

ABSCHLUSSBERICHT

Förderbereich 6 - Naturschutz

Förderthema 2 - Entwicklung degradierter Lebensräume

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

DBU-Aktenzeichen

31995-33/0

Projekttitel

Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Etablierung von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung

Bewilligungsempfänger

Stiftung Lebensraum Moor
Tannenhof 16, 49377 Vechta

Kooperationspartner

Gramoflor GmbH & Co. KG
Diepholzer Straße 173, 49377 Vechta

Institut für Landschaftsökologie (ILÖK)
Arbeitsgruppen Hydrologie und Ökosystemforschung
Westfälische-Wilhelms-Universität Münster
Heisenbergstr. 2, 48149 Münster

Gesamtkosten

173.367 €

Fördermittelhöhe

147.430 €

Projektlaufzeit

01.01.2015 – 31.03.2019

Kontaktdaten der Projektleitung

Stiftung Lebensraum Moor
<http://www.stiftung-lebensraum-moor.de>
Gabriela Gramann (info@stiftung-lebensraum-moor.de)

Institut für Landschaftsökologie
<http://www.uni-muenster.de/Landschaftsoekologie/index>
Prof. Dr. Klaus-Holger Knorr (kh.knorr@uni-muenster.de)
Prof. Dr. Till Kleinebecker (till.kleinebecker@umwelt.uni-giessen.de)
Prof. Dr. Norbert Hölzel (nhoelzel@uni-muenster.de)

Inhalt

1. Zusammenfassung.....	5
2. Anlass und Zielsetzung	6
2.1 Anlass und Hintergrund.....	6
2.2 Zielsetzung und Ansatz.....	8
3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden.....	10
3.1 Arbeitsschritte Modul i: Torfmoosvermehrung.....	10
3.1.1 Vermehrungsanlage auf Tischen	10
3.1.2 Experimente zur Optimierung der Torfmoosvermehrung	11
3.1.3 Produktion von Spendermaterial im größeren Maßstab.....	18
3.2 Arbeitsschritte Modul ii: Begleitendes Monitoring	21
3.2.1 Vorcharakterisierung und Flächenauswahl für Etablierungsexperimente	21
3.2.2 Einrichtung der Etablierungsexperimente	22
3.2.3 Begleitendes Monitoring	24
3.3 Arbeitsschritte Modul iii: Etablierungsexperimente	27
3.3.1 Anlage der Etablierungsexperimente	27
3.3.2 Erfolgskontrollen	30
4. Ergebnisse	31
4.1 Ergebnisse der Torfmoosvermehrung (Modul i).....	31
4.1.1 Ergebnisse zum Vorversuch (Experiment 1, Zyklus I).....	31
4.1.2 Ergebnisse zur Vermehrung in Mischkultur (Experiment 2, Zyklus II.a-c).....	33
4.1.3 Ergebnisse zur Monokultur-Vermehrung (Experiment 3, Zyklus III).....	35
4.1.4 Ergebnisse zur Simulation von Nass-Trocken-Zyklen (Exp. 4, Zyklus II.a.P2).....	37
4.2 Ergebnisse des begleitenden Monitorings (Modul ii).....	39
4.2.1 Ergebnisse des hydrologisches Monitorings	39
4.2.2 Ergebnisse des vegetationskundlichen Monitorings	40
4.2.3 Ergebnisse des biogeochemischen Monitorings	41
4.3 Ergebnisse der Etablierungsexperimente (Modul iii).....	43
4.3.1 Etablierungserfolg.....	43
4.3.2 Charakterisierung günstiger Standorte / Hydrologische Richtwerte	45
5. Diskussion	47
6. Öffentlichkeitsarbeit	50
7. Fazit.....	52
8. Literatur.....	54
9. Anhang.....	58

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3-1. Versuchsaufbau und begleitendes Monitoring zum Vorversuch.....	11
Abb. 3-2. Versuchsanlage der Mischkultur-Experimente (Zyklus II.a-c).....	13
Abb. 3-3. Angewandte Methoden zur Kontrolle des Zuwachses.	15
Abb. 3-4. Spendermaterial zur Beimpfung der Freilandvermehrungsfelder.....	18
Abb. 3-5. Testweise Anlage von Vermehrungsfeldern im Freiland an zwei verschiedenen Standorten (2016).....	19
Abb. 3-6. Anlage und Optimierung von Freilandvermehrungsfelder (2017).....	20
Abb. 3-7. Einrichtung der Etablierungsexperimente.	23
Abb. 3-8. Angewandte Methoden zum vegetationskundlichen Monitoring.....	24
Abb. 3-9. Arbeitsschritte zur biogeochemischen Charakterisierung der Monitoringflächen. ..	25
Abb. 3-10. Arbeitsschritte zur Entnahme von auf Gewächshaustischen vermehrten Spendermaterial zwecks Anlage von kleinflächigen Etablierungsexperimenten.....	27
Abb. 3-11. Experimentelle Anlage zur Erprobung und Entwicklung von Verfahren zur Etablierung von Bult-Torfmoosen auf verschiedenen in der Sukzession befindlichen Wiedervernässungsflächen.....	28
Abb. 3-12. Angewandte Methoden zur Kontrolle des Etablierungserfolgs.	30
Abb. 4-1. Ergebnisse zur Torfmoosvermehrung des Vorversuchs (Zyklus I).	31
Abb. 4-2. Mittleres Wachstum der untersuchten Moosmischungen im Zyklus II.a.....	24
Abb. 4-3. Ergebnisse zur Monokultur-Vermehrung (Zyklus III).	36
Abb. 4-4. Wasserstands-Ganglinien der im Vechtaer Moor gelegenen Versuchsflächen ab Zeitpunkt der Ausbringung bis Ende der Etablierungsexperimente.	40
Abb. 4-5. Ergebnisse zum Monitoring der Qualitäten des Bewässerungs- (Torfmoosvermehrung) und Porenwassers (Etablierungsexperimente).	42
Abb. 4-6. Ergebnisse des Monitorings der Mooshöhen-Änderung von in Sodenform transplantierten Butltorfmoosen seit Ausbringung in ausgewählten Renaturierungsflächen im Vechtaer Moor.....	43

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1. Charakterisierung der im Vorversuch (Zyklus I) getesteten Moos- und Behandlungsvarianten.	12
Tab. 3-2. Charakterisierung der in den Mischkultur-Experimenten (Zyklus II.a-c) getesteten Moos- und Behandlungsvarianten.	14
Tab. 3-3. Charakterisierung der in den Monokultur-Experimenten (Zyklus III) getesteten Moos- und Behandlungsvarianten.	16
Tab. 3-4. Charakterisierung der für die Nass-Trocken-Zyklen (Zyklus II.a.P2) eingesetzten Moosmischungs- und Behandlungsvarianten.	17
Tab. 3-5. Übersicht zur Vorcharakterisierung ausgewählter Monitoringflächen im Vechtaer Moor.....	22
Tab. 3-6. Art und Menge des für die kleinflächigen Etablierungsexperimente im Freiland eingesetzten Spendermaterials.....	23
Tab. 4-1. Ergebnisse zur Torfmoosvermehrung des Vorversuchs (Zyklus I).....	32
Tab. 4-2. Ergebnisse zur Mischkultur-Vermehrung (Zyklus II.a) bei stabiler Wasserversorgung.	33
Tab. 4-3. Ergebnisse zur Vermehrung von Monokulturen (Zyklus III).....	35
Tab. 4-4. Ergebnisse zum Test auf Ansiedlungsfähigkeit durch Simulation von Nass-Trocken-Zyklen.....	37
Tab. 4-5. Ergebnisse und Umfang des hydrologischen, biogeochemischen und vegetationskundlichen Monitorings ab Einrichtung der Etablierungsexperimente.....	39
Tab. 4-6. Abgeleitete Richtwerte wasserchemischer Parameter zur Beurteilung der Eignung von Wasserqualitäten für die Torfmoosvermehrung.	41
Tab. 4-7. Erfolgsquoten zur Etablierung von Bulttorfmoosen und abgeleitete hydrologische Richtwerte aus dem begleitenden Monitoring.....	44

Anhang

Anhang 3-1. Übersicht zur Torfmoos-Vermehrungsanlage auf Gewächshaustischen mit zeitlichem Ablauf der Experimente.	58
Anhang 3-2. Zusammenstellung und Portionierung untersuchter Moosmischungs-Varianten (Mischkulturen).	59
Anhang 4-1. Übersicht aller in Monokultur vermehrten und dokumentieren Bulltorfmoos-Varianten.....	60
Anhang 4-2. Übersicht aller in Mischkultur vermehrten und dokumentierten Bulttorfmoos-Varianten.....	61
Anhang 4-3. Ergebnisse des biogeochemischen Monitorings der Wasserqualitäten mit Vergleich von Bewässerungswasser der Torfmoos-Vermehrung und oberflächennahem Porenwasser der Etablierungsexperimente.	62
Anhang 4-4. Ergebnisse zur biogeochemischen Charakterisierung der für die Etablierungsexperimente ausgewählten Monitoringflächen.	63
Anhang 4-5. Ergebnisse zur vegetationskundlichen Charakterisierung der für die Etablierungsexperimente ausgewählten Monitoringflächen.	64
Anhang 4-6. Zusammenfassende Flächencharakterisierung ausgewählter Standort-Gruppen mit Vergleich des Etablierungserfolgs von Bult-Torfmoosen nach Anwendung verschiedener Ausbringungsvarianten.	65
Anhang 4-7. Regressionen zur Ableitung hydrologischer Richtwerte.	66
Anhang 6-1. Abstract zum Tagungsbeitrag auf der EGU 2016 in Wien.	67
Anhang 6-2. Poster-Beitrag auf der EGU 2016 in Wien.....	68
Anhang 6-3. Abstract zum Tagungsbeitrag auf dem Sphagnum Symposium 2016 in Khanty-Mansiysk.....	69
Anhang 6-4. Abstract zum Tagungsbeitrag auf der EGU 2018 in Wien.....	71
Anhang 6-5. Poster basierend auf dem Tagungsbeitrag bei der EGU 2018 in Wien.....	72
Anhang 6-6. Veröffentlichter Aufsatz in der Zeitschrift TELMA 48 (2018).....	73

1. Zusammenfassung

Als Ökosystemingenieure sind die Bulte bildenden Torfmoose der Gattung *Sphagnum* von großer Bedeutung, wenn es darum geht eine möglichst weitreichende Regeneration der Ökosystemfunktionen degradierter Hochmoore einzuleiten. Da eine spontane Wiederansiedlung der in Nordwest-Deutschland selten gewordenen Bulttorfmoose selbst nach bis zu 30 Jahren erfolgreicher Wiedervernässung so gut wie nicht feststellbar ist, zielte dieses Projekt ab auf die Erprobung und Entwicklung von Verfahren zur Etablierung verschiedener Bulttorfmoose auf in der Sukzession befindlichen Wiedervernässungsflächen. Darauf aufbauend sollten Empfehlungen für die gezielte Optimierung der gängigen Renaturierungspraxis abgeleitet werden, da bisherige Maßnahmen in der Regel nicht über die Einleitung und Aufrechterhaltung von Wiedervernässung hinausgehen.

Hierzu sollten im Untersuchungsgebiet „Vechtaer Moor“ auf Grundlage kleinflächig angelegter Etablierungsexperimente zunächst die vielversprechendsten Flächen identifiziert werden auf denen eine Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen infolge aktiver Einbringung als einzige zusätzliche Maßnahme (neben der gezielten Vermehrung von Diasporen lokaler Herkunft) den größten Erfolg haben kann. Zur Charakterisierung der ausgewählten Flächen, welche ein möglichst breites Spektrum häufig vorkommender Sukzessionsstadien repräsentieren sollten, wurde ein vegetationskundliches, hydrologisches und biogeochemisches Monitoring etabliert. So sollten auf Basis wissenschaftlich fundierter Daten Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, welche die für einen Etablierungserfolg günstigen Standortbedingungen sowie die Auswahl geeigneter Arten bzw. Artenkombinationen und förderliche Ausbringungstechniken berücksichtigen. Zur Bewertung des Etablierungserfolgs von in Sodenform ausgebrachten Bulttorfmoosen wurden Höhen-, Flächen- und Biomassezuwachs ermittelt. Den Etablierungserfolg begünstigende hydrogeologische Standortbedingungen wurden mittels Regressionsanalyse abgeleitet.

Die Etablierungsexperimente ergaben, dass für die Art *S. rubellum* mit dem größten Vermehrungspotenzial unter kontrollierten Optimal-Bedingungen so gut wie kein Etablierungserfolg unter den im Freiland stärker schwankenden und zeitweise harschen Umweltbedingungen zu verzeichnen war. Demgegenüber erwies sich die Art *S. papillosum* mit dem größten Vermehrungspotenzial unter kontrolliert dauerfeuchten Bedingungen auch bei der Etablierung im Freiland am erfolgreichsten, da diese Art sowohl längere Phasen des Überstaus als auch Austrocknung am besten tolerierte.

Die Erprobung verschiedener Bewässerungstechniken zur Torfmoosvermehrung auf Gewächshaustischen umfasste vier verschiedene Experimente/Vermehrungszyklen mit insgesamt 27 Mono- und 20 Mischkultur-Varianten.

Bei stabiler Wasserversorgung variierte das jährliche Vermehrungspotenzial der untersuchten Einzelart- und Moosmischungsvarianten zwischen dem Fünf- und Zehnfachen der Ausgangsbiomasse. Bei instabiler Staubewässerung lagen die erzielten Potenziale zwischen dem Drei- und Fünffachen. Mit Hilfe zusätzlicher Überkopfbewässerung konnten jedoch vergleichbar hohe Vermehrungspotenziale erschlossen werden wie bei stabiler Wasserversorgung, mit Ausnahme von Varianten mit zerkleinerten Moosfragmenten.

Darüber hinaus wurden Techniken zur Vermehrung im Freiland erprobt, sowie gezielte Untersuchungen zu Auswirkungen von Nass-Trocken-Zyklen durchgeführt.

Die Ergebnisse und Handlungsempfehlungen zur Vermehrung der Bulttorfmoose wurden schließlich in Form eines Handlungsleitfadens für den Praxisgebrauch publiziert.

2. Anlass und Zielsetzung

2.1 Anlass und Hintergrund

a. Hochmoore als Gegenstand von Renaturierungsbemühungen

Die regulativen Funktionen von Mooren und die darauf basierenden Ökosystemleistungen für die menschliche Gesellschaft sind erst im letzten Jahrzehnt vor allem im Zuge der Klimawandeldebatte verstärkt in das Zentrum einer intensiven wissenschaftlichen und öffentlichen Debatte gerückt (Joosten & Clarke 2002, Millennium Ecosystem Assessment 2005, Kimmel & Mander 2010). Aufgrund der Eigenschaft ungestörter Moore organische Substanz langfristig als Torf festzulegen, sind Moore global betrachtet von herausragender Bedeutung als Kohlenstoffsinken (Gorham et al. 2012; Loisel et al. 2014) und somit ein wichtiges Regulativ um der Anreicherung von Treibhausgasen in der Atmosphäre und damit der globalen Erwärmung entgegenzuwirken (Frolking & Roulet 2007, Limpens et al. 2008, IPCC 2014). Neben ihrer Wirkung auf das Erdklima, tragen Moore auf lokaler und regionaler Ebene auch wesentlich zu Retention von Wasser und Nährstoffen in der Landschaft bei (Edom 2001). Darüber hinaus bieten sie Lebensraum für zahlreiche seltene und hochspezialisierte Tier- und Pflanzenarten und sind dementsprechend von besonderer Bedeutung für die Erhaltung der Biodiversität (Couwenberg & Joosten 2005).

In Niedersachsen, dem hochmoorreichsten Bundesland in Deutschland, sind intakte Moore durch Entwässerung mit nachfolgender landwirtschaftlicher Nutzung oder Torfabbau inzwischen fast vollständig vernichtet worden (Couwenberg & Joosten 2001). Im Gegenzug wurden im Rahmen des deutschlandweit ersten Moorschutzprogramms seit den 1980er Jahren umfangreiche Renaturierungsmaßnahmen in einem beachtlichen Teil der degenerierten Moore durchgeführt (NLWKN 2006).

b. Defizite bisheriger Renaturierungsbemühungen

Nach Beendigung des Torfabbaus werden seit den 1980er Jahren die Flächen als Folgenutzung für die Renaturierung hergerichtet und wiedervernässt. Die Mehrzahl der Renaturierungsflächen in Niedersachsen (darunter ca. 14.000 ha Wiedervernässungsflächen nach Torfabbau, Schmatzler 2015) haben das Ziel einer möglichst vollständigen Hochmoor-Regeneration jedoch bei Weitem noch nicht erreicht. Insbesondere werden derzeit sowohl nährstoffökologische als auch biotische Komponenten bei der Renaturierung von abgetorften Hochmooren nicht oder kaum berücksichtigt und das Vorgehen ist stark abhängig vom Stand des Wissens der beteiligten Personen. Aufgrund der engen Wechselbeziehungen zwischen Vegetation, Wasserhaushalt und Torfeigenschaften, die Ökosystemprozesse in Mooren steuern (Ivanov 1981), sind ganzheitliche Ansätze aber unabdingbar um wesentliche Funktionen bzgl. Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt sowie Habitatfunktion in absehbaren Zeiträumen zumindest teilweise wiederherzustellen (Schumann & Joosten 2008).

Voruntersuchungen auf über 50 Wiedervernässungsflächen in Nordwestdeutschland im Rahmen von Studierendenarbeiten des Instituts für Landschaftsökologie der Universität Münster haben ergeben, dass die viele hochmoortypischen Pflanzenarten, insbesondere Bulttorfmoose, noch nahezu vollständig fehlen. Das Problem der Ausbreitungslimitierung vieler zur Hochmoorregeneration notwendigen Zielarten (insbesondere Bulttorfmoose) wird jedoch in der bisherigen Renaturierungspraxis bislang kaum berücksichtigt.

c. Ursachen der Ausbreitungslimitierung von Bulttorfmoosen (BTM)

Obwohl Torfmoose in der Lage sind, eine große Menge an Sporen zu produzieren und diese aufgrund ihrer geringen Größe potenziell sehr effektiv ausgebreitet werden können, ist eine Wiederbesiedlung neuer (Renaturierungs-) Flächen über den Weg der generativen Vermehrung unter den gegenwärtigen Bedingungen kaum möglich. Neben teilweise zu hohem Nährstoffniveau und/oder instabilen hydrologischen Bedingungen (Price & Ketcheson 2009), ist dies vor allem auch auf den Mangel an Diasporen und die Ausbreitungslimitierung von zahlreichen, selten gewordenen hochmoortypischen Arten zurückzuführen (Salonen & Setälä 1992; Gorham & Rochefort 2003). Das fast vollständige Fehlen von vitalen Quellpopulationen auf der Landschaftsebene kann somit als eine Hauptursache dafür angesehen werden, dass sich Bulttorfmoose und andere Hochmoorarten nicht mehr von selbst auf Renaturierungsflächen ansiedeln können.

d. Ökosystemare Bedeutung von BTM

Bulttorfmoose sind von essentieller Bedeutung, um längerfristig erneutes Hochmoorwachstum zu ermöglichen (Joosten 1993; Money & Wheeler 1999). Zudem besitzen Bulttorfmoosdecken eine herausragende Funktion als Filter gegenüber atmosphärischen Nährstoffeinträgen (Lamers et al. 2000) und wirken somit der vielen Renaturierungsflächen immanenten Tendenz zur Vergrasung und Verwaldung entgegen (Tomassen et al. 2003, 2004). Ferner zeichnen sich moos- und strauchdominierte Moore im Allgemeinen durch wesentlich geringere Methanemissionen aus, da Seggen und Binsen das Gas effektiv an die Atmosphäre weiterleiten (Shannon & White, 1994; Frenzel & Rudolph, 1998). Über Zeiträume von Jahrzehnten verschiebt sich bei Übergang zu moosdominierten Bedingungen die Klimawirkung der Moore daher relativ in Richtung atmosphärischer Abkühlung, wobei auch Interaktionen zwischen Vegetation und Wasserspiegel zu berücksichtigen sind (Strack et al. 2006).

e. Notwendigkeit einer gezielten Einbringung von BTM

Die für das Ökosystem Hochmoor bedeutsamen Schlüsselarten der Bulte bildenden Torfmoose aus der Gattung *Sphagnum* sind als „ecosystem engineers“ von grundlegender Bedeutung für die Rückgewinnung wichtiger Ökosystemfunktionen (Van Breemen 1995). Wie in kaum einem anderen Ökosystem prägt diese spezielle Pflanzengruppe den Charakter und die Funktionsfähigkeit des gesamten Systems (Larmola et al. 2010; Jassej et al. 2013). Für eine vollständige Regeneration des Ökosystems Hochmoor sind Bulttorfmoose daher unverzichtbar.

Zudem eröffnet die aktive Vermehrung und Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen großes Potential die Regeneration von Wiedervernässungsflächen gezielt zu beschleunigen (Stiftung Lebensraum Moor 2014). Wenngleich bis zur vollständigen Hochmoorregeneration mit einer langen Entwicklungsdauer zu rechnen ist (Timmermann et al. 2009), könnte eine initiale Aktivierung den Prozess nachhaltig beschleunigen und von Beginn an lenken. Die zeitnahe Förderung und Sicherung einer hochmoortypischen Vegetation trägt somit unmittelbar zur Planungssicherheit der bei Abbau, Renaturierung und Nachsorge beteiligten Akteure bei.

2.2 Zielsetzung und Ansatz

Zielsetzung des Projekts ist die wissenschaftliche Erprobung und Entwicklung von Verfahren zur aktiven Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen als weiterführende Maßnahme zur Optimierung der Renaturierung von wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung in Nordwest-Deutschland. Hauptziel war es herauszufinden, welche Faktoren die erfolgreiche Etablierung von Bulttorfmoosen (bultbildende Torfmoose der Gattung *Sphagnum*; z.B. *S. medium*, *S. papillosum*, *S. capillifolium*, *S. rubellum*) in nach industriellem Torfabbau wiedervernässten Mooren fördern.

Da die in der ersten Projektphase erprobten Etablierungsverfahren jedoch eine erfolgreiche Wiederansiedlung überwiegend auf älteren - und somit für die aktuelle Renaturierungspraxis weniger relevanten - Flächen erwarten lassen, sollte im weiteren Projektverlauf die Torfmoosvermehrung in den Vordergrund rücken, um für die Erstellung eines Leitfadens auf hinreichend wissenschaftlich abgesicherte Erkenntnisse zurückgreifen zu können. Infolge der unerwartet schnellen Erfolge bei der Vermehrung sollte zudem in der fortgeschrittenen Projektphase die Möglichkeit der Freilandvermehrung erprobt werden.

Die Idee zum Projekt entstand im Zuge der Gründung der Stiftung Lebensraum Moor durch den Substrathersteller Gramoflor und wurde zusammen mit dem Institut für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster zu einem Projektkonzept entwickelt. Im Hinblick auf Realitätsnähe sowie spätere Umsetzung und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde das Konzept bewusst als Kooperation zwischen Praktikern und Wissenschaftlern aufgelegt. Somit sollte durch die Kombination von Praxis, Forschung und Gemeinnützigkeit bereits bekannte Verfahren optimiert, neue Erkenntnisse gewonnen und die wichtigsten Ergebnisse für Akteure im Moorschutz und der Hochmoorrenaturierung dokumentiert werden.

a. Vermehrung von BTM als Grundvoraussetzung (Modul i)

Aufgrund der sehr begrenzten Verfügbarkeit an Spendermaterial lokaler Herkunft und dem Ziel möglichst viele Flächen mit einheitlichem Material zu beimpfen scheiden die beispielsweise in Kanada etablierten Methoden zum Transfer von Vegetation intakter Flächen für Deutschland aus. Ein vorzeitiger Beginn zur Generierung ausreichend Spendermaterial unter möglichst idealen Bedingungen ist damit notwendig.

Erstes Ziel war somit, ausreichend Spendermaterial für großflächigere Ausbringungen zu gewinnen, um zu Projektende auf den aussichtsreichsten Flächen die Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen initiieren zu können. Ausgehend von den Ergebnissen erster Vorversuche, sollte zudem eine sukzessive Optimierung der Produktion von Spendermaterial für Renaturierungszwecke i. S. v. Arten mit größtem Wiederansiedlungspotenzial erreicht werden. Der Ansatz unterscheidet sich dahingehend von den Leitgedanken des sogenannten "Sphagnum farming" i. S. v. Optimierung bzw. Maximierung der Zuwachsraten bei Minimierung des Aufwandes/Kosten/Wasserverbrauchs.

b. Begleitendes Monitoring (Modul ii)

Zur Bestimmung der wichtigsten ökologischen Faktoren, welche die Etablierung von Bulltorfmoosen begünstigen oder hemmen, sollten umfassende Inventuren des Ist-Zustands sowie begleitendes Monitoring der biotischen (Vegetation) und abiotischen (Hydrologie, Biogeochemie) Standortbedingungen erfolgen.

Als Vorcharakterisierung zur Flächenauswahl wurden zunächst 14 für viele wiedervernässte Abtorfungsflächen repräsentative Flächen ausgewählt und mit automatischen Wasserstandsloggern versehen. Zusätzlich wurden Torfkerne und Pflanzenmaterial (Gräser, flotierende Schlenkentangmoose) für chemische Analysen im Labor entnommen: Neben Nährstoffextraktionen sowie pH-Wertbestimmungen wurde die Qualität des organischen Materials über FTIR-Spektroskopie, CNS-Elementaranalyse und weitere Elementaranalysen von Nähr- und Spurenelementen über Röntgenfluoreszenzspektroskopie untersucht.

Im Rahmen von umfassenderen Flächen-Charakterisierungen und Erfolgskontrollen im Zuge der Etablierungsexperimente wurde oberflächennahes Porenwasser entnommen. Darin wurden ebenfalls neben pH Wert und elektrischer Leitfähigkeit weitere Parameter aufgenommen: Nährstoffe und Hauptionen mittels Ionenchromatographie und ICP-OES, sowie weitere Haupt- und Spurenelemente. Zudem wurden die Flächen mit kombinierten Feuchte- und Temperatursensoren ausgestattet. Die vegetationskundlichen Daueruntersuchungsflächen sowie die Transekte wurden regelmäßig aufgenommen. Die ausgebrachten Torfmoose wurden auf Biomassezuwachs untersucht und auf den Gehalt an Nähr- und Spurenelementen, sowie die Qualität des organischen Materials untersucht.

c. Etablierungsexperimente (Modul iii)

Identifizierung geeigneter Arten und günstiger Ausbringungstechniken bei kleinflächiger, experimenteller Ausbringung:

Mit Hilfe von kleinflächigen, aber breit angelegten Etablierungsexperimenten sollten im Untersuchungsgebiet "Vechtaer Moor" zunächst die aus einer vorzeitig begonnenen Torfmoosvermehrung zur Verfügung stehenden, aussichtsreichsten Zielarten sowie unterschiedliche Ausbringungstechniken erprobt werden, um darauf aufbauend möglichst erfolgversprechende, ergo standortangepasste Etablierungsverfahren entwickeln zu können. Hierzu wurden für verschiedene Sukzessionsstadien repräsentative Wiedervernässungsflächen ausgewählt, die sich hinsichtlich Alter, Abbautechnik und Vornutzung unterscheiden, und ein langfristiges Monitoring etabliert, um die Flächen vegetationskundlich, hydrologisch und biogeochemisch charakterisieren zu können.

3. Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

3.1 Arbeitsschritte Modul i: Torfmoosvermehrung

Sowohl hinsichtlich der angestrebten Etablierungsexperimente im Freiland als auch zur Sicherstellung der Verfügbarkeit von Spendermaterial für spätere großflächigere Ausbringungen war es erforderlich vorzeitig mit der Anlage einer Torfmoosvermehrung zu beginnen, sodass ab Projektbeginn für die Durchführung der geplanten Maßnahmen in ausreichendem Umfang Bultorfmoose zur Verfügung stehen. Hierfür wurde im September 2013 auf von der Firma Gramoflor bereitgestellten Gewächsaustischen ein Vorversuch angelegt (Abb. 3-1). Für die Beimpfung wurde auf begrenzt vorhandenes Pflanzmaterial aus lokaler Herkunft zurückgegriffen, welches im Rahmen einer gemeinsam mit der Unteren Naturschutzbehörde des Landkreises Diepholz durchgeführten Baumaßnahme zur Moorsanierung gesichert werden konnte. Das Material stammt aus einer ca. 20 ha großen „Heile-Haut-Fläche“ in der Gemarkung Mariendrebber, Flur 1, Flurstück 33).

3.1.1 Vermehrungsanlage auf Tischen

Um auf Basis der durch vorzeitigen Maßnahmenbeginn zur Torfmoosvermehrung teilweise vorhandenen - aber aufgrund begrenzter Regenwasser-Speicherkapazitäten nur eingeschränkt nutzbaren - Infrastruktur (vgl. Anhang 3-1) eine Weiterentwicklung der Produktion von Spendermaterial im größerem Maßstab zu ermöglichen, wurden zu Projektbeginn die folgenden Maßnahmen umgesetzt,

- Anlage einer ausreichend großen Zisterne (200 m³) zur Vermeidung von Wassermangel-Situationen
- Erweiterung der bestehenden Tisch-Vermehrungsfläche um 50 m² auf insgesamt 100 m²
- Ergänzung von/Aufrüstung mit Bewässerungstechnik
 - zur Staubewässerung: Schwimmer-Technik
 - zur Überkopfbewässerung: Beregnungsschläuche
- Seitliche Anbringung von Blechen als Windschutz zur Reduzierung des Wasserbedarfs

Infolge der u.a. aufgrund von Wasserknappheit nur teilweise erfolgreich verlaufenden Vermehrung des Vorversuchs (siehe dazu Kapitel 4.1.1), und insbesondere zur Sicherstellung der späteren Verfügbarkeit ausreichender Mengen an Spendermaterial, die für die Realisierung großflächiger Ausbringungen als notwendig erachtet wurden (siehe dazu Kapitel 2.2), wurden zu Projektbeginn weitere Baumaßnahmen durchgeführt, um die Vermehrung von Bultorfmoosen auf Gewächshautischen unter kontrollierten Bedingungen in verbesserter Weise erproben und bei Bedarf schrittweise optimieren zu können.

