirdischen Zuflüssen gemessen wurden. Es zeigte sich, dass die vier Teileinzugsgebiete sehr individuelle P-Dynamiken haben, die durch komplexe und dynamische Zusammenhänge zwischen Landnutzung und saisonalen sowie aktuellen Witterungsverhältnissen gesteuert werden. HANNAPPEL et al. (2018) haben aus lediglich vier Messwerten an je drei Zuflüssen in einem Zeitraum von 160 Tagen abgeleitet, dass die Messungen von MEINIKMANN et al. (2015) die Frachten überschätzen. Zwanzig beispielhafte Reduktionen der hochaufgelösten Daten von MEINIKMANN et al. (2015) auf vier Messtermine zeigen dagegen, dass vier Messtermine bei hochdynamischen Systemen wie den Zuflüssen des Arendsees nicht zu einem repräsentativen Messergebnis führen (Abb. 2).

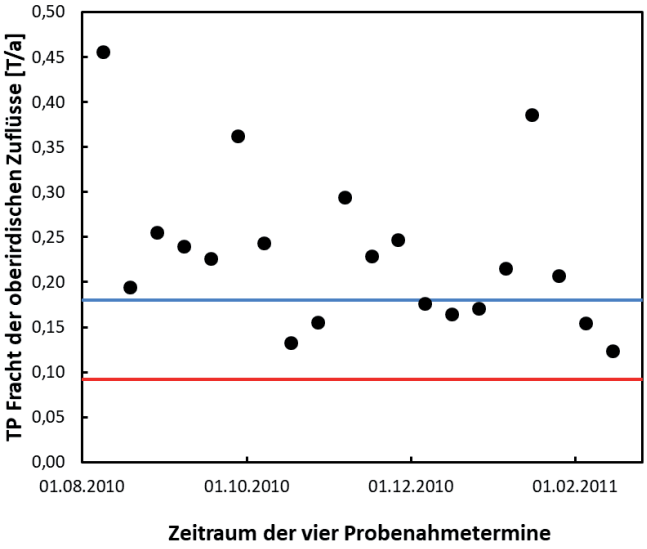

Abbildung 2
In den Arendsee importierte TP (Gesamtphosphor) Fracht der oberirdischen Zuflüsse in Tonnen pro Jahr. Blau der Wert aus MEINIKMANN et al. (2015), ermittelt mit hoher zeitlicher Auflösung für ein Jahr (Abflussmessung: alle 30 Minuten; TP-Konzentrationen einmal täglich; 01.08.2010 - 31.07.2011; 4 Zuflüsse); rot der Wert aus HANNAPPEL et al. (2018), ermittelt durch vier Messungen in einem Zeitraum von 160 Tagen (08.09.2015, 22.11.2015, 11.01.2016, 15.02.2016; 3 Zuflüsse). Als schwarze Punkte dargestellt die Ergebnisse der Datenreduktion des Meinikmann'schen Datensatzes auf vier Messtermine im gleichen zeitlichen Abstand wie bei HANNAPPEL et al. (2018). Dabei wurde der 160-Tage-Zeitraum mit den vier Messterminen im Zeitraum 01.08.2010 - 31.07.2011 von schwarzem Datenpunkt zu Datenpunkt um 10 Tage verschoben (n = 20).

Lokale Eingrenzung der Grundwasserbelastung und Identifikation der Ursachen

In ihrer Zusammenfassung konstatieren HANNAPPEL et al. (2018), dass die „hohe chemische Belastung des Sees mit Phosphor … aus historischen Einträgen über lange Zeiträume" resultiert. Aus unserer Sicht geben die Autoren allerdings keine neuen Anhaltspunkte für die tatsächliche Herkunft der P-Belastung des Grundwassers. Richtig ist, dass es Belastungen des Sees aus häuslichen und teilweise auch industriellen Abwässern gab.

