

TELMA	Band 39	Seite 119 - 138	5 Abb., 3 Tab.	Hannover, November 2009
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

## Boden- und wasserchemische Veränderungen in degradierten Torfmoosmooren und Möglichkeiten ihrer Restaurierung unter Naturschutzaspekten – dargestellt am Beispiel Berliner Moore

Alterations of soil and water chemistry in degraded *Sphagnum* fens  
of the Berlin area, and options of their restoration under the aspect of  
nature conservation

DOMINIK ZAK, PEGGY STEFFENHAGEN und JÖRG GELBRECHT

### Zusammenfassung

Die meist kleinflächigen Torfmoosmoore des nordostdeutschen Tieflandes besitzen einen hohen natur-  
schutzfachlichen Wert und wurden meist als Naturschutzgebiete ausgewiesen. Sie sind aber durch  
großflächige Grundwasserabsenkungen stark gefährdet. Im Gegensatz zu den gut dokumentierten Ver-  
änderungen der Flora und Fauna der Moore gibt es nur lückenhafte Kenntnisse darüber, wie sich  
langjährige Wasserdefizite auf die chemischen Eigenschaften der Torfe ausgewirkt haben. Auch ist noch  
weitgehend unbekannt, ob die lang anhaltende Torfmineralisierung im Falle einer dauerhaften Wieder-  
vernässung zu einem erhöhten Risiko der Nährstofffreisetzung, insbesondere von Phosphor (P), beiträgt.  
Für die Beantwortung dieser Fragen wurden Porenwasseruntersuchungen mittels Dialysesammlertechni-  
k in den wechselfeuchten Berliner Mooren durchgeführt und ein neues sequentielles chemisches Ex-  
traktionsverfahren zur Bestimmung des P-Freisetzungspotenzials in Torfen angewendet. Es ließ sich zei-  
gen, dass die Nährstoffkonzentrationen im Porenwasser im Vergleich zu naturnahen Referenzmooren  
deutlich höher waren und eine erhebliche Anreicherung von redox-empfindlich gebundenem P in den  
stark zersetzten oberen Torfschichten stattgefunden hat. Im Falle einer dauerhaften Wiedervernässung  
wird dieser P freigesetzt und führt zu einer zusätzlichen Eutrophierung der ursprünglich oligotroph-sau-  
ren Moore. Für den Erhalt bzw. die Förderung torfmoosmoortypischer Floren- und Faunenelemente wird  
bei der Revitalisierung degradierten Torfmoosmoore deshalb folgendes Management vorgeschlagen: (1)  
Wiederherstellung der ursprünglichen hydrologischen Bedingungen, (2) zeitgleiche partielle Gehölzent-  
fernung und im Falle des Auftretens von Röhrichten Pflegemahd mit dem Ziel des Nährstoffentzuges und  
(3) Entfernung der stark zersetzten oberen Torfschicht („Flachabtorfung“) in besonders stark gestörten  
Moorbereichen zur Verhinderung der Nährstofffreisetzung nach der Wiedervernässung.

## Abstract

*Sphagnum* fens of the north-eastern lowlands of Germany are mostly small-area and are of importance for nature conservation due to a specialised flora and fauna. But nearly all fens are endangered due to lowering of the groundwater table in their catchments. In contrast to the well documented changes of the flora and fauna knowledge on changes of chemical peat characteristics due to long-term desiccation of the fen types is poor. Furthermore, it is nearly unknown, whether peat mineralization will contribute to a risk enhancement of phosphorus release in case of fen rewetting as a restoration measure. Therefore, we investigated pore water chemistry of degraded Berlin *Sphagnum* fens with changing groundwater tables by means of the dialysis method. Additionally, a newly developed sequential chemical extraction procedure was applied to estimate the risk of phosphorus release after fen rewetting. Our results showed that nutrient pore water concentrations (P, N) of degraded fens with changing groundwater table are strongly enhanced compared with pristine fens (NE-Germany, NW Poland). Furthermore, in the upper soil layer with very decomposed peat large amounts of redox-sensible bound phosphorus had been accumulated. In case of long-term rewetting this phosphorus can be released due to anoxic conditions resulting in eutrophication of the originally oligotrophic-acid fens. Therefore, we suggest following management measures to protect and improve flora and fauna typically for *Sphagnum* fens: (1) Restoration of the hydrology of the fen drainage basin being the most important step, (2) partial removal of shrubs and small trees, and mowing in case of reed succession to support the reoligotrophication, and (3) top soil removal in those parts of the *Sphagnum* fen which consist of very decomposed peat in the upper soil to reduce the risk of P release after rewetting.

## 1. Einleitung

Torfmoosmoore treten im nordostdeutschen Tiefland verbreitet auf, sind jedoch oft nur von geringer Größe (< 5 ha). Aus hydrogenetischer Sicht sind sie vorwiegend den Kessel- und Verlandungsmooren der Jungmoränengebiete Mecklenburg-Vorpommerns, Schleswig-Holsteins, Brandenburgs und Berlins und den Versumpfungsmooren in den Altmoränengebieten zuzuordnen (JOOSTEN & SUCCOW 2001). Die meisten Torfmoosmoore des nordostdeutschen Tieflandes sind aufgrund der klimatischen Bedingungen auf eine Versorgung durch das Grundwasser angewiesen und werden entsprechend als minerotrophe Moore bezeichnet.

Wachsende, minerotrophe Torfmoosmoore benötigen einen Überschuss an nährstoff- und basenarmem Grundwasser und gehören aus Sicht der ökologischen Moortypen zu den oligo- oder mesotroph-sauren Mooren (SUCCOW 2001a, b). Sie können natürlicherweise schwankende Grundwasserstände durch Oszillation ausgleichen, wodurch eine dauerhafte Wassersättigung des Bodens gewährleistet wird. Die hydrologischen Bedingungen sowie die Nährstoffarmut der Torfmoosmoore sind die Grundlage für eine artenarme, aber hoch spezialisierte Flora und Fauna (z.B. TIMMERMANN & SUCCOW 2001, GELBRECHT et al. 2003). Es handelt sich überwiegend um offene Flächen. Gehölze, meist Moor-Kiefer (*Pinus sylvestris* var. *turfosa*) oder Moor-Birke (*Betula pubescens*), treten nur in sehr lichten Beständen auf und sterben in sehr nassen Jahren oder mit zunehmenden Alter wieder ab (PASSARGE & HOFFMANN 1968, JESCHKE et al. 1989, NEUHÄUSL 1975, AGREN et al. 1983).

Die floristischen und faunistischen Besonderheiten der Torfmoosmoore führten wiederholt zu einer sehr frühen Unterschutzstellung, die z. T. schon 100 Jahre zurückliegt (z.B. NSG Plagefenn bei Eberswalde seit 1907 oder NSG Kleiner Griesensee seit 1937, AUTORENKOLLEKTIV 1973). Gegenwärtig sind fast alle Torfmoosmoore des nordostdeutschen Tieflandes als Schutzgebiete ausgewiesen. Unberücksichtigt blieb jedoch, dass für die Moore auch ein „Schutz der Hydrologie“ ihrer Einzugsgebiete notwendig ist, was in den letzten Jahren und Jahrzehnten schwerwiegende Folgen für den Zustand der Moore hatte. Durch großräumige Grundwasserabsenkungen zur landwirtschaftlichen Nutzung von Feuchtgebieten, für Bergbauaktivitäten oder die Grundwasserentnahme zur Trinkwassergewinnung waren oft auch die Torfmoosmoore betroffen. Teilweise wurden die Moore auch durch gezielt angelegte Gräben entwässert und aufgeforstet. Sinkende Wasserstände verursachten eine Mineralisierung der Torfe. Dabei werden organisch gebundene und schlecht verfügbare N- und P-Verbindungen in anorganische Bindungsformen überführt. Gleichzeitig werden Fe(II)-Verbindungen (z.B. Pyrit) unter Bildung von Fe(III)-Hydroxiden oxidiert. Diese binden wiederum anorganische Phosphate, die unter erneut anoxischen Bedingungen leicht auflösbar sind (GELBRECHT & ZAK 2008, ZAK et al. 2008a). Insgesamt stieg durch diese Prozesse das Nährstoffangebot in der oberen Bodenschicht. Konkurrenzstarke nährstoffliebende Pflanzen, z.B. Schilf (*Phragmites australis*) oder Pfeifengras (*Molinia caerulea*) wurden gefördert und verdrängten die typische Moorvegetation (BÜRGER-ARNDT 1994, PFADENHAUER & LÜTKE TWENHÖVEN 1986, ZIMMERMANN 1987). Gleichzeitig setzte eine Sukzession zu Waldstadien ein, wodurch die Oszillationsfähigkeit der Moore stark eingeschränkt wurde bzw. verloren ging.

