Projektbericht

Grundwasser-See-Interaktion in einem tieflandgeprägten nordostdeutschen Flachsee in Brandenburg

Im Nahbereich des hypertrophen Rangsdorfer Sees in Brandenburg wurden im Verlauf eines Jahres 13 um den See verteilte Grundwassermessstellen jeweils an fünf verschiedenen Zeitpunkten beprobt und deren Wasserstände erfasst. Beim für die Eutrophierung des Sees relevanten Stoff Phosphor zeigte sich, dass das von Nordosten den See anströmende Grundwasser sehr geringe Konzentrationen der mobilen Spezies ortho-Phosphatphosphor aufweist (< 0,03 mg/l). Das gegenteilige Bild zeigt sich in einer südwestlich und südlich an den See angrenzenden Niederung mit hohen ortho-Phosphatphosphorgehalten von bis zu 0,67 mg/l. Eine Interaktion zwischen Grundwasser und See konnte mithilfe von Wasserisotopen in zuvor kartierten Bereichen mit sandiger Lithologie bestätigt werden. Neben der hydrochemischen Charakterisierung des Grundwassers wurde dessen Dynamik mithilfe eines auf der Darcy-Gleichung basierenden Ansatzes untersucht.

Es ergeben sich grundsätzlich zwei verschiedene hydraulische Zustände. Einerseits wird der See lediglich von nährstoffarmem Grundwasser aus dem Norden angeströmt. Dies ist der Fall, wenn der Seewasserstand ausreichend hoch ist. Im anderen Fall, wenn der Seewasserstand unterhalb des Grundwasserstandes der südwestlich angrenzenden Niederung liegt, erfolgt an dieser Stelle ein Rückstrom von nährstoffreichem Grundwasser in den See. Dabei handelt es sich teils um ehemaliges Seewasser, welches somit erneut einen Beitrag zum Phosphoreintrag leisten kann. Empfehlungen für das Gewässermanagement sehen eine Stützung des Seewasserstandes vor, wodurch das System in Bezug auf die vorhandene Eutrophierung in den hydraulisch günstigeren Zustand versetzt wird.

1 Einleitung

Phosphor ist in den meisten Süßwasserökosystemen der limitierende Nährstoff. Ein Überangebot an Phosphor führt jedoch zur Eutrophierung mit den daran geknüpften negativen Auswirkungen, wie der Massenvermehrung von Phytoplankton und Sauerstoffarmut im Gewässer nach deren Absterben (WETZEL, 2001).

Um effektive Maßnahmen zur Reduktion von Phosphor in einem See abzuleiten, müssen möglichst alle Eintragspfade identifiziert und quantifiziert werden. Insbesondere die Erfassung von Phosphoreinträgen über das Grundwasser ist meist mit Schwierigkeiten verbunden, da der Grundwasseraustausch zwischen See und Grundwasserleiter oftmals eine ausgeprägte räumliche und zeitliche Heterogenität aufweist. Dies resultiert in einem erheblichen zeitlichen und technischen Messaufwand. Aus diesem Grund wurde die Interaktion zwischen Grundwasser und See in Nährstoffbilanzierungen meist stark vereinfacht oder vernachlässigt, obwohl das Grundwasser einen bedeutenden Anteil an der Nährstofffracht eines Sees ausmachen kann (ROSENBERRY et al., 2015; LEWANDOWSKI et al., 2015; MEINIKMANN et al., 2015).

In früheren Studien zur Erfassung der Nährstoffbelastungsquellen des Rangsdorfer Sees wurde bisher keine systematische Untersuchung des Grundwassers und dessen Interaktion mit dem See durchgeführt. Ziel der hier berichteten Arbeiten (HYDOR, 2021) war es, dieses Wissensdefizit durch orts- und zeitkonkrete Messungen der Phosphorkonzentrationen, Bestimmung von Wasserisotopen und durch hydraulische Auswertungen im Rahmen eines einjährigen Monitorings zu beheben.

