

TELMA	Band 35	Seite 171 - 189	6 Abb., 5 Tab.	Hannover, November 2005
-------	---------	-----------------	----------------	-------------------------

Torfmoos (*Sphagnum*) als nachwachsender Rohstoff – Untersuchungen zur Maximierung der Produktivität von *Sphagnum papillosum* im Regendurchströmungsmoor Ispani 2 (Georgien)

Peat mosses (*Sphagnum*) as a renewable resource – Investigations on maximising productivity of *Sphagnum papillosum* in the percolation bog Ispani 2 (Georgia)

MATTHIAS KREBS und GRETA GAUDIG

Zusammenfassung

Die Kultivierung von Torfmoos-Frischmasse als Alternative zum Abbau fossilen Weißtorfes erlaubt die langfristige, dauerhafte und umweltgerechte Sicherung der Rohstoffversorgung für den Erwerbsgartenbau und trägt zum Erhalt lebender Hochmoore mit ihren wichtigen Funktionen für Naturschutz und Klima (als Kohlenstoffspeicher) bei.

Im Forschungsprojekt „Torfmoos (*Sphagnum*) als nachwachsender Rohstoff“ werden die Optimierung der Wuchsbedingungen und die Etablierung von Torfmoosen auf abgetorften Hochmooren untersucht. Es wird ein Überblick über die Versuche im Projekt gegeben und die Ergebnisse von Untersuchungen zur Nährstoff-Limitation der Produktivität von *Sphagnum papillosum* im Regendurchströmungsmoor Ispani 2 (Georgien) dargestellt.

Abstract

The cultivation of fresh peatmoss biomass as an alternative to the extraction of fossil white peat allows a lasting, sustainable and non-polluting supply of raw material for professional horticulture and the preservation of living bogs with their important functions for nature conservation and climate regulation (as carbon storage).

In the research project “Peatmoss as a renewable resource” the optimising of growth conditions and the establishment of peat mosses on cut-over bogs are investigated. An overview on the experiments of the project is given and the results of investigations about nutrient limitation of productivity of *Sphagnum papillosum* in the percolation bog Ispani 2 (Georgia) is represented.

1. Einleitung

Fossile Torfmoose der Gattung *Sphagnum* sind die Hauptkomponenten von schwach zersetztem *Sphagnum*-Torf („Weißtorf“). Von diesem wichtigsten Substratrohstoff für den Erwerbsgartenbau werden weltweit jährlich 30 Mio. m³ verbraucht (JOOSTEN & CLARKE 2002). Da in den meisten Ländern West- und Mittel-Europas die Weißtorfressourcen schwinden, verlagert sich der Torfabbau zunehmend in die Baltischen Staaten, Skandinavien und Kanada (JOOSTEN 1995a, 2003). Nicht nur, dass Torf eine endliche, nicht erneuerbare Ressource ist (JOOSTEN 2004), Torfabbau zerstört auch wichtige Funktionen der Moore für Naturschutz und Klima (JOOSTEN 1995b, 1998). Deshalb muss umgehend nach einer Alternative gesucht werden, die umweltgerecht ist und die Rohstoffversorgung dauerhaft und nachhaltig sichern kann sowie den hohen Standards im Erwerbsgartenbau gerecht wird.

Diese Alternative könnte die Kultivierung von Torfmoos (*Sphagnum* farming) sein (GAUDIG & JOOSTEN 2002, 2003, GAUDIG 2001, 2002). Torfmoos-Frischmasse weist die gleichen positiven physikalischen und chemischen Eigenschaften wie Weißtorf auf und zeichnet sich zudem durch eine bakterizide und fungistatische Wirkung aus. Versuche zeigen, dass die pflanzenbauliche Verwendung von Torfmoos-Frischmasse ohne Qualitätsverlust möglich ist (GRANTZAU & GAUDIG 2005, GRANTZAU 2002, 2004).

Forschungsschwerpunkte im 3-jährigen Projekt „Torfmoos als nachwachsender Rohstoff“ sind die Optimierung der Wuchsbedingungen und die Etablierung von Torfmoosen auf abgetorften Hochmooren. Einen Überblick über die Versuche gibt Tabelle 1.

Tab. 1: Überblick über die Versuche im Projekt „Torfmoos als nachwachsender Rohstoff“
Overview of the experiments in the project „Peatmoss as a renewable resource“

	Feldversuch		Gefäßversuch		Feldversuch	Gefäßversuch
Forschungsschwerpunkt	Maximierung der Torfmoos-Produktivität					
			Etablierung der Torfmoose auf abgetorftem Hochmoor und ehemaligem Hochmoorgrünland			Pflanzenbauliche Eignung von Torfmoos-Frischmasse als Substratrohstoff im Erwerbsgartenbau
Ort	Regen-Durchströmungsmoor in Georgien	geschlos.Gewächshaus in Greifswald	offenes Gewächshaus in Bremen	abgetorfte Hochmoor in Ramsloh	geschlos. Gewächshaus in Hannover	
Bedingungen	natürlich	total kontrolliert	teilweise kontrolliert (Bewässerung, Abfluss)	teilweise kontrolliert (Bewässerung, Abfluss)	total kontrolliert	
Ausführende Einrichtung	Universität Greifswald	Universität Greifswald	Bodentechnologisches Institut Bremen	Bodentechnologisches Institut Bremen	Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau in Hannover Ahlem	
Stand der Bearbeitung	abgeschlossen	laufend	laufend	laufend	laufend	

Bisher wurden keine Forschungen zur Maximierung der Primärproduktion von Torfmoosen unter kommerziellen Gesichtspunkten durchgeführt. Die vorliegenden Arbeiten über die Ökologie von *Sphagnum* unter natürlichen Bedingungen oder für Hochmoor-Restauration deuten auf eine Erhöhung der *Sphagnum*-Produktivität u. a. durch ganzjährig ausgeglichen hohe Moorwasserstände und Phosphor-Düngung bei ausreichender Stickstoff-Versorgung (vgl. GAUDIG 2002). Beide Größen sind Schwerpunkte der Felduntersuchungen im Regendurchströmungsmoor Ispani 2 (Georgien), die in dieser Veröffentlichung dargestellt werden.

Das Torfmooswachstum ist unter anthropogen nicht erhöhten Stickstoff-Einträgen und in nährstoffarmen Regenmooren primär Stickstoff-limitiert (RISAGER 1998, SUCCOW & JOOSTEN 2001, LIMPENS 2003). Erst bei ausreichender Stickstoff-Versorgung (12-18 kg ha⁻¹ a⁻¹) wird Phosphor zum limitierenden Faktor (RISAGER 1998, LAMERS 2001).

Ausgehend von einer geringen Stickstoff-Deposition in Ispani 2 (1,5-2,5 kg N ha⁻¹a⁻¹, <http://www.emep.int> 1999), stellt es als natürliches, anthropogen kaum beeinflusstes Hochmoor mit einem geschlossenen, homogenen Torfmoosrasen und geringer Deckung an Gefäßpflanzen (Abb. 1) ein optimales Untersuchungsgebiet dar. Zudem lässt das Klima bzw. die lange Vegetationsperiode eine hohe natürliche Produktivität der Torfmoose vermuten.

