

# Begrenzung externer Nährstoffbelastungen durch Vorsperren

Langzeitdaten von neun deutschen Vorsperren mit insgesamt 124 Abflussjahren wurden ausgewertet, um die Zulauf- bzw. Ablaufrachten und entsprechenden Eliminationseffizienzen für die Nährstoffe gelöstes Phosphat, Gesamt-Phosphor, Nitrat, und Silikat zu quantifizieren. Hohe Eliminationseffizienzen wurden für gelöstes Phosphat (43,6 %) und Gesamt-Phosphor (39,9 %) realisiert, vergleichsweise geringere für Nitrat (15,3 %) und Silikat (15,9 %). In der warmen Jahreshälfte ist die Nährstoffelimination deutlich höher als in der kalten Jahreszeit.

Karsten Rinke, Taynara Fernandes und Martin Schultze

## 1 Betrieb und Funktion von Vorsperren

Nahezu alle deutschen Trinkwassertalsperren und auch viele Brauchwassertalsperren sind mit Vorsperren ausgestattet. Diese kleinen Staukörper mit mittleren Verweilzeiten von wenigen Wochen erfüllen keine Speicher- oder Hochwasserschutzfunktion, denn sie werden im Vollstau, d. h. im Überlauf, betrieben. Sie dienen vielmehr der Wassergütesteuierung und leisten hierbei nicht nur den Rückhalt von Schwebstoffen, Geschiebe und Sedimenten, sondern auch von Nährstoffen. Hierdurch kann die externe Nährstoffbelastung vermindert und die Wasserqualität unterhalb liegender Talsperren verbessert werden. Ihre Funktionsweise beruht primär auf der Entfernung von partikulärem Material durch Sedimentation. Durch die Aufnahme gelöster Nährstoffe durch das Phytoplankton realisieren Vorsperren aber auch eine Entfernung der gelösten Nährstoffe [1], [2]. Die Phytoplankton, im Optimalfall gut sedimentierende Kieselalgen, dienen hierbei als biologische Pumpe, die gelöste in partikuläre Nährstofffraktionen überführt und durch Sedimentation entfernt (**Bild 1**). Der Betrieb im Überlauf ist erforderlich, da die oberste Gewässerschicht an der Staumauer den maximalen Reinigungseffekt erreicht und tiefere Schichten oft noch erhöhte Partikelfrachten enthalten oder steigende Nährstoffkonzentrationen aufweisen, die durch die Mineralisierung am Sediment verursacht werden.

Punktuelle externe Nährstoffquellen, z. B. Kläranlagenausläufe, sind in vielen Einzugsgebieten durch eine verbesserte Abwasserreinigung bereits stark reduziert worden. Diffuse Nährstoffquellen, insbesondere aus der Landwirtschaft, entziehen sich aber oft einem effizienten Management und sind wei-

terhin vielerorts auf einem hohem Belastungsniveau. Hier bilden Vorsperren ein wirksames Instrument der Nährstoffkontrolle. Die Elimination der relevanten Nährstoffe wird aber selten quantifiziert und eine solide Erfassung der Eliminationseffizienz ist nur punktuell vorhanden. Daher sind die Anlagen einer Optimierung nur schwer zugänglich.