Die fortschreitende Degradierung der Torfmoosmoore, die im gesamten nordostdeutschen Tiefland zu beobachten ist, lässt sich in vielen Fällen nur durch eine Anhebung der Grundwasserstände im Einzugsgebiet der Moore aufhalten. Erste Erfahrungen der Wiedervernässung von Torfmoosmooren zeigten jedoch, dass auch bei günstigen hydrologischen Bedingungen eine schnelle Wiederherstellung des ursprünglichen Vegetationszustandes nicht stattfindet (JORTAY & SCHUMACKER 1989, JOOSTEN 1995). Die Ursachen für diese Entwicklungen wurden bislang nicht eindeutig geklärt. In wiedervernässten basen- und nährstoffreichen Niedermooren konnte dagegen nachgewiesen werden, dass stark veränderte Eigenschaften der oberen Torfschichten und die damit verbundene hohe Nährstofffreisetzung die Regeneration mesotropher Pflanzengesellschaften um Jahrzehnte verzögern kann (ZAK & GELBRECHT 2007, ZAK et al. 2008a). Im Gegensatz zu diesen degradierten und meist landwirtschaftlich genutzten Mooren gibt es für die Torfmoosmoore nur unzureichende Kenntnisse hinsichtlich des Nährstofffreisetzungspotenzials im Falle einer Wiedervernässung. Deshalb ist es Ziel der Arbeit, am Beispiel ausgewählter Berliner Torfmoosmoore – unter Einbeziehung von Untersuchungen hydrologisch weitgehend ungestörter und noch wachsender Torfmoosmoore in Brandenburg und Nordwest-Polen – folgende Fragen zu beantworten:

- Wie hat sich das P-Freisetzungspotenzial in den oberen Bodenschichten durch langjährige Wasserdefizite verändert?
- Wie wirken sich stark schwankende Wasserstände in degradierten Torfmoosmooren auf den Porenwasserchemismus und damit die Nährstoffversorgung aus und welche Entwicklungen sind bei einer dauerhaften Wiedervernässung zu erwarten?
- Welche ergänzenden praktischen Maßnahmen sind im Falle einer Wiedervernässung notwendig, um eine Wiederausbreitung bzw. erneute Etablierung der typischen Vegetation der Torfmoosmoore zu beschleunigen und ggf. vorhandene Nährstoffüberschüsse zu reduzieren?

## 2. Kurzcharakterisierung der untersuchten Torfmoosmoore

Zur Beantwortung der zuvor formulierten Fragen wurden sechs degradierte Torfmoosmoore Berlins im Südosten (Köpenicker Stadtforst) und im Südwesten (Grunewald) der Stadt untersucht. Ihr aktueller und aus moorökologischer Sicht sehr kritischer Zustand kann als repräsentativ für zahlreiche degradierte Torfmoosmoore des nordostdeutschen Tieflandes gelten. Ergänzende Untersuchungen erfolgten in drei naturnahen Torfmoosmooren (= Referenzmoore) im Land Brandenburg am südöstlichen Berliner Stadtrand sowie in NW-Polen östlich von Szczecin. Eine Kurzcharakterisierung aller Moore erfolgt in Tabelle 1.

Die Referenzmoore sind den aktuell nur noch selten vorhandenen oligotroph-sauren Mooren zuzuordnen (SUCCOW 2001a). Basierend auf Literaturangaben zu den Pflanzengesellschaften vor der Entwässerung (HUECK 1925, 1926, 1938, ZIMMERMANN 1987) gehörten auch alle Berliner Moore zu diesem Moortyp. Die Entwässerung der Berliner Moore erfolgte in den letzten Jahrzehnten durch die Förderung von Trinkwasser, was zu einer starken Absenkung der Grundwasserspiegel in ihren jeweiligen Einzugsgebieten führte, der meist durchschnittlich 1 m oder mehr betrug. Beispielhaft wird das in Abbildung 1 für die Krumme Laake (vgl. Tab. 1) verdeutlicht.

Die mit der Trinkwasserförderung einhergehende Austrocknung der ehemals offenen Torfmoosmoore führte zur Etablierung nährstoffliebender Pflanzengesellschaften und zur Sukzession zu Waldstadien (Tab. 1). Gleichzeitig setzten Torfmineralisierung und Nährstofffreisetzung ein. Fast ausnahmslos haben die untersuchten Moore ihre Oszillationsfähigkeit verloren. Sie ist nur noch in den zentralen Schwinggrasen von Bars- und Pechsee (Tab. 1) vorhanden. Alle anderen Moore sind jetzt durch stark schwankende Moorwasserstände gekennzeichnet mit sommerlichen Grundwasserständen bis 50 cm unter Flur und winterlichem Überstau infolge erhöhter Niederschläge und geringer Verdunstung. Ursprünglich vorhandene oligotrophente Arten wie *Rhynchospora alba*, *Hammarbya paludosa*, *Scheuchzeria palustris* und *Carex limosa* starben aus oder weisen nur noch Rest-

Tab. 1: Lage und Kurzcharakterisierung der untersuchten Torfmoosmoore  
Location and characterisation of *Sphagnum* fens under investigation

	Lage	Hydrogene- tischer Moortyp	Dominante Pflanzenarten auf den Untersuchungsflächen
<b>Degradierete Torfmoosmoore (Berliner Stadtgebiet)</b>			
Krumme Laake bei Müggelheim (westlicher Moorarm)	N 52° 25' E 13° 41'	Verlandungs- moor	<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Frangula alnus</i> , <i>Alnus glutinosa</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Molinia caerulea</i> , <i>Phragmites australis</i>
Kleine Pelzlaake	N 52° 25' E 13° 38'	Kesselmoor	<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Polytrichum commune</i> , <i>Molinia caerulea</i> , <i>Eriophorum</i> <i>vaginatum</i> , <i>Calamagrostis canescens</i> , <i>Vaccinium</i> <i>oxycoccus</i> , <i>Carex lasiocarpa</i> , <i>Juncus effusus</i>
Teufels- seemoor	N 52° 25' E 13° 38'	Kesselmoor	<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> , <i>Molinia caerulea</i> , <i>Polytrichum commune</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Vaccinium</i> <i>oxycoccus</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Phragmites australis</i>
Barssee	N 52° 28' E 13° 12'	Kesselmoor	<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>turfosa</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Phragmites australis</i>
Pechsee	N 52° 28' E 13° 12'	Kesselmoor	<i>Betula pubescens</i> , <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>turfosa</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Molinia caerulea</i> , <i>Juncus effusus</i>
Hundekehle- fenn (mittle- rer Teil)	N 52° 28' E 13° 15'	Verlandungs- moor	<i>Alnus glutinosa</i> , <i>Molinia caerulea</i> , <i>Sphagnum</i> spp., <i>Juncus effusus</i>
<b>Referenzmoore (Land Brandenburg und NW-Polen)</b>			
Kablow- Ziegelei	N 52° 19' E 13° 43'	Kesselmoor	<i>Sphagnum</i> spp., <i>Vaccinium oxycoccus</i> , <i>Andromeda</i> <i>polifolia</i> , <i>Eriophorum angustifolium</i>
Rosiczka (Polen)	N 53° 42' E 14° 42'	Kesselmoor	<i>Sphagnum</i> spp., <i>Vaccinium oxycoccus</i> , <i>Eriophorum</i> <i>angustifolium</i> , <i>Ledum palustre</i>
Mszar (Polen)	N 53° 47' E 15° 31'	Kesselmoor	<i>Sphagnum</i> spp., <i>Carex</i> spp., <i>Vaccinium oxycoccus</i> , <i>Scheuchzeria palustris</i> , <i>Rhynchospora alba</i>

bestände auf (*Andromeda polifolia*). Gleiche Entwicklungen sind auch in den meisten ehemals oligotroph-sauren Torfmoosmooren des gesamten nordostdeutschen Tieflandes zu beobachten.