2 Untersuchungsgebiet und Methodik

Der südlich von Berlin gelegene hypertrophe (Gesamtphosphor Saisonmittel 2019: 0,21 mg/l) und polymiktische Rangsdorfer See (internationale Kennung: DE_LW_DEBB8000158286839) dient als Naherholungsgebiet und stellt ein Gewässer mit außerordentlicher Bedeutung für den Arten- und Naturschutz, insbesondere als Vogelrastplatz, in der Region dar. Es handelt sich um einen typischen Flachsee mit einer mittleren Tiefe von 1,7 m und einer Seefläche von 2,44 km². Im Norden wird der Rangsdorfer See durch den Glasowbach als einzigen oberirdische Zulauf gespeist. Eine Entwässerung findet jeweils über ein Wehr im Süden und im Westen des Sees in den Zühlowkanal statt (TERRA URBANA, 2016). Zum Zeitpunkt der Arbeiten konnte jedoch kein Abfluss über diese Pfade beobachtet werden.

Zur Untersuchung der Phosphorkonzentration, Wasserisotopie und Grundwasserdynamik wurden insgesamt 13 bestehende und temporär errichtete Messstellen verwendet. Diese schließen den oberen Bereich des Grundwasserleiters zwischen 0 bis 6 m unter der Grundwasseroberfläche auf. Ausgenommen ist hiervon eine Bestandsmessstelle, die in einem Bereich von 24,5 bis 26,5 m unter der Grundwasseroberfläche verfiltert ist. In allen Messstellen wurden Mittel- bis Feinsand und teils schluffige Beimengungen angesprochen. Die einjährige Beprobung erfolgte im Zeitraum 2020/21 in einem Turnus von zwei bis drei Monaten an insgesamt fünf Stichtagen. Die Beprobung der Wasserisotope im Grund- und Seewasser wurde an zwei Stichtagen im Winter und Sommer durchgeführt. Im Juli 2021 wurde zusätzlich eine Sondierung der Grundwasseroberfläche auf einer westlich des Sees gelegenen Niederungsebene durchgeführt, um überblicksweise eine höhere räumliche Auflösung der Grundwasserstände zu erhalten.

Der Rangsdorfer See wird in weiten Teilen durch eine meist mehrere Meter, teils über 15 m mächtige Muddeschicht vom oberen unbedeckten Grundwasserleiter getrennt. Dieser besteht im Bereich des Sees aus Mittel- bis Feinsanden und ist hydraulisch mit dem zweiten Grundwasserleiter verbunden. Anhand von durchgeführten Sedimentbohrungen des Konsortium Rangsdorfer See (1992) und Sedimentanalysen von Guder (2003) ist in einigen Bereichen mit teils signifikanter räumlicher Ausdehnung jedoch von einer unmittelbaren Anbindung des Gewässers an

den Grundwasserleiter auszugehen. Vereinfacht wurde, basierend auf der Lithologie im Untersuchungsgebiet, ein kf-Wert von 1*10-4 m/s angesetzt. Dieses Vorgehen erlaubt mithilfe des hydraulischen Gradienten eine Quantifizierung der Grundwasser-See-Interaktion nach ROSENBERRY et al. (2008) und eine Bestimmung des konservativen Eintrags von ortho-Phosphatphosphor.

Die für hydrologische Fragestellungen relevanten Isotope O-18 des Sauerstoffs und D (Deuterium) des Wasserstoffs ermöglichen es, die Herkunft eines Wassers abzuleiten. Grund- und Seewasser zeichnet sich durch sehr unterschiedliche Isotopenzusammensetzungen aus. Grundwasser weist typischerweise die Zusammensetzung von Regenwasser auf, währenddessen die Isotopenzusammensetzung von Seewasser durch Verdunstungsprozesse verändert wurde. Durch Messungen des Isotopenverhältnisses der Grund- und Seewasserproben kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob Grundwasser an dieser Stelle in den See übertritt oder im umgekehrten Fall Seewasser in den Grundwasserleiter infiltriert (TURNER & TOWNLEY, 2006; DWA, 2021 (unveröffentl.)).