3.1.2 Experimente zur Optimierung der Torfmoosvermehrung

a. Experiment 1: Vorversuch (Zyklus I)

Hintergrund:

Da zur Anlage der Etablierungsexperimente die am erfolgreichsten vermehrten Moos-Varianten des Vorversuchs zum Einsatz kommen sollten, waren hierfür im Frühjahr 2015 zunächst die dementsprechend infrage kommenden Varianten zu ermitteln (Tab. 4-1).

Neben der Bereitstellung von Spendermaterial verschiedener Zielarten mit bekannter Anzucht-Historie diente der Vorversuch zudem der Erprobung von Bewässerungstechnik auf Gewächshaustischen. Außerdem sollte herausgefunden werden, ob und inwieweit zwischen den verfügbaren Arten und bestehenden Generationen sowie nach einer mechanischen Zerkleinerung Unterschiede in den zu dokumentierenden Vermehrungsraten festzustellen sind (Abb. 3-1).

Versuchsanlage:

Der Untersuchungszeitraum (Zyklus I) dauerte von September 2013 bis März 2015 (Tab. 3-1). Die Auswahl des Vermehrungsmaterials erfolgte aus dem durch die Firma Gramoflor sichergestellten Wildpflanzen-Bestand lokaler Herkunft (Abb. 3-1). Das Arteninventar umfasste dabei hauptsächlich 3 verschiedene Bultorfmoosarten (*S. medium*, *S. papillosum*, *S. rubellum*), beinhaltete aber auch Diasporen weiterer *Sphagnum*-Arten und Begleitarten.

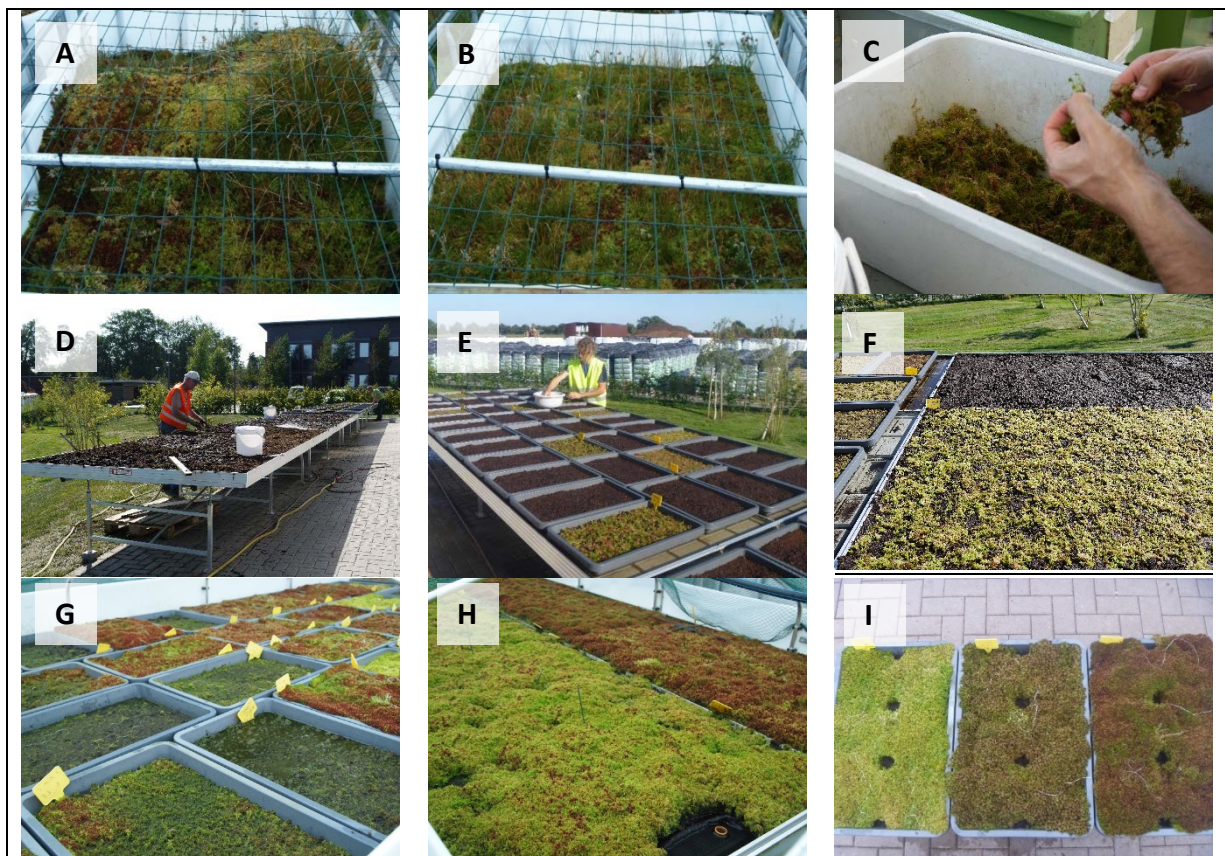


Abb. 3-1. Versuchsaufbau (A–F) und begleitendes Monitoring (G–I) zum Vorversuch (Experiment 1, Zyklus I). (A) F1-Generation („Mutterpflanzenbestand“); (B) F2-Generation (Entnahme aus einmal vegetativ vermehrten Rasen); (C) manuelle Vereinzlung; (D) Substratvorbereitung; (E) Ausbringung in Schalen; (F) Ausbringung auf Vlies; Torfmoosvermehrung in (G) Schalen bzw. (H) auf Vlies zum Zeitpunkt der ersten Bonitur nach 14 Monaten (Nov. 2014); (I) Biomasse-Beprobung von zusätzlich beregneten (iA+B) und nicht zerkleinerten F2-Varianten (v.l.n.r.: *S. papillosum*, *S. medium* und *S. rubellum*) zur Bestimmung des Biomassezuwachses 18 Monate nach Versuchsaufbau (Mrz. 2015).

Tab. 3-1. Charakterisierung der im Vorversuch (Zyklus I) getesteten Moos- (A) und Behandlungsvarianten (B). Ausbringungsmenge für alle Moosvarianten = 750 g FM m⁻². Abkürzungen: Start-TM = Anfangs-Trockenmasse; Start-MD = Anfangs-Deckungsgrad in %; Start-KD = Anfangs-Köpfchendichte in Capitula m⁻²; F1 = aus intakten Soden gezupftes Material (1. Generation); F2 = aus einmal vegetativ vermehrten Rasen gezupftes Material (2. Generation); F2X = gehäckselte Fragmente der 2. Gen.; BW = Bewässerung; iA = instabile Staubewässerung; iA+B = instabile Stau- mit Überkopfbewässerung; VT = Vegetationstage mit Tagesmitteltemperatur > 2 °C.

A: Moosvarianten		Start-TM [g m ⁻²]			Start-MD	Start-KD	Anteile in F2 [TM-%]		
Moosart/-mischung		F1	F2	F2X	F2	F2	Pap	Med	Rub
i.	<i>S. papillosum</i>	30	29	25	60 ±2	~2.000	>95	<5	.
ii.	<i>S. medium</i>	44	37	29	61 ±4	~2.300	~20	~80	.
iii.	<i>S. rubellum</i>	48	43	31	71 ±1	~5.900	.	.	>95
iv.	Mix1	.	42	28	67 ±3	~4.400	26	17	53

B: Behandlungsvarianten		Start-BM [g TM m ⁻²]			Zyklusdauer			Fortgang
Zyklus	BW	F1	F2	F2X	Start	Ende	VT	(vgl. Anhang 3-1)
I	iA	30–48	29–	25–31	09/13	03/15	503	→ PhEx(2016)
	iA+B		43				(90%)	→ EtEx (2015)

Da Teile der ursprünglichen Spenderpopulationen (F1-Generation) im Zuge der vorangegangenen Erhaltungszucht bereits einmal vegetativ vermehrt worden waren (F2-Generation), sollte dies bei der Anlage der Moosvarianten entsprechend berücksichtigt werden. Zusätzlich zu den Einzelart-Varianten (Monokulturen) beider Generationen wurde aus gezupften Einzelpflanzen der F2-Generationen eine Mischungsvariante zusammengestellt. Die Trockenmasse-Anteile der Arten in der Mischung (Mix1) ergaben sich aus den verfügbaren Mengen an Frischmasse (Anhang 3-2). Darüber hinaus wurden Varianten mit gehäckselten Fragmenten der F2-Generation getestet (F2X). Die Ausbringung aller nach Projektbeginn abschließend dokumentierten Varianten erfolgte mit 750 g Frischmasse pro Quadratmeter. Die auf Trockenmasse bezogenen Ausbringungsmengen variierten allerdings zwischen 25 und 48 g TM m⁻² (Tab. 3-1) aufgrund von Unterschieden im Wassergehalt infolge der Entnahme des Materials aus unterschiedlich gut mit Wasser versorgten Behältnissen der Erhaltungszucht (Abb. 3-1).

Die folgenden Bewässerungsvarianten wurden getestet:

iA: instabiler Anstau (4 ±2 cm unter GOF)

iA+B: instabiler Anstau mit zusätzlicher Beregnung (Überkopfbewässerung, 1 mm m⁻² d⁻¹)

Dokumentation/Auswertung:

Aufgrund der anfänglichen Fokussierung auf Etablierung bzw. der ursprünglichen Ausrichtung (Vorrang der Etablierung vor Vermehrung) und begrenzter Kapazitäten zur Erreichung aller im Projektantrag skizzierten Ziele konnte im Frühjahr 2015 nur eine unvollständige Biomasse-Beprobung der zusätzlich berechneten Varianten erfolgen. Um alle Varianten im Hinblick auf ihre Vermehrungsraten miteinander vergleichen zu können, wurden zur indirekten Berechnung der fehlenden Trockenmasse-Werte von Varianten des instabilen Anstaus und einiger zerkleinerter Varianten die stattdessen gemessene Mooshöhe und Moosdeckung sowie die Lagerungsdichte der jeweils respektiven zusätzlich berechneten Moosvariante zugrunde gelegt (vgl. Breeuwer et al. 2008). Die jährliche Nettoproduktivität (JNP, in g m⁻² a⁻¹) wurde mit der folgenden Gleichung geschätzt: $JNP = (TM-18 - TM-Start) / VT * 325$, für Erläuterung der Abkürzungen siehe Tab. 3-1 und Tab. 4-1 sowie Kapitel 4.1.2.

b. Experiment 2: Vermehrung in Mischkultur (Zyklus II.a-c) bei stabiler Wasserversorgung

Hintergrund:

Da innerhalb der Projektlaufzeit durch großflächigere Anwendung der erfolgreichsten Behandlungsvarianten des Vorversuchs ausreichende Mengen an Spendermaterial für Ausbringungen im größeren Maßstab generiert werden sollten (Anhang 3-1), sollte mit diesem Experiment überprüft werden, wie eine ideale Wasserversorgung bei der Vermehrung zu gestalten ist. Aus praktischen Gründen war von besonderem Interesse, ob eine zusätzliche Überkopfbewässerung auch bei stabiler Staubewässerung notwendig ist und inwieweit dadurch die Vermehrung von Moosmischungen beeinflusst wird. Vor allem weil im Zusammenhang des wasserknappheitsbedingten instabilen Anstaus die bis dato im Rahmen des Vorversuchs erzielten Erfolge nur durch die vorhandene Nutzungsmöglichkeit einer zusätzlichen Überkopfbewässerung auf kleiner Fläche zu realisieren waren (vgl. Tab. 4-1 bzw. Kapitel 4.1.1). Da deswegen zu Projektbeginn umfangreiche Baumaßnahmen zur Sicherstellung einer stabilen Wasserversorgung ergriffen wurden (Kapitel 3.1.1), sollte daher mit Hilfe dieses Experiments herausgefunden werden, ob mit einer ausschließlichen, aber stabilen Staubewässerung ebenfalls hohe Vermehrungsraten erzielt werden können. Gleichzeitig sollte geprüft werden, ob und welche Vor- bzw. Nachteile eine zusätzliche Überkopfbewässerung bzw. Strohbedeckung unter diesen Bedingungen bietet.

Versuchsanlage:

Die Versuchsreihe zur detaillierten Untersuchung von Effekten der zusätzlichen Überkopfbewässerung bei stabilem Anstau auf die Vermehrungsraten und Artenzusammensetzung verschiedener Moosmischungen wurde Anfang Juni 2016 auf 20 m² Tischfläche angelegt (Abb. 3-2).

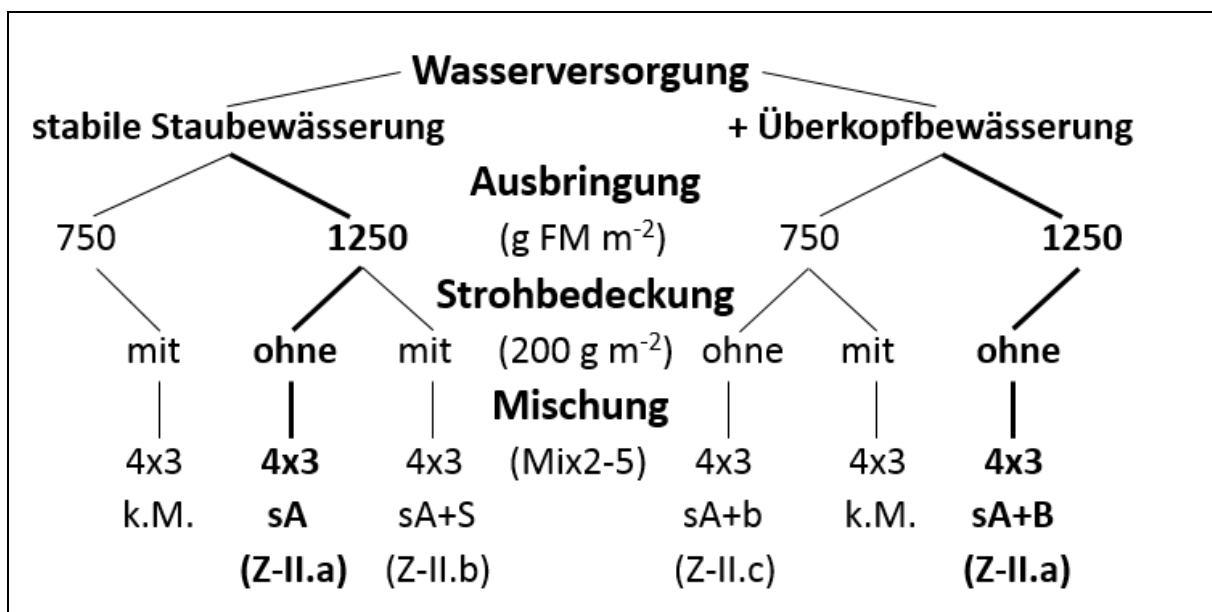


Abb. 3-2. Versuchsanlage der Mischkultur-Experimente (Zyklus II.a-c). Die Anlage umfasste vier Moosmischungen (Mix2-5) und zwei verschiedene Ausbringungsmengen (750 & 1250 g FM m⁻²) zur Untersuchung der Effekte einer zusätzlichen Überkopfbewässerung (+B) und Strohbedeckung (+S) bei stabiler Staubewässerung (sA) auf Gewächshaustischen unter Verwendung von in einer Zisterne zu sammelnden Regenwasser. Da sich infolge der Sicherstellung einer stabilen Wasserversorgung zwischen Varianten ohne und mit Bedeckung einer dünnen Strohschicht keine erkennbaren Unterschiede abzeichneten, wurde bei den Strohvarianten der geringeren Ausbringungsmenge aus Kapazitätsgründen kein Monitoring (k.M.) vorgenommen und das Material für Vermehrungsexperimente im Freiland eingesetzt.

Tab. 3-2. Charakterisierung der in den Mischkultur-Experimenten (Zyklus II.a-c) getesteten Moos- (A) und Behandlungsvarianten (B). Abkürzungen: „750“ = 750 g FM m⁻²; 1250 = 1250 g FM m⁻²; sA+b = stabiler Anstau mit Überkopfbewässerung im ersten Jahr (2015), ab 2016 permanent hoher Anstau (pA, vgl. Tab. 3-3); +S = zusätzliche Bedeckung mit 200 g Stroh m⁻². Für weitere Abkürzungen siehe Tab. 3-1. sowie Anhang 3-1.

A: Moosvarianten		Start-Biomasse [g TM m ⁻²]		Start- MD	Start- KD	Artenanteile [TM-%]		
		„750“	„1250“			„1250“	„1250“	Pap	Med	Rub
Moosmischung								
i.	Mix2 [P/M]	26	44	68 ±2	~2.000	~36	~63	.
ii.	Mix3 [R/M/P]	30	50	71 ±3	~4.200	~16	~32	~47
iii.	Mix4 [P/R/M]	28	46	70 ±2	~3.400	~43	~15	~39
iv.	Mix5 [R]	34	57	74 ±3	~6.800	.	.	~93

B: Behandlungsvarianten		Start-BM		Stroh	Zyklusdauer			Fortgang
Zyklus	BW	„750“	„1250“		Start	Ende	VT	
II.a	sA	44–57		+S	06/15	11/16	494 (92%)	→ NTZ (2017)
	sA+B	44–57						
II.b	sA	44–57		+S	06/15	06/16	355 (91%)	→ FrV-I (k.M.)
	sA+B	26–34						
II.c	sA+b	26–34			06/15	03/17	578 (87%)	→ FeGr-II

Die Anlage der Testvarianten erfolgte wie beim Vorversuch in mit schwach zersetztem Hochmoortorf gefüllten Anzuchtschalen auf zwei Gewächshaustischen (vgl. Abb. 3-1; Anhang 3-1). Pro Tisch wurden 12 verschiedene Varianten (4 Mischungen in drei unterschiedlichen Ausführungen: zwei Ausbringungsmengen, teilweise ohne oder mit zusätzlicher Strohbdeckung) in 3-facher Wiederholung getestet (Abb. 3-2, Tab. 3-2). Die Artenzusammensetzung der Mischungen (Mix2-5) ergab sich aus den verfügbaren Mengen des Vorversuchs und der bestehenden Erhaltungszucht (Anhang 3-2). Wie beim Vorversuch erfolgte zu Beginn eine Charakterisierung des Vermehrungsmaterials, indem Anfangs-Deckung, Anfangs-Köpfchendichte und die Trockenmasse-Anteile der in den Mischungen vertretenen Arten ermittelt wurden (Tab. 3-2).

Die folgenden Bewässerungsvarianten wurden getestet:

sA: stabiler Anstau (2 ±1 cm unter GOF)

sA+B: stabiler Anstau mit zusätzlicher Beregnung (Überkopfbewässerung, 1 mm m⁻² d⁻¹)

Dokumentation/Auswertung:

Der Zuwachs der Varianten des Zyklus II.a wurde in regelmäßigen Abständen dokumentiert. Dies umfasste Schätzungen des Deckungsgrades (bis 100% erreicht), Auszählen der Moosköpfchen (während der ersten 6 Monate und am Ende des Experiments) sowie fortlaufende Messungen der Mooshöhe zur Bestimmung von durchschnittlichen saisonalen Höhenzuwachsrate (Abb. 3-3).

Die Varianten des Zyklus II.b und Zyklus II.c wurden hingegen jeweils zum Ende ihrer Zyklusdauer (i.d.R. vor Verwendung als Spendermaterial für weiterführende Etablierungsexperimente) ausschließlich auf Biomassezuwachs beprobt.

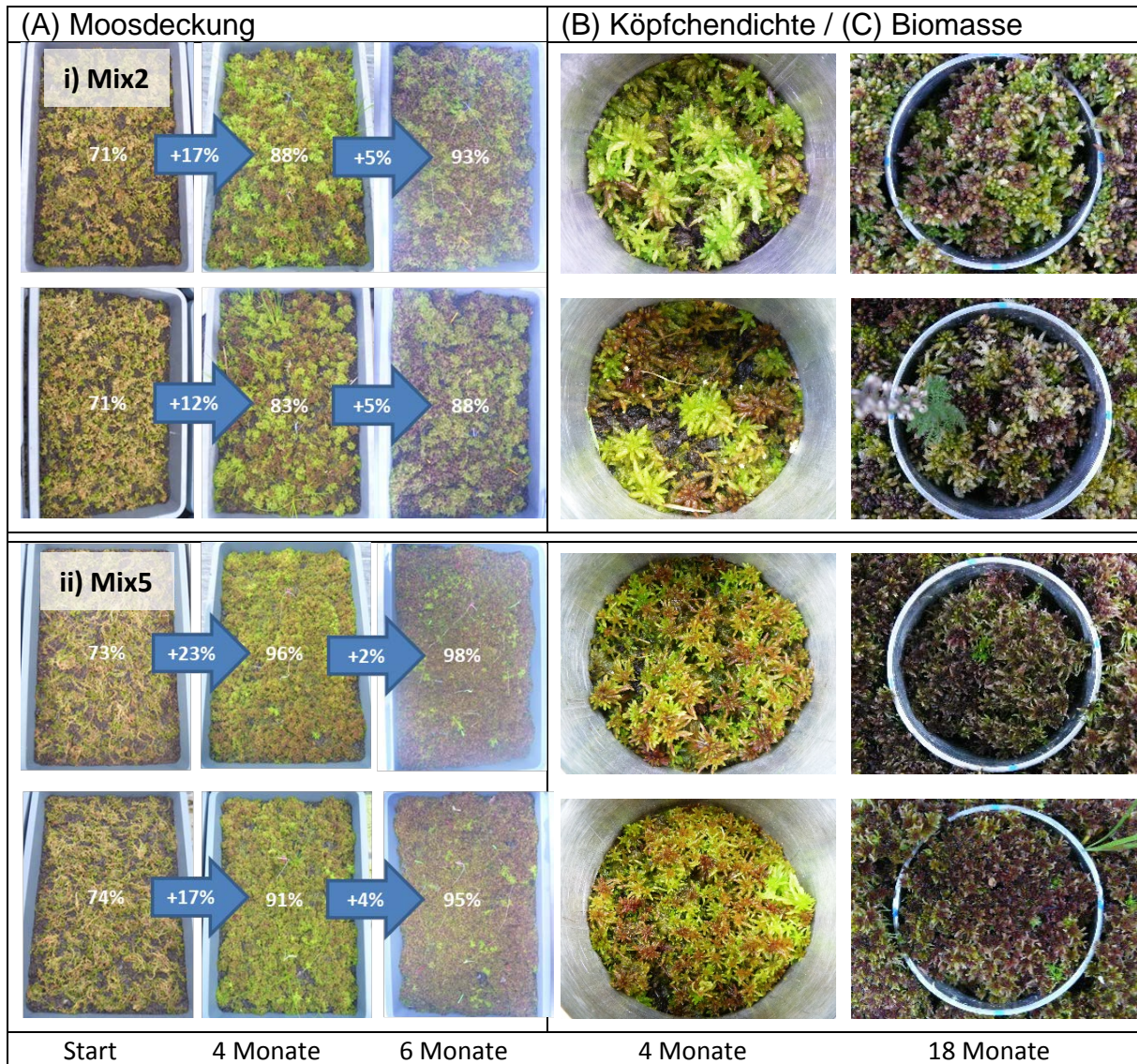


Abb. 3-3. Angewandte Methoden zur Kontrolle des Zuwachses am Beispiel der Moosmischungen (i) Mix2 und (ii) Mix5 des Zyklus II.a. (A) Schätzung des Moos-Deckungsgrades zu Beginn des Experiments sowie nach 4 und 6 Monaten, und (B) Auszählen von Capitula nach 4 und 18 Monaten zur Bestimmung der Köpfdichte und Beprobung der Biomasse (100 cm² Beprobungsfläche) zur Bestimmung des Trockenmassezuwachses nach 18 Monaten der Vermehrung (06/2015–11/2016). Oben: stabiler Anstau mit Überkopfbewässerung (sA+B); unten: stabiler Anstau (sA).

c. Experiment 3: Optimierung der Vermehrung in Monokultur (Zyklus III)

Da sich im Zuge des Monitorings der im Vorjahr begonnenen Mischkultur-Vermehrung angedeutet hatte (Anhang 6-3), dass eine zusätzliche Überkopfbewässerung bei stabiler Staubewässerung in der frühen Phase der Anzucht eine Verschiebung der Artenzusammensetzung in Richtung einer Dominanz von Arten/Wuchsformen bewirken kann (v.a. *S. rubellum*), sollte im Zuge dieses Experiments die Vermehrung der Arten in Monokultur überprüft werden. Eine unter optimaler Wasserversorgung gut wachsende Art könnte mit großer Wahrscheinlichkeit weniger gut an instabile Freilandbedingungen angepasst sein (Anhang 6-2). Außerdem waren auch aufgrund des zeitweiligen Wassermangels während des Vorversuchs keine Vergleichsdaten zu artspezifischen Vermehrungsraten (Monokultur) unter ausschließlich stabiler Staubewässerung dokumentiert (vgl. Kapitel 4.1.1). Darüber hinaus sollte die Versuchsanlage um eine dritte Bewässerungsvariante mit permanent hohem Anstau erweitert werden, um artspezifische Effekte durch Überversorgung infolge von dauerhaft zu nassen Bedingungen abschätzen zu können.

Versuchsanlage:

Der Vermehrungszyklus (Zyklus-III) dauerte von Mai 2016 bis Oktober 2017 (Tab. 3-3). Die Entnahme des Vermehrungsmaterials der Einzelarten erfolgte aus einem Tisch mit instabiler Stau- und zusätzlicher Überkopfbewässerung (Anhang 3-1). Im Gegensatz zum Vorversuch, wo das Trockengewicht der Anfangs-Biomasse teilweise stark voneinander abwich, wurde in diesem Experiment für alle Varianten die gleiche Start-Trockenmasse als Ausbringungsmenge gewählt (Tab. 3-3). Dabei variierte die Frischmasse entsprechend der Wassergehalte zwischen 1275 und 1500 g m⁻². Die Steuerung der angebotenen Wassermengen erfolgte durch Unterschiede in der durchschnittlichen Anstauhöhe sowie zusätzlicher Überkopfbewässerung.

Die folgenden Bewässerungsvarianten wurden getestet:

sA: stabiler Anstau (2 ±1 cm unter GOF)

sA+B: stabiler Anstau mit zusätzlicher Beregnung (Überkopfbewässerung)

pA: permanent hoher Anstau (1 cm unter GOF)

Tab. 3-3. Charakterisierung der in den Monokultur-Experimenten (Zyklus III) getesteten Moos- (A) und Behandlungsvarianten (B). Abkürzungen: F3 = Vermehrungsmaterial entnommen aus zweimal vegetativ vermehrten Rasen (3. Generation); pA = permanent hohe Staubewässerung (1 cm unter GOF). Für weitere Abkürzungen siehe Tab. 3-1 und 3-2.

A: Moosvarianten				B: Behandlungsvarianten				
Moosart (F3)	Start-BM [g TM m ⁻²]	Start- MD	Start- KD	Zyklus	BW	Zyklusdauer		
						Start	Ende	VT
i. <i>S. papillosum</i>	60	77 ±1	~2.000	III	sA	05/16	10/17	479 (87%)
ii. <i>S. medium</i>	60	75 ±1	~2.100		sA+B			
iii. <i>S. rubellum</i>	60	83 ±1	~4.400		pA			

Dokumentation/Auswertung:

Es erfolgten regelmäßige Bonituren mit Schätzung des Deckungsgrades (bis 100% erreicht) und fortlaufender Messung der Mooshöhen bis zur Beprobung der Biomasse im Oktober 2017. Die Höhenmessungen erfolgten bestmöglich zum Ende und Beginn der betrachteten Vegetationsperioden, um eine detaillierte Auswertung saisonaler Wachstumsraten zu erzielen bzw. Phasen mit den höchsten Zuwachsraten identifizieren zu können (vgl. Genet et al. 2013).

d. Experiment 4: Simulation von Nass-Trocken-Zyklen (Zyklus II.a.P2)

Hintergrund:

Aufgrund des hohen Wasserverbrauchs und Vorbehalten hinsichtlich der Tragfähigkeit der Tische bei stabiler Staubewässerung gegenüber zu erwartender Wachstumseinbußen infolge einer schnellen Austrocknung bei geringen Substratmächtigkeiten (ohne Möglichkeit einer zusätzlichen Überkopfbewässerung) wurde mit diesem Experiment eine kontrollierte Simulation von Nass-Trocken-Zyklen der Vermehrungsschalen durchgeführt. Dabei sollte die Aufrechterhaltung hoher Vermehrungsraten (zwecks Produktion ausreichender Mengen an Spendermaterial in überschaubaren Zeiträumen) nicht gefährdet werden.

Eine wichtige Rolle spielte in diesem Zusammenhang außerdem die Beobachtung, dass die für die Etablierungsexperimente ausgewählte produktivste Variante des Vorversuchs bei instabilem Anstau mit zusätzlicher Überkopfbewässerung sich auf Flächen mit stärkeren Wasserstandsschwankungen als besonders empfindlich gegenüber Austrocknung herausstellte, während die gleiche Art in einer Moosmischung mit deutlich größerem Erfolg etabliert werden konnte (vgl. Kapitel 4.3.1). Deswegen sollte dieses Experiment auch Hinweise auf das Etablierungspotenzial von Moosmischungen unter instabilen Freilandbedingungen liefern, da das produzierte und umfangreich dokumentierte Spendermaterial anders als ursprünglich geplant nicht für eine großflächigere Ausbringung auf Flächen mit den größten Erfolgsaussichten eingesetzt werden konnte.