Infolge der Torfmineralisierung kam es in den untersuchten Berliner Torfmoosmooren zu einer erwarteten stärkeren Torfzersetzung in den oberen Bodenschichten, zur Erhöhung der Trockenrohdichte und zur Anreicherung von Phosphor, Eisen- und Aluminiumverbindungen sowie teilweise von Stickstoff und entsprechend veränderten C/N-, C/P- und N/P-Verhältnissen (Tab. 2).

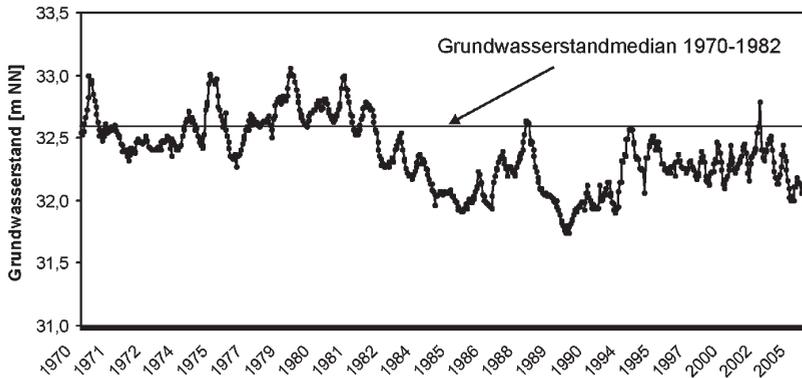


Abb. 1: Grundwasserstände (Pegel 9565) des angrenzenden mineralischen Bereiches der Krummen Laake (Müggelheim, Berlin). 1982 setzte im Einzugsgebiet des Moores die Trinkwasserförderung ein (unveröff., Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verkehr Berlin, SCHEFFLER, pers. Mitt.).

Groundwater level (gauge 9565) of the adjacent mineral area of the fen „Krumme Laake“ (Berlin). Pumping for drinking water started in the fen catchment in 1982 (unpubl., Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verkehr Berlin, SCHEFFLER, pers. communication).

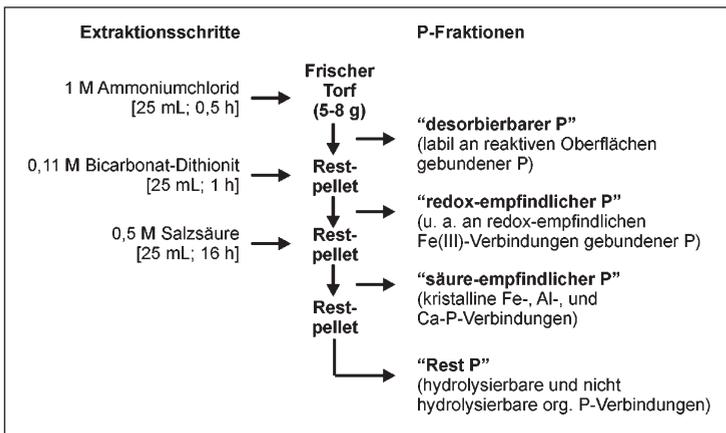


Abb. 2: Verkürztes Analysenschema zur Bestimmung von unterschiedlich mobilisierbaren P-Fractionen in Torfen (nach ZAK et al. 2008a).

Shortened analytical scheme for the determination of different operationally defined P fractions in peat (after ZAK et al. 2008a).

### 3. Material und Methoden

#### 3.1 Bestimmung des P-Freisetzungspotenzials

Zur Bestimmung des P-Freisetzungspotenzials wurden in den degradierten Berliner Torfmoosmooren jeweils 6 Proben (ca. 500 g) aus der oberen Bodenschicht mit stark zersetzten Torfen aus 10 bis 20 cm Tiefe entnommen. Im Falle der im Zentrum noch schwingenden Moore Barssee und Pechsee wurden die stark degradierten Randbereiche untersucht. Der Moorwasserspiegel lag zu den Beprobungsterminen (Juli/August 2008) an allen Torfbeprobungspunkten mehr als 30 cm unter Flur. Um mögliche Veränderungen des P-Freisetzungspotenzials in den stark zersetzten Torfen zu verdeutlichen, wurden zusätzlich in diesen Torfmoosmooren jeweils 6 Proben schwach zersetzter Torfe aus einer Tiefe von 40 bis 50 cm entnommen. Ergänzend dazu wurden schwach zersetzte Torfe aus der oberen Bodenschicht (5-25 cm) der Referenzmoore (Kablow-Ziegelei: Februar 2007, Rosiczka: August 2005, Mszar: Juni 2006) untersucht (vgl. auch Tab. 2).

Die Torfe wurden direkt nach der Probenahme in luftdicht verschließbare Gefrierbeutel verpackt, gekühlt ins Labor transportiert und bis zum darauffolgenden Tag zur Bestimmung des P-Freisetzungspotenzials sowie von Trockenmasse, Glühverlust und Elementgehalt bei 4°C gelagert. Das Phosphorfreisetzungspotenzial der Torfe wurde durch ein sequentielles chemisches Extraktionsverfahren erfasst (ZAK et al. 2008a, ZAK & GELBRECHT 2008). Durch die Anwendung einer verkürzten Variante wurden vier verschiedene P-Fractionen bestimmt (Abb. 2).

Der erste Extraktionsschritt (Ammoniumchlorid) setzt den labil gebundenen bzw. desorbierbaren Phosphor frei, der jedoch aufgrund seines unbedeutenden Anteils (< 1% des Gesamt-P) nachfolgend nicht berücksichtigt wird. Die Verwendung des Extraktionsmittels Bicarbonat/Dithionit (BD) führt zur chemischen Reduktion von amorphen Fe(III)-Hydroxiden und simuliert damit die Prozesse, die bei der Wiederherstellung dauerhaft anoxischer Bedingungen in einem wiedervernässten Moor auftreten. Der im Extrakt gemessene Phosphor ist unter reduktiven Bedingungen potenziell mobilisierbar. Ein größerer Anteil des säure-löslichen Phosphors ist für wurzelnde Helophyten (Sumpfpflanzen) verfügbar (SALEQUE & KIRK 1995). Der nicht extrahierte P („Rest-P“) wird als überwiegend refraktärer organisch gebundener P definiert. Eine P-Freisetzung aus dieser Fraktion erfolgt hauptsächlich durch Mineralisierung unter oxischen Bedingungen. Bei Wiedervernässung saurer Torfmoosmoore und damit verbundenen dauerhaften anoxischen Bedingungen wird sehr wahrscheinlich nur eine unbedeutende Menge dieser P-Fraktion durch mikrobielle Prozesse mobilisierbar sein. Sie stellt daher kein Risiko für eine interne P-Düngung dar.