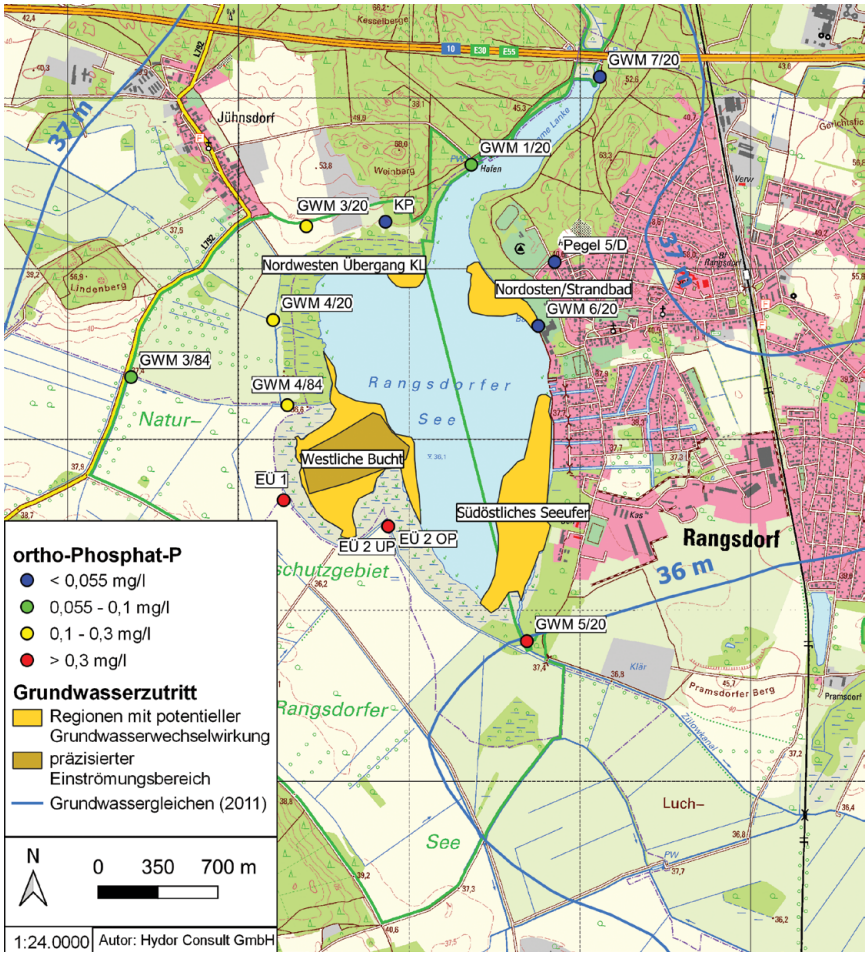

Abbildung 1
Lage der sandigen Bereiche, an denen bevorzugt Wechselwirkungen zwischen Grundwasserleiter und See zu erwarten sind, und die mittlere Konzentration von ortho-Phosphatphosphor (ortho-Phosphat-P) während der einjährigen Probenahmekampagne. Nicht dargestellt ist die mittlere Konzentration der Messstelle EÜ-2 OP mit 0,18 mg/l. Kartengrundlage: DTK250.

3 Ergebnisse

In Abbildung 1 ist die mittlere gemessene ortho-Phosphatphosphor-Konzentration in den Messstellen während des einjährigen Monitorings kartografisch dargestellt. Abgesehen von der Messstelle "GWM 1/20", weisen die im nördlichen und östlichen Bereich des Sees befindlichen Messstellen geringe Konzentrationen auf. In den Messstellen auf der westlichen Seeseite zeigt sich zum Südwesten und Süden eine Erhöhung der mittleren Konzentration mit über 0,6 mg/l an der Messstelle "GWM 5/20". Ebenso ist die Lage der Regionen mit einer angenommenen Grundwasser-See-Interaktion dargestellt. Zusätzlich zu den abgebildeten Bereichen wurde im nördlichen Teilbecken des Sees (Krumme Lanke/KL) eine Anbindung in einem 10 m breiten Uferbereich angenommen, da in diesem Bereich der sandige Grundwasserleiter (GWL) 1.2 ansteht (FRAUENSTEIN, 2017). In der südwestlichen Bucht wurde anhand von Anomalien mit deutlich höheren Konzentrationen von Phosphor und organischem Kohlenstoff im sandigen Sediment eine Präzisierung des Austauschbereichs durchgeführt, da dieses Material vermutlich aus infiltrierendem Seewasser herausgefiltert wird.