## 2 Forschungsziele und Methoden

### 2.1 Datengrundlage und Ziele der Studie

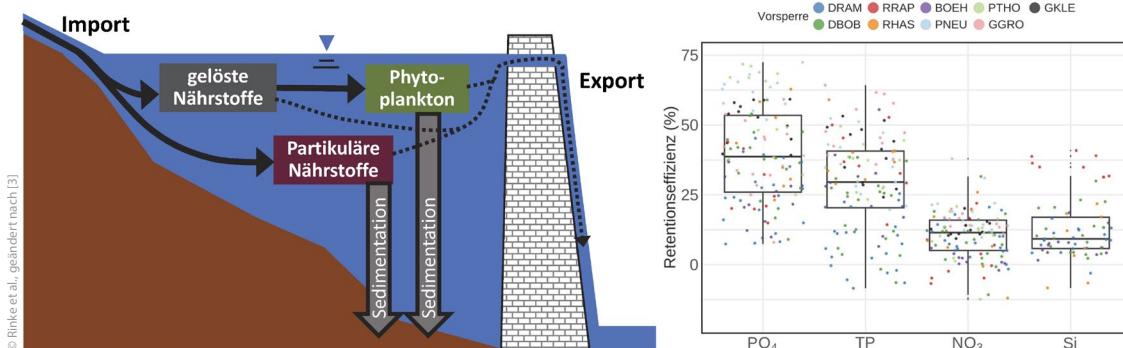
In dieser Studie werden Langzeitdaten von neun Vorsperren mit insgesamt 124 Abflussjahren ausgewertet mit dem Ziel, die Zulauf- bzw. Ablaufrachten und die dazugehörigen Eliminationseffizienzen für die Nährstoffkomponenten gelöstes Phosphat, Gesamt-Phosphor, Nitrat und Silikat zu quantifizieren. Als Datenbasis wurden monatliche oder zweiwöchentliche Messungen der genannten Nährstoffe in den Zu- und Abläufen der Vorsperren von den jeweiligen Talsperrenbetreibern bereitgestellt. Hierbei lagen Daten für Zeiträume zwischen 7 und 22 Jahren vor. Für Silikat fehlten Daten für die Vorsperren der Talsperren Pöhl und Große Dhünn. Zur Frachtermittlung verwendeten wir vier unterschiedliche Verfahren, um methodisch bedingten Quellen von Unsicherheit und Variabilität greifbar zu machen. Wir haben weiterhin die inter- und intra-annuelle Variabilität in der Eliminationseffizienz der verschiedenen Vorsperren analysiert und adressieren Konsequenzen für die Talsperrenbewirtschaftung sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten. Eine detaillierte Charakterisierung der Datengrundlage ist Fernandes et al. [3] zu entnehmen.

### 2.2 Quantifizierung von Nährstofffracht und Retentionseffizienz

Wir verwendeten vier verschiedene Verfahren zur Frachtermittlung auf der Basis von Abflussdaten in täglicher Auflösung sowie den Nährstoffdaten in vorliegender zeitlicher Auflösung (monatlich oder zweiwöchentlich) für jedes Kalenderjahr. Die ersten beiden Methoden repräsentieren klassische Verfahren, die auch seitens der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) empfohlen werden [4] und auf der Berechnung von mittleren Frachten beruhen. Die dritte und vierte Methode beruht auf datengetrie-

### Kompakt

- Vorsperren sind Instrumente zur Reduktion externer Nährstoffbelastungen.
- Die Datenanalyse zeigte hohe mittlere Retentionseffizienzen für gelöstes Phosphat (43,6 %) und Gesamtphosphor (39,9 %) und geringe für Nitrat (15,3 %) und Silikat (15,9 %).
- Die Retention ist in der warmen Jahreszeit höher.



**Bild 1:** links: Prozessschema zur Nährstoffelimination in Vorsperren; rechts: ermittelte Eliminationseffizienzen aller Vorsperren (Legende oben) und Abflussjahre (einzelne Punkte, Mittelwert über alle vier Frachtberechnungsverfahren) für gelöstes Phosphat ( $\text{PO}_4$ ), Gesamtphosphor (TP), Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Silikat (Si)

benen statistischen Methoden, die mittels nicht-linearer, lokaler Glättungsalgorithmen typische Muster der Konzentrations- und Abflussdynamik aufgreifen und mittels Interpolation auch kontinuierliche Datenreihen, d. h. in täglicher Auflösung, der entsprechenden Nährstoffkonzentrationen produzieren können. Folgende vier Methoden wurden verwendet, für eine genaue Darstellung der Berechnung siehe Fernandes et al. [3]:

- 1) LAWA-Methode 1 (Standardmethode): Arithmetisches Mittel der Tagesfrachten.
- 2) LAWA-Methode 2 (abfluss-gewichtete Standardmethode): Abfluss-gewichtete Korrektur der Fracht basierend auf Methode 1.
- 3) Berechnung eines saisonalen GAM (Generalized Additive Model) zur Prognose der Stoffkonzentration mit den Inputdaten Jahr, Tag des Jahres und Tagessumme des Abflusses. Die Jahresfracht ergibt sich dann aus der Summe der Tagesfrachten (Produkt von Abfluss und Konzentration).
- 4) Berechnung von Tagesfrachten mit dem Paket „EGRET“ des U. S. Geological Surveys [5] mit den gleichen Inputdaten wie in Methode 3.