Tab. 2: Ausgewählte Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Torfe aus den Untersuchungsgebieten (siehe auch Tab. 1 (Mittelwerte aus n = 3 bis 6), diese Torfe wurden auch für die Untersuchung des P-Freisetzungspotenzials verwendet)

Selected data of peat properties and chemical peat composition of sampling sites (see also Tab. 1 (means, n = 3-6), these peat samples were also applied for the determination of P release potential)

Moor	Tiefe cm	Torfzer- setzung <sup>1</sup>	Trocken- rohddichte g L <sup>-1</sup>	org. Gehalt %	P <sup>2</sup>	Fe <sup>4</sup> mg L <sup>-1</sup>	Al <sup>4</sup>	C/N <sup>3</sup>	C/P <sup>3</sup>	N/P <sup>3</sup>
Degradierete Torfmoosmoore (Berlin)										
Krumme Laake	10-20	mittel bis stark	121	81	126	554	984	26	1241	49
	40-50	schwach	94	92	43	263	272	24	2707	112
Kleine Pelzlaake	10-20	mittel	113	86	132	535	860	33	1362	40
	40-50	schwach	82	91	32	113	292	40	3459	92
Teufelssee	10-20	mittel bis stark	134	86	129	478	674	31	1248	40
	40-50	schwach	89	93	26	118	216	59	4544	79
Barssee (Rand)	10-20	mittel bis stark	182	88	91	500	726	41	2833	67
Barssee (Zentrum)	40-50	schwach	45	81	32	216	230	16	1662	106
Pechsee (Rand)	10-20	mittel bis stark	187	88	121	748	794	39	1873	51
Pechsee (Zentrum)	40-50	schwach	39	85	28	190	192	14	1780	128
Hundekehlefenn	10-20	stark	130	85	107	575	855	28	1372	49
	40-50	schwach	53	93	19	101	95	56	3656	70
Referenzmoore (Land Brandenburg, NW-Polen)										
Kablow-Ziegelei	5-10	schwach	43	93	22	116	137	44	2226	50
Rosiczka	5-15	schwach	61	98	17	45	6	50	2946	58
Mszar	5-25	schwach	75	98	19	6	67	101	4875	48

<sup>1</sup>Zersetzungsgrad nach von Post-Skala (AD-HOC-AG BODEN 2005); schwach zersetzt = H 1-4; mittel zersetzt = H 5-7 und stark zersetzt = H 8-10; <sup>2</sup>bestimmt durch Glühverlust (550°C, 4h); <sup>3</sup>C- und N-Gehalte wurden mit einem CHN-Analyser (Vario EL, Elementar, Hanau) ermittelt und (Gesamt-) P photometrisch nach nasschemischem Aufschluss (ZAK et al. 2008b) sowie <sup>4</sup>Gesamt-Fe und -Al mittels AAS nach Königswasser-Aufschluss.

### 3.2 Porenwasseruntersuchungen

Zur unverfälschten Beprobung des sauerstoffempfindlichen Porenwassers der Moore wurden Dialysesammler eingesetzt (HESSLEIN 1976). Aufbau der für die vorliegenden Untersuchungen eingesetzten Dialysesammler sowie Prozedur der Beprobung sind bei ZAK et al. (2004) und ZAK (2008) beschrieben. Der Einsatz von Dialysesammlern zur Untersuchung von Moorporenwasser ist nur unter wassergesättigten Bedingungen möglich. In den degradierten wechselfeuchten Berliner Torfmoosmooren beschränkte sich daher die Porenwasserbeprobung auf das Frühjahr 2008. Sie erfolgte einmalig in den Monaten April und Mai 2008 an jeweils 6 Messpunkten der 6 Untersuchungsgebiete in einer Bodentiefe von 0-60 cm. In diesem Zeitraum wiesen alle Moore an den Beprobungsstellen wasserge-

sättigte Bedingungen (Barssee, Pechsee) bzw. einen Überstau von 20-40 cm (übrige Moore) auf. Die jeweiligen Messpunkte wurden in Transekten von 50-100 m Gesamtlänge festgelegt, um damit einen Überblick über die Variabilität des Wasserchemismus der einzelnen Moore zu erhalten. Nur im Barssee und Pechsee lagen die Messstellen in den zentralen Schwingbereichen mit schwach bis mäßig zersetzten Torfen, da in den randlichen Bereichen mit stark zersetzten Torfen keine Wassersättigung vorhanden war.

Durch den Einsatz von mehrkammerigen Dialysesammlern (14 Kammern) war es möglich, im anoxischen Milieu eine Porenwasserbeprobung im vertikalen Abstand von 4 cm durchzuführen, um so für ausgewählte wasserchemische Parameter Tiefenprofile zu erstellen. Außerdem wurden aus den Kammern Mischproben gewonnen, in denen dann zusätzlich vor Ort pH-Wert (mittels pH-Meter mit pH-Elektrode, WTW) und elektrische Leitfähigkeit (mittels Konduktometer, WTW) gemessen wurden. Analoge Untersuchungen mit jeweils drei Dialysesammlern erfolgten in den ständig wassergesättigten Referenzmooren im November 2003 in den nordwestpolnischen Mooren Rosiczka und Mszar sowie im März 2007 im Moor bei Kablow-Ziegelei (Brandenburg).

Im Zentralen Chemielabor des IGB wurden folgende Wasserinhaltsstoffe nach Standardmethoden gemessen (ZAK et al. 2008b):

- SRP (soluble reactive phosphorus = gelöster anorganischer Phosphor)
- $\text{NH}_4^+$  (Ammonium)
- $\text{NO}_3^-$  (Nitrat)
- $\text{SO}_4^{2-}$  (Sulfat)
- DOC (dissolved organic carbon = gelöster organischer Kohlenstoff) sowie die
- Metalle K (Kalium), Ca (Calcium) und Fe (Eisen)

Schwefelwasserstoff wurde mit Hilfe der Methylenblaumethode nach CLINE (1969) bestimmt.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Phosphor-Freisetzungspotenzial in degradierten Torfmoosmooren

Die Gesamt-P-Konzentrationen in den stärker zersetzten Torfen der Mooroberfläche lagen um das 3- bis 5-fache über den Gehalten der tiefer liegenden schwach zersetzten Torfe (Tab. 2). Überraschenderweise waren diese Unterschiede ähnlich hoch wie in basenreichen landwirtschaftlich genutzten Niedermoortorfen (ZAK et al. 2008a). Anders als in diesen meist gedüngten Böden ist die P-Anreicherung in den oberen Bodenschichten der Torfmoosmoore ausschließlich auf die Torfmineralisation (=„interne Düngung“) zurückzuführen.

Die stark zersetzten Torfe der oberen Bodenschichten der degradierten Berliner Torfmoosmoore wiesen gleichzeitig ein deutlich höheres P-Freisetzungspotenzial als die in tieferen Bereichen vorhandenen schwach zersetzten Torfe auf. So waren die Gehalte an redox-empfindlich gebundenem Phosphor (=BD-P) und säure-löslichem Phosphor (=HCl-P) im Durchschnitt um den Faktor 2-10 höher als in den **tiefer liegenden**, gering zersetzten Torfen (Abb. 3).

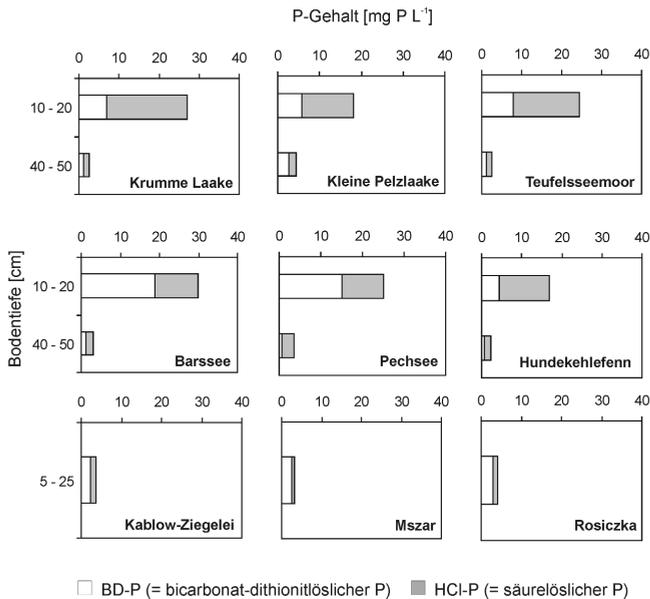


Abb. 3: Durchschnittliche Gehalte an reduktiv löslichem (BD-P) und säurelöslichem Phosphor (HCl-P) degradiierter Torfmoosmoore (Berlin) in der oberflächennahen Bodenschicht (10-20 cm) mit stark zersetzten Torfen und in schwach zersetzten Torfen aus einer Tiefe von 40-50 cm sowie in der obersten Bodenschicht (5-25 cm) von Referenzmooren (Kablów-Ziegelei, Mszar, Rosiczka) mit ebenfalls schwach zersetzten Torfen.

