

This is the preprint of the contribution published as:

Rinke, K., Fernandes, T., Schultze, M. (2025):

Begrenzung externer Nährstoffbelastungen durch Vorsperren [Reducing external nutrient loading into reservoirs by small pre-dams]

WasserWirtschaft **115** (2-3), 62 - 65

The publisher's version is available at:

<https://doi.org/10.1007/s35147-025-2476-3>

Karsten Rinke, Taynara Fernandes, Martin Schultze

Begrenzung externer Nährstoffbelastungen durch Vorsperren

English Title:

Reducing external nutrient loading into reservoirs by small pre-dams

Kurzfassung in Deutsch

Langzeitdaten von neun deutschen Vorsperren mit insgesamt 124 Abflussjahren wurden ausgewertet, um die Zulauf- bzw. Abflussfrachten 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.

Abstract (english)

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 (PO₄), total phosphorus (TP), nitrate (NO₃), 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 PO₄ (43.6 %) and TP (39.9 %) while retention of NO₃ (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.

Max. 3 Kernaussagen für „Kompakt“ im Gesamtumfang von max. 300 Zeichen.

- Vorsperren sind Instrumente zur Reduktion externer Nährstoffbelastungen
- Unsere 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 höher in der warmen Jahreszeit

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 Wassergütesteuerung 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 Phytoplankter, 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 weiterhin 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 Poehl 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 intraannuelle Variabilität in der Eliminationseffizienz der verschiedenen Vorsperren analysiert und adressieren Konsequenzen für die Talsperrenbewirtschaftung sowie mögliche Optimierungsmöglichkeiten. Eine detaillierte Charakterisierung der Datengrundlage ist [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 datengetriebenen 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 4 Methoden wurden verwendet, für eine genaue Darstellung der Berechnung siehe [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 GAMs (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 US Geological Surveys [5] mit den gleichen Inputdaten wie in Methode 3.

Zur Ermittlung der Retentionseffizienz R wurde die Differenz zwischen Zulauffracht (L_{in}) und Abflussfracht (L_{out}) berechnet und durch die Zulauffracht geteilt (Gl. 1). Negative Retentionseffizienzen zeigen demnach eine Nährstofffreisetzung in der Vorsperre an.

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

3. Eliminationsleistung der Vorsperren

3.1. Retentionseffizienz und erreichte Wassergüteverbesserung

Unsere Ergebnisse zeigen deutlich höhere mittlere Eliminationseffizienzen (Bild 1, 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 – und damit Algen-verfügbarem – Phosphor verständlich 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 (siehe [3]).

Die vier unterschiedlichen Frachtberechnungsverfahren können sich bezüglich der ermittelten Zulauf- und Ablauffrachten durchaus unterscheiden, wie in Bild 2 am Beispiel des gelösten Phosphates aufgezeigt. Die Schwankungsbreiten bei den anderen Nährstoffen ist vergleichbar. Diese Variabilität zwischen den unterschiedlichen Frachtberechnungsverfahren ist aber deutlich geringer als die Unterschiede zwischen den Vorsperren. Hierbei auftretende Abweichungen scheinen aber systematischer Natur zu sein, d.h. wenn ein Berechnungsverfahren höhere Werte generiert, dann betrifft das in der Regel sowohl die Zulauf- als auch die Ablauffrachten, sodass die ermittelte Eliminationseffizienz relativ robust ist. Bei Nährstofffreisetzungen 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 Trophieklasse der darunter liegenden Talsperre (Hauptsperre) 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 Vorsperre 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 Wassertemperatur 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 substantiellen Beitrag zur Minimierung von Nährstoffimporten in die dazugehörigen Hauptsperre. Hohe Stoffimporte im Winterhalbjahr können hingegen weniger effektiv zurückgehalten werden. Die saisonale Verteilung der Zulauffrachten 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 geringe ist. In solchen Fällen mit hoher Winterlast, sind weitere Managementmaßnahmen denkbar. Z.B. wären Verfahren zur Phosphorfällung eine mögliche Option. Diese werden bisher in Vorsperren 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 Hauptsperren bereit, insbesondere für die Phosphorkomponenten. Ein effizienter Betrieb der Vorsperre kann den trophischen Zustand der Hauptsperre um eine Trophieklasse verbessern. Eine Bewertung der Reinigungsleistung erfordert mindestens monatliche, besser zweiwöchentliche Beprobungen der Zulauf und Ablaufkonzentrationen. 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. Wenn Vorsperren hohe Zulauffrachten im Winterhalbjahr erhalten, wenn die Retentionseffizienz deutlich geringer als in der warmen Jahreszeit ist, kann die Retentionsleistung gering ausfallen. 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 Wassergütmanagement 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. 101157743) gefördert.