HANNAPPEL et al. (2018) bestätigen die sehr hohe P-Konzentrationen im Aquifer (zum Teil über 5 mg P L^{-1}). Wie schon in MEINIKMANN et al. (2015) ausgeführt, bleibt fraglich, ob die Belastung des Aquifers weiterhin stattfindet oder ob es sich um frühere, nicht mehr aktive Belastungsquellen handelt. Angesichts hoher P-Konzentrationen im Grundwasserleiter sind weiterhin aktive Eintragsquellen in das Grundwasser nicht auszuschließen, da ein Rückgang der Konzentrationen im Grundwasser zu einer Verringerung der P-Sättigung im Korngerüst führen würde. HANNAPPEL et al. (2018) fanden jedoch hohe P-Sättigungen der Sedimente im Anstrom des Sees vor. Sie konnten die Ursachen der aktuell hohen P-Konzentrationen im zuströmenden Grundwasser leider nicht aufklären. Sie zeigen, dass potentielle Altlasten wie ein Düngemittellager oder die Verregnung von Abwässern im Einzugsgebiet in keinem Zusammenhang mit der aktuellen Grundwasserbelastung stehen. Es gibt keine Hinweise auf erhöhte P-Konzentrationen im Abstrom dieser Flächen. Anscheinend haben auch die Installation von neuen Grundwassermessstellen und weitere Sondierungen im Grundwasserleiter keine (lokale) Eingrenzung der Herkunft der Belastung ermöglicht, so dass die Aussage von MEINIKMANN et al. (2015) weiterhin Bestand hat, dass es eine Vielzahl von Einzelquellen im Stadtgebiet gibt oder gegeben hat. Damit steht weiterhin die Befürchtung im Raum, dass die Ursachen der Verunreinigung des Grundwassers, beispielsweise defekte Abwasser-Hausanschlussleitungen, noch immer aktiv sind.

Unabhängige Methoden zur Ermittlung der P-Einträge

Da die Ermittlung des P-Eintrages über die einzelnen Quellen naturgemäß mit vielen Unsicherheiten verbunden ist, sollten für die Ermittlung der gesamten P-Einträge in einen See weitere Methoden herangezogen werden. Somit lässt sich, wie bereits in MEINIKMANN et al. (2015) und HUPFER et al. (2016) dargestellt, die Summe der ermittelten P-Einträge in den Arendsee auf unabhängige Weise verifizieren. In dem einfachen Bilanzansatz wird der P-Eintrag mit der Summe der Verlustgrößen und der Veränderung des P-Inhalts im See gleichgesetzt. Untersuchungen an datierten Sedimentkernen haben ergeben, dass jährlich 1,0 t P pro Jahr dauerhaft im Sediment des Sees zurückgehalten werden (HUPFER et al., 2016). Der Verlust durch den jährlichen P-Export über den oberirdischen Abfluss und über das Grundwasser kann relativ einfach mit 0,37 t pro Jahr quantifiziert werden (HUPFER & LEWANDOWSKI, 2005; MEINIKMANN et al., 2015). Im Vergleich zu HANNAPPEL et al. (2018) ist der P-Export etwas geringer, weil für die Quantifizierung des P-Exports die mittlere P-Konzentrati-

on im Epilimnion verwendet wurde, da in einem geschichteten Wasserkörper wie dem Arendsee kein P-reicheres Tiefenwasser oberirdisch abfließen kann. Auch der Grundwasserabfluss erfolgt analog zum Grundwasserzustrom überwiegend ufernah, also ebenfalls als epilimnisches Seewasser. Eine weitere wichtige Größe in der P-Bilanz ist die Änderung des P-Inhalts im Wasserkörper. Von 1995 bis 2014 ist der P-Inhalt des Sees durchschnittlich um 0,26 t P pro Jahr angestiegen (HUPFER et al., 2016). Addiert man die drei Größen beträgt der mittlere P-Eintrag in den See 1,63 t pro Jahr. In den letzten Jahren ist kein Anstieg im Wasserkörper mehr registriert wurden, so dass der P-Eintrag etwas geringer ausfallen könnte.

