

Abschätzung der biogeochemischen Umsetzung, Sedimentation und Resuspension von Phosphorverbindungen in der Unterwarnow für Flusseinträge in der Ostsee

PhosWaM Technical Report AP1.1b

Daniel Neumann

Rev. 1.0, September 2019

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



NaWaM

Nachhaltiges Wassermanagement



ReWaM

Regionales Wasserressourcen-Management
für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland



Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Lizenz CC BY-SA 4.0 International. Mit dieser Lizenz sind die Verbreitung und das Teilen erlaubt unter den Bedingung: Namensnennung. Die Lizenz ist einsehbar unter:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

This work is distributed under the Creative Commons License CC BY-SA 4.0 International. It permits to copy and redistribute the material in any medium or format, requiring attribution to the original author. The license is available at:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode>

Dieser Artikel wird zitiert als /This paper should be cited as:

Neumann, D. (2019). Abschätzung der biogeochemischen Umsetzung, Sedimentation und Resuspension von Phosphorverbindungen in der Unterwarnow. PhosWaM Technical Report AP1.1b. Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde, Rostock, Deutschland. DOI: 10.12754/misc-2019-0002.

Zusammenfassung

Im Projekt PhosWaM wurden Simulationen zum Umsatz von Phosphorverbindungen in Oberwarnow und in der Ostsee durchgeführt. Die Phosphoreinträge aus der Flussmodellierung sollten als Eingangsdaten für die Ostseemodellierung genutzt werden. Allerdings mündet die Oberwarnow nicht direkt in die Ostsee sondern in die Unterwarnow. Die Unterwarnow ist ein ästuarines Gewässer, in dem sich Wassermassen aus der Oberwarnow mit Wassermassen aus der Ostsee mischen. Herkömmliche Fließgewässermodelle können nicht für die Unterwarnow angewandt werden. Gleichzeitig ist die Unterwarnow zu klein um vom gewählten Ostseemodell räumlich ausreichend aufgelöst zu werden. Daher war es nötig, die biogeochemische Umwandlung und die physikalischen Sedimentations-Resuspensions-Prozesse von Phosphorverbindungen in der Unterwarnow abzuschätzen. Zwei hierfür nutzbare Abschätzungen, die auf Basis von Messkampagnen anderer Arbeitspakete in PhosWaM durchgeführt wurden, werden in diesem Bericht vorgestellt.

Abstract

In the PhosWaM project, simulations were carried out on the turnover of phosphorus compounds in the Oberwarnow River and in the Baltic Sea. The phosphorus inputs from the river modeling should have been used as input data for the Baltic Sea modeling. However, the Oberwarnow does not flow directly into the Baltic Sea but, first, into the Unterwarnow and from there into the Baltic Sea. The Unterwarnow is an estuarine water body in which water masses from the Oberwarnow mix with water masses from the Baltic Sea. Conventional river models cannot be used for the Unterwarnow. At the same time, the Unterwarnow is too small to be spatially resolved by the selected Baltic Sea model. Therefore, it was necessary to estimate the biogeochemical transformation and the physical sedimentation-resuspension processes of phosphorus compounds in the Unterwarnow. Two useful estimations based on measurement campaigns of other work packages in PhosWaM are presented in this report.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des BMBF Projekts PhosWaM (*Phosphor von der Quelle bis ins Meer - Integriertes Phosphor- und Wasserressourcenmanagement für nachhaltigen Gewässerschutz*) durchgeführt (FKZ 033Wo42, <https://www.phoswam.de>). PhosWaM ist eines von 15 Forschungsprojekten der Fördermaßnahme ReWaM (*Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland*). ReWaM ist Teil des BMBF-Förderschwerpunktes „*Nachhaltiges Wassermanagement*“ (NaWaM) im Rahmenprogramm „*Forschung für Nachhaltige Entwicklung*“ (FONA³). Einige Schritte der Datenauswertung wurden auf Servern des Projektes PROSO (*Prozesse von Spurenstoffen in der Ostsee*) durchgeführt (FKZ 03Fo779A). Die Messdaten, auf deren Basis die hier vorgestellten Abschätzungen aufbauen, wurden von Lisa Rönspieß, Franziska Bitschofsky und Monika Nausch zur Verfügung gestellt. Weiterhin waren Günther Nausch und Thomas Neumann an Diskussionen über diese Abschätzungen beteiligt. Einen großen Dank an alle fünf.