Versuchsanlage:

Der Untersuchungszeitraum dauerte von Ende Mai 2017 bis Oktober 2017 (Tab. 3-4). Zusätzlich zur Fortsetzung der vorausgegangenen Stau- und Überkopfbewässerung (Kontrollen) wurden die Mischkultur-Varianten (Mix2-Mix5) über einen Zeitraum von 20 Wochen (Juni bis Oktober 2017) in alternierenden Intervallen von einer bzw. zwei Wochen vier unterschiedlichen Nass-Trocken-Zyklen unterzogen. Hierzu wurde das Material in den Anzuchtschalen des Zyklus II.a (Mischkultur, stabile Wasserversorgung) in sechs gleichgroße Soden aufgeteilt, wodurch aus den drei Wiederholungen einer Mischungsvariante 18 vergleichbare Versuchseinheiten gebildet werden konnten. Pro Variante wurden jeweils drei Soden mit Soden der übrigen drei Mischungen in neuen Pflanzschalen zusammengeführt, sodass jede Mischungsvariante innerhalb der vier zu testenden Nass-Trocken-Zyklen sowie den zwei Kontrollen erneut in dreifacher Wiederholung vertreten war.

Tab. 3-4. Charakterisierung der für die Nass-Trocken-Zyklen (Zyklus II.a.P2) eingesetzten Moosmischungs- (A: Varianten aus Zyklus II.a) und Behandlungsvarianten (B). Abkürzungen: sA = Fortsetzung des stabilen Anstaus (Kontrollen); NT1 = 1-wöchiger Anstauwechsel; NT2 = 2-wöchiger Anstauwechsel; +B = zusätzliche Überkopfbewässerung ($1 \text{ mm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

A: Moosvarianten		Start-BM [g TM m ²]		Start-KD		Artanteile [TM-%]		
Moosmischung		sA	sA+B	sA	sA+B	Pap	Med	Rub
i.	Mix2	479 ±53	482 ±86	~23.200	~19.600	35–40	57–64	.
ii.	Mix3	549 ±29	521 ±62	~33.000	~33.800	18–23	36–38	33–37
iii.	Mix4	572 ±35	575 ±33	~35.100	~33.100	42–43	16–17	35–38
iv.	Mix5	616 ±75	602 ±20	~51.900	~48.000	.	.	90–91

B: Behandlungsvarianten		Start-BM [g TM m ²]		Zyklusdauer		VT	Fortgang
Zyklus	BW	sA	sA+B	Start	Ende		
II.a	sA/+B	479–	482–			140	
-P2	NT1/+B	616	602	06/17	10/17	(100%)	→ WV
	NT2/+B						

Dokumentation/Auswertung:

Die Bearbeitung und Auswertung gestaltete sich aufgrund der umfangreichen Unterteilung von in Moosmischungen vertretenen Arten als wesentlich aufwendiger als erwartet, woraus sich Verzögerungen einerseits, aber auch interessante Ergebnisse andererseits ergaben (vgl. Kap. 4.1.4, Anhang 6-4/5).

3.1.3 Produktion von Spendermaterial im größeren Maßstab

Neben den Experimenten (in Anzuchtschalen) zur Erprobung verschiedener Techniken für die Optimierung der Torfmoosvermehrung auf Gewächshaustischen wurde die erfolgreich getestete Bewässerungsvariante des Vorversuchs mit instabilem Anstau und einmaliger Beregnung pro Tag zu Projektbeginn auf größerer Fläche (50m²) auf Tischen mit Vlies etabliert. Hierfür wurden Moosmischungen (Mix3 und Mix6) mit 750 bis 1250 g FM m⁻² verwendet. Die Vermehrungsanlage auf dem Werksgelände wurde entsprechend erweitert und mit der notwendigen Bewässerungstechnik aufgerüstet (Anhang 3-1).

Vermehrungsanlage im Freiland

Aufgrund des hohen Biomassezuwachses auf den Tischen der im September 2013 begonnenen Vermehrung erschien es Anfang 2016 erforderlich etwa 20 m² Spendermaterial abzuernten (Anhang 3-1), um einerseits Verdrängungsstress infolge von Platzmangel oder eines Wechsels der Bewässerung zwischen den Moosen zu vermeiden (vgl. Robroeck et al. 2007) und andererseits - für den Fall, dass die Zuwachsraten anhalten sollten - die Tragfähigkeit der Tische nicht zu gefährden (Abb. 3-4). Da allerdings zu diesem Zeitpunkt die Etablierungsexperimente noch nicht abgeschlossen waren (vgl. Kapitel 4.3) und somit noch keine soliden Kenntnisse zur Umsetzung großflächiger bzw. praxisnaher Ausbringungstechniken vorlagen, beschloss das Projektteam die Möglichkeit zu nutzen und mit dem verfügbaren Spendermaterial zu Testzwecken zwei Vermehrungsflächen im Freiland nach aus dem Bereich des „Sphagnum farmings“ bekannten Vorbildern anzulegen (Gaudig et al. 2014). Eine Erweiterung der Tisch-Vermehrungsfläche kam aus Platzgründen nicht in Betracht. Das Material reichte aus um circa 150 m² Freilandfläche nach Oberbodenabtrag im Verhältnis von 1:8 mit losen Fragmenten zu beimpfen (Abb. 3-5). Darüber hinaus wurden Sodenvarianten getestet (27 cm x 36 cm, Abb. 3-4), indem aus Kapazitätsgründen bislang nicht dokumentierte Strohvarianten der im Vorjahr angelegten Moosmischungen verwendet wurden (Tab. 3-2; Abb. 3-2). Da allerdings aus denselben Gründen auch auf den Vermehrungsfeldern im Freiland kein umfangreiches Monitoring geleistet werden konnte, sollten die Anlagen vor allem der allgemeinen Identifizierung günstiger Standort- und Rahmenbedingungen dienen auf Basis eines erfolgreichen, messbaren Biomassezuwachses. Zunächst stand jedoch die Erprobung erforderlicher Maßnahmen zur Herrichtung und Betreuung der Flächen als Alternative zur Tischvermehrung im Vordergrund (Abb. 3-5).



Abb. 3-4. Spendermaterial zur Beimpfung der Freilandvermehrungsfelder im Juni 2016. (A) 10 m² Moosmischung mit Begleitvegetation (Vermehrung auf Tisch 4 ab 09/2013) für Ausbringung als lose Fragmente; und (B) 4 m² Moosmischung mit dünner Strohbedeckung (Vermehrung auf Tisch 1 und 3 ab 06/2015) für Ausbringung als intakte Soden. Siehe auch Anhang 3-1 und Tab. 3-2.

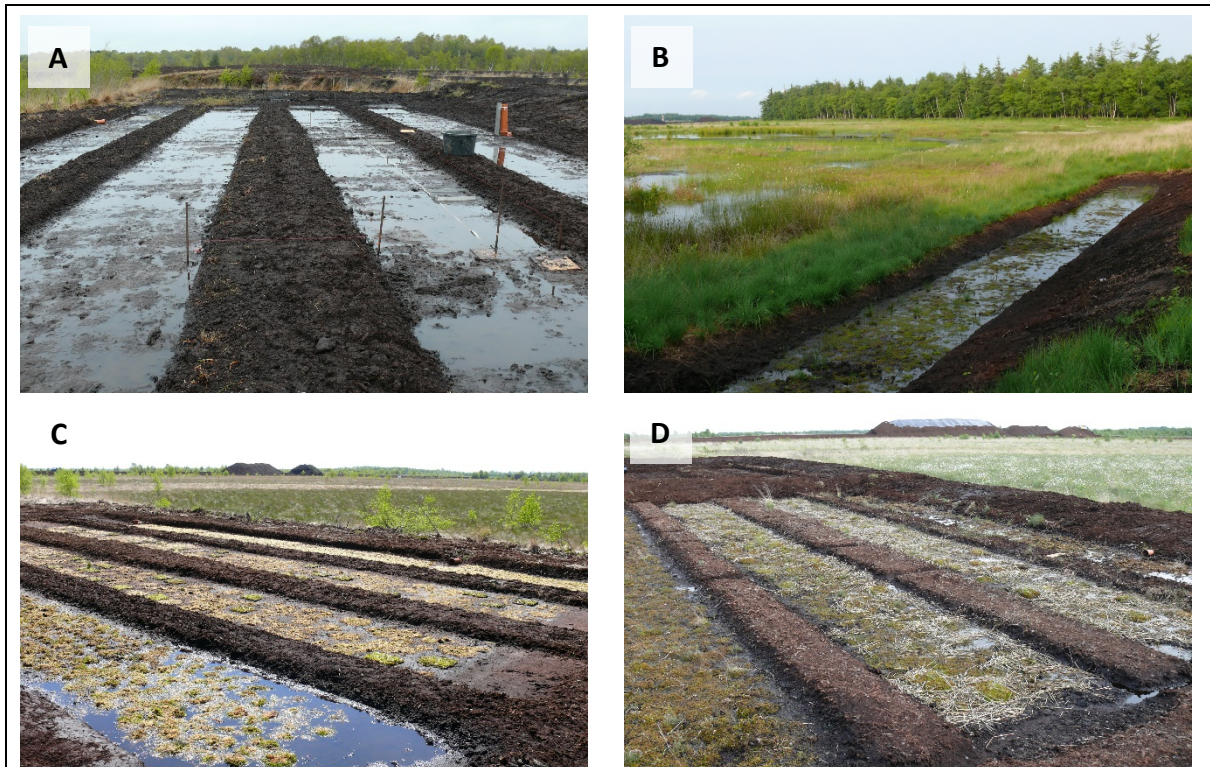


Abb. 3-5. Testweise Anlage von Vermehrungsfeldern im Freiland an zwei verschiedenen Standorten (2016). (A) Zentral im Moor gelegener Bereich auf einem vegetationslosen Torfrücken zwischen einer Wiedervernässungsfläche und einem Regenwasser-Speicherbecken. (B) Vermehrungstreifen in Randlage zu einer Wiedervernässungsfläche und einem höher gelegenen Moorbirkenwald. (C) Beimpfung mit losen Fragmenten und gewachsenen Soden und manuelle Ebbe/Flut-Bewässerung durch Zulauf aus dem angrenzenden Speicherbecken. (D) Bedeckung mit Stroh zum Schutz der Fragmente vor Austrocknung nachdem die Bewässerung im Spätsommer 2016 aufgrund von Wassermangel nicht länger aufrecht gehalten werden konnte.

Nachdem die großflächige Vermehrung auf den Tischen weiterhin erfolgreich verlief, standen im Frühjahr 2017 weitere 30 m² an erntereifem Spendermaterial zur Verfügung (Anhang 3-1). Es zeichnete sich jedoch zunehmend ab, dass eine großflächige Ausbringung auf potenziell besser geeigneten – aber zumeist bereits länger in der Sukzession befindlichen und somit schwerer zugänglich gelegenen – Flächen für die Entwicklung praxisnaher Etablierungsverfahren schwer umzusetzen ist. Die für einfacher durchzuführende Initialpflanzungen besser erreichbaren, jedoch zeitweise hoch überstauten jüngeren Sukzessionsstadien erforderten hingegen nach erster Einschätzung ebenfalls zusätzliche Maßnahmen (wie z.B. die Anlage von Torfbänken). Damit fokussierte sich das Projekt zunehmend auf die Vermehrung, auch im Freiland, um zukünftig in größerem Umfang auf Spendermaterial für die Beimpfung von Flächen mit guten Voraussetzungen zur erfolgreichen Etablierung zurückgreifen zu können. Infolge wurde eine Neuanlage und Optimierung der günstig gelegenen Vermehrungsfelder zentral im Moor durchgeführt (Abb. 3-6).

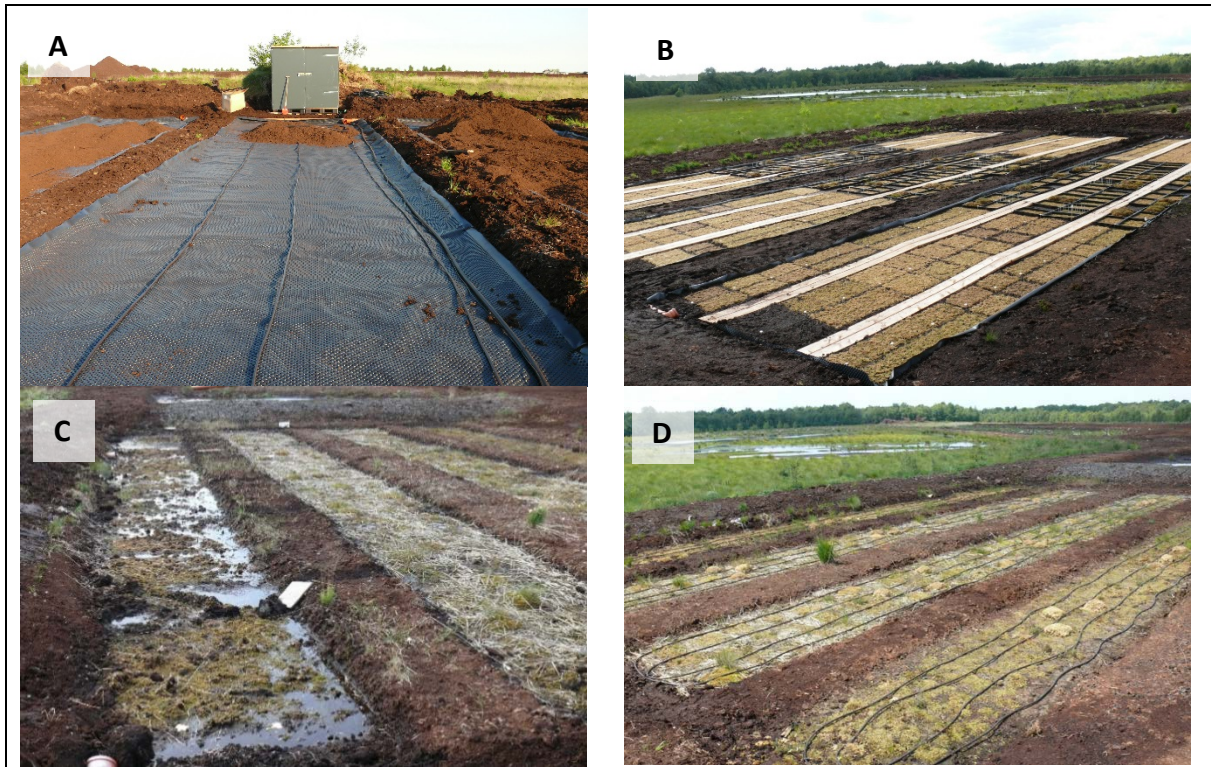


Abb. 3-6. Anlage und Optimierung von Freilandvermehrungsfelder (2017). (A) Einrichtung von kammerartigen Beeten mit frischem Weißtorfsubstrat und Installation von Unterflurbewässerung. (B) Beimpfung mit Spendermaterial aus der Torfmoosvermehrung der Tische 8–10 (vgl. Anhang 3-1). (C) Aufgrund von Problemen infolge periodischen Überstaus in zu tief gelegenen Bereichen und um Bewässerungswasser sparsamer einsetzen zu können, wurden die im Vorjahr eingerichteten Vermehrungsfelder mit einer Oberflurbewässerung ausgestattet (D).

3.2 Arbeitsschritte Modul ii: Begleitendes Monitoring

3.2.1 Vorcharakterisierung und Flächenauswahl für Etablierungsexperimente

Das Vorgehen zur Auswahl der Versuchsfleichen für die Durchführung der Etablierungsexperimente (Modul-iii) umfasste folgende Arbeitsschritte:

1. Vorauswahl von 14 im Untersuchungsgebiet liegender und potenziell geeigneter sowie betretbarer Wiedervernässungsflächen nach Karten- und Luftbildinterpretation.
2. Auswertung vorhandener Informationen zur Abbau- und Renaturierungshistorie (Abbauverfahren, Vornutzung, Flächenalter/Jahre seit Wiedervernässung).
3. Vegetationskundliche Einordnung im Zuge von Flächenbegehungen (Erfassung des dominierenden Vegetationstyps in Anlehnung an Drachenfels, 2011).
4. Hydrologische Vorcharakterisierung anhand von mit automatischen Datenloggern kontinuierlich aufgezeichneten Wasserstandsmessungen.

Auf Basis dieser Informationen wurden im Vechtaer Moor 10 Flächen ausgewählt, welche als repräsentativ für die standörtlichen Bedingungen unterschiedlicher Sukzessions- bzw. Regenerationsstadien nach verschiedenen Ausgangs- und Rahmenbedingungen (im Zusammenhang unterschiedlicher Abbau- und Renaturierungs-Techniken sowie landwirtschaftlicher Nutzung) angesehen werden können (Tab. 3-5). Hierbei wurden ganz bewusst nicht nur Flächen ausgewählt, welche potenziell am besten geeignet erschienen, sondern auch solche, die im Hinblick auf Sukzession, Wasserstände und andere Faktoren voraussichtlich weniger günstig sind, um möglichst allgemeingültige Aussagen über die Wirksamkeit aktiver Einbringungsmaßnahmen treffen und daraus prioritär anzuwendende Verfahren herleiten zu können.

Ferner erfolgten nach Absprache mit dem Niedersächsischem Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zwei weitere Ausbringungen auf den Untersuchungsflächen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projektes mit dem Schwerpunkt auf biogeochemische Randbedingungen und Prozesse bei der Renaturierung (KN929/8-1, Projektleitung K.-H. Knorr, bearbeitet durch Svenja Agethen; jeweils eine Fläche im Mittleren Wietingsmoor und Neustädter Moor). Somit wurden für die kleinflächige und experimentelle Ausbringung insgesamt 12 Flächen unterschiedlicher Sukzessionsstadien ausgewählt.

Tab. 3-5. Übersicht zur Vorcharakterisierung ausgewählter Monitoringflächen für die Etablierungsexperimente im Vechtaer Moor anhand (i) dominierender Vegetation, (ii) Abbau- und Renaturierungshistorie, (iii) Hydrologie und (iv) Lage im Moor. Abkürzungen: LW-Vorn. = Landwirtschaftliche Vornutzung (exGr = extensives Grünland; * = Zufluss nährstoffreichen Wassers aus landwirtschaftlich genutzten Umfeld); O-U-V = Ober-Unterefeld-Verfahren; JsW = Jahre seit Beginn der Wiedervernässung; Som. 2014 = mittl. Wasserstand 06–11/2014; Win. 14/15 = mittl. Wasserstand 12/2015–5/2016; Ampl. = Wasserstands-Amplitude (06/2014–05/2015). Die Gruppeneinteilung (A1–5 bzw. B1–5) erfolgte anhand der Rangordnung der während des Jahres vor Ausbringung beobachteten Wasserstands-Amplituden (R).

V	i. Vegetation	ii. Vorgeschichte			iii. Hydrologie				iv. Lage
	Sukzessionsstadium	LW-Vorn.	Abbau-Verf.	Alter (JsW)	Som. 2014	Win. 14/15	Ampl.	R	Koordinaten
A1	Wollgras-Torfmoos-Schwingr. (W-T-S-I)	nein	Sodenstich	~18	-1	-5	14 (V1)	1	N52° 42.774' E8° 21.099'
A2	Wollgras-Torfmoos-Schwingr. (W-T-S-II)	nein	Sodenstich	~20	-3	-10	17 (V3)	3	N52° 42.905' E8° 20.882'
A3	Flatterbinsen-Fläche I (Jun-eff-I)	Ja (exGr)	O-U-V	~17	9	-3	26 (V5)	5	N52° 42.049' E8° 19.756'
A4	Scheiden-Wollgras-Fläche II (Eri-vag-II)	nein	Frästorf	~15	21	-3	42 (V7)	7	N52° 42.733' E8° 21.397'
A5	Flatterbinsen-Fläche II (Jun-eff-II)	nein* (exGr)	Frästorf	~15	17	-12	58 (V9)	9	N52° 42.740' E8° 21.447'
A: Mittelwert				~17	9	-7	32		
B1	Schmalbl. Wollgras-Fläche I (Eri-ang-I)	nein	Frästorf	~17	0	-4	15 (V2)	2	N52° 42.743' E8° 21.134'
B2	Woll-/Pfeifengras-Fläche (Eri-Mol-I)	nein	Frästorf	~17	1	-6	18 (V4)	4	N52° 41.681' E8° 19.379'
B3	Scheiden-Wollgras-Fläche I (Eri-vag-I)	nein	Frästorf	~12	14	9	26 (V6)	6	N52° 42.788' E8° 21.615'
B4	Schmalbl. Wollgras-Fläche II (Eri-ang-II)	nein	O-U-V	~9	5	5	50 (V8)	8	N52° 42.520' E8° 20.793'
B5	Pfeifen-/Wollgras-Fläche (Eri-Mol-II)	nein	O-U-V	~12	k.M	k.M	k.M (V10)	.	N52° 41.829' E8° 19.983'
B: Mittelwert				~13	5	1	27		
Gesamt: Spanne (ohne B5)				9–20	-3–17	-12–9	14–58		

3.2.2 Einrichtung der Etablierungsexperimente

Die Einrichtung der Versuchsfelder hatte sich nach Art und Menge des aus dem Vorversuch zu entnehmenden Spendermaterials zu richten (vgl. Kapitel 4.1.1), was deutliche Abweichungen vom ursprünglich vorgesehenen Versuchsdesign nach sich zogen. So konnte die Ausbringung der nur begrenzt vorhandenen Soden-Varianten nicht entlang eines Feuchtegradienten innerhalb der ausgewählten Flächen erfolgen. Stattdessen wurde das verfügbare und aussichtsreichste Material zugunsten echter Wiederholungen auf eine möglichst große Anzahl unterschiedlicher Flächentypen aufgeteilt (Tab. 3-6, Abb. 3-11). Für die Beimpfung mit einer zweiten Sodenvariante sollte darüber hinaus eine gleichmäßige Verteilung erreicht werden (vgl. Kapitel 3.3.1). Hierzu wurde eine Einordnung der Flächen nach der beobachteten Wasserstandsamplitude zugrunde gelegt (Tab. 3-5).

Tab. 3-6. Art und Menge des für die kleinflächigen Etablierungsexperimente im Freiland eingesetzten Spendermaterials für (A) Ausbringung in Sodenform und (B) Ausbringung als lose Fragmente: Abkürzungen: T = Treatment/Versuchsvariante; VF = Versuchsfeld/Plot; BS = Beimpfungsstelle; S:E = Verhältnis von Spender- zu Empfängerfläche; SF = Sodenfläche (0.0324 m² = 22% von 0.15 m² der BS); FBF = Fragment-Beimpfungsfläche pro BS (0.1 m²); +Stroh = Bedeckung mit 30 g Stroh FBS⁻¹ (= 300 g Stroh m⁻² = 3 t ha⁻¹).

A: Soden-Ausbringung		n			SF	FM	TM	TM
T	Art	VF	BS	S:E	[cm ² BS ⁻¹]	[g Sode ⁻¹]	[g Sode ⁻¹]	[g m ⁻²]
T1	<i>S. papillosum</i>	12	36	1:1		~270	~11	319 ±84
T2a	„Mix1“	6*	18	1:1	324 (18x18 cm)	~440	(G: ~400) ~18	534 ±51
T2b	<i>S. rubellum</i>	6**	18	1:1		~578	(G: ~325) ~23	693 ±54
Gesamt-Beimpfungsfläche Soden:					~2.3 m ² SF		~1140 g TM	
B: Fragment-Ausbringung		n			FBF	FM	TM	TM
T	Art	VF	BS	S:E	[cm ²]	[g BS ⁻¹]	[g BS ⁻¹]	[g m ⁻²]
T3	„Mix3“	12	36	1:2.5	1000 (0.1 m ²)	~500	~20	~200
T4	„Mix3“+Stroh	12	36	1:5	1000	~250	(G: ~720) ~10	~100
Gesamt-Beimpfungsfläche Fragmente:					~7.2 m ² FBF		~1080 g TM	

Nachdem die Beimpfungsstellen und Dauerbeobachtungsflächen in den Versuchsfeldern über einzurichtende Holzstege störungsfrei erreicht werden konnten (Abb. 3-7), wurde das erforderliche Messequipment für das Monitoring zu den Etablierungsexperimenten installiert. Zur fortlaufenden und nicht-destruktiven Kontrolle des Höhenwachstums der in Sodenform transplantierten Varianten wurden in zufällig ausgewählten Bereichen innerhalb der Stege Messstäbe befestigt (nach Clymo 1970, Abb. 3-9). Die exakte Platzierung der dadurch festgelegten Beimpfungsstellen richtete sich nach der vorhandenen Pionier-Vegetation. Hierbei wurden Horst-bildende Pflanzen (Scheiden-Wollgras, Flatterbinse) bzw. festes Substrat (z.B. geschlossene Torfmoos-Schwingdecken) bevorzugt eingerichtet – d.h. tiefere bzw. einsinkende und somit länger überstauende Bereiche oder freie Wasserflächen (Wellenschlag) wurden gemieden.

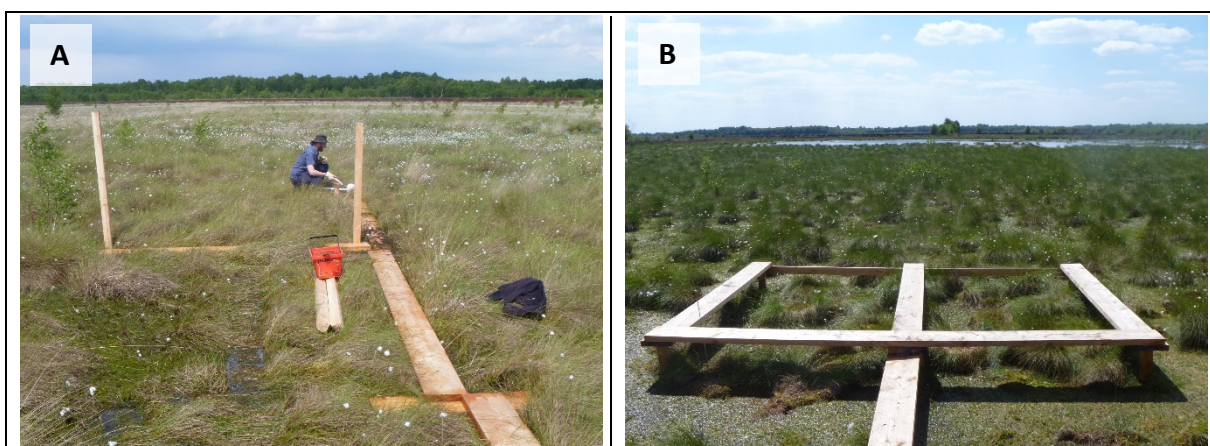


Abb. 3-7. Einrichtung der Etablierungsexperimente. (A) Stegbau-Maßnahmen zur Einrichtung des Versuchsfeldes auf einer Wollgras-Torfmoos-Schwinggrasen-Fläche (A1); und (B) fertig eingerichtetes Versuchsfeld auf einer Scheiden-Wollgras-Fläche (A4) zwecks regelmäßiger und störungsarmer Untersuchung der innerhalb der Holzstege gelegenen Beimpfungsstellen.

3.2.3 Begleitendes Monitoring

Methoden des hydrologischen Monitorings

Auf 9 der 14 Flächen, die zwecks Vorcharakterisierung bereits mit Wasserstands-Datenloggern ausgestattet gewesen waren, wurde das hydrologische Monitoring nach Einrichtung der Etablierungsexperimente fortgesetzt. Eine im Ober-Unterefeld-Verfahren befindliche Renaturierungsfläche (B5: Pfeifen-/Wollgras-Fläche) wurde dagegen erst im Mai 2015 in das Monitoring aufgenommen (Tab. 3-5). Darüber hinaus wurden zu Vergleichszwecken als bereits länger in Sukzession befindliche Flächen (ca. 30 Jahre) die zwei außerhalb des Projektgebiets liegenden, externen Flächen (je eine im Mittleren Wietingsmoor und Neustädter Moor) herangezogen (Agethen & Knorr, 2018).

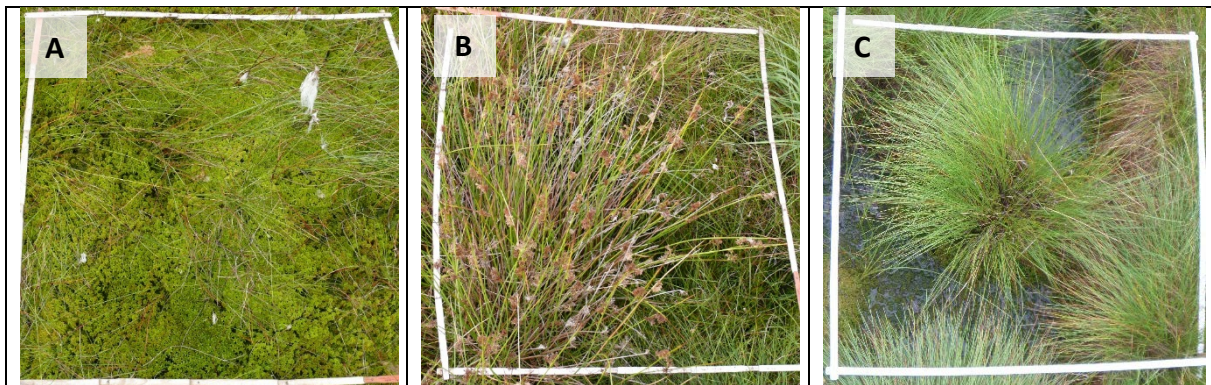


Abb. 3-8. Angewandte Methoden zum vegetationskundlichen Monitoring. Zur Charakterisierung der für die Etablierungsexperimente ausgewählten Renaturierungsflächen wurden bis zu 6 Transekt-Aufnahmeflächen eingerichtet und im ersten und zweiten Jahr dokumentiert. (A) Wollgras-Torfmoos-Schwingrasen-II (A2); (B) Flatterbinsen-Fläche I (A3); (C) Scheiden-Wollgras-Fläche II (A4).