Die unterstützend zur Identifizierung von Infiltrations- und Exfiltrationsbereichen durchgeführte Analyse der Wasserisotope zeigt (Abb. 2), dass sich die Wasserproben drei deutlich unterschiedlichen Gruppen zuordnen lassen. Die größte Gruppe weist eine leichte isotopische Zusammensetzung auf (stark negative Werte). Diese Wasserart befindet sich auf der globalen meteorischen Wasserlinie bzw. der lokalen meteorischen Wasserlinie von Berlin[1]. Es handelt sich um meteorisches Wasser, das keinem bzw. nur einem geringen evaporativen Einfluss unterlag. Weiterhin wurde ein saisonaler Effekt in diesen Wasserproben beobachtet, welcher auf Wasser jungen Alters hindeutet. Das gegenüberliegende Endglied besteht aus isotopisch schwerem Wasser. Dieses unterlag einer Isotopenfraktionierung durch Evaporation. Die Proben mit dieser Signatur stammen dabei aus den Grundwassermessstellen "EÜ-1" und "GWM 5/20" sowie aus dem Rangsdorfer See.

Die dritte Gruppe besteht ausschließlich aus Wasserproben, welche aus den Messstellen "EÜ-2 OP" und "EÜ-2 UP" entnommen wurden. Es handelt sich um Mischwasser, welches sich aus meteorischem und evaporativ beeinflusstem Wasser zusammensetzt. Da die betrachteten Proben jedoch nur geringfügig unterhalb der lokalen meteorischen Wasserlinie plotten, ist nicht vollständig auszuschließen, dass es sich um meteorisches Wasser handelt. Dieses wäre jedoch deutlich älter als das Wasser der ersten Gruppe, da nach dem Jahr 2012 keine Niederschläge mit einem vergleichbaren Isotopenverhältnis fielen. Insbesondere im Hin-

1 http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_isohis.html

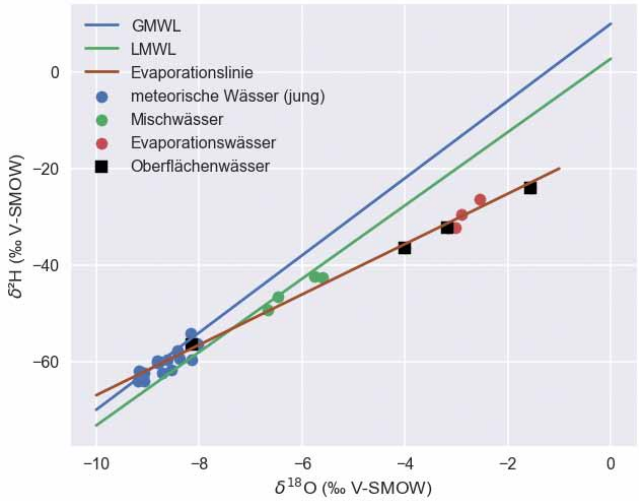

Abbildung 2
Darstellung des Verhältnisses von δ^2H und $\delta^{18}O$ (bezogen auf das Vienna Standard Mean Ocean Water – VSMOW) in den Proben der Grundwassermessstellen und des Oberflächenwassers, der globalen meteorischen Wasserlinie, der lokalen meteorischen Wasserlinie für Berlin und der anhand der Proben erzeugten Evaporationslinie.

blick auf eine beobachtbare leichte Saisonalität ist die Erklärung, dass es sich um Mischwasser handelt, plausibler.

Die Isotopensignatur der Oberflächenwasserproben folgt einem klaren Muster: Wasser mit der leichtesten Signatur stammt unmittelbar von der Glasowbachmündung. Das Glasowbachwasser ist somit meteorischen Ursprungs und unterlag keiner signifikanten Fraktionierung durch Evaporation. Anschließend findet über das nördliche Teilbecken hin zum Hauptbecken des Rangsdorfer Sees eine progressive Anreicherung des schwereren Sauerstoffisotops statt.

