

TELMA	Band 40	Seite 229 - 244	2 Abb., 6 Tab.	Hannover, November 2010
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

Veränderung der Wasser- und Nährstoffdynamik eines entwässerten Moores im Nationalpark Harz nach Wiedervernässung

Changes of the water and nutrient dynamics of a drained mire in the German
Harz Mountains after rewetting

NADINE TAUCHNITZ, KATJA OSTERLOH, SABINE BERNSDORF,
RALPH MEISSNER und HANS-ULLRICH KISON

Zusammenfassung

In der Vergangenheit wurden im Zusammenhang mit großflächigen Entwässerungen zahlreiche Moore degradiert und damit ihrer Funktionen als Stoffsenken, Wasserspeicher und wertvolle Lebensräume beraubt. Ziel vorliegender Untersuchungen war es, Veränderungen der Wasser- und Nährstoffdynamik eines entwässerten Moores nach Wiedervernässung zu erfassen, um den Erfolg im Hinblick auf eine langfristige Regeneration des Moores zu beurteilen. Relevante Wasserhaushaltsparameter (Niederschlag, Moorwasserstände und Moorabfluss) sowie Stoffhaushaltsparameter (Sauerstoffgehalte, Redoxpotenziale, pH, elektrische Leitfähigkeit, Stickstoff-, Phosphor- und Kohlenstoffgehalte von Moorwasser, Abfluss und Torf) wurden vor und nach der Wiedervernässung erhoben und miteinander verglichen. Zudem wurden Untersuchungen zur Hydrologie und Trophie des Moores im ungestörten und entwässerten Bereich durchgeführt, um den Einfluss der in der Vergangenheit durchgeführten Entwässerung zu ermitteln.

Die Untersuchungen zeigten Unterschiede im entwässerten Bereich mit signifikant niedrigeren Wasserständen, höheren elektrischen Leitfähigkeiten und mineralischen Nährstoffgehalten im Moorwasser und Torf sowie höheren Trockenrohdichten. Infolge der Wiedervernässungsmaßnahmen stiegen die Wasserstände im wiedervernässten Bereich deutlich an. Ansteigende Phosphorgehalte im Moorwasser und Moorabfluss sowie abnehmende P-Gehalte im Torf deuten auf eine erhöhte P-Mobilisierung infolge der Wiedervernässung hin. Im Moorabfluss wurden steigende Ammonium-Gehalte nach der Wiedervernässung ermittelt. Die Nitratgehalte im Moorwasser zeigten nach der Wiedervernässung einen abnehmenden Trend.

Abstract

In the past many peatlands were disturbed due to the large-scale drainage and thus lose their functions as nutrient sinks, water reservoirs and habitats for rarely plants and animals. Study aimed to investigate changes of the water and nutrient dynamics of a drained mire caused by rewetting to assess the long-term success for the mires regeneration. We measured relevant parameters for the water balance like precipitation, water table levels and discharge amounts as well as parameters relevant for the interpretation of nutrient dynamics like oxygen levels, redox potentials of mire pore water and electric conductivity, nitrogen, phosphorus and carbon contents in the mire pore water, discharge and peat soil before and after the rewetting started. Furthermore, we studied the current water and nutrient status of the mire in the undisturbed and drained mire zones to assess the impact of the former drainage.

Our results showed significant lower water table levels, higher electric conductivity values and inorganic nutrient contents in the mire water and peat soil as well as higher dry densities in the drained mire zone compared to those of the undisturbed zone. As a result of the rewetting we observed rising water table levels in the rewetted mire zones. Increases of the phosphorus contents in the mire pore water and discharge and decreases of P contents in the peat soil after rewetting seems to be the result of rising P mobility caused by the rewetting. We observed increasing ammonium contents of the discharge after rewetting whereas nitrate contents of the mire pore water were decreasing.

1. Einleitung

Wachsende Moore sind Ökosysteme mit einer langfristig positiven Kohlenstoffbilanz, in denen die Produktion organischer Substanz größer ist als deren Zersetzung. Mit einer Festlegung von etwa 12 % der aktuellen anthropogenen C-Emissionen fungieren Moore als bedeutende C-Senken (CLYMO et al. 1998). Infolge der langjährigen intensiven Nutzung und damit verbundener massiver Eingriffe in den Wasserhaushalt wurden europaweit großflächig intakte Moorgebiete zerstört und ihrer Funktionen als Stoffsenken, Wasserspeicher und Lebensraum spezialisierter Pflanzen und Tiere beraubt. Inzwischen gibt es zahlreiche Bemühungen zur Regeneration dieser Lebensräume (SUCCOW & JOOSTEN 2001). Seit Anfang der 90-iger Jahre wurden in Deutschland verschiedene Wiedervernässungsvorhaben durchgeführt. Grundlegende Erfahrungen zur Wiedervernässung entwässerter Moore mit geringem Gefälle liegen vor (z. B. PFADENHAUER 1998, LÜTT 2001). Demgegenüber sind wenige Wiedervernässungsmaßnahmen bei entwässerten Mittelgebirgsmooren mit starkem Gefälle bekannt, deren Vernässung eher als problematisch angesehen wird (EGGELSMANN 1987, 1989; SCHUCH 1994). Bisherige Untersuchungen zeigten, dass die Auswirkungen der Wiedervernässung auf den Wasser- und Bodenchemismus des Moores nicht genau vorhersehbar sind (GELBRECHT et al. 2006, 2008). Die infolge steigender Wasserstände bedingten veränderten Redoxbedingungen zeigten in verschiedenen Untersuchungen eine Erhöhung der Mobilität von bestimmten Verbindungen, wie gelöster organischer Kohlenstoff (DOC) sowie Ammonium und Phosphor, die als eine potenzielle Gefahr für angrenzende Ökosysteme einzuschätzen ist (z. B. KALBITZ et al. 2000, MEISNER & LEINWEBER 2004, VELTY et al. 2004, ZAK & GELBRECHT 2007).