Acknowledgements

The work was performed within the project PhosWaM funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF, FKZ 033Wo42, <https://www.phoswam.de>). PhosWaM is one of 15 joint research projects in the funding measured ReWaM of the funding priority NaWaM in BMBF framework program FONA (details in the project description). The simulation was performed at the North-German Supercomputing Alliance (HLRN). The model output data were processed and evaluated on servers provided by the project 'PROSO - Prozesse von Spurenstoffen in der Ostsee' (FKZ 03Fo779A). The measurement data on which the estimates presented here are based were provided by Lisa Rönspieß, Franziska Bitschofsky, and Monika Nausch. Günther Nausch and Thomas Neumann were involved in discussions on these estimates. Many thanks to all five of them.

1	Inhalt	
2	Einführung	3
3	Abschätzungen des Phosphorumsatzes in der Unterwarnow	4
3.1	Erste Abschätzung für Phosphorumsatz in der Unterwarnow	4
3.2	Zweite Abschätzung für Phosphorumsatz in der Unterwarnow.....	8
3.3	Anmerkung zu beiden Berechnungsansätzen:.....	11
4	Ausblick.....	11
5	Referenzen	12

2 Einführung

Im PhosWaM Projekt wurden Simulationen zur Nachverfolgung der Phosphoreinträge aus der Warnow in der Mecklenburger Bucht durchgeführt. Hierfür wurde das gekoppelte physikalische biogeochemische Ozeanmodell MOM-ERGOM (Modular Ocean Model -- Ecological ReGional Ocean Model) genutzt (Griffies, 2004; Neumann, 2000; Neumann, Fennel, & Kremp, 2002). Die Flusseinträge der Warnow wurden mit SWAT (Soil & Water Assessment Tool) berechnet (Bauwe, Eckhardt, & Lennartz, 2019). Die beiden Modell und die durchgeführten Simulationen sind in den Kapiteln 3.9 und 3.10 des PhosWaM Abschlussberichtes beschrieben (LUNG M-V, 2019). Abbildung 2.1 gibt einen Überblick über alle in PhosWaM bearbeitete Themen, die im PhosWaM Abschlussbericht in ihrer Gänze vorgestellt werden.

