

# Abschlussbericht

## Quality, Quantity and Transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea

Bearbeiter  
Sandra Jahn

---

Betreuer: Monika Nausch + Thesis-Komitee: H. Schulz-Vogt (IOW), B. Lennartz (UoR)

Einrichtungen: Leibniz-Institut für Ostseeforschung, Rostock-Warnemünde

Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät,  
Lehrstuhl für Bodenphysik und Ressourcenschutz

Laufzeit Förderung: 15.05.2015 bis 30.06.2019

\*Datum der Abgabe: Abbruch der Doktorarbeit im Januar 2018

\*Datum der Verteidigung: -

\*Datum der Anerkennung: -

---

# Inhaltsverzeichnis

| Kapitel                                | Seite |
|--|-------|
| 1 Zusammenfassung und Schlussfolgerung |       |
| 2 Einleitung und Ziele der Promotion   |       |
| 3 Material und Methoden                |       |
| 4 Ergebnisse                           |       |
| 5 Diskussion                           |       |
| 6 Literaturverzeichnis                 |       |
| 7 Anhang*                              |       |

\* Liste der: Forschungsaufenthalte außerhalb der betreuenden Einrichtungen, Vorträge bzw. Poster auf Konferenzen, Öffentlichkeitsarbeit und/oder Publikationen

## 1 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Phosphor (P) wird entlang der Fließgewässer von der Quelle bis zum Meer transportiert. Da P ständig zwischen den verschiedenen Fraktionen transformiert wird, ist das Verständnis der P-Dynamik entlang der Fließgewässer von entscheidender Bedeutung, um die Belastung zu reduzieren. In diesem Projekt wurden die Konzentrationen, Fraktionen und die Form, in der P an suspendiertem Material gebunden ist, im Einzugsgebiet der Zarnow, einem Teileinzugsgebiet der Warnow, untersucht. Dazu wurden 8 Stationen vom Dränauslass, dem angrenzenden Graben und weiter entlang des Baches bis zum übergeordneten Fluss, der Warnow, beprobt. In einer separaten Studie wurde der Dränauslass mit anderen Dränauslässen verglichen, um zu sehen wie repräsentativ dieser Dränauslass ist. Ferner wurde die Bioverfügbarkeit der Fraktionen bestimmt. Die Untersuchungen wurden vom 1. November 2015 bis zum 2. Mai 2017 durchgeführt. Ergänzende Arbeiten erfolgten bis zum Frühjahr 2018. Wir fanden eine räumliche und zeitliche Variation der Gesamt P (TP)-Konzentrationen und seiner Zusammensetzung. Extrem hohe TP- Konzentrationen wurden an der Station Prisannewitz im Sommer beobachtet, was wahrscheinlich auf Eintrag von Siedlungen oder Stallanlagen zurückzuführen ist. Die Beseitigung dieser Quellen kann die P-Last der Warnow deutlich reduzieren. Im untersuchten Warnow-Bereich findet durch Phytoplanktonproduktion eine Transformation von gelöstem reaktivem P (DRP) in partikuläres nichtreaktives P (PNP) statt. Außer DRP sind auch partikulärer reaktives P (PRP) und gelöstes nichtreaktives P (DNP) teilweise bioverfügbar. In der Summe aller drei Fraktionen sind 45-47% der TP bioverfügbar. Bei der Annahme, dass nur DRP bioverfügbar ist, wird das Eutrophierungspotential von TP um die Hälfte unterschätzt.

## 2 Einleitung und Ziele der Promotion

Phosphor (P) ist ein Element, das das Wachstum von Pflanzen reguliert. Sein Einsatz in der Landwirtschaft ist für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und von Erträgen unverzichtbar (Smil, 2000). Jedoch führte übermäßige Düngung in den vergangenen Jahren dazu, dass ein großer Teil des eingesetzten P in die Gewässer gelangte (Gentry et al., 2007) und dort das Wachstum von Phytoplankton und Makrophyten stimulierte. Die Folge war die Eutrophierung der Gewässer, einhergehend mit einer Veränderung der Artenvielfalt und Ökosystemfunktionen als auch der Nutzbarkeit der Gewässer durch den Menschen (Smith et al., 1999). Die Reduktion des Düngereinsatzes in der Landwirtschaft (UBA, 2017) brachte bisher nicht die gewünschten Erfolge. Die Binnen- und Küstengewässer sind noch immer eutrophiert (Nausch, 2011) und haben einen unzureichenden ökologischen Zustand. Das trifft auch für die Ostsee und die Gewässer in ihrem Einzugsgebiet zu. Die Zunahme der Häufigkeit und Ausdehnung toxischer Algenblüten sowie Zunahme sauerstoffarmer Bereiche in den tiefen Becken der Ostsee werden auf die erhöhten Nährstoffeinträge, insbesondere die P-Einträge, zurückgeführt (Degerholm et al., 2006; Gustaffson et al., 2012) wobei 75% der P-Einträge über die Flüsse in die Ostsee gelangen (Nausch, 2011).

Auf Initiative der 1979 verabschiedeten Helsinki-Konvention eingeleitete Maßnahmen, wie die Eliminierung der P-Einträge aus Punktquellen wie Abwasseraufbereitungsanlagen führte dazu, dass gegenwärtig die von der HELCOM und der Europäischen Meeresstrategierahmenrichtlinie gesetzten Orientierungswerte für die Konzentration von gelöstem anorganischem Stickstoff im winterlichen Oberflächenwasser weitestgehend eingehalten werden. Für Phosphat werden sie jedoch nach wie vor um das Doppelte überschritten (HELCOM, 2014). Ferner spiegeln sich die bisherigen Reduktionsmaßnahmen nicht in einer adäquaten Verbesserung des ökologischen Zustandes wider. Bis

heute sind die Küstenregionen der Ostsee als eutroph zu bewerten (HELCOM, 2015). Zur Erreichung des guten ökologischen Zustands gibt die HELCOM weitere Reduktionsmaßnahmen für alle Anrainerstaaten vor. So muss Deutschland die P-Einträge in die Ostsee um weitere  $170 \text{ t a}^{-1}$  senken. Da P-Einträge aus Punktquellen bereits weitgehend eliminiert wurden (Nausch, 2011), sind die aktuellen Nährstoffbelastungen hauptsächlich auf diffuse Quellen zurückzuführen, wobei die Landwirtschaft einen Anteil von rund 60% hat. Reduktion landwirtschaftlicher Einträge stehen im Fokus gegenwärtiger Reduktionsmaßnahmen.