Anschrift der Autoren.

1. Prof. Dr. Karsten Rinke, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Brückstrasse 3a, 39114 Magdeburg, Email: karsten.rinke@ufz.de
2. MSc Taynara Fernandes, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Brückstrasse 3a, 39114 Magdeburg, Email: taynara.fernandes@ufz.de
3. Dr. Martin Schultze, Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Brückstrasse 3a, 39114 Magdeburg, Email: martin.schultze@ufz.de

Literatur

(maximal 9 Literaturangaben).

- [1] L. Paul, „Nutrient elimination in pre-dams: results of long term studies“, *Hydrobiologia*, Bd. 504, S. 289–295, 2003.
- [2] J. Benndorf und K. Pütz, „Control of eutrophication of lakes and reservoirs by means of pre-dams — I. Mode of operation and calculation of the nutrient elimination capacity“, *Water Research*, Bd. 21, S. 829–838, 1987.

- [3] T. Fernandes, T. Shatwell, M. Schultze, C. Mi, M. Determann, und K. Rinke, „How efficient are pre-dams as reservoir guardians? A long-term study on nutrient retention“, *Water Research*, Bd. 272, S. 122864, März 2025, doi: 10.1016/j.watres.2024.122864.
- [4] M. Hilden, „Ermittlung von Stoff-Frachten in Fließgewässern. Probenahmestrategien und Berechnungsverfahren“, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 2003.
- [5] R. M. Hirsch und L. A. D. Cicco, „User guide to Exploration and Graphics for RivEr Trends (EGRET) and dataRetrieval: R packages for hydrologic data“, in *Techniques and Methods*, Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubs.usgs.gov/tm/04/a10/>
- [6] J. Benndorf, „A Contribution to the Phosphorus Loading Concept“, *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie*, Bd. 64, Nr. 2, S. 177–188, 1979, doi: <https://doi.org/10.1002/iroh.19790640203>.
- [7] J. Clasen und H. Bernhardt, „Chemical methods of P-elimination in the tributaries of reservoirs and lakes“, *Schweiz. Z. Hydrol*, Bd. 49, Nr. 2, S. 249–259, Juni 1987, doi: 10.1007/BF02538506.

Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften

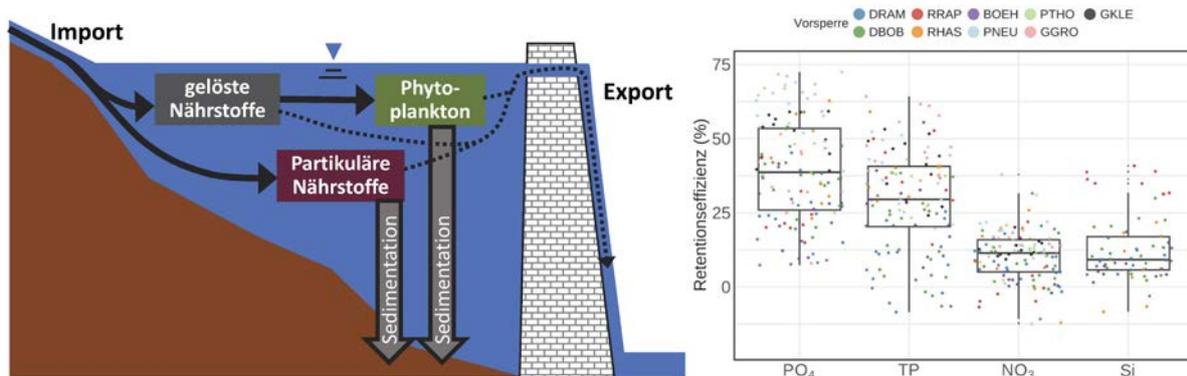


Bild 1: Links: Prozessschema zur Funktionsweise von Vorsperren. Durch die Sedimentation von eingetragem partikulärem Material und Phytoplankton wird der Export über den Überlauf reduziert. Rechts: Ermittelte Eliminationseffizienz aller Vorsperren (Legende oben) und Abflussjahre (einzelne Punkte) für die vier Nährstoffkomponenten (PO₄ – gelöstes Phosphat, TP – Gesamtphosphor, NO₃ – Nitrat, Si – Silikat, dargestellt als Siliziumanteil) (© Autoren, geändert nach [3])