Nach dem Vollenweider-Modell (VOLLENWEIDER & KEREKES, 1982) zur Berechnung des P-Eintrags bei einer bekannten mittleren P-Konzentration im See, beträgt der externe Eintrag 1,72 t pro Jahr. Diese Berechnungen stimmen sehr gut mit der von MEINIKMANN et al. (2015) berechneten Summe der einzelnen P-Einträge in Höhe von 1,56 t pro Jahr überein. HANNAPPEL et al. (2018) kommen auf Einträge von lediglich 893 kg P pro Jahr, was nur etwa der Hälfte der über den Bilanzansatz oder über das Vollenweider-Modell ermittelten P-Einträge entspricht. Daraus ist zu folgern, dass es entweder eine bislang nicht berücksichtigte P-Quelle gibt, oder ein wesentlicher Eintragspfad von HANNAPPEL et al. (2018) deutlich unterschätzt wird. Die Bilanzberechnungen sprechen sehr dafür, dass vor allem die Werte für die P-Einträge über das Grundwasser in der Studie von HANNAPPEL et al. (2018) zu gering sind.

Nicht nachvollziehbar sind die Schlussfolgerungen in HANNAPPEL et al. (2018), dass der jährliche externe P-Eintrag unbedeutend für die P-Konzentration im See ist. In der Limnologie ist seit langem bekannt, dass die P-Flächenbelastung in Relation zur mittleren Tiefe und der hydraulischen Belastung die entscheidende Kenngröße für den trophischen Status eines Sees ist (SAS, 1990; VOLLENWEIDER, 1976). Nicht die einzelne Jahresfracht im Vergleich zum P-Inhalt des Sees ist entscheidend, sondern ob der kontinuierliche P-Eintrag von außen oberhalb eines bestimmten Schwellenwertes liegt. Einfache Rechnungen oder auch Belastungsmodelle zeigen, dass insbesondere bei langen Wasseraufenthaltszeiten im Vergleich zum Wasserkörper „geringe“ P-Einträge pro Jahr ausreichen, um ein hohes P-Niveau im See zu erhalten bzw. wiederherzustellen. Der nahezu stationäre Zustand mit P-Konzentrationen um 180 µg L^{-1} im Arendsee lässt keine andere Schlussfolgerung zu, als dass die externe P-Belastung bis in die jüngste Zeit für ein Erreichen der in der EU Wasserrahmenrichtlinie definierten Wasserqualitätsziele viel zu hoch ist.

Abschließend bleibt festzustellen, dass sowohl HANNAPPEL et al. (2018) als auch die Veröffentlichungen von MEINIKMANN et al. (2015) und HUPFER et al. (2016) die Notwendigkeit einer gewässerinternen Maßnahme wie eine P-Fällung begründen. Der Unterschied besteht vor allem darin, dass MEINIKMANN et al. (2015) und HUPFER et al. (2016) eine über Jahrzehnte nachhaltige Seenrestaurierung nur für möglich halten, wenn sich der externe P-Eintrag rückläufig entwickelt oder eine solche Entwicklung durch begleitende oder nachträglich einsetzende Maßnahmen unterstützt wird.

Literaturverzeichnis

HANNAPPEL, S., KÖPP, C. & REJMAN-RASINSKA, E. (2018): Aufklärung der Ursachen zur Phosphorbelastung des oberflächennahen Grundwassers im hydraulischen Zustrom zum Arendsee in der Altmark. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 62(1): 25-38.

HUPFER, M., REITZEL, K., KLEEBERG, A. & LEWANDOWSKI, J., (2016): Long-term efficiency of lake restoration by chemical phosphorus precipitation: Scenario analysis with a phosphorus balance model. Water Research, 97: 153-161.

HUPFER, M., & LEWANDOWSKI, J. (2005): Retention and early diagenetic transformation of phosphorus in Lake Arendsee (Germany) - consequences for management strategies. Archiv fuer Hydrobiologie, 164(2): 143-167.

JORDAN, P., ARNSCHEIDT, J., MCGROGAN, H. & MCCORMICK, S. (2005): High-resolution phosphorus transfers at the catchment scale: the hidden importance of non-storm transfers. Hydrology and Earth System Sciences, 9(6): 685-691.

LEWANDOWSKI, J., MEINIKMANN, K., NÜTZMANN, G. & ROSENBERRY, D.O. (2015): Groundwater – the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 2: effects of groundwater on nutrients. Hydrological Processes, 29(13): 2922-2955.