Mit dem Ziel, die in Verbindung mit der Wiedervernässung stehenden Veränderungen unterschiedlicher Stoffhaushaltsparameter zu erfassen sowie den Erfolg der Wiedervernässung einzuschätzen, wurden in vorliegender Forschungsarbeit Untersuchungen zur Wasser- und Nährstoffdynamik eines wiedervernässten Moores (Blumentopfmoor) durchgeführt. Dabei waren Schwerpunkte der Untersuchungen:

- der Vergleich der Hydrologie und Trophie des Moores und der Moorböden im entwässerten und ungestörten Moorbereich zur Beurteilung der Auswirkungen vergangener Entwässerung und
- die Untersuchung der Wasser- und Nährstoffdynamik von ungestörten, entwässerten und wiedervernässten Bereichen des Moores zur Einschätzung des Erfolges der Wiedervernässung.

2. Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Blumentopfmoor liegt in der Naturentwicklungszone des Nationalparks Harz im Einzugsgebiet der Holtemme in 650-680 m ü. NN (51°48' N, 10°37' E, Abb. 1).

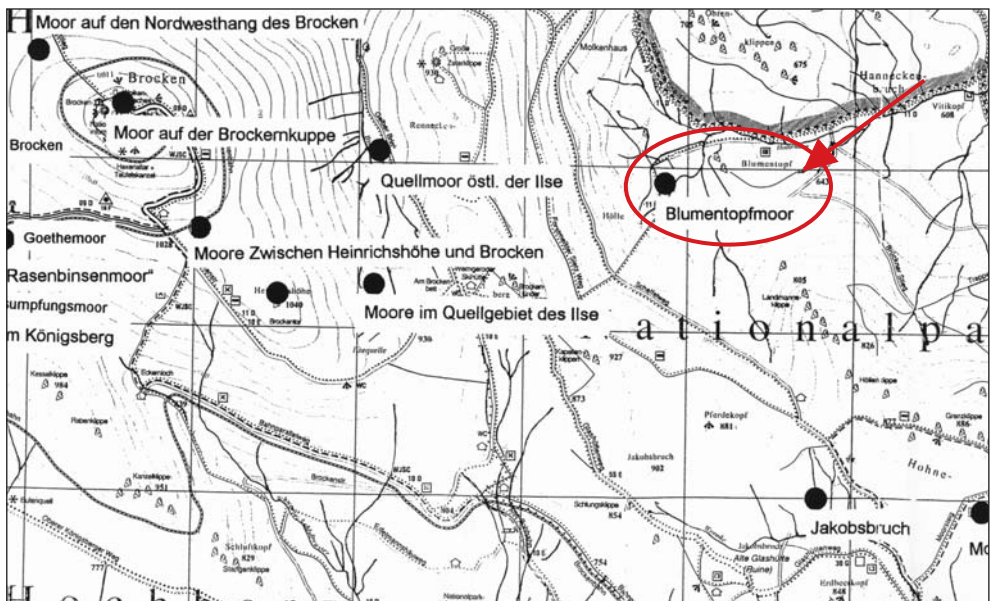


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes (nach JESCKE 2001)
Location of the study site

Die Temperaturen betragen durchschnittlich $2,9\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ und die Niederschläge 1767 mm/a (Durchschnitt 1961-1990; WEGENER & KISON 2002). Das Moor ist 19 ha groß. Das Einzugsgebiet des Moores beträgt 118 ha .

In den Jahren 1750 bis 1776 wurde das Moor durch Anlage von Gräben nahezu vollständig entwässert. Im letzten Jahrhundert wurde das Gebiet für die Fichtenwirtschaft genutzt und mit einem Graben- und Wegenetz durchzogen, das bis Mitte der achtziger Jahre regelmäßigen Unterhaltungsmaßnahmen unterlag. Auf einer kleinen Fläche des Moores von etwa 700 m^2 ist noch ein ungestörter intakter Moorbereich vorhanden, der vegetationskundlich als *Molinia caerulea*-Niedermoor-Stufenkomplex eingeordnet wird (BAUMANN 2009). Der entwässerte Teil des Moores nimmt die weitaus größte Fläche des Moores ein und wird durch Fichtenforst auf nassen bis feuchten Standorten charakterisiert. Auf kleineren Flächen sind Waldlichtungen ohne nässezeigende Vegetation vorhanden. Das Blumentopfmoor kann im ungestörten Bereich bodenkundlich nach KA 5 als Normhochmoor und zum Teil als Übergangsmoor angesprochen werden, während der entwässerte Bereich des Moores eine mehr oder weniger starke Vererdung der oberflächennahen Torfhorizonte aufweist und daher als Normerdhochmoor bis Übergangserdmoor klassifiziert wird. Im ungestörten Moorbereich sind maximale Torfauflagen bis zu 2 m vorhanden. Darunter folgen organische oder mineralische Mudden (letztere bestehend aus verwittertem Granit mit Lößbeimengungen) oder Festgestein als Granit (ALTERMANN & ROSCHE 2010).

Die Wiedervernässung wurde im Mai 2005 mit Hilfe des Einbaus von insgesamt 5 Stau-einrichtungen in ausgewählten Graben- bzw. Bachabschnitte des Entwässerungsnetzes initiiert. Mit weiterer Wiedervernässung wurde im August 2009 begonnen, indem ein Bach auf die entwässerte Fläche umgeleitet wurde.

2.2 Methoden

Gemessen wurden Niederschlag mittels eines automatischen Niederschlagsmessers, Moorabfluss mittels Durchflussmesseinrichtung und Pegelsensor (Ultraschall) und Moorwasserstände mit Piezometern und Brunnenpfeife (Eigenbau). Die Piezometer wurden in je vierfacher Wiederholung etwa 1 m tief in den Torfhorizont des natürlich ungestörten Moorbereiches mit moortypischer Vegetation (*Molinia caerulea*-Niedermoor-Stufenkomplex), entwässerten Moorbereiches ohne nässezeigende Vegetation und den wiedervernässten Moorbereich eingebaut. Für die Stoffhaushaltsuntersuchungen wurden vor Ort monatlich in den Piezometern Sauerstoffgehalte (O_2) und Redoxpotentiale (RP) des Moorwassers in 20 cm Tiefe gemessen. Mit einem Sammler (Eigenbau) wurden Moorwasserproben in den Piezometern in 30 cm Tiefe einmal monatlich entnommen und für die Laboranalysen in Sammelflaschen überführt.