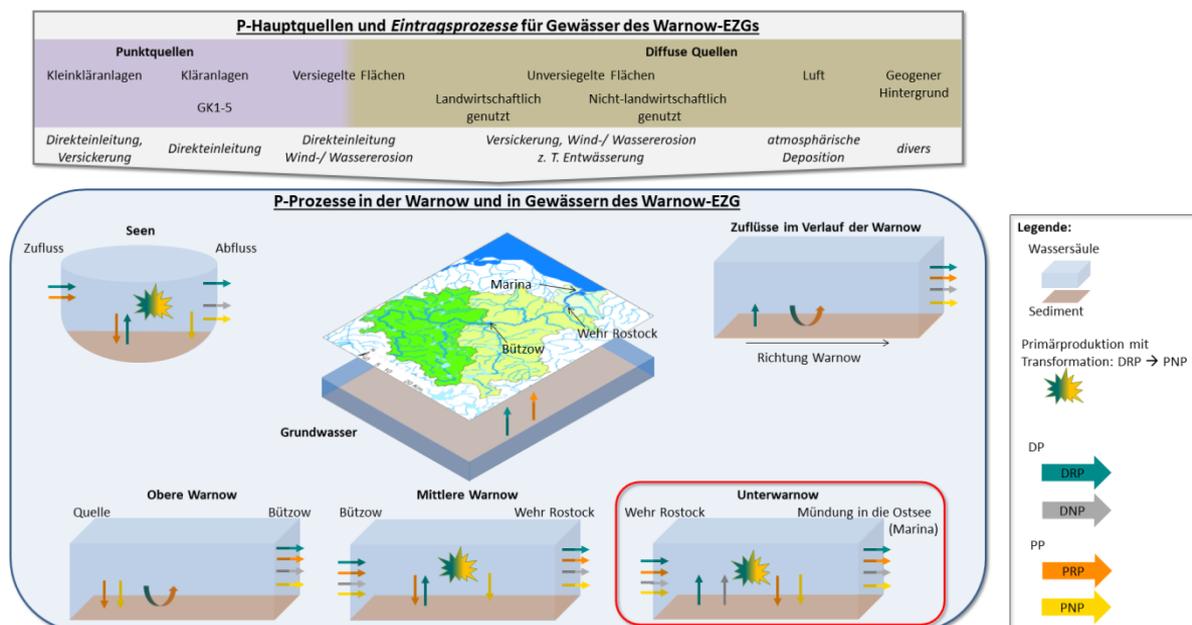


Abbildung 2.1. Betrachtetes Kompartiment des Untersuchungsgebiets

Das Modell MOM-ERGOM setzt erst am Übergang von der Unterwarnow in die Ostsee an („Marina“ in Abbildung 2.1), während die Fließgewässermodellierung mit SWAT in PhosWaM Arbeitspaket 1.1a nur die Warnow bis zum Wehr (Übergang Warnow in Unterwarnow) erfasste (siehe Abbildung 2.1). Beide Modellsysteme sind in Ihrer aktuellen Konfiguration nicht sinnvoll für eine Simulation des Phosphorumsatzes in der Unterwarnow nutzbar. Daher musste der Umsatz der unterschiedlichen Phosphorfraktionen und deren Deposition und Resuspension ins/vom Sediment in der Unterwarnow anderweitig abgeschätzt werden (siehe Abbildung 2.2). Darüber hinaus mussten diffuse Nährstoffeinträge und kleinere Zuflüsse aus dem Stadtgebiet in die Unterwarnow mit einbezogen werden. Es wurden zwei unterschiedliche Ansätze

verfolgt, den Phosphorumsatz in der Unterwarnow abzuschätzen. Die erste unten vorgestellte Abschätzung wurde als Standardabschätzung für die MOM-ERGOM Simulationen des PhosWaM Projektes genutzt. Siehe hierzu die Kapitel 3.10.3 und 3.10.4 des PhosWaM Abschlussberichts (LUNG M-V, 2019).

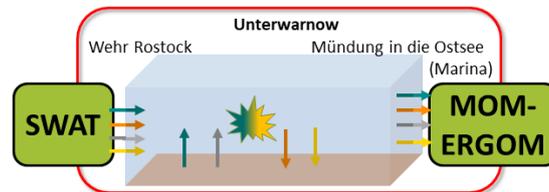


Abbildung 2.2. Schematische Darstellung der verwendeten Modelle und ihrer Anwendungsgebiete

Es wurden Abflüsse und TP-Frachten (total phosphorus; Gesamtphosphor) der Warnow, die mit SWAT in PhosWaM Arbeitspaket 1.1a berechnet wurden, genutzt. Modellierte Stickstofffrachten wurden nicht betrachtet. Eine genauere Beschreibung der SWAT-Daten befindet sich in **Kapitel 3.9** des PhosWaM Abschlussberichts (LUNG M-V, 2019).

3 Abschätzungen des Phosphorumsatzes in der Unterwarnow

3.1 Erste Abschätzung für Phosphorumsatz in der Unterwarnow

Aus Abschätzungen vom Institut Biota (Biota, 2012) für die Abflüsse von Warnow, weiterer Flüsse und diffuser Quellen in die Unterwarnow ergibt sich ein Anteil des Abflusses der Warnow am Abfluss der Unterwarnow von etwa 91 %. Wir nehmen an, dass Nährstoffkonzentrationen in den anderen 9 % der Abflüsse denen der Warnow gleichen. Dies ist eine vage Annahme sollte aber von der Größenordnung her stimmen. Für einige Zuflüsse wären detailliertere Daten vorhanden gewesen. In Hinblick auf Verallgemeinerbarkeit auf weitere Jahre und andere Flussästuare haben wir aber darauf verzichtet diese Daten zu nutzen. Darüber hinaus wurden die Beprobungen der anderen Zuflüsse oft nicht an den gleichen Tagen durchgeführt, wie Beprobungen der Unterwarnow stattfanden. Daher nehmen wir an, dass die P-Frachten sich um 9 % erhöhen.

Die Menge an Gesamtphosphor in der Wassersäule nimmt während des Transports durch die Unterwarnow ab. Diese Abnahme wurde anhand der Messungen der TP-Konzentrationen in der Unterwarnow von PhosWaM Arbeitspaket 2.3 abgeschätzt. Die Abnahme von Phosphor in der Wassersäule hängt mit dessen biogeochemischen Umsatz zusammen: mehr biologische Aktivität => mehr Umwandlung von gelöstem in partikulärem Phosphor => mehr Sedimentation => größere Abnahme in der

Wassersäule. Daher wurden vier saisonale P-Abnahme-Faktoren aus den Messungen berechnet, die angeben wie viel Phosphor während des Transports durch die Unterwarnow in der Wassersäule erhalten bleibt. Saisonale Abnahme-Faktoren erschienen sinnvoll, weil die vier Jahreszeiten grob den unterschiedlichen Wachstumsphasen/Blüteperioden von Algen entsprechen. Die Faktoren sind in Spalte 2 von Tabelle 3.1 angegeben. Die Ostseesimulationen mussten gestartet werden bevor die endgültige Auswertung der Messungen in Arbeitspaket 2.3 abgeschlossen war. Die hier dargestellten Faktoren sind daher als Zwischenergebnisse zu betrachten (auch, wenn sie für die finalen Simulationen genutzt wurde). Für zukünftige Modellstudien sollten die finalen Ergebnisse von Arbeitspaket 2.3 aus Kapitel 3.3 mit TP-Verlust in Unterwarnow genutzt werden (LUNG M-V, 2019).