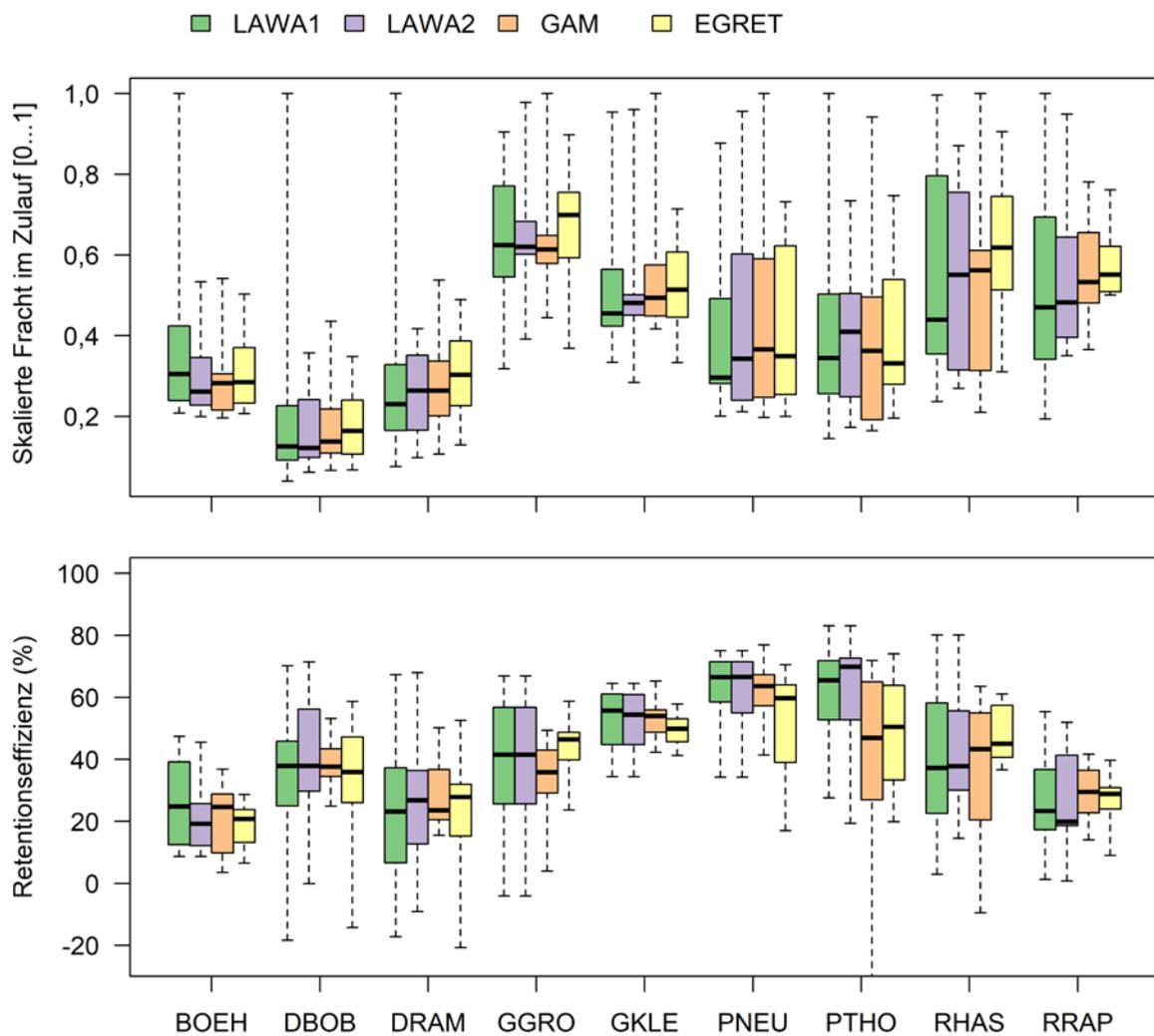


Bild 2: Oben: Boxplots (Median, 25/75-Perzentil, Min/Max) der skalierten Zulauffrachten für gelöstes Phosphat (PO_4) der 9 Vorsperren (bezogen auf den Maximalwert der jeweiligen Vorsperre, Abkürzungen siehe Tabelle 1) für die vier alternativen Fracht-Berechnungsverfahren; Unten: Vergleichbare Darstellung für die Retentionseffizienzen (in %) der 9 Vorsperren und vier Fracht-Berechnungsverfahren für das gelöste Phosphat (PO_4); beachte dass (selten) auch negative Retentionseffizienzen auftreten können wenn die Abauffrachten höher als die Zulauffrachten liegen aufgrund von Nährstofffreisetzungen in der Vorsperre. (© Autoren)

