TELMA	Band 47	Seite 25 - 44	4 Abb., 3 Tab.	Hannover, November 2017

Abschätzung der Phosphorbelastung des Vorfluters eines degradierten Quellmoores in NO-Brandenburg

Evaluation of stream pollution due to increased phosphorus release from a degraded spring mire in NE Brandenburg

MARC ALEXANDER WESTPHALEN, GUNNAR LISCHEID, RON MEIER-UHLHERR und DOMINIK ZAK

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Teilgebiet der Sernitzniederung bei Greiffenberg (Uckermark), eines der größten entwässerten Quellmoorkomplexe Deutschlands, in Hinblick auf eine potenzielle Phosphorbelastung nach Wiedervernässung in das angrenzende Fließgewässer „Sernitz“ untersucht. Als Folge der jahrhundertelangen Entwässerung sind die Oberböden überwiegend stark degradiert. Artenarme Phytozönosen in Form von Schilf-Landröhrichten kennzeichnen den Standort. Durch die Torfmineralisierung und damit verbundene Sackung sind einzelne Moorbereiche durch längere Überstauphasen gekennzeichnet. Für eine Bewertung der Auswirkung der Moorvernässung auf die interne P-Freisetzung und das Risiko erhöhter P-Austräge wurden im Zeitraum von Juni bis Oktober 2015 Untersuchungen zur Substratqualität und zur chemischen Zusammensetzung des Boden- und Oberflächenwassers durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden drei für das Moor repräsentative Bereiche ausgewählt, die sich hinsichtlich der Standortfaktoren Wasserstand und Vegetation deutlich voneinander unterschieden. Die Bereiche waren überwiegend durch degenerierte Torfe an der Oberfläche mit einer Mächtigkeit von mehreren Dezimetern gekennzeichnet. Trotz des insgesamt hohen P-Freisetzungspotenzials im stark degradierten Oberboden besteht für das angrenzende Fließgewässer kein Risiko erhöhter P-Einträge nach einer Moorvernässung.

Abstract

In this study, a sub-area of one of the largest drained spring water mire complex in Germany, a part of the Sernitz Valley close to Greiffenberg (Uckermark), was examined for the potential risk of phosphorous release in the adjacent watercourse „Sernitz“ post rewetting. The area is characterized by a high degradation of the top soil layer and a species-poor phytocoenoses of countryside reed beds as a result of the drainage over hundreds of years. In consequence of the changes in the peat characteristics and the associated substantial soil shrinkage, some areas of the fen exhibit permanent inundated conditions. Overall, the important ecosystem functions provided by the fen, e.g. water and nutrient retention, are being altered negatively. For an assessment of the rewetting effects on the internal P release and the risk of elevated P export, investigations on substrate quality and porewater chemistry were performed in the period of June to

October 2015. For this purpose, three representative investigation areas were selected within the study site. These areas are clearly different from each other in terms of water level and vegetation but they all possess several decimeters thick layer of highly decomposed peat. The highest P release potential was found for the fen area with alternating water levels. Despite the overall high P release potential in the upper degraded peat layer, there was no evidence of elevated P export to the adjacent watercourse due to rewetting.

1. Einleitung

Moore gehören weltweit zu den am stärksten bedrohten Ökosystemen. Naturnahe Moore wirken als Stoffsenke und entlasten dadurch angrenzende Oberflächengewässer (Zak et al. 2008a). Darüber hinaus regulieren sie den Wasserhaushalt der Landschaft. Auf Grund ihrer im Vergleich zur Umgebung höheren Verdunstung erzielen sie einen kühlenden Effekt und beeinflussen als Kaltluftbildungsräume das Mikro- und Mesoklima positiv (Succow & Koska 2001). Als Kohlenstoffsenke und als Ort einer einzigartigen biologischen Vielfalt kommt ihnen außerdem eine globale Bedeutung zu. In Nordostdeutschland waren ehemals etwa 10 % der Landesfläche von überwiegend grundwassergespeisten Niedermooren bedeckt (Zak & Gelbrecht 2014). Mehr als 95 % dieser Moorflächen wurden im letzten Jahrhundert zum Zwecke der intensiven Land- und Forstwirtschaft mittels komplexer Grabensysteme entwässert (Luthardt 2014a). Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels kommt es zu einer Belüftung der Torfe, wodurch auch stabile organische Substanzen verstärkt abgebaut werden. In der von Entwässerung betroffenen Bodenschicht führen die Mineralisierungsprozesse zu einer verstärkten Freisetzung von Kohlenstoffdioxid und Lachgas (Gelbrecht et al. 2008). Ursprünglich als stabile, organische Verbindungen festgelegte Stoffe, wie beispielsweise Phosphor werden in leicht mobilisierbare, anorganische Verbindungen umgewandelt. Aus der ursprünglichen Senke für Phosphor, Kohlenstoff, Stickstoff und andere Nährstoffe wird durch Entwässerung eine Quelle, was zu einer verstärkten Stoffbelastung angrenzender Gewässer führen kann (Zak & Gelbrecht 2014).

In Anbetracht der Eutrophierung der Oberflächengewässer, des Biodiversitätsverlustes und der globalen Erwärmung werden verstärkt Anstrengungen unternommen, die ursprünglichen landschaftsökologischen Funktionen der Moore zum Kohlenstoff- und Nährstoffrückhalt wiederherzustellen. Durch Etablierung natürlicher flurnaher Grundwasserstände soll eine weitere Degradierung des Moores verhindert, neues Torfwachstum initiiert und die Belastung von angrenzenden Gewässern reduziert werden (Kadlec et al. 2008, Erwin 2009, Zak et al. 2015). In Brandenburg werden zurzeit aus Gründen des Natur-, Klima- und Gewässerschutzes etwa 3900 ha Moorfläche wiedervernässt (Luthardt 2014a).

Im Rahmen des Life+-Projektes „Verbesserung der Brut- und Nahrungshabitate für Schreiadler (*Aquila pomarina)*, sowie für Wachtelkönig (*Crex crex*) und Seggenrohrsänger (*Acrocephalus paludicola*)“ wurden Maßnahmen zur Verbesserung der hydrologi-

schen Verhältnisse in einem stark degradierten Quellmoorkomplex der Sernitzniederung westlich von Greiffenberg durchgeführt. Das Ziel dieser Maßnahmen ist die Aufwertung der Brut- und Nahrungshabitate der erwähnten Arten durch die Revitalisierung des überregional bedeutenden Quellmoorkomplexes, der im europäischen Maßstab einen seltenen hydrogenetischen Moortyp darstellt (Kovalev et al. 2015). Dazu wurden im Winterhalbjahr 2015/16 4,3 km Gräben vollständig mit Substraten aus dem Moor, die durch lokale Flachabtorfungen gewonnen wurden, verfüllt und damit deaktiviert.

Die Anhebung der Moorwasserstände in degradierten Niedermooren führt schnell zu anaeroben Bedingungen in den ehemals belüfteten Bodenschichten. In Folge dessen wird dreiwertiges Eisen chemisch und/oder mikrobiell reduziert. Der an redoxsensible Fe(III)-Hydroxid/Oxyhydraten gebundene Phosphor wird dann verstärkt ins Bodenwasser freigesetzt. In degradierten, eisenarmen Mooren wurde nach Wiedervernässung Phosphatkonzentrationen von über 10 mg L^{-1} nachgewiesen (Zak et al. 2004, 2010). Solche wiedervernässten Niedermoore können die Ursache einer potenziellen Gewässereutrophierung darstellen (Aldous et al. 2005). Für Moore mit einem molaren Fe:P-Verhältnis im Bodenwasser von > 3 wurde jedoch ein nahezu vollständiger P-Rückhalt an der Mooroberfläche festgestellt (Zak et al. 2004). Das Risiko für einen erhöhten P-Austrag in angrenzende Gewässer ist in diesem Fall deutlich geringer. Das westlich an das Quellmoor angrenzende Fließgewässer, die „Sernitz“, verfehlt jedoch aufgrund einer erhöhten Belastung mit Gesamtphosphor (TP) das Bewirtschaftungsziel der Wasserrahmenrichtlinie um eine Zustandsklasse (Lugv 2014). Aus diesem Grund ist es entscheidend, durch Voruntersuchungen eine Abschätzung über das P-Austragsrisiko bereits vor einer Wiedervernässung zu treffen.