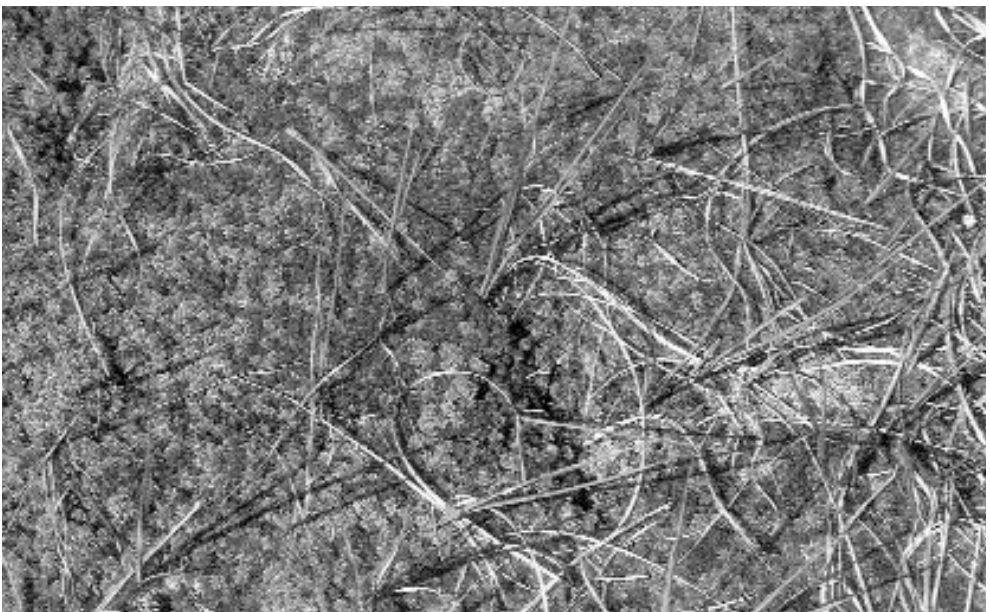


Abb. 1: Vegetationsaspekt im Zentrum von Ispani 2
Aspect of vegetation in the centre of Ispani 2

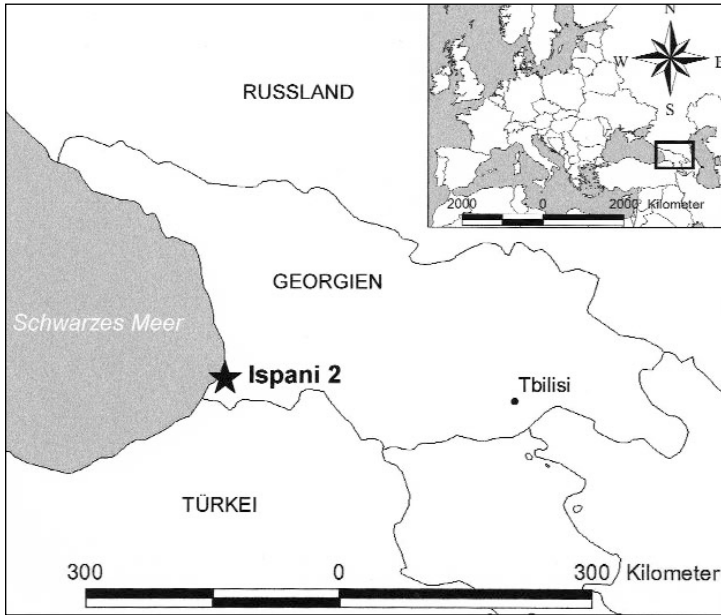


Abb. 2: Lage von Ispani 2
Location of Ispani 2

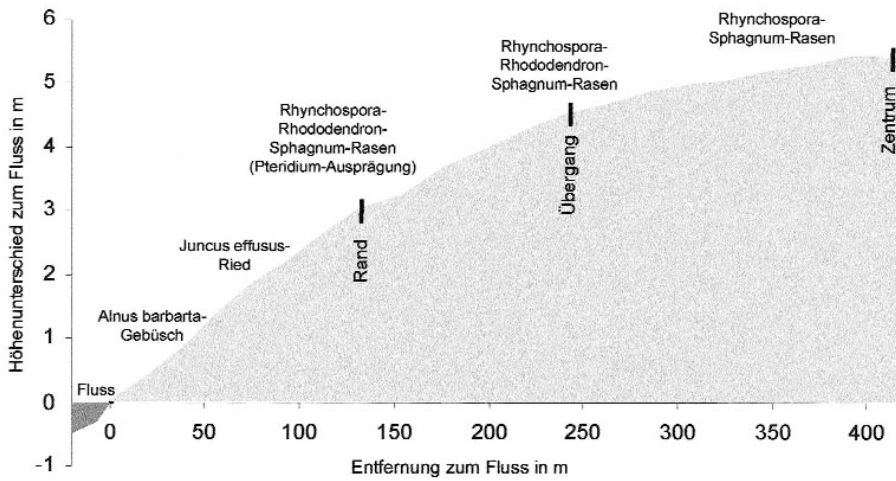


Abb. 3: Lage der Untersuchungsgebiete im Profilschnitt von Ispani 2
Location of the research areas in the cross-section of Ispani 2

Das Moor Ispani 2 (41° 51' N, 41° 48' O) liegt im Südwestteil der Kolchis-Tiefebene (Georgien) (Abb. 2). Es ist 1100 m vom Schwarzen Meer entfernt und befindet sich am östlichen Siedlungsrand der Stadt Kobuleti. Mit einer Ausdehnung von 2300 m (Nordwest-Südost) und 1150 m (Südwest-Nordost) beträgt die Moorfläche ca. 250 ha. Das Regenmoor ist uhrglasförmig aufgewölbt (Abb. 3).

Kennzeichnend für die südliche Kolchis-Tiefebene ist ein subtropisches Klima mit hohen, gleichmäßig über das Jahr verteilten Niederschlägen mit durchschnittlich 2500 mm, hoher Luftfeuchtigkeit von 70-83 % und selten auftretende Fröste. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 13,4 °C (Klimastation Kobuleti).

2. Methodik

2.1 Untersuchungsflächen

Die Einrichtung der Untersuchungsflächen erfolgte im anthropogen kaum veränderten Südostteil des Moores in folgenden Vegetationseinheiten (Tab. 2, nach KAFFKE in prep.):

1. *Rhynchospora-Rhododendron-Sphagnum*-Rasen (*Pteridium*-Ausprägung),
2. *Rhynchospora-Rhododendron-Sphagnum*-Rasen und
3. *Rhynchospora-Sphagnum*-Rasen.

Tab. 2: Kurzcharakterisierung der für die Untersuchungen ausgewählten Vegetationseinheiten (nach KAFFKE in prep.)

Short characterisation of the selected vegetation units (after KAFFKE in prep.)

Vegetationseinheit					
	1. Rand	2. Übergang	3. Zentrum		
	<i>Rhynchospora-Rhododendron-Sphagnum</i> -Rasen (<i>Pteridium</i> -Ausprägung)	<i>Rhynchospora-Rhododendron-Sphagnum</i> -Rasen	<i>Rhynchospora-Sphagnum</i> -Rasen		
Moose	Gesamtdeckung in %	75	60	96	
	<i>Sphagnum papillosum</i>	75	75	85	
	<i>Sphagnum imbricatum</i>	0	1	6	
	<i>Sphagnum mulleri</i>	0,5	2	5	
	<i>Polytrichum strictum</i>	0	2	0	
Gefäßpflanzen	Gesamtdeckung in %	50	35	20	
		Deckung von <i>Molinia fibrotica</i> bis zu 50 %, hochsteet: <i>Pteridium aquilinum</i> (Deckung bis 25 %), <i>Osmunda regalis</i> , <i>Rubus spec.</i> , <i>Achras barbatifolia</i> -Arten der Gebüschzone	<i>Rhododendron latifolium</i> , <i>R. ponticum</i> , <i>Vaccinium arctostaphylos</i> , <i>Fraxinus alba</i> bis 50 cm Höhe, hochsteet: <i>Silphium laciniatum</i>	<i>Molinia fibrotica</i> , <i>Rhynchospora alba</i> mit Deckungsgaden bis zu 25 %, hochsteet: <i>Drosera rotundifolia</i>	
	Ø Höhe von <i>Molinia fibrotica</i> in cm	71	63	55	