Abschließend lässt sich mit hoher Sicherheit sagen, dass das Wasser in den Grundwassermessstellen "EÜ-1", "EÜ-2 OP/UP" und "GWM 5/20" aus dem Rangsdorfer See stammt.

Im Verlauf der einjährigen Messungen zeigte sich, dass die Messstellen in Bezug zum Seewasserstand alternierende Gradienten aufweisen. Exemplarisch werden hierfür zwei Zustände in Abbildung 3 dargestellt. Für Juli 2021 zeigt sich, dass in der Mehrzahl der Messstellen der Wasserstand unterhalb des Seeniveaus lag. Dies bedeutet, dass primär ein Einströmen von Seewasser in den Grundwasserleiter zu erwarten ist. Das Gegenteil ist für Januar 2021 zu beobachten. Fast alle Messstellen weisen einen umgekehrten Gradienten zum See auf und deuten auf ein Einströmen von Grundwasser in den See hin. In beiden Abbildungen ist die Grundwasserfließrichtung durch Pfeile gekennzeichnet. Mit Blick auf die beobachteten Isotopenverhältnisse in den Messstellen "EÜ-1", "EÜ-2 OP" und "EÜ-2 UP" ist somit davon auszugehen, dass zu bestimmten Zeiten stark mit Phosphor angereichertes ehemaliges Seewasser zurück in den Rangsdorfer See strömt und somit zu dessen hohen Nährstoffkonzentrationen beiträgt.

Die für den jeweiligen Messzeitraum und Einströmungsbereich repräsentativen Grundwasserflüsse sind in Tabelle 1 dargestellt. Daraus wurde für den gesamten Rangsdorfer See die Grundwasserbilanz für den jeweiligen Messzeitraum berechnet und anschließend zu einer Jahresbilanz aggregiert. Hierfür wurden die vier Messungen von September 2020 bis Juli 2021 verwendet und jeweils als repräsentativ für ein Quartal des Jahres angesehen. Die erste Messung vom 25. Juni 2020 wurde nicht für die Jahresberechnung hinzugezogen, da sonst der Sommer doppelt in die Berechnungen einfließen würde. Die Berechnungen zeigen, dass der See im betrachteten Jahr netto rund 300.000 m^3 durch den Grundwasserpfad verliert.

Die Verwendung der quartalsweise für die einzelnen Bereiche mit potenzieller Grundwasser-See-Interaktion vorliegenden Grundwasserflüsse erlaubt eine räumlich und zeitlich differenzierte Abbildung der grundwasserbürtigen Phosphorfracht. Die berechneten konservativen Phosphorfrachten des Sees sind in Tabelle 2 dargestellt. Als Jahresfracht für den Grundwasserpfad ergibt sich schließlich aus der Summe der letzten vier Quartale eine Phosphormenge von 32,22 kg. Es wurde dabei angenommen, dass ausschließlich ortho-Phosphat mobil im Grundwasser ist. Dabei handelt es sich um eine im Vergleich zu anderen Eintragsquellen, wie dem oberirdischen Zufluss mit 313 bis 351 kg P/a, sehr geringe Eintragsmenge.

Bei diesem auf der Darcy-Gleichung nach ROSENBERRY et al. (2008) basierenden Ansatz ist von Bedeutung, dass große Unsicherheiten hinsichtlich der räumlichen Verteilung des kf-Werts des Grundwasserleiters bestehen. Bereits geringe Schwankungen des kf-Werts können zu einer starken Über- bzw. Unterschät-

Tabelle 1
Quartalsweise berechnete Grundwasserbilanz, basierend auf dem hydraulischen Gradienten bzw. den Grundwasserflüssen an den Bereichen mit potenzieller Grundwasser-See-Interaktion. Die Jahresbilanz bezieht sich auf die vier aktuellsten Quartale.