Zur Ermittlung der Retentionseffizienz  $R$  wurde die Differenz zwischen Zulauffracht ( $L_{in}$ ) und Ablauffracht ( $L_{out}$ ) berechnet und durch die Zulauffracht geteilt:

$$R[\%] = \frac{L_{in} - L_{out}}{L_{in}} \times 100 \quad (1)$$

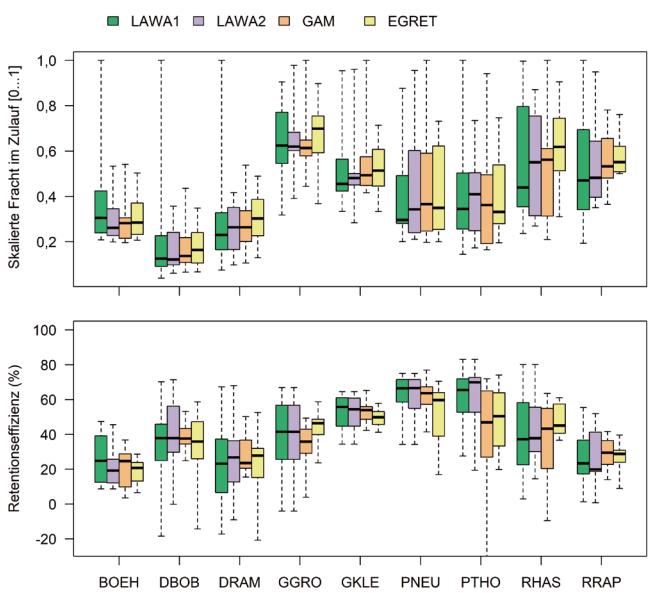
Negative Retentionseffizienzen zeigen demnach eine Nährstofffreisetzung in der Vorsperre an.

### 3 Eliminationsleistung der Vorsperren

#### 3.1 Retentionseffizienz und erreichte Wassergüteverbesserung

Unsere Ergebnisse zeigen deutlich höhere mittlere Eliminationseffizienzen (Bild 1 und Tabelle 1) für gelöstes Phosphat (43,6 %) und Gesamt-Phosphor (39,9 %) im Vergleich zu Nitrat (15,3 %) und Silikat (15,9 %). Da in unseren Gewässern in der Regel eine Phosphorlimitation des Phytoplanktons vorliegt, ist die hohe selektive Aufnahme von gelöstem Phosphor verständ-

lich und die Elimination höher als beim Nährstoff Nitrat. Letzteres kann aber ggf. auch durch Denitrifikation entfernt werden, wofür aber nur eine geringe Aktivität in den Vorsperren zu erwarten ist. Silikat kann hingegen nur durch Aufnahme durch Kieselalgen eliminiert werden. Die Eliminationseffizienzen zeigen eine hohe Variabilität. Hierbei treten auch systematische Unterschiede zwischen den Vorsperren auf und manche Systeme verhalten sich effizienter als andere (Bild 2). Dies ist zu einem gewissen Ausmaß auf Unterschiede in der Verweilzeit zurückzuführen [3]. Die interannuelle Variabilität innerhalb der einzelnen Vorsperren ist ebenfalls erheblich aufgrund der hohen Schwankungen in den hydrologischen Randbedingungen und Konzentrationsdynamiken. Diese interannuelle Variabilität ist aber fast 50 % geringer als die Variabilität zwischen den Vorsperren [3].



**Bild 2:** Oben: Boxplots (Median, 25-75-Perzentil, Min/Max) der skalierten Zulauffrachten für gelöstes Phosphat ( $\text{PO}_4$ ) der neun Vorsperren (bezogen auf den Maximalwert der jeweiligen Vorsperre, Abkürzungen siehe Tabelle 1) für die vier alternativen Fracht-Berechnungsverfahren; unten: Vergleichbare Darstellung für die Retentionseffizienzen (in %) für das gelöste Phosphat ( $\text{PO}_4$ ); man beachte, dass negative Retentionseffizienzen auftreten

**Tabelle 1:** Übersicht über die in dieser Studie untersuchten Vorsperren und die zugehörigen Retentionseffizienzen für gelöstes Phosphat ( $\text{PO}_4$ ), Gesamtphosphat (TP), Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Silikat (Si), Angabe als Mittelwert  $\pm$  Standardabweichung und Minimum bzw. Maximum (in Klammern) (VWZ: Verweilzeit) (Quelle: [3])