2. Untersuchungsgebiet

Die vermoorte Sernitzniederung befindet sich im Nordosten Brandenburgs im Landkreis Uckermark etwa 80 km nordöstlich von Berlin. Sie erstreckt sich von der Quelle der Sernitz nahe der Ortschaft Steinhöfel über die Flächen südlich der Ortschaft Greiffenberg bis zur Mündung in die Welse nahe Ziethenmühle. Die Sernitz entwässert die Niederung von West nach Ost auf einer Fließlänge von 12,5 km. Der Höhenunterschied auf dieser Fließstrecke beträgt 45 m, was einem Sohlgefälle von 3,6 ‰ entspricht. Die mittlere Jahresniederschlagssumme für den Zeitraum von 1981 bis 2010 betrug an der 8 km südöstlich gelegenen Wetterstation Angermünde 521 mm bei einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 8,9 °C (Dwd 2016). Dabei befindet sich das Untersuchungsgebiet in der gemäßigten Klimazone am Übergang vom atlantischen Klima Westeuropas zum kontinental geprägten Klima Osteuropas. Die naturräumliche Gliederung nach Scholz (1962) ordnet das Gebiet innerhalb des Rücklandes der mecklenburgischen Seenplatte dem Uckermärkischen Hügelland zu.

Wie der gesamte nordbrandenburgische Raum wurde auch die Sernitzniederung durch das Pommersche Stadium der Weichselkaltzeit geprägt und zählt morphologisch zur Jungmoränenlandschaft der Uckermark (STEGMANN et al. 2014). Sie entstand dabei aus einem ehemaligen Gletscherzungenbecken, das zeitweise von einem Eisstausee erfüllt war. Im Spätglazial wurde es durch den Abfluss des Schmelzwassers zum Tal umgeformt (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Innerhalb dieser Gebietskulisse liegt das Untersuchungsgebiet. Es umfasst den Oberlauf der Sernitz und den etwa 50 ha großen, in den zentralen Bereichen auf einem Verlandungsmoor aufgewachsenen, karbonatreichen Quellmoorbereich südwestlich der Ortschaft Greiffenberg. Der mineralische Untergrund besteht hauptsächlich aus glazilimnischen Tonen und Schluffen im Wechsel mit Sanden. Darüber liegt der Moorkörper, der durchschnittlich 1,2 m und im zentralen Talbereich östlich der Bahnlinie bis zu 11 m mächtig ist. Die Basis des Moorkörpers bilden häufig Sand-, Ton- und Kalkmudden ehemaliger offener Gewässer und Quellen. Eine ausführliche Beschreibung zu Genese und Aufbau des Moores findet sich bei STEGMANN (2005).

Zu Beginn des 19. Jahrhunderts wurden die ersten Entwässerungsgräben angelegt, um landwirtschaftliche Nutzung und Torfstechen zu ermöglichen. Bis zum Ende der 1960er Jahre wurde das Grabensystem weiter ausgebaut, die Flächen fielen aber seitdem aufgrund unrentabler Bewirtschaftung brach. Vor der Wiedervernässung im Winterhalbjahr 2015/16 entwässerte ein etwa 1200 m langer und sehr tiefer Hauptentwässerungsgraben und eine Vielzahl von ebenfalls sehr tiefen Seitengräben das Moor von West nach Ost in Richtung der flankierenden Sernitz. Aufgrund des ehemals noch funktionstüchtigen Entwässerungssystems lagen die Moorwasserstände überwiegend bei 40 bis mehr als 60 cm (Wasserstufen 3+ und 2+) unter Flur. Die Oberböden sind größtenteils stark vererdet und anstatt der ursprünglichen torfbildenden Kleinseggen und Braunmoose dominierten dichte, artenarme Landröhricht-Bestände mit *Phragmites australis.* Nur in wenigen, sehr kleinflächigen und hydrologisch begünstigten Arealen konnten sich Großseggen-Bestände aus *Carex acutiformis* erhalten.

3. Methoden

Für die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung des Bodenwassers und der Bodensubstrate wurden im Juni 2015 im Abstand von ca. 10 m zum Hauptgraben zwei parallel und ein rechtwinklig verlaufendes Messtransekt eingerichtet (Abb. 1). Diese werden nachfolgend gemäß den Wasserständen zur Zeit der Untersuchungen als „überstaut“, „wechselfeucht“ und „nass“ bezeichnet. Ausgewählte Bodeneigenschaften, Wasserstände und vorherrschende Vegetation sind in der Tabelle 1 zusammengefasst.

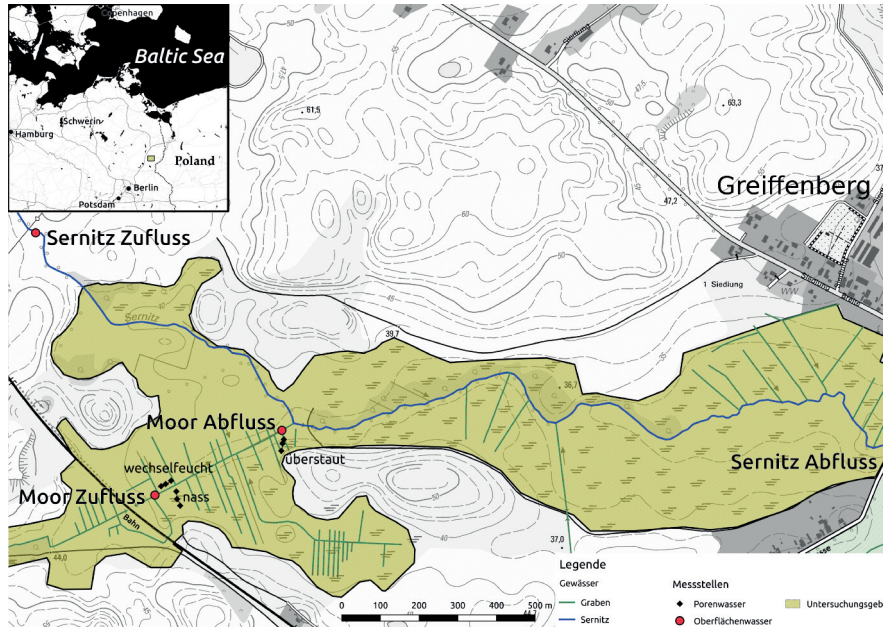

Abb. 1: Lage der Probenahmestellen für Oberflächen- und Bodenwasser im entwässerten Quellmoorkomplex der Sernitzniederung (Geobasisdaten © GeoBasis-DE/LGB, GB-D 25/17).
Location of the surface water and porewater sampling sites in the drained spring mire of „Sernitzniederung“ (Geo basis data © GeoBasis-DE/LGB, GB-D 25/17).