Average content of redox-soluble (BD-P) and acid-soluble phosphorus (HCl-P) of degraded *Sphagnum* fens (Berlin) in the near-surface soil layer (10-20 cm) with very decomposed peat and in underlying slightly decomposed peat (40-50 cm) as well as in the near-surface soil layer (5-25 cm) of pristine *Sphagnum* fens (Kablów-Ziegelei, Mszar, Rosiczka) with slightly decomposed peat.

Die deutliche Anreicherung von reduktiv(BD)- und säure(HCl)-löslichem Phosphor in stark zersetzten Torfen der untersuchten Torfmoosmoore wird auch durch einen Vergleich mit schwach zersetzten Torfen der **oberen Bodenschicht von naturnahen Referenzmooren** verdeutlicht. Auch hier waren die Gehalte an reduktiv- und säure-löslichem Phos-

phor in den schwach zersetzten Torfen aus einer Tiefe von 5-25 cm deutlich niedriger als in den stark zersetzten Torfen der degradierten Berliner Moore. Die etwas höheren BD-Gehalte in der oberen schwach zersetzten, aber noch von Moorpflanzen wie Wollgras durchwurzelten Torfschicht der Referenzmoore (Abb. 3) werden vermutlich durch das Eindringen von Sauerstoff über das Aerenchym dieser Moorpflanzen verursacht. Sauerstoff kann dann in der Durchwurzelungszone in die nächste Umgebung der Wurzeln austreten und vorhandene gelöste Fe(II)-Ionen unter Bildung von ausfallenden Fe(III)-Hydroxiden oxidieren (HUPFER & DOLLAN 2003). Diese können wiederum Phosphat binden, welches in der BD-Fraktion erfasst wird. Insgesamt liegen jedoch die reduktiv- und säurelöslichen P-Gehalte in der gleichen Größenordnung wie die der tiefer liegenden schwach zersetzten Torfe der untersuchten Berliner Moore.

Eine dauerhafte Wiedervernässung wird somit zu einer Freisetzung von Phosphat aus den oberen, stark zersetzten Torfen führen, was die Konkurrenzfähigkeit nährstoffliebender Pflanzen weiter fördern wird (WHEELER & SHAW 1991, BRIDGHAM et al. 1996, VERHOEVEN et al. 1996, MALMER et al. 2003, TOMASSEN et al. 2004). Im Falle der Wiedervernässung von Mooren, die bislang vor allem in den Randbereichen durch Austrocknung degradiert sind, ist eine Verlagerung von freigesetzten Nährstoffen über den Grundwasserzustrom in die noch wenig gestörten zentralen Moorbereiche zu erwarten. Dadurch erhöht sich auch dort das Risiko der Etablierung oder Förderung nährstoffliebender Pflanzenarten.

#### 4.2 Porenwasserchemismus

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Zusammensetzung des Porenwassers degradierter und naturnaher Torfmoosmoore werden in Tabelle 3 zusammengefasst. Die wasserchemischen Daten belegen, dass das degradierte Moor Hundekehlefenn schon zu den mesotroph-subneutralen Mooren (SUCCOW 2001a) überleitet. Insbesondere sind im Vergleich zu allen anderen Torfmoosmooren die Calcium-Konzentrationen, die elektrische Leitfähigkeit und die pH-Werte deutlich erhöht. Diese wasserchemischen Veränderungen sind nicht nur eine Folge der Austrocknung, sondern auch auf das Eindringen von basenreichem Fremdwasser aus einem angrenzenden Graben zurückzuführen.

Die Referenzmoore sind durch sehr niedrige Porenwasser-Konzentrationen von Phosphor (als SRP gemessen), Sulfat, Calcium, Nitrat (unter der analytischen Bestimmungsgrenze), sehr niedrige pH-Werte und sehr geringe elektrische Leitfähigkeiten gekennzeichnet (Tab. 3, Abb. 4). Die Ammonium-Konzentrationen variieren stark. Die deutlich höheren Konzentrationen im Moor bei Kablow-Ziegelei könnten eine Folge des atmosphärischen N-Eintrages aus dem Ballungsraum Berlin (BÜRGER-ARNDT 1994, FISCHER 1998) sein und deuten auf Störungen im Vergleich zu völlig unbelasteten Mooren hin. Sie wirken sich jedoch noch nicht negativ auf die moortypische Vegetation aus (s. Tab. 1).

Tab. 3: Ausgewählte wasserchemische Parameter (vgl. Kap. 3.2) im Porenwasser degradiierter Torfmoosmoore und in Referenzmooren (Mittelwerte der Mischproben aus 0-60 cm Tiefe mit n = 3 bzw. 6)

Selected data of pore water chemistry (see chapter 3.2) of degraded and pristine *Sphagnum* fens (depth 0-60 cm, means, n = 3 or 6, respectively)

Moor	pH	Elektr. Leitf. $\mu\text{S cm}^{-1}$	SRP	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	K	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	Ca $\text{mg L}^{-1}$	Fe	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{H}_2\text{S}$	DOC
<b>Degradierte Torfmoosmoore (Berlin)</b>											
Krumme Laake	5,2	84	0,18	0,97	3,5	< 0,05*	9,3	3,1	0,7	0,5	64
Kl. Pelzlaake	4,8	81	0,23	1,13	1,0	< 0,05*	8,4	3,1	5,0	0,2	79
Teufelssee	4,7	78	0,10	1,20	1,9	< 0,05*	5,5	2,9	0,6	0,1	86
Barssee-Zentrum	4,9	45	0,04	0,21	2,7	0,08	2,8	2,4	3,0	0,2	36
Pechsee-Zentrum	5,3	55	0,04	0,27	2,0	0,05	3,8	5,3	0,7	0,1	22
Hundekehlefen	5,5	216	0,17	0,69	1,5	0,05	16,1	3,5	1,3	0,9	75
<b>Referenzmoore (Brandenburg, NW-Polen)</b>											
Kablow- Ziegelei	4,2	65	0,01	0,94	0,7	< 0,05*	4,5	1,6	1,5	–	55
Mszar	3,8	54	0,01	0,06	1,8	< 0,05*	0,9	0,2	0,3	–	24
Rosiczka	3,7	47	0,02	0,07	1,4	< 0,05*	0,9	0,3	0,1	–	30

\*Bestimmungsgrenze

Im Vergleich zu den Referenzmooren ist das Moorporenwasser aller degradierten Torfmoosmoore durch deutlich erhöhte Nährstoffkonzentrationen, höhere pH-Werte und höhere elektrische Leitfähigkeiten charakterisiert. Eine erwartete Ausnahme bilden die wasserchemischen Daten aus den noch schwingenden zentralen Bereichen der Moore Bars- und Pechsee, die sich (noch) nicht wesentlich von denen der Referenzmoore unterscheiden (Tab. 3). Ursache für erhöhte Stoffkonzentrationen in den degradierten Mooren ist die Stofffreisetzung infolge der Mineralisierung in den oberen Bodenschichten. Die höheren P-Konzentrationen sind sehr wahrscheinlich auch auf die reduktive Auflösung von in den Trockenphasen gebildeten Fe(III)-Hydroxiden zurückzuführen (LAMERS et al. 2002, CANFIELD et al. 1993, vgl. auch 4.1). Dieser Zusammenhang wird auch durch die gemessenen Phosphor-Konzentrationsprofile bestätigt (Abb. 5). Hohe P-Konzentrationen treten in den oberen Bodenschichten mit stark zersetzten Torfen auf und sinken mit zunehmender Tiefe, wo der Torf nur schwach zersetzt ist (s. Tab. 2). Das heißt, dass es in wechselfeuchten degradierten Torfmoosmooren während zeitweiliger Überstauung im Frühjahr zu erheblicher P-Freisetzung aus den oberen, stark zersetzten Torfschichten kommt, was zu einer Eutrophierung dieser Moore beiträgt. Mit zunehmender Wiedervernässungsdauer und höheren Temperaturen ist mit einem weiteren Anstieg der P-Konzentration im Moorporenwasser zu rechnen (ZAK & GELBRECHT 2007).