In Mecklenburg-Vorpommern (Nordostdeutschland) ist das Einzugsgebiet der Warnow das zweitgrößte Einzugsgebiet der Ostsee (Behrendt und Bachor, 1998). Die  $3300 \text{ km}^2$  sind dünn besiedelt (25 bis 50 Einwohner  $\text{km}^2$ ) und bestehen größtenteils aus ländlichen Gebieten mit wenig Industrie. 75% der Landnutzung entfallen auf die Landwirtschaft (60% als Ackerland und 15% als Grünland) (Koch et al., 2018). Etwa 53% der Ackerflächen und 88% des Grünlandes sind gedränt (Kahle et al., 2019), so dass Dränagen ein wesentlicher Austragspfad für P sein können. Nach Behrendt and Bachor (1998) und (Kunkel et al., 2016) liegt ihr Beitrag zur Nährstoffbelastung der Gewässer in der gleichen Größenordnung wie Grundwasser und Erosion.

Das Ziel der Studie war es, einen detaillierten Einblick über P-Austräge aus gedränten landwirtschaftlichen Nutzflächen in die Gewässer im Vergleich zum derzeitigen Kenntnisstand zu erhalten. Phosphor ist in Gewässern sehr dynamisch und wird ständig zwischen gelösten und partikulären, anorganischen und organischem Phosphor transformiert. Da Wasser aus den Dränagen nicht direkt in die Flüsse gelangt, sondern über Gräben und kleinere und größere Bäche transportiert wird, wurde verfolgt wie sich Konzentrationen von Gesamt P und seine Zusammensetzung entlang der Fließstrecke vom Dränausfluss bis zum übergeordneten Fluss (Warnow) ändern.

Darüber hinaus sollen Kenntnisse über die Bioverfügbarkeit von P erworben werden, um das Potenzial für die Eutrophierung abzuschätzen. Dadurch wird unser Verständnis der P-Einträge und ihrer Auswirkungen auf das Ostsee und ihr Einzugsgebietssystem verbessert, was neue Möglichkeiten für eine effiziente Phosphorreduzierung durch ein optimiertes Management diffuser Phosphorquellen eröffnet.

### 3 Material und Methoden

#### **Untersuchungsgebiet und Probenahme**

Die Untersuchungen wurden im Einzugsgebiet der Zarnow durchgeführt. Dieses 49.6 km<sup>2</sup> große Einzugsgebiet ist repräsentativ für das gesamte Einzugsgebiet der Warnow hinsichtlich der Besiedlungsdichte, Landnutzung (65% Ackerland, 22% Grünland, 8% Wald) und Geomorphologie.

Auf einem Feld nahe der Ortschaft Dummerstorf wurde ein Dränauslass beprobt, an dem seit 2001 Untersuchungen durch die Fakultät für Agrar- und Umweltwissenschaften der Universität Rostock durchgeführt werden (Abb. 1). Dieser Standort ist ausgestattet für die Messung von Niederschlägen und des Durchflusses sowie mit einem automatisierten Probensammler. Entsprechende Daten standen für die Auswertung zur Verfügung. Phosphorverbindungen haften gern an Gefäßwänden, was bei einem automatisierten Probensammler mit dem Proben, die über eine Woche oder länger gesammelt werden, möglich ist. Um zu prüfen, ob der Probensammler für unsere Untersuchungen genutzt werden kann, hat Sandra Jahn zu Beginn der Dissertation einen Versuch durchgeführt, in dem Wasser in Flaschen des Sammlers eine Woche lang gelagert wurden. Über diesen Zeitraum wurden täglich Messungen von Gesamtphosphor (TP) und den Fraktionen durchgeführt. Es wurde eine Verschiebung von gelöstem anorganischen P (DRP) zu partikelgebundenem anorganischen reaktiven P (PRP) beobachtet. Deshalb haben wir uns entschieden, sogenannte „Frischproben“ zu untersuchen. Die Untersuchungen wurden vom 1. November 2015 bis zum 2. Mai 2017 durchgeführt und umfassten zwei hydrologische Perioden (1. November - 30. April) und die Sommer- und Herbstmonate dazwischen. Die Probenahme erfolgte wöchentlich während der hydrologischen Periode und alle zwei Wochen in der Zwischenzeit.

Parallel zum Dränauslass wurden 8 weitere Stationen in Fließrichtung untersucht. Sie umfassten den Graben (ditch), vier Stationen in der Zarnow (Za-D, Za-P, Za-R, Za-M) und zwei in der Warnow (Wa-K, Wa-M) (Abb. 1). Die Proben wurden in einer Kühlbox gelagert und ins IOW transportiert, wo sie analysiert wurden.

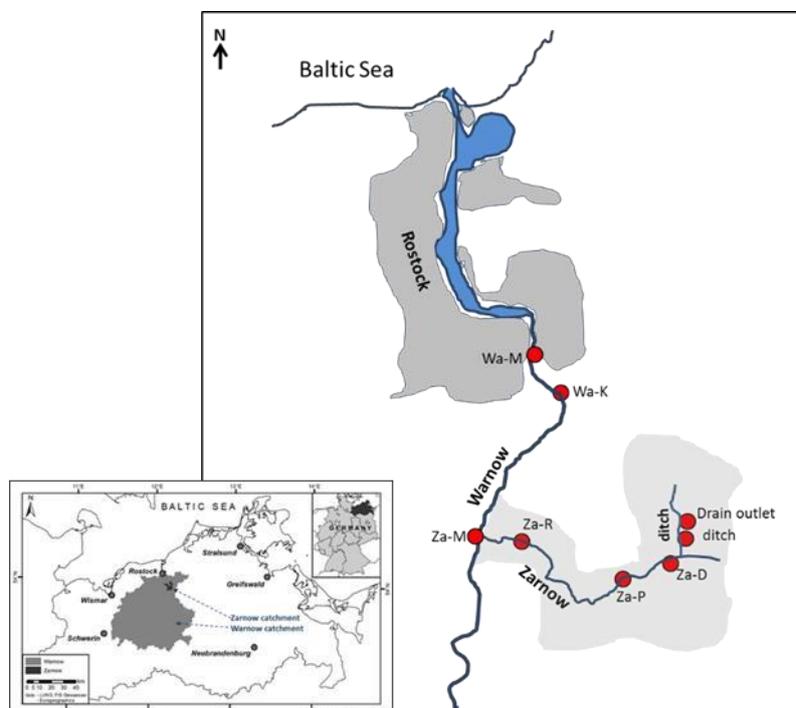


Abb.1: Das Untersuchungsgebiet mit den beprobten Stationen

## Analytische Messungen

Die Probenbearbeitung erfolgte unmittelbar nach der Rückkehr ins Labor. Folgende Parameter wurden bestimmt: Gesamt P (TP), gesamt gelöstes P (DP), gesamt reaktives P (TRP), gelöster reaktives P (DRP), sowie gelöstes und partikuläres nichtreaktives P (DNP, PNP). Ferner wurde die Konzentration von Chlorophyll a (Chla), suspendiertem partikulärem Material (SPM) und von ausgewählten Proben die elementare Partikelzusammensetzung im Rasterelektronenmikroskop gemessen.