3.1 Probenahme des Bodenwassers und P-Rückhalt

Das überwiegend anoxische Bodenwasser wurde im Juni und Oktober 2015 mittels Dialysesammlertechnik gewonnen (Hesslein 1976). Pro Transekt wurden drei Dialysesammler mit jeweils 14 Kammern im Abstand von 7-10 m in den oberen Bereich des Moorkörpers (0-60 cm) eingebracht und für etwa zwei Wochen im Torf exponiert. Dieser Zeitraum gewährleistete eine Gleichgewichtseinstellung zwischen den Konzentrationen der gelösten und kolloidalen Stoffe im Bodenwasser und dem deionisierten Wasser der Kammern. Nach der Entnahme wurde das Wasser der 14 Kammern zu einer Mischprobe zusammengeführt und die elektro-physikalisch-chemischen Parameter erfasst. Die Mischproben wurden anschließend vor Ort in vorbereitete Gefäße aliquotiert und in Abhängigkeit des zu untersuchenden Parameters mit entsprechenden Chemikalien fixiert. Die Beprobung und Simulation des P-Rückhaltes beim Austritt von anoxischem Bodenwasser an der Mooroberfläche erfolgte durch Belüftung der anoxischen Mischproben nach Zak et al. (2004).

Tab. 1: Ausgewählte Daten der drei untersuchten Transekte. Der pH-Wert wurde im Bodenwasser ermittelt. C_t:N_t entspricht dem molaren Verhältnis von Gesamtkohlenstoff zu Gesamtstickstoff in den Torfproben. Der organische Gehalt der Torfe (OBS) wurde über den Glühverlust und die Trockenrohdichte (TRD) nach SCHEFFER & BLANKENBURG (1993) bestimmt. Angegebene Werte entsprechen dem Median des Oberbodens (0-30 cm) / Unterbodens (30-60 cm).
Selected data on the three investigation areas for porewater and peat samples: pH-value was measured in porewater. C_t:N_t ratios are molar ratios of total carbon and total nitrogen in peat samples. Soil organic matter (OBS) was determined by loss of ignition and dry bulk density (TRD) according to SCHEFFER & BLANKENBURG (1993). The values represent medians of upper (0-30 cm) / lower (30-60 cm) peat layer.

	überstaut	**wechselfeucht**	**nass**
pH C_t:N_t OBS [%] TRD [g dm^{-3}]	6,9 17 / 19 74 / 78 177 / 147	7,3 25 / 42 13 / 14 520 / 458	6,8 15 / 16 56 / 71 222 / 176
Substrat	(Quell) Volltorfe	sehr carbonatreicher, stark humoser Mineralboden bzw. Antorfe[3]	carbonathaltige (Quell) Halbtorfe
Oberbodenmerkmale	stark degeneriert, dunkelbraun mit wenigen Pflanzenresten (Schilf, Seggen)	sehr stark degeneriert. Oxidationshorizont mit Eisenausfällung im Oberboden und verfestigtes Polyedergefüge. Zum Teil knollige Kalkausfällungen. Ohne erkennbare Pflanzenreste	stark degeneriert, dunkelbraun bis schwarz. H_2S Geruch
hydrologische Verhältnisse[1]	nass, zeitweise überstaut, im Bereich quelliger Areale	wechselhaft feucht, von Grundwasser beeinflusst	wechselhaft nass bis nass, im Bereich quelliger Areale
Wasserstufe[2]	5+/+	3+/2+	4+/+, 5+/+
Wasserstand im Untersuchungszeitraum	nass, leichter Überstau	Sommer: 20-35 cm unter Flur Herbst: flurnah	flurnah
Vegetation	*Phragmites australis, Carex acutiformis*	*Carex acutiformis, Phragmites australis, Calamagrostis epigejos*	*Phragmites australis, Lysimachia palustre*

[1]Nach WAGNER (2015), STEGMANN (2005) und KOSKA et al. (1996)
[2]Wasserstufenausbildung nach KOSKA (2001).
[3]Bezeichnung „Antorfe“ nach SUCCOW & STEGMANN (2001)

3.2 Probenahme der Torfe und Extraktionsverfahren

Im Juni 2015 wurden im Radius von einem Meter um die Dialysesammler jeweils drei Torfproben aus dem sehr stark degradierten Oberboden (10-30 cm) und den darunterliegenden, ebenfalls stark zersetzten Torfen (30-60 cm) entnommen. Aus den insgesamt 54 Torfproben wurde das potenzielle P-Freisetzungspotenzial mittels eines sequentiellen Ex-

traktionsverfahrens nach Zak et al. (2008b) abgeschätzt. Dazu wurden drei Extraktionsschritte mit folgenden Lösungsmitteln durchgeführt und die jeweiligen Gehalte an gesamtem gelösten Phosphor (TDP) und Eisen (Fe) bestimmt:

1. „Desorbierbarer P“ bzw. NH_4Cl-P: Mit einer sauerstofffreien 1 M NH_4Cl Lösung wird vor allem im Bodenwasser gelöster sowie schwach an Oberflächen von Eisen-, Mangan- und Calciumverbindungen und organischem Material adsorbierter Phosphor mobilisiert (Hupfer et. al 1995). Weiterhin werden gelöste und schwach gebundene Spezies des Eisens und Calciums entfernt, die in darauf folgenden Schritten störend einwirken könnten.

2. „Redox-empfindlicher P“ bzw. „Bicarbonat-Dithionit-löslicher P“ (BD-P): Mit einer 0,11 M BD-Lösung wird Phosphor mobilisiert, der vor allem an redoxsensitiven amorphen Fe(III)-Hydroxid/Oxyhydraten sowie auch an Fe(III)-Huminstoffkomplexen gebunden ist. Dies entspricht dem unter anoxischen Bedingungen potenziell freisetzbaren Phosphor.

3. „Säure-löslicher P“ bzw. HCl-P: Mittels einer 0,5 M HCl Lösung wird Phosphor mobilisiert, der an kristallinen, redox-unempfindlichen Eisen-, Aluminium- und Calciumverbindungen gebunden ist sowie hydrolysierbarer organisch gebundener Phosphor.

3.3 Untersuchung des Oberflächenwassers

Das aus den westlichen Moorbereichen über den Hauptgraben in das Untersuchungsgebiet anströmende Oberflächenwasser wurde an einem bestehenden Messpunkt des Landesamtes für Umwelt entnommen, der nachfolgend vereinfacht als „Moor Zufluss“ bezeichnet wird. Kurz vor der Mündung des Hauptgraben in die Sernitz wurde im Bereich einer durch Biberaktivität entstandenen Überstaufläche eine weitere Messstelle eingerichtet („Moor Abfluss“). Zusätzlich wurden an zwei Stellen im Verlauf der Sernitz Proben genommen. Eine Messstelle wurde vor dem Eintritt der Sernitz ins Moor („Sernitz Zufluss“) und eine weitere am östlichen Ende des Untersuchungsgebietes („Sernitz Abfluss“) (Abb. 1). Der Mooranteil des ca. 25 km^2 großen Einzugsgebietes beträgt hier etwa 2 %. Zwischen Juni und Dezember 2015 wurden an diesen Stellen insgesamt viermal die Stoffkonzentrationen und die elektro-physikalisch-chemischen Parameter ermittelt.

4. Ergebnisse

4.1 Torfeigenschaften

Der stark humose Mineralboden im wechselfeuchten Transekt zeichnete sich im Vergleich zu den anderen beiden Transekten durch niedrige organische Anteile und signifikant höhere Gehalte an Gesamtphosphor (P_t) aus. Die höheren P-Gehalte korrespondieren mit er-

höhten Gehalten an Gesamteisen (Fe_t) (Abb. 2) und Gesamtcalcium (Ca_t) (Einzeldaten nicht gezeigt) als potenzielle P-Bindungspartner. Bei den Gehalten an Gesamtaluminium (Al_t) gab es kaum Unterschiede zwischen den Transekten. Die in der Tendenz erhöhten Konzentrationen in der oberen Bodenschicht lassen sich vermutlich überwiegend durch atmosphärische Staubeinträge (Deposition) erklären. Die recht niedrigen Konzentrationen gegenüber Eisen und Calcium lassen annehmen, dass Aluminium aber für die P-Bindung vernachlässigbar ist. Auffällig waren die um die bis zum Faktor 8 höheren Gehalte an Gesamtschwefel (S_t) im nassen Transekt. Diese sind ein Hinweis auf verstärkte Bildung von Eisensulfiden unter den hier vorherrschenden anaeroben Bedingungen.