In den filtrierten ($0,45\text{ }\mu\text{m}$ Membranfilter) Proben wurden im Labor pH-Werte und elektrische Leitfähigkeiten (LF) bestimmt. Des Weiteren wurden die Ammonium- (NH_4),

Nitrat- (NO_3 -) und ortho-Phosphat- (PO_4 -P)-Gehalte photometrisch im Moorwasser gemessen. Die Eigenfärbung des Moorwassers wurde mittels Korrekturfaktoren korrigiert. Die Gesamtstickstoffgehalte (N_t) und gelösten organischen Kohlenstoffgehalte (DOC) wurden oxidativ in den Wasserproben mittels HIGHTOC bestimmt. Der organische N-Gehalt wurde als Differenz aus N_t und anorganischem N ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$) berechnet. An den Piezometermessstellen wurden horizontbezogen einmal jährlich Torfproben als Mischprobe entnommen. In den luftgetrockneten Torfproben wurden Gesamtkohlenstoff (C) und N_t -Gehalte oxidativ mittels Elementanalysator, pH-Werte (0.01 M CaCl_2) und LF sowie NH_4 -, NO_3 - und PO_4 -P-Gehalte im 2 M KCl-Extrakt photometrisch gemessen.

Die Prüfung signifikanter Unterschiede der erhobenen Wasser- und Stoffhaushaltsparameter vor und nach der Wiedervernässung sowie der Unterschiede zwischen den untersuchten Moorbereichen erfolgte mittels einfaktorierlicher Varianzanalyse. Die Daten wurden vor der Analyse auf Normalverteilung und Varianzhomogenität getestet.

3. Ergebnisse

3.1 Wasserhaushalt

Die am Untersuchungsstandort registrierten jährlichen Niederschlagssummen betragen 1292 mm (2005), 1267 mm (2006), 2269 mm (2007), 1634 mm (2008) und 1078 mm (2009). Die Wasserstände der Standorte zeigten deutliche Unterschiede zwischen den Messstellen mit den im Vergleich zu den anderen Moorbereichen signifikant niedrigsten Wasserständen im entwässerten Bereich von im Mittel -35 bis -15 cm unter Flur ($p < 0,01$, $n=4$) in den Jahren 2005 bis 2008 sowie den höchsten Wasserstandsschwankungen (Tab. 1).

Tab. 1: Wasserstände (cm unter Flur) lt. Piezometer im ungestörten, wiedervernässten und entwässerten Moorbereich von 2005 bis 2009. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ($p < 0,01$, Mann-Whitney-U-Test)

Water table parameters (WT) of the undisturbed, rewetted and drained mire zone for the study period 2005 to 2009. Different letters indicate significant differences among years $p < 0,01$, Mann-Whitney-U-Test)

Parameter	Moorbereich	2005	2006	2007	2008	2009
Hydrologisches Jahr 01.11 bis 31.10						
WT _{Median} (cm)	ungestört	-1,4 (a)	-0,3 (a)	0 (a)	0 (a)	-2 (a)
	entwässert	-35 (a)	-30 (a)	-15 (a)	-17 (a)	-6 (b)
	wiedervernässt	-4 (a)	0 (b)	0 (b)	0 (b)	0(b)
WT _{25% Perz.} (cm)	ungestört	-3,4	-3,7	-5	-0,3	-5
	entwässert	-37	-34	-25	-27	-21
	wiedervernässt	-18	-0,7	0	-2	0
WT _{75% Perz.} (cm)	ungestört	0	0	0	0	-0,1
	entwässert	-25	-24	-14	-6	-1
	wiedervernässt	-3	0	0	0	0

Perz.: Perzentil

Der deutliche Anstieg der Wasserstände im Jahr 2009 im entwässerten Moorbereich ist in Zusammenhang mit der im August 2009 beginnenden parallel laufenden Wiedervernäsung zu sehen. Anhand der mittleren Wasserstände in den einzelnen Untersuchungsjahren lässt sich im wiedervernässten Moorbereich ein signifikanter Anstieg beginnend im Jahr 2005 (Einbau der Stauvorrichtungen Mai 2005) bis 2009 erkennen. Bereits kurze Zeit nach Einbau der Stauvorrichtungen war ein deutlicher Anstieg der Wasserstände zu verzeichnen (Abb. 2).

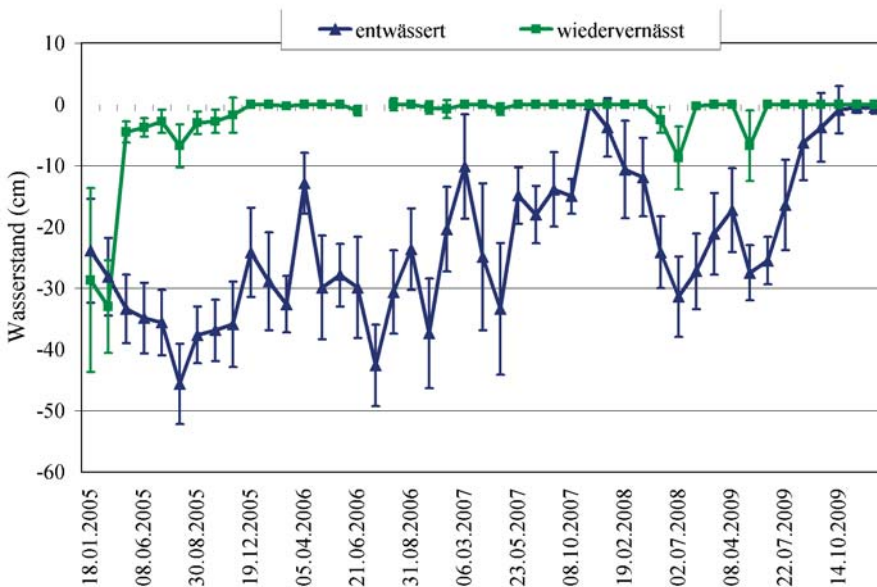


Abb. 2: Wasserstände in wiedervernässten und entwässerten Moorbereichen von 2005 bis 2009
Water table levels (cm below the mire surface) in the rewetted and drained mire zone for the study period 2005 to 2009

Eine vollständige Bilanzierung des Abflusses bezogen auf die Fläche des Einzugsgebietes (118 ha) mit 860 mm ist nur für das Jahr 2008 möglich. Die mittleren Abflussmengen betragen 16 ls^{-1} (2006), 47 ls^{-1} (2007), 38 ls^{-1} (2008) und 26 ls^{-1} (2009). Die höchsten Abflussspenden von 176 ls^{-1} (2009) wurden in der Schneeschmelze bzw. bei Starkniederschlägen in den Herbstmonaten beobachtet.