Alle Messungen wurden nach Standardmethoden der Wasseranalytik (Grasshoff et al., 1983; Wasmund et al., 2006; Felgentreu et al., 2018), die am IOW etabliert sind, durchgeführt (Abb.2a).

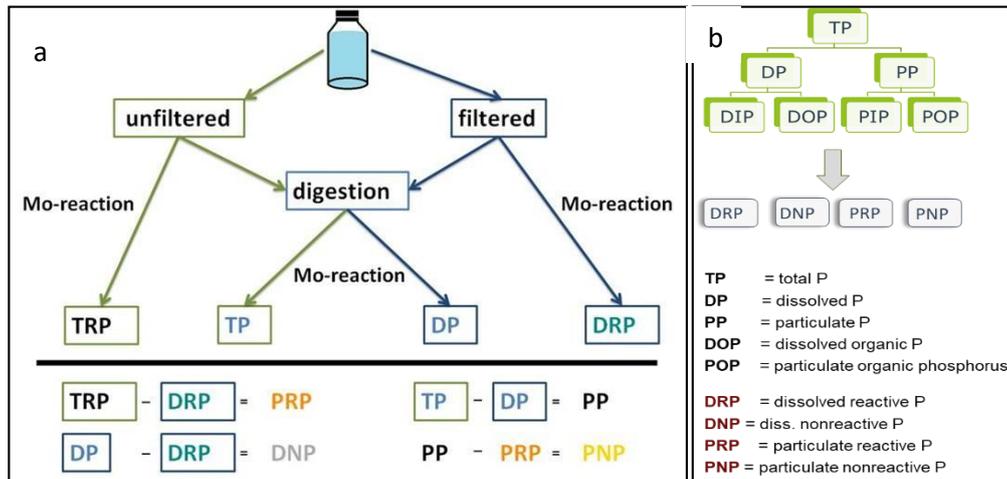


Abb. 2a: Probenaufbereitung für die Bestimmung von Gesamtphosphor und seiner Fraktionen (Felgentreu et al. 2018). Abb. 2 b: Klassische Bezeichnung der P-Fractionen und ihre Umbenennung nach der Reaktion in der Molybdänblaumethode

Im Wasser der Warnow und ihren Zuflüssen war eine saubere Trennung der klassischen Fraktionen POP, DOP, DIP und PIP nicht möglich, weil oft labiles organisches P mit der Molybdänblaumethode bei den anorganischen Fraktionen mit erfasst wurde. Deshalb wurden die Fraktionen nach ihrer Reaktion in dieser Methode bezeichnet und in DRP, DNP, PRP und PNP umbenannt (Abb.2 b).

## Bioverfügbarkeitsexperimente

Die Bioverfügbarkeit wurde in sieben Experimenten ermittelt, in denen Phosphor während des Wachstums von Phyto- und Bakterioplankton aufgenommen wurde. Dazu wurde Wasser (6-9 L) aus der Zarnow (Station Za-R = Reez) und aus der Warnow (Station Wa-K = Kessin) bei 15°C und einer Belichtung im 16/8 hell/dunkel Rhythmus inkubiert (Abb. 3). Es wurden jeweils 3 Parallelen untersucht. Die Inkubationszeit der einzelnen Experimente betrug 6-14 Tage. Während dieser Zeit wurden täglich Proben genommen, um die Veränderung der einzelnen P-Fractionen zu ermitteln.

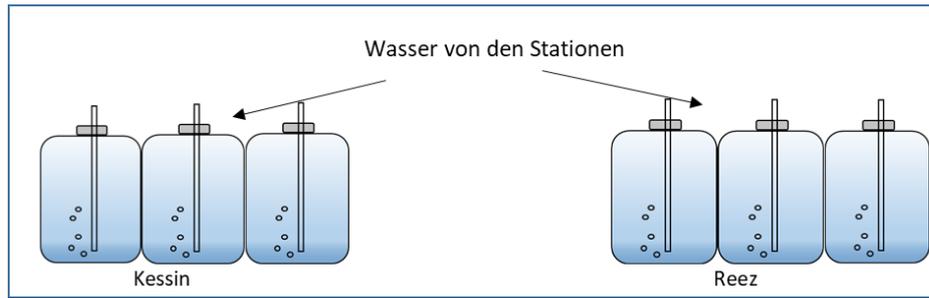


Abb.3: Beispiel für das Design der Bioverfügbarkeitsexperimente

## 4 Ergebnisse

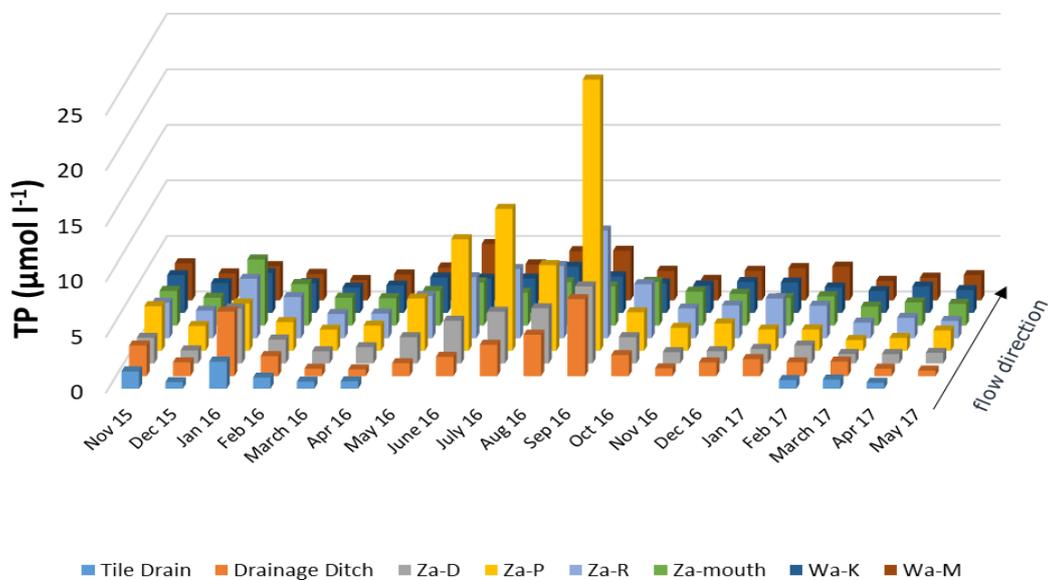


Abb. 4: Monatliche Gesamt P (TP) – Konzentrationen im Dränwasser und entlang der Fließrichtung bis zur Mündung der Warnow in die Unterwarnow und über die gesamte Untersuchungsperiode. Zarnow bei Dummerstorf (Za-D), bei Prisannewitz (Za-P), bei Reez (Za-R), an der Mündung in die Warnow (Za-mouth), Warnow bei Kessin (Wa-K) und an der Warnow-Mündung (Wa-M).