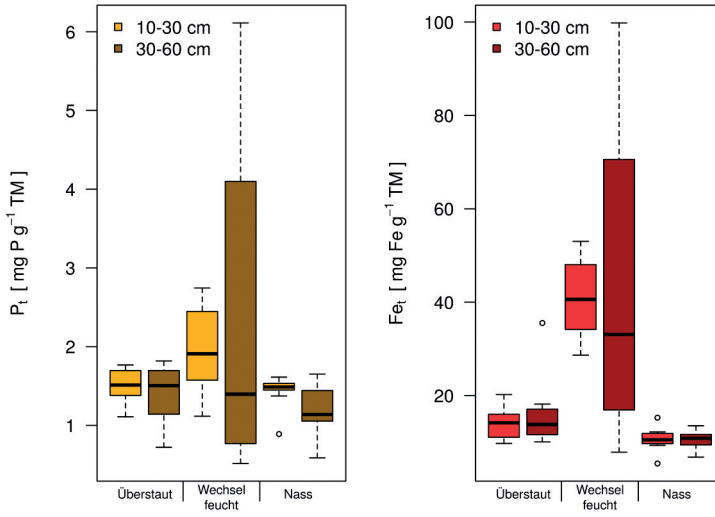

Abb. 2: Box-Whisker Plot der Gehalte von Gesamtphosphor (P_t) und Gesamteisen (Fe_t) in den Torfproben des überstauten, wechselfeuchten und nassen Bereiches für Oberboden (0-30 cm) und Unterboden (30-60 cm). Die Höhe der Box entspricht dem Interquartilsabstand (IQR), der waagerechte Balken dem Median. Die Länge der Whisker wird durch den größten bzw. kleinsten Wert der Verteilung festgelegt, der innerhalb des Bereiches 75 % Quartil + 1,5 IQR bzw. 25 % Quartil – 1,5 IQR liegt. Daten ober- bzw. unterhalb sind als Punkte (Ausreißer) gekennzeichnet.
Box-Whisker-Plot of the amount of total phosphorus (P_t) and total iron (Fe_t) in the peat samples of the three investigation areas (flooded, periodically wet, wet) and the upper (0-30 cm) and lower (30-60 cm) peat layer. In the plot, the height of the box is the interquartile range (IQR) and the horizontal line inside the box is the median. The length of the whisker is determined by the highest and the lowest value within the range of the 75 % quartile + 1.5 IQR and the 25 % quartile – 1.5 IQR respectively. Values beyond this range are marked as dots (outliers)

Der Anteil an sequenziell extrahierbarem P in den Torfen lag deutlich unterhalb von 50 % des P_t. Auffällig war der insgesamt sehr niedrige Anteil an P, der potenziell nach einer Wiedervernässung freigesetzt werden kann. Erwartungsgemäß lag der wasserlösliche bzw. „desorbierbare P“ unterhalb von 1% des P_t. Aber auch der Anteil von P, der durch die Auf-

lösung von redox-empfindlichen Substanzen freisetzbar ist, lag mit Werten unter 5 % des P_t auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die durchschnittlich höchsten Gehalte an „redox-empfindlichem“ Phosphor und Eisen, aber auch die höchste Spannweite wurden im wechselfeuchten Bereich gemessen. Die Eisenkonzentrationen lagen um das bis 100-fache höher als in den beiden anderen Transekten. Eine Anreicherung von „redox-empfindlichen P“ (BD-P) wurde in den stärker zersetzten oberen Bodenschichten aller Transekte festgestellt (Abb. 3). Die hohe Spannweite der redoxempfindlichen Fe- und P-Gehalte im sehr stark humosen und wechselfeuchten Bereich schlägt sich in den molaren Fe_{BD}:P_{BD}-Verhältnisse von 7-689 (Median = 75) nieder. Deutlich niedrigere Verhältnisse von durchschnittlich 10 und 2 traten im überstauten und nassen Bereich auf. Demgegenüber wiesen diese beiden Transekte sehr hohe Anteile an „säure-löslichem Phosphor“ auf (ca. 30 % am P_t). Im wechselfeuchten Bereich betrug die „säure-lösliche P-Fraktion“ dagegen nur etwa 1,5 % des P_t.

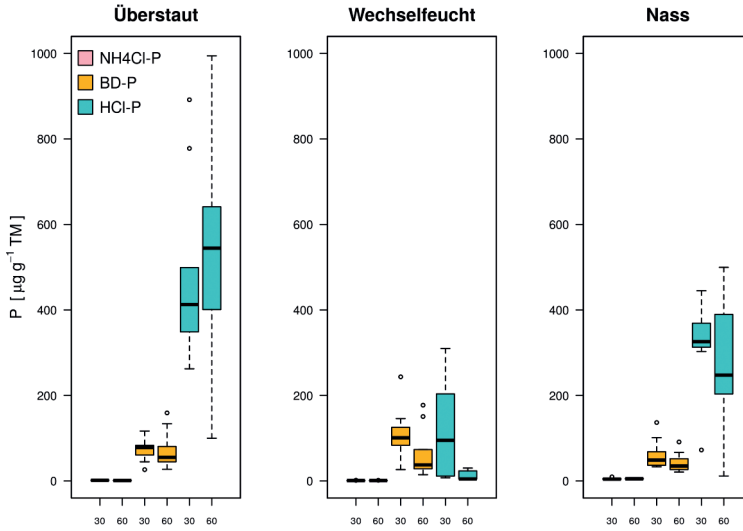

Abb. 3: Box-Whisker-Plot der Gehalte von „desorbierbarem“ (NH_4Cl-P), „redox-sensiblem“ (BD-P) und „säure-löslichem“ Phosphor im Ober- (30) und Unterboden (60) des überstauten, wechselfeuchten und nassen Bereiches
Box-Whisker-Plot of the amount of „desorbable“ (NH_4Cl-P), „reductant-soluble“ (BD-P) and „acid-soluble“ (HCl-P) phosphorus in the upper (30) and lower (60) peat layer of the three investigation areas: flooded (left), periodically wet (middle) and wet (right).

4.2 Bodenwasserchemismus und sauerstoffinduzierter P-Rückhalt

Die pH-Werte im Bodenwasser aller Transekte lagen mit Werten zwischen 6,9-7,8 im neutralen bis basischen Bereich und deuten somit auf ein carbonat-gepuffertes, kalkreiches System hin. In Übereinstimmung zu den erhöhten Metallgehalten in den Torfen wies das

wechselfeuchte Transekt die höchsten Konzentrationen an Calcium, Eisen und Mangan im Bodenwasser auf (Abb. 4). Im Gegensatz dazu lagen aber die Konzentrationen an reaktiv gelöstem Phosphor (SRP) auf einem sehr niedrigen Niveau (120-290 µg L^{-1}). Die SRP-Konzentrationen im Bodenwasser der anderen Transekte lagen um eine Größenordnung höher. Sehr niedrige Konzentrationen an gelöstem Eisen traten im nassen Bereich auf. Diese waren mit 0,05-3,5 mg L^{-1} um den Faktor 4-90 geringer, als in den beiden anderen Transekten. Demgegenüber wurden hier die höchsten Konzentrationen an Chlorid und Sulfat festgestellt.

