

Dietmar Mehl, Tim G. Hoffmann, Marc Schneider, Matthias Knüppel, Wibke Baumgarten und Henning Giese

Konzeptstudie für den Schaalsee (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern).

I. Phosphoraustrag (Einzugsgebiet) und Phosphoreintrag (See)

Concept study of lake Schaalsee (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Western Pomerania).
I. Phosphorus output (catchment area) and phosphorus input (lake)

Untersuchungsgegenstand einer Konzeptstudie ist der 24 km² große Schaalsee. Die maßnahmenorientierte Studie zur Verbesserung des ökologischen (trophischen) Seenzustandes basiert auf Analysen zum Austrag von Gesamt-Phosphor (P) aus dem Einzugsgebiet sowie dessen Eintrag in den See. Dieser Beitrag behandelt diesbezügliche Grundlagen und Ergebnisse der Studie. Weitere, darauf aufbauende Konzept-Teile werden in einem weiteren Teilbeitrag (MEHL et al. 2016) behandelt.

Der für das Einzugsgebiet berechnete mittlere Gesamt-P-Austrag beträgt 7.479 kg P *a⁻¹, wovon ein Viertel auf Punktquellen entfällt; drei Viertel des Austrages stammen aus diffusen Quellen. Der Gesamt-P-Eintrag in den Schaalsee wurde auf Grundlage einer Neubewertung der P-Belastungssituation durch ein Mess- und Analysenprogramm ermittelt. Die Summe über alle Eintragspfade (Gesamteintrag) beträgt 3.681 kg P *a⁻¹. Der Gesamt-P-Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer liegt mit 1.090 kg P *a⁻¹ bei ca. 30 % des Gesamteintrages. Der Grundwassereintrag liefert mit 1.516 kg P *a⁻¹ den größten Teilbeitrag (41 % des Gesamteintrages). Die atmosphärische Deposition umfasst einen relativ hohen Eintrag (846 kg P *a⁻¹, 23 % des Gesamteintrages). Die anderen Eintragspfade sind von geringer Bedeutung. Ursachen für diese Eintragsverteilung werden diskutiert.

Schlagwörter: Quantifizierung der Phosphorbelastung, See, WRRL

Lake Schaalsee, with a size of 24 km², is the subject of a concept study. The action-oriented study aiming to improve the ecological (trophic) condition of the lake is based on analyses concerning the output of total phosphorus (P) from the drainage area as well as its input into the lake. This paper deals with principles and results of the study related to this topic. Further parts of the concept are discussed in an additional paper (MEHL et al. 2016).

The calculated (estimated) average total-P-output in the catchment area is 7,479 kg P *a⁻¹, one quarter of which accounts for point sources. Approximately three quarters come from diffuse sources. The total-P-input into lake Schaalsee has been determined by means of reassessing the P-pollution situation using a measuring and analysing programme. The total amount of all input paths (total input) is 3,681 kg P *a⁻¹. Total-P-input from surface water is 1,090 kg P *a⁻¹ (ca. 30 % of the total input). Input from ground water, which is 1,516 kg P *a⁻¹, represents the biggest part (41 % of the total input). Besides, the atmospheric deposition accounts for a relatively high input (846 kg P *a⁻¹, 23 % of the total input). All other paths of input play a minor role. Reasons for this apportionment of input will be discussed.

Keywords: Lake, quantification of phosphorus loads, WFD

1 Einleitung

Der Pflanzennährstoff Phosphor (P) tritt in der Hydrosphäre in drei Formen auf: als anorganisches gelöstes Orthophosphat, in Form gelöster organischer Phosphorverbindungen sowie partikulär bzw. dispers gebunden an Biomasse oder organischen/anorganischen Stoffen. Anthropogen erhöhte landschaftliche P-Stoffflüsse führen, vor allem in trophisch bestimmten limnischen und marinen Gewässern, zu vielfältigen Eutrophierungsphänomenen (KLAPPER 1992). Dies bildet einen zentralen Problembereich des Gewässerschutzes insbesondere in Bezug auf die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) sowie die Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (MSRL 2008) und ist auch Inhalt vieler Untersuchungen und Studien in Deutschland (BEHRENDT et al. 1999, NIXDORF et al. 2004, FUCHS et al. 2010). Zwar sind die punktförmigen P-Quellen im Zuge zahlreicher Vermeidungs- und Reduktionsmaßnahmen, vor allem im Bereich

der Abwasserbehandlung, stark in ihrer Bedeutung zurückgegangen; aber damit dominieren heute vielfach diffuse P-Belastungen, auch und insbesondere an Seen (MEINIKMANN et al. 2013, TETZLAFF et al. 2015). Relativ neu erscheint das Phänomen der deutlich über das Grundwasser mit P belasteten Seen. Am Arendsee (Sachsen-Anhalt) vermuten MEINIKMANN et al. (2015) eine Belastung durch frühere Leckagen von Abwassersystemen und mittlerweile aufgebrauchte Retentionspotenziale im Boden, im tieferen Untergrund und im Grundwasser.

Auch landwirtschaftliche Düngergaben, vornehmlich auf P-sorptionsarmen Böden, können das Grundwasser und in der Folge Oberflächengewässer hypothetisch höher belasten. Entsprechende Hinweise geben auch auf hydrologischen und P-Konzentrationsmessungen in den Gewässern sowie den Eigenschaften der Einzugsgebiete basierende regionale Studien (MEHL et al. 2009). Allerdings sind beispielsweise in Mecklen-

burg-Vorpommern aktuell berechnete Phosphorsalden aus der Feldblockbezogenen Differenz von Nährstoffzufuhr und -abfuhr bis auf wenige Hotspots (z.B. im Umkreis großer Tieranlagen) relativ gering und sogar verbreitet negativ (MEHL 2013). Dieser scheinbare Widerspruch zeigt, dass eine Ursachenanalyse zur P-Belastung sich möglichst mit dem Austragsgeschehen und der Retention in der Landschaft sowie dem Eintragsgeschehen in die Gewässer beschäftigen muss. Dabei sind auch Prozesszeiten von hohem Belang („historische“ Belastungen).

Im Auftrag des Gewässerentwicklungsverbandes Schaalsee-Delvenau wurde eine durch EU-, Bundes- und Landesmittel geförderte und auf Maßnahmen zielende Konzeptstudie zur Verbesserung des ökologischen Zustandes des Schaalsees erarbeitet (BIOTA 2015). Der ökologische Zustand der zentralen Teile des Schaalsees ist derzeit nur mit „mäßig“ nach den Kriterien der WRRL zu bewerten (LLUR 2014). Die Seitenbecken werden aktuell sogar nur mit „unbefriedigend“ bewertet. Bereits durch die Studie von GIG (2011) wurde gezeigt, dass die P-Belastung des Schaalsees insgesamt als zu hoch bewertet werden muss, auch wenn die einzelnen Seebecken verschieden hoch belastet sind. Bemerkenswert ist, dass ein ausgesprochen hoher Anteil des Phosphors über den hydrologischen Pfad Grundwasser in den See gelangt. Es besteht demzufolge Handlungsbedarf, um das Umweltziel der WRRL „guter ökologischer Zustand“ zu erreichen. Zusätzlich spielt die zu hohe P-Belastung auch im Hinblick auf umfangreiche naturschutzfachliche Zielstellungen eine große Rolle (MEHL et al. 2016).

Für die P-Belastungsanalyse bei BIOTA (2015) wurde der übliche Weg einer Differenzierung in Emissions- und Immissionsbetrachtung im Sinne einer Identifizierung von Quellen (Austrag) und Eintragspfaden gewählt (BEHRENDT et al. 1999, BEHRENDT & DANNOWSKI 2005). Bereits bei der Abschätzung des Austrages wurden die Quellen konsequent nach dem Eintragspfad (hinsichtlich „Übertritt“ in den Schaalsee) unterschieden: Grundwasserzufluss (GW) und Zufluss oberirdischer Gewässer (OW). Die interne P-Rücklösung aus dem Seesediment wurde nicht berücksichtigt, da sich Freisetzung und Fixierung bei der derzeit gegebenen Phosphorzuführung im langjährigen Mittel in etwa ausgleichen (GIG 2011).

In diesem ersten Beitrag sollen folgende wesentliche Teile vorgestellt werden:

1. Charakterisierung des Untersuchungsgebietes
2. Verwendete Grundlagendaten
3. Ergebnisse eines Messprogramms zu P-Frachten in Zuflüssen und Dränabläufen
4. Analyse des mittleren jährlichen Gesamt-P-Austrages im Einzugsgebiet nach Quellen
5. Analyse des Gesamt-P-Eintrages in den See nach Eintragspfaden

2 Untersuchungsgebiet

Untersuchungsgegenstand ist der 24 km² große Schaalsee, der beim Seevolumen mit 390 Mio. m³ auf Platz 10 der deutschen Seen steht. Der Schaalsee gehört administrativ zu den Ländern Schleswig-Holstein (S-H) und Mecklenburg-Vorpommern (M-V); bis 1990 verlief mitten durch den See die innerdeutsche Grenze (Abb. 1). Der Schaalsee bildet in Mecklenburg-Vorpommern den Kern des gleichnamigen UNESCO-Biosphärenreservats Schaal-

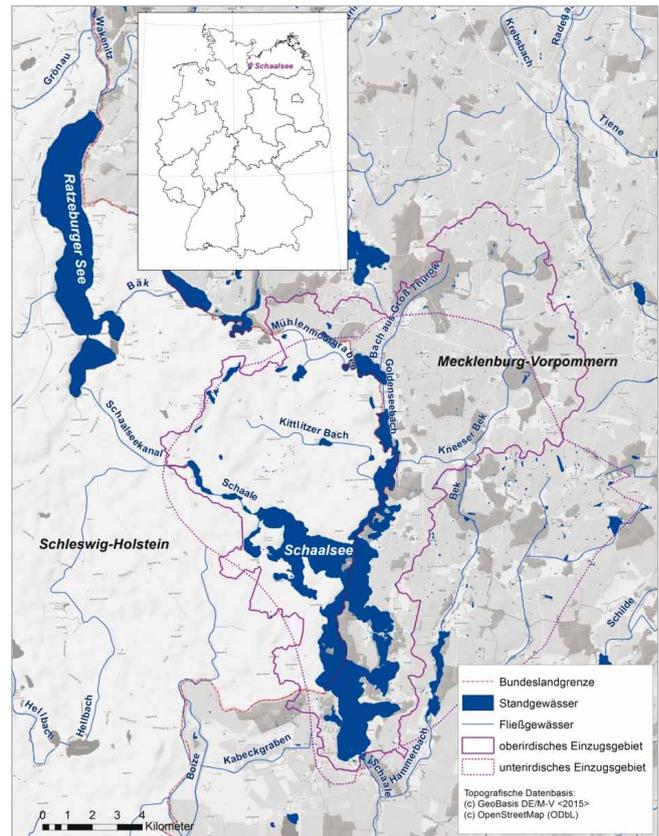


Abbildung 1

Geographische Lage, Gewässersystem und Einzugsgebiet des Schaalsees, Koordinaten: 53° 35' 25" N, 10° 54' 52" O
 Geographical location, water system and catchment area of lake Schaalsee, Coordinates: 53° 35' 25" N, 10° 54' 52" E

see, in Schleswig-Holstein einen wichtigen Teil des Naturparks Lauenburgische Seen.