Talsperre	Vorsperre	Abk.	Volumen [ $10^6 \text{ m}^3$ ]	Mittl. Tiefe [m]	Mittl. VWZ [d]	Zeitraum	Retentionseffizienz
							$\text{PO}_4$ [%]
Bautzen	Oehna	BOEH	0,52	3,17	2,44	2006–2018	$21,8 \pm 8,8$ (9,6–36,8)
Dröda	Ramoldsreuth	DRAM	0,14	2,66	2,44	2002–2017	$25,2 \pm 11,4$ (7,4–45,3)
Dröda	Bobenneukirchen	DBOB	0,19	3,44	8,42	2002–2017	$37,3 \pm 12,6$ (9,1–59)
Große Dhünn	Große Dhünn	GGRO	7,50	11,2	84,19	2004–2017	$38,7 \pm 13,9$ (8–59,2)
Große Dhünn	Kleine Dhünn	GKLE	0,40	3,8	13,75	2004–2017	$51,6 \pm 7,4$ (39,2–59,2)
Pöhl	Neuensalz	PNEU	0,21	3,75	21,56	2008–2021	$60,8 \pm 9,2$ (35,4–72,5)
Pöhl	Thossfell	PTHO	1,23	3,73	19,32	2008–2021	$52,1 \pm 16,1$ (25–71,7)
Rappbode	Rappbode	RRAP	1,25	5,3	28,6	2012–2019	$27,3 \pm 10,8$ (14,9–43,9)
Rappbode	Hassel	RHAS	1,45	5	52,6	2012–2019	$41,7 \pm 14,9$ (23,1–62,8)

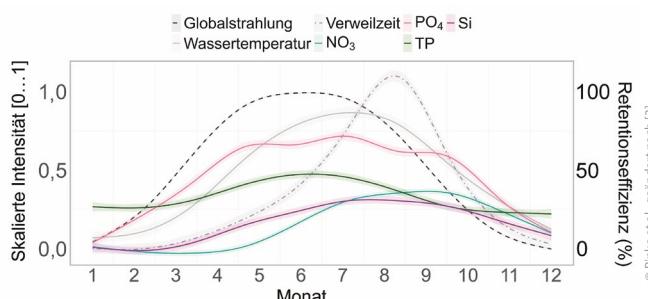
Die vier unterschiedlichen Frachtberechnungsverfahren können sich bezüglich der ermittelten Zulauf- und Ablaufräften durchaus unterscheiden, wie in **Bild 2** am Beispiel des gelösten Phosphates im Zulauf aufgezeigt. Die Schwankungsbreiten bei den anderen Nährstoffen sind vergleichbar. Diese Variabilität zwischen den unterschiedlichen Frachtberechnungsverfahren ist aber deutlich geringer als die Unterschiede zwischen den Vorsperren. In einem gegebenen Abflussjahr sind aber die auftretenden Abweichungen systematischer Natur, d. h. wenn ein Berechnungsverfahren höhere Werte generiert, dann betrifft das in der Regel sowohl die Zulauf- als auch die Ablaufräften, so dass die ermittelte Eliminationseffizienz relativ robust ist. Bei Nährstofffreisetzung in der Vorsperre können auch negative Retentionseffizienzen auftreten (**Bild 2**). Die Daten-getriebenen statistischen Methoden GAM und EGRET zeigen oft eine engere Übereinstimmung im Vergleich zu den beiden LAWA-Methoden. Die LAWA-Methode 1 ist etwas anfälliger für Ausreißer in der Frachtermittlung und die Methode GAM produzierte für die Vorsperre Thossfell einen Ausreißer. Die LAWA-Methode 2 und EGRET liefern robuste Ergebnisse mit geringerer Ausreißer-Anfälligkeit.

Bei Anwendung des Modells von Benndorf [6] zur Trophieklassifikation von Talsperren basierend auf der Phosphor-Flächenbelastung und der hydraulische Belastung kann ermittelt werden, ob die Nährstoffelimination in der Vorsperre zu einer Verbesserung der Trophiekasse der darunter liegenden Talsperre (Hauptsperrre) führt. Tatsächlich waren bei 3 der 5 untersuchten Talsperren die Vorsperren in der Lage, den trophischen Zustand des nachgelagerten Hauptspeichers um eine Stufe zu verbessern. Dies betraf die Trinkwassertalsperren Rappbode, Pöhl und Große Dhünn. Für jede dieser Talsperren waren in diesem Untersuchungsprogramm jeweils zwei Vorsperren integriert, d. h. bei dieser Trophieverbesserung waren sechs der neun untersuchten Vorsperren involviert.