Aus den unterschiedlichen Konzentrationen an gelöstem Eisen und SRP ergaben sich signifikante Unterschiede für die molaren Fe:P-Verhältnisse. Hohe Eisenkonzentrationen und geringe SRP-Konzentrationen ergaben im wechselfeuchten Transekt Verhältnisse von über 50 im Vergleich zu 4 und 0,8 in den eisenärmeren überstauten und nassen Bereichen. Hier findet sich eine gute Übereinstimmung zu den molaren Fe_{BD}:P_{BD}-Verhältnissen in den Torfen. Die Höhe des sauerstoffinduzierten P-Rückhaltes an der simulierten Mooroberfläche unterschied sich somit deutlich in den verschiedenen Moorbereichen. In den eisenreicheren anoxischen Mischproben der wechselfeuchten und überstauten Bereiche kam es kurz nach der Belüftung zur sichtbaren Ausfällung von rotbraun gefärbten Fe(III)-Hydroxid/Oxyhydraten. Mit einer Ausnahme sanken in beiden Untersuchungszeiträumen die Ausgangskonzentrationen von gelöstem Eisen nach der Belüftung auf Werte unter 0,25 mg L^{-1}. Gleichermaßen sanken die SRP-Konzentrationen in den oxischen Proben auf Werte unter 25 µg L^{-1} und lagen damit im Bereich von SRP-Konzentrationen im Bodenwasser naturnaher Moore. Der P-Rückhalt an der anoxisch/oxischen Phasengrenze überschritt in diesen relativ eisenreichen Moorabschnitten 97 %. In den Proben des nassen Bereiches war nach der Belüftung kein Niederschlag zu beobachten. Die relativ geringen Konzentrationen an gelöstem Eisen und die gleichzeitig relativ hohen SRP-Konzentrationen im anoxischen Bodenwasser mit molaren Fe:P-Verhältnissen < 0.8 bewirkten einen deutlich geringeren Rückhalt von 2-58 %. Dadurch lagen die SRP-Konzentrationen in den belüfteten Proben teilweise oberhalb von 1 mg L^{-1}.

4.3 Oberflächenwasser

Die SRP-Konzentrationen lagen in allen Proben unter 22 µg L^{-1} und zeigten damit eine recht gute Übereinstimmung zum Bodenwasser nach Belüftung und Ausfällung von Fe(III)-P-Verbindungen. Die durchschnittlich höchste Konzentration wurde am „Sernitz Abfluss“ gemessen. Die Oberflächenwasserproben von „Sernitz Zufluss“ und „Sernitz Abfluss“ zeigten im Mittel, mit Ausnahme von SRP, eine deutliche Abnahme der Konzentrationen aller Wasserinhaltsstoffe sowie der elektrischen Leitfähigkeit entlang dieses Transportpfades (Tab. 2). Gesamtphosphor (TP) verringerte sich entlang der untersuchten Fließstrecke um 30 % auf 83 µg L^{-1}, was nach LAWA (1998) einer mäßigen Belastung entspricht. Eine deutlichere Abnahme um einen Faktor > 2-3 zeigt sich bei Sulfat, Chlorid und gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC) sowie gelöstem Eisen.

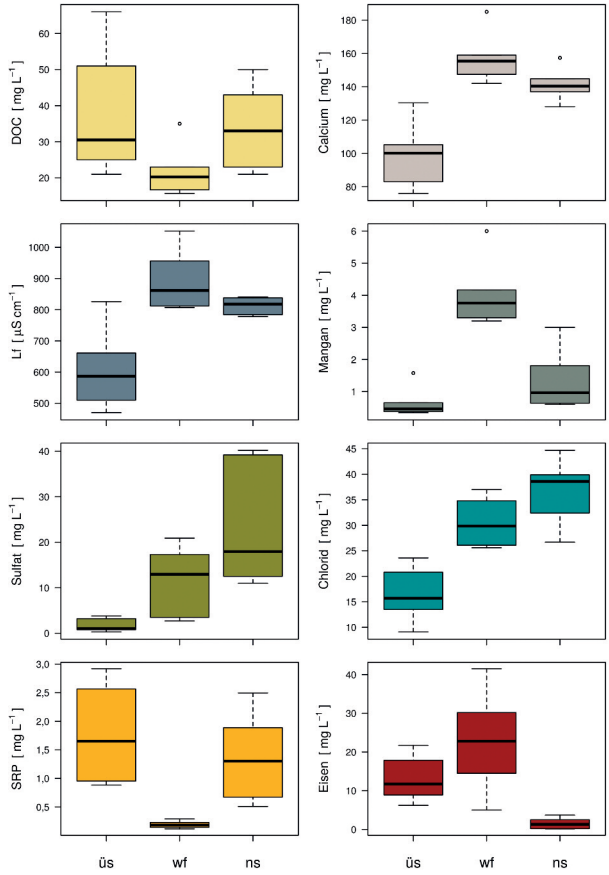

Abb. 4: Box-Whisker-Plot der Konzentrationen von gelöstem organischen Kohlenstoff (DOC), Calcium, Mangan, Sulfat, Chlorid, gelöstem reaktiven Phosphor (SRP) und Eisen sowie der elektrischen Leitfähigkeit (Lf) des anoxischen Bodenwassers im überstauten (üs), wechselfeucht (wf) und nassen (ns) Bereich.
Box-Whisker-Plot of concentrations of dissolved organic carbon (DOC), calcium, manganese, sulphate, chloride, soluble reactive phosphorus (SRP), iron as well as electrical conductivities (Lf) in anoxic pore waters of the flooded (üs), periodically wet (wf) and wet (ns) area.

Zwischen den Messstellen „Moor Zufluss“ und „Moor Abfluss“ erhöhten sich die Konzentrationen von TP und Eisen durchschnittlich um den Faktor 7. Während des Untersuchungszeitraumes wurde eine hohe zeitliche Variabilität der Konzentrationen beobachtet, mit erhöhten Stoffkonzentrationen im Herbst. Insbesondere für die TP-Konzentration konnte eine mehr als 10-fache Erhöhung von 30 auf 528 µg L^{-1} festgestellt werden. Eine solche Erhöhung wurde auch für das Eisen gefunden, so dass angenommen werden kann, dass es sich hierbei hauptsächlich um partikuläre Fe(III)-P-Verbindungen handelte. Die Konzentrationen am „Sernitz Abfluss“ lagen, mit Ausnahme von Sulfat und SRP, unter den Konzentrationen am „Moor Abfluss“.

Tab. 2: Mittlere Konzentrationen (Median, Spannweite in Klammern) ausgewählter Wasserinhaltsstoffe und elektrische Leitfähigkeit (Lf) an verschiedenen Oberflächenwassermessstellen (Abb. 1). Position als UTM-Koordinaten (WGS84).
Average concentrations (median, range in parentheses) and electrical conductivities (Lf) of surface water samples (Fig. 1). Position as UTM coordinates (WGS84).