Der längliche Schaalsee ist reich an Buchten und Halbinseln und in neun Teilseen gegliedert (Abb. 2). Das oberirdische Einzugsgebiet (EZG) des Schaalsees ist vergleichsweise klein und umfasst nur eine Fläche von 180 km² (40 % S-H, 60 % M-V). Ca. 63 % des oberirdischen EZG werden durch drei relativ kleine und größenordnungsmäßig vergleichbare Zuläufe entwässert: Kittlitzer Bach, Goldenseebach, Kneeser Bek. Der nördlich des Schaalsees gelegene und mit diesem durch ein Fließgewässer verbundene Goldensee hat eine hohe natürliche Bedeutung als Stoffsenke im System der oberirdischen Zuflüsse.

Tabelle 1 Haupt-Landnutzungsarten im Gesamt-Einzugsgebiet des Schaalsees Main land use types in the total catchment area of lake Schaalsee		
Landnutzung	Fläche (km ²)	Anteil
Acker	123,2	49 %
Grünland	31,1	12 %
Feuchtgebiet	1,6	1 %
Gewässer	27,7	11 %
Wald	58,5	23 %
Siedlung und Sonstiges	10,5	4 %
Summe	252,6	100 %

Der Schaalsee hat eine maximale Tiefe von 71,5 m. Da die tiefste Stelle des Seebodens 36,5 m unter dem Meeresspiegel liegt, zählt der See zu den sogenannten Kryptodepressionen. Der See ist stark grundwassergespeist. Hydrogeologisch relevant sind

- mehrere Grundwasserstockwerke mit zum Teil deutlich über das oberirdische Einzugsgebiet hinausreichenden Grundwassereinzugsgebieten sowie
- sowohl Grundwasserzu- als auch -abstrom; letzterer vornehmlich in Richtung Westen und Südwesten, zur ca. 30 km entfernten Elbe.

Das unterirdische EZG hat eine Fläche von 213 km² (GIG 2011), so dass dieses deutlich größer ist als das oberirdische. Für viele Fragestellungen ist das „maximale“ bzw. hydrologische Gesamt-EZG von Belang, das sich bei der räumlichen Überlagerung von ober- und unterirdischem EZG ergibt. Es umfasst eine Fläche von 253 km². Die Landnutzung ist im ober- und unterirdischen Einzugsgebiet verhältnismäßig gleich verteilt (Tab. 1). Dabei dominiert die landwirtschaftliche Flächennutzung mit mehr als 60 %.

Hydrometeorologisch lässt sich das Einzugsgebiet wie folgt charakterisieren (Station Grambek des Deutschen Wetterdienstes, ca. 10 km westlich des Schaalsees, Reihe 1985 bis 2014, Quelle: StALU WM 2016):

- Mittlere Jahrestemperatur: 9,0 °C
- Mittlerer Jahresniederschlag: 725 mm
- Mittlere potenzielle Verdunstung nach HAUDE: 593 mm/a
- Klimatische Wasserbilanz: +132 mm/a

Der ursprüngliche Ablauf des Schaalsees über die Schaale in Richtung Elbe wurde weitgehend dicht gesetzt und über den

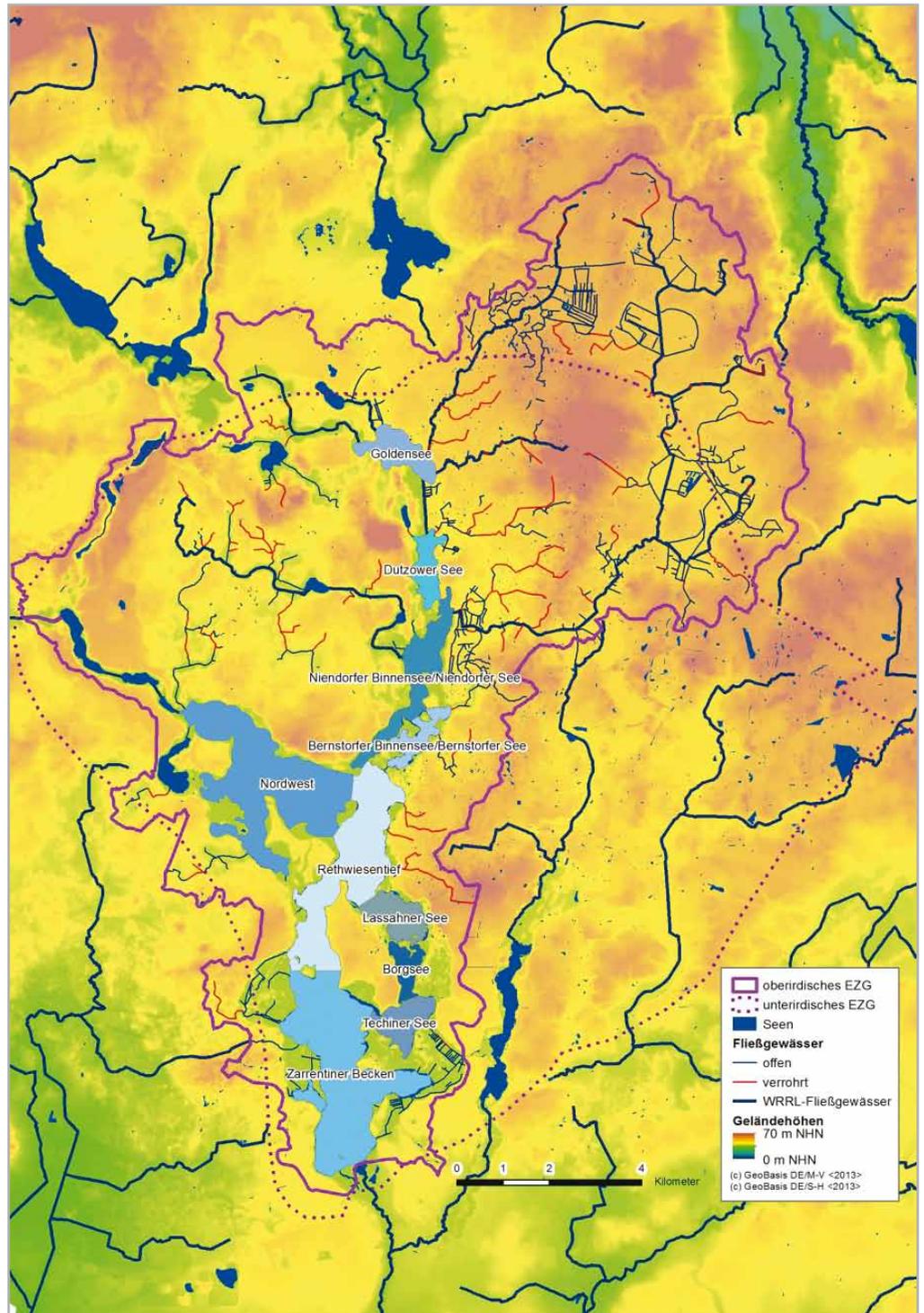


Abbildung 2

Schaalsee mit seinen Teilseen sowie ober- und unterirdischem Einzugsgebiet; zusätzlich dargestellt: Goldensee (nördlich Schaalsee)

Lake Schaalsee with sections of the lake and its catchment areas (surface and subsurface); additionally illustrated: Lake Goldensee (north of lake Schaalsee)

Schaalseekanal und das Wasserkraftwerk Farchau nach Westen in Richtung des Ratzeburger Sees verlagert, was auf einen mit einer ersten Laufzeit von 1923 bis 1935 geschlossenen Vertrag zwischen dem Freistaat Mecklenburg-Schwerin und der Lauenburgischen Landeskraftwerk AG zurückgeht (KREIS HERZOGTUM LAUENBURG 2016).

3 Grundlagen

3.1 Vorhandene Daten

Die verwendeten geowissenschaftlichen, umweltbezogenen und Nutzungsdaten sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

3.2 Neue Daten (Messdaten, Neuberechnungen)

Im Rahmen eines Messprogrammes wurden bereits vorliegende Messergebnisse überprüft und ergänzt. Dabei standen im Vordergrund

Tabelle 2 Datengrundlagen ...			
Daten	M-V	S-H	Datenquelle
Topographische Karten/Luftbilder			
GDI-MV (TK10 bis 50)	X		http://www.geodaten-mv.de
Luftbilder DOP20	X		http://www.geodaten-mv.de
DTK5 und DTK25		X	GEV
Luftbilder: SH WMS DOP5 C_KF		X	http://service.schleswig-holstein.de
Digitale Geländemodelle (DGM)			
DGM 1	X		AfBR
DGM 1		X	GEV
Gewässerdaten			
Einzugsgebiete (EZG)	X	X	StALU WM
Schaalsee/Seeteile	X	X	StALU WM
Standgewässer	X		StALU WM
Tiefenlinien Schaalsee	X	X	AfBR
Fließgewässer (Linien)		X	GEV
Querbauwerke		X	GEV
Fließgewässer	X		StALU WM
Nutzungsverhältnisse			
Landnutzung	X	X	CORINE LANDCOVER, Stand 2006
Biotop und Nutzungstypen	X		AfBR
Detaillierte Nutzungskartierungen	X	X	AfBR
Hydrologie			
Pegeldaten (W, Q)	X		StALU WM
Regionalisierung der mittleren Abflusspenden in M-V (1981-2010)			LUNG M-V
Grundwasserisohypsen, Kenngrößen der Grundwasserleiter	X	X	GIG (2011)
Wasserstände und P-Konzentrationen an Grundwassermessstellen	X	X	LUNG M-V
Wasserentnahmen aus oberirdischen Gewässern	X	X	AfBR
Klima- und Niederschlagsdaten der Station Grambek		X	Deutscher Wetterdienst, Bereitstellung: StALU WM
Bodeninformationen, Regionalisierungen von Nährstoffsalden und -belastungen			
Bodenkarten	X		LUNG M-V
Geologische Oberflächenkarte	X		LUNG M-V
Bodenerosionsbereiche am Schaalsee	X	X	GIG (2011)
P-Quellenkartierung	X	X	GIG (2011)
Lage von Dränsystemen	X	X	GIG (2011)
Gedränte Flächen	X		BIOTA (2010)
Dränsammlereinmündungen		X	GEV
Nährstoffregionalisierung für WRRL-Gewässer/-Einzugsgebiete	X	X	LLUR, S-H, LUNG M-V
Stickstoff-/Phosphor-Bilanzen der Feldblöcke	X		LU M-V
Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS)	X		LU M-V
Kläranlagen (inkl. Kleinkläranlagen)			Kreis Herzogtum Lauenburg, Landkreis Ludwigslust-Parchim, Landkreis Nordwestmecklenburg, Amt Lauenburgische Seen

Abkürzungen für Datenquellen soweit nicht im Literaturverzeichnis: AfBR = Amt für das Biosphärenreservat Schaalsee, GEV = Gewässerentwicklungsverband Schaalsee-Delvenau, StALU WM = Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Westmecklenburg, LU M-V = Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, LUNG M-V = Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, LLUR S-H = Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein

Tabelle 3 Messprogramm zur Ermittlung der Phosphorfrachten der oberirdischen Gewässer und Dränsysteme <i>Measuring programme for determining the phosphorus loads of surface waters and drainage systems</i>			
	Anzahl Messungen	Anzahl Messtage	Anzahl Messstellen
Regelmäßige Beprobung, Analyse und Abflussmessung der Seezuläufe	57	19	3
Regenereignisbezogene Beprobung, Analyse und Abflussmessungen der Seezuläufe im Mündungsbereich und im Längsverlauf der Seezuläufe	24	4	6
Beprobung von Dränagen	35	5	7
Gesamt	116		

- eine Validierung der Ergebnisse nach GIG (2011) durch Beprobung der drei wichtigsten Seezuläufe (die Einträge über die drei oberirdischen Zuläufe wurden 2009/2010 anhand von jeweils 5 Probenahmen in einem relativ trockenen Jahr ermittelt),
- in Abhängigkeit zuvor ermittelter potenzieller Nährstoff-Eintragschwerpunkte im Einzugsgebiet sowie von möglichen Nährstofffreisetzungen in durchflossenen Seen mehrfache (regelmäßige) Datengewinnung im Längsverlauf der drei Zuläufe und optional an einmündenden Dränagen sowie
- eine auf Regenereignisse bezogene Beprobung der drei Zuläufe sowie von Dränagen entlang der Zuläufe, optional auch die auf Regenereignisse bezogene Beprobung einzelner Zuläufe an mehreren Stellen im Längsverlauf.