Tendenziell steigen auch die DOC-Konzentrationen in den degradierten Torfmoosmooren im Vergleich zu den Referenzmooren an. Auch die Pflanzennährstoffe Ammonium und Kalium weisen im Porenwasser der oberen, stark zersetzten Torfschichten höhere Konzentrationen auf (Abb. 5), wobei sich die Kalium-Konzentrationen im Porenwasser aller untersuchten Torfmoosmoore nur geringfügig unterscheiden.

Aufgrund der atmosphären Schwefelbelastung sowie des Sulfateintrages über das Grundwasser konnte eine Anreicherung von Schwefelwasserstoff als Reaktionsprodukt der Sulfatreduktion unter anaeroben Bedingungen nicht ausgeschlossen werden. Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ) ist eine potenziell phytotoxisch wirksame Substanz (z.B. ROELOFS 1991) und könnte die Vegetationszusammensetzung beeinflussen.  $\text{H}_2\text{S}$  trat jedoch in niedrigen Konzentrationen von kleiner  $1 \text{ mg L}^{-1}$  auf (Tab. 3). Vermutlich wird gebildeter Schwefelwasserstoff durch das im Überschuss vorliegende Eisen als schwerlösliches Eisensulfid gebunden, was als natürlicher „Entgiftungsprozess“ angesehen werden kann.

In den degradierten Torfmoosmooren steigen nicht nur absolut die Nährstoffkonzentrationen (Phosphor und Ammonium) im Vergleich zu Referenzmooren an, sondern auch die räumliche Variabilität nimmt drastisch zu (Abb. 4), was auch auf Kalium zutrifft.

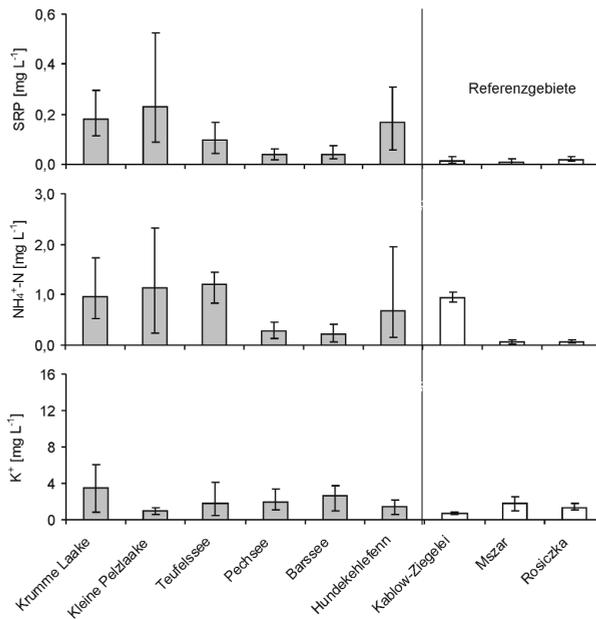


Abb. 4: Räumliche Variabilität der Nährstoffkonzentrationen im Porenwasser (0-60 cm) in degradierten Torfmoosmooren (Berlin) sowie in ungestörten Referenzmooren (Mittelwerte und Spannweiten,  $n = 3-6$ ).

Spatial variability of nutrient concentration in the pore water (depth 0-60 cm) of degraded and pristine *Sphagnum* fens (means and range,  $n=3-6$ ).

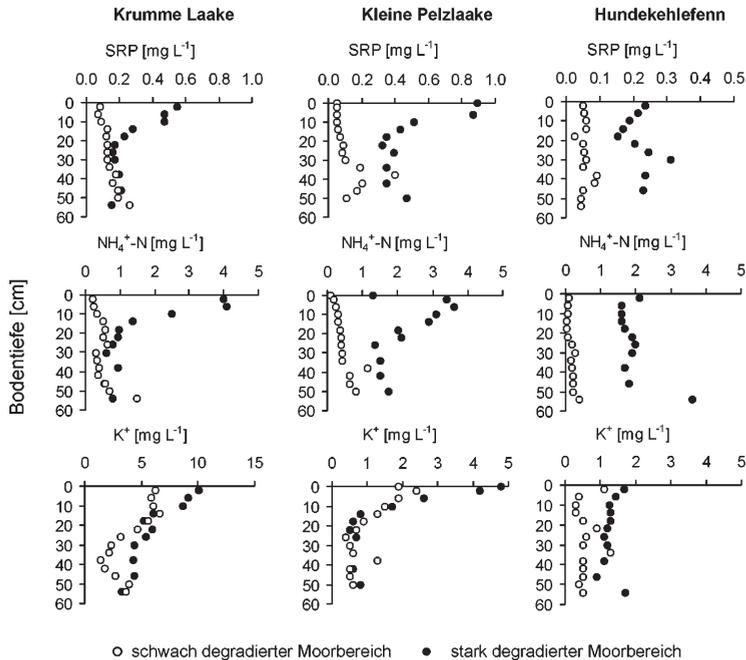


Abb. 5: Ausgewählte Konzentrationsprofile gelöster Nährstoffe im Porenwasser von drei degradierten Torfmoosmooren.  
Selected concentration profiles of dissolved nutrients in the pore water of three degraded *Sphagnum* fens.

## 5. Schlussfolgerungen für die Restaurierung von degradierten Torfmoosmooren

Die Ergebnisse zeigen, dass infolge Austrocknung und Torfmineralisierung in Torfmoosmooren eine erhebliche Nährstofffreisetzung stattfindet, die zu starken Veränderungen des Porenwasserchemismus und zu einer Eutrophierung der ursprünglich oligotroph-sauren Moore führt. In solchen degradierten Torfmoosmooren wird in den oberen stark zersetzten Torfschichten gleichzeitig an Eisen(III)-Hydroxiden gebundener und damit reduktiv löslicher Phosphor angereichert. Es treten somit gleiche Entwicklungen wie in basenreichen entwässerten Niedermooren auf (ZAK et al. 2008a). Im Falle einer dauerhaften Wiedervernässung stellt die Anreicherung des redox-empfindlich gebundenen Phosphors ein erhebliches Gefährdungspotenzial hinsichtlich einer zusätzlichen Eutrophierung dar. Die beschriebenen irreversiblen boden- und wasserchemischen Veränderungen schließen eine schnelle (Selbst-)Regeneration der Moore zu den ursprünglichen nährstoffarmen (oligotrophen) Bedingungen aus (PFADENHAUER & KLÖTZLI 1996).

Für eine Restaurierung degradierter Torfmoosmoore mit der naturschutzfachlichen Zielstellung der mittelfristigen Wiederherstellung wachsender, oligotroph-saurer Moore sind aus Sicht der Autoren daher folgende Schritte notwendig:

*(1) Klärung der Ursachen für die Grundwasserabsenkung im Einzugsgebiet der Torfmoosmoore und Maßnahmen zur Erhöhung der Grundwasserstände im Einzugsgebiet der Moore*

Diese einfache Forderung verlangt in der Regel aufwändige hydrogeologische Untersuchungen. Während im Falle der meisten untersuchten Berliner Torfmoosmoore die Ursache des Trockenfallens die Förderung von Trinkwassers ist (s.o.), welche zu einem Absinken der Grundwasserspiegel führte, sind für viele andere betroffene Torfmoosmoore im nordostdeutschen Tiefland die Gründe weniger klar und sind vermutlich komplexer Natur (Entwässerungsmaßnahmen und/oder unzureichende Grundwasserneubildung infolge Veränderung der Waldstruktur und veränderter klimatischer Bedingungen). In der Regel fehlen jedoch Kenntnisse zur aktuellen und früheren Größe des unterirdischen Einzugsgebietes eines Moores.