Stichtag	25.06.2020	21.09.2020	12.01.2021	10.03.2021	05.07.2021
Südöstliches Seeufer {m^3/s]	-0,0235	0,0258	0,0172	-0,0484	-0,0218
Nordosten/Strandbad [m^3/s]	0,0049	0,0085	0,0030	0,0016	0,0042
Nordwesten Übergang Krumme Lanke [m^3/s]	-0,0002	0,0076	0,0039	-0,0028	0,0010
Westliche Bucht [m^3/s]	-0,0266	-0,0273	0,0042	-0,0043	-0,0174
Krumme Lanke [m^3/s]	-0,0002	0,0078	0,0024	-0,0033	0,0004
Gesamtsee [m^3/s]	-0,0456	0,0223	0,0308	-0,0572	-0,0336
Bilanz See [m^3/Quartal]	-359.852,10	176.000,95	242.550,11	-451.008,31	-264.767,25
				Bilanz Jahr [m^3/a]	-297.224.50

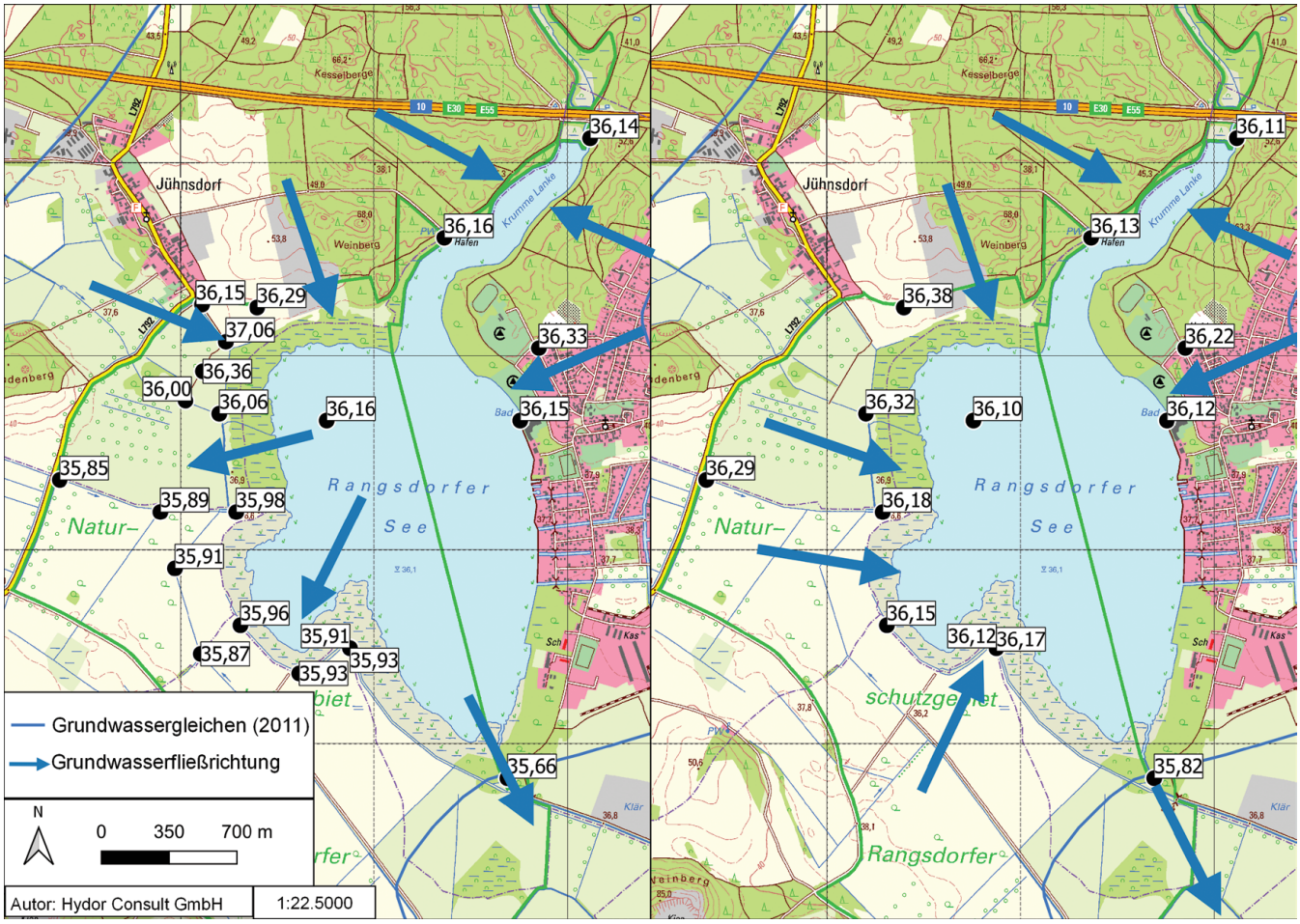

Abbildung 3
Darstellung der Grundwasserstände (m NHN) in den verwendeten Grundwassermessstellen und den sieben Sondierungen der Grundwasseroberfläche am 5. Juli 2021 (links) und am 12. Januar 2021 (rechts). Ebenfalls dargestellt ist der Seewasserstand an den jeweiligen Stichtagen. Nicht dargestellt ist der Grundwasserstand in der Messstelle KP (Koppelpumpe), da aus baulichen Gründen keine Messung des Grundwasserstandes möglich war.

Tabelle 2
Basierend auf den Grundwasserflüssen quartalsweise berechnete ortho-Phosphatphosphor-Eintragsmengen an den Bereichen mit angenommenem Grundwasseraustausch. Die Jahressumme bezieht sich auf die vier aktuellsten Quartale.

	Kilogramm ortho-Phosphatphosphor je Quartal					
Stichtagmessung	**25.06.2020**	**21.09.2020**	**12.01.2021**	**10.03.2021**	**05.07.2021**	**Jahressumme**
Südöstliches Seeufer		5,65	2,95			
Nordosten/Strandbad	1,87	1,86	0,51	0,18	0,46	
Nordwesten Übergang Krumme Lanke		5,50	3,29		0,84	
Westliche Bucht			7,41			
Krumme Lanke		2,44	0,98		0,15	
Summe	1,87	15,46	15,13	0,18	1,45	32,22