Der Durchfluss an den Messstellen wurde entsprechend LAWA-Pegelvorschrift, Anlage D (LAWA 1991) bestimmt: Fließgeschwindigkeitsmessung (v) mit induktivem Messgerät, Querschnittsbestimmung (A), ggf. nach Durchflusslamellen, anschließende Durchflussberechnung $Q = A \cdot v$, alternativ Auslitern mit Messgefäß vor allem bei Dränabflüssen (Volumenbestimmung je Zeiteinheit). Die Gesamt-Phos-

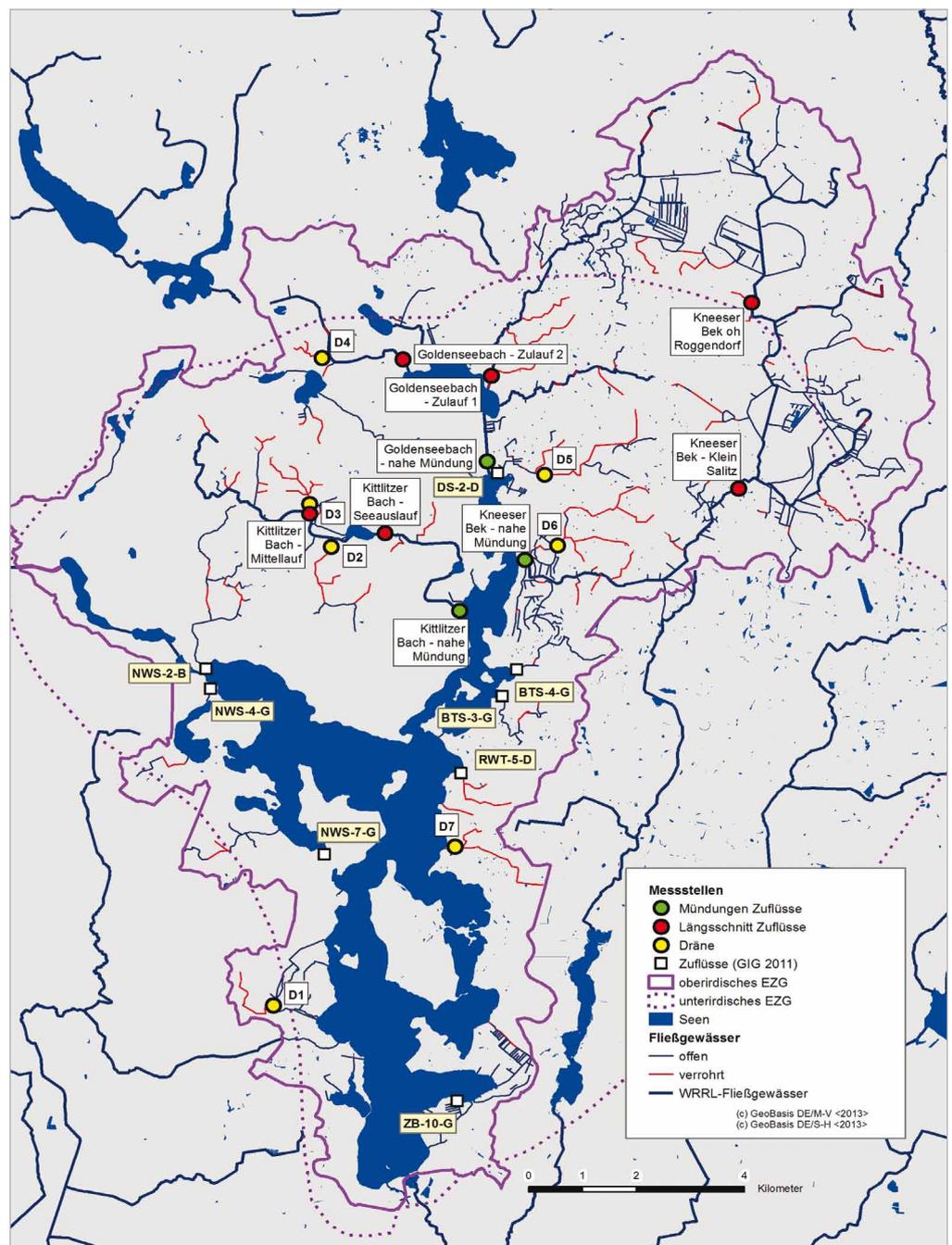


Abbildung 3
Lage der Messstellen an den Zuflüssen und den Dränsystemen im Einzugsgebiet des Schaalsees
Position of the measuring points situated at the inlets and drainage systems within the catchment area of lake Schaalsee

phor-Konzentration der vor Ort genommenen Wasserproben wurde nach DIN EN ISO 11885-E22:2009-09 in einem Fachlabor bestimmt. Daneben wurden weitere Parameter durch Sonden erfasst (Temperatur, Leitfähigkeit, pH-Wert) und die Wasserproben im Labor auf weitere Inhaltsstoffe untersucht (ortho-Phosphat-P, Gesamt-Stickstoff, Ammonium-Stickstoff, Nitrat-Stickstoff), um Grunddaten für andere Fragestellungen zu gewinnen.

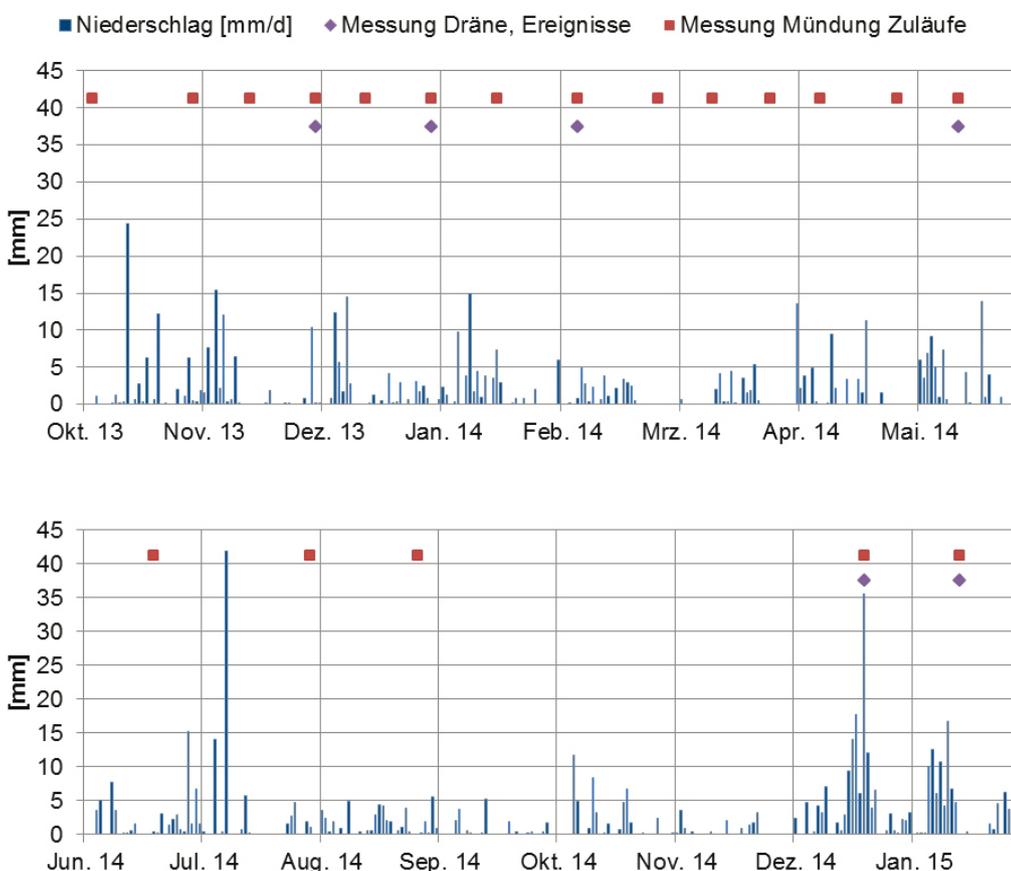
Das im Zeitraum von Oktober 2013 bis Januar 2015 umgesetzte Messprogramm veranschaulichen Abbildung 3 und Tabelle 3 im Überblick. Abbildung 3 zeigt ferner auch die Messstellen nach GIG (2011), für die zusätzlich Gesamt-P-Frachtberechnungen nach anderer Methodik vorgenommen wurden, um den Einfluss der hydrologischen Variabilität auf die Stofffrachten möglichst auszugleichen.

Die Festlegung von Messtagen orientierte sich primär an den jeweiligen Niederschlagsverhältnissen, da diese wesentlich die hydrologischen Bedingungen determinieren (Bezug zur räumlich repräsentativen DWD-Station in Grambek). Gerade die Untersuchung der Dränabflüsse fand deshalb nach abflussauslösenden Niederschlagsereignissen statt. Während in den Jahren 2013 und 2014 nur wenige kräftigere Regenereignisse zu verzeichnen waren, konnten mit den letzten beiden Messungen im Dezember 2014 und im Januar 2015 auch höhere Dränabflüsse quantitativ und qualitativ erfasst werden (Abb. 4).

Zur Berechnung der mittleren Phosphorfracht aus Messdaten wurde die u.a. auch bei MEHL et al. (2009) verwendete und bei BEHRENDT & DANNOWSKI (2005) beschriebene „abflusskorrigierte Standardmethode“ gewählt, da sie durch einen speziellen Term den Mittelwert der Durchflüsse der Messzeitpunkte ins Verhältnis zum mittleren Durchfluss setzt und damit den hohen Einfluss der Abflusssituation zum Zeitpunkt von Untersuchungen auf eine mittlere Fracht zu berücksichtigen hilft. Diese Frachtberechnungsmethode erzielte im Vergleich einfacher Berechnungsverfahren bei HILDEN (2003) auch die besten Ergebnisse:

$$F_{Q(a)} = \frac{MQ(a)}{Q_{M(a)}} \cdot t \cdot \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \cdot Q_i \text{ mit}$$

- $F_{Q(a)}$ durchflussnormierte Jahresfracht
- $MQ(a)$ mittlerer Durchfluss des Jahres a, abgeleitet/regionalisiert aus Pegelraten
- $Q_{M(a)}$ Mittelwert der Durchflüsse an den Tagen mit Beprobung bzw. Konzentrationswert, abgeleitet/regionalisiert aus Pegelraten
- C_i Konzentrationswert der i-ten Beprobung im Jahr a
- Q_i zugehöriger, taggleicher Durchfluss an der Konzentrationsmessstelle
- n Anzahl der Konzentrationsmessungen/-werte
- t Berechnungszeitraum = 1 Jahr



Auf Grund eines fehlenden Durchflusspegels im EZG des Schaalsees musste für die Zuflüsse zum Schaalsee auf den benachbarten Bezugspegel Pötrau an der Steinau (Zufluss zum Elbe-Lübeck-Kanal) ausgewichen werden, dessen je Messtag berechnetes Verhältnis $MQ(a)/QM(a)$ hier vereinfacht als hydrologisch repräsentativ angesetzt wurde, auch bezüglich der Frachten der Dränabflüsse. Wenn Dränabflüsse, z.B. bei starkem Rückstau und Eisbildung, nicht messbar oder nicht zeitlich repräsentativ waren, erfolgte eine einfache Übertragung der Abflussspende eines hydrologisch ähnlichen Drängebietes (gleiche/ähnliche Bodenverhältnisse). Alle Mess- und Analysenergebnisse sowie die entsprechenden Frachtberechnungen sind in den Tabellen 4 bis 6 dargestellt.