In die Berechnung der Faktoren wurden zu den TP-Konzentrationen korrespondierende Messungen der Salinität mit einbezogen. Anhand der Salinität wurden die Vermischung von Warnowwasser mit Ostseewasser berechnet und die Phosphorfrachten zu „unvermischten“ Frachten korrigiert.

*Tabelle 3.1. Saisonale Faktoren zur Umrechnung des mit SWAT modellierten TP-Eintrags (Warnow -> Unterwarnow) in den TP-Eintrag für MOM-ERGOM (Unterwarnow -> Ostsee) in Spalte 2. Die Menge an TP in der Wassersäule nimmt ab, da einige Phosphorverbindungen biogeochemisch umgesetzt werden und anschließend zum Teil sedimentieren. Die Spalten 3 bis 6 zeigen Faktoren zur Aufteilung des TP in die vier Phosphorfraktionen DRP, DNP, PRP und PNP. Die Faktoren beziehen sich auf Konzentrationen weshalb ein „c“ vor jeder Fraktion steht. Die Querbalken über den Brüchen und der Index „Saison“ sollen ausdrücken, dass es sich um saisonale Mittelwerte handelt. Die sind vorläufige für die Modellierung genutzte Faktoren. Die Ergebnisse der finalen Auswertung sind in **Tabelle 3.7** in **Kapitel 3.3** des PhosWaM Abschlussberichts zu finden (LUNG M-V, 2019).*

Jahreszeit (Saison)	$\left(\frac{cTP_{out}}{cTP_{in}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{cDRP_{out}}{cTP_{out}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{cDNP_{out}}{cTP_{out}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{cPRP_{out}}{cTP_{out}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{cPNP_{out}}{cTP_{out}}\right)_{Saison}$
Frühling	75 %	11 %	27 %	11 %	51 %
Sommer	94 %	25 %	21 %	2 %	52 %
Herbst	96 %	57 %	18 %	6 %	19 %
Winter	87 %	65 %	15 %	11 %	8 %

Die gemessene Phosphorfraktionierung an den letzten beiden Stationen am Übergang von Unterwarnow in die Ostsee (Warnemünde Mole und rote Tonne) wurde hergenommen um TP in DRP, DNP, PRP und PNP aufzuteilen. Diese Aufteilung ist abhängig von der Algenblüteperiode. Daher wurde auch hier eine jahreszeitliche Aufteilung gewählt. Die Faktoren sind in den Spalten 3 bis 6 in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Prinzipiell könnte man die Faktoren in Tabelle 3.1 noch feiner auflösen – z.B. monatlich – oder je nach Blüteperiode die Faktoren berechnen. Ersteres lässt die Menge an aktuell erhobenen Datenpunkten (monatliche Messungen über einen Zeitraum von knapp über zwei Jahren) leider nicht zu. Letzteres würde die Verallgemeinerung der Faktoren auf einen Modellierungszeitraum von 20 Jahren und mehr deutlich erschweren.

ERGOM nutzt aktuell zwei Phosphorfraktionen, die über Flüsse eingetragen werden: Phosphat und „Phosphor in Detritus“. Phosphat in ERGOM ist gelöst und leicht bioverfügbar wohingegen Phosphor in Detritus partikulär und schwer bioverfügbar ist. Die berechneten DRP-, DNP-, PRP- und PNP-Frachten mussten auf die beiden in ERGOM genutzten zwei Fraktionen abgebildet werden. Hierfür wurden vorläufige Ergebnisse der Bioverfügbarkeitsexperimente in PhosWaM Arbeitspaket 2.2 genutzt um Umrechnungsfaktoren zu berechnen (Tabelle 3.2; persönliche Kommunikation mit F. Bitschofsky). Die finalen Auswertungen der Bioverfügbarkeitsexperimente aus den Arbeitspaketen 2.2 und 2.3 konnten nicht mehr für die Simulationen berücksichtigt werden. In zukünftigen Modellstudien sollten sie allerdings Beachtung finden. Da sich Warnow und Unterwarnow in Hinblick auf die dort stattfindenden Prozesse unterscheiden, sollten insbesondere die in **Kapitel 3.3** des PhosWaM-Abschlussberichts dargestellten Ergebnisse genutzt werden (LUNG M-V, 2019). In der zweiten Abschätzung des Phosphorumsatzes (weiter unten) wurden die finalen Ergebnisse aus Arbeitspaket 2.3 genutzt.