3.2 Stoffhaushalt

3.2.1 Moorwasser

Die hydrochemischen Parameter des Moorwassers zeigten signifikante Unterschiede zwischen entwässertem und ungestörtem Moorbereich. Im entwässerten Moorbereich wurden im Vergleich zum ungestörten Moorbereich signifikant höhere O₂-Gehalte von durchschnittlich 2,5 mg l⁻¹ (n=4, p<0,05, Tab. 2) im Moorwasser nachgewiesen.

Tab. 2: Hydrochemische Parameter des Moorwassers (Mittelwert ± SD) im gestörten, ungestörten und wiedervernässten Moorbereich von 2005 bis 2008. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Moorbereichen (p<0,05, t-Test)

Hydro-chemical variables of the mire pore water (mean ± standard deviation) in the undisturbed, rewetted and drained mire zone for the study period 2005-2008. Different letters indicate significant differences among mire zones (t-Test, p<0,05)

Parameter	gestört	ungestört	wiedervernässt
n	43	41	37
O₂ (mg l ⁻¹)	2,5 ± 1 (a)	1,3 ± 0,6 (b)	1,6 ± 0,7 (ab)
RP (mV)	162 ± 96 (a)	85 ± 63 (a)	78 ± 95 (a)
NO₃-N (mg l ⁻¹)	0,7 ± 0,3 (a)	0,5 ± 0,2 (a)	0,6 ± 0,2 (a)
NH₄-N (mg l ⁻¹)	1,0 ± 0,5 (a)	0,5 ± 0,2 (b)	0,6 ± 0,3 (b)
DON (mg l ⁻¹)	1,1 ± 0,7 (a)	0,6 ± 0,3 (a)	0,6 ± 0,3 (a)
DOC (mg l ⁻¹)	28,0 ± 5 (a)	35,4 ± 6 (b)	18,7 ± 3 (a)
PO₄-P (mg l ⁻¹)	0,04 ± 0,03 (a)	0,03 ± 0,01 (a)	0,04 ± 0,03 (a)
pH	4,4 ± 0,2 (a)	4,6 ± 0,3 (a)	4,4 ± 0,2 (a)
LF (μS cm ⁻¹)	68 ± 21 (a)	40 ± 9 (b)	57 ± 5 (c)

RP: Redoxpotenzial, DON: gelöster organischer N, DOC: gelöster organischer C

Ebenso wie der entwässerte Moorbereich die höchsten mittleren NH₄-N-Gehalte von 1 mg l⁻¹ (n=4, p<0,05) und die höchsten LF von durchschnittlich 68 μS cm⁻¹ (n=4, p<0,05) auf. Die mittleren Redoxpotenziale (RP) des Moorwassers in den verschiedenen Moorbereichen lagen im Bereich von 78 bis 162 mV. Aufgrund der sehr hohen Streuung der RP sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Messstellen sichtbar. Auffallend ist jedoch, dass im entwässerten Moorbereich die höchsten RP-Werte von maximal 370 mV gemessen wurden. Die DOC-Gehalte des Moorwassers schwankten zwischen 19 bis 35 mg l⁻¹ mit den signifikant höchsten Gehalten im ungestörten Moorbereich (n=4, p<0,05). Die mittleren pH-Werte des Moorwassers lagen im Bereich von 4,4 bis 4,6 und unterschieden sich nicht signifikant an den einzelnen Messstellen. Die Veränderungen der hydrochemischen Parameter des Moorwassers im wiedervernässten Moorbereich sind aus Tabelle 3 ersichtlich.

Tab. 3: Hydrochemische Parameter des Moorwassers (Mittelwert \pm SD) im wiedervernässten Moorbereich von 2005 bis 2009. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ($p < 0,05$, t-Test)

Hydro-chemical variables of the mire pore water (mean \pm standard deviation) in the rewetted mire zone for the study period 2005-2009. Different letters indicate significant differences among years (t-Test, $p < 0,05$)

Param.	2005	2006	2007	2008	2009
n	12	12	12	11	10
O₂ (mg l ⁻¹)	1,8 \pm 0,3 (a)	1,8 \pm 1,2 (a)	1,2 \pm 0,3 (a)	1,7 \pm 0,8 (a)	-
RP (mV)	57 \pm 35 (a)	87 \pm 89 (a)	80 \pm 128 (a)	87 \pm 129 (a)	83 \pm 106 (a)
NO₃-N (mg l ⁻¹)	0,5 \pm 0,1 (a)	0,5 \pm 0,2 (a)	0,8 \pm 0,3 (a)	0,4 \pm 0,2 (a)	0,2 \pm 0,1 (b)
NH₄-N (mg l ⁻¹)	0,5 \pm 0,3 (a)	0,7 \pm 0,5 (a)	0,5 \pm 0,2 (a)	0,6 \pm 0,4 (a)	0,4 \pm 0,2 (a)
DON (mg l ⁻¹)	0,8 \pm 0,2 (a)	0,6 \pm 0,2 (a)	0,3 \pm 0,2 (a)	0,7 \pm 0,4 (a)	-
DOC (mg l ⁻¹)	29,0 \pm 1,1 (a)	22,3 \pm 4,5 (a)	11,7 \pm 5,3 (b)	12,0 \pm 2,2 *	-
PO₄-P (mg l ⁻¹)	0,02 \pm 0,01 (a)	0,05 \pm 0,04 (a)	0,07 \pm 0,02 (a)	0,04 \pm 0,03 (a)	0,2 \pm 0,1 (b)
pH	4,1 \pm 0,2 (a)	4,3 \pm 0,1 (a)	4,2 \pm 0,3 (a)	4,4 \pm 0,2 (a)	4,2 \pm 0,2 (a)
LF (μ S cm ⁻¹)	58 \pm 3 (a)	59 \pm 5 (a)	56 \pm 6 (a)	56 \pm 6 (a)	55 \pm 3 (a)

* wenig Daten, RP: Redoxpotenzial, DON: gelöster organischer N, DOC: gelöster organischer C

Die mittleren DOC-Gehalte des Moorwassers sanken seit 2005 (Jahr der Wiedervernäsung) signifikant von 29 auf 12 mg l⁻¹ ($n=12$, $p < 0,05$). Im Vergleich zu den Vorjahren wurden im Jahr 2009 signifikant höhere PO₄-P-Gehalte ($n=10$, $p < 0,05$) von durchschnittlich 0,2 mg l⁻¹ im Moorwasser erfasst. Demgegenüber sanken die NO₃-N-Gehalte des Moorwassers von 0,5 mg l⁻¹ (2005) auf 0,2 mg l⁻¹ (2009, $n=10$, $p < 0,05$).