Tab. 3: Standortparameter der Vegetationseinheiten
Site conditions of the vegetation units

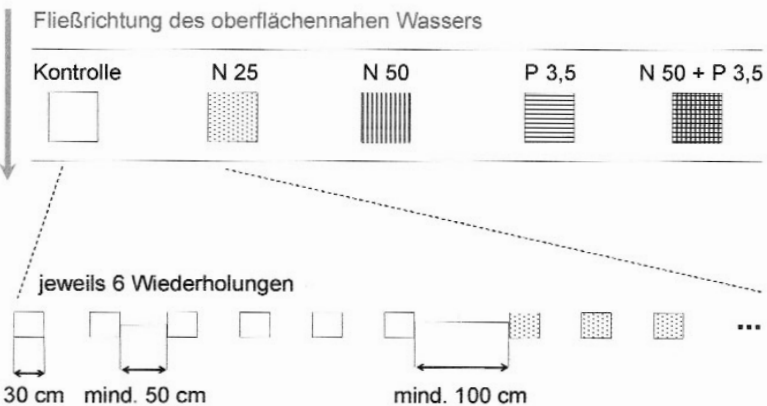
Vegetations-einheit	Untersuchungs-bereich	Abstand vom Moorrand in m	Wasser-stand in cm unter MOF ⁽¹⁾	pH ⁽²⁾	eL in $\mu\text{scm}^{-1(2)}$	C/N-Verhältnis ⁽³⁾
1	Rand	40	-30,4	~4,3	~125	28
2	Übergang	150	-28,5	~4,3	~90	35
3	Zentrum	320	-21,4	~4,3	~80	54

- (1) über Untersuchungszeitraum Anfang Mai bis Ende September 2003 gemittelt (n=21), MOF-Moosoberfläche
- (2) Zusammenfassung von 2 Messungen (Juli, August 2003) am Anfang und Ende der Untersuchungstransecte
- (3) Torfprobe aus 40 cm unter MOF, 11.05.2003, Daten von Andreas Kaffke, Analyse mit C/N-Analyser

Die Vegetationseinheiten unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Standortparameter (Tab. 3). Vom Zentrum zum Moorrand nehmen der Wasserstand und das C/N-Verhältnis ab und die elektrische Leitfähigkeit (eL) zu.

Tab. 4: Düngevarianten und entsprechende Düngemenge in $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, Düngemenge nach RUDOLPH & VOIGT 1986, JAUHAINEN et al. 1998, LIMPENS 2003
Fertilization variants and amount of fertilizer in $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$, fertilization form after RUDOLPH & VOIGT 1986, JAUHAINEN et al. 1998, LIMPENS 2003

Bezeichnung	Düngemenge in $\text{kg ha}^{-1}\text{a}^{-1}$	Düngerform	Ausbringung	
			in mg pro Fläche pro Düngung	
C (Kontrolle)	-	-	ohne Dünger	(gelöst in) 300 ml Moorwasser in 6 Durchgängen im Abstand von 3 Wochen
N25	25 (N)	NH_4NO_3	37,5 N	
N50	50 (N)	NH_4NO_3	75,0 N	
P	3,5 (P)	NaH_2PO_4	5,25 N	
NP	50 (N) + 3,5 (P)	$\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{NaH}_2\text{PO}_4$	75,0 N + 5,25 P	



In jeder Vegetationseinheit (Untersuchungsbereiche **Rand, Übergang, Zentrum**) wurden für jede Düngestufe jeweils sechs Flächen mit einer Größe von 30 x 30 cm nebeneinander eingerichtet (Tab. 4). Um Beeinflussungen zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen zu verhindern, wurden die auf einer Linie angeordneten Untersuchungsflächen senkrecht zum Moorgefälle und damit zur lateralen Wasserströmung ausgerichtet. Zwischen zwei Düngestufen wurde ein Mindestabstand von 100 cm und zwischen den Wiederholungen von 50 cm festgelegt, der sich erhöhte, wenn Straucharten in den Bereichen der Mindestentfernungen vorkamen. Die Streu wurde entfernt, um die durch die Streudeckung bestehenden Unterschiede auszugleichen.

2.2 Vegetationsaufnahmen

Um Änderungen in der Vegetationszusammensetzung zu untersuchen, wurde diese inklusive der Streumenge und dem Anteil an trockenen Torfmoosen in den einzelnen Untersuchungsflächen alle 2,5 Monate während des Untersuchungszeitraumes aufgenommen. Die prozentuale Deckung der einzelnen Pflanzenarten und der anderen Parameter wurde mit Hilfe eines Gitters (3 x 3 cm Quadrate) erfasst.

Die Bestimmung der Moosarten erfolgte nach DANIELS & EDDY (1985) sowie FRAHM & FREY (2004), die der Gefäßpflanzen nach DMITRIEVA (1990).

2.3 Düngung

Zur Untersuchung der Produktivitätslimitation wurden die Torfmoose mit Stickstoff und Phosphor gedüngt (Tab. 4, Methode abgewandelt nach AERTS et al. 1992, 2001). Die N25-Düngermenge gewährleistet eine ausreichende Stickstoff-Versorgung der Torfmoose (vgl. RUDOLPH & VOIGT 1986, LAMERS 2001). Hohe Stickstoff-Einträge, wie sie in Westeuropa anthropogen auftreten (AERTS et al. 1992), wurden mit der N50-Düngung simuliert. Um den engen, pflanzenphysiologischen Zusammenhang von Stickstoff und Phosphor (STÖHR pers. Mitt. 2005) zu untersuchen, wurde die höhere Stickstoff-Düngemenge mit einer Phosphor-Zugabe von 3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹ (NP) kombiniert.

2.4 Bestimmung des Längen- und Biomassezuwachses

Zur Bestimmung des Längenzuwachses von *Sphagnum papillosum* wurde die Ausgangshöhe der Torfmoossschicht in den Wiederholungen nach der „cranked wire“ – Methode (CLYMO 1970) markiert. Pro Untersuchungsfläche wurden 3 rostfreie Stahldrähte („cranked wire“) mit bürstenartigem unteren Ende in 8 cm Tiefe senkrecht im Moosrasen verankert. Die Moosoberkante wurde am Draht markiert. Zusätzlich wurden 5

Torfmoose mit einem Bindfaden direkt unterhalb des Torfmoosköpfchens (Capitulum) gekennzeichnet (CLYMO 1970). Als Capitulum wurde der obere Abschnitt des Torfmooses mit kompakter Ästchenanordnung definiert. Zum Ende des Untersuchungszeitraums wurde der Längenzuwachs der Mooschicht (mit und ohne Capitulum) an den „cranked wire“ und den mit Bindfaden markierten Moosen gemessen.

Der Biomassezuwachs wurde anhand des Längenzuwachses bestimmt und oberhalb der Marker – zum Ausschließen von Randeffekten – nur in den zentralen 20 x 20 cm jeder Untersuchungsfläche abgeschnitten (AERTS et al. 1992; LIMPENS 2003). Nach dem Aussortieren der einzelnen Arten wurde *Sphagnum papillosum* innerhalb von 24 h bei 105 °C 12 h lang getrocknet und dann gewogen. Um den Netto-Biomassezuwachs zu ermitteln, wurden je Untersuchungsbereich Moospflanzen aus einer unbehandelten Fläche (10 x 10 cm) entnommen, das mittlere Gewicht der Capitula für die Fläche von 1 m² bestimmt und vom Biomassezuwachs abgezogen.