	Sernitz Zufluss	**Sernitz Abfluss**	**Moor Zufluss**	**Moor Abfluss**
Ostwert	33427161	33429370	33427466	33427789
Nordwert	5882766	5882210	5882088	5882237
Lf [µS cm^{-1}]	1125 (1000-1285)	707 (665-743)	837 (816-866)	915 (768-1047)
SRP [µg L^{-1}]	9 (4-17)	15 (6-22)	9 (4-16)	6 (4-8)
TP [µg L^{-1}]	109 (25-154)	83 (54-122)	36 (25-48)	279 (25-570)
Fe [mg L^{-1}]	0,88 (0,01-2,20)	0,05 (0,04-0,07)	0,15 (0,01-0,52)	0,93 (0,04-3,41)
DOC [mg L^{-1}]	14,4 (6,4-30)	4,2 (3,7-5,1)	6,1 (4,1-7)	12,1 (5,8-21)
NH_4^+ [mg L^{-1}]	0,23 (0,06-0,44)	0,19 (0,1-0,26)	0,04 (0,04-0,05)	0,17 (0,04-0,6)
SO_4^{2-} [mg L^{-1}]	146 (105-170)	25 (48-68)	33 (84-118)	31 (30-74)
Cl^- [mg L^{-1}]	51 (40-62)	25 (22-29)	33 (32-34)	31 (25-37)

5. Diskussion

Nach der Wiedervernässung von Niedermooren kommt es in Abhängigkeit von vorangegangenen Schrumpfungs- und Sackungsprozessen oftmals zu einem anhaltenden Überstau größerer Moorbereiche. In Abhängigkeit vom Wasserdargebot und dem Relief des Moores können sich aber auch Bereiche etablieren, die überwiegend flurnahe Wasserstände oder wechselfeuchte Bedingungen aufweisen. Bei dem Untersuchungsgebiet handelt es sich um ein geneigtes Moor. Unter natürlichen Bedingungen findet der Wasseraustausch meist flächig statt, wohingegen Stauwasserregime kleinflächige Phänomene darstellen. Zum Zeitpunkt der Untersuchung war das Untersuchungsgebiet noch entwässert und durch vorwiegend wechselfeuchte und nur kleinflächig nasse oder überstaute Bereiche charakterisiert. Alle Bereiche wiesen degenerierte Torfe in den oberen Bodenschichten auf, zeigten jedoch erhebliche Unterschiede beim Gehalt mobiler P-Fraktionen und im Bodenwasserchemismus.

5.1 Mobile P-Fraktionen in degradierten Bodenschichten

Für Quellmoore ist zu berücksichtigen, dass die Torfe auch unter natürlichen Bedingungen einen hohen Zersetzungsgrad aufweisen können. Bei hohen Eisenkonzentrationen im anströmenden Grundwasser kommt es wie bei einer Moorentwässerung zu einer fortwährenden Zersetzung der Torfe (Stegmann 2005). Dabei dient dreiwertiges Eisen als Oxidationsmittel für mikrobiell gesteuerte Redoxprozesse und bewirkt die anaerobe Mineralisierung von organischem Material. Dieser Prozess wird durch häufig wechselnde Redoxzustände unter entwässerten Bedingungen noch verstärkt (Li et al. 2012). Der durch die eiseninduzierte Torfmineralisierung gebildete anorganische Phosphor kann an kristalline redox-unempfindlichere Fe(II, III)-Hydroxide/Oxyhydrate adsorbiert werden. Die in solchen Quellenbereichen ebenfalls oft erhöhten Calciumkonzentrationen fördern dabei die Sorption von Phosphat-Anionen an Fe(II, III)-Hydroxide/Oxyhydrate oder auch an organischem Material (Zak et al. 2004).

Die sogenannte „redox-sensible P-Fraktion“ spielt eine entscheidende Rolle bei der Freisetzung von Phosphor nach einer Wiedervernässung. Dabei lagen die Gehalte mit 0,026-0,250 mg g^{-1} TM (Median: 0,101 mg g^{-1} TM) jedoch unterhalb der Werte, die in vergleichbaren, hoch zersetzten Torfen anderer Moore ermittelt wurden (Zak et al. 2010). Der Anteil des „säure-löslichen Phosphors“ war dagegen in dem nassen und überstauten Bereich ungewöhnlich hoch. Aufgrund des Kalkreichtums besitzt der Quellmoorkomplex jedoch eine hohe Pufferkapazität. Diese Fraktion spielt somit bei der P-Mobilisierung nach Wiedervernässung eine untergeordnete Rolle. Einige Pflanzen können jedoch über ihre Wurzeln organische Säuren ausscheiden (Wurzelexsudate) und dadurch auch diese weniger gut löslichen Phosphorverbindungen nutzen. Durch die Verlagerung aus dem Wurzelraum in die oberirdische Biomasse beeinflusst auch diese Fraktion schlussendlich den Phosphorkreislauf im wiedervernässten Moor. Überraschend geringe Gehalte an „säure-löslichem“ Phosphor von weniger als 10 % traten im stark humosen Mineralboden des wechselfeuchten Bereiches auf. Durch die Nutzung weiterer Extraktionsschritte müsste geklärt werden, ob sich mineralische Phosphorverbindungen gebildet haben, die gegenüber der Extraktion mit Salzsäure unempfindlich sind (Hüttle et al. 2000).

Es konnte gezeigt werden, dass der Oberboden im wechselfeuchten Bereich das höchste P-Freisetzungspotenzial aufweist (Tab. 3). Das P-Freisetzungspotenzial der übrigen Transekte ist wesentlich geringer, lag aber dennoch über dem von naturnahen Standorten (Tab. 3). Auf Grundlage des Zusammenhangs zwischen „redox-sensiblem P“ und P-Freisetzung nach Zak et al. (2010) kann die Dauer einer erhöhten P-Freisetzung abgeschätzt werden. Demnach könnten der „redox-empfindliche Phosphor“ im sehr stark humosen Oberboden des wechselfeuchten Transekts über einen Zeitraum von 25 bis 50 Jahren als Quelle für Phosphor dienen. Es ist jedoch fraglich, ob der gesamte „redox-sensible Phosphor“ tatsächlich mobilisiert wird. Die durch Redoxprozesse gesteuerte Mobilisierung kann z.B. durch die Verfügbarkeit von organischem Kohlenstoff limitiert werden (Aldous et al.

2005, KJAERGAARD et al. 2012). Weiterhin wird ein großer Anteil des „redox-sensiblen Phosphors“ an der Redoxgrenzfläche ausgefällt. Dieser kann jedoch unter erneuten anoxischen Bedingungen wieder freigesetzt werden und somit über einen noch längeren Zeitraum hinaus zu erhöhten Phosphorkonzentrationen führen. Unter bestimmten geochemischen Randbedingungen können sich auch unter anoxischen Bedingungen stabile Fe(II)-Phosphate wie Vivianit oder besonders bei pH-Werten oberhalb von 8 Calciumphosphat (z.B. Apatit) bilden und zu einer Verringerung des potenziell freisetzbaren Phosphors beitragen (HOFFMANN et al. 2009).

Tab. 3: Hochrechnung der Phosphormenge in der degradierten Bodenschicht (0-30 cm), der nach einer Wiedervernässung der drei Untersuchungsbereiche potenziell mobilisiert werden kann, im Vergleich zu naturnahen Niedermooren Polens.
Upscaling of the amount of phosphorus in the upper degraded soil layer (0-30 cm), which can be potentially mobilized under rewetted conditions in comparison to natural fens of Poland.