### **P-Emission im Dränwasser (tile drain)**

Abb. 4 zeigt, dass die TP Emission über Dränwasser in der Abflussperiode 2015/2016 von November bis April und in der Abflussperiode 2016/2017 von Februar bis April Jahr stattfand. In der übrigen Zeit floss aus dem Dränauslass kein Wasser, so dass auch kein P- ausgetragen wurde. Das späte Einsetzen des Dränabflusses in der Periode 2016/2017 ist darauf zurückzuführen, dass der vorausgegangene Sommer und Herbst sehr trocken waren (Tabelle 1) und die Niederschläge von November bis zum Februar im Boden gespeichert wurden. Das verursachte das späte Einsetzen des Dränabflusses. Die Wasserfracht des Dräns ist mit der Niederschlagsmenge in den vorhergehenden Sommer- und Herbstmonaten korreliert.

Die TP-Konzentrationen waren in beiden hydrologischen Perioden sehr ähnlich und unterschieden sich auch nicht signifikant von den Voruntersuchungen in der hydrologischen Periode 2013/2014. Die TP-Frachten waren jedoch sehr unterschiedlich und von der Wasserfracht der Abflussperiode abhängig.

Tabelle 1: Niederschlagssummen der hydrologischen Periode (Nov. - April) und im vorangegangenen Sommer und Herbst, TP-Konzentrationen und TP-Frachten für den Untersuchungszeitraum im Vergleich mit der Periode 2013/2014, einer Vorarbeit für dieses Projekt

|  | 2013/2014      | 2015/2016      | 2016/2017      |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Niederschlag Juni - November (mm)                | 243            | 269            | 197            |
| Niederschlag November - April (mm)               | 198            | 290            | 244            |
| Fracht Dränwasser (mm)                           | 72             | 127            | 11             |
| Beginn der Abflussperiode                        | 12.12.2013     | 30.11.2015     | 24.02.2017     |
| TP-Konzentrationen ( $\mu\text{mol l}^{-1}$ )    | $0.5 \pm 0.1$  | $0.8 \pm 0.3$  | $0.7 \pm 0.2$  |
| TP-Konzentration ( $\mu\text{g l}^{-1}$ )        | $15.5 \pm 4.1$ | $24.5 \pm 9.8$ | $21.4 \pm 7.4$ |
| TP Fracht ( $\text{g ha}^{-1}$ Periode $^{-1}$ ) | 11             | 26.5           | 2.4            |

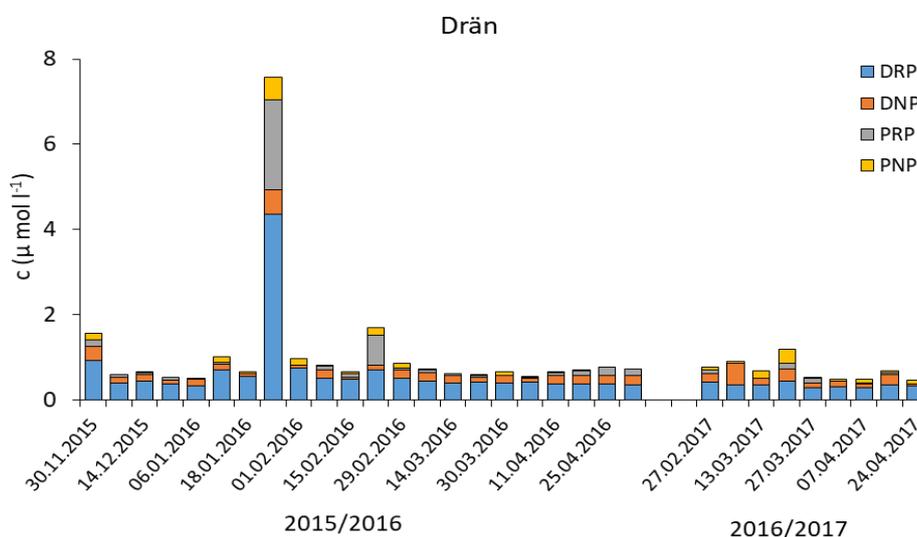


Abb.5: Die P-Fractionen im Dränwasser an den wöchentlichen Messungen während der beiden hydrologischen Perioden

Die Zusammensetzung von Phosphor im Dränwasser war relativ konstant. DRP macht  $60.3 \pm 11.3\%$  aus, DNP  $23.6 \pm 10.9\%$ , PRP  $12.5 \pm 10.3\%$  und PNP  $9.1 \pm 7.6\%$  aus (Abb.5).

Die hohen TP-Konzentrationen im Januar 2016 wurden während der Schneeschmelze gemessen. Am stärksten nahm die Konzentration von DRP zu, aber auch die der anderen Fraktionen, insbesondere von PRP wurde hier beobachtet.

### Veränderung entlang der Fließstrecke

Abb. 4 zeigt die Variabilität der TP-Konzentrationen über Raum und Zeit aller untersuchten Stationen. Bereits im Graben (ditch) wurden höhere TP-Konzentrationen gemessen als im Dränwasser. Diese nahmen entlang der Zarnow noch zu und erreichten maximale Werte an der Station Prisannewitz (Za-P). An den nachfolgenden Stationen nahmen sie wieder ab. Dieser Verlauf war im Sommer stärker ausgeprägt als im Winter.

Alle Stationen zeigten das gleiche saisonale Muster, eine Abnahme der TP-Konzentrationen von Januar bis Mai und maximale Konzentration von Juni bis September mit extrem hohen Konzentrationen an der Station Za-P. Die Abnahme von Januar bis Mai war in der hydrologischen Periode 2015/2016 stärker ausgeprägt als in der hydrologischen Periode 2016/2017. Im Gegensatz zur Zarnow, sind die

saisonalen Unterschiede in der Warnow und an der von der Warnow beeinflussten Station Za-mouth nur noch gering.