Tabelle 3.2. Umrechnungsfaktoren für die Phosphorfraktionen DRP, DNP, PRP und PNP in die zwei in ERGOM genutzten Phosphorfraktionen gelöster bioverfügbarer Phosphor und partikulärer schwer bioverfügbarer Phosphor in Prozent. Die sind vorläufige für die Modellierung genutzte Faktoren, die auf Basis der Bioverfügbarkeitsexperimente mit Wasserproben aus der Warnow (Arbeitspaket 2.2) ermittelt wurden. Die Ergebnisse der finalen Auswertung sind in Tabelle 3.7 in Kapitel 3.3 des PhosWaM Abschlussberichts zu finden (LUNG M-V, 2019).

	Phosphat in ERGOM	Phosphor in Detritus in ERGOM
DRP	100 %	0 %
DNP	20 %	80 %
PRP	50 %	50 %
PNP	0 %	100 %

Der Umsatz von DNP und PRP ist abhängig von der Verfügbarkeit an DRP und von der Blüteperiode der Algen, sodass beide Einflüsse in die Umrechnungsfaktoren mit einbezogen werden müssten. In einer erweiterten Auswertung in Arbeitspaket 2.2

wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen DRP-Konzentration und der Bioverfügbarkeit von DNP/PRP hergeleitet, der genutzt werden könnte. In Anbetracht der bereits enthaltenen Unsicherheiten aus den vorherigen Schritten sahen wir es nicht als sinnvoll an weitere detaillierte funktionale Zusammenhänge einzubinden, die eine nicht vorhandene Sicherheit vorgeben. Daher wurde an dieser Stelle auf DRP-abhängige Umrechnungsfaktoren verzichtet.

Aus der vorangegangenen Beschreibung ergibt sich für die Berechnung der Frachten der vier Phosphorfractionen DRP, DNP, PRP, und PNP von der Unterwarnow in Ostsee folgendes:

$$f_{DRP_{ERGOM,Monat}} = c_{TP_{SWAT,Monat}} \cdot \frac{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot \frac{\left(\frac{DRP_{out}}{TP_{out}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot 1,09 \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$f_{DNP_{ERGOM,Monat}} = c_{TP_{SWAT,Monat}} \cdot \frac{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot \frac{\left(\frac{DNP_{out}}{TP_{out}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot 1,09 \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$f_{PRP_{ERGOM,Monat}} = c_{TP_{SWAT,Monat}} \cdot \frac{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot \frac{\left(\frac{PRP_{out}}{TP_{out}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot 1,09 \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$f_{PNP_{ERGOM,Monat}} = c_{TP_{SWAT,Monat}} \cdot \frac{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot \frac{\left(\frac{PNP_{out}}{TP_{out}}\right)_{Saison}}{\left(\frac{TP_{out}}{TP_{inn}}\right)_{Saison}} \cdot 1,09 \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

Das Präfix „f“ steht für „Fracht“ und das Präfix „c“ für „Konzentration“. Aus SWAT wurden monatliche Werte ausgegeben. Daher wird der Index „Monat“ genutzt. $Q_{SWAT,Monat}$ steht für den Abfluss an Wasser berechnet mit SWAT am Wehr. Die eingeklammerten Ausdrücke mit dem Index „Saison“ entsprechen Werte in **Tabelle 3.1**. Es müssen die Faktoren der Jahreszeit (= Saison) gewählt werden, in der der aktuelle „Monat“ liegt.

Für die beiden Phosphorfractionen in ERGOM ergibt sich dann wie folgt:

$$f[\text{Phosphat}]_{ERGOM,Monat} = 1,0 \cdot f_{DRP_{Monat}} + 0,2 \cdot f_{DNP_{Monat}} + 0,5 \cdot f_{PRP_{Monat}} + 0,0 \cdot f_{PNP_{Monat}}$$

$$f[\text{P in Detritus}]_{ERGOM,Monat} = 0,0 \cdot f_{DRP_{Monat}} + 0,8 \cdot f_{DNP_{Monat}} + 0,5 \cdot f_{PRP_{Monat}} + 1,0 \cdot f_{PNP_{Monat}}$$

Man könnte die Gleichungen und Faktoren an diesem Punkt zusammenfassen und die Berechnung von beiden ERGOM-Phosphorfractionen vereinfachen. Das überlassen wir dem Nutzer. Bei der gewählten Darstellung ist für den Nutzer einfacher, einzelne Schritte unserer Berechnung bei Bedarf für seine Zwecke zu optimieren.

3.2 Zweite Abschätzung für Phosphorumsatz in der Unterwarnow

Es ist sinnvoll zum Verständnis dieses Abschnittes den bisherigen Inhalt vom vorherigen Kapitel 3.1 zu lesen.