zung des wechselwirkenden Wasservolumens und somit der eingetragenen Phosphormenge führen. Auch können zeitlich hochfrequente Schwankungen des hydraulischen Gradienten signifikante Austauschraten zur Folge haben, die jedoch in einer zeitlich gering aufgelösten Betrachtung nicht erfasst werden können (ROSENBERRY et al., 2015). Diese Aspekte könnten in der westlich gelegenen Bucht mit deutlich erhöhten Phosphorkonzentrationen und zeitlich differierenden Grundwassereinströmen zu einer höheren tatsächlichen Phosphorfracht führen. Dennoch lassen sich trotz potenzieller Einschränkungen der genutzten Methodik anhand der Erkenntnisse Empfehlungen zum Gewässermanagement geben, da letztlich eine Stabilisierung des Seewasserstands einen Zustrom des nährstoffreichen Grundwassers im Westen des Sees effektiv verhindern kann.

4 Schlussfolgerung

In der vorliegenden Studie wurde eine Untersuchung des Grundwassers im Nahbereich des hypertrophen Rangsdorfer Sees durchgeführt. Hierfür wurden im Verlauf eines Jahres 13 um den See verteilte Messstellen jeweils zu fünf verschiedenen Zeitpunkten beprobt und deren Grundwasserstände erfasst. Dabei ergaben sich grundsätzlich zwei verschiedene hydraulische Zustände. In einem Zustand wird der See lediglich von nährstoffarmem Grundwasser aus dem Norden angeströmt. Dies ist der Fall, wenn der Seewasserstand ausreichend hoch ist. Im anderen Fall liegt der Seewasserstand unterhalb des Grundwasserstands der südwestlich an den See angrenzenden Niederungen. Dabei erfolgt an dieser Stelle ein Rückstrom von nährstoffreichem Grundwasser in den See, welches teils aus ehemaligem Seewasser besteht. Durch Isotopenuntersuchungen konnte an den dort mithilfe von Sedimentuntersuchungen identifizierten sandigen Bereichen eine Interaktion von Grundwasser und See zweifelsfrei bestätigt werden. Die genutzten Methoden ermöglichen, gesicherte Empfehlungen hinsichtlich des Gewässermanagements auszusprechen, da durch Stabilisierung des Wasserstands der See in den zuerst genannten, günstigen hydraulischen Zustand versetzt werden kann und der Rückstrom von nährstoffreichem Grundwasser in den See unterbunden wird.