Für eine Förderung und Etablierung der ursprünglichen Vegetation (offene Wollgras-Torfmoos-Gesellschaften) sollte sich durch entsprechende Maßnahmen im Einzugsgebiet der Torfmoosmoore ein Grundwasser-Flurabstand im Moor zwischen 0 und 20 cm einstellen. Die jährliche Amplitude der Wasserstandsschwankungen sollte möglichst unter 20 cm liegen und 40 cm nicht überschreiten (TIMMERMANN 1999, DIERBEN & DIERBEN 2001). Eine Einleitung von basen- und elektrolytreichem Fremdwasser zur Erhöhung der Moorwasserstände ist unbedingt zu vermeiden, da es dadurch im Moorkörper zu weiteren wasserchemischen Änderungen kommt, durch die Pflanzen mit höheren Nährstoffansprüchen gefördert werden (ROWINSKY 1993, 1995).

*(2) Maßnahmen zur Stabilisierung der noch vorhandenen torfmoosmoortypischen Flora und Fauna*

Das partielle, aber **nicht** vollständige Beseitigen von Gehölzen wie Birken und Kiefern („Entkusseln“) ist eine fallweise aus Artenschutzgründen notwendige Übergangslösung bis zum Erreichen stabiler hoher Wasserstände in den Torfmoosmooren, insbesondere um ein lokales Aussterben beschattungsempfindlicher Pflanzenarten und daran gebundener Insektenarten zu verhindern (z.B. WAGNER 1994, GELBRECHT et al. 2003). Im Falle des Auftretens von Schilf (*Phragmites australis*) oder anderen hochwüchsigen Pflanzen sollte die partielle Gehölzbeseitigung durch wiederholte Pflegemahd ergänzt werden.

### *(3) Ergänzende Maßnahmen bei einer erfolgreichen Wiedervernässung*

Die Wiederherstellung ursprünglicher hydrologischer Bedingungen im Einzugsgebiet ist oft nicht ausreichend, um mittelfristig nährstoffarme Pflanzengesellschaften wachsender Torfmoosmoore erfolgreich zu regenerieren (JORTAY & SCHUMACKER 1989, KLÖTZLI & GROOTJANS 2001). Da das Oszillationsvermögen stark eingeschränkt ist und die Torfe der oberen Bodenschicht bereits stärker mineralisiert sind und ein erhöhtes Nährstoffangebot aufweisen (s.o.), ist mit der Etablierung von nährstoffliebenden Sumpfpflanzengesellschaften zu rechnen. Um das zu verhindern bzw. deutlich einzuschränken, werden folgende ergänzende Maßnahmen, die allerdings sehr kostenintensiv sind, vorgeschlagen:

- Pflegemahd und Beräumung des Mahdguts im Falle des verstärkten Auftretens von Schilf, Pfeifengras oder Rohrkolben, wodurch bereits innerhalb weniger Jahre eine Verminderung der Nährstoffüberschüsse im Boden erreichbar ist (MIDDLETON et al. 2006),
- Abtrag der oberen stark zersetzten Torfschicht („Flachabtorfung“) unter Bildung von flachen Torfstichen: Durch diese Maßnahme ließe sich eine Nährstofffreisetzung aus stark zersetzten Torfen weitgehend verhindern. In diesem Falle muss eine dauerhafte Wassersättigung (bzw. flacher Überstau) der abgetorften Flächen/Bereiche gewährleistet werden, um eine Wiederbesiedlung mit Torfmoosen bzw. Wollgras zu ermöglichen (KLIMKOWSKA et al. 2007).

Die hier formulierten Strategien und Maßnahmen zur erfolgreichen Wiedervernässung und Regenerierung von Torfmoosmooren unter Naturschutzaspekten können nur einen allgemeinen Charakter tragen. Für jeden Einzelfall bedürfen sie einer individuellen Anpassung unter besonderer Berücksichtigung des Erhaltes von noch vorhandenen Elementen der torfmoosmoortypischen Flora und Fauna.

## 6. Danksagung

Für die Durchführung von wasser- und bodenchemischen Analysen sowie für die Mitwirkung bei den Beprobungen danken wir den MitarbeiterInnen des Zentralen Chemielabor des IGB Hans-Jürgen Exner, Antje Lüder, Nils Meyer, Thomas Rossoll, Bernd Schütze, Sarah Schell, Grit Siegert und Dr. Elke Zwirnmann. Frau Martina Wagner, Herrn Eckhart Scheffler und Herrn Holger Brandt (alle Senatsverwaltung für Stadtentwicklung) danken wir für inhaltliche Diskussionen und Bereitstellung von Materialien zu den Berliner Untersuchungsgebieten. Frau M. Wagner danken wir außerdem für das kritische Lesen des Manuskriptes. Der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung (Berlin) danken wir für die finanzielle Unterstützung bei den Untersuchungen der Berliner Moore.

## 7. Literaturverzeichnis

- AD-HOC-AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. - 5. Aufl, 438 S.; Stuttgart (Schweizerbart).
- AGREN, S., ISAAKSON, L. & ZACKRISSON, O. (1983): Natural age and size of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* on a mire in the inland part of northern Sweden. – *Holarctic Ecology* **6**: 228-237.
- AUTORENKOLLEKTIV (1973): Handbuch der Naturschutzgebiete der Deutschen Demokratischen Republik, Bd. 2, 2. Aufl., 223 S; Leipzig, Jena, Berlin (Urania).
- BRIDGHAM, S.D., PASTOR, J., JANSSENS, J.A., CHAPIN, C. & MALTERER, T.J. (1996): Multiple limiting gradients in peatlands: A call for a new paradigm. – *Wetlands* **16**: 45-65.
- BÜRGER-ARNDT, R. (1994): Zur Bedeutung von Stickstoffeinträgen für naturnahe Vegetationseinheiten in Mitteleuropa. – *Dissertationes Botanicae* **220**: 1-226.
- CANFIELD, D.E., THAMDRUP, B., & HANSEN, J.W. (1993): The anaerobic degradation of organic matter in Danish coastal sediments: iron reduction, manganese reduction, and sulfate reduction. – *Geochimica et Cosmochimica Acta* **57**: 3867-3883.
- CLINE, J.D. (1969): Spectrophotometric determination of hydrogen sulphide in natural waters. – *Limnology and Oceanography* **14**: 454-458.
- DIERBEN, K. & DIERBEN, B. (2001): Moore, 230 S.; Stuttgart (Eugen Ulmer).
- FISCHER, U. (1998): Ökologische Dauerbeobachtung: Deposition. Gutachten im Auftrag der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umweltschutz Berlin – Jahresbericht 1997.
- GELBRECHT, J., KALLIES, A., GERSTBERGER, DOMMAIN, R., GÖRITZ, U., HOPPE, H., RICHERT, A., ROSENBAUER, F., SCHNEIDER, A., SOBCZYK, T. & WEIDLICH, M. (2003): Die aktuelle Verbreitung der Schmetterlinge der nährstoffarmen und sauren Moore des nordostdeutschen Tieflandes (Lepidoptera). – *Märk. Ent. Nachr.* **5**(1): 1-68.
- GELBRECHT, J. & ZAK, D. (2008): Stoffumsetzungsprozesse in naturnahen, entwässerten und wiedervernässten Niedermoorböden. – *DWA-Themen, Dränung*: 70-79.
- HESSLEIN, R.H. (1976): An in situ sampler for close interval pore water studies. – *Limnology and Oceanography* **22**: 913-915.
- HUECK, K. (1925): Vegetationsstudien auf Brandenburgischen Hochmooren. – *Beitrag z. Naturdenkmalpflege* **10** (5): 309-408.
- HUECK, K. (1926): Die Naturschutzgebiete Preußens, Teil die Grunewaldmoore. – *Beitrag z. Naturdenkmalpflege* **11**: 57-59.
- HUECK, K. (1938): Die Vegetation der Grunewaldmoore. – *Arb. Berliner Provinzstelle für Naturschutz* **1**: 1-256.
- HUPFER, M. & DOLLAN, A. (2003): Immobilisation of phosphorus by iron-coated roots of submerged macrophytes. – *Hydrobiologia* **506**(1): 635-640.