	Gesamt-P im Boden	**“redox-sensibler-P”**	**“säure-löslicher-P”**
	kg ha^{-1}		
überstaut	785	40	249
wechselfeucht	3086	170	190
nass	968	45	203
naturnah[1]	42 (40-70)	5 (2-5)	2 (1-2)

[1] Median und Spannweite aus stichprobenartig erhobenen Daten von gering zersetzten Torfen naturnaher polnischer Moore aus einer Bodentiefe von 0-30 cm (ZAK et al. 2010, 2008b)

5.2 Interne Phosphorfreisetzung und Abschätzung des P-Austragrisikos

Zu den Zielen der Wiedervernässung von Niedermooren zählt die Verbesserung der Wasserqualität der angrenzenden Gewässer. Sind die Torfe an der Mooroberfläche stark degeneriert (vererdet oder vermulmt), kann es nach einer Moorvernässung zu einer verstärkten P-Freisetzung ins Bodenwasser (interne P-Freisetzung) kommen. Es hat sich jedoch bestätigt, dass es in der Regel bei molarem Fe:P-Verhältnis von mehr als 3 zu einem nahezu vollständigen P-Rückhalt bei Austritt des Bodenwassers an der Mooroberfläche kommt. In diesem Fall stellten sich in den oxischen Proben SRP-Konzentrationen von weniger als 30 µg L^{-1} ein, die in der Regel als unbedenklich für angrenzende Gewässer angesehen werden können. Im wechselfeuchten Bereich lag der P-Rückhalt bei annähernd 100 %. Auffällig waren die sehr niedrigen SRP-Konzentrationen im anoxischen Bodenwasser von unter 300 µg L^{-1}, die sich bei der zweiten Untersuchung im Herbst 2015, als flurnahe Wasserstände vorlagen, sogar noch verringerten. Aufgrund der hohen Gehalte an „redox-sensiblem Phosphor“ im Oberboden wäre ein Anstieg der SRP-Konzentrationen zu erwarten gewesen. Das Ausbleiben lässt sich durch die hohen Fe_{BD} :P $_{BD}$-Verhältnisse von 17-256 (Median: 68) in der oberen Bodenschicht erklären. Durch den hohen Über-

schuss an Eisen waren offenbar genügend freie Bindungsplätze vorhanden, um freigesetztes Phosphat zu resorbieren. Die hohen Calcium-Konzentrationen begünstigten diese Sorption, so dass es zu keiner erhöhten Netto-P-Freisetzung ins Bodenwasser kam.

Im überstauten Bereich mit den durchschnittlich höchsten SRP-Konzentrationen kam es mit Ausnahme einer Mischprobe ebenfalls zu einem nahezu 100%igen P-Rückhalt. Das einmalige Auftreten einer unvollständigen Eisenausfällung und der damit verringerte P-Rückhalt könnte auf die Bildung von gelösten Eisen-Huminstoffkomplexen (Zak et al. 2004) oder andere stabile gelöste Eisenverbindungen zurückgeführt werden. Im nassen Bereich kam es zu einem sehr geringen P-Rückhalt von 2-59 %. Hier war das molare Fe:P-Verhältnis kleiner als 1, so dass nicht genügend Eisen für den P-Rückhalt zur Verfügung stand. Die einerseits erhöhten P-Konzentrationen und die insgesamt niedrigen Eisenkonzentrationen lassen sich vermutlich auch auf eine verstärkte Sulfatreduktion in diesem Moorabschnitt zurückführen. Die mikrobiell katalysierte Sulfatreduktion führt zu einer verstärkten Zersetzung von organischem Material und zu einer Freisetzung von organisch gebundenem Phosphor (Geurts et al. 2009, Lamers et al. 2002). Der gebildete Schwefelwasserstoff reagiert mit Fe^{2+}-Ionen zu schwer löslichen Eisensulfiden. Außerdem kann der Schwefelwasserstoff Fe(III)-P-Verbindungen auf chemischem Wege reduzieren und somit zusätzlich zu einer erhöhten Phosphorfreisetzung ins Bodenwasser beitragen.

Die Untersuchung des Oberflächenwassers ergab jedoch, dass trotz erhöhtem P-Austragsrisiko aus den eisenarmen Bereichen der hohe Eisenüberschuss im Quellmoorkomplex in der Summe einen hohen P-Rückhalt bewirkt. Dafür sprechen die generell niedrigen SRP-Konzentrationen des Oberflächenwassers sowohl im Moor als auch an den beiden Messstellen der Sernitz (< 30 µg L^{-1}). Die deutlich erhöhten TP-Konzentrationen an „Moor Abfluss“ gegenüber „Moor Zufluss“ (Tab. 2) geben aber einen Hinweis darauf, dass unter den im Jahr 2015 noch entwässerten Bedingungen eine Belastungssituation besteht. Die Erhöhung der TP-Konzentrationen lässt sich durch an Eisenpartikel gebundenem P erklären, denn SRP (als Teilmenge des TP) liegt an allen Messstellen auf einem sehr niedrigen Konzentrationsniveau (< 30 µg L^{-1}, Tab. 2). Kommt es zu einer weiteren Zunahme der Überstauflächen, in denen Eisenpartikel und daran gebundener P akkumulieren, besteht das Risiko einer weiteren Zunahme der TP-Einträge nach der Moorvernässung bspw. nach Starkregen. Eine Gefahr erhöhter P-Austräge besteht auch dann, wenn sich im Sommer bei hohen Wassertemperaturen sauerstoffarme Bedingungen im Freiwasser etablieren. Dann kommt es zu einer Rücklösung von an Fe(III)-Partikeln gebundenem P und/oder die Mooroberfläche fungiert nicht mehr als „Redoxbarriere“. Aus diesen Gründen ist es wichtig, dass Überstaubedingungen möglichst vermieden werden. Unter wechselfeuchten Bedingungen wird der P-Rückhalt durch Eisenausfällung gefördert, aber die Torfmineralisierung schreitet voran und die Bildung von Torfen als dauerhafte Senke für P und andere Nährstoffe findet nicht statt.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit lassen sich für die Wiedervernässung der Sernitzniederung folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Ein weiterer Anstieg der P-Einträge in die Sernitz ist nicht zu erwarten.
2. Überstauphasen sollten insbesondere in den Sommermonaten vermieden werden.
3. Der Abtrag des vererdeten Oberbodens setzt die interne P-Freisetzung herab.

6. Danksagung

Wir danken allen Mitarbeitern der Abteilung 6 „Chemische Analytik und Biogeochemie“ des Instituts für Gewässerökologie und Binnenfischerei für Ihre Hilfe und Unterstützung bei der Feldarbeit und der umfangreichen Analyse der Wasser- und Feststoffproben. Dem Team des Projekts „Life+Schreiadler“ (LIFE10 NAT/DE/000012) gilt unser besonderer Dank bei der Unterstützung der Freilanduntersuchungen. Zusätzlich danken wir Prof. Dr. Jutta Zeitz, Dr. Joachim Blankenburg und Prof. Dr. Volker Schweikle für die kritische Begutachtung einer früheren Version und die hilfreichen Hinweise zur Überarbeitung.

7. Literaturverzeichnis

Aldous, A., McCormick, P., Ferguson, C., Graham, S. & Craft, C. (2005): Hydrologic regime controls soil phosphorus fluxes in restoration and undisturbed wetlands. – Restoration Ecology **13** (2): 341-47; Blackwell Science Inc.

Dwd, Deutscher Wetterdienst (2016): Climate Data Center. – http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html, Letzter Zugriff 12.06.2016

Erwin, K. (2009): Wetlands and Global Climate Change: The Role of Wetland Restoration in a Changing World. – Wetlands Ecology and Management **17** (1): 71-84; Springer.

Gelbrecht, J., Zak, D. & Augustin, J. (2008): Biogeochemische Prozesse in Niedermooren und deren Wirkung auf Gewässer und Klima. – In: Gelbrecht, J., Zak, D. & Augustin, J. (Hrsg.): Phosphor- und Kohlenstoffdynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetals in Mecklenburg-Vorpommern. Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten: Berichte des IGB **26**: 12-19.

Geurts, J., Sarneel, J.M., Willers, B.J.C., Roelofs, J.G.M., Verhoeven, J.T.A. & Lamers, L. (2009): Interacting effects of sulphate pollution, sulphide toxicity and eutrophication on vegetation development in fens: a mesocosm experiment. – Environmental Pollution **157** (7): 2072-2081.

Hesslein, R. H. (1976): An in Situ Sampler for Close Interval Pore Water Studies. – Limnology and Oceanography **21** (6): 912-14.