3.2.2 Abfluss

Die im Messwehr und Entwässerungsgraben ermittelten hydrochemischen Parameter des Moorabflusses zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Messstellen (Tab. 4).

Demgegenüber waren Änderungen der Parameter nach der Wiedervernäsung nachweisbar. Die mittleren NH₄-N-Gehalte des Moorabflusses stiegen von 0,03 mg l⁻¹ nach der Wiedervernäsung (2005) binnen 4 Jahren auf 0,4 mg l⁻¹ (2009, $n=10$, $p < 0,05$). Die PO₄-P-Gehalte des Moorabflusses im Entwässerungsgraben zeigten ebenfalls einen steigenden

Tab. 4: Hydrochemische Parameter des Moorabflusses (Mittelwert \pm SD) im Messwehr (M) und Entwässerungsgraben (G) von 2005 bis 2009. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ($p < 0,05$, t-Test)

Hydrochemical variables of the discharge (mean \pm standard deviation) sampled in the measuring weir (M) and in the drainage ditches (G) for the study period 2005 to 2009. Different letters indicate significant differences among years (t-Test, $p < 0,05$)

Parameter	2005	2006	2007	2008	2009
n	9	16	11	8	9
RP	M 225 \pm 81 (a)	226 \pm 82 (a)	289 \pm 63 (a)	185 \pm 100 (a)	204 \pm 81 (a)
(mV)	G 275 \pm 116 (a)	252 \pm 100 (a)	223 \pm 101 (a)	218 \pm 100 (a)	212 \pm 104 (a)
O2	M 6,7 \pm 4,3 (a)	5,6 \pm 3,2 (a)	6,9 \pm 1,8 (a)	6,2 \pm 6,0 (a)	10,3 \pm 5,0 (a)
(mg l ⁻¹)	G 7,5 \pm 5,3 (a)	5,3 \pm 3,8 (a)	6,9 \pm 3,4 (a)	5,6 \pm 3,5 (a)	14 \pm 7 (a)
NH₄-N	M 0,03 \pm 0,03 (a)	0,1 \pm 0,1 (b)	0,2 \pm 0,2 (b)	0,2 \pm 0,1 (b)	0,4 \pm 0,2 (b)
(mg l ⁻¹)	G 0,01 \pm 0,03 (a)	0,1 \pm 0,2 (a)	0,3 \pm 0,3 (b)	0,2 \pm 0,1 (b)	0,5 \pm 0,3 (b)
NO₃-N	M 0,6 \pm 0,3 (a)	0,8 \pm 0,6 (a)	0,6 \pm 0,3 (a)	0,4 \pm 0,4 (a)	0,4 \pm 0,4 (a)
(mg l ⁻¹)	G 0,9 \pm 0,8 (a)	0,7 \pm 0,6 (a)	0,4 \pm 0,4 (a)	0,1 \pm 0,1 (a)	0,5 \pm 0,6 (a)
PO₄-P	M 0,02 \pm 0,05 (a)	0,01 \pm 0,02 (a)	0,03 \pm 0,03 (a)	0,01 \pm 0,01 (a)	0,2 \pm 0,2 (a)
(mg l ⁻¹)	G 0,02 \pm 0,03 (a)	0,01 \pm 0,01 (ab)	0,03 \pm 0,03 (a)	0,01 \pm 0,01 (ab)	0,1 \pm 0,1 (ac)
pH	M 5,0 \pm 0,7 (a)	4,9 \pm 0,6 (a)	4,6 \pm 0,3 (a)	5,5 \pm 0,6 (a)	4,8 \pm 0,4 (a)
	G 4,6 \pm 0,6 (a)	4,7 \pm 0,5 (a)	4,6 \pm 0,5 (a)	4,9 \pm 0,1 (a)	4,5 \pm 0,4 (a)
LF	M 53 \pm 2 (ab)	55 \pm 12 (a)	51 \pm 6 (a)	61 \pm 22 (a)	44 \pm 6 (ac)
(μ S cm ⁻¹)	G 53 \pm 3 (ab)	57 \pm 11 (ab)	42 \pm 17 (a)	51 \pm 2 (a)	47 \pm 3 (ac)

RP: Redoxpotenzial

Trend mit im Vergleich zum Jahr der Wiedervernässung (2005) höheren Gehalten von 0,1 mg l⁻¹ im Jahr 2009 (n=10, $p < 0,05$). Die LF des Moorabflusses nahmen seit 2005 ab (n=10, $p < 0,05$).

3.2.3 Torf

Die im Torf an den einzelnen Messstellen ermittelten Trockenrohdichten lagen im Bereich von 49 bis 207 g l⁻¹ mit den signifikant niedrigsten Werten im ungestörten Moorbereich (n=4, $p < 0,05$, Tab. 5).

Der ungestörte Moorstandort wies sowohl die signifikant niedrigsten NO₃-N- und PO₄-P-Gehalte als auch die weitesten C:N-Verhältnisse (n=4, $p < 0,05$) im Torf auf. Die pH-Werte des Torfs lagen im Bereich von 3,5 bis 3,7 und zeigten keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Messstellen. Die mittleren LF des Torfs lagen im Bereich von 67 bis 83 μ S cm⁻¹ und unterschieden sich ebenfalls nicht signifikant an den verschiedenen Moorstandorten. Im wiedervernässen Moorbereich wurden signifikante Änderungen der PO₄-P-Gehalte sowie der LF des Torfes seit 2005 ermittelt (Tab. 6).