Die TP-Zunahmen vom Graben bis zur Station Za-P werden im Wesentlichen durch zunehmende DRP- und PRP-Konzentrationen verursacht. Das trifft für die hydrologischen Perioden zu, aber auch für die Sommermonate (Abb. 6). Im Sommer nimmt DRP von Prisannewitz (Za-P) bis Reez (Za-R) ab begleitet von einer Zunahme des PRP. Auch die bei Za-P beobachteten PNP-Konzentrationen kommen bis auf eine Ausnahme an der nächsten Station Za-R nicht mehr vor. An den beiden Warnow-Stationen (Wa-K, Wa-M) ist PNP, neben DRP, die dominante Fraktion über den gesamten Untersuchungszeitraum. Bei relativ gleichbleibenden TP-Konzentrationen kommt es zu saisonalen Verschiebungen dieser beiden Fraktionen. DRP ist von November bis etwa Mitte Februar vorhanden. Danach wurden bis Ende Mai kein DRP gemessen. In dieser Zeit verringerten sich auch die PRP-Konzentrationen. Parallel zur Abnahme dieser Fraktionen erhöhte sich das PNP. PNP korrelierte mit Chla. Im Sommer kam DRP wieder vor, obwohl PNP in gleichen Konzentrationen wie im Frühjahr vorhanden war (Abb. 6).

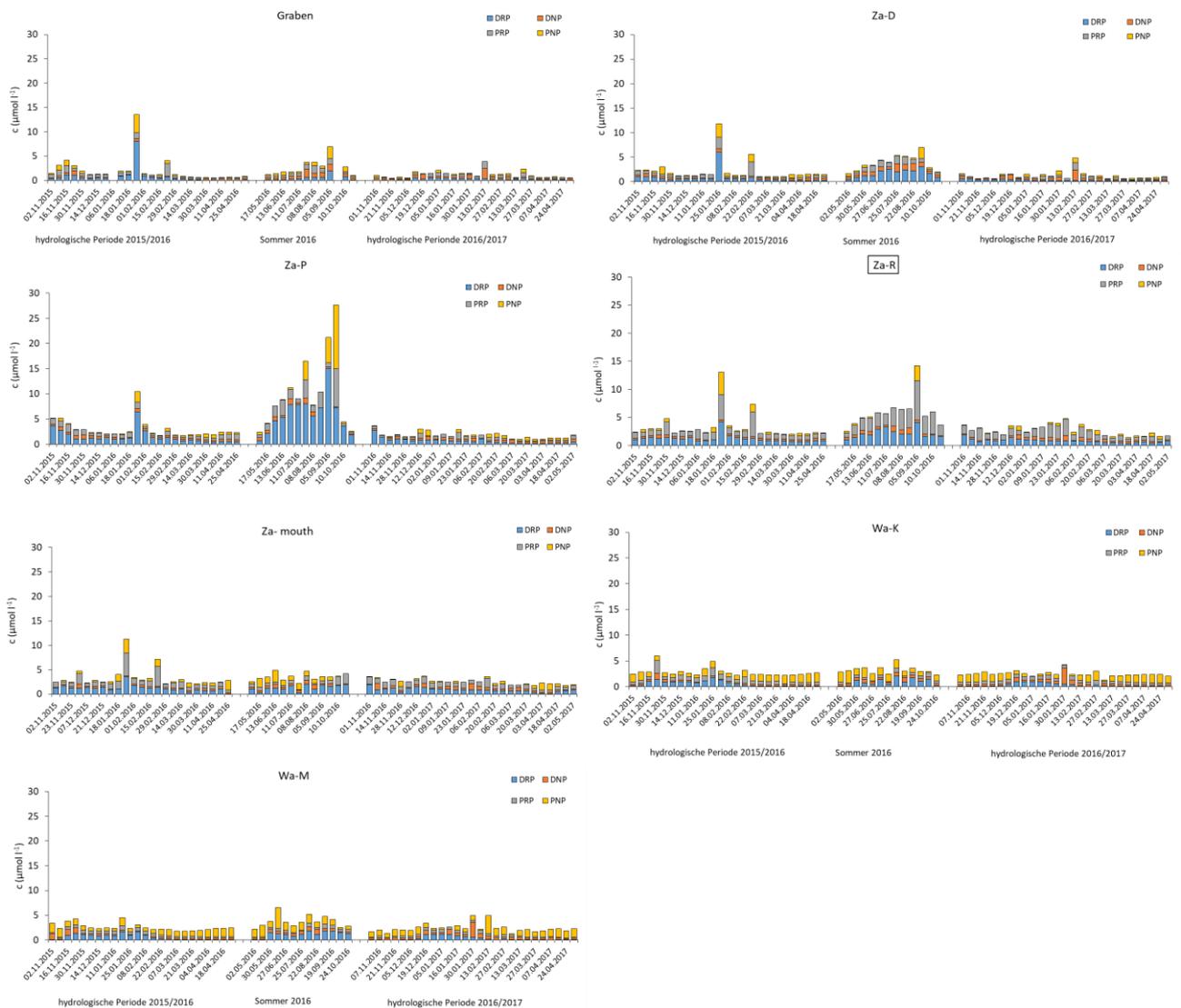


Abb. 6: Saisonale Variation der TP-Zusammensetzung im Graben und entlang der Zarnow und der Warnow für den gesamten Untersuchungszeitraum.

### Partikelanalysen des suspendierten partikulären Materials

Es wurden fünf Arten von P-haltigen Partikeln identifiziert: an Eisenoxide (FeOx) und Tonmineralien (Tonmin.) adsorbiertes P, Eisen- und Kalziumphosphate (FePO<sub>4</sub>, CaPO<sub>4</sub>) und Polyphosphate (PolyP) (Abb. 7). FePO<sub>4</sub>, CaPO<sub>4</sub> und PolyP kamen nur in geringen Zahlen vor. Sie hatten jedoch einen relativ hohen P-Gehalt von 12.7±1.4 %, 14.0±1.8 und 18.5±1.3%. FeOx und Tonmineralien waren die häufigsten P-Verbindungen, jedoch mit einer breiten Variation der Häufigkeit. Die Partikel wiesen jedoch einen geringen P-Gehalt (FeOx: 5.1± 0.7 %, Tonmin: 1.4 ± 1.3%) auf. Im Dränwasser war die Anzahl der FeOx-Partikel gering. Die Medianwerte (Abb. 7) nahmen im Graben und entlang der Zarnow bis zur Mündung in die Warnow (Station Za-mouth) zu und in der Warnow wieder ab. Die Medianwerte der Tonmineralien hatten im Graben ihr Maximum. Auch diese nahmen bis zur Station Za-mouth ab, blieben bei Wa-K auf dem gleichen Niveau und nahmen erst bis zur Station Wa-M noch einmal ab.