MCBRIDE, M.S. & PFANNKUCH, H.O. (1975): Distribution of seepage within lakebeds. Journal of Research of the US Geological Survey, 3(5): 505-512.

MEHL, D., HOFMANN, T. G., SCHNEIDER, M., KNÜPPEL, M., BAUMGARTEN, W. & GIESE, H. (2016): Konzeptstudie für den Schalsee (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern). I. Phosphorausstrag (Einzugsgebiet) und Phosphoreintrag (See). Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 60(5): 303-320.

MEINIKMANN, K., HUPFER, M.; NÜTZMANN, G. & LEWANDOWSKI, J. (2016): Methoden zur Erfassung von Grundwasser-Oberflächenwasser-Interaktionen. In: Hupfer, M. &; Fischer, H. (Ed.): Handbuch Angewandte Limnologie. Weinheim: Wiley-VCH, Kapitel III-1.2.2, 32. Erg. Lfg. 2/15, 39 S.

MEINIKMANN, K., HUPFER, M. & LEWANDOWSKI, J. (2015): Phosphorus in groundwater discharge – A potential source for lake eutrophication. Journal of Hydrology, 524(0): 214-226.

MEINIKMANN, K., LEWANDOWSKI, J. & NÜTZMANN, G. (2013): Lacustrine groundwater discharge: Combined determination of volumes and spatial patterns. Journal of Hydrology, 502(0): 202-211.

PFANNKUCH, H.O. & WINTER, T.C. (1984): Effect of anisotropy and groundwater system geometry on seepage through lakebeds: 1. Analog and dimensional analysis. Journal of Hydrology, 75(1–4): 213-237.

SAS, H. (1990): Lake restoration by reduction of nutrient loading: Expectations, experiences, extrapolations. SIL Proceedings, 1922-2010, 24(1): 247-251.

SELKER, J.S., THÉVENAZ, L., HUWALD, H., MALLET, A., LUXEMBURG, W., VAN DE GIESEN, N., STEJKSAL, M., ZEMAN, J., WESTHOFF, M. & PARLANGE, M. B. (2006): Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. Water Resour. Res., 42(12), W12202.

VOLLENWEIDER, R.A. (1976): Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication. Memorie dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, 33: 53–84.

VOLLENWEIDER, R.A. & KEREKES, J. (1982): Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris, 154 S.

WADE, A.J., PALMER-FELGATE, E. J., HALLIDAY, S. J.,SKEFFINGTON, R. A., LOEWENTHAL, M., JARVIE, H. P., BOWES, M. J., GREENWAY, G. M., HASWELL, S. J., BELL, I. M., JOLY, E., FALLATAH, A., NEAL, C., WILLIAMS, R. J., GOZZARD, E. & NEWMAN, J. R. (2012): Hydrochemical processes in lowland rivers: insights from in situ, high-resolution monitoring. Hydrology and Earth System Sciences, 16(11): 4323-4342.

Entgegnung

Stephan Hannappel, Claudia Köpp & Elzbieta Rejman-Rasinska

Entgegnung zur Stellungnahme: „Grundwasser als Quelle für die Phosphor-Belastung des Arendsees" Meinikmann, K., Hupfer, M., Nützmann, G. & J. Lewandowski (2018)

Der Kommentar der KollegInnen des IGB bezieht sich auf einige methodische Aspekte unserer Untersuchungen zu den Ursachen der hohen Phosphorbelastung des oberflächennahen Grundwassers im Zustrom zum Arendsees, zu denen wir gerne Stellung beziehen. Grundsätzlich kommen unsere, in HYDOR (2016) dokumentierten Untersuchungen zu dem gleichen Schluss wie die langjährigen Forschungsergebnisse des IGB: das Grundwasser im hydraulischen Zustrom des Arendsees ist extrem hoch mit Phosphor belastet und trägt damit unzweifelhaft zur langjährig stabilen Trophie des Seekörpers bei. Im Fokus unserer Studie stand die Aufklärung der bisher weitgehend unbekannten Ursachen dieser Belastung, um die aktuell in der Diskussion stehenden Restaurierungs- bzw. Sanierungsmaßnahmen fachlich zu unterstützen. Unstrittig ist, dass eine aufwändige Seesanierung nur dann nachhaltig und mit einer breiten Akzeptanz auch in der Bevölkerung durchgeführt werden kann, wenn die Ursachen der Belastung bekannt sind und zukünftig kein weiterer Anstieg dieser Belastung zu erwarten ist. Dies war das primäre Ziel unserer Arbeiten im Auftrag des Umweltministeriums Sachsen-Anhalt. Bei der Gliederung unserer Stellungnahme halten wir uns an diejenige von MEINIKMANN et al. (2018).