Anmerkung
Das Vorhaben wurden im Rahmen des Entwicklungsprogrammes für den ländlichen Raum in Brandenburg und Berlin für die Förderperiode 2014 bis 2020 – Maßnahme M07 (Investitionen in die naturnahe Gewässerentwicklung) finanziert. Die Zuwendung setzt sich aus EU-Mitteln des Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raumes (ELER) und Landesmitteln zusammen (www.eler.brandenburg.de).

Literaturverzeichnis

DWA (2022 (unveröffentl.)): Merkblatt DWA-M 641. Methoden zur Charakterisierung von Grundwasser-See Interaktionen. Unter Mitarbeit von Ulrich Lang, Jörg Lewandowski, Michael Faißt, Stephan Hannappel, Antje Schwalb, Thomas Wolf und Kim Jasmin Krahn.

FRAUENSTEIN, A (2017): Erarbeitung einer P-Bilanz im Rahmen eines Konzeptes zur Sanierung und Restaurierung des Rangsdorfer Sees. Masterarbeit. Universität Potsdam, Potsdam. Institut für Erd- und Umweltwissenschaften.

GUDER, S. (2003): Qualitative Analysen von Oberflächensedimenten des Rangsdorfer Sees, Brandenburg. Diplomarbeit. Freie Universität Berlin. Geographisches Institut der Freien Universität.

HYDOR (2021): Sanierungsmaßnahmen zur Verbesserung des chemischen und ökologischen Zustandes des Rangsdorfer Sees einschließlich Kanalsystem Klein Venedig - Phase 2.- Gutachten der HYDOR Consult GmbH im Auftrag der Gemeinde Rangsdorf, Berlin, 1. Oktober 2021 (unveröff.).

KONSORTIUM RANGSDORFER SEE (1992): Konzept zur Komplexsanierung Rangsdorfer See, im Auftrag der Gemeindeverwaltung Rangsdorf, von Konsortium Rangsdorfer See. Berlin.

LEWANDOWSKI, J., MEINIKMANN, K., NÜTZMANN, G. & D.O. ROSENBERRY (2015): Groundwater – the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 2: effects of groundwater on nutrients. In: Hydrol. Process. 29 (13), S. 2922–2955. DOI: 10.1002/hyp.10384.

MEINIKMANN, K., HUPFER, M. & J. LEWANDOWSKI (2015): Phosphorus in groundwater discharge – A potential source for lake eutrophication. In: Journal of Hydrology 524, S. 214–226. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.031.

ROSENBERRY, D., LABAUGH, J. & R. HUNT (2008): Use of monitoring wells, portable piezometers, and seepage meters to quantify flow between surface water and ground water. Chapter 2 of Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water.

ROSENBERRY, D.O., LEWANDOWSKI, J., MEINIKMANN, K. & G. NÜTZMANN (2015): Groundwater – the disregarded component in lake water and nutrient budgets. Part 1: effects of groundwater on hydrology. In: Hydrol. Process. 29 (13), S. 2895–2921. DOI: 10.1002/hyp.10403.

TURNER, J.V. & L.R. TOWNLEY (2006): Determination of groundwater flow-through regimes of shallow lakes and wetlands from numerical analysis of stable isotope and chloride tracer distribution patterns. In: Journal of Hydrology 320 (3-4), S. 451–483. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.050.

WETZEL, R.G. (2001): Limnology. Lake and river ecosystems. 3rd ed. San Diego: Academic Press.

Philipp Wolke,
Stephan Hannappel
HYDOR Consult GmbH
wolke@hydor.de
hannappel@hydor.de