Abbildung 4
Niederschlagsereignisse und Messtermine (DWD-Station Grambek)
Precipitation events and measurement dates (DWD-station Grambek)

Tabelle 4									
Mess- und Analysenergebnisse sowie berechnete Phosphorfrachten für die Dränsysteme									
<i>Measuring and analysis results as well as calculated loads of phosphorus for the drainage systems</i>									
Messstelle	Datum	EZG	Gesamt-P	Durchfluss gemessen	Durchfluss übertragen	Dränabfluss-spende	P-Fracht	Mittlere P-Fracht	Mittlere P-Flächenspende
		(km ²)	(mg·l ⁻¹)	(l·s ⁻¹)	(l·s ⁻¹)	(l·s ⁻¹ km ⁻²)	(g·d ⁻¹)	(kg·a ⁻¹)	(kg·a ⁻¹ km ⁻²)
Dränauslauf D1	30.12.2013	0,791	0,07	2,7		3,5	17	50,8	64,2
	06.02.2014		0,7	3,5		4,4	206		
	16.05.2014		0,1	3,5		4,4	21		
	22.12.2014		0,581	16,7		21,1	837		
	16.01.2015		0,101	16,7		21,1	146		
Dränauslauf D2	30.12.2013	0,804	0,1	0,4		0,5	2	10,9	13,7
	06.02.2014		0,1	2,2		2,7	9		
	16.05.2014		0,1	2,0		2,5	9		
	22.12.2014		0,101	n. messbar	13,9	17,3	121		
	16.01.2015		0,103	n. messbar	13,9	17,4	124		
Dränauslauf D3	30.12.2013	0,922	0,1	0,2		0,2	1	5,8	6,3
	06.02.2014		0,1	2,7		2,9	12		
	16.05.2014		0,1	2,0		2,2	9		
	22.12.2014		0,1		13,9	15,1	60		
	16.01.2015		0,1	-	13,9	15,1	60		
Dränauslauf D4	30.12.2013	0,307	1,1	0,2		0,6	16	7,5	25,1
	06.02.2014		0,0	n. messbar	0,4	1,3	0		
	16.05.2014		0,1	n. messbar	0,3	1,1	4		
	22.12.2014		0,421	n. repräs.	3,0	9,9	108		
	16.01.2015		0,208	n. repräs.	3,0	9,9	53		
Dränauslauf D5	30.12.2013	2,00	0,1	1,6		0,8	7	37,9	18,9
	06.02.2014		0,1	1,7		0,8	7		
	16.05.2014		0,1	1,3		0,7	6		
	22.12.2014		0,532	n. repräs.	17,4	8,7	802		
	16.01.2015		0,062	n. repräs.	17,5	8,7	94		
Dränauslauf D6	30.12.2013	2,68	0,1	4,7		1,7	21	107,3	40,0
	06.02.2014		0,1	8,3		3,1	36		
	16.05.2014		0,1	4,2		1,6	18		
	22.12.2014		0,396	n. repräs.	61,2	22,8	2.093		
	16.01.2015		0,08	n. repräs.	61,2	22,8	423		
Dränauslauf D7	30.12.2013	1,14	0,1	n. messbar	2,4	2,1	14	45,4	39,8
	06.02.2014		0,5	n. messbar	5,6	4,9	260		
	16.05.2014		1,4	n. messbar	4,5	4,0	539		
	22.12.2014		0,137	24,0		21,0	284		
	16.01.2015		0,0	24,0		21,0	0		

Tabelle 5

Mess- und Analyseergebnisse sowie berechnete Phosphorfrachten für die Hauptzuläufe des Schaalsees (nicht farblich unterlegt: regelmäßige Messung/Beprobung, blau unterlegt: ereignisbezogene Messung/Beprobung)
 Measuring and analysis results as well as calculated loads of phosphorus for the main inlets of lake Schaalsee (not coloured: regular measuring/sampling, blue: event-related measuring/sampling)

Messstelle	Datum	EZG	Gesamt-P	Durchfluss gemessen	Durchfluss übertragen	Abfluss-spende	P-Fracht	Mittlere P-Fracht	Mittlere P-Flächenspende
		(km ²)	(mg*l ⁻¹)	(l*s ⁻¹)	(l*s ⁻¹)	(l*s ⁻¹ km ⁻²)	(g*d ⁻¹)	(kg*a ⁻¹)	(kg*a ⁻¹ km ⁻²)
Goldenseebach, Nähe Mündung	03.10.2013	33,9	0,12	< 0,08	0,0	0,0	0	575	17,0
	29.10.2013		0,09	0,2		0,0	1		
	13.11.2013		0,12	0,4		0,0	4		
	30.11.2013		0,07	1,4		0,0	8		
	13.12.2013		0,06	0,5		0,0	3		
	30.12.2013		0,06	2,0		0,1	11		
	16.01.2014		0,14	33,3		1,0	403		
	06.02.2014		0,13	201,7		6,0	2.335		
	27.02.2014		0,14	350,0		10,3	4.143		
	13.03.2014		0,14	275,0		8,1	3.303		
	28.03.2014		0,17	230,0		6,8	3.338		
	10.04.2014		0,13	300,0		8,9	3.473		
	30.04.2014		0,14	241,7		7,1	2.903		
	16.05.2014		0,16	293,3		8,7	3.979		
	19.06.2014		0,17	58,3		1,7	867		
	30.07.2014		0,09	0,0		0,0	0		
27.08.2014	0,10	0,0		0,0	0				
22.12.2014	0,13	Rückstau	26,3	0,8	296				
16.01.2015	0,149	n. messbar	50,0	1,5	644				
Goldenseebach, Zulauf 1	30.11.2013	11,0	0,00	trocken	0,1	0,0	0	5	0,4
	06.02.2014		0,16	2,2		0,2	30		
	16.05.2014		0,11	n. messbar	1,6	0,1	16		
	22.12.2014		0,44	0,3		0,0	13		
Goldenseebach, Zulauf 2	30.11.2013	10,7	2,43	1,4		0,1	294	803	75
	06.02.2014		0,85	138,3		12,9	10.171		
	16.05.2014		0,58	n. messbar	61,1	5,7	3.033		
	22.12.2014		2,32	3,8		0,4	762		
Kneeser Bek, Nähe Mündung	03.10.2013	44,8	0,07	0,2		0,0	1	96	2,1
	29.10.2013		0,12	0,4		0,0	4		
	13.11.2013		0,20	8,0		0,2	138		
	30.11.2013		0,31	2,6		0,1	69		
	13.12.2013		0,12	16,0		0,4	160		
	30.12.2013		0,14	13,0		0,3	152		
	16.01.2014		0,09	41,3		0,9	325		
	06.02.2014		0,15	16,7		0,4	213		
	27.02.2014		0,05	36,7		0,8	158		
	13.03.2014		0,14	31,7		0,7	394		
	28.03.2014		0,20	27,5		0,6	478		
10.04.2014	0,17	37,5		0,8	551				

Messstelle	Datum	EZG	Gesamt-P	Durchfluss gemessen	Durchfluss übertragen	Abfluss- spende	P-Fracht	Mittlere P-Fracht	Mittlere P-Flächenspende
		(km ²)	(mg*l ⁻¹)	(l*s ⁻¹)	(l*s ⁻¹)	(l*s ⁻¹ km ⁻²)	(g*d ⁻¹)	(kg*a ⁻¹)	(kg*a ⁻¹ km ⁻²)
	30.04.2014		0,28	24,0		0,5	581		
	16.05.2014		0,18	35,3		0,8	537		
	19.06.2014		0,29	6,2		0,1	152		
	30.07.2014		0,12	-	0,0	0,0	0		
	27.08.2014		0,09	-	0,0	0,0	0		
	22.12.2014		0,274	5,0		0,1	118		
	16.01.2015		0,12	25,0		0,6	259		
Kneeser Bek, Klein Salitz	30.11.2013	34,5	0,1	0,1		0,0	1	107	3,1
	06.02.2014		0,1	12,0		0,3	52		
	16.05.2014		0,1	7,5		0,2	32		
	23.12.2014		0,393	33,3		1,0	1.131		
Kneeser Bek, oberhalb Rogendorf	30.11.2013	14,0	0,1	0,1		0,0	1	93	6,7
	06.02.2014		0,1	2,3		0,2	10		
	16.05.2014		0,1	7,9		0,6	34		
	23.12.2014		0,352	33,3		2,4	1.013		
Kittlitzer Bach, Nähe Mündung	03.10.2013	20,3	0,11	< 0,08	0,0	0,0	0	100	4,9
	29.10.2013		0,09	0,4		0,0	3		
	13.11.2013		0,08	0,2		0,0	1		
	30.11.2013		0,08	2,2		0,1	16		
	13.12.2013		0,08	3,7		0,2	25		
	30.12.2013		0,05	0,6		0,0	3		
	16.01.2014		0,07	29,3		1,5	175		
	06.02.2014		0,05	80,0		3,9	346		
	27.02.2014		0,06	108,3		5,3	543		
	13.03.2014		0,07	43,5		2,1	252		
	28.03.2014		0,07	85,0		4,2	499		
	10.04.2014		0,10	68,0		3,4	576		
	30.04.2014		0,13	64,2		3,2	693		
	16.05.2014		0,08	126,3		6,2	851		
	19.06.2014		0,081	22,5		1,1	157		
	30.07.2014		0,228	0		0,0	0		
	27.08.2014		0,179	0		0,0	0		
22.12.2014	0,08	-	19,3	1,0	133				
16.01.2015	0,073	33,3		1,6	210				
Kittlitzer Bach, Seeauslauf	30.11.2013	16,3	0,13	2,1		0,1	24	12	0,7
	06.02.2014		0,05	-		0,0	0		
	16.05.2014		0,07	9,5		0,6	53		
	22.12.2014		0,094	7,5		0,5	61		
Kittlitzer Bach, Mittellauf	30.11.2013	7,73	0,07	2,1		0,3	12	48	6,2
	06.02.2014		0,05	n. messbar	50,1	6,5	217		
	16.05.2014		0,05	32,7		4,2	141		
	23.12.2014		0,248	8,3		1,1	178		

Tabelle 6

Neu berechnete Phosphorfrachten für die Nebenzuläufe des Schaalsees; Messdatengrundlage: GIG (2011)
Recalculated loads of phosphorus for the subsidiary inlets of lake Schaalsee; Measuring data basis: GIG (2011)