Grundwasserbürtige Phosphor-Fracht

Ein erheblicher Unterschied unserer Ergebnisse zu den von MEINIKMANN et al. (2015 & 2018) angenommenen Frachten besteht in der Abschätzung der dem Arendsee an seinem Südufer zutretenden Phosphorfracht über das Grundwasser. Aus seenahen Tiefbohrungen ist bekannt, dass hier der sandige Grundwasserleiter sehr mächtig ausgebildet ist, also keine geringleitenden Sedimente den Zutritt behindern.

MEINIKMANN et al. (2015 & 2018) ermittelten die im Vergleich zu der von uns berechneten jährlichen Fracht (313 kg Phosphor pro Jahr) mehr als doppelt so hohe Fracht von 830 kg Phosphor pro Jahr (MEINIKMANN et al., 2018) durch uferabschnittsweise Messungen der Grundwasser-Exfiltrationsraten aus Temperaturtiefenprofilen sowie der gemessenen P-Konzentrationen im oberflächennahen Grundwasser in Seenähe. Konzeptionell erläutert wird dieser Ansatz durch die schematische Skizze in Abb. 1 der aktuellen Stellungnahme mit den leicht nach oben abknickenden Fließpfaden des oberflächennahen Grundwassers in Seenähe. Das ist ein geohydraulisch lang bekanntes Phänomen in sog. „Entlastungsgebieten" (HANNAPPEL et al., 1995; LAWA, 1999) des Grundwassers, wo das Grundwasser in die oberirdischen Fließ- oder Standgewässer (Seen) aufgrund der aufsteigenden Stromlinien exfiltriert.

Die – höher angenommenen – 830 kg P pro Jahr ergaben sich dann durch die Multiplikation der in Abschnitten gemessenen P-Konzentrationen mit einer mittleren Grundwasserneubildungsrate von 1,27 Mio. m^3 pro Jahr. Diesen Ansatz haben wir aufgegriffen und durch die temporäre Installation von Grundwassersondierungen mit einer tiefenspezifischen Entnahme von Proben im oberflächennahen Zustrombereich weiterverfolgt. Durch diese aktuellen Messungen zeigte sich, dass in einigen Uferabschnitten bereits in etwa 10 Meter Tiefe seenah (wenige Meter vom Ufer entfernt) deutlich niedrigere P-Konzentrationen (< 0,05 mg/Liter) im Grundwasser als wenige Meter darüber vorliegen, diese Daten standen MEINIKMANN et al. (2015) noch nicht zur Verfügung. Dieses Grundwasser strömt zweifelsfrei auch dem Seekörper zu, da es keine anderen Exfiltrationsmöglichkeiten gibt. Beim Zutritt in das Gewässer vermischt es sich also mit dem höher belasteten Grundwasser darüber. Deutlich höhere Konzentrationen (> 0,5 mg/Liter) wurden fast ausschließlich nur in den oberen Metern gemessen, bereits in 10 Meter Tiefe lagen die Konzentrationen mit einer Ausnahme darunter.

Die von uns vorgenommene, abschnittsweise Differenzierung für das gesamte Tiefenintervall bis 50 Meter Tiefe zeigt die schematische Darstellung in Abb. 11 unseres Beitrages. Die vertikale Abgrenzung bis 50 Meter erfolgte aufgrund der maximalen Tiefe des Sees, der nachgewiesenen Mächtigkeiten des Grundwasserleiters bis in mindestens diese Tiefe sowie der reflexionsseismisch nachgewiesenen Oberfläche des Gipshutes in dieser Tiefenlage (HARTMANN & SCHÖNBERG, 2009). Ebenfalls berücksichtigt wurde am südwestlichen Seeufer der in der GK 25 des LAGB dokumentierte Rupelton, der hier aufgrund seiner starken Barrierefunktion keinen Grundwasserzustrom zulässt.