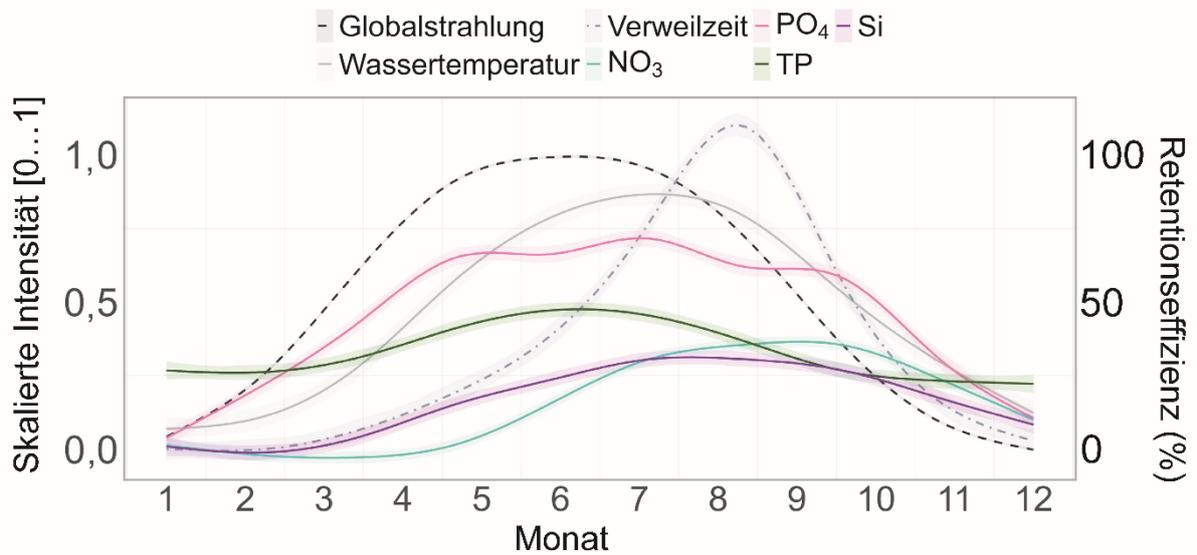


Bild 3: Saisonaler Verlauf der Retentionseffizienzen (rechte Achse) für gelöstes Phosphat (PO₄), Gesamtphosphor (TP), Nitrat (NO₃) und Silikat (Si) sowie die saisonalen Dynamiken für die Verweilzeit, Wassertemperatur und Globalstrahlung. Die letzteren drei Variablen wurden durch Division durch den Maximalwert skaliert (linke Achse) und repräsentieren somit den relativen Verlauf. Alle Kurven wurden durch ein zyklisches GAM (Generalized Additive Model) aus dem Gesamtdatensatz extrahiert. (© Autoren, geändert nach [3])

Tabelle 1: Übersicht über die in dieser Studie untersuchten Vorsperren und die zugehörigen Retentionseffizienzen für gelöstes Phosphat (PO₄), Gesamtphosphat (TP), Nitrat(NO₃) und Silikat (Si), Angabe als Mittelwert ± Standardabweichung und Minimum bzw. Maximum (in Klammern). VWZ=Verweilzeit. (Quelle: [3])

Talsperre	Vorsperre	Abk.	Volumen (10 ⁶ m ³)	Mittl. Tiefe (m)	Mittl. VWZ (d)	Zeitraum	Retentionseffizienz PO ₄ (%)	Retentionseffizienz TP (%)	Retentionseffizienz NO ₃ (%)	Retentionseffizienz Si (%)
Bautzen	Oehna	BOEH	0.52	3.17	2.44	2006-2018	21.8 ± 8.8 (9.6-36.8)	26 ± 13.3 (6.5-55.5)	3.7 ± 4.4 (-2-13.4)	7.5 ± 4.8 (1.6-18.6)
Droeda	Ramoldsreuth	DRAM	0.14	2.66	2.44	2002-2017	25.2 ± 11.4 (7.4-45.3)	7.6 ± 10.1 (-8.4-25.4)	9.1 ± 6.1 (-1.6-20.6)	8.6 ± 4.2 (-3-16.6)
Droeda	Bobenneukirchen	DBOB	0.19	3.44	8.42	2002-2017	37.3 ± 12.6 (9.1-59)	19.2 ± 13.3 (-6.4-38.5)	8.9 ± 8.7 (-10.8-31.6)	11.9 ± 8 (2.2-29.9)
Große Dhünn	Grosse Dhuenn	GGRO	7.50	11.2	84.19	2004-2017	38.7 ± 13.9 (8-59.2)	49.2 ± 9.8 (35.9-64.3)	15.6 ± 2.6 (11.1-19.9)	keine Daten
Große Dhünn	Kleine Dhuenn	GKLE	0.40	3.8	13.75	2004-2017	51.6 ± 7.4 (39.2-59.2)	39.7 ± 10.1 (24.2-53.2)	13.1 ± 3 (9.4-20.2)	keine Daten
Poehl	Neuensalz	PNEU	0.21	3.75	21.56	2008-2021	60.8 ± 9.2 (35.4-72.5)	35.5 ± 10.6 (19.7-52.4)	18.8 ± 7.9 (9.8-37.9)	keine Daten
Poehl	Thossfell	PTHO	1.23	3.73	19.32	2008-2021	52.1 ± 16.1 (25-71.7)	35.6 ± 7.7 (23.3-49.6)	10 ± 8.4 (-12.4-20.8)	keine Daten
Rappbode	Rappbode	RRAP	1.25	5.3	28.6	2012-2019	27.3 ± 10.8 (14.9-43.9)	37.1 ± 12.4 (14.3-52.7)	2.9 ± 10.7 (-6.7-22)	36 ± 3.4 (31.4-40.9)
Rappbode	Hassel	RHAS	1.45	5	52.6	2012-2019	41.7 ± 14.9 (23.1-62.8)	38.8 ± 9.4 (29-59)	9 ± 12.1 (-12-25.9)	7.9 ± 11.4 (-8.3-21.8)