Gewässer	Messstelle	Datum	EZG	Gesamt-P	Durchfluss gemessen	P-Fracht	Mittlere P-Fracht	Mittlere P-Flächenspende
			(km ²)	(mg*l ⁻¹)	(l*s ⁻¹)	(g*d ⁻¹)	(kg*a ⁻¹)	(kg*a ⁻¹ km ⁻²)
Krukenbek	NWS-2-B	26.05.2009	4,94	0,064	1,5	8	9,9	2,0
		21.07.2009		0,105	3	27		
		20.10.2009		0,091	0,5	4		
		09.02.2010		0,071	0,05	0		
		31.03.2010		0,082	23,3	165		
Ablauf Seedorfer Kuchensee	NWS-4-G	26.05.2009	2,40	0,056	4	19	11,8	4,9
		21.07.2009		0,056	10	48		
		20.10.2009		0,065	0,05	0		
		09.02.2010		0,068	13,7	80		
		31.03.2010		0,07	15,6	94		
Graben Gut Großzecher	NWS-7-G	19.11.2009	0,820	0,189	0,05	1	1,8	2,2
		03.03.2010		0,111	0,05	0		
		31.03.2010		0,04	19,7	68		
Wiesengraben nördlich Schaliss	ZB-10-G	26.05.2009	0,429	0,3	0,05	1	3,7	8,6
		21.07.2009		0,182	0,05	1		
		20.10.2009		0,115	0,05	0		
		09.02.2010		0,198	0,05	1		
		31.03.2010		0,07	12	73		
Sammler Nord	RWT-5-D	26.05.2009	1,30	0,057	0,05	0	1,9	1,5
		21.07.2009		0,055	0,05	0		
		20.10.2009		0,039	0,05	0		
		09.02.2010		0,019	1	2		
		31.03.2010		0,03	14,1	37		
Graben nördlich Hakendorf	BTS-3-G	26.05.2009	2,37	0,025	0,2	0	8,8	3,7
		21.07.2009		0,024	0,3	1		
		20.10.2009		0,018	0,05	0		
		09.02.2010		0,066	1,9	11		
		31.03.2010		0,057	34,2	168		
Graben nördlich Bernstorf	BTS-4-G(vr)	21.07.2009	1,41	0,283	2,8	68	7,5	5,3
		20.10.2009		1,17	0,05	5		
		09.02.2010		0,087	1,9	14		
		31.03.2010		0,09	7,6	59		
Graben nach Dutzow	DS-2-D	21.07.2009	4,28	0,109	1	9	6,9	1,6
		20.10.2009		0,11	0,05	0		
		09.02.2010		0,06	2,8	15		
		31.03.2010		0,05	25,6	111		

4 Phosphoraustrag im Einzugsgebiet nach Quellen

Für den Phosphoraustrag im Einzugsgebiet des Schaalsees sind die punktuellen und diffusen Quellen entsprechend dem P-Stofffluss-Schema in Abbildung 5 relevant. Die atmosphärische Deposition lässt sich nicht mit dem System Einzugsgebiet erfassen; hier ist der Prozessraum abweichend. Eine Berechnung bzw. Abschätzung des Austrages nach Quellen kann generell nur als mehr oder weniger hypothetische Größe gelingen (s. FUCHS et al. (2010) zu Grundlagen des Modells MONERIS). Der reale Aus- trag unterliegt einer hohen zeitlichen Variabilität, was sowohl anthropogen als auch meteorologisch-hydrologisch determiniert

ist. FUCHS et al. (2010) stützen sich daher für vergleichende Belastungsanalysen in den deutschen Flussgebieten auf Mittelwerte von 5-Jahres-Zeiträumen. Bei den Punktquellen konnte für die Konzeptstudie auf Daten des Zeitraumes von 2007/2008 bis 2013 (5 bis 6 Jahre) zurückgegriffen werden. Bei den diffusen Quellen war durch die Grundwasserabflussanalysen nach GIG (2011) die längere Zeitreihe 1978 bis 2009 (ca. 30 Jahre) als Bezugsperiode vorbestimmt. Diese Inhomogenität hinsichtlich zeitlicher Bezüge musste in Kauf genommen werden, wird aber angesichts der allgemein trägeren Grundwasserdynamik und der sonstigen Unsicherheiten der Austragsabschätzung in der Bedeutung als eher zweitrangig eingeschätzt. Für einige Bereiche lagen keine

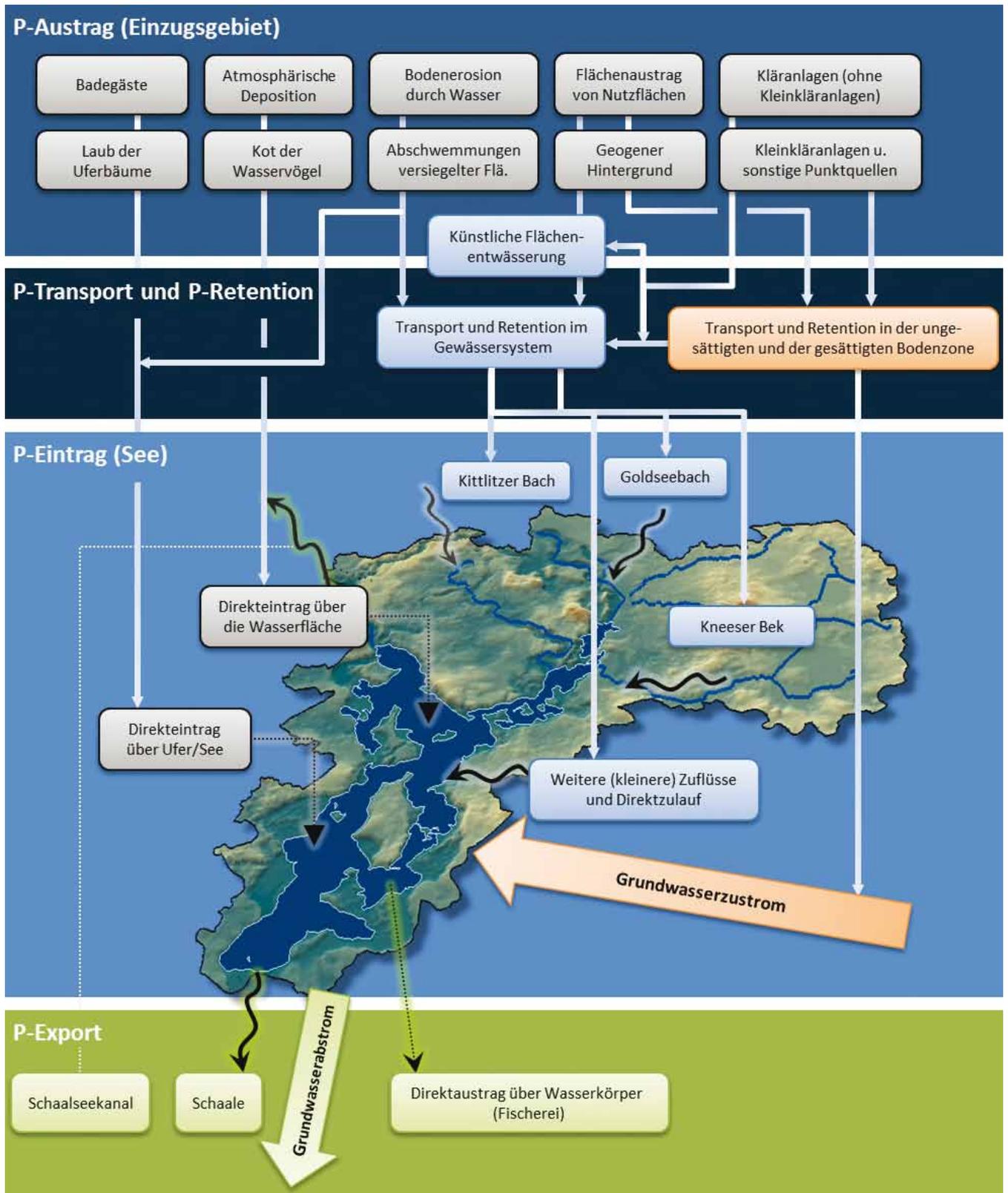


Abbildung 5
 P-Stofffluss-Schema für das Einzugsgebiet des Schaalsees
 Schema of P-flow for the catchment area of lake Schaalsee

regionalen Messdaten vor, z.B. für versiegelte Flächen. In solchen Fällen musste zwangsläufig auf möglichst repräsentative Vergleichs-/Literaturdaten zurückgegriffen werden.

Die Quantifizierung des P-Austrages im EZG erfolgte differenziert für Punktquellen und diffuse Quellen nach differenzierten methodischen Ansätzen sowie teilweise durch Übernahme von

Tabelle 7

Mittlerer jährlicher P-Austrag im Schaalsee-Einzugsgebiet nach Quellen und differenziert in Grundwasserpfad (GW) und Pfad oberirdische Gewässer (OW)
Average annual P-emission in the catchment area of lake Schaalsee by sources, differentiated into groundwater path (GW) and surface water path (OW)

Quelle (Pfad)	P-Austrag (kg*a ⁻¹)	Datengrundlagen, methodische Hinweise
Punktquellen		
Kommunale Kläranlagen (OW)	267	4 kommunale Kläranlagen Größenklasse 1 und 2 nach AbwV, ca. 3.500 EW, Frachtberechnung: Mittelwerte Jahresschmutzwassermenge, Ablaufkonzentration P
Kommunale Kläranlagen (GW)	520	
Kleinkläranlagen (OW)	211	Kleinkläranlagen (KKA) für insgesamt ca. 1.500 EW, Frachtberechnung: KKA-Typ, angeschlossene Einwohnerzahl, Schmutzwassermenge, Ablaufkonzentrationen entsprechend KKA-Typ nach STRAUB (2008)
Kleinkläranlagen (GW)	470	
Versiegelte Flächen (OW)	374	P-Austrag nach Flächenanteilen und Versiegelungsanteilen mit P-Austrag nach BROMBACH & MICHELBAACH (1998)
Landwirtschaftliche und industrielle Produktionsstätten (OW)	170	Keine Industrieflächen, 52 lw. Hofstellen/Produktionsstätten mit ca. 68 ha Fläche; Ansatz eines mittleren Austragswertes in Höhe von 2,5 kg P ha ⁻¹ a ⁻¹
Badestellen (OW)	1	GIG (2011)
Summe Punktquellen	2.013	
Diffuse Quellen		
Landwirtschaftliche Nutzflächen, Waldflächen und sonstige Flächen (GW)	2.473	Hydrotopbasierte Berechnung von Wasserhaushaltskomponenten mittels BAGLUVA-Verfahren (BAGROV 1953, GLUGLA et al. 2003), Abschätzung der Dränabflüsse nach HENNING & HILGERT (2007) mit Flächenkulisse nach BIOTA (2010), Kalibrierung anhand des Gesamtabflusses nach GIG (2011); mittlere P-Konzentrationen nach Nutzung, Bodenart, Entwässerung und Milieu, ausgewählt nach verschiedenen Quellen (z. B. LUA 2002, KAHLE et al. 2008, FUCHS et al. 2010, LLUR 2014); für 12.122 Hydrotope flächenscharfe Berechnung der mittleren jährlichen P-Fracht (GW + OW-Pfad)
<i>(davon von künstlich entwässerten Flächen)</i>	<i>(706)</i>	
Landwirtschaftliche Nutzflächen, Waldflächen und sonstige Flächen (OW)	1.772	
<i>(davon von künstlich entwässerten Flächen)</i>	<i>(1.609)</i>	
<i>(davon aus entwässerten Hochmooren)</i>	<i>(1.049)</i>	
Bodenerosion (OW)	160	Abschätzung des Bodenabtrags mittels Allgemeiner Bodenabtragungsgleichung (ABAG) entsprechend DIN 19708, mittlere Gesamt-P-Konzentrationen nach Bodenarten entsprechend LUNG (2005); nur Berücksichtigung von Erosionsflächen mit eintragungswirksamer Lage zum Gewässernetz, u.a. Herausfilterung von Mulden und Binnengebieten
Atmosphärische Deposition (OW)	846	GIG (2011)
Ausscheidungen der Wasservögel (OW)	154	GIG (2011)
Laubeintrag (OW)	61	GIG (2011)
Summe diffuse Quellen	5.466	
Summe Punktquellen und diffuse Quellen (Gesamtaustrag)	7.479	
davon über den Grundwasserpfad	3.463	
davon über den Pfad oberirdische Gewässer	4.016	