2.5 Bestimmung der Nährstoffe im Torfmoos

Von dem getrockneten und gemahlene Torfmoosmaterial wurde der Gesamt-Stickstoff- und der Gesamt-Phosphor-Gehalt gemessen. Die Ermittlung des N-Gehalts erfolgte über eine trockene Verbrennung im Sauerstoffstrom und einer oxidativen und katalytischen Umwandlung der Probeninhaltsstoffe zu N₂ und dessen Bestimmung mittels Wärmeleitdetektor im C/N-Analyser (Element vario EL) (DIN ISO 13878 1998). Der P-Gehalt wurde nach einem Aufschluss mit H₂SO₄ (10 M), H₂O₂ (30%ig) sowie deionisiertem Wasser und einer Erhitzung (160°C) photometrisch mittels VARIAN-Photometer bestimmt (DIN EN 1189 1996, ZWIRNMANN et al. 1999).

2.6 Standortparameter

Die Wasserstände wurden in allen Untersuchungsbereichen in je 2 Pegelrohren im Mindestabstand von zwei Wochen gemessen (n=21). In einem zusätzlichen Pegelrohr (**Übergang**) mit Datalogger wurde der Wasserstand 2 Monate lang im 15 min Takt aufgezeichnet.

Der pH und die elektrische Leitfähigkeit des oberflächennahen Porenwassers wurden ebenfalls in jedem Untersuchungsbereich gemessen. Die pH-Bestimmung erfolgte potenziometrisch mit der Einstabmesskette pH 320 WTW. Die elektrische Leitfähigkeit wurde mit dem Leitfähigkeitsmessgerät Cond 315i WTW und der Standard-Leitfähigkeitsmesszelle TetraCon 325 WTW mit einem Messbereich von 1 µS cm⁻¹-2 S cm⁻¹ ermittelt (Zellkonstante 0,475 cm⁻¹). Das pH-, wie auch das Leitfähigkeitsmessgerät haben eine automatische Temperaturkompensation für 25°C.

2.7 Berechnungen

Die Vegetations- und Wachstumsperiode für *Sphagnum papillosum* wurde anhand der Anzahl der Tage, deren Minimum-Temperatur über 0 °C liegt, bestimmt (GRIGAL 1985). Die Vegetationsperiode beträgt im langjährigen Mittel 364 Tage (1971-2003). Die Biomasse- und Längenzuwächse wurden auf diese Dauer hochgerechnet.

Die Produktivität (in $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$) wurde aus dem Netto-Jahresbiomassezuwachs und der Deckung von *Sphagnum papillosum* in den einzelnen Untersuchungsflächen ermittelt.

2.8 Statistik

Unterschiede zwischen den Untersuchungsflächen wurden aufgrund fehlender Varianzhomogenität und Normalverteilung der Düngevarianten mit einem nichtparametrischen multiplen Vergleichstest (Tukey-type multiple comparison test) nach ZAR (1999) auf ihre Signifikanz untersucht. In dem Test werden die Rangsummen der Stichproben miteinander verglichen und der Standardfehler unter Einbeziehung gleicher Ränge („tied ranks“) nach DUNN berechnet (ZAR 1999).

3. Ergebnisse

3.1 Längenzuwachs

In allen Moorbereichen von Ispani 2 (**Rand**, **Übergang** und **Zentrum**) beträgt das natürliche Längenwachstum von *Sphagnum papillosum* ca. 3 cm pro Jahr und kann durch eine Düngung mit Phosphor (P) oder Stickstoff und Phosphor kombiniert (NP) signifikant erhöht werden (Abb. 4a). Mit 13,41 cm pro Jahr wurde der höchste (mittlere) Längenzuwachs bei Phosphor-Düngung (P) am **Rand** festgestellt. Während eine Düngung ausschließlich mit Stickstoff (N25, N50) im **Übergang** und im **Zentrum** den Längenzuwachs tendenziell hemmt, führt die N25-Zugabe am **Rand** zu einer Steigerung des Längenzuwachses.

3.2 Produktivität

Die Produktivität von *Sphagnum papillosum* ist im **Zentrum** im Vergleich zum **Rand** um das 2,3-fache signifikant höher (Abb. 4b). Unter natürlichen Bedingungen konnte im **Zentrum** eine Produktivität von $1060 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ festgestellt werden. Nur geringfügig höher ist mit $1108 \text{ g m}^{-2} \text{a}^{-1}$ der für die Produktivität von *Sphagnum papillosum* in Ispani 2 höchste Wert, der durch eine Phosphor-Düngung (P) im **Zentrum** erreicht wurde.

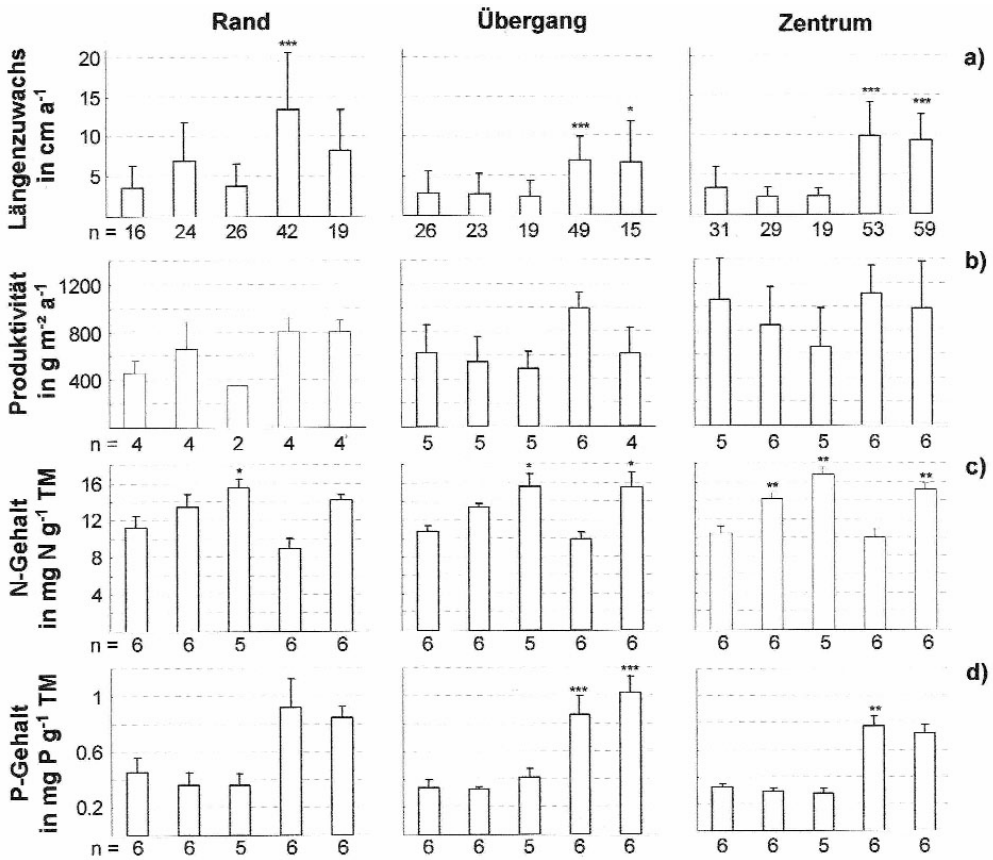


Abb. 4: Mittelwerte für a) Längenzuwachs, b) Produktivität, c) N-Gehalt und d) P-Gehalt von *Sphagnum papillosum* in Ispani 2 unterschiedlicher Düngevarianten (C = ungedüngte Kontrolle, N25 = 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹; N50 = 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹; P = 3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹; NP = 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹ + 3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹) Fehlerbalken = Standardabweichung, Signifikanz der Unterschiede zur Kontrolle getestet nach ZAR (1999) * P<0,05; ** P<0,01; *** P<0,001. Pro Jahr entspricht einer Wachstumsperiode von *Sphagnum papillosum* von 364 Tagen