Festgehalten werden kann, dass es zwischen der von MEINIKMANN et al. (2015 & 2018) durchgeführten Bilanzierung der P-Einträge und der von uns vorgenommenen Berechnung keinen prinzipiellen Unterschied gibt, unsere tiefenspezifisch aufgelösten, aktuellen Messungen jedoch eine präzisere Berechnung erlauben.

Einträge aus oberirdischen Gewässern

Zutreffend festgehalten wird von MEINIKMANN et al. (2018), dass die P-Einträge aus oberirdischen Fließgewässern für die P-Gesamtbilanz der Einträge in den See nur eine untergeordnete Rolle spielen, in unserer Bilanzierung z. B. umfassen sie mit den ermittelten 92 kg P pro Jahr nur etwa 10 % aller Einträge aus den fünf identifizierten Eintragspfaden (athmosphärische Deposition über den Luftpfad, Wildvögel, Fließgewässer, Grundwasser und Sonstiges). Auch die weiteren von den KollegInnen ausgeführten Erläuterungen zum signifikant ereignisbezogenen Eintrag von Phosphor in Gewässer teilen wir uneingeschränkt. Bei einer Bilanzierung für mittlere Zustände dürfen Hochwasserereignisse jedoch nicht einseitig überschätzt werden.

MEINIKMANN et al. (2015) führten zeitlich hochaufgelöste Messungen an den zufließenden Gewässern in der Periode von August 2010 bis Juli 2011 durch, im langjährigen Vergleich war diese Periode besonders niederschlagsreich und damit abflussintensiv. Der Zeitraum unserer Messungen von September 2015 bis Februar 2016 dagegen zeichnete sich nicht durch besonders untypische klimatische Verhältnisse aus, das Jahr 2015 z. B. war mit nur 75 % des langjährigen Niederschlages an der Wetterstation des IGB am Arendsee eher ein trockenes Jahr (HYDOR, 2016). Tendenziell haben wir also eher einen Niedrigwasserzeitraum erfasst, MEINIKMANN et al. (2015) eher einen Hochwasserzeit-

raum. Das erklärt die Unterschiede in der P-Bilanzierung bei den Gewässern, die in beiden Untersuchungen jedoch nur etwa 10 % der Einträge umfassen und deren Bedeutung damit relativiert werden sollte.

Lokale Eingrenzung der Grundwasserbelastung und Identifikation der Ursachen

Hier können wir der Einschätzung der KollegInnen des IGB nicht folgen. Durch unsere Untersuchungen konnte erstmals nachgewiesen werden, dass die hohe hydrochemische Belastung des Arendsees mit Phosphor (2015 im Jahresmittel 183 µg/l TP) aus historischen Einträgen über sehr lange Zeiträume resultiert. Ursächliche Quelle des Eintrages war immer häusliches Abwasser, das aus Klärgruben, Verregnungsflächen oder Stapelteichen emittierte und dann über primär oberirdische Eintragspfade nach unterschiedlich langen Verweilzeiten ohne wesentlichen Stoffabbau stets den Arendsee erreicht hatte.

Das im Landeshauptarchiv Sachsen-Anhalt erstmalig recherchierte Dokument (IfW, 1984) enthält sehr wertvolle Detailinformationen zum damaligen „Produktionsversuch mit kommunalem Abwasser" und dokumentiert u. a. auch historische Daten zur Beschaffenheit des damaligen Abwassers, des Sickerwassers und des oberflächennahen Grundwassers. Das mit Phosphor hochkonzentrierte Abwasser wurde über etwa 20 Jahre bis zu Beginn der 1990er Jahre auf Flächen im südlichen Zustrombereich zum Arendsee in einer Entfernung von etwa 2 km zum See verregnet. Von dort strömte es ungehindert zum See. Das rezente Abwasser als potentielle Quelle der Belastung dagegen konnte durch aktuelle Messungen des frisch zuströmenden Abwassers am kommunalen Pumpwerk ausgeschlossen werden, die Konzentrationen lagen hier um eine Größenordnung unterhalb der im Grundwasser nachgewiesenen Werte.