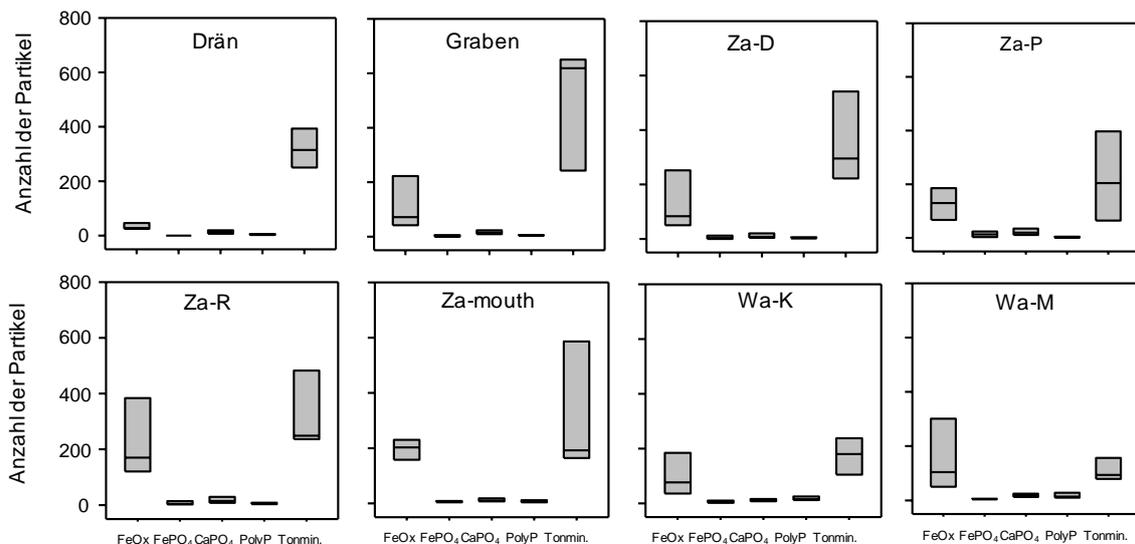


Abb. 7: Art und Anzahl der P-haltigen Partikel von 2000 gezählten Partikeln im suspendierten Material (SPM) an den untersuchten Stationen

### Bioverfügbarkeit

Die drei Fraktionen DRP, PRP und DNP sind an beiden untersuchten Stationen (Station Za-R – Reez und Station Wa-K - Kessin) im gleichen Umfang bioverfügbar (Abb. 8a, b). DRP ist nahezu zu 100% bioverfügbar, PRP zu 23-95 % und DNP zu 17-98%. Die Bioverfügbarkeit aller drei Fraktionen am TP macht 47% an der Station Za-R und 45% an der Station Wa-K aus (Abb. 8 c), wobei der bioverfügbare Anteil von DRP am TP (23 %) etwa gleich dem Anteil von PRP+DNP (24%) war (Abb. 8 d).

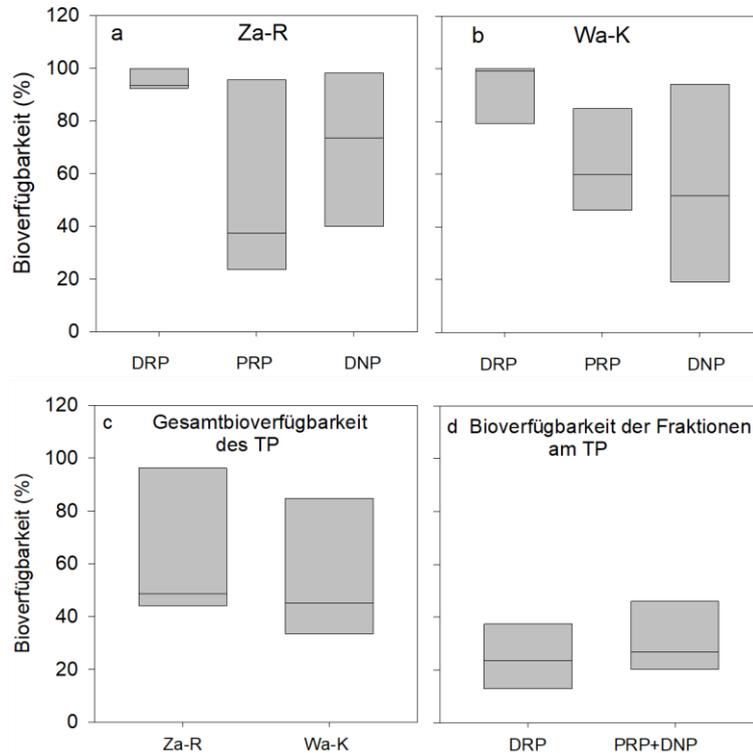


Abb. 8: Bioverfügbare Anteil an den jeweiligen Fraktionen für die Station Za-R (a) und Wa-K (b) sowie der bioverfügbare Anteil aller Fraktionen (c) und der Einzelfraktionen (d) am TP.

## 5 Diskussion

Erste Untersuchungen zur TP und DRP-Emission von der gedrähten Ackerfläche in Dummerstorf wurden in den hydrologischen Perioden 2003 bis 2006 durchgeführt (Tiemeyer et al., 2009). Ein Vergleich unserer Ergebnisse mit denen dieser Autoren zeigte, dass bei ähnlichen Niederschlagsmengen die Abflüsse deutlich differierten. Wir konnten einen Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge von Juni bis November und dem Abfluss während der hydrologischen Periode zeigen. Die Niederschlagsmenge im Sommer und Herbst prägt die Bodenfeuchte und die Speicherkapazität für Wasser im Boden (Lam et al., 2016) sowie das Einsetzen des Drän-Abflusses. Da die Höhe der TP und DRP-Frachten eng an das Abflussgeschehen gekoppelt ist, weist das auf eine zwischenjährige Variabilität des P-Exports aus landwirtschaftlichen Feldern hin, wie dies bereits von gedrähten Flächen im südlichen Ontario (Kanada) berichtet wurde (Macrae et al., 2007). Ein positiver Zusammenhang zwischen Niederschlag, Abfluss und P-Fracht wurde für viele Einzugsgebiete beschrieben (Gentry et al., 2007; Withers and Jarvie, 2008; Verheyen et al., 2015) und auch von Tiemeyer et al. (2009) für das Einzugsgebiet Zarnow.

Wir haben uns die Frage gestellt, wie repräsentativ dieser Dränauslass ist. Dazu wurden in einer separaten Studie 4 weitere Dränauslässe entlang des Grabens beprobt. Ferner wurde dieser Dränauslass mit einem Dränauslass an der Beke und im Huntsgraben (Bitschofsky und Meier, pers. comm.), verglichen. Entlang des Grabens als auch im Vergleich zu den Dränauslässen in den anderen Regionen unterschieden sich die TP-Konzentrationen nicht. Die Abflüsse jedoch waren sehr verschieden und damit auch die P-Frachten.