Mean values with standard deviation for a) length growth, b) productivity, c) N-content, and d) P-content of *Sphagnum papillosum* in Ispani 2 in various fertilization variants (C = not fertilized = control, N25 = 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹; N50 = 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹; P = 3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹; NP = 50 kg N ha⁻¹ a⁻¹ + 3,5 kg P ha⁻¹ a⁻¹) Significance of differences to control tested after ZAR (1999) * P<0,05; ** P<0,01; *** P<0,001. Values per year calculated with a growth period of *Sphagnum papillosum* of 364 days

Aufgrund der geringen Stichprobenanzahl und der hohen Varianz innerhalb der Düngebehandlungen konnten hier keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Tendenziell führt die Phosphor-Düngung (P) im Vergleich zur Kontrolle (C) am selben Standort in den Moorbereichen **Rand** und **Übergang** zu einer erhöhten Produktivität. Ausschließlich am **Rand** bewirkt auch die Zugabe von Stickstoff in geringer Konzentration (N25) und in Kombination mit Phosphor (NP) eine Steigerung der Produktivität. Die Düngung von Stickstoff in hoher Konzentration (N50) führt in allen Moorbereichen zu einer Hemmung der Produktivität.

3.3 Stickstoff-Gehalt

Der N-Gehalt im Zuwachs von *Sphagnum papillosum* ist in allen Moorbereichen für die unterschiedlichen Düngevarianten ähnlich (Abb. 4c). In den Kontroll-Flächen (C) beträgt der N-Gehalt 10,5 bis 11,7 mg N g TM⁻¹. Während in den ausschließlich mit Phosphor gedüngten Flächen der N-Gehalt geringer ist, ist dieser in den Flächen, denen Stickstoff zugeführt wurde – von der N25- über NP- zur N50-Düngestufe zunehmend – z.T. signifikant erhöht (Abb. 4c).

3.4 Phosphor-Gehalt

Sphagnum papillosum weist am **Rand** geringfügig, aber nicht signifikant höhere P-Gehalte auf als im **Übergang** und im **Zentrum** (0,46, 0,35 und 0,33 mg N g TM⁻¹) (Abb. 4d). Deutlich und z.T. signifikant erhöht sind die P-Gehalte in den mit Phosphor gedüngten Flächen (P, NP). Die P-Gehalte in den ausschließlich mit Stickstoff gedüngten Flächen (N25, N50) zeigen kaum Unterschiede zu den jeweiligen Kontroll-Flächen.

Tab. 5: Vergleich der Stickstoff-Gehalte in Torfmoosen
Comparison of N contents in *Sphagnum* species

mg N g TM ⁻¹	Material	Methode	Quelle
10,5-11,7	Capitulum + Stengel von <i>S. papillosum</i>	C/N-Analyser	Eigene Untersuchungen in Ispani 2
<10 (= 1% der TM)			Clymo & Hayward (1982)
9,1-10,1	Capitulum von <i>S. magellanicum</i>	C/N-Analyser	Limpens (2003), Twenhöven (1992)
11,6	Capitulum von <i>S. magellanicum</i>	C/N-Analyser	Bragazza et al. (2004)
11,0±1,1	0 – 4 cm von <i>S. papillosum</i>	Flow injection analyser	Malmer & Wallen (2005)

4. Diskussion

4.1 Nährstofflimitation der Produktivität

In Ispani 2 weist *Sphagnum papillosum* lediglich am **Rand** bei der Zugabe von Stickstoff in geringer Konzentration (N25) eine Produktivitätssteigerung auf. Das deutet auf eine Stickstoff-Limitation (vgl. KOERSELMAN & MEULEMAN 1996, RISAGER 1998). Da dennoch eine hohe Stickstoff-Akkumulation festgestellt wurde (Abb. 4b, c), ist zu vermuten, dass der Stickstoff-Bedarf zusätzlich zum natürlichen Stickstoff-Angebot weit geringer als die o.g. Stickstoff-Düngemenge ist. Die höheren Phosphor-Ausgangsgelalte am **Rand** (Abb. 4d, Vergleich der Kontroll-Flächen) können zu einer höheren Stickstoff-Aufnahme und Biomassebildung führen.

In den Moorbereichen **Übergang** und **Zentrum** hingegen zeigen die Stickstoff-Akkumulation im Torfmoos, die fehlende Produktivitätssteigerung sowie die tendenzielle Hemmung der Produktivität in der reinen Stickstoff-Düngung (N25, N50) (Abb. 4b, c), dass keine Stickstoff-Limitation besteht (vgl. MALMER 1988, JAUHAINEN et al. 1998, AERTS et al. 2001). Sehr hohe N-Konzentrationen in den Torfmoosen wirken toxisch und führen zu einer überwiegend Ammonium (NH_4^+) bedingten Schädigung (RUDOLPH & VOIGT 1986, WOODIN & LEE 1987, GUNNARSSON & RYDIN 2000, VAN DER HEIJDEN et al. 2000).

Da die Stickstoff-Ausgangsgelalte in den Kontroll-Flächen im Vergleich mit Literaturangaben (Abb. 4c, Tab. 5) hoch sind, wird vermutet, dass die Stickstoff-Einträge höher als angenommen sind. Die bedeutendste Stickstoff-Quelle für Regenmoore ist die atmosphärische Nass- und Trockendeposition (WOODIN & LEE 1987, DAMMAN 1988a, AERTS et al. 2001). Mögliche Anreicherung im Torf durch höhere Viehbestände (VAT-SHAKMADZE pers. Mitt. 2003), Düngerzugaben auf den angrenzenden Feldern vor Beginn der 90er Jahre und die nahe gelegene Transittrasse können die Stickstoff-Verfügbarkeit erhöhen. Dieser Stickstoff wird durch Relokalisierung für die Torfmoose verfügbar (DAMMAN 1988a, b, RYDIN & CLYMO 1989).

Neben der Deposition führt die Luft-Stickstoff-Fixierung durch Mikroorganismen wie heterotrophe Bakterien und Cyanobakterien (vgl. DAMMAN 1988b, RISAGER 1998), die durch hohe Temperaturen in Kombination mit hoher Luftfeuchtigkeit gefördert wird, zu einer erhöhten Stickstoff-Anreicherung.

Bei ausreichender Stickstoff-Verfügbarkeit, wie für **Übergang** und **Zentrum** festgestellt, wird eine Limitationsverschiebung von Stickstoff zu Phosphor beobachtet (vgl. MALMER 1990, AERTS et al. 1992, RISAGER 1998, LAMERS 2001, LIMPENS 2003). Eine P-Limitation lässt sich aufgrund der tendenziellen, ausschließlich durch die reine Phosphor-Zugabe verursachten Steigerung der Torfmoosproduktivität, nur im **Über-**

gang feststellen. Am **Rand** liegt durch die Stickstoff-Limitation und die Phosphor-bedingte Wachstumsförderung eine NP-Colimitation vor (vgl. RISAGER 1998). Die Abnahmen der Stickstoff-Gehalte in den P-Düngevarianten unterstützen die Aussagen zur Phosphor-Limitation (vgl. JAUHAINEN et al. 1998, AERTS et al. 2001). Da im **Zentrum** weder eine Phosphor-, Stickstoff- noch eine NP-Colimitation vorliegt, wird Kalium als limitierender Nährstoff vermutet (vgl. VERHOEVEN et al. 1996, VENTERINK et al. 2002, BRAGAZZA et al. 2004). Unterstützend wirkt die im Vergleich mit Angaben von GIGNAC (1989) (0,18 – 40,44 mg K l⁻¹) geringe Kalium-Konzentration im Porenwasser des **Zentrums** (0,13 mg K l⁻¹).