Methoden der vegetationskundlichen und biogeochemischen Flächeninventur

Die allgemeine vegetationskundliche Einordnung der Flächen erfolgte anhand von Transekt-Kartierungen (Abb. 3-8). Während im ersten Jahr auf allen Flächen eine Bestandsaufnahme zur Charakterisierung des Ausgangszustandes vorgenommen wurde, beschränkten sich die erneuten Kartierungen im Folgejahr auf die aussichtsreichsten Flächen, um die Sukzessionsentwicklung dokumentieren zu können (Anhang 4-5). Im September des zweiten Jahres (2016) wurde zudem erstmals die unmittelbar die Soden-Beimpfungsstellen umgebende Vegetation detailliert erfasst (Abb. 3-12), um bei der Datenauswertung Soden-spezifisch Zusammenhänge zwischen vorhandener Vegetation und Etablierungserfolg ermitteln zu können (Anhang 4-6).

Aufgrund der Kapazitäten der Analytik und der umfangreichen Arbeiten an den Vermehrungsanlagen, beschränkte sich die biogeochemische Charakterisierung (Mineralisierungsgrad, Nährstoffinventar, potenzielle Abbaubarkeit des Torfs) der Flächen zunächst auf 5 Flächen (Tab. 4-5).

Die Arbeitsschritte zur Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung des organischen Pflanzen- und Torf-Materials umfasste folgende Maßnahmen:

(A) Probenahmen:

- Pflanzen-Biomasse: Beprobung der oberirdischen Gefäßpflanzen-Biomasse in den Fragment-Beimpfungsstellen zum Zeitpunkt der Ausbringung (Juni 2015) und in den Transekt-Aufnahmeflächen im August 2015
- Torfmaterial: Beprobung von Torfkernen auf 8 der 10 im Projektgebiet liegenden Versuchsfächen

(B) Laboranalysen:

- Bestimmung des pH-Wertes in wässriger Lösung
- Bestimmung von Gesamt-Elementgehalte (v.a. Ca, Mg, Na, K, P) mittels WD-Röntgenfluoreszenzspektroskopie (XRF)
- Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphats (P_2O_5) und Kaliums (K_2O) mittels CAL-Extraktions-Methode (Broll & Erber, 2000)
- Bestimmung des C/N-Verhältnisses mittels Elementaranalyse
- Bestimmung der Qualität des organischen Materials (Abbaubarkeit) mittels FTIR-Spektroskopie



Abb. 3-9. Arbeitsschritte zur biogeochemischen Charakterisierung der Monitoringflächen. (A+B) Einrichtung von Porenwasser-Probennehmern am Beispiel der Flutterbinsen-Fläche-I (A3) für wasserchemische Analysen im Labor (C); und Beprobung von Torfkernen zur biogeochemischen Inventur der Versuchsflächen (D: Wollgras-Torfmoos-Schwingrasen-I [A1]; E: Wollgras-Torfmoos-Schwingrasen-II [A2])

Methoden des begleitenden biogeochemischen Monitorings (Wasserqualität)

Zur Untersuchung von Wechselwirkungen zwischen der Wasserqualität und dem Etablierungserfolg wurden auf insgesamt 8 Flächen (5 davon ab 06/2015, 1 ab 09/2015, 2 ab 04/2016; vgl. Tab. 4-5) direkt unterhalb der Beimpfungsstellen der jeweils zweiten Sodenvariante (T2a bzw. T2b) sowie in unbeimpften Kontrollbereichen außerhalb der Stege in jeweils 2 Tiefen Porenwasser-Probennehmer installiert (Abb. 3-9). Die Beprobung des Porenwassers erfolgte im ersten Jahr (2015) zweimalig (Juli, September), im zweiten Jahr (2016) dreimalig (April, Juli, Oktober) und im dritten Jahr (2017) zweimalig (April, September). An den gleichen Terminen wurde auch das für die Torfmoosvermehrung eingesetzte Bewässerungswasser beprobt.

Zur Bestimmung der Wasserqualitäten wurden die folgenden Laboranalysen durchgeführt:

- Bestimmung von Nitrat-, Ammonium- und Phosphatgehalt mittels Fließinjektions-Analyse, sowie Kalium (Flammenphotometrie)
 - N+P+K (Nährstoffverfügbarkeit)
- Bestimmung von Phosphat- und Eisen-Gehalt mittels UV-Vis Spektrometrie
 - Eisen als Proxy für die Wassersättigung und damit verbundene Redox-Verhältnisse
 - Vergesellschaftung von Eisen und Phosphat.
- Bestimmung von Kationen mittels ICP-OES Emissionspektrometrie
 - Basen-Kationen als Maß für Grundwassereinfluss
- Bestimmung des Gehalts an gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) mittels TOC-Analysator
 - organische Belastung des Bewässerungswassers und DOC Freisetzung im Porenwasser

3.3 Arbeitsschritte Modul iii: Etablierungsexperimente

Die Versuchsanlage hatte sich nach Art und Menge des verfügbaren Spendermaterials zu richten und sollte dabei berücksichtigen, dass Bulltorfmoose grundsätzlich als Einzelarten und Moosmischungen sowie auf zweierlei Weise ausgebracht werden können: als intakte Soden, vgl. Sliva & Pfadenhauer (1999), oder als lose Fragmente, vgl. Quinty & Rochefort (2003).

3.3.1 Anlage der Etablierungsexperimente

Um möglichst zeitnah und ohne größere Verzögerungen mit der Anlage der Etablierungsexperimente beginnen zu können, wurde auf Spendermaterial aus dem Vorversuch zur Torfmoosvermehrung zurückgegriffen (Abb. 3-10). Zur Erprobung unterschiedlicher Ausbringungstechniken (Soden/Fragmente, Einzelarten/Mischungen) kamen aus dem damaligen Bestand aus Gründen der Menge jedoch nur die regelmäßig von oben berechneten Varianten (A+B) in Frage. Nur diese hatten im Zeitraum von 09/2013 bis 03/2015 bereits ausreichend Biomasse akkumuliert (Moosdeckung > 95%, Mooshöhe > 30 mm; Trockenmasse > 300 g m⁻²), um aus den Anzuchtschalen für den Transfer intakte Soden entnehmen zu können (Tab. 4-1).

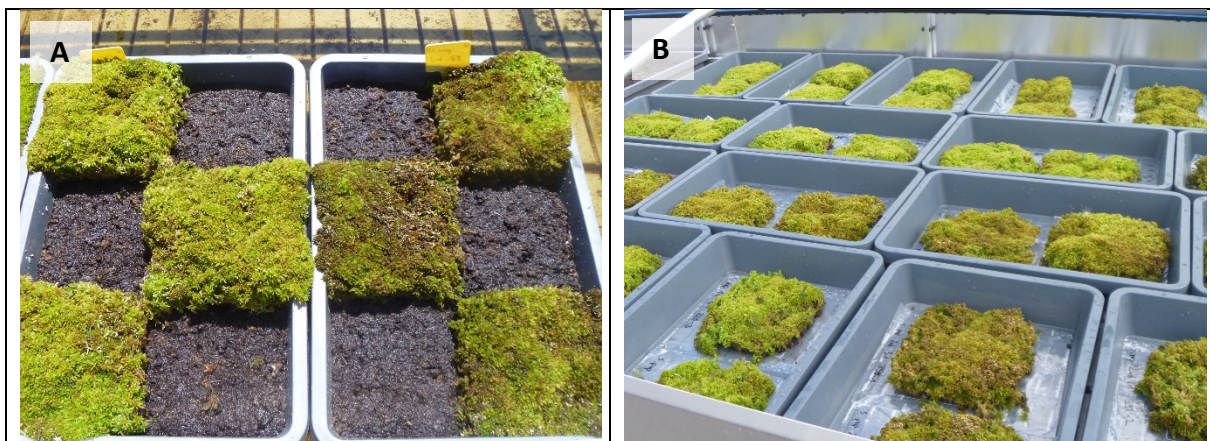


Abb. 3-10. Arbeitsschritte zur Entnahme von auf Gewächshaustischen vermehrten Spendermaterial zwecks Anlage von kleinflächigen Etablierungsexperimenten. (A) Aufteilung von Material des Vorversuchs für die Sodenausbringung oder weitere Vermehrung. Aus einer Schale (36 x 54 cm) wurden jeweils 6 Soden (18 x 18 cm) zugeschnitten; und (B) ausgewählte Moos-Soden für den Transfer zu den Versuchsfeldern.

Die Auswahl des Materials zur Erprobung der Soden-Ausbringung sollte bewusst verschiedene Arten umfassen, welche sich hinsichtlich Produktivität und ökologischer Potenz unterscheiden, um die Erfolgsaussichten unter unterschiedlichen Standortbedingungen artspezifisch beurteilen zu können. Allerdings war nur von *S. papillosum* genügend Material mit vergleichbaren Start-Eigenschaften (F1- & F2-Generation) verfügbar, um auf allen Versuchsfeldern eine experimentelle Soden-Ausbringung ausführen zu können (Tab. 4-1). Demgegenüber stand von *S. rubellum*, aufgrund des geringen Wachstums der F1-Generation, nur ausreichend homogenes Soden-Material für 6 Versuchsfelder zur Verfügung, um jeweils drei vergleichbare Wiederholungen der F2-Generation einzubringen (Tab. 3-6). Um auch auf den übrigen Flächen die Ausbringung einer zweiten Soden-Variante erproben zu können (vgl. Abb. 3-11), wurde eine zu diesem Zeitpunkt ausreichend vorhandene und dokumentierte

Moosmischung (Mix1) ausgewählt. Diese Variante setzte sich neben *S. medium* und *S. papillosum* zum Großteil wiederum aus *S. rubellum* zusammen und stellte zugleich die zweiterfolgreichste Variante des Vorversuchs dar (Tab. 4-1).

Um darüber hinaus die Erfolgsaussichten aktiver Einbringung durch Anwendung einer alternativen Ausbringungsform abschätzen zu können, wurden innerhalb der Stege zwei Varianten einer Moosmischung als lose Fragmente ausgestreut (Abb. 3-11). Hierzu wurden zu den Soden ähnliche Ausbringungsmengen verwendet – welche allerdings großflächiger verteilt wurden – und zur Verbesserung des Mikroklimas eine der Varianten mit einer zusätzlichen Strohschicht abgedeckt (Tab. 3-6). Bei der Soden-Ausbringung beliefen sich die eingesetzten Mengen an Spendermaterial auf insgesamt 1140 g Trockenmasse, verteilt auf 2.3 m² Beimpfungsfläche im Ausbringungsverhältnis von 1:1. Bei der Fragment-Ausbringung wurden insgesamt 1080 g Trockenmasse eingesetzt, verteilt auf 7.2 m² Beimpfungsfläche im Ausbringungsverhältnis von 1:2.5 bzw. 1:5 (Tab. 3-6). Hierzu wurde Material aus dem parallel begonnenen Mischkultur-Vermehrungsexperiment verwendet (siehe Kapitel 3.1.2).

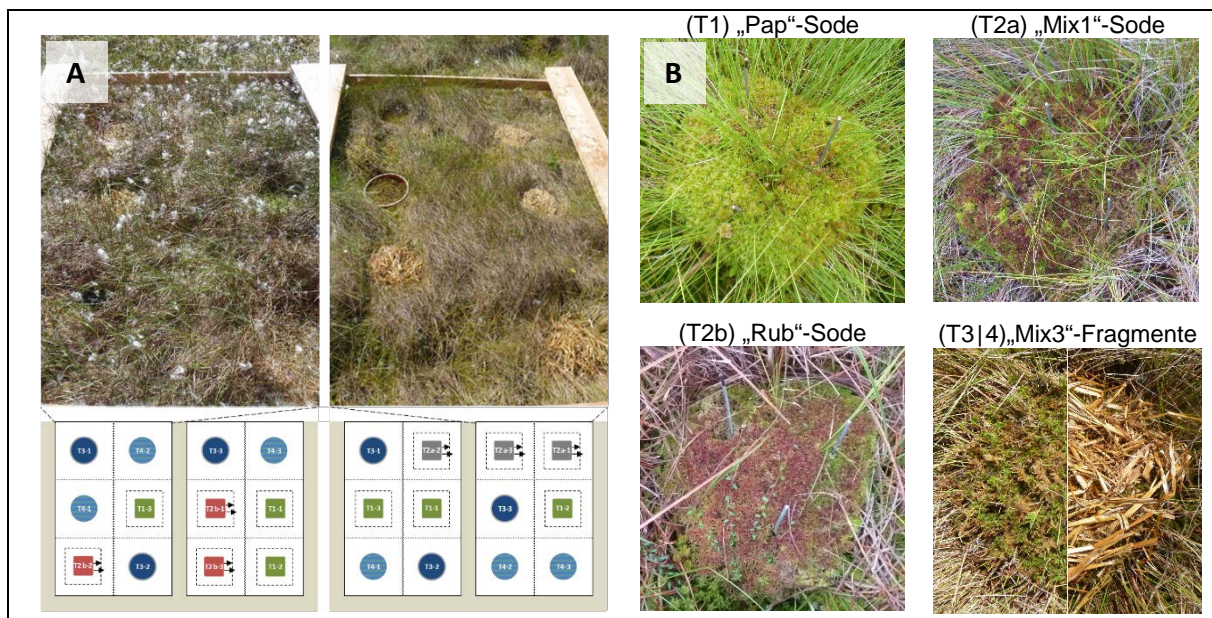


Abb. 3-11. (A) Experimentelle Anlage zur Erprobung und Entwicklung von Verfahren zur Etablierung von Bult-Torfmoosen auf verschiedenen in der Sukzession befindlichen Wiedervernässungsflächen (links: „Schmalbl. Wollgras-Fläche-I [B1]; rechts: „Wollgras-Torfmoos-Schwingrasen-I“ [A1]; untere Grafik: mit Soden beimpfte Stellen sind durch Rechtecke, mit Fragmenten beimpfte Bereiche sind durch Kreise gekennzeichnet; Pfeile kennzeichnen Bodenfeuchte-Probennehmer); und (B) Detailansichten von in dreifacher Wiederholung getesteten Ausbringungs-Varianten (Soden: „Pap“ = *S. papillosum* [grünes Rechteck]; „Mix1“ = gewachsene Moosmischung [graues Rechteck]; „Rub“ = *S. rubellum* [rotes Rechteck]; Fragmente: „Mix3“ = Moosmischung aus gezupften losen Einzelpflanzen; T3 = 200 g TM m⁻² [dunkelblauer Kreis]; T4 = 100 g TM m⁻² plus Strohschicht [hellblauer Kreis]).

Die Aufteilung von jeweils drei Wiederholungen einer Ausbringungsvariante erfolgte zufällig unter 12 Beimpfungsstellen innerhalb der Stege (Abb. 3-11). Dabei wurden die Soden und Fragmente in Abhängigkeit der vorhandenen Vegetationsstruktur in mehr oder weniger großer Entfernung zum aktuellen Wasserstand ausgebracht. Dennoch wurde versucht innerhalb eines Versuchsfelds möglichst vergleichbare Mikrostandorte zu beimpfen. Dies umfasste entweder Beimpfungsstellen auf oder am Rande von Horst-bildenden Gefäßpflanzen (auf überstauten Flächen), in offenen Lücken zwischen Gefäßpflanzen (bei rasiger Vegetation) sowie in dicht gewachsenen und ggf. flotierenden Torfmoos-Teppichen (bei Dominanz von

Schlenkentrifmoos). Vor Beimpfung der bestehenden Vegetation mit losen Fragmenten wurde zur Schaffung konkurrenzarmer Start-Bedingungen außerdem die oberirdische Biomasse der Gefäßpflanzen zurückgeschnitten. Das entnommene Pflanzenmaterial diente zugleich der Bestimmung der Produktivität der krautigen Vegetation (Gräser, Grasartige) zusammen mit aus den Transekt-Aufnahmeflächen entnommenen Biomasse (Anhang 4-5).

Weitere Experimente im Rahmen von Studierendenarbeiten

Zur besseren Einschätzung des Etablierungspotenzials sowie zur Optimierung von Ausbringungstechniken wurden im Rahmen von Bachelorarbeiten weitere experimentelle Feldversuche angelegt.

So konnten zusätzlich verschiedene Methoden zur Evaluierung des Etablierungserfolgs von Bulttorfmoosen getestet werden, indem der Einfluss abnehmender Wasserverfügbarkeit auf Vitalität, Photosynthesekapazität und Wachstum während trockener Sommermonate untersucht wurde (Brink, 2017; Heilscher 2017). Hierzu wurden von den im Zuge des Monitorings bereits charakterisierten Versuchsflächen vier verschiedene ausgewählt und Spendermaterial von aus dem Vorversuch verbliebenen Varianten ausgebracht (Anhang 3-1). Die verwendeten Soden wurden dabei sowohl ohne als auch mit einer zusätzlichen Substratunterlage verpflanzt, um mögliche Effekte auf den Etablierungserfolg in Abhängigkeit unterschiedlicher Standortbedingungen beurteilen zu können. Als mögliches Monitoring-Werkzeug für die Praxis sollte darüber hinaus herausgefunden werden, ob sich objektiv messbare Photosyntheseraten anstelle subjektiver Vitalitätsschätzungen zur Evaluation des Etablierungserfolgs eignen.

Außerdem beschäftigten sich zwei weitere Bachelorarbeiten mit dem Einfluss der Wasserfügbarkeit auf den Etablierungserfolg von Bulttorfmoosen, indem Mono- und Mischkulturen unterschiedlicher Artenzusammensetzung entlang eines Höhengradienten am Rande einer Wiedervernässungsfläche ausgebracht und Entfernung zum Wasserstand, Bodenfeuchte und Capitula-Wassergehalte mit dem Wachstum der Moosvarianten korreliert wurden (Rüsing 2018; Warnke 2018). Neben der Untersuchung von Interaktionen zwischen den in den Mischkulturen vertretenen Arten diente der Versuchsaufbau zudem der Ermittlung optimaler Ausbringungshöhen in Abhängigkeit von Arteigenschaften, Artenzusammensetzung und den abiotischen (Hydrologie, Porenwasserchemie) Standortbedingungen.

Zur Untersuchung möglicher Einflussfaktoren auf Methan- und Lachgasflüsse wurden im Rahmen einer weiteren Bachelor-Arbeit auf ausgewählten Wiedervernässungsflächen zudem die mit Fragmenten beimpften Bereiche sowie unbeimpfte Kontrollen mit Messequipment für die Datenerhebung ausgestattet (Voigt 2018).

3.3.2 Erfolgskontrollen

Fortlaufende Kontrollen (Abb. 3-12)

Zur vorläufigen Beurteilung des Etablierungserfolgs der in Sodenform ausgebrachten Bultorfmoos-Varianten (T1, T2a, T2b) wurden folgende (Wachstums-) Parameter erfasst.

1. Regelmäßige Messung der Sodenhöhe mithilfe einer abgewandelten Form der non-destruktiven „Cranked-Wire“ Methode (Clymo 1970), auch zur Dokumentation saisonaler Änderungen im Höhenwachstum.
2. Schätzung des Austrocknungsgrades anhand des prozentualen Verhältnisses von farbigen (vitalen) zu bleichen (inaktiven, leblosen) Pflanzenteilen. Zur Überprüfung der Methode konnte im Rahmen studentischer Abschlussarbeiten bestätigt werden, dass die tatsächliche Photosyntheseleistung der Moose mit der geschätzten Vitalität eng in Verbindung steht (Brink, 2017, Heilscher 2017).

Zur Bewertung des Etablierungserfolgs der als lose Fragmente ausgebrachten Varianten (T3, T4) wurde einmalig am Ende des dritten Jahres (30 Monate nach Ausbringung) die Anwesenheit überlebender Pflanzen festgestellt (ja/nein) und eine Wiederfindungsrate pro Fläche ermittelt (Anhang 4-6). Aufgrund der unterschiedlichen Ausbringungs- bzw. Wuchsform und teilweisen Strohbedeckung konnten anders als bei den Soden-Varianten keine fortlaufenden Höhenmessungen und Vitalitätsschätzungen vorgenommen werden.



Abb. 3-12. Angewandte Methoden zur Kontrolle des Etablierungserfolgs durch Erfassung des Zustandes der im Juni 2015 ausgebrachten Soden (v.l.n.r.: „Mix1“ auf Torfmoos-Wollgas-Schwingrasen-I [A2]; „Mix1“ auf Wollgas-Horst-Fläche-II [A4]; „Mix1“ auf Flatterbinsen-Fläche-I [A3]; „Rub“ auf Wollgas-Pfeifengras-Fläche [B5]) 26 Wochen (obere Reihe) und 56 Wochen (untere Reihe) nach Ausbringung in 0.15 m² großen Dauerquadraten um die Beimpfungsstellen.

Abschließende Erfolgskontrollen

Zur abschließenden Beurteilung des Etablierungserfolgs der in Sodenform ausgebrachten Varianten im Hinblick auf Biomassezuwachs bzw. –verlust wurden diese im November 2016 (78 Wochen nach Ausbringung) einmalig beprobt. Die destruktive Entnahme definierter Volumina an Biomasse erfolgte aus allen noch vorzufindenden Soden (insgesamt: n = 59; *S. papillosum*; n = 29; „Mix1“ & *S. rubellum*: jeweils n = 15) auf einer Fläche von genau 25 cm² mithilfe eines Stechzylinders. Darüber hinaus wurden zur Bestimmung des lateralen Flächenzuwachses (als non-destruktives Maß zur Beurteilung des Etablierungserfolgs) Schätzungen des Deckungsgrades der Soden herangezogen und mit der Ausgangsfläche zum Zeitpunkt der Ausbringung (18x18 cm = 324 cm² = 22% der Beimpfungsstelle) verrechnet. Hierzu wurde auf die im Zuge des vegetationskundlichen Monitorings in den Dauerbeobachtungsflächen jeweils zuletzt geschätzte Bultorfmoosdeckung zurückgegriffen (Abb. 3-12).

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Torfmoosvermehrung (Modul i)

4.1.1 Ergebnisse zum Vorversuch (Experiment 1, Zyklus I)

Alle untersuchten Moos-Varianten des Vorversuchs vermehrten sich mit zusätzlicher Überkopfbewässerung erfolgreicher als bei instabiler Staubewässerung, sofern das Spendermaterial vor Ausbringung nicht zerkleinert wurde (Abb. 4-1). Ohne Berücksichtigung der zerkleinerten Varianten bewirkte die Überkopfbewässerung im Vergleich zur instabilen Staubewässerung durchschnittlich einen um 71% höheren Biomassezuwachs. Im Mittel aller nicht zerkleinerten Varianten betrug der Biomasseertrag nach 18 Monaten 340 g Trockenmasse pro Quadratmeter, was einem relativen Biomassezuwachs um das 9-fache entspricht. Die Varianz im Biomassezuwachs war jedoch beachtlich (Tab. 4-1), die Vermehrungsrate variierte zwischen dem 4.6- (*S. rubellum*-F1-iA) und dem 16.3-fachen (*S. rubellum*-F2-iA+B).

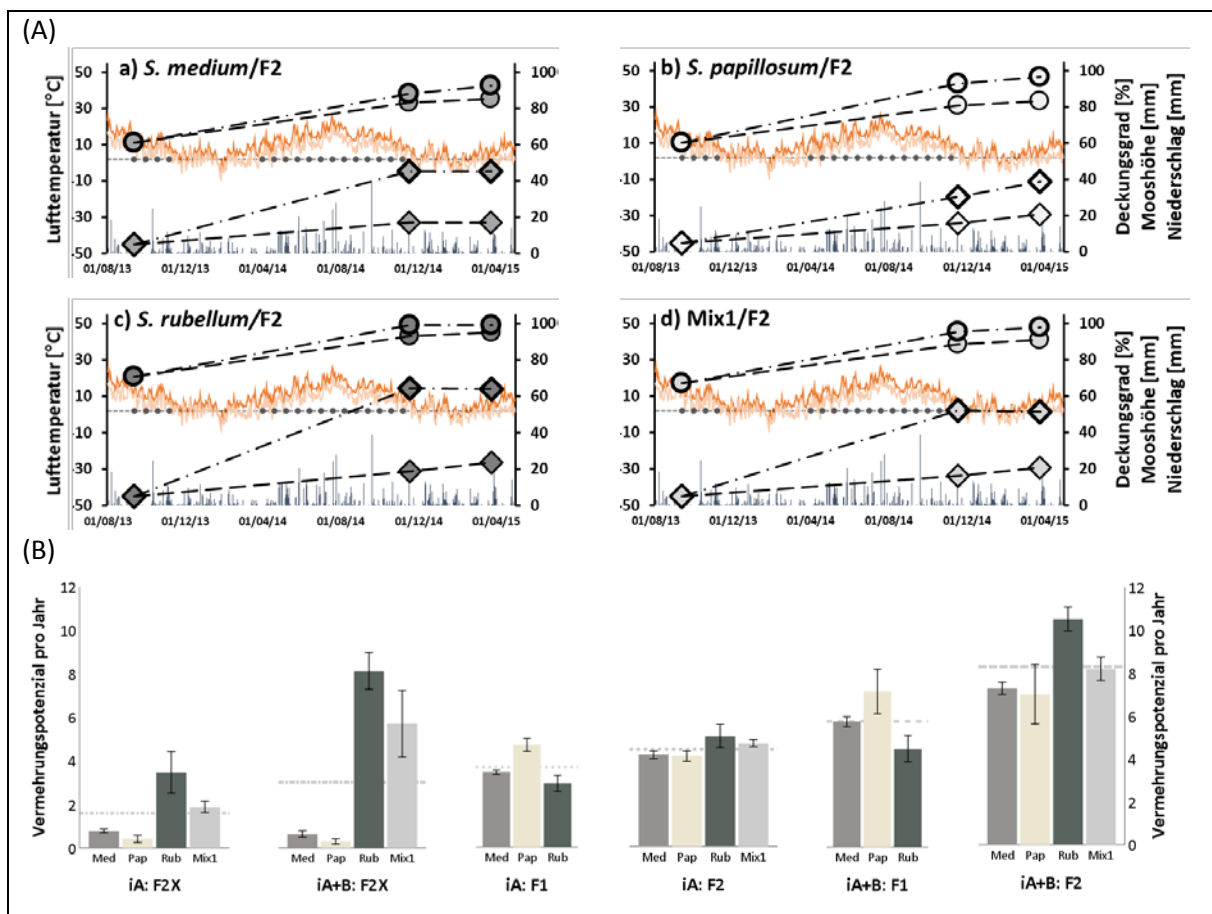


Abb. 4-1. Ergebnisse zur Torfmoosvermehrung des Vorversuchs. (A) Mittlere Moosdeckung (oberer Verlauf, Kreise) und Mooshöhe (unterer Verlauf, Rauten) von jeweils drei Replikaten der zweiten Generationen (F2) von (a) *Sphagnum medium*, (b) *S. papillosum*, (c) *S. rubellum* und (d) einer Moosmischung bei instabiler Stau- ohne (dünn) und mit (dick) zusätzlicher Überkopfbewässerung in Relation zum saisonalen Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag; und (B) mittleres jährliches Vermehrungspotenzial (\pm SE) aller getesteten Moosvarianten des Vorversuchs. Für Erläuterung von Abkürzungen der Moos- und Behandlungsvarianten siehe Tab. 3-1.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass – trotz gleicher Bewässerung – mit unterschiedlichen Moos- und Behandlungsvarianten sowohl sehr hohe Vermehrungsraten als auch ein Stillstand bzw. eine Abnahme der Ausgangsmenge (bis zu einer Halbierung) auftreten können. Fehlgeschlagene Vermehrungen waren jedoch ausschließlich bei vor Ausbringung zerkleinerten Varianten zu verzeichnen – mit Ausnahme der Art *S. rubellum*, welche trotz Zerkleinerung relativ hohe Vermehrungsraten hervorbrachte (ohne Zusatzberechnung um das 5.4-fache; mit Zusatzberechnung um das 12.5-fache, Tab. 4-1). Gleiches gilt für die ebenfalls mit ganzen und zerkleinerten Fragmenten erstellten Varianten einer Moosmischung, welche sich nach 18 Monaten wiederum größtenteils aus *S. rubellum* zusammensetzten.

Tab. 4-1. Ergebnisse zur Torfmoosvermehrung des Vorversuchs (Zyklus I) bei (A) instabiler Staubewässerung und (B) instabiler Stau- mit zusätzlicher Überkopfbewässerung. Abkürzungen: MD = Moosdeckung; MH = Mooshöhe; TM = Trockenmasse; VR = Vermehrungsrate (Vielfaches der Ausgangsbiomasse); -18 = nach 18 Monaten (März 2015); JNP = jährliche Nettoproduktivität; JVP = jährliches Vermehrungspotenzial; PAO = prozentuale Abweichung zum maximal erzielten JVP bei optimaler Wasserversorgung (= *). Für weitere Abkürzungen siehe Tab. 3-1.