Für die zweite Abschätzung wurden in AP2.3 berechnete Frachten am Wehr in Rostock und an der Mole in Warnemünde genutzt (siehe Tabelle 3.7, LUNG M-V, 2019) um saisonale Faktoren zum Skalieren der SWAT DRP-Frachten zu berechnen. Die Aufteilung auf die anderen Phosphorfraktionen geschah anhand gemessener Phosphorkonzentrationen an der Mole in Warnemünde. Anschließend wurden auf Basis der Bioverfügbarkeitsexperimente aus AP2.3 (siehe Abbildung 3.27, LUNG M-V, 2019) saisonale Faktoren zur Aufteilung der vier gemessenen Phosphorfraktionen auf die zwei in ERGOM enthaltenen Phosphorfraktionen berechnet.

SWAT berechnet die Phosphorfrachten genau bis zum Wehr in Rostock (südlich vom Wehr). Die Messungen von AP2.3 wurden hinter dem Wehr durchgeführt (nördlich vom Wehr). Somit gelten die aus den Messungen berechneten Frachten für den Bereich hinter dem Wehr. Die räumliche Distanz zwischen dem Ort der Phosphorfrachten aus SWAT und dem Ort der Phosphorfrachten berechnet aus Messungen ist gering. Trotzdem finden in diesem Bereich biogeochemische und physikalische Prozesse statt, die möglicherweise einen deutlichen Verlust oder Zugewinn an Phosphorverbindungen bewirken, da die Strömungsgeschwindigkeit zum Teil sehr gering ist. Man sieht diesen Unterschied deutlich, wenn man praktisch die Frachten aus AP1.1a und 2.3 vergleicht: Die Frachten aus AP2.3 (berechnet aus Messungen) sind geringer als die Frachten aus AP1.1a (SWAT).

Um mögliche Verluste an Phosphor in der Umgebung des Wehrs mit einzubeziehen wurden wie folgt saisonale Faktoren zum Umrechnung von SWAT Phosphorfrachten am Wehr zu ERGOM Phosphorfrachten an der Mole Warnemünde berechnet:

$$\begin{aligned} \overline{\left(\frac{fDRP_{Mole}}{fDRP_{SWAT}}\right)_{Saison}} &= \frac{1}{[\text{Anzahl Monate in Saison}]} \sum_{\text{Monat} \in \text{Saison}} \left(\frac{fDRP_{Mole, \text{Monat}}}{fDRP_{Wehr, \text{Monat}}} \cdot \frac{fDRP_{Wehr, \text{Monat}}}{fDRP_{SWAT, \text{Monat}}} \right) \\ &= \frac{1}{[\text{Anzahl Monate in Saison}]} \sum_{\text{Monat} \in \text{Saison}} \left(\frac{fDRP_{Mole, \text{Monat}}}{fDRP_{SWAT, \text{Monat}}} \right) \end{aligned}$$

Dabei entspricht der Ausdruck links dem saisonalen Faktor zum Umrechnung der SWAT DRP-Fracht am Wehr in DRP-Frachten an der Mole Warnemünde. Der Querstrich drückt aus, dass es sich um einen Mittelwert handelt. Es wurde DRP und nicht TP als Basis für

die Berechnung gewählt, weil die SWAT TP-Fracht schon aus der SWAT DRP-Fracht und Messungen abgeschätzt wurde (siehe **Kapitel 3.9** für Details). Der Ausdruck auf der rechten Seite des Gleichzeichens sagt aus, dass wir jede DRP-Fracht an der Mole durch die jeweilige SWAT DRP-Fracht teilen und dann den Mittelwert über alle diese Quotienten je Jahreszeit bilden. Die Messungen wurden etwa über drei Jahre durchgeführt. Je Jahreszeit hat man daher auf der rechten Seite etwa zwölf Quotienten (vier Monate je Jahreszeit; drei Jahre). Der Platzhalter „[Anzahl Monat in Saison]“ entspricht immer der Anzahl an Quotienten. Die Ergebnisse sind in Spalte 2 von Tabelle 3.3 angegeben.

Anschließend wurden aus den Messungen an der Mole Warnemünde saisonale Faktoren berechnet um von DRP auf die anderen Phosphorfraktionen zu kommen. Die berechneten Faktoren sind in den Spalten 3 bis 5 von Tabelle 3.3 angegeben.