In allen Moorbereichen ist eine tendenzielle Abschwächung des wachstumshemmenden Einflusses von hoher Stickstoff-Verfügbarkeit (N50) durch die Zugabe von Phosphor (NP) zu erkennen (Abb. 4b, vgl. LIMPENS 2003). Am **Rand** wird diese Hemmung sogar aufgehoben. Zwischen Stickstoff und Phosphor besteht ein enger Zusammenhang, indem durch eine höhere Phosphor-Verfügbarkeit weitere Energie in Form von Adenosinriphosphat (ATP) gespeichert werden kann, die einen Abbau der toxisch wirkenden NH₄⁺-Konzentrationen im Zellgewebe und die erneute Bildung von Biomasse ermöglicht (vgl. STÖHR 2005, pers. Mitt.).

Die Produktivität von *Sphagnum papillosum* in den Untersuchungsbereichen **Rand** und **Übergang** lässt sich durch Phosphor- bzw. kombinierte Stickstoff-/Phosphor-Zugaben fast verdoppeln, erreicht aber dennoch nicht die enorm hohen Werte unter natürlichen Bedingungen im **Zentrum** (1060 g m⁻² a⁻¹) (Abb. 4b). Im Literaturvergleich sind jedoch auch die Werte vom **Rand** und **Übergang** hoch, was auf die lange Vegetationsperiode und die gleichmäßig verteilten Niederschlagsereignisse zurückgeführt wird. Bisherige Untersuchungen stellen bei einer ähnlich langen Vegetationsperiode, aber geringerem Jahresniederschlag eine maximale natürliche Produktivität von *Sphagnum papillosum* von 610 g m⁻² a⁻¹ fest (CLYMO 1970).

Im Zentrum müssen günstigere Standortbedingungen als im **Rand** und **Übergang** vorliegen, die nicht ausschließlich durch die verfügbare Nährstoffmenge erklärbar sind, da sich trotz geringerer Stickstoff- und Phosphor-Gehalte in den Torfmoosen die enorme Produktivität im **Zentrum** durch eine Nährstoffzugabe nur gering oder gar nicht steigern lässt. Es konnte eine enge positive Korrelation der Biomassezunahme mit dem Wasserstand festgestellt werden (Abb. 5), die hohe Produktivität scheint also eng an hohe Wasserstände gekoppelt zu sein. Für *Sphagnum papillosum* wird eine maximale Produktivität im mittleren Rasenniveau bei 20 cm über Moor-Wasserstand festgestellt (vgl. GAUDIG 2001, 2002), wie sie im **Zentrum** von Ispani 2 für den Untersuchungszeitraum beobachtet wurden (Tab. 3). Die Wasserstände sind im **Zentrum** nicht nur höher, sondern schwanken auch geringer als am **Rand** und **Übergang** (Abb. 6).

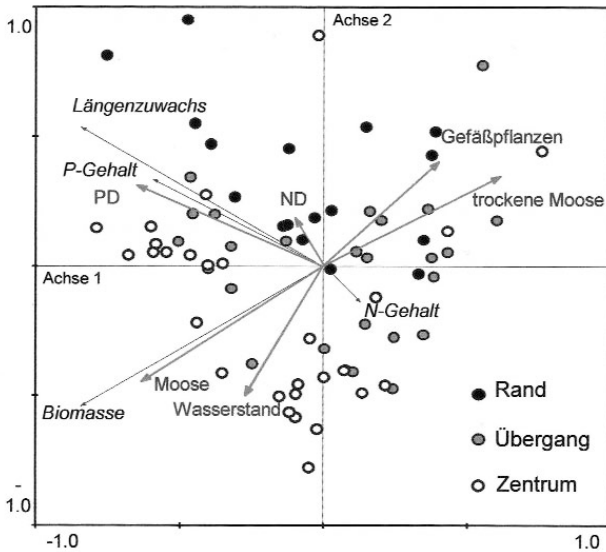


Abb. 5: Principal correspondence analysis (PCA) der Untersuchungsflächen vom **Rand**, **Übergang** und **Zentrum** nach TER BRAAK (1992) (Anordnung der Untersuchungsflächen im Ordinationsraum nach Parametern Biomasse (Trockengewicht der Torfmoose)⁽¹⁾, Längenzuwachs⁽¹⁾, P- und N-Gehalt⁽¹⁾; indirekte Gradientenanalyse (supplementary environment data) der Parameter Deckung der Torfmoose⁽¹⁾, der trockenen Moose⁽¹⁾ und der Gefäßpflanzen⁽²⁾, Wasserstand⁽²⁾, ND⁽²⁾ und PD⁽¹⁾ (Menge der Stickstoff- und Phosphor-Zugabe); Achse 1 erklärt 63,2 % der Varianz⁽¹⁾ und Achse 2 25,9 %⁽²⁾)

Principal correspondence analysis (PCA) of the test series **Rand**, **Übergang**, **Zentrum** after TER BRAAK (1992) (Assembly of the plots in the "room of ordination" after the parameters Biomasse (dry weight of the peat mosses)⁽¹⁾, length growth (Längenzuwachs)⁽¹⁾, P- and N-content (P-, N-Gehalt)⁽¹⁾; indirect gradient analysis (supplementary environment data) of the parameters cover of the peat mosses (Moose)⁽¹⁾, dry mosses (trockene Moose)⁽¹⁾ and vascular plants (Gefäßpflanzen)⁽²⁾, water level (Wasserstand)⁽²⁾, ND⁽²⁾ and PD⁽¹⁾ (amount of N- and P-fertilisation); axis 1 explains 63,2 % of the variance⁽¹⁾ and axis 2 25,9 %⁽²⁾)

4.2 Zusammenhang zwischen Produktivität und Längenzuwachs

Obwohl bei einer Zunahme der Länge ebenfalls eine Steigerung der Biomasse stattfindet ($P < 0,01$), liegt keine enge quantitative Korrelation vor ($R = 0,398$, Spearman-Rangkorrelation). Dieses ist auf unterschiedliche Zusammenhänge zwischen den beiden Parametern in den einzelnen Düngevarianten zurückzuführen.