Gen	Art	MD-18 [%]	MH-18 [cm]	TM-18 [g m ⁻²]	VR-18	JNP [g m ⁻² a ⁻¹]	JVP	PAO
iA: Instabiler Anstau (1–5 cm unter GOF)								
F1	Med	93 ±2	18 ±1	233 ±11	5.4 ±0.2	122 ±7	3.5 ±0.1	-53%
	Pap	92 ±6	22 ±2	223 ±24	7.3 ±0.8	124 ±15	4.7 ±0.5	-41%
	Rub	79 ±5	17 ±4	218 ±47	4.6 ±1.0	110 ±30	2.9 ±0.6	-72%
	iA: F1	88 ±8	19 ±3	224 ±28	5.7 ±1.4	119 ±19	3.7 ±0.9	-55%
F2	Med	85 ±3	17 ±3	244 ±18	6.6 ±0.5	134 ±12	4.3 ±0.3	-42%
	Pap	83 ±4	21 ±3	187 ±19	6.5 ±0.7	102 ±12	4.2 ±0.4	-48%
	Rub	95 ±5	19 ±7	337 ±62	7.9 ±1.5	190 ±40	5.1 ±0.9	-51%
Abb.	iA: F2	88 ±7	19 ±4	256 ±74	7.0 ±1.1	142 ±44	4.5 ±0.7	-47%
F2X	Med	68 ±12	9 ±0	35 ±6	1.2 ±0.2	4 ±4	0.8 ±0.1	-89%
	Pap	35 ±14	8 ±3	16 ±11	0.6 ±0.4	-6 ±7	0.4 ±0.3	-95%
	Rub	73 ±22	14 ±4	166 ±80	5.4 ±2.6	87 ±51	3.5 ±1.7	-67%
	iA: F2X	59 ±23	10 ±3	72 ±81	2.4 ±2.6	28 ±51	1.6 ±1.7	-84%
F2	Mix1	91 ±9	21 ±5	308 ±18	7.4 ±0.4	172 ±11	4.8 ±0.3	-42%
F2X	Mix1	58 ±3	10 ±2	82 ±20	2.9 ±0.7	35 ±13	1.9 ±0.4	-77%
iA+B: Instabiler Anstau (1–5 cm u. GOF) mit Überkopfbewässerung								
F1	Med	98 ±1	45 ±4	390 ±26	9.0 ±0.6	224 ±17	5.8 ±0.4	-21%
	Pap	99 ±1	38 ±6	339 ±84	11.1 ±2.8	199 ±55	7.2 ±1.8	-11%
	Rub	93 ±6	25 ±7	336 ±78	7.0 ±1.6	186 ±51	4.5 ±1.1	-57%
	iA+B: F1	97 ±4	36 ±10	355 ±65	9.0 ±2.4	203 ±42	5.8 ±1.6	-30%
F2	Med	92 ±5	45 ±4	418 ±28	11.3 ±0.7	246 ±18	7.3 ±0.5	0%*
	Pap	96 ±4	39 ±5	313 ±107	10.9 ±3.7	184 ±69	7.0 ±2.4	-13%
	Rub	99 ±1	64 ±5	693 ±64	16.3 ±1.5	420 ±41	10.5 ±1.0	0%*
	iA+B: F2	96 ±4	49 ±12	475±182	12.8 ±3.3	284 ±114	8.3 ±2.1	-4%
F2X	Med	56 ±19	8 ±1	28 ±11	1.0 ±0.4	0 ±7	0.6 ±0.3	-91%
	Pap	29 ±4	7 ±4	12 ±8	0.5 ±0.3	-9 ±5	0.3 ±0.2	-96%
	Rub	99 ±1	32 ±6	384 ±69	12.5 ±2.2	228 ±44	8.1 ±1.4	-23%
	iA+B: F2X	61 ±33	16 ±13	142±186	4.6 ±6.0	73 ±119	3.0 ±3.9	-70%
F2	Mix1	98 ±1	51 ±4	528 ±61	12.7 ±1.5	314 ±39	8.2 ±0.9	0%*
F2X	Mix1	96 ±3	26 ±5	246±115	8.8 ±4.1	141 ±74	5.7 ±2.6	-31%
Gesamt-Ø		82 ±22	25 ±16	261±175	7.1 ±4.5	146 ±110	4.6 ±2.9	-46%

4.1.2 Ergebnisse zur Vermehrung in Mischkultur (Experiment 2, Zyklus II.a-c)

Nach einer zum Vorversuch vergleichbaren Dauer des Zyklus II.a variierten die mittleren Biomasseerträge der Moosmischungen zwischen 479 g TM m² (Mix2, sA) und 616 g TM m² (Mix5, sA). Dies entspricht einer relativen Vervielfachung zwischen dem 10.5- (Mix3+5, sA+B) und 12.5-fachen (Mix4, sA+B) der Ausgangsbiomasse (Tab. 4-2). Bezogen auf eine angenommene jährliche Wachstumsperiode mit 325 Vegetationstagen (Tage mit Tagesmittel-Temperaturen von > 2° C; vgl. Gignac et al. 1991) war im Mittel aller Varianten das 7.5-fache der Ausgangsbiomasse festzustellen.

Wie beim Vorversuch zeichnete sich zu Beginn des Experiments (nach 6 Monaten) im Hinblick auf die Moosdeckung und –höhe zunächst ein positiver Effekt der Zusatzberegnung ab (Abb. 4-2). So betrug der mittlere Unterschied zwischen den fortlaufend untersuchten Bewässerungsvarianten des Zyklus II.a in dieser Phase + 4% beim Deckungsgrad und + 28% bei der Mooshöhe (Tab. 4-2). Nachdem eine geschlossene Moosdeckung erreicht wurde, verringerte sich jedoch der mittlere Vorsprung im Höhenzuwachs mit zunehmender Wachstumsdauer und die nicht zusätzlich beregneten Varianten hatten den anfänglichen Rückstand nach 12–18 Monaten nahezu aufgeholt (Abb. 4-2, Tab. 4-2).

Tab. 4-2. Ergebnisse zur Mischkultur-Vermehrung (Zyklus II.a) bei stabiler Wasserversorgung. Abkürzungen: sA = stabiler Anstau; sA+B = stabiler Anstau mit zusätzlicher Überkopfbewässerung; MD = Moosdeckung nach 6 Monaten; TM-G = Gesamt-Trockenmasse der Mischungen [g m⁻²]; VR-G = Vermehrungsrate der ganzen Mischungen; PA = prozentuale Abweichung von Werten der Varianten unter sA+B zu sA.

	MD [%]	Mooshöhe [mm]			TM-G /18M	VR-G /18M	Artspezifische VR/18M		
	/6M	/6M	/12M	/18M			Pap	Med	Rub
Mix2									
sA	88 ±1	18 ±1	29 ±2	70 ±3	479 ±53	11.0	11.1	11.0	NA
sA+B	93 ±1	23 ±2	37 ±3	76 ±3	482 ±86	11.1	13.1	9.7	NA
PA	+6%	+33%	+29%	+9%	+1%		+17%	-12%	NA
Mix3									
sA	91 ±2	18 ±3	32 ±2	68 ±1	549 ±29	11.0	12.6	13.0	8.6
sA+B	95 ±1	22 ±2	32 ±3	70 ±5	521 ±62	10.5	15.0	11.7	7.3
PA	+4%	+24%	+1%	+2%	-5%		+20%	-10%	-14%
Mix4									
sA	93 ±1	20 ±1	33 ±2	74 ±6	572 ±35	12.4	12.2	14.8	11.4
sA+B	97 ±1	23 ±4	36 ±4	79 ±6	575 ±33	12.5	12.3	13.5	12.3
PA	+4%	+16%	+10%	+7%	+1%		±0%	-8%	+7%
Mix5									
sA	95 ±1	17 ±2	33 ±2	73 ±7	616 ±75	10.7	NA	NA	10.5
sA+B	98 ±1	23 ±2	32 ±2	75 ±6	602 ±20	10.5	NA	NA	10.2
PA	+2%	+41%	-2%	+3%	-2%		NA	NA	-3%
Gesamt: Mix2-5									
sA	92 ±3	18 ±2	32 ±2	71 ±5	554 ±72	11.3	12.0	12.9	10.2
sA+B	96 ±2	23 ±2	34 ±4	75 ±6	545 ±68	11.1	13.5	11.6	9.9
PA	+4%	+28%	+6%	+6%	-2%		+12%	-10%	-3%

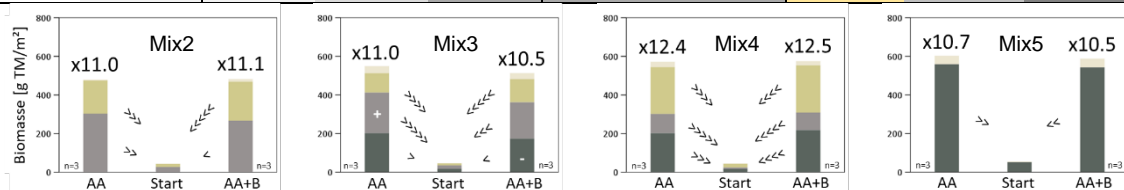


Abb.-Erläuterungen: beige = *S. papillosum* (Pap); mittelgrau = *S. medium* (Med); dunkelgrau = *S. rubellum* (Rub); hellgrau = sonstige Arten. VR-G = oberhalb Balken. Symbole für artspez. VR: > = < x10; >> = ≥ x10–x11; >>> = ≥ x11–x12; >>>> = ≥ x12–x13; >>>>> = ≥ x13. (+) = signifikante anteilige Zunahme bzw. (-) = signifikante anteilige Abnahme einer Art an der Gesamt-Trockenmasse im Vergleich zum jeweiligen Anteil an der Ausgangsbiomasse.

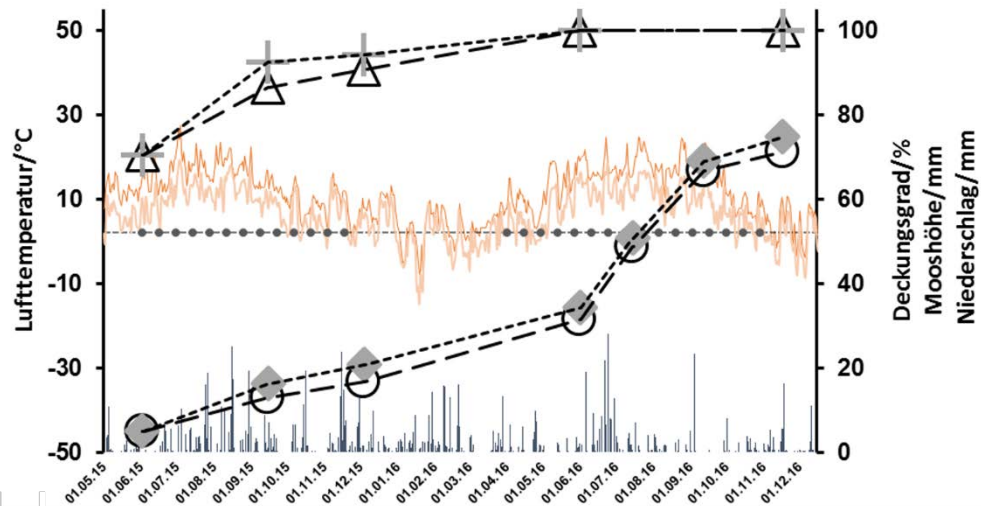


Abb. 4-2. Mittleres Wachstum der untersuchten Moosmischungen (Mix2–Mix5) bei stabilem Anstau mit (grau) und ohne (weiß) zusätzlicher Überkopfbewässerung im Zyklus II.a. Unterer Verlauf = Mooshöhe; oberer Verlauf = Moosdeckung. Lufttemperatur: dunkel = Tagesmittelwert; hell = Tagesstiefstwert. Niederschlagsbalken = Tagessumme; gepunktete Linie = Zeitraum mit aktivierter Zusatzbewässerung ($1 \text{ mm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$).

Da nur der Zuwachs der Varianten des Zyklus II.a in regelmäßigen Abständen dokumentiert werden konnte und die Varianten der Zyklen II.b und II.c bis zur Beprobung der Biomasse außerdem eine unterschiedlich lange Zyklusdauer durchliefen (Tab. 3-2), wurde anhand des relativen Biomassezuwachses und der Anzahl an Vegetationstagen (355 bzw. 578) das auf ein durchschnittliches Wachstumsjahr bezogene Vermehrungspotenzial berechnet, um die Varianten miteinander vergleichen zu können. Demnach ergeben sich interessanterweise für die meisten Mischungsvarianten sowohl mit einer zusätzlichen Strohbedeckung als auch mit einer nur im ersten Jahr aktivierten Überkopfbewässerung zwischen 7% (Mix5, sA+S) und 28% (Mix5, sA+b) höhere Vermehrungspotenziale im Vergleich zum jeweils höchsten Potenzial der Mischungen unter den Bewässerungen im Zyklus II.a (Anhang 4-2).

4.1.3 Ergebnisse zur Monokultur-Vermehrung (Experiment 3, Zyklus III)

Am Ende des dritten Vermehrungszyklus betrug der mittlere Biomasseertrag für alle Monokultur-Varianten 652 g TM m⁻² und variierte zwischen 456 (*S. medium*-sA+B) und 853 (*S. rubellum*-sA+B) g TM m⁻² (Tab. 4-3). Dies entspricht relativen Zuwächsen auf das 11- bzw. 8- und 14-fache der Ausgangsbiomasse, welche mit 60 g TM m⁻² für alle Varianten gleich gewählt wurde.

So stellte sich *S. rubellum* auch unter den hier getesteten dauerfeuchten Bedingungen - wie bei zusätzlicher Überkopfbewässerung des Vorversuchs (vgl. Tab. 4-1) - erneut als die vermehrungsstärkste Art heraus. Nach 5 Monaten (Anfang Oktober) hatten alle Bewässerungsvarianten dieser Art bereits einen Deckungsgrad von mehr als 95% erreicht. Die durchschnittliche Mooshöhe war zum gleichen Zeitpunkt für alle Varianten nahezu gleich (36–37 mm). Zum Zeitpunkt der Biomasse-Beprobung (etwa ein Jahr später nach insgesamt 18 Monaten) variierte die Mooshöhe zwischen 87 und 97 mm (Tab. 4-3).

Tab. 4-3. Ergebnisse zur Vermehrung von Monokulturen (Zyklus III) der Moosarten (i.) *S. medium*, (ii.) *S. papillosum* und (iii.) *S. rubellum* bei drei verschiedenen Bewässerungen (sA, sA+B, pA). Abkürzungen: TM = Trockenmasse nach 18 Monaten; VR = Vermehrungsrate nach 18 M.; JNP = Nettoproduktivität pro Jahr mit 325 Vegetationstagen (325T); JVP = Vermehrungspotenzial pro Jahr; PAO = prozentuale Abweichung vom maximal erzielten JVP bei optimaler Wasserversorgung (= *).

	Moosdeck. [%]		Mooshöhe [mm]			TM	VR	JNP	JVP	PAO
	6M	12M	6M	12M	18M	18M	18M	325T	325T	
sA: Stabiler Anstau (1–3 cm unter GOF)										
i. Med	89 ±2	93 ±2	29 ±3	34 ±2	73 ±8	585 ±114	9.8 ±1.9	356 ±78	6.7 ±1.3	-9%
ii. Pap	93 ±2	96 ±1	29 ±4	36 ±4	66 ±5	603 ±33	10.0 ±0.5	368 ±22	6.8 ±0.4	-16%
iii. Rub	97 ±1	99 ±0	37 ±4	45 ±6	93 ±13	785 ±103	13.1 ±1.7	492 ±70	8.9 ±1.2	-15%
i.–iii.	93 ±4	96 ±3	31 ±5	38 ±7	77 ±15	657 ±124	11.0 ±2.1	405 ±84	7.4 ±1.4	-13%
sA+B: Stabiler Anstau (1–3 cm u. GOF) mit Überkopfbewässerung										
i. Med	90 ±2	93 ±2	32 ±1	40 ±1	75 ±19	456 ±123	7.7 ±2.1	269 ±84	5.2 ±1.4	-29%
ii. Pap	94 ±2	98 ±1	33 ±3	44 ±3	87 ±7	716 ±59	11.9 ±1.0	445 ±40	8.1 ±0.7	0%*
iii. Rub	99 ±1	100 ±0	36 ±1	46 ±2	97 ±8	853 ±115	14.2 ±1.9	538 ±78	9.7 ±1.3	-8%
i.–iii.	94 ±4	97 ±3	34 ±3	43 ±3	86 ±14	675 ±196	11.3 ±3.3	417 ±133	7.6 ±2.2	-12%
pA: permanent hoher Anstau (1 cm unter GOF)										
i. Med	88 ±2	93 ±2	29 ±1	37 ±3	73 ±15	496 ±31	8.3 ±0.5	296 ±21	5.7 ±0.4	-23%
ii. Pap	94 ±1	97 ±0	32 ±2	42 ±2	83 ±5	652 ±22	10.8 ±0.4	402 ±15	7.3 ±0.2	-9%
iii. Rub	98 ±1	99 ±0	37 ±1	43 ±0	87 ±3	725 ±45	12.1 ±0.8	451 ±31	8.2 ±0.5	-22%
i.–iii.	93 ±4	96 ±3	33 ±3	40 ±3	81 ±10	624 ±105	10.4 ±1.7	383 ±71	7.1 ±1.2	-18%
Gesamt (sA, sA+B, pA)										
i. Med	89 ±2	93 ±2	30 ±2	37 ±3	74 ±13	512 ±110	8.6 ±1.7	307 ±70	5.8 ±1.2	-20%
ii. Pap	94 ±1	97 ±1	31 ±3	41 ±4	79 ±11	657 ±60	10.9 ±1.0	405 ±41	7.4 ±0.7	-8%
iii. Rub	98 ±1	100 ±0	37 ±2	45 ±4	92 ±9	788 ±98	13.1 ±1.7	494 ±67	8.9 ±1.1	-15%
i.–iii.	94 ±4	97 ±3	33 ±4	41 ±5	82 ±13	652 ±143	10.9 ±2.4	402 ±97	7.4 ±1.6	-14%

Die Art *S. papillosum* zeigte sich (wie *S. rubellum*) am produktivsten bei stabilem Anstau und zusätzlicher Überkopfbewässerung (sA+B). Nach 18 Monaten betrug hier der mittlere Biomasseertrag 716 g TM m⁻², was dem 12-fachen der Ausgangsbiomasse entspricht. Während *S. rubellum* bei gleicher Bewässerung (sA+B) sich durchschnittlich um das 14-fache vermehrte, war jedoch unter diesen Bedingungen für *S. medium* mit einem durchschnittlichen Zuwachs auf das 8-fache der Ausgangsbiomasse die insgesamt niedrigste, aber dennoch beachtliche Vermehrungsrate zu verzeichnen (Abb. 4-3).

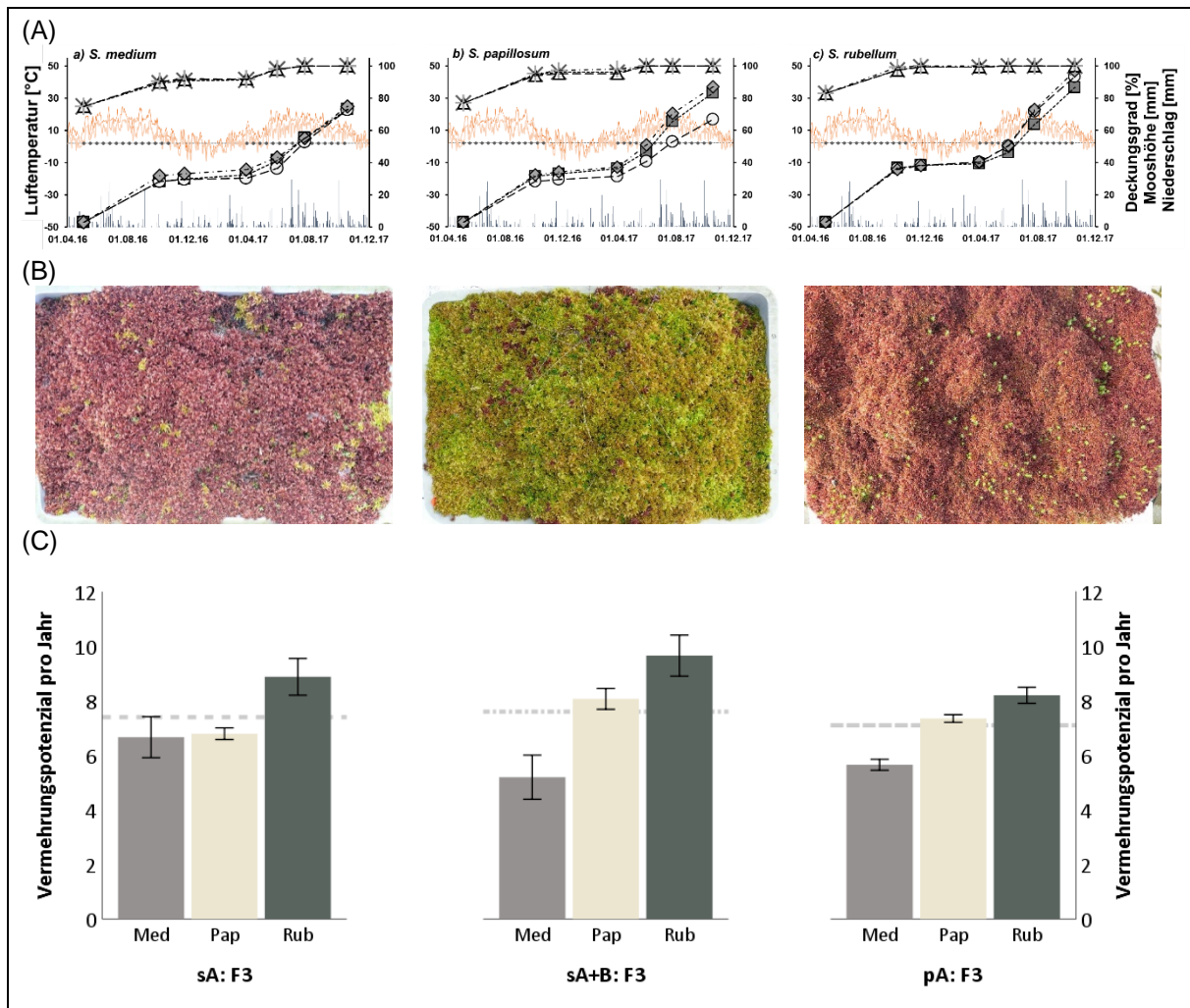


Abb. 4-3. Ergebnisse zur Monokultur-Vermehrung (Experiment 3, Zyklus III). (A) Mittlere Moosdeckung (oberer Verlauf) und Mooshöhe (unterer Verlauf) von je drei Replikaten der dritten Generationen (F3) von (a) *Sphagnum medium*, (b) *S. papillosum* und (c) *S. rubellum* bei stabiler Staubewässerung ohne (Kreis/Dreieck; sA) und mit zusätzlicher Überkopfbewässerung (Raute/+; sA+B) sowie kontinuierlich hohem Anstau (Quadrat/X; pA) in Relation zum saisonalen Verlauf von Lufttemperatur und Niederschlag; (B) Zustand der sA-Varianten im Oktober 2017 nach 18 Monaten der Vermehrung; und (C) mittlere jährliche Vermehrungspotenziale (± SE). Gestrichelte Linien kennzeichnen durchschnittliche Potenziale. Weitere Erläuterungen finden sich im Text.

4.1.4 Ergebnisse zur Simulation von Nass-Trocken-Zyklen (Experiment 4, Zyklus II.a.P2)

Unter den simulierten Bedingungen variierte der durchschnittliche relative Gesamt-Biomassezuwachs zwischen + 1-2% für die Acutifolia-Mischung (Mix5) bei instabiler Wasserversorgung (NT1/2, Tab. 4-4) und + 62% für die Sphagnum-Mischung (Mix2) unter verschiedenen Wasserversorgungsbedingungen (sA, NT1+B, Tab. 4-4).

Tab. 4-4. Ergebnisse zum Test auf Ansiedlungsfähigkeit durch Simulation von Nass-Trocken-Zyklen. Dargestellt sind mittlerer Höhen- (in mm) und Gesamtbiomasse-Zuwachs (absolut in g TM m⁻²; relativ in %) von je 3 Replikaten verschiedener Moosmischungen (Mix2–5: Anzucht im Zyklus II.a) sowie mittlere artspezifische relative Biomasse-Zuwächse (in %) der vertretenen Einzelarten (Med = *S. medium*; Pap = *S. papillosum*; Rub = *S. rubellum*; NA = nicht erfasst/ verfügbar) nach 20 Wochen (Jun.–Okt.) Behandlung mit (i–vi) vier verschiedenen Nass-Trocken-Zyklen (NT) sowie zwei Kontrollen (K). Für weitere Erläuterung der Bewässerungsvarianten siehe Tab. 3-4.

Bewässerung	Höhen- zuwachs [mm]	Gesamtbiomasse- Zuwachs [g TM m ⁻²]	Artspezifischer relativer Biomasse-Zuwachs				
			Med	Pap	Rub		
Mix2	sA	Start: 67 ±5	479 ±53				
	i: sA (K)	+ 23	+ 283 g	+ 62%	+ 39%	+ 109%	NA
	ii: NT1	+ 6	+ 254 g	+ 54%	+ 31%	+ 94%	NA
	iii: NT2	+ 17	+ 286 g	+ 60%	+ 72%	+ 50%	NA
	sA+B	Start: 73 ±8	482 ±86				
	iv: sA+B (K)	+ 28	+ 233 g	+ 50%	+ 69%	+ 16%	NA
	v: NT1+B	+ 9	+ 271 g	+ 62%	+ 63%	+ 62%	NA
vi: NT2+B	+ 8	+ 262 g	+ 56%	+ 63%	+ 92%	NA	
Mix3	sA	Start: 67 ±7	549 ±29				
	i: sA (K)	+ 33	+ 272 g	+ 50%	+ 45%	+ 66%	+ 77%
	ii: NT1	+ 14	+ 301 g	+ 56%	+ 57%	+ 103%	+ 56%
	iii: NT2	+ 8	+ 194 g	+ 36%	+ 22%	+ 95%	+ 44%
	sA+B	Start: 69 ±6	521 ±62				
	i: sA+B (K)	+ 24	+ 228 g	+ 45%	+ 58%	+ 80%	+ 40%
	ii: NT1+B	+ 9	+ 286 g	+ 57%	+ 104%	+ 69%	+ 31%
iii: NT2+B	+ 9	+ 231 g	+ 46%	+ 75%	+ 48%	+ 44%	
Mix4	sA	Start: 72 ±7	572 ±35				
	i: sA (K)	+ 23	+ 242 g	+ 42%	+ 44%	+ 32%	+ 74%
	ii: NT1	+ 8	+ 118 g	+ 29%	± 0%	+ 66%	+ 17%
	iii: NT2	+ 11	+ 229 g	+ 42%	- 12%	+ 90%	+ 27%
	sA+B	Start: 80 ±10	575 ±33				
	i: sA+B (K)	+ 21	+ 292 g	+ 50%	+ 3%	+ 115%	+ 16%
	ii: NT1+B	+ 17	+ 254 g	+ 45%	+ 19%	+ 81%	+ 44%
iii: NT2+B	+ 14	+ 303 g	+ 53%	+ 68%	+ 76%	+ 41%	
Mix5	sA	Start: 68 ±14	616 ±75				
	i: sA (K)	+ 15	+ 108 g	+ 18%	NA	NA	+ 18%
	ii: NT1	- 2	+ 14 g	+ 2%	NA	NA	+ 2%
	iii: NT2	+ 7	+ 5 g	+ 1%	NA	NA	+ 1%
	sA+B	Start: 72 ±10	602 ±20				
	i: sA+B (K)	+ 25	+ 216 g	+ 36%	NA	NA	+ 36%
	ii: NT1+B	- 5	+ 35 g	+ 6%	NA	NA	+ 6%
iii: NT2+B	+ 3	+ 168 g	+ 28%	NA	NA	+ 28%	

Bei periodischer Unterbrechung der Wasserversorgung von unten (NT-Varianten) waren insbesondere bei den artenreicheren Moosmischungen (Mix2-4) – im Gegensatz zur Acutifolia-Mischung „Mix5“, die neben *S. capillifolium* und *S. fimbriatum* überwiegend aus *S. rubellum* bestand – weiterhin hohe Biomasse-Zuwachsraten zu verzeichnen (bis zu 303 g TM m⁻², bzw. durchschnittlich + 50% in 20 Wochen, Tab. 4-4), ohne signifikante Verschiebungen in der Artenzusammensetzung (Anhang 6-5). Demnach besitzt insbesondere *S. rubellum* ein weit größeres Potenzial, sich erfolgreich auf Renaturierungsflächen mit fluktuierendem Wasserstand zu etablieren, wenn es nicht in Monokultur, sondern in Kombination mit *S. medium* und *S. papillosum* ausgebracht wird. Somit erscheint die Vermehrung von Bultorfmoosen in Mischkultur insbesondere im Hinblick auf eine erfolgreiche Etablierung und Einnischung der unter Optimal-Bedingungen produktivsten, aber im Freiland sensibelsten Art, ein vielversprechender Ansatz.

4.2 Ergebnisse des begleitenden Monitorings (Modul ii)

Die Ergebnisse der hydrologischen, biogeochemischen und vegetationskundlichen Charakterisierung der Flächen finden sich in der Tabelle 4-5 sowie im Anhang 4-4 und 4-5. Zudem sind einige Ergebnisse des Monitorings für ausgewählte Vergleichsgruppen in Anhang 4-6 zusammengefasst.

4.2.1 Ergebnisse des hydrologisches Monitorings

Im Zuge des hydrologischen Monitorings zeigte sich, dass die vorgenommene Gruppierung der Versuchsflächen auf Grundlage der während des zur Vorcharakterisierung gewählten Zeitraumes vorherrschenden Wasserstands-Amplituden nicht optimal war (siehe Tab. 3-5).