Daten nach GIG (2011). Generell wurde unterschieden, ob der resultierende P-Austrag in das Grundwasser oder in die oberirdischen Gewässer erfolgt (Tab. 7, Abb. 6 und 7). Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der mittlere Gesamt-P-Austrag liegt in der Summe bei 7.479 kg P *a⁻¹, hiervon entfällt ca. immerhin ein Viertel auf Punktquellen (2.013 kg P *a⁻¹); drei Viertel des Austrages (5.466 kg P *a⁻¹) stammen aus diffusen Quellen.
- Der Austragsanteil, der letztlich dem Pfad oberirdische Gewässer zuzurechnen ist, liegt mit 4.016 kg P *a⁻¹ etwas höher als der Anteil, der sich auf den Grundwasserpfad bezieht (3.463 kg P *a⁻¹).
- Bei den Punktquellen umfasst der Austrag aus Kläranlagen einschließlich Kleinkläranlagen 1.468 kg P *a⁻¹ und damit immerhin 20 % des Gesamtaustrages.
- Bei den diffusen Quellen dominiert der Austrag von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit 4.245 kg P *a⁻¹ (mit enthalten sind kleinere Beiträge von Wald- und sonstigen ungenutzten Flächen); dies entspricht fast 80 % des gesamten Austrages aus diffusen Quellen. Der höhere Anteil (2.473 kg P *a⁻¹) des flächenbezogenen Austrages bezieht sich auf den Grundwasserpfad.
- Auch die atmosphärische Deposition (bezogen auf die Seeoberfläche) stellt mit 846 kg P *a⁻¹ (ca. 16 %) eine bedeutsame diffuse Quelle dar. In GIG (2011) werden die verschiedenen Datengrundlagen bzw. Literaturdaten zur Deposition ausführlich diskutiert; sowohl bei GIG (2011) als auch in dieser Berechnung wurde den bereits regionalisierten Daten nach FUCHS et al. (2010) gefolgt.
- Bemerkenswert ist der hohe Anteil des P-Austrages beim Pfad oberirdische Gewässer aus entwässerten, landwirtschaftlich

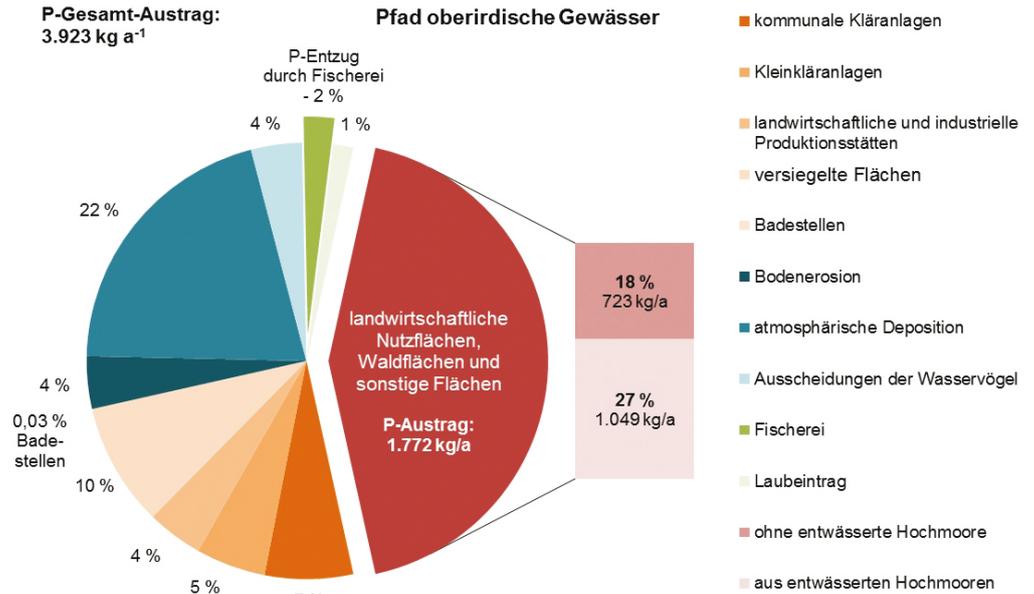


Abbildung 6
Relative Bedeutung aller P-Quellen für den Pfad oberirdische Gewässer im Einzugsgebiet des Schaalsees
Relative importance of all P-sources via surface waters in the catchment area of lake Schaalsee

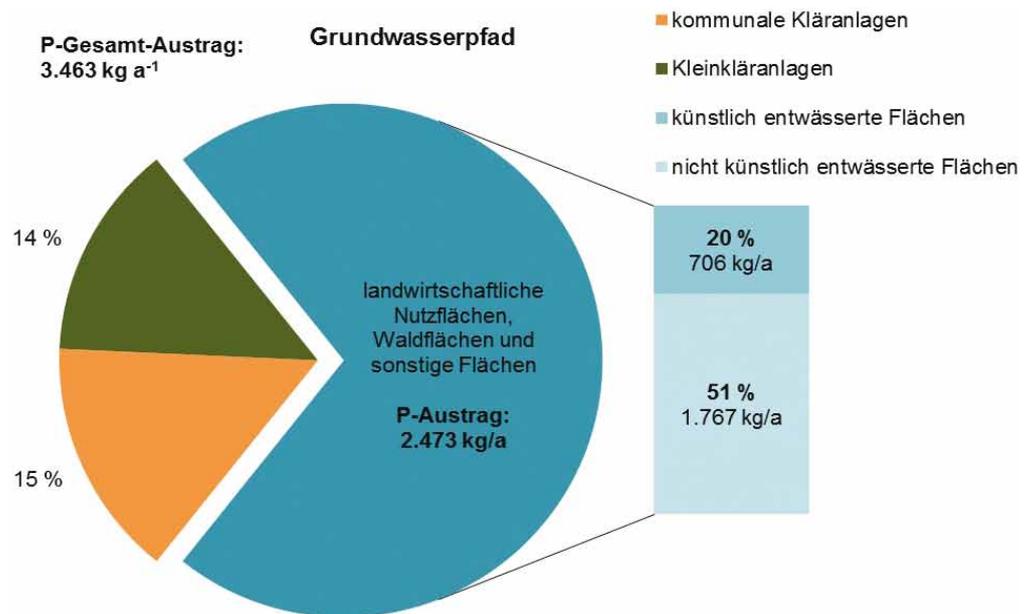


Abbildung 7
Relative Bedeutung aller P-Quellen für den Grundwasserpfad im Einzugsgebiet des Schaalsees
Relative importance of all P-sources of groundwater in the catchment area of lake Schaalsee

genutzten Hochmooren (ca. 20 % der diffusen Quellen). Der Anteil an Flächen mit Hochmoorböden im oberirdischen Einzugsgebiet beträgt zwar nur 2,9 % (5,3 km²), wovon 35 % landwirtschaftlich genutzt sind. Aber bei landwirtschaftlich genutzten Hochmoorböden wiesen bereits SCHEFFER & BLANKENBURG (1978) ca. 10- bis 20-mal höhere Phosphatverluste durch Auswaschung im Vergleich zu Mineralböden nach.

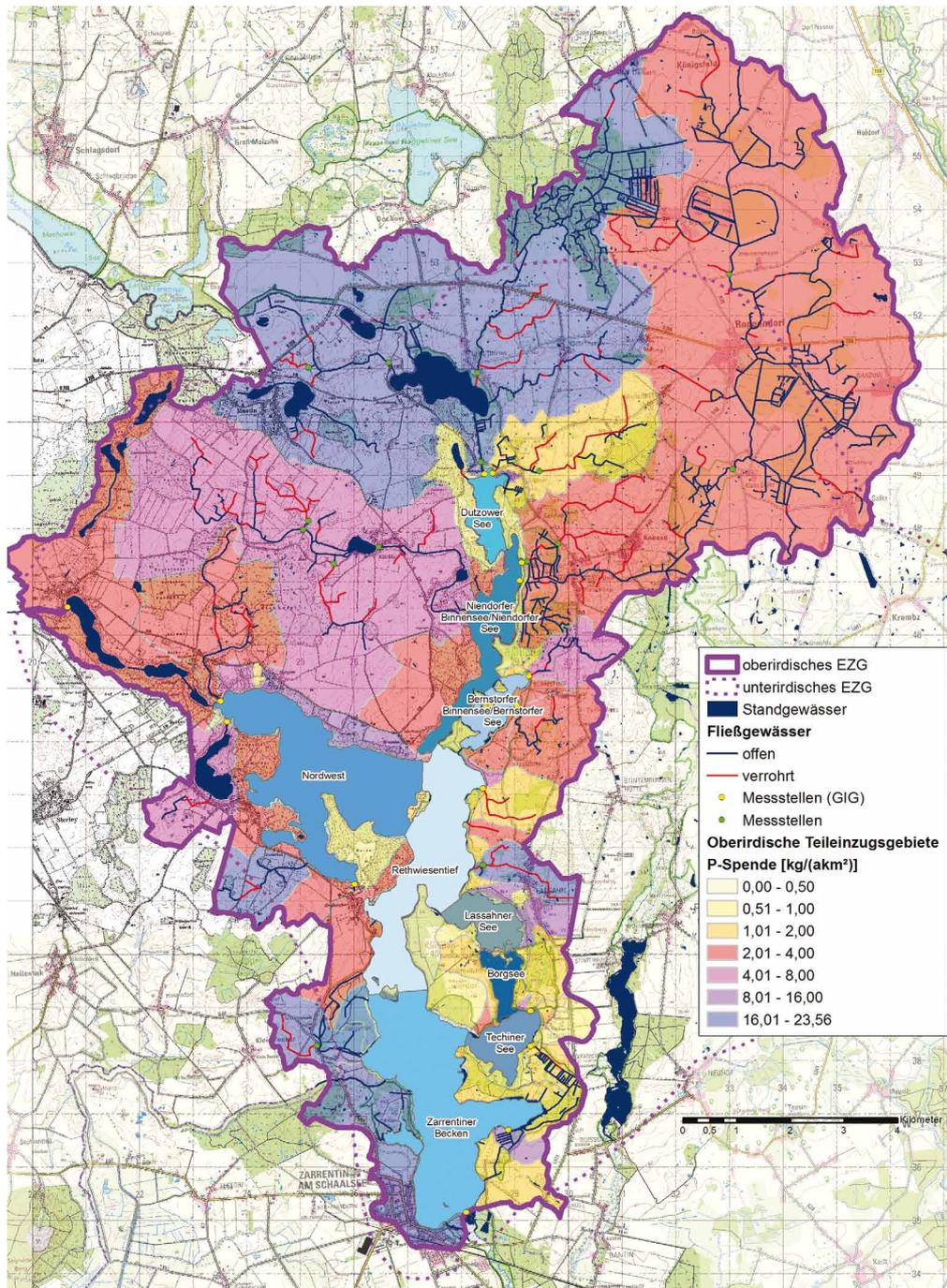


Abbildung 8
 Flächennormierter Gesamt-P-Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer im oberirdischen Einzugsgebiet des Schaalsees
 Area-normalized total phosphorus input via surface waters in the catchment area of lake Schaalsee

5 Phosphoreintrag in den Schaalsee nach Pfaden

Der Gesamt-P-Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer konnte maßgeblich auf der Basis der eigenen Analysen und hydrologischen Berechnungen quantifiziert werden, vor allem im Hinblick auf größere Zuläufe. Außerdem erfolgte eine Neubewertung der Messdaten von GIG (2011) für kleinere Zuläufe, indem auch für diese Daten die o.g. Methode zur Berechnung mittlerer Frachten angewandt wurde. In Abbildung 8 wird der

so berechnete Gesamt-P-Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer flächennormiert dargestellt (als P-Flächenspende), wobei die Struktur der oberirdischen Teil-EZG zugrunde gelegt wurde. Das Teilgebiet mit dem höchsten, flächenbezogenen Eintrag bildet das EZG des Goldenseebaches im Norden.