Unabhängig von der unterschiedlichen Nährstoff-Limitation und trotz gleicher Produktivität (Zentrum: Kontrollfläche und P-Düngevariante) findet ein signifikant höherer Längenzuwachs bei der P-Düngevariante in allen Moorbereichen statt (Abb. 4a). Die

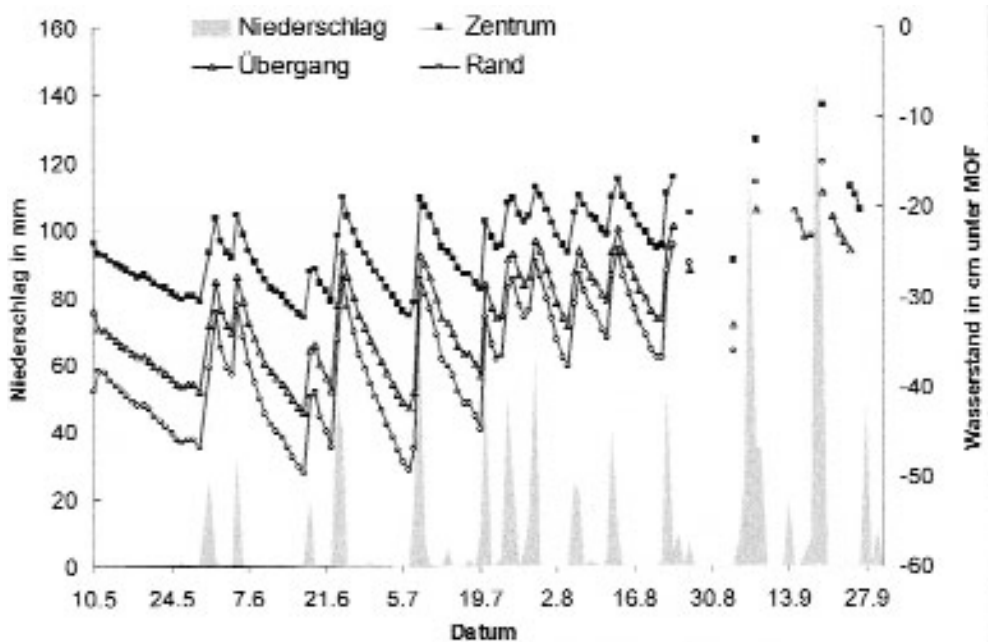


Abb. 6: Zusammenhang zwischen Niederschlag (Klimastation Kobuleti) und Wasserständen in den einzelnen Moorbereichen im Jahr 2003. Wasserstände interpoliert aus Einzelmessungen (n=21) und Datalogger

Relation between precipitation (meteorological station Kobuleti) and water level in the different mire areas in the year 2003. Water level interpolated from individual measurements (n=21) and data logger

Hemmung des Längenwachstums durch reine Stickstoff-Zugaben (vgl. RUDOLPH & VOIGT 1986, ROCHEFORT & BAYLEY 1990, AERTS et al. 1992, LIMPENS 2003) wird wie bei der Produktivität durch Phosphor aufgehoben.

5. Schlussfolgerungen

Im Moor Ispani 2 wurden im **Zentrum** die höchsten bisher gemessenen Produktivitäts-Werte von *Sphagnum papillosum* ermittelt. Als wichtigste Ursache hierfür werden die besonders günstigen klimatischen Bedingungen in der Kolchistiefebene gewertet, die eine lange Wachstumsperiode (364 Tage) zulassen sowie eine hohe und gleichmäßige Wasserversorgung garantieren. Ein ganzjährig ausgeglichen hoher Moor-Wasserstand hat einen größeren Einfluss auf die Produktivität als die Menge an verfügbaren Nährstoffen. Inwieweit die Produktivität durch eine Anhebung des Wasserstandes erhöht werden kann, bedarf weiterer Forschung.

Die unter natürlichen Bedingungen enorm hohe Produktivität (**Zentrum**), aber auch die hohe Produktivitätssteigerung durch Nährstoffzugaben (**Rand** und **Übergang**) zeigen, dass die Kolchistiefebene optimale Voraussetzungen für die Torfmoos-Kultivierung bietet. Dieser mögliche Wirtschaftszweig könnte einen zukunftssträchtigen Beitrag zur Lösung der großen ökonomischen Probleme in Georgien liefern. Deshalb sind hier weitere Forschungen zur Auswahl geeigneter Flächen und zur Etablierung von Torfmoosen notwendig.

Es gilt ebenfalls zu erforschen, inwieweit sich eine Torfmoos-Art an unterschiedliche Nährstoff-Angebote anpassen kann und ggf. unterschiedliche Sippen bildet, die verschiedene Reaktionen auf gleiche Nährstoffzugaben zeigen (vgl. AERTS et al. 1992).

Durch die Zugabe von Phosphor erreicht *Sphagnum papillosum* bei gleich bleibender Biomasse größere Längen (Abb. 4a, b, **Zentrum**). Dieser Unterschied in der Struktur ist hinsichtlich seiner Bedeutung für einen Substratrohstoff im Erwerbsgartenbau zu untersuchen. Des Weiteren ist zu prüfen, inwiefern eine Strukturänderung der Torfmoose Auswirkungen auf deren Vitalität hat.

6. Danksagung

Unser Dank gilt Andreas Kaffke für seine Mitarbeit bei der Einrichtung der Untersuchungsflächen, der Bereitstellung von Daten und für die fachliche Unterstützung sowie den georgischen Wissenschaftlern, insbesondere Izolda Matchutadze, für ihre Hilfe vor Ort. Des Weiteren danken wir den Mitarbeitern des Zentralen Chemielabors des IGB Berlin, die unter der Leitung von Jörg Gelbrecht eine schnelle Analyse der Phosphor-Gehalte der Torfmoose ermöglichten sowie Ulrich Möbius für seine Unterstützung im Labor des Botanischen Instituts der Uni Greifswald. Gedankt sei Hans Joosten für die kritische Durchsicht des Manuskriptes.

7. Literaturverzeichnis

- AERTS, R., WALLEN, B. & MALMER, N. (1992): Growth-limiting nutrients in *Sphagnum*-dominated bogs subject to low and high atmospheric nitrogen supply. - J. Ecol. **80**: 131-140; Oxford.
- AERTS, R., WALLEN, B., MALMER, N. & DE CALUWE, C. (2001): Nutritional constraints on *Sphagnum* - growth and potential decay in northern peatlands. - J. Ecol. **89**: 292-299; Oxford.
- BRAGAZZA, L., TAHVANAINEN, T., LIMPENS, J., KUTNAR, L., RYDIN, H., HÁJEK, M., HÁJEK, T., GROSVERNIER, P., HAJKOVA, P. & IACUMIN, P. (2004): Nutritional constraints in ombrotrophic *Sphagnum* plants under increasing atmospheric nitrogen deposition in Europe. - New Phytol. **163**: 609; Cambridge.
- CLYMO, R.S. & HAYWARD, P.M. (1982): The ecology of *Sphagnum*. - In: SMITH, A.J.E. (ed.): Bryophyte Ecology; London (Chapman and Hall).