Tab. 4-5. Ergebnisse und Umfang des (I) hydrologischen, (II) biogeochemischen und (III) vegetationskundlichen Monitorings ab Einrichtung der Etablierungsexperimente (Juni 2015) mit Vergleich der Standortgruppen (A1–5 und B1–5). Abkürzungen/Erläuterungen: Wst. u. SB = mittlere Entfernung des Wasserstandes zur Sodenbasis (bezogen auf die mittlere Ausbringungshöhe aller 6 Soden-Replikate pro Fläche); Sommer 2015+2016 = Jun.–Nov.; Winter 2015/16 = Dez.–Mai; Wst.-Ampl. = Amplitude des Wasserstandes; k.M. = kein Monitoring.

VG	I. Hydrologisches Monitoring					II. Biogeochemie			III. Vegetation		
	Wst. u. SB Start	Mit. Wasserstand Sommer	Wasserstand Winter	Wasserstand Sommer	Wst.-Ampl.	Porenwasser		Torf	Transektkartierung		Soden-BS
	06/15	2015	15–16	2016	15–16	2015	2016	M/J	2015	2016	2016
A1	3	8	-8	10	41	Jun–Sep	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
A2	-1	4	-10	6	28	Sep ¹	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
A3	6	12	-1	21	44	Jun–Sep	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
A4	3	14	-8	17	59	k.M. ²	Apr–Okt ²	Sep/16 ²	Aug	Sep	Sep
A5	3	11	-2	18	57	k.M. ²	Apr–Okt ²	Sep/16 ²	Aug	Sep	Sep
A-Ø/% (Spanne)	3 (-1–6)	10 (4–14)	-6 (-10–1)	14 (6–21)	46 (28–59)	60%	100%	100%	100%	100%	100%
B1	5	12	-3	22	54	Jun–Sep	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
B2	2	8	-3	11	27	Jun–Sep	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
B3	26	27	13	36	58	k.M. ³	k.M.	k.M.	Aug	k.M. ³	Sep
B4	26	26	1	16	72	k.M. ³	k.M.	k.M.	Aug	k.M. ³	Sep
B5	17	27	9	34	56	Jun–Sep	Apr–Okt	Okt/15	Aug	Sep	Sep
B-Ø/% (Spanne)	15 (2–26)	20 (8–27)	3 (-3–13)	24 (11–36)	53 (27–72)	60%	60%	100%	100%	60%	100%

¹ = Beginn des Monitorings erst im September, wie NsM und MWM

² = kein Monitoring im ersten Jahr, Porenwasser ab April 2016, Torfbeprobung erst im September 2016

³ = durchgehend kein biogeochemisches Monitoring, da zu trocken. Zudem keine Transektkartierung 2016

Damit konnte eine gleichmäßige Verteilung der nur begrenzt verfügbaren Versuchseinheiten der zweiten Sodenvarianten (VG-A: Mix1; VG-B: Rub) auf die im Untersuchungsgebiet vorherrschenden hydrologischen Verhältnisse nicht wie geplant erreicht werden (Tab. 4-5, Abb. 4-4). Vor allem drei Versuchsflächen der Vergleichsgruppe B (B3, B4, B5), die neben *S. papillosum* (T1) mit *S. rubellum* (T2b) beimpft wurden, zeichneten sich bereits zum Zeitpunkt der Ausbringung durch deutlich trockenere Standortverhältnisse aus als die übrigen Flächen. In der Folge setzte sich diese Diskrepanz in den hydrologischen Verhältnissen zwischen den

Vergleichsgruppen fort, sodass die mittleren saisonalen Wasserstände (welche nur nachträglich anhand der durchschnittlichen Ausbringungshöhe aller auf einer Fläche ausgebrachten Soden berechnet werden konnten) auf den Flächen der Gruppe B durchschnittlich um 9-10 cm niedriger lagen als die auf den Flächen der Gruppe A (Tab. 4-5).

Die daraus resultierende schwierige Vergleichbarkeit des zu beobachtenden Etablierungserfolgs der jeweils zweiten Sodenvariante war daher bei der vergleichenden Analyse der Zuwachsraten in Abhängigkeit der Umweltdaten und den Prognosen zum Etablierungserfolg zu berücksichtigen (vgl. Tab. 4-7).

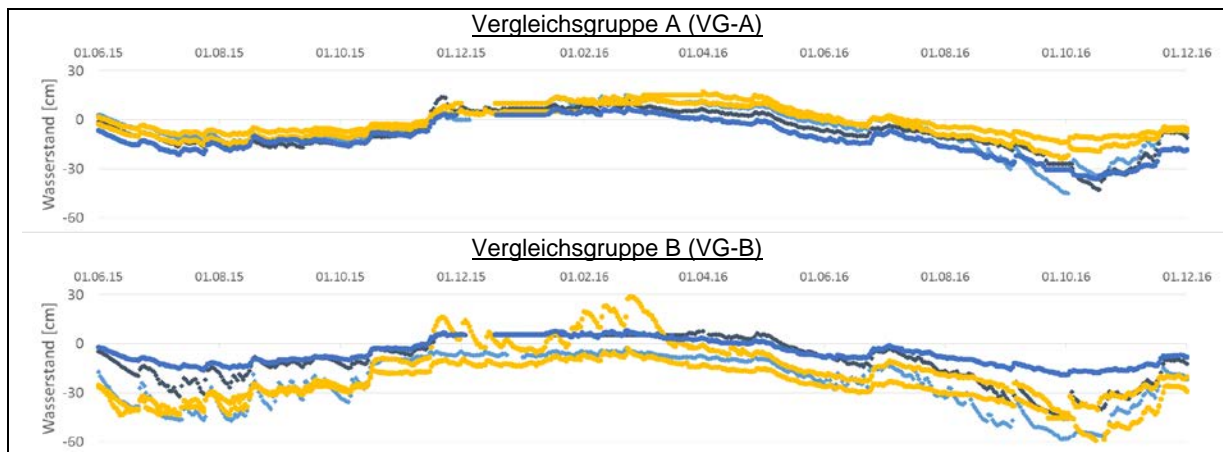


Abb. 4-4. Wasserstands-Ganglinien (mittlere Entfernung zur Sodenbasis) der im Vechtaer Moor gelegenen Versuchsfelder (aufgeteilt nach Vergleichsgruppen) ab Zeitpunkt der Ausbringung (Anfang Juni 2015) bis Ende der Etablierungsexperimente (Anfang Dezember 2016 mit Beprobung der Biomasse).

4.2.2 Ergebnisse des vegetationskundlichen Monitorings

Auf den in der Sukzession befindlichen Monitoringflächen variierte die durchschnittliche Deckung an Schlenkentangmoosen in den Transekt-Aufnahmeflächen im ersten Jahr zwischen 15% und 91%, und die der Gefäßpflanzen zwischen 20% und 88%. Nachdem im zweiten Jahr nur noch die Flächen mit den größten Erfolgsaussichten erneut kartiert wurden, variierten die entsprechenden Deckungen zwischen 35% und 95% bzw. zwischen 11% und 77% (Anhang 4-5).

Die zur Beurteilung des Etablierungserfolgs erstmals im September 2016 um die Soden-Beimpfungsstellen herum geschätzte Gefäßpflanzen-Deckung variierte zwischen 21% und 71% und die der Schlenkentangmoose zwischen 2% und 57%, während die im Vorjahr eingebrachten Bultorfmoos-Soden zwischen 10% und 47% bedeckten. Entsprechend einer für alle Soden zugrunde gelegten Anfangsdeckung von 22% ergab sich eine Veränderung zwischen -12% und +25% nach 18 Monaten.

4.2.3 Ergebnisse des biogeochemischen Monitorings

Die für eine Vermehrung und Etablierung von Bultorfmoosen wichtigsten Ergebnisse der im Zeitraum von 2013 bis 2017 durchgeführten Wasseranalysen sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Eine tabellarische Übersicht der Wasserqualitäten des für die Torfmoosvermehrung eingesetzten Bewässerungswassers und des Porenwassers auf den für die Etablierungsexperimente ausgewählten Flächen findet sich zudem im Anhang 4-3. Weitere im Zuge des biogeochemischen Monitorings erhobene Umweltdaten sind darüber hinaus in Anhang 4-4 und Anhang 4-6 zusammengefasst.

Wasserqualitäten

Verglichen mit den bereits vereinzelt im Rahmen des Vorversuchs durchgeführten Qualitätskontrollen lagen die Werte des im Zeitraum von 2015 bis 2017 gesammelten Regenwassers weitgehend im selben unbedenklichen Bereich (Abb. 4-5). Im Vergleich mit einer externen Referenzfläche (auf der nach einer winterlichen Überstauphase keine vitalen Moose wiedergefunden wurden) erscheinen insbesondere folgende Parameter entscheidend: Calcium-Gehalte von $< 15 \text{ mg/l}$, DOC-Gehalte $< 20 \text{ mg/l}$ (Anhang 4-3). Lediglich zu Beginn ergaben sich infolge einer Beimischung von aus dem Moor entnommen Oberflächenwasser und anschließender Aufkonzentration infolge starker Verdunstung zeitweise deutliche Überschreitungen der in Tabelle 4-6 zusammengefassten Richtwerte, besonders im Hinblick auf die Konzentration der Basen-Kationen (Abb. 4-5; Anhang 4-3). Gleichwohl zeigen die Vermehrungsraten, dass die Qualitäten des zur Tischvermehrung eingesetzten Bewässerungswassers durch zunehmende Verdünnung mit im weiteren Verlauf eingespeistem Regenwasser mit pH-Werten zwischen 5.9 und 7.3 und parallelen Werten der elektrischen Leitfähigkeiten zwischen 83 und $135 \mu\text{S cm}^{-1}$ grundsätzlich als geeignet eingestuft werden können. Vergleichbares gilt für die Qualität des Porenwassers erfolgreicher Etablierungsversuche sowie des in der Freiland-Vermehrung eingesetzten Oberflächenwassers, die hinsichtlich elektrischer Leitfähigkeit Werte zwischen 67 und $118 \mu\text{S cm}^{-1}$ aufwiesen, während die pH-Werte zwischen 4.0 und 5.4 lagen (Anhang 4-6). Demnach erscheint es vor allem im Freiland als sehr wahrscheinlich, dass neben sommerlichem Trockenstress insbesondere Überstauwasser mit höheren Gehalten an Basen-Kationen sowie gelöstem organischem Kohlenstoff einen negativen Effekt auf das Mooswachstum bzw. den Etablierungserfolg ausübt (vgl. Harpenslager et al. 2015).

Tab. 4-6. Abgeleitete Richtwerte wasserchemischer Parameter zur Beurteilung der Eignung von Wasserqualitäten für die Torfmoosvermehrung.

Abkürzungen/Symbole: DOC = gelöster organischer Kohlenstoff; OW = Oberflächenwasser, * = über Dachfläche gesammelt ; ** = bei Überkopfbewässerung (mit stärker mineralisiertem Wasser infolge z.B. Beimischung, Staubeinträgen und Aufkonzentration; *** = Moor-Oberflächenwasser, wenn ebenfalls erhöht mineralhaltig und/oder starker Trübung (DOC).

Parameter	Potenziell geeignet	Probleme wahrscheinlich
pH (Regenwasser*, Tisch-Anstau)	5.9 bis 7.3	> 7.3 (bei Überkopfbewässerung**)
pH (Freiland-Anstau***)	4.1 bis 5.4	> 5.4 (bei Überstau mit OW***)
Elektr. Leitfähigkeit [$\mu\text{S/cm}$]	< 135 (zeitweise bis 330)	> 150 (dauerhaft)
Calcium [mg/l]	< 15 (zeitweise bis 35)	> 15 (dauerhaft)
Magnesium [mg/l]	< 3 (zeitweise bis 9)	> 5 (dauerhaft)
Natrium [mg/l]	< 10 (zeitweise bis 30)	> 15 (dauerhaft)
Kalium [mg/l]	< 3 (zeitweise bis 13)	> 6 (dauerhaft)
Phosphat [mg/l]	< 0.5 (zeitweise bis 2)	> 1 (dauerhaft)
Nitrat [mg/l]	< 1.5 (zeitweise bis 4)	> 4 (zeitweise toleriert)
Ammonium [mg/l]	< 1 (zeitweise bis 3)	> 3 (zeitweise toleriert)
DOC [mg/l]	< 15 (ideal $< 5^{**}$)	> 20 (zeitweise bis 30 toleriert)

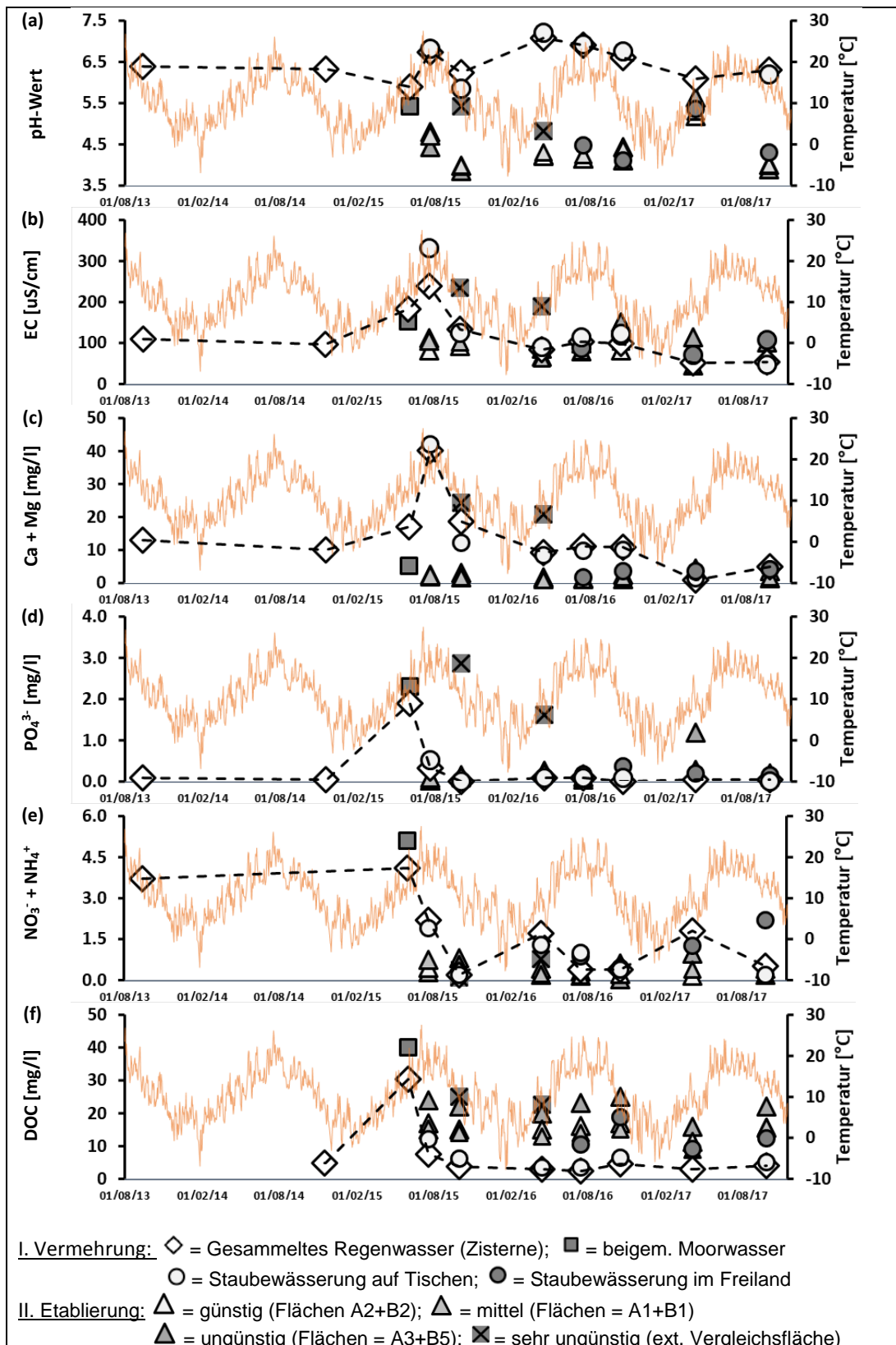


Abb. 4-5. Ergebnisse zum Monitoring der Qualitäten des Bewässerungs- (I. Torfmoosvermehrung) und Porenwassers (II. Etablierungsexperimente). Dargestellt sind Mittelwerte (von 1 bis 6 Replikaten) ausgewählter wasserchemischer Parameter (a: pH-Wert; b: elektr. Leitfähigkeit; c: Summe von Calcium- und Magnesium-Gehalt; d: Phosphat-Gehalt; e: Summe von Nitrat- und Ammonium-Gehalt; f: Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoff) in Relation zum saisonalen Verlauf der Lufttemperatur im Zeitraum von Aug. 2013 bis Nov. 2017. Für weitere Ergebnisse siehe Anhang 4-3.

4.3 Ergebnisse der Etablierungsexperimente (Modul iii)

4.3.1 Etablierungserfolg

Sodenausbringung - fortlaufende Kontrollen des Höhenzuwachses

Bereits im Zuge der fortlaufenden Kontrollen des Höhenzuwachses (sowie der Vitalitätsschätzungen) der in Sodenform ausgebrachten Varianten war festzustellen (Abb. 4-6), dass *S. papillosum* im gruppeninternen Vergleich - trotz geringerer Ausbringungsmenge (vgl. Tab. 3-6) - durchschnittlich deutlich höhere Zuwächse aufweist (Gruppe A: +3 cm; Gruppe B: +1.2 cm nach jeweils 78 Wochen) als die Moosmischung auf den Flächen der Gruppe A (+1.5 cm) und *S. rubellum* auf den Flächen der Gruppe B (-2.7 cm). Weiterhin war festzustellen, dass trotz der destruktiven Entnahme von Biomasse im November 2016 im darauffolgenden Jahr (bis Woche 122) in den meisten Fällen sich jeweils eine Fortsetzung des vorherigen Trends abzeichnet (Abb. 4-6).

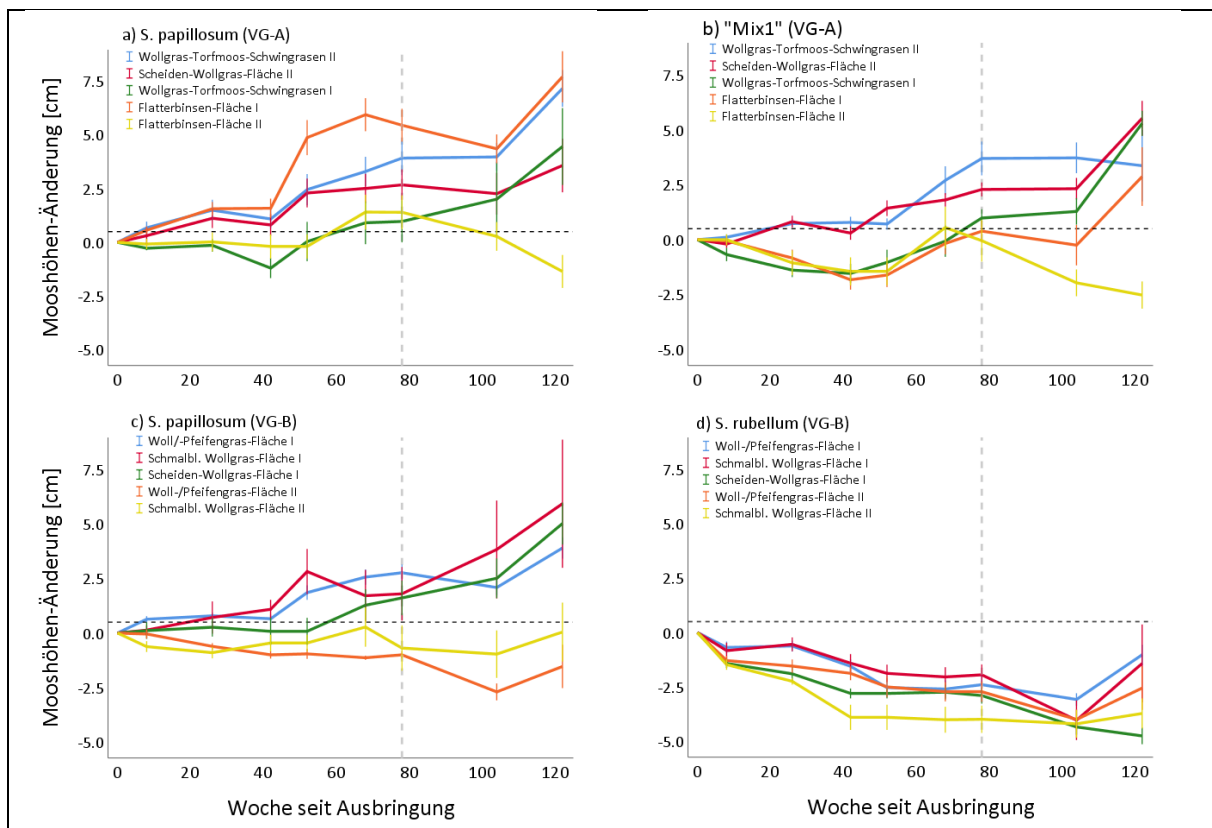


Abb. 4-6. Ergebnisse des Monitorings der Mooshöhen-Änderung von in Sodenform transplantierten Butlortorfmossen (Mittelwerte \pm SE von drei Replikaten pro Fläche) seit Ausbringung (Woche 0 entspricht Anfang Juni 2015) in ausgewählten Renaturierungsflächen im Vechtaer Moor unterteilt nach Vergleichsgruppe und Sodenvariante (VG-A: 5 Flächen beimpft mit (a) *S. papillosum* und (b) Moosmischung „Mix1“; VG-B: 5 Flächen beimpft mit (c) *S. papillosum* und (d) *S. rubellum*). Die horizontale gestrichelte Linie zeigt die Grenze für positiven Höhenzuwachs an (= 0.5 cm). Die gestrichelte vertikale Linie kennzeichnet das vorläufige Ende der Etablierungsexperimente zum Zeitpunkt der Biomasse-Beprobung (78 Wochen nach Ausbringung, Anfang Dezember 2016).

Sodenausbringung - abschließende Erfolgskontrolle

Die nach 78 Wochen im Zuge einer vorläufig abschließenden Erfolgskontrolle ermittelten Erfolgsquoten der Sodenvarianten in Bezug auf Überschreitung eines jeweils definierten positiven Höhen-, Flächen- und Biomassezuwachses sind in Tabelle 4-7 zusammengefasst.

Tab. 4-7. (I.) Erfolgsquoten (definiert als prozentualer Anteil ausgebrachter Soden mit positivem Zuwachs [i. %-Fälle > 5 mm; ii./iii. %-Fälle > 10%] im Vergleich zum mittleren Ausgangswert der Varianten [vgl. Tab. 3-6 u. 4-1]) zur Etablierung von Bulttorfmoosen (A: *Sphagnum papillosum*; B: Moosmischung „Mix1“; C: *S. rubellum*) 18 Monate nach der Ausbringung (06/2015–11/2016) und (II.) abgeleitete hydrologische Richtwerte aus dem begleitenden Monitoring (vgl. Anhang 4-7).

	I. Erfolgsquoten			II. Hydrologische Richtwerte		
	Gruppe A [n=15]	Gruppe B [n=14]	Gesamt [n=29]	Wasserstand unter Sodenbasis [cm]		
(A) <i>S. papillosum</i>				NW	MW	HW
i. pos. Höhen-Z.	80%	57%	69%	60 ^{n.s.}	20*	-27*
ii. pos. Flächen-Z.	53%	21%	38%	39**	11**	-25 ^{n.s.}
iii. pos. Biomasse-Z.	73%	43%	59%	43*	13**	-25*
Spanne	53–80%	21–57%	38–69%	43–39	20–11	-25–27
(B) Moosmischung	[n=15]	[n=15] ¹	[n=30] ²	NW	MW	HW
i. pos. Höhen-Z.	73%	47%	60%	50 ^{n.s.}	10*	-20 ^{n.s.}
ii. pos. Flächen-Z.	47%	33%	40%	45 ^{n.s.}	8*	-20 ^{n.s.}
iii. pos. Biomasse-Z.	33%	13%	23%	20 ^{n.s.}	0**	-22*
Spanne	33–73%	13–47%	23–60%	<50	10–0	-22
(C) <i>S. rubellum</i>	[n=15] ¹	[n=15]	[n=30] ²	NW	MW	HW
i. pos. Höhen-Z.	20%	0%	10%	15 ^{n.s.}	5 ^{n.s.}	>-12*
ii. pos. Flächen-Z.	20%	7%	13%	<15*	<5*	>-12*
iii. pos. Biomasse-Z.	13%	0%	7%	15 ^{n.s.}	5 ^{n.s.}	-10 ^{n.s.}
Spanne	13–20%	0–7%	7–13%	<15	<5	>-12

Auf den Versuchsflächen der Gruppe A, die mit *S. papillosum* und der Moosmischung „Mix1“ beimpft worden waren, waren für die erste Variante in 53% bis 80% und für die zweite in 33% bis 73% der untersuchten Fälle Etablierungserfolge festzustellen. Durch Übertragung der auf den Flächen der Gruppe B ermittelten hydrologischen Grenzwerte für *S. rubellum* auf die hydrologischen Verhältnisse der Gruppe A wäre für *S. rubellum* allein wiederum nur in 13% bis 20% der Fälle ein Etablierungserfolg zu erwarten gewesen.

Auf den Versuchsflächen der Gruppe B, die neben *S. papillosum* mit *S. rubellum* beimpft wurden, verlief die Etablierung der ersten Variante in 21% bis 57% der Fälle erfolgreich während für zweite lediglich in einem Fall (7%) ein positiver lateraler Flächenzuwachs zu verzeichnen war. Unter der Annahme, dass die Moosmischung anstelle von *S. rubellum* auf diesen Flächen ausgebracht worden wäre, hätte man vielmehr in 13% bis 47% der Fälle mit einem Etablierungserfolg rechnen können.

Werden nun die Erfolgsquoten beider Vergleichsgruppen zusammengefasst, ist für *S. papillosum* in 38% bis 69% aller Fälle ein Etablierungserfolg festzustellen. Bezieht man für die beiden anderen Varianten die abgeleiteten Werte des potenziellen Etablierungserfolgs auf den Flächen der jeweils fehlenden Gruppe mit ein, wären im Zuge einer vollständigen Ausstattung der Etablierungsexperimente bei der Moosmischung in 23% bis 60% und bei *S. rubellum* in 7% bis 13% der Fälle potenziell ein Etablierungserfolg zu verzeichnen gewesen.

Als vorläufiges Ergebnis der Etablierungsexperimente ist somit festzustellen, dass in Abhängigkeit der hydrologischen Standortbedingungen, der Moosvariante sowie der zugrunde gelegten Messmethode zur Bestimmung des Etablierungserfolgs potenziell 7% bis 69% der im Projektgebiet ausgewählten Beimpfungsstellen für eine Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen als geeignet eingestuft werden können.

Fragmentausbringung - Etablierungs- bzw. Wiederfindungsrate

Nach 30 Monaten konnten in den Fragment-Beimpfungsstellen der Variante „T3“ (Ausbringungsmenge = 200 g TM m⁻²) in 60% (in 18 von 30 Fällen) und bei „T4“ (100 g TM m⁻² plus Strohbdeckung) wiederum in 47% (14 von 30) der Fälle überlebende Pflanzen wiedergefunden werden (Anhang 4-6).

4.3.2 Charakterisierung günstiger Standorte / Hydrologische Richtwerte

Sodenausbringung - Hydrologische Richtwerte

Neben den Erfolgsquoten sind in Tabelle 4-7 auch hydrologische Richtwerte dargestellt. Die Werte wurden mittels linearer bzw. polynomialer Regressionen der erfassten Wachstumsraten in Abhängigkeit der im Rahmen des hydrologischen Monitorings erhobenen Wasserstandsdaten abgeleitet (Anhang 4-7).

Als Richtwerte für Etablierungserfolge mit *S. papillosum* konnten Entfernungen der Sodenbasis von kleiner 20 bis 11 cm zum mittleren Wasserstand und kleiner 43 bis 39 zum Niedrigstwasserstand, sowie bis zu einem maximalen Überstau von 25 bis 27 cm innerhalb eines Zeitraums von 18 Monaten noch positive Zuwächse ermittelt werden. Im Hinblick auf die Moosmischung waren Etablierungserfolge wiederum bei Entfernungen der Sodenbasis von kleiner 10 bis 0 cm zum mittleren Wasserstand und kleiner 50 cm zum Niedrigstwasserstand festzustellen. Der maximal tolerierte Überstau lag hier bei 22 cm. Für das anspruchsvolle Moos *S. rubellum*, das unter den Optimal-Bedingungen auf den Tischen die höchsten Vermehrungsraten erreicht (vgl. Kapitel 4.1) aber am stärksten unter Wasserstress leidet, ergaben sich als Richtwerte für den Etablierungserfolg wie erwartet die mit Abstand geringsten Entfernungen zur Sodenbasis mit kleiner 5 cm zum mittleren Wasserstand und kleiner 15 zum Niedrigstwasserstand sowie ein maximaler Überstau von nur 12 cm.

Sodenausbringung - Charakterisierung günstiger Standortbedingungen

Zusammenfassend lassen sich Flächen mit guten Voraussetzungen zur erfolgreichen Etablierung wie folgt charakterisieren (Anhang 4-6).

Auf den Flächen mit dem größten Etablierungserfolg innerhalb der Gruppe A betrug die mittlere Entfernung der Sodenbasis zum Wasserstand zwischen 3 und 5 cm. Zudem hatten Schlenkentangmoose und Gefäßpflanzen in den Beimpfungsstellen durchschnittlich einen Deckungsanteil zwischen 25% und 31% bzw. zwischen 38% und 44% (Anhang 4-6). Unter diesen Bedingungen war 18 Monate nach der Einbringung für *S. papillosum* in 78% bis 89% und für die Moosmischungen in 56% bis 89% der Fälle ein Etablierungserfolg feststellbar. Während auf zwei weiteren Flächen der Gruppe A mit Flatterbinsen-Dominanz ebenfalls Etablierungserfolge für *S. papillosum* im Hinblick auf Höhen- und Biomassezuwachs festgestellt wurden, beschränkten sich Erfolge mit der Moosmischung ausschließlich auf den Höhenzuwachs. Hier lag nicht nur der mittlere Wasserstand um bis zu 8 cm tiefer, sondern auch die Gefäßpflanzen bedeckten durchschnittlich mehr und Schlenkentangmoose deutlich weniger Fläche. Die durchschnittliche Gefäßpflanzen-Deckung betrug zwischen 52% und

56%. Zudem waren diese Flächen durch die vergleichsweise höchsten Deckungen an Gefäßpflanzen-Streu gekennzeichnet.