Die von uns gemessenen TP und DRP-Konzentrationen im Dränwasser (Tabelle 1, Abb. 5) liegen unter den von der LAWA (Deutsche Arbeitsgruppe zur Umsetzung der Wasser-Rahmenrichtlinie)

angegebenen Grenzwerten für Flüsse von  $0.1 \text{ mg L}^{-1}$  ( $3.2 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ ) für TP und  $0.07 \text{ mg L}^{-1}$  ( $2.26 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ ) für DRP. Die Bodentypen der drainierten Flächen sind Parabraunerden, Pseudogleye und Gleye im Oberboden, mit einem pflanzenverfügbaren P-Gehalt von  $75 \text{ mg/kg}$  und einer Düngung von  $10\text{-}67 \text{ kg/haP}$ , der bevorzugt über Gärrückstände eingebracht wird (Kahle et al., 2019). Das Düngungsverhalten dieser Böden verbunden mit dem Anbau von Winterweizen und Luzerne (Kahle et al., 2019) führt nicht zu einen erhöhten P-Austrag von drainierten Feldern. Die Grenzwerte der WRRL werden jedoch bei starken Abflussereignissen überschritten, wie es in dieser Studie während der Schneeschmelze beobachtet und auch bei Sturm- und Starkregenereignissen beobachtet wurde (Jordan-Meille and Dorioz, 2004; Zimmer et al., 2016).

Bereits im Graben kam es zu Überschreitungen der TP-Grenzwerte bei 15% der Messungen, die DRP-Konzentrationen blieben dagegen unter dem Grenzwert (Tabelle 2). Am häufigsten wurden die TP Grenzwerte an den Stationen Za-P und Za-R überschritten. Das ist insbesondere im Sommer der Fall. Diese Erhöhungen sind allein durch die jahreszeitliche Variation aufgrund geringer Niederschläge im Sommer nicht zu erklären. Die gleichzeitige Zunahme von DRP und Überschreitung der DRP-Grenzwerte deuten an, dass in diesem Zarnow-Abschnitt Abwasser von Siedlungen und/oder Stallanlagen eingeleitet wurden. Die Beseitigung dieser Quellen können die P-Frachten der Zarnow deutlich reduzieren und können ein Ansatzpunkt für weitere Managementstrategien sein. Es wird in dieser Arbeit auch deutlich, dass außer DRP auch die anderen Fraktionen zur Überschreitung der TP-Grenzwerte beitragen.

*Tabelle 2: Anteil (%) der Messungen, in denen die von der LAWA festgelegten Grenzwerte für TP und DRP überschritten wurden*

|             | <u>DRP</u> | <u>TP</u> |
|-------------|------------|-----------|
| Drän        | 0          | 0         |
| Graben      | 0          | 15        |
| Za-D        | 5          | 15        |
| Za-P        | 23         | 28        |
| Za-R        | 9          | 31        |
| Za-mouth    | 2          | 24        |
| Wa-K        | 0          | 11        |
| <u>Wa-M</u> | <u>0</u>   | <u>25</u> |

## Literaturverzeichnis

- Behrendt, H., and Bachor, A. (1998). Point and diffuse load of nutrients to the Baltic Sea by river basins of north east Germany (Mecklenburg-Vorpommern). *Water Sci. Technol.* 38(10), 147-155. doi: 10.1016/S0273-1223(98)00744-6.
- Degerholm, J., Gundersen, K., Bergman, B., and Soderback, E. (2006). Phosphorus-limited growth dynamics in two Baltic Sea cyanobacteria, *Nodularia* sp and *Aphanizomenon* sp. *FEMS Microbiol. Ecol.* 58(3), 323-332. doi: 10.1111/j.1574-6941.2006.00180.x.
- Felgentreu, L., Nausch, G., Bitschofsky, F., Nausch, M., and Schulz-Bull, D. (2018). Colorimetric Chemical Differentiation and Detection of Phosphorus in Eutrophic and High Particulate Waters: Advantages of a New Monitoring Approach. *Front. Mar. Sci.* 5. doi: UNSP 21210.3389/fmars.2018.00212.
- Gentry, L.E., David, M.B., Royer, T.V., Mitchell, C.A., and Starks, K.M. (2007). Phosphorus transport pathways to streams in tile-drained agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.* 36(2), 408-415. doi: 10.2134/jeq2006.0098.
- Grasshoff, K., Ehrhardt, M., and Kremling, K. (1983). *Methods of seawater analysis*. Weinheim: Verlag Chemie.
- Gustaffson, B.G., Blenckner, T., Eilola, K., MacKenzie, B., Meier, H.E., Müller-Karulis, B., et al. (2012). Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850-2000. *Ambio* 41, 534-548.
- HELCOM (2014). Eutrophication status of the Baltic Sea 2007-2011 - a concise assessment. *Balt. Sea Environ. Proc.* (143), 1-40.
- HELCOM (2015). Updated Baltic Sea Pollution Load Compilation (PLC5.5). *Balt. Sea Environ. Proc.* 145, 1-40.
- Jordan-Meille, L., and Dorioz, J.M. (2004). Soluble phosphorus dynamics in an agricultural watershed. *Agronomie* 24(5), 237-248. doi: 10.1051/agro:2004021.
- Kahle, P., Bauwe, A., and Lennartz, B. (2019). P-Austräge aus gedrähten landwirtschaftlich genutzten Böden und Möglichkeiten zur Minderung. *Korrespondenz Wasserwirtschaft* 3, 148-153.
- Koch, S., Kahle, P., and Lennartz, B. (2018). Spatio-temporal analysis of phosphorus concentrations in a North-Eastern German lowland watershed. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 15, 203-2016. doi: org/10.1016/j.ejrh.2018.02.001
- Kunkel, R., Kape, H.E., Keller, L., Koch, F., Tetzlaff, B., and Wendland, F. (2016). Scenarios for the reduction of nitrogen inputs to achieve the groundwater and marine protection goals in Mecklenburg-Pommern. *Hydrol. Wasserbewirts.* 60(2), 119-134. doi: 10.5675/HyWa\_2016,2\_2.
- Lam, W.V., Macrae, M.L., English, M.C., O'Halloran, I.P., Plach, J.M., and Wang, Y. (2016). Seasonal and event-based drivers of runoff and phosphorus export through agricultural tile drains under sandy loam soil in a cool temperate region. *Hydrological Processes* 30(15), 2644-2656. doi: 10.1002/hyp.10871.
- Macrae, M.L., English, M.C., Schiff, S.L., and Stone, M. (2007). Intra-annual variability in the contribution of tile drains to basin discharge and phosphorus export in a first-order agricultural catchment. *Agric. Water Manage.* 92(3), 171-182. doi: 10.1016/j.agwat.2007.05.015.
- Nausch, G. (2011). Pollution and Marine Eutrophication of the Baltic Sea. *Chem. Unserer Zeit* 45(3), 164-170.
- Smil, V. (2000). Phosphorus in the environment: Natural flows and human interferences. *Annu. Rev. Energ. Env.* 25, 53-88. doi: 10.1146/annurev.energy.25.1.53.
- Smith, V.H., Tilman, G.D., and Nekola, J.C. (1999). Eutrophication: impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. *Environmental Pollution* 100(1-3), 179-196. doi: Doi 10.1016/S0269-7491(99)00091-3.
- Tiemeyer, B., Kahle, P., and Lennartz, B. (2009). Phosphorus losses from an artificially drained rural lowland catchment in North-Eastern Germany. *Agric. Water Manage.* 96(4), 677-690. doi: 10.1016/j.agwat.2008.10.004.
- UBA (2017). "Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung". (Dessau-Roßlau.: Umweltbundesamt).
- Verheyen, D., Van Gaalen, N., Ronchi, B., Batelaan, O., Struyf, E., Govers, G., et al. (2015). Dissolved phosphorus transport from soil to surface water in catchments with different land use. *Ambio* 44, S228-S240. doi: 10.1007/s13280-014-0617-5.
- Wasmund, N., Topp, I., and Schories, D. (2006). Optimizing the storage and extraction of chlorophyll samples. *Oceanologia* 48(1), 125-144.
- Withers, P.J.A., and Jarvie, H.P. (2008). Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review. *Sci. Total Environ.* 400(1-3), 379-395. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.08.002.
- Zimmer, K.D., Kahle, P., and Baum, C. (2016). Loss of soil phosphorus by tile drains during storm events. *Agric. Water Manage.* 167, 21-28.