- CLYMO, R.S. (1970): The growth of *Sphagnum*: Methods of Measurement. - J. Ecol. **58**: 13-49; Oxford.
- DAMMAN, A.W.H. (1988a): Spatial and seasonal changes in water chemistry and vegetation in an ombrogenous bog. – In: VERHOEVEN, J.T.A. (ed.): Vegetation Structure in Relation to Carbon and Nutrient Economy: 107-119; The Hague (SPB Academic Publishing).
- DAMMAN, A.W.H. (1988b): Regulation of nitrogen removal and retention in *Sphagnum* bogs and other peatlands. - Oikos **51**: 291-305.
- DANIELS, R.E. & EDDY, A. (1985): Handbook of European Sphagna. Institute of Terrestrial Ecology; Huntingdon.
- DIMITRIEVA, A.A. (1990): Opredelitel rastenij adscharii. Band 1&2; Tbilisi.
- DIN EN 1189 (1996): Bestimmung von Phosphor.
- DIN ISO 13878 (1998): Bodenbeschaffenheit-Bestimmung von Gesamt-Stickstoff nach trockener Verbrennung (Elementaranalyse).
- FRAHM, J.-P. & FREY, W. (2004): Moosflora. 4. Aufl.; Stuttgart (Ulmer).
- GAUDIG, G. & JOOSTEN, H. (2002): Peat moss (*Sphagnum*) as a renewable resource - an alternative to *Sphagnum* peat in horticulture. – In: SCHMILEWSKI, G. & ROCHEFORT, L. (eds.): Peat in horticulture. Quality and environmental challenges: 117-125; International Peat Society; Jyväskylä.
- GAUDIG, G. & JOOSTEN, H. (2003): Kultivierung von Torfmoosen als nachwachsender Rohstoff - Möglichkeiten und Erfolgsaussichten. - Greifswalder Geographische Arbeiten **31**: 75-86; Greifswald.
- GAUDIG, G. (2001): Das Forschungsprojekt: Etablierung von *Sphagnum* – Optimierung der Wuchsbedingungen. - Telma **31**: 329-334; Hannover.
- GAUDIG, G. (2002): Das Forschungsprojekt: "Torfmoose (*Sphagnum*) als nachwachsender Rohstoff: Etablierung von Torfmoosen - Optimierung der Wuchsbedingungen". - Telma **32**: 227-242; Hannover.
- GIGNAC, L.D. (1989): Mineral content of mire surface water and hummock- forming *Sphagnum* species in peatlands of Western Canada. - Lindbergia **15**: 151-160; Kopenhagen.
- GRANTZAU, E. & GAUDIG, G. (2005): Torfmoos als Alternative. - TASPO Magazin **3**: 8-10; Braunschweig.
- GRANTZAU, E. (2002): *Sphagnum* als Kultursubstrat. - Deutscher Gartenbau **44**: 34-35; Stuttgart.
- GRANTZAU, E. (2004): Torfmoos als Substrat für Zierpflanzen geeignet. - Deutscher Gartenbau **34**: 14-15; Stuttgart.
- GRIGAL, D.F. (1985): *Sphagnum* production in forested bogs of northern Minnesota. - Can.J.Bot. **63**: 1204-1207; Ottawa.

- GUNNARSSON, U. & RYDIN, H. (2000): Nitrogen fertilization reduces *Sphagnum* production in bog communities. - *New Phytologist* **147**: 527-537.
- JAUHAINEN, J., WALLEN, B. & MALMER, N. (1998): Potential NH_4^+ and NO_3^- uptake in seven *Sphagnum* species. - *New Phytol.* **138**: 287-293; Cambridge.
- JOOSTEN, H. & CLARKE, D. (2002): Wise use of mires and peatlands – Background and principles including a framework for decision-making. International Mire Conservation Group / International Peat Society; Totnes (NHBS Ltd.).
- JOOSTEN, H. (1995a): 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: 379 – 404; Chichester (Wiley).
- JOOSTEN, H. (1995b): The golden flow: the changing world of international peat trade. - *Gunneria* **70**: 269-292.
- JOOSTEN, H. (1998): Peat as a renewable resource: The road to paludiculture. – In: MALTERER, T., JOHNSON, K. & STEWARD, J. (eds.): Peatland Restoration and Reclamation – Techniques and Regulatory Considerations, Proceedings of the International Peat Symposium in Duluth: 56-63; Jyskä.
- JOOSTEN, H. (2003): Moore in Europa in einer Welt des Wandels. – In: ASCHEMEIER, C. (ed.): Naturschutz in Moor und Heide: 23-33; Vreden.
- JOOSTEN, H. (2004): Renewability revisited: on folly and swindle in peat energy politics. IMCG Newsletter 2004/1: 16-20. <http://www.imcg.net>.
- KAFFKE, A. (in prep.): Das Regendurchströmungsmoor Ispani 2. Diss. E.-M.-A.-Universität Greifswald; Greifswald.
- LAMERS, L.P.M. (2001): Tackling Biochemical Questions in Peatlands. PhD thesis, Katholieke Universiteit Nijmegen.
- LI, Y., GLIME, J.M. & DRUMMER, T.D. (1993): Effects of phosphorus on the growth of *Sphagnum magellanicum* Brid. and *S. papillosum* Lindb. - *Lindbergia* **18**: 25-30; Lund.
- LIMPENS, J. (2003): Prospects for *Sphagnum* Bogs Subject to High Nitrogen deposition. PhD thesis University Wageningen.
- MALMER, N. (1988): Patterns in the growth and the accumulation of inorganic constituents in the *Sphagnum* cover on ombrotrophic bogs in Scandinavia. - *Oikos* **53**: 105-120; Oxford.
- MALMER, N. (1990): Constant or increasing nitrogen concentrations in *Sphagnum* mosses on mires in Southern Sweden during the last few decades. - *Aquilo Ser. Bot.* **28**: 57-65.
- MALMER, N. & WALLEN, B. (2005): Nitrogen and phosphorus in mire plants: variation during 50 years in relation to supply rate and vegetation type. - *Oikos* **109**: 539-554; Oxford.
- RISAGER, M. (1998): Impacts of nitrogen on *Sphagnum* dominated bogs with emphasis on critical load assessment. PhD thesis University of Copenhagen.
- ROCHFORD, L. BAYLEY, S.E. (1996): Growth, production and decomposition dynamics of *Sphagnum* under natural and experimentally acidified conditions. - *Ecology* **71**: 1986-2000.

- RUDOLPH, H. & VOIGT, J.U. (1986): Effects of $\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$ on growth and metabolism of *Sphagnum magellanicum*. - *Physiologia Pl.* **66**: 339-343; Oxford.
- RYDIN, H. & CLYMO, R.S. (1989): Transport of carbon and phosphorus compounds about *Sphagnum*. - *Proc. of the Royal Soc. of London Series B* **237**: 63-84.
- SUCCOW, M. & JOOSTEN, H. (2001): *Landschaftsökologische Moorkunde*; Stuttgart (Schweizerbart).
- TER BRAAK, C.J.F. (1992): *CANOCO - a FORTRAN Program for Canonical Community Ordination*. Microcomputer Power; New York.
- TWENHÖVEN, F.L. (1992): Untersuchungen zur Wirkung stickstoffhaltiger Niederschläge auf die Vegetation von Hochmooren. - *Mitt. d. AG Geobotanik in SH und Hamburg* **44**: 172 S.; Kiel.
- VAN DER HEIJDEN, E., JAUHAINEN, J., SILVOLA, J., VASANDER, H. & KUIPER, P.J.C. (2000): Effects of elevated atmospheric CO_2 concentration and increased nitrogen deposition on growth and chemical composition of ombrotrophic *Sphagnum balticum* and oligo-mesotrophic *Sphagnum papillosum*. - *J. Bryol.* **22**: 175-182.
- VENTERINK, H. O., PIETERSE, N. M., BELGERS, J. D. M., WASSEN, M. J. & DE RUITER, P. C. (2002): N, P, and K budgets along nutrient availability and productivity gradients in Wetlands. - *Ecol. Appl.* **12**: 1010-1026; New York.
- 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 Ecol. and Evol.* **11**: 494-497.
- WOODIN, S.J. & LEE, J.A. (1987): The effects of nitrate, ammonium and temperature on nitrate reductase activity in *Sphagnum* species. - *New Phytol.* **105**: 103-115; Oxford.
- ZAR, J.H. (1999): *Biostatistical Analysis*. New Jersey (Prentice Hall).
- ZWIRNMANN, E., GELBRECHT, J. & KRÜGER, A. (1999): Analytik im Zentralen Chemielabor des IGB. - In: *Berichte des IGB: 3-24*. Inst. für Gewässerökologie und Binnenfischerei im Forschungsverbund Berlin.

Anschrift der Verfasser:

M. Krebs
 G. Gaudig
 Universität Greifswald
 Institut für Botanik und Landschaftsökologie
 Grimmer Straße 88
 D-17487 Greifswald
 E-Mail: matkrebs@gmx.de, gaudig@uni-greifswald.de

Manuskript eingegangen am 8. August 2005