Tabelle 3.3. Saisonale Faktoren zur Umrechnung der mit SWAT modellierten DRP-Fracht (Warnow -> Unterwarnow) in die DRP-Fracht für MOM-ERGOM (Unterwarnow -> Ostsee) in Spalte 2. Die Menge an DRP in der Wassersäule verändert sich, da einige Phosphorverbindungen biogeochemisch umgesetzt werden und anschließend zum Teil sedimentieren – oder Phosphorverbindungen aus dem Sediment resuspendiert werden. Die Spalten 3 bis 5 zeigen Faktoren zur Berechnung der Frachten der drei übrigen Phosphorfraktionen DNP, PRP und PNP aus der DRP-Fracht. Die Faktoren beziehen sich auf Frachten weshalb ein „f“ vor jeder Fraktion steht. Die Querbalken über den Brüchen und der Index „Saison“ sollen ausdrücken, dass es sich um saisonale Mittelwerte handelt.

Jahreszeit (Saison)	$\left(\frac{fDRP_{Mole}}{fDRP_{SWAT}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fDNP_{Mole}}{fDRP_{Mole}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fPRP_{Mole}}{fDRP_{Mole}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fPNP_{Mole}}{fDRP_{Mole}}\right)_{Saison}$
Frühling	14 %	147 %	39 %	180 %
Sommer	20 %	94 %	25 %	586 %
Herbst	63 %	35 %	12 %	25 %
Winter	59 %	14 %	6 %	13 %

Die Frachten der vier Phosphorfraktionen berechnen sich dann wie folgt:

$$fDRP_{Mole,Monat} = fDRP_{SWAT,Monat} \cdot \overline{\left(\frac{DRP_{Mole}}{TP_{SWAT}}\right)_{Saison}} \cdot 1 \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$fDNP_{Mole,Monat} = fDRP_{SWAT,Monat} \cdot \overline{\left(\frac{DRP_{Mole}}{DRP_{SWAT}}\right)_{Saison}} \cdot \overline{\left(\frac{DNP_{Mole}}{DRP_{Mole}}\right)_{Saison}} \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$fPRP_{Mole,Monat} = fDRP_{SWAT,Monat} \cdot \overline{\left(\frac{DRP_{Mole}}{DRP_{SWAT}}\right)_{Saison}} \cdot \overline{\left(\frac{PRP_{Mole}}{DRP_{Mole}}\right)_{Saison}} \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

$$fPNP_{Mole,Monat} = fDRP_{SWAT,Monat} \cdot \overline{\left(\frac{DRP_{Mole}}{DRP_{SWAT}}\right)_{Saison}} \cdot \overline{\left(\frac{PNP_{Mole}}{DRP_{Mole}}\right)_{Saison}} \cdot Q_{SWAT,Monat}$$

Wie in der Beschreibung des ersten Umrechnungsansatzes beschrieben (Kapitel 3.1), sind in den ERGOM-Flusseinträgen nur Phosphat und „Phosphor im Detritus“ enthalten. Die vier hier berechneten Phosphorfractionen mussten daher auf die beiden in ERGOM enthaltenen Fractionen abgebildet werden. Die finalen Ergebnisse der Bioverfügbarkeitsexperimente in PhosWaM AP2.3 wurden genutzt (siehe Tabelle 4.28) um saisonale Umrechnungsfaktoren hierfür zu berechnen. Tabelle 3.4 enthält die Faktoren um ERGOM-Phosphat zu berechnen. Die Faktoren für Phosphor in Detritus berechnen sich über „100 % - [Faktor Tabelle 3.4]“ bzw. „1.0 - [Faktor Tabelle 3.4]“.

Tabelle 3.4. Bioverfügbarkeitsfaktoren für die Berechnung von Phosphat in ERGOM aus den vier Phosphorfractionen DRP, DNP, PRP und PNP. Die Faktoren werden hier in % angegeben um besser lesbar zu sein. In der Formel müssen sie als Dezimalzahlen (Faktor/100%) genutzt werden. Die Faktoren beziehen sich auf Frachten weshalb ein „f“ vor jeder Fraction steht. Die Querbalken über den Brüchen und der Index „Saison“ sollen ausdrücken, dass es sich um saisonale Mittelwerte handelt.

Jahreszeit (Saison)	$\left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fDRP_{Mole}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fDNP_{Mole}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fPRP_{Mole}}\right)_{Saison}$	$\left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fPNP_{Mole}}\right)_{Saison}$
Frühling	92 %	23 %	97 %	0 %
Sommer	62 %	13 %	100 %	0 %
Herbst	95 %	50 %	100 %	0 %
Winter	100 %	38 %	100 %	0 %