## 8 Anhang

### *Publikationen*

Phosphorus 2020 - Challenges for Synthesis, Agriculture and Environment. Tagungsband 8th International Phosphorus Workshop, September 12-16, 2016, in Rostock, Germany. 281 pp.

Krämer, I., M. Nausch, G. Nausch, D. Mehl and B. Deutsch (2016). Phosphor - von der Quelle bis ins Meer. Wasser u. Abfall 18: 18-22.

S. Jahn, P. Kahle, H. Schulz-Vogt, B. Lennartz, M. Nausch. A one-year high resolution monitoring of P losses from diffuse sources and changes on the way to the Baltic Sea. Abstract book of the 11. Baltic Sea Science Conference in 12-16 June 2017.

Nausch, M.; Woelk, J.; Kahle, P.; Nausch, G.; Leipe, T.; Lennartz, B. (2017): Phosphorus fractions in discharges from artificially drained lowland catchments (Warnow River, Baltic Sea). Agricultural Water Management 187: 77-87.

### *Publikationen in Preparation*

M. Nausch, S. Jahn, F. Bitschbofsky, J. Müller, P. Kahle, B. Lennartz. Phosphorus losses from drained agricultural land in a German lowland catchment – temporal and spatial scales

M. Nausch, S. Jahn, F. Bitschbofsky, P. Kahle, B. Lennartz. Particulate Phosphorus in running waters of a tile drained agricultural area” (working titles)

### *Tagungen, Konferenzen, Workshops*

#### **Vorträge**

Jahn, S., Nausch, M., Schulz-Vogt, H.-, B. Lennartz, P Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Vortrag, P-Campus Startworkshop, Rostock, 12.06.2015.

Jahn, S. Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Vortrag P-Campus Symposium. Rostock, 10. März 2016.

Jahn, S. Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Vortrag P-Campus Symposium. Rostock, 6. April 2017.

Jahn, S. Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Vortrag P-Campus Symposium P-Campus-Symposium, Rostock, 8.-9. Nov. 2017.

Nausch, M., Woelk, J., Kahle, P., Nausch, G., Leipe, T., Lennartz. Quantity and quality of phosphorus losses from an artificially drained lowland catchment. Vortrag, EGU, Wien, Österreich, 28. April 2017.

Nausch, M., Jahn, S., Kahle, P., Nausch, G., Woelk, J., Leipe, T., Lennartz. Phosphorus losses from an artificially drained lowland catchment and its changes along the flow path. Vortrag, EUTRO 2018, Nyborg, Dänemark 17.-20.06.2018.

Nausch, M., Jahn, S., Kahle, P., Nausch, G., Leipe, T., Lennartz, B. Phosphorus losses from small catchments and across spatial scales. Vortrag, 17. Internationale ERB-Konferenz. Darmstadt, Germany, 11.-14.9.2018.

Nausch, M. Phosphoraustrag aus gedrähten Flächen im Einzugsgebiet der Warnow Dränworkshop Gülzow, 19. März 2019.

### **Poster**

S. Jahn, P. Kahle, B. Lennartz, H. Schulz-Vogt, M. Nausch. Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Poster IPW8, Rostock. 12.- 16. Sept. 2016.

S. Jahn, P. Kahle, B. Lennartz, H. Schulz-Vogt, M. Nausch. Quality, quantity and transformation of P losses from diffuse sources to the Baltic Sea. Poster, 11. Baltic Sea Science Conference Rostock, Germany, 12.-16 June 2016.

Nausch, M. Jahn, S., Woelk, J., Kahle, P., Leipe, T., G. Nausch, G., Lennartz, B. Phosphorus losses from a small catchment across spatial and temporal scales. Poster-Campus-Symposium Dummerstorf, 19.- 20. Nov. 2018.

### *Öffentlichkeitsarbeit*

Nausch, G. 2015 Nährstoffe in den deutschen Küstengewässern und in der Ostsee. Ringvorlesung, Rostock, 11.11.2015

S. Jahn. Teilnahme an der langen Nacht der Wissenschaften in Rostock, April 2016

Journalistische Beiträge über das Vorhaben in Zeitungen über das Projekt:

Artikel „Phosphorquellen ergründen“ in den Norddeutschen Neusten Nachrichten (NNN) vom 28.07.2016

TV Dokumentation „Der Irrsinn mit der Gülle“ in Planet Erde am 18.3.2018 ZDF TV

Dokumentation „Phosphat in der Ostsee“ in Planet Erde am 18.3.2018 ZDF

### *Transfer*

Die Daten werden dem StaluMM für die Erarbeitung eines neuen Managementplanes zur Reduzierung der Nährstoffeinträge zur Verfügung gestellt.