Innerhalb der Gruppe B wiesen wiederum nur zwei Flächen im Hinblick auf *S. papillosum* vergleichbar hohe Etablierungserfolge auf (zwischen 60% und 100%) wie Soden der gleichen Art auf den Flächen der Gruppe A. Zudem war für *S. rubellum* nur in einem Fall ein positiver Flächenzuwachs festzustellen. Bei mittleren Entfernungen zum Wasserstand von etwa 10 cm hatten die eingebrachten Soden-Varianten hier durchschnittlich einen Deckungsanteil von 31% (*S. papillosum*) bzw. 20% (*S. rubellum*), während für Schlenkendorfmoosee eine durchschnittliche Deckung von 34% (um *S. papillosum*) bzw. 45% (um *S. rubellum*) und für Gefäßpflanzen Werte von 23% bzw. 33% dokumentiert wurden. Auf den übrigen Flächen der Gruppe B, die bei mittleren Entfernungen der Sodenbasis zum Wasserstand von mehr als 20 cm nicht nur durch die mit Abstand ungünstigsten hydrologischen Verhältnisse, sondern auch durch die höchsten Gefäßpflanzen-Deckungen (> 60%) gekennzeichnet waren, konnte für *S. papillosum* ein Etablierungserfolg im Hinblick auf Höhen- und Biomassezuwachs in 33% bzw. 22% der untersuchten Fälle verzeichnet werden, während die Ausbringung von *S. rubellum* Soden keinerlei Etablierungserfolg mit sich brachte.

5. Diskussion

A: Inwieweit wurden die verfolgten Ziele erreicht?

Die Etablierungsexperimente haben gezeigt, dass eine Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen als Schlüsselarten zur Aktivierung der Hochmoor-Regeneration unter heutigen Rahmenbedingungen (v.a. die eutrophierte Agrarlandschaft, erhöhte Nährstoffdeposition und geringe Verfügbarkeit von Spenderpopulationen) grundsätzlich möglich ist. Hierzu erscheint die Vermehrung von Bulttorfmoosen in Artenmischungen unter kontrollierten Bedingungen vielversprechend, insbesondere im Hinblick auf eine erfolgreiche Etablierung und Einnischung sensibler Arten unter zunächst suboptimalen Freiland-Bedingungen. Im Zuge der über die Dauer der ersten zwei Projektjahre dokumentierten Untersuchungen mit begleitendem Monitoring liegen umfassende vegetationskundliche, hydrologische und biogeochemische Flächen-Charakterisierungen vor, die zukünftig für die Einschätzung von Etablierungschancen auf Flächen vergleichbarer Sukzessionsstadien herangezogen werden können. Darüber hinaus konnte dokumentiert werden, welche Flächen im Projektgebiet - und damit auch eine Vielzahl vergleichbarer Standorte - für großflächige Wiederansiedlungsmaßnahmen geeignet sind bzw. welche zusätzlichen Maßnahmen unterstützend durchzuführen wären.

Bislang nur unvollständig erreicht werden konnte die Untersuchung der Auswirkung der Wiederherstellung einer hochmoortypischen Vegetation auf die Emissionen des wichtigen Treibhausgases Methan. Ebenso noch unklar ist, inwiefern durch die Ansiedlung von Bulttorfmoosen und hochmoortypischer Vegetation eine echte Kohlenstoffsinkenfunktion und ein Torfwachstum der Standorte wieder erreicht werden kann. Dies liegt insbesondere daran, dass gegenwärtig noch nicht auf ausreichend großer Flächen im Gelände eine Wiederansiedlung umgesetzt werden konnte. Somit wurde auch das Ziel eines Etablierungsversuches auf der Ebene einer gesamten Wiedervernässungsfläche noch nicht erreicht, vor allem mangels ausreichendem Spendermaterial und der bisher erfolgten Untersuchung verschiedener Ausbringungsvarianten im kleinen Maßstab. Die flächige Wiederansiedlung und die Auswirkungen auf die Treibhausgasflüsse sollen jedoch nun gezielt im nachfolgenden Projekt untersucht werden.

B: Woraus ergeben sich Abweichungen der erhaltenen Ergebnisse (aufgetretene Probleme, Veränderungen bezüglich Strategie oder angewandter Methoden)?

Als wichtiger Faktor, der den Umfang der erhaltenen Ergebnisse beeinflusste, stellte sich der Konflikt zwischen der wissenschaftlichen Fundierung und dem daraus resultierenden erheblichen Messaufwand (statistische Datensicherheit, systematische Versuchsanlage) auf der einen Seite und der Vielzahl an möglichen Verfahren und Varianten, sowie Einschränkungen bei der praktischen Umsetzung auf der anderen Seite dar. So sollten im Projekt nicht nur verschiedene Verfahren erprobt, sondern zudem für die Weiterentwicklung vollständig und zusammenhängend, wissenschaftlich fundiert dokumentiert werden. Das Spannungsfeld zwischen wissenschaftlich systematischem, im Rahmen einer Dissertation zu veröffentlichenden Daten und dem breit angelegten, ganzheitlichen Ansatz erlaubte einen erheblichen Ausgestaltungsspielraum, führte das Team aber wiederholt an die Grenzen der Kapazitäten. Art und Umfang erforderlicher Maßnahmen und Messungen wurden daher wiederholt angepasst und häufig die Tiefe der Messung aufgrund der größeren Zahl an Varianten auf das nötige Maß eingeschränkt. Aufgrund der begrenzten Kapazitäten bei der Bearbeitung dieses breiten Ansatzes konnte die Auswertung der umfangreich erhobenen wissenschaftlichen Daten leider bislang nicht wie beabsichtigt vorangetrieben werden. Durch die wiederholte Anpassung der Vorgehensweise stellte uns die Auswertung der Vermehrungsexperimente auch teilweise vor größere Herausforderungen in Bezug auf die jeweilige Vergleichbarkeit der Experimente. Einschränkungen in der Praxis (Platz, Wasserverfügbarkeit, Arbeitseinsatz, Flächenbeschaffenheiten) waren hier häufige Faktoren.

Für nachfolgende Arbeiten wird daher eine Strategie zu entwickeln sein, die Experimente konzentriert und fokussiert zu bearbeiten, so dass einheitliche Daten und Kapazitäten für die Datenbearbeitung geschaffen werden. Durch eine strukturierte Betreuung mit regelmäßigen Berichten über den Fortgang der Auswertung soll dies weiter unterstützt werden.

Veränderungen der angewandten Methoden bei der Vermehrung

Aufgrund schlechter Erfahrungen während des Vorversuchs wurde im weiteren Verlauf des Projekts auf eine Zerkleinerung der Moospflanzen vor Ausbringung vollständig verzichtet. Die Erkenntnisse aus der Literatur erschienen unter den hier gegebenen Bedingungen also als wenig erfolgversprechend (Quinty & Rochefort, 2003). Stattdessen wurden die aus i.d.R. artenreinen, geschlossenen Moosdecken gezupften Pflanzen sorgfältig vereinzelt, um eine gleichmäßige Ausbringung der Fragmente mit gutem Kontakt zum unterliegenden Substrat einerseits (Schipperges & Rydin, 1998) sowie bei der Zusammenstellung von Moosmischungen homogene Replikate andererseits zu erzielen. Der Erfolg dieser Vorgehensweise ist in den Daten klar zu erkennen. Beispielsweise mussten aufgrund der unerwarteten Erfolge der Torfmoosvermehrung zwei Tische bereits im Frühjahr 2016 geräumt werden.

Da infolge der Anlage von Freilandvermehrungsfeldern keine Kapazitäten mehr für die beispielhafte Beimpfung der aussichtsreichsten Flächen zur Etablierung im größeren Maßstab vorhanden waren, wurde der Fokus dieses Projekts in Richtung der Vermehrung verschoben und die Etablierung trat aus Kapazitätsgründen etwas zurück. So konnten weitere Varianten der Vermehrung systematisch und wissenschaftlich verwertbar getestet werden. Als besonders interessant aufgrund der schwankenden Wasserverfügbarkeiten stellten sich die neu angelegten Versuche zur Simulation von Nass-Trocken-Zyklen heraus. Zum Ende des Projekts wurden somit in dem erstellten Leitfaden ausschließlich Handlungsempfehlungen zur Torfmoosvermehrung dargelegt. Für die Erstellung eines Leitfadens zur Freilandetablierung lagen noch nicht ausreichende Kenntnisse vor. Dies soll im nachfolgenden Projekt jedoch Schwerpunkt sein.

Aufgetretene Probleme bei den Etablierungsexperimenten

Nachdem die für März 2015 angesetzten Stegbaumaßnahmen sich verzögerten, verschob sich die Ausbringung der Versuchsvarianten auf Anfang Juni. Aufgrund der während dieser zweimonatigen Verspätungen gesunkenen Wasserstände waren die Moose vor allem auf trockenen Flächen bereits zu Beginn starkem Trockenstress ausgesetzt. Auf anderen Flächen, wo sich die Moose zu Beginn - infolge der nach Möglichkeit wasserstandsnahen Ausbringung - über den ersten Sommer zunächst vielversprechender entwickelten, waren diese wiederum im darauffolgenden Winter zu hoch überstaut und zudem stärker ungeeignete Wasserqualitäten und Konkurrenz mit Gefäßpflanzen ausgesetzt. Diese Schwierigkeiten zeigen deutlich die Wichtigkeit der hydrologischen Bedingungen im Freiland bei der Etablierung; Vermehrungsanlagen sind hingegen auf konstante Bedingungen optimiert. Für nachfolgende Arbeiten wurde daher in dem neuen Projektantrag besonderes Augenmerk auf die Etablierungsexperimente bei verschiedenen Wasserständen und Abständen zum Wasserspiegel gelegt.

Die kleinflächige Ausbringung war zudem mit einigen Einschränkungen verbunden bezüglich vorläufiger Beurteilung des Erfolges (Höhenmessungen und Vitalitätsschätzungen). Die teils ungünstigen Ausbringungszeitpunkte (Trockenheit) schafften weitere Probleme und die Identifizierung aussichtsreicher Flächen war letztendlich erst nach destruktiver Entnahme zum Ende der zweiten Vegetationsperiode möglich. Insgesamt erscheint der günstige Ausbringungszeitpunkt sowohl flächenabhängig als auch witterungsabhängig.

Für eine bessere Einschätzung des Erfolges der Etablierungsvarianten erschien auch eine Objektivierung der Vitalitätsschätzungen mittels Messung von Capitula-Wassergehalten und Photosyntheseraten sinnvoll, die jedoch Mehrarbeit bedeutete.

Die Ausbringung der Bulttorfmoose mit einer zusätzlichen Substratunterlage (mit dem Ziel einer Optimierung der Wasserversorgung) erbrachte auch keine Veränderung des Etablierungserfolgs (Brink 2017; Heilscher 2017). Vielmehr bestätigte sich, dass eine erfolgreiche Wiederansiedlung vor allem auf älteren Flächen mit ausreichend hoher Wasserverfügbarkeit und bereits weitgehend stabilen hydrologischen Verhältnissen erfolgversprechend ist. Da besonders aus Sicht von Praktikern idealerweise Maßnahmen so früh wie möglich durchzuführen wären, ergibt sich hieraus ein gewisses Spannungsfeld. Neben ausreichend hoher Wasserverfügbarkeit während trockener Sommermonate war vor allem auf jüngeren Flächen der winterliche Überstau problematisch und macht zusätzliche Maßnahmen erforderlich.

C: Wie gestaltete sich die Arbeit mit den unterschiedlichen Kooperationspartnern (Institute, Firmen, Kommunen, Länder)?

Mit der Gramoflor GmbH & Co. KG als Projektpartner vor Ort waren die Rahmenbedingungen für die Durchführung eines solchen Projektes besonders günstig. Neben seinem Wissen und seiner langjährigen Erfahrung stellte das Unternehmen die logistischen Rahmenbedingungen für die Vermehrung von Spendermaterial und der Herrichtung von Flächen im Freiland. So konnte auf einen Maschinenpark mit moortauglichen Geräten und Fahrzeugen sowie bei Bedarf auch auf unterstützendes Personal zurückgegriffen werden. Derartige Unterstützung wäre in einem Forschungsprojekt sonst nur mit erheblichem finanziellen Mehraufwand zu stemmen. Insbesondere auch bei den nachträglichen Änderungen zur Anpassung an die tatsächlichen Gegebenheiten, Entwicklungen und Erfordernisse wurde gemeinsam nach den idealen Lösungswegen gesucht.

Zudem waren zusätzliche Eigenleistungen notwendig, da die Sicherstellung der Verfügbarkeit von Spendermaterial lokaler Herkunft als Grundvoraussetzung für die Durchführbarkeit zukünftiger Maßnahmen angesehen wurde. Da sich die zur Verfügung stehenden Sach- und Personalmittel im ersten Jahr bereits an der Einrichtung der Vermehrungsanlage sowie der Etablierungsexperimente erschöpften, wurde zur Erreichung des ursprünglich angestrebten Ziels (Leitfaden zur Etablierung) zunehmend versucht studentische Abschlussarbeiten mit einzubinden. Darüber hinaus wurden zusätzliche Eigenleistungen von Gramoflor erbracht.

Obwohl auch die Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Torfmoosvermehrung als Leitfaden aufgrund der zum Teil schwer auszuwertenden Vermehrungsexperimente sich als komplizierter und umfangreicher herausstellte als erwartet, war das erhaltene Feedback nach Fertigstellung von allen Seiten durchweg äußerst positiv.

6. Öffentlichkeitsarbeit

D: Wie werden die Ergebnisse veröffentlicht?

Neben Darstellungen von Zielen und Fortschritten des Projekts auf den Webseiten der Projektpartner wurden erste Ergebnisse zur Etablierung und Vermehrung als Poster- oder Vortrags-Beiträge auf verschiedenen Fachtagungen (u.a. auf den Jahreshauptversammlungen der European Geoscience Union 2016 und 2018 in Wien, dem Symposium on the Biology of Sphagnum 2016 in Khanty-Mansiysk, sowie der Jahrestagung des Netzwerks Renaturierung 2018 in Münster) präsentiert sowie eine Zusammenfassung im Dezember 2018 als Aufsatz in der Zeitschrift TELMA veröffentlicht (Raabe et al. 2018).

Schon während der gesamten Projektlaufzeit wurde ein offener und überregionaler Austausch mit Praktikern und Akteuren des Moorschutzes und der Hochmoorrenaturierung, anderen Forschungsprojekten, Instituten und Wissenschaftlern geführt, um Wissen, Erfahrungen, Forschungsziele und Forschungsergebnisse abzugleichen. Parallel wurde das Projekt bei verschiedenen Gelegenheiten sowohl der lokalen Öffentlichkeit als auch politischen Akteuren und betroffenen Behörden sowie in den grünen Branchen Gartenbau und Landwirtschaft, vorgestellt.

Nach Abschluss der zur Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Bulttorfmoosvermehrung erforderlichen Absicherung der Ergebnisse, wurden die insbesondere für Akteure im Moorschutz und in der Hochmoorrenaturierung als relevant eingestuften Erkenntnisse in Form eines Leitfadens gebündelt und mithilfe der Deutschen Bundesstiftung für Umwelt im März 2019 als Broschüre veröffentlicht (Hölzel et al. 2019).

Für einen praxisnahen Wissenstransfer wird in Zukunft in Zusammenarbeit mit Akteuren, wie z.B. der DGMT (Deutsche Gesellschaft für Moor- und Torfkunde), GfÖ (Gesellschaft für Ökologie), IAVS (International Association for Vegetation Science) u.a., eine Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen weiterer Tagungen und Exkursionen angestrebt. Auf der diesjährigen Tagung der GfÖ in Münster wird es zwei Themenschwerpunkte im Bereich Moore/Renaturierung geben und es wird eine Exkursion zu den Versuchsflächen angeboten. Durch diese und weitere Tagungen soll der Übergang in die Praxis initiiert werden. Darüber hinaus sind wissenschaftliche Fachpublikationen, auch im Rahmen der angestrebten Promotion von Herrn Peter Raabe, in Vorbereitung.

E: Wer partizipiert an den Ergebnissen?

Der Leitfaden zur Vermehrung von Bulttorfmoosen richtet sich vor allem an Praktiker und Akteure im Moorschutz und in der Hochmoorrenaturierung. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden so für einen breiten Interessentenkreis zugänglich gemacht und können auch auf andere Vorhaben übertragen werden. Wenngleich für den Übergang in die Praxis nicht zu vernachlässigen ist, mit welchem Aufwand der Erfolg erreicht wurde.

Eine Übersetzung des Leitfadens zur Vermehrung der Bulttorfmoose in die englische Sprache wurde bereits mehrfach angefragt, um auch interessierte Praktiker und Wissenschaftler im Ausland zu erreichen. Für die wissenschaftlich zu publizierenden Ergebnisse erwarten wir aufgrund des Umfangs und der Untersuchungstiefe ein großes Interesse des internationalen Fachpublikums.

F: Wird das Vorhaben über die Projektlaufzeit weitergeführt?

Die bislang erarbeiteten Grundlagen und Erfahrungen bilden eine außerordentlich günstige Ausgangslage für die Weiterentwicklung von Verfahren zur Vermehrung und Etablierung von Bulttorfmoosen unter Praxisbedingungen.

Sowohl zur erfolgreichen Wiederansiedlung eines möglichst vollständigen Spektrums an hochmoortypischer Vegetation mittels in der gängigen Renaturierungspraxis umsetzbaren Maßnahmen als auch zur Weiterentwicklung zusätzlich durchzuführender Maßnahmen bieten die bislang erarbeiteten Grundlagen vielfältige Anknüpfungspunkte. Diese werden im Zuge des am 1.01.2019 gestarteten Projekts „Aktivierung der Hochmoorregeneration durch Ansiedlung von Bulttorfmoosen“, kurz „AktiMoos“, DBU AZ 34436/01, aufgegriffen. Unter Nutzung der bislang erfolgreich erprobten Vermehrungsstrategie zur Gewinnung von lebender Moosbiomasse und vorhandener Infrastrukturen (eingerichtete Versuchsflächen) werden dabei vor allem Ansiedlungsstrategien (weiter)entwickelt und auf ihre Umsetzbarkeit und Effektivität unter Praxisbedingungen untersucht. Insbesondere die im Ober-Unterfeld-Verfahren abgebauten und noch verhältnismäßig jungen Flächen erscheinen im vertretbaren Umfang und mit guten Aussichten geeignet, Bulttorfmoose wieder anzusiedeln.

7. Fazit

G: Hat sich die Vorgehensweise bewährt (evtl. veränderte Lösungsansätze, Ideen ...)?

Der breite, ganzheitlich orientierte Projektansatz und die zunehmende Fokussierung auf Lösungsansätze zur Absicherung von Erkenntnissen für die Erstellung eines Leitfadens zur Bultorfmoosvermehrung brachten ein Aufgabenspektrum mit, welches in dieser Breite im Vorfeld nicht absehbar war. Dabei profitierte das Vorhaben von den unterschiedlichen Wissens- und Erfahrungsgrundlagen der Kooperationspartner aus Wissenschaft, Wirtschaft und Naturschutz, ihrer verschiedenen Herangehens- und Arbeitsweise und den jeweils vorhandenen Ressourcen und Arbeitsmitteln. Gleichzeitig sorgten eben diese grundsätzlich bereichernden Unterschiede für ein mitunter schwieriges Spannungsfeld zwischen Wissenschaft und Praxis, welches allen Beteiligten einiges an zusätzlichem, über den geplanten und budgetierten Rahmen hinausgehendes Engagement abverlangte, um den Anforderungen der Wissenschaft einerseits und der Praxis andererseits gerecht werden und die gesetzten Projektziele mit den verfügbaren Mittel erreichen zu können.

Nachdem die unerwartet schnellen Erfolge bei der Tischvermehrung eine Fortsetzung der Vermehrungsversuche im Freiland sinnvoll erscheinen ließen und aus finanziellen und räumlichen Gründen auch erforderlich machten, entschied sich das Projektteam, die Optimierung der Torfmoosvermehrung konsequent in den Vordergrund zu rücken. Somit mussten die teilweise bereits angelegten Etablierungsexperimente zwar zurückgestellt werden, jedoch konnten die Erkenntnisse zur Bultorfmoosvermehrung abgesichert und mit ihrer Veröffentlichung in Form eines praxistauglichen Handlungsleitfadens ein wertvoller Beitrag zur Optimierung der heutigen Renaturierungspraxis geleistet werden.

Für die Fortsetzung der Forschungszusammenarbeit wurden die Aufgabenverteilungen und Verantwortlichkeiten klarer strukturiert und kommuniziert, auch der regelmäßige persönliche Austausch der Partner ist sinnvoll, um die jeweiligen Vorstellungen und Erwartungen immer wieder abzugleichen und die Projektziele nicht aus den Augen zu verlieren.

H: Werden Änderungen der Zielsetzung notwendig?

a. Im Hinblick auf Vermehrung unter optimalen Bedingungen

Die getestete Bultorfmoosvermehrung auf Tischen hat sich als besonders geeignet erwiesen, um unter kontrollierten Bedingungen schon in kurzer Zeit von zwei bis drei Jahren beachtliche Erfolge in der Vermehrung von sehr begrenzt verfügbaren Diasporen zu erzielen. Als schwierig stellten sich dabei jedoch der hohe Wasserverbrauch und der große Platzbedarf dar.

Bei der Vermehrung von Torfmoosen zu Renaturierungszwecken sind hingegen nicht zwangsläufig maximale Vermehrungsraten bzw. eine hohe Biomasse-Produktivität unter optimalen Bedingungen entscheidend, sondern die langfristigen Aussichten auf Etablierungserfolg unter den im Freiland tatsächlich vorherrschenden Bedingungen (Gunnarsson & Söderström, 2007). So können bei einer weniger auf Zeit und Ertrag ausgerichteten Vermehrung sowie geringerer Wasserverfügbarkeit bzw. belasteten Wasservorräten auch langsamere Wachstumsraten zum Ziel führen, d. h. kompaktere Wuchsform und größere Anpassbarkeit an ungünstige Standortbedingungen (Taylor & Price, 2015). Eine Vermehrungsanlage im Freiland, wie im Projekt entwickelt, ist zwar schwieriger zu kontrollieren, erscheint im Hinblick auf die Produktion größerer Mengen an Spendermaterial

aber als vielversprechendere Variante, eine sorgfältige Standortauswahl im Moor vorausgesetzt.

b. Im Hinblick auf Etablierung unter Praxisbedingungen bzw. frühestmögliche Ansiedlung

Da aus Sicht von Praktikern Zweifel an der Übertragbarkeit der ausschließlich auf älteren Sukzessionsstadien getesteten Etablierungsverfahren und somit der Praxisrelevanz bestehen, soll im Rahmen des Projekts AktiMoos u. a. genauer untersucht werden, ob und welche zusätzlichen Maßnahmen auf jungen, i. d. R. landwirtschaftlich vorgenutzten Flächen ergriffen werden können (Schmatzler, 2012), um eine Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen so früh wie möglich bzw. bereits parallel zum Torfabbau erfolgreich zu initiieren. Das von Gramoflor entwickelte Ober-Unterfeld-Verfahren, bei dem Wiedervernässungsmaßnahmen und die Etablierung moortypischer Vegetation bereits während des Torfabbaus erfolgen, bietet hierfür eine ideale Grundlage. Ziel ist die Entwicklung von Wiederansiedlungsmaßnahmen unter Praxisbedingungen, wobei gerade im Hinblick auf die noch nicht abzuschätzenden Folgen des Klimawandels eine höchstmögliche Resilienz der Pflanzen gegenüber Phasen mit ungünstigen Bedingungen anzustreben ist (Waddington et al. 2015).

Neben den bestehenden Unsicherheiten, ob und welche Maßnahmen auf jungen Flächen ergriffen werden müssen, um eine Wiederansiedlung zu initiieren, fehlen Kenntnisse, inwiefern solche unterstützenden Verfahren nachträglich bei bereits begonnener Renaturierung implementiert werden können.

I. Allgemeines Fazit

Durch die erzielten Erfolge in der Vermehrung bestehen heute deutlich verbesserte Rahmenbedingungen, um die Renaturierung von Hochmooren voran zu bringen und zu beschleunigen und somit nicht nur einen größeren Beitrag zum Moorschutz, sondern durch die Schaffung von CO₂-Senken auch zum Klimaschutz leisten zu können (LLUR, 2012).

Weitere Forschungen zur Entwicklung von Verfahren und Techniken zur Ausbringung und Etablierung hochmoortypischer Vegetation im größeren Maßstab sind nun notwendig und wichtig. Doch nicht vergessen werden darf, dass trotz des großen Flächenpotentials allein in Niedersachsen der Zugriff auf diese teilweise schwierig und die Verfügbarkeit daher sehr begrenzt ist (Caspers, 2015). Ferner fehlt es an finanziellen Mitteln für Forschungsleistungen, Flächenerwerb und Maßnahmen zur praktischen Umsetzung sowie der notwendigen politischen Unterstützung. Die Entwicklung langfristig wieder wachsender Hochmoore ist aus natur- und Klimaschutzfachlicher Sicht von großer Bedeutung, für eine Umsetzung in relevanter Größenordnung müssen jedoch noch wichtige Rahmenbedingungen erfüllt werden.

8. Literatur

- Agethen, S. & Knorr, K.-H. (2018): *Juncus effusus* mono-stands in restored cutover peat bogs – Analysis of litter quality, controls of anaerobic decomposition, and the risk of secondary carbon loss. *Soil Biology and Biochemistry* 117, 139–152.
- Breeuwer, A., Heijmans, M.P.D., Robroek, B.J.M. & Berendse, F. (2008): The effect of temperature on growth and competition between *Sphagnum* species. *Oecologia* 156(1): 155–167.
- Brink, L.-K. (2017): Etablierung von Bultorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren - Einfluss von Wasserstress auf Mooswachstum und -vitalität. Münster.
- Broll, G. & Erber C. (2000): Skript zum bodenkundlichen und bodenökologischen Laborpraktikum. Aktualisierte Fassung 2007 unter Mitarbeit von Berning-Mader, U., Malkus, A., Supper, M., Tappe, M. & T. Tritscher. Institut für Landschaftsökologie. Münster.
- Caspers, G. (2015): Potenziale zur Realisierung des Natur- und Klimaschutzes in niedersächsischen Mooren. TELMA Beiheft 5: 159–182. Hannover.
- Clymo R.S. (1970): The growth of *Sphagnum*: Methods of Measurement. *Journal of Ecology* 58(1): 13–49.
- Couwenberg, J. & Joosten, H. (2001): Bilanzen um Moorverlust - Das Beispiel Deutschland. In: Succow, M. & Joosten, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*. Schweizerbart, Stuttgart, 409–411.
- Couwenberg, J. & Joosten, H. (2005). Self-organization in raised bog patterning: the origin of microtope zonation and mesotope diversity. *Journal of Ecology* 93: 1238-1248.
- Drachenfels, O. v. (2011): Kartierschlüssel für Biotoptypen in Niedersachsen unter besonderer Berücksichtigung der gesetzlich geschützten Biotope sowie der Lebensraumtypen von Anhang I der FHH-Richtlinie, Stand März 2011. *Naturschutz Landschaftspf. Niedersachs. Heft A/4*: 1-326. Hannover.
- Edom, F. (2001). Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht (chorische Betrachtung). In: Succow, M. & Joosten, H. (Hrsg.): *Landschaftsökologische Moorkunde*, Schweizerbart, Stuttgart, 185–228.
- Frenzel, P. & Rudolph, J. (1998). Methane emission from a wetland plant: the role of CH₄ oxidation in *Eriophorum*. *Plant and Soil* 202(1): 27–32.
- Frolking, S. & Roulet, N.T. (2007): Holocene radiative forcing impact of northern peatland carbon accumulation and methane emissions. *Global Change Biol.* 13(5): 1079–1088.
- Gaudig G., Fengler F., Krebs M., Prager A., Schulz J., Wichmann S. & Joosten H. (2014). *Sphagnum* farming in Germany – a review of progress. *Mires and Peat* 13 (2013/14): 1–11.
- Genet, H., Oberbauer, S.F., Colby, S.J., Staudhammer, C.L. & Starr, G. (2013): Growth responses of *Sphagnum* hollows to a growing season lengthening manipulation in Alaskan Arctic tundra. *Polar Biol* 36(1): 41–50.
- Gignac, L.D., Vitt, D.H. & Bayley, S.E. (1991): Bryophyte response surfaces along ecological and climatic gradients. *Vegetatio* 93(1): 29–45.
- Gorham, E. & Rochefort, L. (2003). Peatland restoration: A brief assessment with special reference to *Sphagnum* bogs. *Wetlands Ecology and Management* 11: 109–119.
- Gorham, E., Lehman, C., Dyke, A., Clymo, D. & Janssens, J. (2012). Long-term carbon sequestration in North American peatlands. *Quat. Sci. Rev.* 58: 77–82.
- Gunnarsson, U. & Söderström, L. (2007): Can artificial introductions of diaspore fragments work as a conservation tool for maintaining populations of the rare peatmoss *Sphagnum angermanicum*. *Biol. Conserv.* 135: 450–458.