Der Gesamt-P-Eintrag über oberirdische Gewässer (inklusive der gedrähten EZG-Anteile) liegt danach bei 1.090 kg P * a⁻¹; damit umfassen die Zuflüsse summarisch den zweithöchsten Teileintrag (ca. 30 % des Gesamteintrages).

Beim Eintrag über den Grundwasserpfad wurde den Angaben nach GIG (2011) gefolgt: berechnete/modellierte Grundwasserabflüsse und mittlere Stoffkonzentrationen im Ergebnis von Analysen an Sondermessstellen nach Grundwasserstockwerken (17 temporäre Grundwasser-Messstellen rund um den Schaalsee sowie bis zu 5 Terminmessungen in den Jahren 2009 und 2010). Die Grundwasserstockwerke weisen dabei räumlich stark unterschiedliche P-Konzentrationen auf; zeitlich waren die Messwerte aber relativ konstant.

Die Daten nach GIG (2011) wurden bei BIOTA (2015) einer Plausibilitätsprüfung durch Einordnung in den regionalen hydrogeologischen Zusammenhang unterzogen (Datenvergleich mit amtlichen Grundwassermessstellen des Landes Mecklenburg-Vorpommern). Anhand der Grundwasserisohypsen nach GIG (2011) wurden auch die Grundwasser-EZG für die einzelnen Grundwasserstockwerke und die jeweiligen Seeteile des Schaalsees bestimmt. Mit Hilfe dieses Flächenbezuges konnten die Gesamt-P-Frachten zusätzlich als „flächennormierte“ Gesamt-P-Spenden berechnet werden, so dass die Phosphorbelastung aus dem Grundwasser räumlich differenziert werden kann (Abb. 9 als Darstellung aller drei überlagerten Grundwasserstockwerke).

Im obersten (1.) Grundwasserstockwerk ergeben sich die größten (flächennormierten) Belastungen im Süden des Schaalsees. Davon betroffen sind die Teilseen Zarrentiner Becken und Techiner See. Aber auch der Nordwestteil des Schaalsees unterliegt einer deutlichen Belastung über den Grundwasserpfad. In den tieferen Grundwasserstockwerken erfolgt die Anströmung des Schaalsees nur noch aus östlicher und teilweise nördlicher Richtung. Die Belastung über das 2. Grundwasserstockwerk ist vor allem für den Teilsee Dutzower See hoch und deutlich.

Im 3. Grundwasserstockwerk ist die Belastung allgemein deutlich geringer. Der Grundwassereintrag umfasst insgesamt $1.516 \text{ kg P} \cdot \text{a}^{-1}$ (41 % des Gesamteintrages). Hier spielen zum einen hohe gemessene Gesamt-P-Konzentrationen eine Rolle. So lagen bei GIG (2011) Messwerte teilweise im Bereich $> 2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ Gesamt-P, was sich nahezu im Bereich der P-Belastungen urbaner Grundwasserkörper bei Untersuchungen am Arendsee bewegt ($> 4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ Gesamt-P, MEINIKMANN et al. 2015). Zum anderen kann dies durch die hohe quantitative Bedeutung des Grundwasserzuflusses für den Schaalsee erklärt werden.

Die atmosphärische Deposition umfasst immerhin 23 % des Eintrages ($846 \text{ kg P} \cdot \text{a}^{-1}$); auf die Problematik des in der Relation offenbar zunehmenden P-Eintrages aus der atmosphärischen Deposition weisen u.a. bereits HERZOG et al. (2011) und MEINIKMANN et al. (2013) hin. So sind bei oligotrophen Seen relative Anteile der atmosphärischen P-Deposition teilweise im Bereich von 30 bis 40 % zu konstatieren. Die anderen Eintragspfade haben nur eine vergleichsweise geringe Bedeutung (Tab. 8).

6 Zusammenfassung

Die Bearbeitung einer maßnahmenorientierten Konzeptstudie zur Verbesserung des ökologischen Zustandes des Schaalsees (BIOTA 2015) war in verschiedene, aufeinander aufbauende

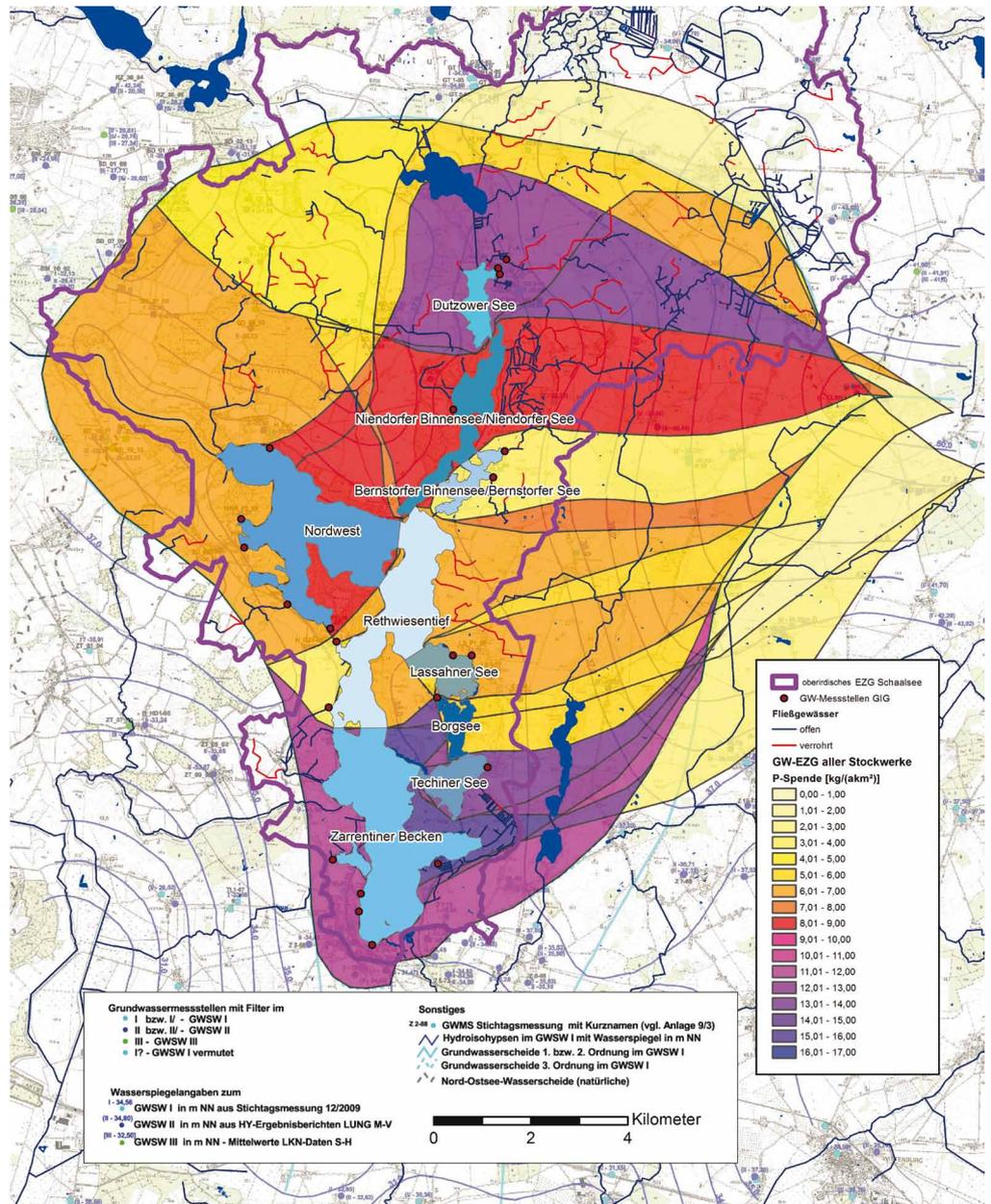


Abbildung 9

Grundwassereinzugsgebiete und flächennormierter Gesamt-P-Eintrag über den Grundwasserpfad für alle drei Grundwasserstockwerke im Schaalseegebiet (Datengrundlage: GIG 2011)

Groundwater basins and corresponding total phosphorus input via groundwater for all three aquifers in the catchment area of lake Schaalsee (data basis: GIG 2011)

Schritte gegliedert. In diesem Beitrag werden neben einer thematischen Einführung und einer Charakterisierung des Untersuchungsgebietes die verwendeten Grundlagendaten, die Ergebnisse eines Messprogramms zu Gesamt-P-Frachten in Zuflüssen und Dränabläufen, die Analyse des mittleren jährlichen Gesamt-P-Austrages im Einzugsgebiet nach Quellen sowie die Analyse des Gesamt-P-Eintrages in den See nach Eintragspfaden vorgestellt.

Der mittlere P-Gesamt-Austrag im EZG liegt in der Summe danach bei $7.479 \text{ kg P} \cdot \text{a}^{-1}$, wovon ca. ein Viertel auf Punktquellen entfällt; ca. drei Viertel des Austrages stammen aus diffusen Quel-

Tabelle 8

Mittlerer jährlicher pfadbezogener Gesamt-P-Eintrag in den Schaalsee
Average annual path-related total phosphorus input into lake Schaalsee

Eintragspfad	Teilsystem	Fracht (kg P *a ⁻¹)
Hauptzuflüsse	Kittlitzer Bach (oberirdisches EZG: 20,29 km ²)	100
	Goldenseebach (oberirdisches EZG: 33,88 km ²)	575
	Kneeser Bek (oberirdisches EZG: 44,80 km ²)	96
Kleinere Zuflüsse und Direktabfluss aus dem Eigen-EZG	Zuflüsse aus dem Eigen-EZG (Zwischen- und Oberflächenabfluss)	11
	Kleinere Zuflüsse, z.T. dränierte EZG-Anteile/restliches EZG	308
Ufer/Wasserfläche	Badestellen	1
	Laubeintrag	61
	Bodenerosion durch Wasser	13
Wasserfläche	Atmosphärische Deposition	846
	Wasservögel	154
Grundwasserzustrom	GW-Stockwerk 1	988
	GW-Stockwerk 2	299
	GW-Stockwerk 3	229
	Summe	3.681

len. Die Punktquellen umfassen vor allen Dingen die Kläranlagen einschließlich Kleinkläranlagen (20 % des Gesamtaustrages). Bei den diffusen Quellen dominiert der Austrag von landwirtschaftlichen Nutzflächen mit 4.245 kg P *a⁻¹ (mit enthalten sind kleinere Beiträge von Wald- und sonstigen ungenutzten Flächen): Dies entspricht fast 80 % des gesamten Austrages aus diffusen Quellen.

Zudem wurde der Gesamt-P-Eintrag in den Schaalsee auf folgender Grundlage ermittelt: Neubewertung der P-Belastungssituation durch ein Mess- und Analysenprogramm, besonderer Fokus auf den Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer, adäquate Berücksichtigung des Einflusses der Abflusssituation in Bezug auf zeitliche Repräsentanz sowie weitestmögliche Differenzierung aller Ergebnisse nach hydrologischen Teilsystemen. Der mittlere Gesamt-P-Eintrag als Summe aller Eintragspfade (Gesamteintrag) liegt bei 3.681 kg P *a⁻¹. Der Gesamt-P-Eintrag über den Pfad oberirdische Gewässer (inklusive der gedränten EZG-Anteile) liegt danach bei 1.090 kg P *a⁻¹; damit umfassen die Zuflüsse summarisch den zweithöchsten Teileintrag (aber ca. 30 % des Gesamteintrages). Der Grundwassereintrag liefert mit insgesamt 1.516 kg P *a⁻¹ den größten Teilbeitrag (41 % des Gesamteintrages). Außerdem führt die atmosphärische Deposition zu einem relativ hohen Eintrag (846 kg P *a⁻¹, 23 % des Gesamteintrages).