Hoffmann, C., Kjaergaard, C., Uusi-Kamppa, J., Hansen, H.C.B. & Kronvang, B. (2009): Phosphorus retention in riparian buffers: Review of Their Efficiency. – Journal of Environmental Quality **38** (5): 1942-1955.

HUPFER, M., GÄCHTER, R. & GIOVANOLI, R. (1995): Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. – Aquatic Sciences **57** (4): 305–324.

HÜTTLE, R. F., WEBER, E. & KLEM, D. (HRSG.) (2000): Ökologisches Entwicklungspotential der Bergbaufolgelandschaften im Niederlausitzer Braunkohlerevier. – 384 S.; B.G, Teubner.

KADLEC, H. & WALLACE, S. (2008): Treatment Wetlands. – 1046 S.; CRC Press.

KJAERGAARD, C., HEIBERG, L., JENSEN, H. & HANSEN, H.C.B. (2012): Phosphorus mobilization in rewetted peat and sand at variable flow rate and redox regimes. – Geoderma **173-174**: 311-21.

KOSKA, I. (2001): Ökohydrologische Kennzeichnung. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde: 92-112; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

KOSKA, I. & STEGMANN, H. (1996): Ökologische Zustandsbewertung und Entwicklungsziele von Quell- und Wasserabflußsystemen in der Agrarlandschaft. D.4.2 BMBF-TP 3.2 „Quell- und Wasserabflußsysteme". Zwischenbericht BMBF-TP 3.2.

KOVALEV, N., SPUNDFLASCH, F. & KRAUTZ, S. (2015): Renaturierung der Sernitz und angrenzende Moore oberhalb Greiffenberg. – Genehmigungsplanung. Büro für Ingenieurbiologie, Umweltplanung und Wasserbau.

LAMERS, L. P. M., FALLA, S.-J., SAMBORSKA, E. M., VAN DULKEN, I. A. R., HENGSTUM, G. & ROELOFS, J. G. M. (2002): Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. – Limnology and Oceanography **47** (2): 585-593.

LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA) (HRSG.) (1998): Beurteilung der Wasserbeschaffenheit von Fließgewässern in der Bundesrepublik Deutschland – Chemische Gewässergüteklassifikation: 80 S.

LI, Y., YU, S., STRON, J. & WANG, H. (2012): Are the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus driven by the "FeIII–FeII redox wheel in dynamic redox environments? – Journal of Soils and Sediments **12** (5): 683-693.

LUGV, REGIONALABTEILUNG OST 5.1. (2014): Plangenehmigungsverfahren für das Vorhaben „Verbesserung der hydrologischen Situation im Gebiet Sernitz Süd- West". – Stellungnahme.

LUTHARDT, V. (2014a): Naturnahe Moore und ihre Gefährdung. – In: LUTHARD, V. & ZEITZ, J.: Moore in Brandenburg und Berlin: 135-138; Natur+Text GmbH.

LUTHARDT, V. (2014b): Moore im Funktionsgefüge der Landschaft. – In: LUTHARD, V. & ZEITZ, J.: Moore in Brandenburg und Berlin: 14-17; Natur+Text GmbH.

OPENSTREETMAP (OSM) (2017): © OpenStreetMap und Mitwirkende, CC-BY-SA 2.0

SCHEFFER, B. & BLANKENBURG, J. (1993): The determination of the bulk-density of peat soils. – Agrarbiological Research – Zeitschrift für Agrarbiologie, Agrikulturchemie und Ökologie **46** (1): 46-53.

SCHOLZ, E. (1962): Die naturräumliche Gliederung Brandenburgs. – Pädagogisches Bezirkskabinett (Hrsg.): 71 S.

STEGMANN, H. (2005): Die Quellmoore im Sernitztal (NO-Brandenburg) – Genese und anthropogene Bodenveränderungen. – Dissertation, Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald: 221 S.

STEGMANN, H. & EDOM, F. (2014): Moorkundliches und hydrogeologisches Gutachten für das Projektgebiet 10 B „Sernitztal und Sernitzmoor / Mitte“ (Ortschaft Greiffenberg im Nordosten Brandenburgs, Landkreis Uckermark). – Gutachten: 112 S.

SUCCOW, M. & H. JOOSTEN (Hrsg.) (2001): Landschaftsökologische Moorkunde. – 340 S.; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

SUCCOW, M. & KOSKA, I. (2001): Nutzung der Moore – Schutz der Moore: Aktuelle Erfordernisse. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde: 471-472; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

SUCCOW, M. & STEGMANN, H. (2001): Moorsubstrate. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): Landschaftsökologische Moorkunde; Stuttgart (Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).

WAGNER, T. (2015): Ökologische Charakterisierung des Sernitzmoores (West) auf Grundlage des Vegetationsformenkonzeptes – Akuteller Zustand und Vergleich mit dem Zustand von 1994. – Magisterarbeit, Universität Potsdam: 78 S.

ZAK, D. & GELBRECHT, J. (2014): Die Bedeutung der Moore für den Schutz der Gewässer. – In: LUTHARD, V. & ZEITZ, J. (HRSG.): Moore in Brandenburg und Berlin: 218-224; Rangsdorf; Natur+Text GmbH.

ZAK, D., AUGUSTIN, J. & GELBRECHT, J. (2008a): Biogeochemische Prozesse in Niedermooren und deren Wirkung Auf Gewässer Und Klima. In: GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (Hrsg.): Phosphor- und Kohlenstoffdynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetals in Mecklenburg-Vorpommern. Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten: Berichte des IGB **26**: 12-19.

ZAK, D., GELBRECHT, J. & STEINBERG, C.E.W. (2004): Phosphorus retention at the redox interface of peatlands adjacent to surface waters in northeast Germany. – Biogeochemistry **70**(3): 359-370.

ZAK, D., WAGNER, C., GELBRECHT, J. & STEINBERG, C.E.W. (2008b): Evaluation of phosphorus mobilization potential in rewetted fens by an improved sequential chemical extraction procedure – European Journal of Soil Science **59** (6): 1191-1201.

ZAK, D., WAGNER, C., PAYER, B., AUGUSTIN, J. & GELBRECHT, J. (2010): Phosphorus mobilization in rewetted fens: the effect of altered peat properties and implications for their restoration. – Ecological Applications **20** (5) 1336-1349.

ZAK, D., MEYER, N., CABEZAS, A., GELBRECHT, J., MAUERSBERGER, R., TIEMEYER, B., WAGNER, C. & MCINNES. R. (2015): Topsoil removal to minimize internal eutrophication in rewetted peatlands and to protect downstream systems against phosphorus pollution: A case study from NE Germany. – Ecological Engineering In Press.

ZWIRNNMANN, E., KRÜGER, A. & GELBRECHT, J. (1999): Analytik im Zentralen Chemielabor des IGB – Berichte des IGB (**9**): 3-24, akt. 2013.

Anschriften der Verfasser:

M. A. Westphalen
Chemische Analytik und Biogeochemie
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
Müggelseedamm 301
D-12587 Berlin
E-Mail: marc61@gmx.de

Prof. Dr. G. Lischeid
Institut für Landschaftswasserhaushalt
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V.
Eberswalder Straße 84
D-15374 Müncheberg
E-Mail: lischeid@zalf.de

R. Meier-Uhlherr
Landesumweltamt Brandenburg
Seeburger Chaussee 2
D-14476 Potsdam, OT Groß Glienicke
E-Mail: ron.meier-uhlherr @lfu.brandenburg.de

Dr. D. Zak
Universität Rostock
Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
Justus-von-Liebig-Weg 6
D-18059 Rostock
E-Mail: zak@igb-berlin.de

Manuskript eingegangen am 29. April 2017,
begutachtet und angenommen am 21. Juli 2017