Tab. 5: Chemische Parameter und Trockenrohdichten (TRD) des Torfs (Mittelwert \pm SD) im gestörten, ungestörten und wiedervernässten Moorbereich. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Moorbereichen ($p < 0,05$, t-Test)

Peat soil properties and dry densities (TRD) of the peat soil (mean \pm standard deviation) in the drained, regenerated and rewetted mire zone. Different letters indicate significant differences among mire zones (t-Test, $p < 0,05$)

Parameter	ungestört	gestört	wiedervernässt
n	4	4	4
TRD (g l^{-1})	49 \pm 3 (a)	207 \pm 37 (b)	169 \pm 14 (b)
NH₄-N (g m^{-2*})	2,2 \pm 2,0 (a)	3,8 \pm 2,8 (a)	4,8 \pm 0,9 (a)
NO₃-N (g m^{-2*})	0,02 \pm 0,02 (a)	0,4 \pm 0,1 (b)	0,2 \pm 0,2 (b)
PO₄-P (g m^{-2*})	0,4 \pm 0,1 (a)	1,5 \pm 0,3 (b)	1,1 \pm 0,2 (b)
Nt (%)	1,2 \pm 0,6 (a)	2,0 \pm 0,2 (a)	1,5 \pm 0,3 (a)
Ct (%)	45,9 \pm 3,6 (a)	47,3 \pm 2,0 (a)	46,3 \pm 1,9 (a)
C:N	54 \pm 8 (a)	24 \pm 2 (b)	32 \pm 6 (b)
pH	3,7 \pm 0,1 (a)	3,5 \pm 0,1 (a)	3,6 \pm 0,1 (a)
LF ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	67 \pm 6 (a)	76 \pm 5 (a)	83 \pm 16 (a)

* 20 cm Tiefe

Tab. 6: Chemische Parameter des Torfs (Mittelwert \pm SD) im wiedervernässten Moorbereich von 2005 bis 2009. Unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ($p < 0,05$, t-Test).

Peat soil properties (mean \pm standard deviation) of the peat soil in the rewetted mire zone for the study period 2005 to 2009. Different letters indicate significant differences among years (t-Test, $p < 0,05$).

Parameter	2005	2006	2007	2009
n	4	4	4	4
NH₄-N (g m^{-2*})	6,7 \pm 2,6 (a)	5,9 \pm 3,0 (a)	3,8 \pm 2,8 (a)	2,3 \pm 0,2 (a)
NO₃-N (g m^{-2*})	0,5 \pm 0,4 (a)	0,4 \pm 0,2 (a)	0,2 \pm 0,2 (a)	0,08 \pm 0,05 (a)
PO₄-P (g m^{-2*})	4,3 \pm 0,5 (a)	2,0 \pm 0,4 (b)	1,1 \pm 0,2 (b)	1,8 \pm 0,2 (b)
Nt (%)	1,4 \pm 0,4 (a)	1,7 \pm 0,1 (a)	1,5 \pm 0,3 (a)	1,3 \pm 0,1 (a)
Ct (%)	38,3 \pm 10,5 (a)	55,5 \pm 4,0 (a)	46,3 \pm 1,9 (a)	42,0 \pm 2,6 (a)
C:N	29 \pm 2 (a)	33 \pm 3 (a)	32 \pm 6 (a)	31 \pm 2 (a)
pH	3,4 \pm 0,1 (a)	3,5 \pm 0,1 (a)	3,6 \pm 0,1 (a)	3,5 \pm 0,1 (a)
LF ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	281 \pm 100 (a)	206 \pm 53 (a)	83 \pm 16 (b)	211 \pm 9 (a)

* 20 cm Tiefe

4. Diskussion

4.1 Wasserhaushalt

Die Ergebnisse zeigten bereits kurze Zeit nach der Wiedervernässung einen Anstieg der Wasserstände im entwässerten Bereich. Von 2006 bis 2009 waren mittlere Wasserstände bis nahe der Geländeoberfläche mit geringen Wasserstandsschwankungen eine sehr gute Voraussetzung für die langfristige Regeneration des Moores (EDOM & WENDEL 1998). Im entwässerten Moorbereich, der seit August 2009 ebenfalls von der Wiedervernässung beeinflusst wird, wurde ebenso ein im Vergleich zu den Vorjahren signifikanter Anstieg der mittleren Wasserstände beobachtet. Vorher wurden an diesem Standort geringe Wasserstände und hohe Wasserstandsschwankungen mit Amplituden bis zu -31 cm registriert, die typisch für entwässerte Moore sind (JAUHAINEN 2003) und einer Etablierung moortypischer Vegetation entgegenwirken.

Ein Einfluss der Wiedervernässung auf den Moorabfluss war anhand vorliegender Untersuchungen nicht nachweisbar, da aufgrund lückenhafter Daten keine Quantifizierung des Abflusses vorgenommen werden konnte.

4.2 Stoffhaushalt

Die Ergebnisse der Moorwasser- und Torfuntersuchungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen ungestörtem und entwässertem Moorbereich. Im Moorwasser des entwässerten Bereiches wurden höhere O_2 -Gehalte gemessen, die vermutlich im Zusammenhang mit einer erhöhten O_2 -Verfügbarkeit infolge der Absenkung der Wasserstände stehen. Die im entwässerten Bereich im Moorwasser nachgewiesenen im Vergleich zum ungestörten Moorbereich höheren NH_4 -Gehalte und LF sowie die im Torf erfassten höheren NO_3 -, PO_4 -Gehalte und engeren C:N-Verhältnisse weisen auf Mineralisierung hin.

Unter Berücksichtigung der pH-Verhältnisse und des Nährstoffstatus der Torfproben, ausgedrückt in Form des C:N-Verhältnisses bzw. des Nc-Wertes, ist der ungestörte Moorbereich nach SUCCOW & JOOSTEN (2001) ein saures, oligotrophes Moor und der entwässerte Bereich ein saures, mesotrophes Moor. Mit der aeroben Zersetzung gehen die Prozesse der Vererdung bzw. Vermulmung des Torfes einher, die vor allem im Oberboden infolge von Setzung und Verdichtung zu einer Erhöhung des Substanzvolumens, der Trockenrohddichte und zu einer Verschiebung der Porenanteile führen (ZEITZ 1992, SCHÄFER 1996). Darauf sind vermutlich auch die im Vergleich zum ungestörten Bereich deutlich höheren Trockenrohddichten im Torf des entwässerten Bereiches zurückzuführen.