- JOESCHKE, L., LANGE, E. & WESTHUS, W. (1989): Zur Vegetationsgeschichte und zur Genese der Torflager im Naturschutzgebiet „Sonder“ – Nördliches Thüringer Becken. – *Flora* **183**: 177-188.
- JOOSTEN, J.H. (1995): Time to regenerate long-term perspectives of raised bog regeneration with special emphasis on palaeoecological studies. – In: WHEELER, B.D., SHAW, S.C., FOJT, W.J., ROBERTSON, R.A. (eds.): *Restoration of temperate wetlands*, 576 S. (Wiley & Sons).
- JOOSTEN, H. & SUCCOW, M. (2001): Hydrogenetische Moortypen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2., völlig neu bearb. Aufl.: 234-240; Stuttgart (Schweizerbart).
- JORTAY, A. & SCHUMACKER, R. (1989): Zustand, Erhaltung und Regeneration der Hochmoore im Hohen Venn (Belgien). – *Telma Beih.* **2**: 279-293; Hannover.
- KLIMKOWSKA, A., VAN DIGGELEN, R., BAKKER, J.P. & GROOTJANS, A.P. (2007): Wet meadow restoration in Western Europe: A quantitative assessment of the effectiveness of several techniques. – *Biological Conservation* **140**: 318-328.
- KLÖTZLI, F. & GROOTJANS, A.P. (2001): Restoration of natural and semi-natural wetland systems in Central Europe: Progress and predictability of developments. – *Restoration Ecology* **9**(2): 209-219.
- LAMERS, L.P.M., FALLA, S.-J., SAMBORSKA, E.M., VAN DULKEN, I.A.R., VAN HENGSTUM, G. & ROELOFS, J.G.M. (2002): Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. – *Limnology and Oceanography* **47**: 585-593.
- MALMER, N., ALBINSSON, C., SVENSSON, B.M. & WALLÉN, B. (2003): Interferences between *Sphagnum* and vascular plants: effects on plant community structure and peat formation. – *Oikos* **100**: 469-482.
- MIDDLETON, B.A., HOLSTEN, B. & VAN DIGGELEN, R. (2006): Biodiversity management of fens and fen meadows by grazing, cutting and burning. – *Applied Vegetation Science* **9**: 307-316.
- NEUHÄUSL, R. (1975): Hochmoore am Teich Velké Dárko. – *Vegetace CSSR A* **9**, 267 S.
- PASSARGE, H. & HOFFMANN, G. (1968): Pflanzengesellschaften des nordostdeutschen Flachlandes II. – *Pflanzensoziologie* **16**; Jena.
- PFADENHAUER, H. & LÜTKE TWENHÖVEN, F. (1986): Nährstoffökologie von *Molinia caerulea* und *Carex acutiformis* auf baumfreien Niedermooren des Alpenvorlandes. – *Flora* **178**: 157-166.
- PFADENHAUER, J. & KLÖTZLI, F. (1996): Restoration experiments in middle European wet terrestrial ecosystems: an overview. – *Vegetatio* **126**: 101-115.
- ROELOFS, J. G. M. (1991): Inlet of alkaline river water into peaty lowlands: effect on water quality and *Stratiotes aloides* L. stands. – *Aquatic Botany* **46**: 267-293.
- ROWINSKY, V. (1993): Ökologie und Erhaltung von Kesselmooren an Berliner und Brandenburger Beispielen. – *Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg, Sonderheft Niedermoore*: 20-25.
- ROWINSKY, V. (1995): Hydrologische und stratigraphische Studien zur Entwicklungsgeschichte von Brandenburger Kesselmooren. Dissertation, Freie Universität Berlin. – *Berliner Geographische Abhandlungen* **60**: 1 – 155 S.; Berlin.

- SALEQUE, M.A. & KIRK, G.J.D. (1995): Root-induced solubilization of phosphate in the rhizosphere of lowland rice. – *New Phytologist* **129**: 325-336.
- SUCCOW, M. (2001a): Ökologisch (-phytozoenologische) Moortypen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2., völlig neu bearb. Aufl.: 229-252; Stuttgart (Schweizerbart).
- SUCCOW, M. (2001b): Übersicht chorischer Moor-Naturraumtypen. – In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2., völlig neu bearb. Aufl.: 240-252; Stuttgart (Schweizerbart).
- TIMMERMANN, T. (1999): Sphagnum-Moore in Nordostbrandenburg: Stratigraphisch-hydrodynamische Typisierung und Vegetationswandel seit 1923. – *Dissertationes Botanicae* **305**: 1 – 176; Berlin, Stuttgart (J. Cramer in der Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung).
- TIMMERMANN, T. & SUCCOW, M. (2001): Vegetationsformen oligotroph-saurer naturnaher Moorstandorte. In: SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2., völlig neu bearb. Aufl.: 144-149; Stuttgart (Schweizerbart).
- TOMASSEN, H.B.M., SMOLDERS, A.J.P., LIMPENS, J., LAMERS, L.P.M. & ROELOFS, M. (2004): Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: desiccation or high N deposition? – *Journal of Applied Ecology* **41**: 139-150.
- VERHOEVEN, J.T.A., KOERSELMAN, W. & MEULEMAN, A.F.M. (1996): Nitrogen- or phosphorus-limited growth in herbaceous, wet vegetation: Relations with atmospheric inputs and management regimes. – *Trends in Ecology and Evolution* **11**: 494-497.
- WAGNER, C. (1994): Zur Ökologie der Moorbirke *Betula pubescens* ERH. in Hochmooren Schleswig-Holsteins unter besonderer Berücksichtigung von Regenerationsprozessen in Torfstichen. – *Mitt. AG Geobot. SH/HH (Kiel)* **47**: 182.
- WHEELER, B.D. & SHAW, S.C (1991): Above ground crop mass and species richness of the principal types of herbaceous rich-fen vegetation of lowland England and Wales. – *Journal of Ecology* **79**: 285-301.
- ZAK, D. (2008): Dialysesammlertechnik zur Beprobung des anoxischen Moorporenwassers. – In: GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (Hrsg.): *Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern – Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten*. - *Berichte des IGB* **26**: 40-43.
- ZAK, D. & GELBRECHT, J. (2008): Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Bestimmung des P-Freisetzungs potenzials in wiedervernässten Mooren. – In: GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (Hrsg.): *Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern – Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten*. - *Berichte des IGB* **26**: 87-96.
- ZAK, D. & GELBRECHT, J. (2007): The mobilisation of phosphorus, organic carbon and ammonium in the initial stage of fen rewetting (a case study from NE Germany). – *Biogeochemistry* **85**: 141-151.
- 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**: 357-368.

- ZAK, D., GELBRECHT, J., WAGNER, C. & STEINBERG, C.E.W. (2008a): Evaluation of phosphorus mobilization potential in rewetted fens by an improved sequential chemical extraction procedure. – *European Journal of Soil Science* **59**: 1191-1201.
- ZAK, D., STEFFENHAGEN, P., ZWIRNMANN, E. & GELBRECHT, J. (2008b): Wasser- und Feststoffanalytik. – In: GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (Hrsg.): Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetales in Mecklenburg-Vorpommern – Status, Steuergrößen und Handlungsmöglichkeiten. – *Berichte des IGB* **26**: 45-47.
- ZIMMERMANN, F. (1987): Vegetationskundlich-ökologische Untersuchungen im Naturschutzgebiet „Krumme Laake“ als Grundlage für die Ableitung von Schutzkriterien und Behandlungsmaßnahmen. – *Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin*, 106 S.

Anschriften der Verfasser:

Dr. D. Zak,  
Dr. J. Gelbrecht  
Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei  
Müggelseedamm 301  
D-12587 Berlin  
E-Mail: zak@igb-berlin.de, gelbr@igb-berlin.de

P. Steffenhagen  
Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Universität Greifswald  
Grimmer Straße 88  
D-17487 Greifswald

Eingang des Manuskriptes am 21. Juli 2009