An mehreren Grundwassermessstellen können noch aktuell die aus den historischen Einträgen resultierend sehr hohen Konzentrationen bis zu mehr als 1 mg/Liter (s. Abb. 9 unseres Beitrages) gemessen werden. Die Messstelle mit den am Abstand höchsten Werten von mehr als 4 mg/Liter in einer Entfernung von etwa 200 Meter zum See zeigt seit inzwischen vielen Jahren eine deutlich abnehmende Tendenz, während direkt am See die – deutlich niedrigeren – Konzentrationen noch leicht steigen bzw. stabil. Das steht in Übereinstimmung mit unserer Modellvorstellung des Zustromes aus der früheren Abwasserverregnung. Wir gehen davon aus, dass die Belastung sicher noch einige Jahre anhalten, dann aber – aufgrund der nicht mehr vorhandenen Quelle – abnehmen wird und somit eine Restaurierung des Sees als nachhaltig bewertet werden kann.

Unabhängige Methoden zur Ermittlung der P-Einträge

Hier unterstützen wir grundsätzlich die Ausführungen von MEINIKMANN et al. (2018), z. B. zur Möglichkeit der Feststellung des P-Eintrages an datierten Sedimentkernen. Dies stand jedoch nicht im Fokus unserer Untersuchungen zur P-Belastung des dem See zuströmenden Grundwassers. Unabhängig unserer dargelegten Differenzen bei der P-Bilanzierung stimmen wir jedoch mit den AutorInnen überein, dass die Einträge auch aktuell noch deutlich zu hoch sind, um die Ziele der EG-WRRL für den Arendsee ohne eine Restaurierung bzw. Sanierung zu erreichen. Wir gehen jedoch begründet durch unsere Recherchen und Messungen davon aus, dass diese in der Zukunft zurück gehen und Sanierungsvarianten daher als nachhaltig bewertet werden können.

Anschrift der VerfasserInnen
Dr. S. Hannappel
M.Sc. Claudia Köpp
Dipl. Geol. E. Rejman-Rasinska
HYDOR Consult GmbH
Am Borsigturm 40
13507 Berlin
Tel. 030 43726730
hannappel@hydor.de

Literaturverzeichnis

HANNAPPEL, S., VOIGT, H.-J. & D. LAUTERBACH (1995): Hydrogeologische Struktureinheiten im Lockergestein. - Zeitschrift Angewandte Geologie, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.

HARTMANN, O. & G. SCHÖNBERG (2009): Geologische Entwicklungsgeschichte und Untersuchungs-ergebnisse am Arendsee. - Nachrichtenblatt Arbeitskreis Unterwasserarchäologie, Bd. 15/2009, S. 58-64, Hrsg.: Kommission für Unterwasserarchäologie im Verband der Landesarchäologen.

HYDOR (2016): Sanierungsuntersuchung/Sanierungskonzept zu externen Phosphorquellen im Einzugsgebiet vom Arendsee. - Gutachten im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt (MLU) des Landes Sachsen-Anhalt, 24.03.2016, Berlin.

IfW (1984): Produktionsversuch mit kommunalem Abwasser aus der Kläranlage Arendsee/Altmark. - Forschungsunterlage zur Anlage 4, Bearbeiter: Dipl.-Landw. H. Seeger, Institut für Wasserwirtschaft, Berlin, 26 S., unveröff. (im Landeshauptarchiv Sachsen-Anhalt unter: LHASA, MD, M 55, III Nr. 12.

LAWA (1999): Grundwasser – Empfehlungen zu Konfiguration von Messnetzen sowie zu Bau und Betrieb von Grundwassermessstellen (qualitativ). - Hrsg.: Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.

MEINIKMANN, K., LEWANDOWSKI, J. & M. HUPFER (2015): Phosphorus in groundwater discharge - A potential source for lake eutrophication. - Journal of Hydrology 524, pp. 214-226, Elsevier.