### 3.2 Saisonale Effekte

Aufgrund der höheren biologischen Aktivität ist die Nährstoffelimination in der warmen Jahreshälfte deutlich höher als in der kalten (**Bild 3**). Die Retention der Phosphorkomponenten ist hierbei vorwiegend mit den saisonalen Verläufen von Wasser-temperatur und Globalstrahlung gekoppelt, während die Retention von Nitrat und Silikat eher mit der Verweilzeit verbunden ist. Die intra-annuelle Variabilität ist deutlich höher als die inter-annuelle Variabilität für eine gegebene Vorsperre [3].

Vorsperren leisten demnach insbesondere während der warmen Jahreszeit einen substanzialen Beitrag zur Minimierung von Nährstoffimporten in die dazugehörigen Hauptsperrre. Hohe Stoffimporte im Winterhalbjahr können hingegen weniger effektiv zurückgehalten werden. Die saisonale Verteilung der Zulauffräften ist deshalb entscheidend für die Ausprägung der jährlichen Retentionsleistung der Vorsperren. Werden vor allem im Sommerhalbjahr Nährstoffe eingetragen, erreichen Vorsperren eine hohe Retentionseffizienz. Erfolgen aber wesentliche Stoffimporte im Winterhalbjahr, z. B. mit der Schneeschmelze, ist die Retentionseffizienz gering. Bei entsprechend hohen Stoffimporten kann dann aber trotzdem der höchste absolute Stoffrückhalt im Winter stattfinden (z. B. Hassel-Vorsperre), obwohl die Retentionseffizienz geringer ist. In solchen Fällen mit hoher Winterlast sind weiterer Managementmaßnahmen denkbar. Hier wären z. B. Verfahren zur Phosphorfällung eine mögliche Option. Diese werden bisher in Vor-



**Bild 3:** Saisonaler Verlauf der Retentionseffizienzen (rechte Achse) für gelöstes Phosphat ( $\text{PO}_4$ ), Gesamtphosphor (TP), Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Silikat (Si) sowie die saisonalen Dynamiken für die Verweilzeit, Wassertemperatur und Globalstrahlung, die letzten drei Variablen wurden durch Division durch den Maximalwert skaliert (linke Achse) und repräsentieren somit den relativen Verlauf; alle Kurven wurden durch ein zyklisches GAM aus dem Gesamtdatensatz extrahiert

TP [%]	NO <sub>3</sub> [%]	Si [%]
26 ± 13,3 (6,5-55,5)	3,7 ± 4,4 (-2-13,4)	7,5 ± 4,8 (1,6-18,6)
7,6 ± 10,1 (-8,4-25,4)	9,1 ± 6,1 (-1,6-20,6)	8,6 ± 4,2 (-3-16,6)
19,2 ± 13,3 (-6,4-38,5)	8,9 ± 8,7 (-10,8-31,6)	11,9 ± 8 (2,2-29,9)
49,2 ± 9,8 (35,9-64,3)	15,6 ± 2,6 (11,1-19,9)	keine Daten
39,7 ± 10,1 (24,2-53,2)	13,1 ± 3 (9,4-20,2)	keine Daten
35,5 ± 10,6 (19,7-52,4)	18,8 ± 7,9 (9,8-37,9)	keine Daten
35,6 ± 7,7 (23,3-49,6)	10 ± 8,4 (-12,4-20,8)	keine Daten
37,1 ± 12,4 (14,3-52,7)	2,9 ± 10,7 (-6,7-22)	36 ± 3,4 (31,4-40,9)
38,8 ± 9,4 (29-59)	9 ± 12,1 (-12-25,9)	7,9 ± 11,4 (-8,3-21,8)

sperren kaum angewendet. Eine interessante Ausnahme bildet aber die Phosphoreliminationsanlage im Zulauf der Wahnbachtalsperre, die seit über 45 Jahren erfolgreich betrieben wird [7].

#### 4 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Vorsperren stellen eine erhebliche Reinigungsleistung für die unterhalb liegenden Hauptsperrten bereit, insbesondere für die Phosphorkomponenten. Ein effizienter Betrieb der Vorsperre kann den trophischen Zustand der Hauptspur um eine Trophiekasse verbessern. Eine Bewertung der Reinigungsleistung erfordert mindestens monatliche, besser zweiwöchentliche Beprobungen der Zulauf und Ablaufkonzentrationen.