Im Moorwasser des ungestörten Moorbereiches wurden die höchsten mittleren DOC-Gehalte gemessen. Hohe DOC-Gehalte sind typisch für Moorwässer und werden durch Huminstoffe dominiert (RYDIN & JEGLUM 2006). Dabei ist das Ausmaß der DOC-Freisetzung

wesentlich vom Zersetzungsgrad des Torfes abhängig (KALBITZ & GEYER 2002). BIESTER et al. (2006) berichten, dass ungestörte bzw. schwach degradierte Moore höhere DOC-Konzentrationen im Moorwasser aufweisen als stark degradierte Moore.

Der Vergleich der Parameter des Moorwassers zeigt nur wenige Unterschiede zwischen den Untersuchungsjahren. Eine in Verbindung mit der Anhebung der Wasserstände stehende Reduktion der O₂-Gehalte und RP, die in verschiedenen Wiedervernässungsprojekten beschrieben wird (MITSCH & GOSSELINK 2000, MEISSNER & LEINWEBER 2004, VELTY et al. 2004, ZAK & GELBRECHT 2007, MEISSNER et al. 2008), konnte nicht bestätigt werden. Die Ursache dafür ist vermutlich, dass aufgrund des raschen Anstiegs der Wasserstände unmittelbar nach Einbau der Stauvorrichtungen die durchschnittlichen O₂-Gehalte und RP im Jahr der Wiedervernässung bereits ein niedriges Niveau aufwiesen. Der kurze Zeitabschnitt von Januar bis Mai 2005 vor der Vernässung wird nur durch wenige Daten repräsentiert. Die im Untersuchungszeitraum erfassten mittleren RP schwankten zwischen 57 bis 87 mV und lagen damit im Bereich der Nitrat- und Eisenreduktion. Auffallend sind sehr hohe Streubreiten des RP. Bisherige Untersuchungen zeigten, dass mikrobiell induzierte Redoxreaktionen eine Schlüsselrolle bei der Mobilisierung gelöster Substanzen infolge der Wiedervernässung spielen (SHENKER et al. 2005). Eine in engem Zusammenhang mit den veränderten Redoxbedingungen stehende Anhebung der pH-Werte des Moorwassers bei wiedervernässen Mooren (ZAK & GELBRECHT 2007) zeigte sich in unseren Untersuchungen nicht.

Zahlreiche Autoren weisen auf eine Erhöhung der P-, DOC- und NH₄-Konzentration im Moorwasser infolge der Wiedervernässung hin (RUPP et al. 2004, ZAK et al. 2004). Ergebnisse von ZAK & GELBRECHT (2007) zeigten, dass der oberste stark zersetzte Torfhorizont am meisten von einer zunehmenden Mobilität von P, DOC und NH₄ betroffen ist, da hier ein erhöhtes Angebot oxidierender Substanzen (Fe(III)-hydroxide, Sulfate) sowie zersetzbarer organischer Substanz vorhanden ist. Auf das Problem der erhöhten P-Mobilisierung in Verbindung mit Wiedervernässung weisen zahlreiche Autoren hin (MEISSNER & LEINWEBER 2004, RUPP et al. 2004, ZAK et al. 2004). Als Ursache hierfür wird die Rücklösung des im Zuge der Entwässerung mineralisierten und an Eisenverbindungen sorbierten anorganischen Phosphors gesehen. Eisen ist redoxsensitiv und wird bei abnehmendem RP von Fe(III) zu Fe(II) reduziert. Die Folge ist eine Rücklösung von Phosphor aus Eisen(III)hydroxiden (MITSCH & GOSSELINK 2000, PANT et al. 2002). Entscheidend für die Rücklösung ist das Fe-P und Fe-S-Verhältnis (ZAK et al. 2004, GELBRECHT et al. 2006). Kurzfristige N- als auch P-Austräge werden neben den genannten Ursachen ebenfalls auf ein großflächiges Absterben der Vegetation bei langanhaltendem Überstau zurückgeführt (HÖHNE 2000).

Unsere Ergebnisse deuten anhand der Erhöhung der PO₄-P-Gehalte im Moorwasser, Moorabfluss sowie einer Abnahme der P-Gehalte im Torf ebenfalls auf eine Erhöhung der Mobilität von P-Verbindungen infolge der Wiedervernässung hin. Der im Moorabfluss

beobachtete Anstieg der NH_4 -Konzentrationen nach der Wiedervernässung steht vermutlich ebenso im Zusammenhang mit kurzfristigen Auswaschungen infolge wechselnder Redoxbedingungen. Demgegenüber wurde bei langfristig permanent wassergesättigten Verhältnissen eine Abnahme der N-Mineralisierung beobachtet (MÜNCHMEYER et al. 1999, SCHRAUTZER 2001). So fand z. B. KIECKBUSCH (2003) eine deutliche Reduktion der NO_3 -Austräge nach der Wiedervernässung. Auch unsere Ergebnisse zeigten eine Abnahme der NO_3 -Konzentrationen im Moorwasser.

5. Danksagung

Wir danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Land Sachsen-Anhalt für die finanzielle Förderung des Projektes als auch der Verwaltung des Nationalparks Harz für die Unterstützung unserer Forschungsarbeiten.

6. Literaturverzeichnis

- ALTERMANN, M. & ROSCHE, O. (2010): Bodenkundliche Ansprache des Blumentopfmoores im Nationalpark Harz. – Unveröff. Gutachten im Auftrag der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- BAUMANN, K. (2009): Entwicklung der Moorvegetation im Nationalpark Harz. – Schriftenreihe aus dem Nationalpark Harz: 1-244.
- BIESTER, H., SELIMOVIC, D., HEMMERICH, S. & PETRI, M. (2006): Halogens in porewater of peat bogs – the role of peat decomposition and dissolved organic matter. - *Biogeosciences* **3**: 53-64.
- CLYMO, R.S., TURUNEN, J. & TOLONEN, K. (1998): Carbon accumulation in Peatland. - *OIKOS* **81**: 368-388.
- EDOM, F. & WENDEL, D. (1998): Regeneration von hydrologischem Regime und Veränderungen der Vegetation im NSG Mothäuser Heide. - Schriftenreihe der Sächsischen Akademie für Natur und Umwelt, Dresden **3**: Ökologie und Schutz der Hochmoore im Erzgebirge: 32-64.
- EGGELSMANN, R. (1987): Hochmoorregeneration verlangt eine nahezu horizontale Mooroberfläche. - *Natur und Landschaft* **6**: 241-246.
- EGGELSMANN, R. (1989): Zur Wiedervernässung von degenerierten Gebirgsmooren. - *Telma Beiheft* **2**: 233-255.
- GELBRECHT, J., ZAK, D. & ROSSOL, T. (2006): Dynamik gelöster Stoffe und Phosphorrückhalt in wiedervernässten Mooren des Peenetals (Mecklenburg-Vorpommern). - *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* **45**: 3-21.
- GELBRECHT, J., ZAK, D. & AUGUSTIN, J. (2008) : Phosphor- und Kohlenstoff-Dynamik und Vegetationsentwicklung in wiedervernässten Mooren des Peenetals in Mecklenburg-Vorpommern – Status, Steuergößen und Handlungsmöglichkeiten, *Berichte des IGB H 26*: 1-190 S.
- HÖHNE, L. (2000): Auswirkungen der Überstauung einer Niedermoorfläche auf die Wasserbeschaffenheit eines angrenzenden Fließgewässersystems.- *DGL-Tagungsbericht 1999*: 449-452; Rostock, Tautzing.