Die Fracht an Phosphat für ERGOM berechnet sich dann wie folgt:

$$\begin{aligned}
 f[\text{Phosphat}]_{\text{ERGOM,Monat}} &= \left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fDRP_{Mole}}\right)_{\text{Saison}} \cdot fDRP_{\text{Mole,Monat}} \\
 &+ \left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fDNP_{Mole}}\right)_{\text{Saison}} \cdot fDNP_{\text{Mole,Monat}} \\
 &+ \left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fPRP_{Mole}}\right)_{\text{Saison}} \cdot fPRP_{\text{Mole,Monat}} \\
 &+ \left(\frac{fPO_4^{3-} \text{ ERGOM}}{fPNP_{Mole}}\right)_{\text{Saison}} \cdot fPNP_{\text{Mole,Monat}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & f[\text{P in Detritus}]_{\text{ERGOM, Monat}} \\
 &= \left(1,0 - \frac{fPO_4^{3-}{}_{\text{ERGOM}}}{fDRP_{\text{Mole}}}_{\text{Saison}} \right) \cdot fDRP_{\text{Monat}} \\
 &+ \left(1,0 - \frac{fPO_4^{3-}{}_{\text{ERGOM}}}{fDNP_{\text{Mole}}}_{\text{Saison}} \right) \cdot fDNP_{\text{Monat}} \\
 &+ \left(1,0 - \frac{fPO_4^{3-}{}_{\text{ERGOM}}}{fPRP_{\text{Mole}}}_{\text{Saison}} \right) \cdot fPRP_{\text{Monat}} \\
 &+ \left(1,0 - \frac{fPO_4^{3-}{}_{\text{ERGOM}}}{fPNP_{\text{Mole}}}_{\text{Saison}} \right) \cdot fPNP_{\text{Monat}}
 \end{aligned}$$

3.3 Anmerkung zu beiden Berechnungsansätzen:

Es ist wichtig zu beachten, dass im zweiten Berechnungsansatz die Monatsmittelwerte aus SWAT mit zeitlichen Punktmessungen verrechnet werden. Es ist nicht unbedingt gewährleistet, dass die Messungen repräsentativ für den jeweiligen Monat sind. Im ersten Ansatz wurden zuerst nur die Messungen miteinander verrechnet und dann saisonale Mittelwerte gebildet. Erst im Anschluss wurden die saisonalen Umrechnungsfaktoren auf die Monatsmittelwerte von SWAT angewandt. Das bringt dann wiederum andere Nachteile mit sich.

4 Ausblick

In diesem Dokument wurden zwei Ansätze beschrieben über die sich die Frachten an Phosphorverbindungen an der Mole in Warnemünde aus den Frachten an Phosphorverbindungen am Wehr nahe der Rostocker Innenstadt abschätzen lassen. Beide Ansätze basieren auf Daten einer dreijährigen Messkampagne mit monatlichen Messungen in der Unterwarnow. Aus den Messdaten wurden Klimatologien gebildet und saisonale Umrechnungsfaktoren abgeschätzt. Es ist nicht klar, ob die dreijährige Messkampagne, die bereits relativ aufwendig war, ausreicht um die vollständige Dynamik der Phosphorumsetzung in der Unterwarnow zu erfassen. Vermutlich ist dies nicht der Fall. Daher sind in Zukunft weitere ähnliche und vergleichbare Messkampagnen von Nöten. Nichtsdestotrotz sind erhobenen Messdaten und die daraus resultierende Abschätzung der Phosphorfrachten in die Ostsee ein deutlicher Schritt nach vorne, da in der Vergangenheit oft die am Wehr bestimmten Phosphorfrachten genutzt wurden.

5 Referenzen

- Bauwe, A., Eckhardt, K.-U., & Lennartz, B. (2019). Predicting dissolved reactive phosphorus in tile-drained catchments using a modified SWAT model. *Ecohydrol. Hydrobiol.* <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2019.03.003>
- Biota. (2012). *Überarbeitung und Aktualisierung der Karte der mittleren Abflüsse und mittleren Niedrigwasserabflüsse für Mecklenburg-Vorpommern.*
- Griffies, S. M. (2004). *Fundamentals of Ocean Climate Models.* Retrieved from <https://press.princeton.edu/titles/7797.html>
- LUNG M-V. (2019). *Abschlussbericht des BMBF-Forschungsverbundprojektes PhosWaM.* Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG M-V), Güstrow, Hintergrunddokument.
- Neumann, T. (2000). Towards a 3D-ecosystem model of the Baltic Sea. *J. Mar. Syst.*, 25(3), 405–419. [https://doi.org/10.1016/S0924-7963\(00\)00030-0](https://doi.org/10.1016/S0924-7963(00)00030-0)
- Neumann, T., Fennel, W., & Kremp, C. (2002). Experimental simulations with an ecosystem model of the Baltic Sea: A nutrient load reduction experiment. *Global Biogeochem. Cycles*, 16(3), 7–19. <https://doi.org/10.1029/2001GB001450>