Karsten Rinke, Taynara Fernandes and Martin Schultze

#### Reducing external nutrient loading into reservoirs by small pre-dams

The reduction of external nutrient loading is a key target in water quality management of reservoirs in order to mitigate eutrophication. This is particularly relevant in reservoirs used for drinking water supply. The operation of pre-dams, i.e. small impoundments of inflows located directly upstream the main reservoir, can be an efficient instrument in nutrient management as they can even limit loads from non-point sources, e.g. from agriculture. We analysed long-term data from nine German pre-dams (in total 124 discharge years) in order to quantify inflow and outflow loads as well as nutrient retention in these pre-dams for the following nutrients: dissolved phosphate (PO<sub>4</sub>), total phosphorus (TP), nitrate (NO<sub>3</sub>), and silicate (Si). For load estimation, four different statistical methods were employed that delivered similar results for nutrient retention efficiency though inflow and outflow loads showed larger variability. Our analysis (mean values) indicated that pre-dams have a high potential to retain PO<sub>4</sub> (43.6%) and TP (39.9%) while retention of NO<sub>3</sub> (15.3%) and Si (15.9%) was lower. Variability among pre-dams was high. We found intra-annual variability in nutrient retention to be higher than inter-annual variability with higher retention in the warm season due to higher biological activity when compared to winter conditions.

Zur Frachtberechnung können die LAWA-Methode 2 und die Methode EGRET empfohlen werden. Erstere ist einfacher durchführbar, letztere erlaubt aber auch die Analyse saisonaler Effekte. Durch die geringeren Retentionseffizienz im Winterhalbjahr im Vergleich zum Sommer fallen bei Vorsperren mit hohen Zulauffrachten im Winterhalbjahr die Retentionsleistungen insgesamt geringer aus. Hier könnten zusätzliche Maßnahmen zur Nährstoffelimination in Betracht gezogen werden, z. B. durch Fällungsmaßnahmen. Teilweise treten sogar negative Retentionseffizienzen auf. Hier bilden Maßnahmen zur Verminderung der Mineralisierung eine Option, z. B. durch Sedimentberäumung.

Insgesamt sind Vorsperren wichtige Komponenten im Wassergütemanagement von Talsperren, deren Stoffretention eine effektive und effiziente Ökosystemdienstleistung darstellt und zu wesentlichen Güteverbesserungen führt.

#### Dank

Wir danken der Landestalsperrenverwaltung Sachsen, dem Wupperverband und dem Talsperrenbetrieb Sachsen-Anhalt für die Bereitstellung der Daten. Diese Publikation wurde durch das Horizon-Europe-Projekt FERRO (<https://ferroproject.eu/>, Projekt Nr. 101 157 743) gefördert.

#### Autoren

Prof. Dr. Karsten Rinke

Taynara Fernandes, M. Sc.

Dr. Martin Schultze

Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ

Brückstrasse 3a

39114 Magdeburg

karsten.rinke@ufz.de

taynara.fernandes@ufz.de

martin.schultze@ufz.de

#### Literatur

- [1] Paul, L.: Nutrient elimination in pre-dams: results of long term studies. In: Hydrobiologia (2003), Bd. 504, S. 289-295.
- [2] Benndorf, J.; Pütz, K.: Control of eutrophication of lakes and reservoirs by means of pre-dams - I. Mode of operation and calculation of the nutrient elimination capacity. In: Water Research (1987), Bd. 21, S. 829-838.
- [3] Fernandes, T.; Shatwell, T.; Schultze, M. et al.: How efficient are pre-dams as reservoir guardians? A long-term study on nutrient retention. In: Water Research (2025), Bd. 272, S. 122 864 (doi.org/10.1016/j.watres.2024.122864).
- [4] Hilden, M.: Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern. Probennahmestrategien und Berechnungsverfahren. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2003.
- [5] Hirsch, R. M.; Cicco, L. A. D.: User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and data Retrieval: R packages for hydrologic data. In: U. S. Geological Survey Techniques and Methods, 2015, book 4, chap. A10 (doi.org/10.3133/tm4A10).
- [6] Benndorf, J.: A Contribution to the Phosphorus Loading Concept. In: Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie 64 (1979), Nr. 2, S. 177-188 (doi.org/10.1002/ioh.19790640203).
- [7] Clasen, J.; Bernhardt, H.: Chemical methods of P-elimination in the tributaries of reservoirs and lakes. In: Schweiz. Z. Hydrol. 49 (1987), Nr. 2, S. 249-259 (doi.org/10.1007/BF02538506).

DOI dieses Beitrags: <http://doi.org/10.1007/s35147-025-2476-3>