- JAUHAINEN, S. (2003): Holocene development of two boreal mires and the ecological effects of drainage and restoration. - DS thesis, University of Helsinki.
- KALBITZ, K., SOLINGER, S., PARK, J.H., MICHALZIK, b. & MATZNER, E. (2000): Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. – *Soil Sciences* **165**: 277-304.
- KALBITZ, K. & GEYER, S. (2002): Different effects of peat degradation on dissolved organic carbon and nitrogen. - *Organic Geochemistry* **33**: 319-326.
- KIECKBUSCH, J. (2001): Ökolydrologische Untersuchungen zur Wiedervernässung von Niedermooren am Beispiel der Pohnsdorfer Stauung. – Unveröff. Gutachten.
- JESCHKE, L. (2003): Strukturuntersuchungen in den Mooren des Nationalparks Harz. – Unveröff. Gutachten.
- LÜTT, S. (2001): Die Veränderungen der Vegetationsdecke von Torfstichen schleswig-holsteinischer Moore: Untersuchungen an Dauerbeobachtungsflächen. – *Kieler Notiz. Pflanzenkunde Schleswig-Holstein-Hamburg* **29**: 24-44.
- MITSCHE, J.M. & GOSSELINK, J.G. (2000): *Wetlands*. - 920 pp.; New York (Wiley).
- MEISSNER, R. & LEINWEBER, P. (2004): Prowater: prevention of diffuse water pollution with phosphorus from degraded and rewetted peat soils. - *UFZ-Bericht* **5**.
- MEISSNER, R., LEINWEBER, P., RUPP, H., SHENKER, M., LITAOR, M. J., ROBINSON, S., SCHLICHTING, A. & KOEHN, J. (2008): Mitigation of diffuse phosphorus pollution during rewetting of fen peat soils- a trans-European case study. – *Water, Air and Soil Pollution* **188**: 111-126.
- MÜNCHMEYER, U., ANDREAS, S. & AUGUSTIN, J. (1999): Einfluss der Wiedervernässung von stark degradiertem Niedermoorgrasland auf den Verlauf der Stickstoff-Mineralisierung. – *Archiv für Naturschutz und Landschaftspflege* **38**: 308-314.
- PANT, h.K., REDDY, K.R. & SPECHLER, R.M. (2002): Phosphorus retention in soils from a prospective constructed wetland site: environmental implications. – *Journal of soil sciences* **167**: 607-615.
- PFADENHAUER, J. (1998): Grundsätze und Modelle der Moorrenaturierung in Süddeutschland. - *Telma* **28**: 251-272.
- RUPP, H., MEISSNER, R. & LEINWEBER, P. (2004): Effects of extensive land use and rewetting on diffuse phosphorus pollution in fen areas – results from a case study in the Drömling catchment, Germany. - *Journal of plant nutrition and soil sciences* **167**: 408-416.
- RYDIN, H. & JEGGLUM, J. (2006): *The biology of peatlands*; New York (Oxford University Press Inc.).
- SCHÄFER, W. (1996): Changes in physical properties of organic soils induced by land use.-*Proc. 10th. International Peat Congress* **4**: 77-84.
- SCHUCH, M. (1994): Ziele der Moorrenaturierung: Die wichtigsten Maßnahmen. -*Telma* **24**: 245-252.
- SCHRAUTZER, J. (2001): Niedermoore Schleswig-Holsteins: Charakterisierung und Beurteilung ihrer Funktionen im Landschaftshaushalt. - *Habil. Christian-Albrechts-Universität Kiel*: 350 S.

- SHENKER, M., SEITELBACH, S., BRAND, S., HAIM, A. & LITAOR, M.I. (2005): Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland. -*European Journal of soil science* **56**: 515-525.
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): *Landschaftsökologische Moorkunde*, 2. völlig neu bearbeitet Auflage. -622 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- VELTY, S., DAGMAR B. & ZEITZ J. (2004): Einfluss von Wiedervernässung auf den Stoffhaushalt eines degradierten Niedermooses. - *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*: 59-86.
- WEGENER, U. & KISON H.U. (2002): Die Vegetation des Brockens im Nationalpark Hochharz (Exkursion G). - *Tüxenia* **22**: 243 – 267.
- 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.
- ZEITZ, J. (1992): Bodenphysikalische Eigenschaften von Substrat-Horizont-Gruppen in landwirtschaftlich genutzten Niedermooren. - *Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung* **33**: 301-307.

Anschrift der Verfasser:

Dr. N. Tauchnitz,
K. Osterloh,
Dr. S. Bernsdorf
Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
Naturwissenschaftliche Fakultät III
Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
Julius-Kühnstrasse 23
D-06112 Halle (Saale)
E-Mail: nadine.tauchnitz@landw.uni-halle.de

Prof. Dr. R. Meißner
UFZ-Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
Department Bodenphysik
Lysimeterstation
Dorfstrasse 55
D-39615 Falkenberg
E-Mail: ralph.meissner@ufz.de

244

Dr. H.-U. Kison
Nationalpark Harz
Lindenallee 35
38855 Wernigerode
E-Mail: hans-ulrich.kison@npharz.sachsen-anhalt.de

Manuskript eingegangen am 3. August 2010