In einem weiteren Teil (MEHL et al. 2016) schließen sich folgende Darlegungen an: Abschätzung der landschaftlichen Gesamt-P-Retention, Analyse des Gesamt-P-Austrages aus dem See (P-Export), Gesamt-P-Bilanz, Zieldefinition (P-Reduktionsziele), Maßnahmenableitung und -auswahl.

Summary

The action-oriented concept study aiming to improve the ecological condition of lake Schaalsee (BIOTA 2015), has been divided into several subsequent steps. Apart from a general introduction to the topic and the definition of the study area, this paper deals with the fundamental data, the results of a measur-

ing programme concerning total-P-loads in inlets and the drainage system, the analysis of the average annual total-P-output in the catchment area according to sources, as well as the analysis of the average annual total-P-input into the lake according to input paths.

In the conceptual study of the Schaalsee watershed, P-discharges by source (emission) have been quantified down to point and diffuse sources as well as into groundwater and surface water paths. The average P-emission in the catchment area can be estimated to 7,479 kg P *a⁻¹. About one quarter is related to point sources and three quarters to diffuse sources. The point sources primarily

include treatment plants and especially small sewage treatment plants (20 % of total emissions). In case of diffuse sources, the use-related surface contributions of dissolved phosphorus dominate with 4,245 kg P *a⁻¹ (almost 80 % of total emissions from diffuse sources); the higher proportion (2,473 kg P *a⁻¹) refers to the discharge into groundwater.

Besides, the total amount of P-input into lake Schaalsee has been determined on the following basis: reassessment of the P-emission-situation by means of a measuring and analysing programme, special focus on the input from surface waters, adequate consideration of the influence of the effluent situation in terms of chronological occurrence as well as best possible differentiation according to hydrological subsystems. The total amount of all input tracks (total input) is 3,681 kg P *a⁻¹. The total-P-input from surface water (including the drained parts of the catchment area) is 1,090 kg P *a⁻¹, so the inlets comprise the second highest input (ca. 30 % of the total input).

The input from ground water which is 1,516 kg P *a⁻¹ represents the biggest part (41 % of the total input). Besides, the atmospheric deposition has a relatively high input (846 kg P *a⁻¹, 23 % of the total input). All other tracks of input play a minor role.

A different paper in this issue (MEHL et al. 2016) deals with additional explanations: estimation of the landscaped total-P-retention, analysis of the total-P-output from the lake (P-export), total-P-balance, definition of goals (P-reduction goals), deduction and selection of actions.

Danksagung

Für die fachliche und organisatorische Unterstützung sowie die angenehme und konstruktive Zusammenarbeit danken die Autoren den Mitgliedern der projektbegleitenden, länderübergreifenden Arbeitsgruppe, insbesondere Frau Wesseler, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume S-H, den Herren Ahne und Hartnack, Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz S-H, Herrn Dr. Mathes, Ministerium für

Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz M-V, Herrn Foth, Kreis Herzogtum Lauenburg, sowie Herrn Mund, Gewässerentwicklungsverband Schaalsee-Delvenau. Ein besonderer Dank gilt den beiden Gutachtern im Review-Verfahren für ihre sachdienlichen Hinweise.

Anschriften der Verfasser:

Dr. Dr. D. Mehl

Dr. T.G. Hoffmann

Dipl.-Ing. M. Schneider

M.Sc. M. Knüppel

biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH

Nebelring 15, 18246 Bützow

dietmar.mehl@institut-biota.de

PD Dr. W. Baumgarten

Universität Rostock, Institut für Bodenkunde

Justus-von-Liebig-Weg 6, 18051 Rostock

Dr.-Ing. H. Giese

Gewässer- und Landschaftsverband Herzogtum Lauenburg

Robert-Bosch-Straße 21a, 23909 Ratzeburg

Literaturverzeichnis

- BAGROV, N.A. (1953): O srednem mnogoletnem isparenii s poverchnosti susi (Über den vieljährigen Durchschnittswert der Verdunstung von der Oberfläche des Festlandes). – Meteorolog. i Hidrolog. 10, 20–25
- BEHRENDT, H. & R. DANNOWSKI (Hrsg.) (2005): Nutrients and heavy metals in the Odra River System – Emissions from point and diffuse sources, their loads, and scenario calculations and possible changes. – Weißensee Verlag, Berlin, 353 S.
- BEHRENDT, H., P. HUBER, M. KORNMILCH, D. OPITZ, O. SCHMOLL, G. SCHOLZ & R. UEBE (1999): Nährstoffbilanzierung der Flussgebiete in Deutschland. – Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 75/99, 386 S.
- BIOTA (2010): Ermittlung von Art und Intensität künstlicher Entwässerung von landwirtschaftlichen Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern, 102 S.
- BIOTA (2015): Konzeptstudie zur Verbesserung des ökologischen Zustandes des Schaalsees. – biota – Institut für ökologische Forschung und Planung GmbH im Auftrag des Gewässerentwicklungsverbandes Schaalsee-Delvenau, 153 S.
- BROMBACH, H. & S. MICHELBACH (1998): Abschätzung des einwohnerbezogenen Nährstoffaustrages aus Regenentlastungen im Einzugsgebiet des Bodensees (Studie). – Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Bericht Nr. 49, 47 S.
- DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. – DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN ISO 11885-E22:2009-09: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von ausgewählten Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ICP-OES) (ISO 11885:2007). – Deutsche Fassung EN ISO 11885:2009. – DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- FUCHS, S., U. SCHERER, R. WANDER, H. BEHRENDT, M. VENOHR, D. OPITZ, T. HILLENBRAND, F. MARSCHEIDER-WEIDEMANN & T. GÖTZ (2010): Berechnung von Stoffeinträgen in die Fließgewässer Deutschlands mit dem Modell MONERIS, Nährstoffe, Schwermetalle und Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. – Hrsg. Umweltbundesamt, UBA-Texte 45/2010, 207 S.
- GIG (2011): Studie zur Wasser- und Nährstoffbilanz des Schaalsees. – GIG Gesellschaft für Ingenieurgeologie mbH in Kooperation mit KLS (Dr. Spieker) im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft, Umwelt und Verbraucherschutz Mecklenburg-Vorpommern, 262 S.
- GLUGLA, G., JANKIEWICZ, P., RACHIMOW, C., LOJEK, K., RICHTER, K., FÜRTIG, G. & P. KRAHE (2003): Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. – Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), BfG-Bericht Nr. 1342, 103 S.
- HENNIG, H. & T. HILGERT (2007): Dränabflüsse – Der Schlüssel zur Wasserbilanzierung im nordostdeutschen Tiefland. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51 (6), 248–257
- HERZOG, C., P. KASPRZAK & F. GOHR (2011): Atmosphärische Deposition – Wichtiger Eintragspfad für Nährstoffe in Seen. – Deutsche Gesellschaft für Limnologie (DGL), Erweiterte Zusammenfassungen der Jahrestagung 2011, 278–281
- HILDEN, M. (2003): Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern – Probenahmestrategien und Berechnungsverfahren. – Hrsg. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), Kulturbuchverlag Hannover, 72 S.
- KAHLE, P., D. TIEMEYER, B. EICHLER-LÖBERMANN & B. LENNARTZ (2008): Phosphoraustrag aus einem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet des norddeutschen Tieflandes. – Wasserwirtschaft 5, 2–7
- KLAPPER, H. (1992): Eutrophierung und Gewässerschutz. – Fischer Verlag Jena, Stuttgart, 277 S.
- KREIS HERZOGTUM LAUENBURG (2016): Geschichte des Landkreises. – www.herzogtum-lauenburg.de, Abruf vom 21.02.2016
- LAWA (1991): Pegelvorschrift, Anlage D: Richtlinie für das Messen und Ermitteln von Abflüssen und Durchflüssen. – Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und Bundesministerium für Verkehr (BMV)
- LLUR (2014): Nährstoffe in Gewässern Schleswig-Holsteins: Entwicklung und Bewirtschaftungsziele. – Hrsg. Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume S-H, 92 S.
- LUA (2002): Stoffeinträge in die Gewässer des Landes Brandenburg. – Landesumweltamt Brandenburg (LUA), Fachbeiträge des Landesumweltamtes 68, 33 S.
- LUNG (2005): Beiträge zum Bodenschutz in Mecklenburg-Vorpommern – Böden in Mecklenburg-Vorpommern – Abriss ihrer Entstehung, Verbreitung und Nutzung. 2. Auflage. – Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie M-V, 84 S.
- MEHL, D. (2013): Berechnung regionalisierter Stickstoff- und Phosphorbilanzen landwirtschaftlicher Nutzflächen in Mecklenburg-Vorpommern. – Vortragskurzfassung, 18. Gewässersymposium „Landwirtschaft und Gewässerschutz“ des LUNG M-V, 20.11.2013 in Güstrow, 4 S.
- MEHL, D., A. STEINHÄUSER, F. KOCH & A. KÜCHLER (2009): Regionalisierung der Nährstoffbelastung in Oberflächengewässern in Mecklenburg-Vorpommern. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (5), 336–341
- MEHL, D., T.G. HOFFMANN, M. SCHNEIDER, M. KNÜPPEL, M., W. BAUMGARTEN & H. GIESE (2016): Ergebnisse einer Konzeptstudie für den Schaalsee (Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern). II Phosphorretention, Gesamtbilanz, Reduktionsziele, Maßnahmen. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 60 (5), 321–330; DOI: 10.5675/HyWa_2016,5_3
- MEINIKMANN, K., A. BARSCH, J. GELBRECHT, B. GRÜNEBERG, S. WANNER, L. WOLF, D. ZAK & J. LEWANDOWSKI (2013): Diffuse Belastung von Seen aus dem Einzugsgebiet. – KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 6 (12), 702–709
- MEINIKMANN, K., M. HUPFER & J. LEWANDOWSKI (2015): Phosphorus in groundwater discharge – A potential source for lake eutrophication. – Journal of Hydrology 524, 214–226

- MSRL (2008): Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). – Amtsblatt der EG Nr. L 164/19 vom 25.06.2008
- NIXDORF, B., M. HEMM, A. HOFFMANN & P. RICHTER (2004): Dokumentation von Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands. – Umweltbundesamt (UBA), UBA-Texte 05/2010, 51 S.
- SCHEFFER, B. & J. BLANKENBURG (1978): Löslichkeit und Wanderung von Phosphaten in saurem Hochmoorboden. – Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Ges. 27, 271–280
- StALU WM (2016): Daten der Station Grambek des Deutschen Wetterdienstes für die Reihe 1985–2014. – Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Westmecklenburg (Frau Besler, mdl. Mitt.)
- STRAUB, A. (2008): Einfache Messmethoden zur Charakterisierung sowie Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit biologischer Kleinkläranlagen. – Schriftenreihe Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt 17, 301 S.
- TETZLAFF, B., D. KRAUSE, K. MAROWSKY & A. BOCK (2015): Eutrophierungsprobleme im Altmühlsee als Folge diffuser und punktförmiger P-Einträge – Modellierung und Ergebnisse. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59 (1), 223–236; DOI: 10.5675/HyWa_2015,1_2
- WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Europäische Wasserrahmenrichtlinie – Amtsblatt der EG Nr. L 327/1 vom 22.12.2000