- Harpenslager, S.F., van den Elzen, E., Kox, M.A.R., Smolders, A.J.P., Ettwig, K.F. & Lamers, L.P.M. (2015): Rewetting former agricultural peatlands: Topsoil removal as a prerequisite to avoid strong nutrient and greenhouse gas emissions. *Ecological Engineering* 84: 159–168.
- Heilscher, C. (2017): Evaluierung des Etablierungspotentials von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren anhand eines Vergleiches von Vitalität, Photosynthesekapazität und Wachstum. Münster.
- Hölzel, N., Kleinebecker, T., Knorr, K.-H., Raabe, P. & Gramann, G. (2019): Leitfaden zur Torfmoosvermehrung für Renaturierungszwecke. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Osnabrück.
- IPCC (2014). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (Hrsg.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1–32.
- Ivanov, K.E. (1981): *Water Movement in Mirelands (Vodoobmen v bolotnykh landshaftakh)*. Trans. by Arthur Thomson and H.A.P. Ingram. Academic Press, London.
- Jassey, V.E., Chiapusio, G., Binet, P., Buttler, A., Laggoun-Defarge, F., Delarue, F., Bernard, N., Mitchell, E., Toussaint, M.-L., Francez, A.-J. & Gilbert, D. (2013): Above- and belowground linkages in Sphagnum peatland: climate warming affects plant-microbial interactions. *Global Change Biology* 19: 811–823.
- 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, Saarijärvi, Finland.
- Joosten, H. (1993): Denken wie ein Hochmoor: Hydrologische Selbstregulation von Hochmooren und deren Bedeutung für Wiedervernässung und Restauration. *Telma* 23: 95–115. Hannover.
- Kimmel, K. & Mander, M. (2010): Ecosystem services of peatlands: implications for restoration. *Prog Phys Geogr*, 34(4): 491–514.
- Lamers, L.P.M., Bobbink, R. & Roelofs, J.G.M. (2000): Natural nitrogen filter fails in polluted raised bogs. *Global Change Biology* 6: 583–586.
- Larmola, T, Tuittila, E.-S., Tirola, M., Nykänen, H., Martikainen, P.J., Yrjälä, K., Tuomivirta, T. & Fritze, H. (2010): The role of Sphagnum mosses in the methane cycling of a boreal mire. *Ecology* 91: 2356–2365.
- Limpens, J., Berendse, F., Blodau, C., Canadell, J. G., Freeman, C., Holden, J., Roulet, N., Rydin, H. & Schaepman-Strub, G. (2008). Peatlands and the carbon cycle: from local processes to global implications – a synthesis. *Biogeosciences* 5(5): 1475–1491.
- LLUR – Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein (Hrsg.) (2012): *Potenziale und Ziele zum Moor- und Klimaschutz – Gemeinsame Erklärung der Naturschutzbehörden*. Flintbek.
- Loisel J., Yu Z., Beilman D.W., Camill P., Alm J., Amesbury M.J., et al. (2014): A database and synthesis of northern peatland soil properties and Holocene carbon and nitrogen accumulation. *In The Holocene* 24(9): 1028–1042.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005): *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis Report*. Washington DC, Island Press.
- Money, R.P. & Wheeler, B.D. (1999): Some critical questions concerning the restorability of damaged raised bogs. *Applied Vegetation Science* 2: 107–116.

- NLWKN – Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (2006): 25 Jahre Niedersächsisches Moorschutzprogramm - Eine Bilanz. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 3: 150-188.
- Price, S.P. & Ketcheson, S.J. (2009). Water relations in cutover peatlands. Geophysical Monograph Series 184: 277–287.
- Quinty, F. & Rochefort, L. (2003): Peatland Restoration Guide, second edition. Canadian Sphagnum Peat Moss Association and New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Québec, Québec.
- Raabe, P., Kleinebecker, T., Knorr, K.-H., Hölzel, N. & Gramann, G. (2018): Vermehrung und Ansiedlung von Bulttorfmoosen in der Hochmoorrenaturierung – erste Ergebnisse eines Pilotprojekts im Landkreis Vechta (Niedersachsen). TELMA 48: 71–80.
- Robroek, B.J.M., Limpens, J., Breeuwer, A., Schouten, M.G.C. (2007): Effects of water level and temperature on performance of four Sphagnum mosses. Plant Ecology 190(1): 97–107.
- Rüsing, A. (2018): Wachstum von Bulttorfmoosen entlang eines experimentellen Feuchtegradienten. Münster.
- Salonen, V. & Setälä, H. (1992): Plant colonization of bare peat surface – relative importance of seed availability and soil. Ecography 15: 199–204.
- Schipperges, B. & Rydin, H. (1998): Response of photosynthesis of Sphagnum species from contrasting microhabitats to tissue water content and repeated desiccation. New Phytol. 140: 677–684.
- Schmatzler, E. (2012): Die Torfindustrie in Niedersachsen – Erste Ergebnisse einer Umfrage zur Zukunft der Torfgewinnung in Niedersachsen. TELMA 42: 27–42. Hannover.
- Schmatzler, E. (2015): Moornutzung und Moorschutz in Niedersachsen – Geschichtlicher Rückblick und zukünftige Entwicklung. Telma Beiheft 5: 19–38. Hannover.
- Schumann, M. & Joosten, H. (2008): Global Peatland Restoration Manual. International Mire Conservation Group, Institute of Botany and Landscape Ecology, Universität Greifswald, Deutschland.
- Shannon, R.D. & White, J.R. (1994): 3-Year study of controls on methane emissions from two Michigan peatlands. Biogeochemistry 27(1): 35–60.
- Sliva, J. & Pfadenhauer, J. (1999): Restoration of Cut-Over Raised Bogs in Southern Germany: A Comparison of Methods. Applied Vegetation Science 2: 137–148.
- Stiftung Lebensraum Moor (2014): Projektantrag – Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Etablierung von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung. DBU-Aktenzeichen 31995/01-33/0. Vechta.
- Strack, M., Waller, M.F. & Waddington, J.M. (2006): Sedge succession and peatland methane dynamics: A potential feedback to climate change. Ecosystems 9(2): 278–287.
- Taylor, N. & Price, J. (2015): Soil water dynamics and hydrophysical properties of regenerating Sphagnum layers in a cutover peatland. Hydrol. Process. 29(18): 3878–3892
- Timmermann, T., Joosten, H. & Succow, M. (2009): Restaurierung von Mooren In: Zerbe, S. & Wiegand, G. (Hrsg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. Spektrum, Heidelberg, 55–93.
- Tomassen, H.B.M., Smolders, A.J.P., Lamers, L.P.M. & Roelofs, J.G.M. (2003): Stimulated growth of *Betula pubescens* and *Molinia caerulea* on ombrotrophic bogs: role of high levels of atmospheric nitrogen deposition. Journal of Ecology 91: 357–370.
- Tomassen, H.B.M., Smolders, A.J.P., Limpens, J., Lamers, L.P.M. & Roelofs, J.G.M. (2004): Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: desiccation or high N deposition? Journal of Applied Ecology 41: 139–150.

- Van Breemen, N. (1995): How Sphagnum bogs down other plants. *Trends Ecol Evol* 10: 270–275.
- Voigt, C. (2018): Treibhausgasemissionen auf nach Torfabbau renaturierten Hochmoorflächen - mögliche Einflussfaktoren auf Methan- und Lachgasflüsse. Münster.
- Waddington, J. M., Morris, P.J., Kettridge, N., Granath, G., Thompson, D.K., & Moore, P.A. (2015): Hydrological feedbacks in northern peatlands. *Ecohydrology* 8(1): 113–127.
- Warnke, K. (2018): Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf das Wachstum von Bultorfmoos-Gesellschaften in Moor-Renaturierungsflächen. Münster.

9. Anhang

Anhang 3-1. Übersicht zur Torfmoos-Vermehrungsanlage auf Gewächshaustischen mit zeitlichem Ablauf der Experimente (Zyklusdauer, Moos- und Behandlungsvarianten). Abkürzungen: BW = Bewässerung (für weitere Abkürzungen siehe Tab. 3-1-4); G = Ausbringungsmenge; M = Monitoring (MD = Moosdeckung; MH = Mooshöhe; BM = Biomasse); E = Zyklus-Ende; F bzw. → = Fortgang d. Spendermaterials; EtEx = Etablierungsexperimente; FeGr-I = Feuchtgradient-Experiment (2016); FrVe-I = Freiland-Vermehrung (2016); PhEx = Photosynthese-Experiment (2016); FeGr-II = Feuchtgradient-Experiment (2017); FrVe-II = Freiland-Vermehrung (2017); NTZ = Nass-Trocken-Zyklen (Zyklus II.a.P2); Mono = Monokulturen auf Vlies (PAP/P = *S. papillosum*; MED/M = *S. medium*; RUB/R = *S. rubellum*); X = zerkleinerte Fragmente; +GP = Anzucht mit Gefäßpflanzen.

	Tisch1 Schalen	Tisch2 Schalen	Tisch3 Flies → Schalen	Tisch4 Flies	Tisch5 Flies	Tisch6 Flies	Tisch7 Flies	Tisch8 Flies	Tisch9 Flies	Tisch10 Flies
09/2013	<u>Start: Zyklus I</u> BW: iA+B	<u>Start: Zyklus I</u> BW: iA	<u>Start: Mix1-X/ Mono1-X</u>	<u>Start: Mix1+GP</u> G: 600 g FM m ⁻²	<u>Start: Mono</u> - PAP (6 m ²)					
05/2014			G: 600 g FM m ⁻² BW: iA+B	BW: iA+B	- MED (2 m ²) - RUB (2 m ²)					
11/2014	1.M: (MD, MH)	1.M: (MD, MH)			G: 600 g FM m ⁻² BW: iA+B					
03/2015	<u>E: Zyklus I, iA+B</u> F: → EtEx, Z-II	2.M: (ohne BM) F: → w. Anzucht	F: → k. Ertrag	F: → w. Anzucht	F: → w. Anzucht					
05/2015	<u>Neu</u>	BW: iA → sA	<u>Neu</u>	BW: → sA+B	BW: → sA+B	<u>Neu (nach Fertigstellung der Zisterne)</u>				
06/2015	<u>Start Zyklus IIa-c</u> V: Mix2-5 (7 m ²) BW: sA		<u>Start Zyklus IIa-c</u> V: Mix2-5 (7 m ²) BW: sA+B			<u>Start: Mix3 (10m²)</u> G: 1000g FM m ⁻² ~40 g TM m ⁻² BW: iA-sA	<u>Start: Mix6 (10m²)</u> G: 750 g FM m ⁻² ~30 g TM m ⁻² BW: iA-sA	<u>Start: Mix3 (10m²)</u> G: 1000g FM m ⁻² ~40 g TM m ⁻² BW: iA-sA+B	<u>Start: Mix6 (10m²)</u> G: 750 g FM m ⁻² ~30 g TM m ⁻² BW: iA-sA+B	<u>Start: Mix6 (10m²)</u> G: 1250g FM m ⁻² ~50 g TM m ⁻² BW: iA-sA+B
	<u>E: Zyklus II.b</u> → FeGr-I (2 m ²) → FrVe-I (2 m ²)	<u>E: Zyklus I, i/sA</u> → PhEx (4 m ²)	<u>E: Zyklus II.b</u> → FrVe-I (2 m ²)	<u>E: Mix1+GP</u> → FrVe-I (10 m ²)	<u>E: Mono (P/M/R)</u> → Zyklus-III (2m ²) → FrVe-I (8m ²)					
05/2016	<u>Start: Z-III (2m²)</u> BW: sA	<u>Start: Z-III (2m²)</u> BW: sA → pA	<u>Start: Z-III (2m²)</u> BW: sA+B	<u>Start: Mono</u> - PAP (6 m ²) - MED (2 m ²) - RUB (2 m ²)	<u>Start: Mono</u> - PAP (3 m ²) - MED (5 m ²) - RUB (2 m ²)					
11/2016	<u>E: Zyklus II.a</u>	<u>E: Zyklus II.c</u> → FeGr-II (2 m ²)	<u>E: Zyklus II.a</u>	M: 750 g FM m ⁻² ~30 g TM m ⁻²	M: 1250g FM m ⁻² ~50 g TM m ⁻²			<u>E: Mix3 (9m²)</u> → FrVe-II	<u>E: Mix6 (9m²)</u> → FrVe-II	<u>E: Mix6 (9m²)</u> → FrVe-II
05/2017	<u>Start: NTZ (3 m²)</u> BW: sA, NT1/2		<u>Start: NTZ (3 m²)</u> BW: sA/NT1/2+B	BW: iA-sA	BW: iA-sA+B			<u>Neustart: Mix3</u> +divers	<u>Neustart: Mix6</u> +divers	<u>Neustart: Mix6</u> +divers
10/2017	<u>E: Z-III, Z-II.a.P2</u>	<u>E: Zyklus III</u>	<u>E: Z-III, Z-II.a.P2</u>							

Anhang 3-2. Zusammenstellung und Portionierung untersuchter Moosmischungs-Varianten des Vorversuchs (Mix1) und der Vermehrungszyklen II.a-c (Mix2–5). Das aus der Erhaltungszucht entnommene Material zur Bildung des Anteils von *S. papillosum* in den Mischungen Mix2–4 war zu ca. 25% mit *S. medium* vermengt (*). Dies wurde bei der Bestimmung des anfänglichen Trockenmasseanteils entsprechend berücksichtigt (Tab. 3-2).

A–E: Moosmischungen Ausbringungsmenge (Frischmasse) mit Verhältnis von Spender zu Empfängerfläche	Varianten- anzahl	Beimpfte Empfängerfläche		Portionierung						
		pro Variante in m ² (3x WH a 0.2 m ²)	pro Ausbring- ungsart in m ²	Gesamt	<i>S. medium</i>		<i>S. papillosum</i>		<i>S. rubellum</i>	
				Spender- material (g FM m ⁻²)	Frisch- masse (g m ⁻²)	FM-%	Frisch- masse (g m ⁻²)	FM-%	Frisch- masse (g m ⁻²)	FM-%
A. Mix1: 750 g FM m⁻²	4	0.60	2.40	1800	300	16.7	600	33.3	900	50.0
B. Mix2										
a. 1250 g FM m ⁻² (1:10)	3	0.60	1.80	2250	1250	55.6	1000	44.4	.	.
b. 750 g FM m ⁻² (1:17)	3	0.60	1.80	1350	750	55.6	600	44.4	.	.
Gesamt	6	0.60	3.60	3600	2000	55.6	1600	44.4	.	.
C. Mix3										
a. 1250 g FM m ⁻² (1:10)	3	0.60	1.80	2250	750	33.3	500	22.2	1000	44.4
b. 750 g FM m ⁻² (1:17)	3	0.60	1.80	1350	450	33.3	300	22.2	600	44.4
Gesamt	6	0.60	3.60	3600	1200	33.3	800	22.2	1600	44.4
D. Mix4										
a. 1250 g FM m ⁻² (1:10)	3	0.60	1.80	2250	*	*	1500*	66.7*	750	33.3
b. 750 g FM m ⁻² (1:17)	3	0.60	1.80	1350	*	*	900*	66.7*	450	33.3
Gesamt	6	0.60	3.60	3600	*	*	2400*	66.7*	1200	33.3
E. Mix5										
a. 1250 g FM m ⁻² (1:10)	3	0.60	1.80	2250	.	.	.	.	2250	100.0
b. 750 g FM m ⁻² (1:17)	3	0.60	1.80	1350	.	.	.	.	1350	100.0
Gesamt	6	0.60	3.60	3600	.	.	.	.	3600	100.0
B–E Gesamt	24	0.60	14.40	14400	3200	22.2	4800	33.3	6400	44.4
Spendermaterial-Entnahme aus:					Vorversuch (sA+B) F1 + F2		Erhaltungszucht (EZ)		Vorversuch (sA+B) F1 + F2X + EZ	

Anhang 4-1. Übersicht aller in Monokultur vermehrten und dokumentieren Bulltorfmoos-Varianten.

Abkürzungen: iA = instabiler Anstau; sA = stabiler Anstau; pA = permanent hoher Anstau; +B = mit zusätzlicher Überkopfbewässerung; X = zerkleinerte Fragmente; KD = Köpfdichte; BM = Biomasse; JVP = jährliches Vermehrungspotenzial; PAO = prozentuale Abweichung des JVP zum maximal erzielten JVP unter optimaler Wasserversorgung (= *); PAZ = prozentuale Abweichung des JVP zum Durchschnitt aller Monokultur-Varianten innerhalb eines Zyklus. 1. gestrichelte Linie = produktivste Monokultur-Variante; 2. gestr. Linie = JVP < 5; 3. gestr. Linie = JVP < 1.

Nr	Variante	Zyklus	Bewässerung	Start-KD [Capi/ g TM]	Start-BM [g TM m ⁻²]	Final-BM [g TM m ⁻²]	JVP	PAO	PAZ	Rang
1	<i>S. rubellum</i> F2	Z-I	iA+B	138	43	693 ±64	10.5 ±1.0	0%*	+46%	1
2	<i>S. rubellum</i> F3	Z-III	sA+B	74	60	853 ±115	9.7 ±1.3	-8%	+26%	2
3	<i>S. rubellum</i> F3	Z-III	sA	74	60	785 ±103	8.9 ±1.2	-15%	+19%	3
4	<i>S. rubellum</i> F3	Z-III	pA	74	60	725 ±45	8.2 ±0.5	-22%	+16%	4
5	<i>S. rubellum</i> F2X	Z-I	iA+B	138/X	31	384 ±69	8.1 ±1.4	-23%	+120%	5
6	<i>S. rubellum</i> F2	Z-I	iA	138	43	337 ±62	5.1 ±0.9	-51%	+21%	16
7	<i>S. rubellum</i> F1	Z-I	iA+B	91	48	336 ±78	4.5 ±1.1	-57%	-37%	18
8	<i>S. rubellum</i> F2X	Z-I	iA	138/X	31	166 ±80	3.5 ±1.7	-67%	+112%	22
9	<i>S. rubellum</i> F1	Z-I	iA	91	48	218 ±47	2.9 ±0.6	-72%	-31%	23
1	<i>S. papillosum</i> F3	Z-III	sA+B	35	60	716 ±59	8.1 ±0.7	0%*	+6%	6
2	<i>S. papillosum</i> F3	Z-III	pA	35	60	652 ±22	7.3 ±0.2	-9%	+4%	8
3	<i>S. papillosum</i> F1	Z-I	iA+B	67	30	339 ±84	7.2 ±1.8	-11%	±0%	9
4	<i>S. papillosum</i> F2	Z-I	iA+B	70	29	313 ±107	7.0 ±2.4	-13%	-3%	10
5	<i>S. papillosum</i> F3	Z-III	sA	35	60	603 ±33	6.8 ±0.4	-16%	-8%	11
6	<i>S. papillosum</i> F1	Z-I	iA	67	30	223 ±24	4.7 ±0.5	-41%	+11%	17
7	<i>S. papillosum</i> F2	Z-I	iA	70	29	187 ±19	4.2 ±0.4	-48%	-1%	20
8	<i>S. papillosum</i> F2X	Z-I	iA	70/X	25	16 ±11	0.4 ±0.3	-95%	-75%	26
9	<i>S. papillosum</i> F2X	Z-I	iA+B	70/X	25	12 ±8	0.3 ±0.2	-96%	-92%	27
1	<i>S. medium</i> F2	Z-I	iA+B	61	37	418 ±28	7.3 ±0.5	0%*	+1%	7
2	<i>S. medium</i> F3	Z-III	sA	34	60	585 ±114	6.7 ±1.3	-9%	-11%	12
3	<i>S. medium</i> F1	Z-I	iA+B	43	44	390 ±26	5.8 ±0.4	-21%	-20%	13
4	<i>S. medium</i> F3	Z-III	pA	34	60	496 ±31	5.7 ±0.4	-23%	-21%	14
5	<i>S. medium</i> F3	Z-III	sA+B	34	60	456 ±123	5.2 ±1.4	-29%	-32%	15
6	<i>S. medium</i> F2	Z-I	iA	61	37	244 ±18	4.3 ±0.3	-42%	±0%	19
7	<i>S. medium</i> F1	Z-I	iA	43	44	233 ±11	3.5 ±0.2	-53%	-14%	21
8	<i>S. medium</i> F2X	Z-I	iA	61/X	29	35 ±6	0.8 ±0.1	-89%	-52%	24
9	<i>S. medium</i> F2X	Z-I	iA+B	61/X	29	28 ±11	0.6 ±0.3	-91%	-83%	25

Anhang 4-2. Übersicht aller in Mischkultur vermehrten und dokumentierten Bulttorfmoos-Varianten.

Abkürzungen: sA = stabiler Anstau; sA+B = stabiler Anstau mit zusätzlicher Überkopfbewässerung; sA+b = stabiler Anstau mit Überkopfbewässerung im ersten Jahr (2015), ab 2016 permanent hoher Anstau (pA, vgl. Tab. 3-2); sA+S = stabiler Anstau mit Strohdedeckung (200 g m⁻²); PAO = prozentuale Abweichung des JVP im Vergleich zum jeweils höchsten Potenzial einer Mischung unter den Bewässerungen im Zyklus II.a (1-4) bzw. im Zyklus I (5); PAZ = prozentuale Abweichung des JVP zum Durchschnitt aller Mischkultur-Varianten innerhalb eines Zyklus.

Nr	Mischungs- variante	Zyklus	Bewässerung	Start-KD [Capi/ g TM]	Start- Biomasse [g TM m ⁻²]	End- Biomasse [g TM m ⁻²]	Vermehrungs- Potenzial (JVP)	PAO ¹⁻⁵	PAZ	Rang
1	Mix4	Z-II.c	sA+b	74	28	510 ±74	10.4 ±1.5	+26%	+20%	1
2	Mix4	Z.II.b	sA+S	74	46	465 ±19	9.3 ±0.1	+13%	+11%	2
3	Mix4	Z-II.a	sA+B	74	46	575 ±32	8.2 ±0.5	0%¹	+12%	7
4	Mix4	Z-II.a	sA	74	46	572 ±65	8.2 ±0.9	-1%	+10%	8
1	Mix5	Z-II.c	sA+b	118	34	553 ±70	9.0 ±1.1	+28%	+5%	3
2	Mix5	Z.II.b	sA+S	118	57	473 ±5	7.6 ±0.1	+7%	-9%	10
3	Mix5	Z-II.a	sA	118	57	616 ±75	7.1 ±0.9	0%²	-5%	15
4	Mix5	Z-II.a	sA+B	118	57	602 ±20	6.9 ±0.2	-2%	-6%	17
1	Mix3	Z.II.b	sA+S	84	50	453 ±52	8.4 ±1.0	+15%	±0%	4
2	Mix3	Z-II.c	sA+b	84	30	414 ±64	7.8 ±1.2	+8%	-9%	9
3	Mix3	Z-II.a	sA	84	50	549 ±29	7.3 ±0.4	0%³	-2%	12
4	Mix3	Z-II.a	sA+B	84	50	521 ±62	6.9 ±0.8	-5%	-6%	16
1	Mix2	Z.II.b	sA+S	47	44	389 ±58	8.2 ±1.2	+12%	-2%	5
2	Mix2	Z-II.a	sA+B	47	44	482 ±86	7.3 ±1.3	0%⁴	-1%	11
3	Mix2	Z-II.c	sA+b	47	26	337 ±17	7.3 ±0.4	0%	-16%	13
4	Mix2	Z-II.a	sA	47	44	479 ±52	7.2 ±0.8	-1%	-3%	14
1	Mix1	Z-I	iA+B	104	42	528 ±61	8.2 ±0.9	0%⁵	+13%	6
2	Mix1/X	Z-I	iA+B	104	28	246 ±115	5.7 ±2.6	-31%	+54%	18
3	Mix1	Z-I	iA	104	42	308 ±18	4.8 ±0.3	-42%	+12%	19
4	Mix1/X	Z-I	iA	104	28	82 ±20	1.9 ±0.4	-77%	+17%	20

Anhang 4-3. Ergebnisse des biogeochemischen Monitorings der Wasserqualitäten (Spanne der Mittelwerte von 2 bis 6 Probenahmen im angegebenen Zeitraum mit 1 bis 6 Replikaten) mit Vergleich von (A) Bewässerungswasser der Torfmoosvermehrung und (B) oberflächennahem Porenwasser der Etablierungsexperimente (je 2 Flächen aus den beiden Vergleichsgruppen zusammengefasst mit vergleichbarem Etablierungserfolg, vgl. Tab. 4-5, Anhang 4-5) sowie einer externen Vergleichsfläche (EV). Erläuterungen: Eckige Klammer unter A = kurzzeitig erhöhte Werte nach Beimischung von aus dem Moor entnommenen Oberflächenwasser (*) und anschließender Aufkonzentration (**) bevor Verdünnung mit Regenwasser einsetzte (vgl. Abb. 4-5); Runde Klammern unter B = Spanne aller Einzelmessungen. Alle anderen Angaben umfassen die Spanne der Mittelwerte der Proben einer Gruppe im jeweiligen Probenahme-Zeitraum. Symbole: (C) Vermehrungserfolg (Biomassezuwachs pro Jahr): ++++ = > x10; +++ = x10–x7; ++ = < x7; (D) Etablierungserfolg (Biomassezuwachs 06/2015–11/2016): ++ = > 50%; + = > 10–50%; +/- = 10–10%; - = < -10–50%; -- = < -50%

Parameter	A: Bewässerungswasser (Vermehrung)				B: Porenwasser (Etablierungsexperimente)			
	2013-14 Überkopf (iA+B) [n=2x1]	2015-16 Überkopf (sA+B) [n=6x3]	Anstau (sA) [n=5x6]	2016 Freiland [n=3x3]	2015-16 A2+B2 [n=5x6x2]	A1+B1 [n=5x6x2]	A3+B5 [n=5x6x2]	2016 EV [n=2x2]
pH-Wert	6.3–6.4	6.3–7.2 [5.9*]	5.9–7.3 [6.8**]	4.1–5.4	4.0–4.8 (3.9–5.3)	4.0–4.7 (3.8–5.1)	3.9–4.4 (3.6–4.8)	5.4–6.4 (5.2–6.7)
El. Leitf. [µS/cm]	110–120	83–133 [239**]	86–135 [332**]	71–118	67–92 (37–104)	63–105 (42–176)	85–150 (53–234)	189–235 (155–272)
Calcium [mg/l]	10–12	8.1–17 [31**]	6.7–12 [35]**	0.6–2.6	0.5–0.9 (0.2–1.6)	0.6–1.4 (0.3–5.0)	1.6–2.2 (0.4–10)	16–17 (12–22)
Magnesium [mg/l]	1–2	1.1–2.1 [9.1**]	1.4–2.4 [7.0**]	1.0–2.1	0.9–1.7 (0.2–2.0)	0.6–1.7 (0.3–6.9)	1.3–2.4 (0.4–4.9)	5.0–7.3 (4.7–8.4)
Natrium [mg/l]	5–7	3.7–6.0 [27**]	4.7–8.6 [23**]	7.5–9.2	4.6–10 (3.4–12)	6.8–12 (3.8–29)	8.4–18 (5.5–27)	16 (14–17)
Kalium [mg/l]	2–4	1.0–2.6 [13**]	1.3–2.4 [11**]	1.1–1.6	0.3–1.1 (0.1–2.0)	0.3–0.9 (0.1–2.2)	0.2–0.8 (0.1–1.1)	6.1–12 (3.4–14)
Phosphat [mg/l]	<0.1–0.1	<0.1–0.3 [1.9*]	<0.1–0.1 [0.5**]	0.2–0.4	<0.1–0.2 (<0.1–0.4)	<0.1–0.2 (<0.1–0.5)	<0.1–0.3 (<0.1–0.3)	1.6–2.9 (0.5–3.4)
Nitrat [mg/l]	0.5	<0.1–1.4 [4.1*]	0.1–1.3 [1.6**]	<0.1–0.8	<0.1–0.1 (<0.1–0.2)	<0.1–0.2 (<0.1–0.9)	<0.1–0.1 (<0.1–0.1)	0.1–0.6 (0.1–0.9)
Ammonium [mg/l]	3.1	0.1–0.8 [2.1*]	0.1–0.4 [0.3**]	0.4	0.2–0.5 (0.1–2.7)	0.2–0.6 (<0.1–3.7)	<0.1–0.7 (<0.1–1.7)	0.1 (0.1–0.2)
DOC [mg/l]	5	3–8 [30*]	3–6 [12**]	9–19	15–17 (7–27)	13–15 (9–24)	20–25 (14–40)	23–25 (17–29)
Varianten	C: Vermehrungserfolg				D: Etablierungserfolg			
Rub-F2/Mix5	++++	++	+++	k.M.	-	--	--	--
Mix1/3/4	+++	++/+++	+++	k.M.	+	-	-	--
Pap-F2/Mix2	+++	+++	+++	k.M.	++	+	+/-	--

Anhang 4-4. Ergebnisse zur biogeochemischen Charakterisierung der für die Etablierungsexperimente ausgewählten Monitoringflächen. Die Übersicht umfasst Mittelwerte (\pm Standardabweichung) biogeochemischer Parameter zur Charakterisierung von (A) Regenerationsschicht (= RS), (B) oberflächennahen und (C) tieferen Torfschichten sowie (D) weiteren Torf- und Standorteigenschaften der im Vechtaer Moor gelegenen Versuchsflächen (A1–5, B1–5).

Abkürzungen: Sukzessionsstadien vgl. Tab. 3-5; P₂O₅ = Phosphat-Gehalt nach CAL-Extraktion; FTIR = Fourier-Transformations-Infrarot-Spektrometrie;

WT = Weißtorf (h3–5); ST = Schwarztorf (h6–8); NT = Niedermoortorf; k.M. = keine Monitoring-Daten erfasst; * = einmalige Erhebung im Zuge der Vorcharakterisierung.

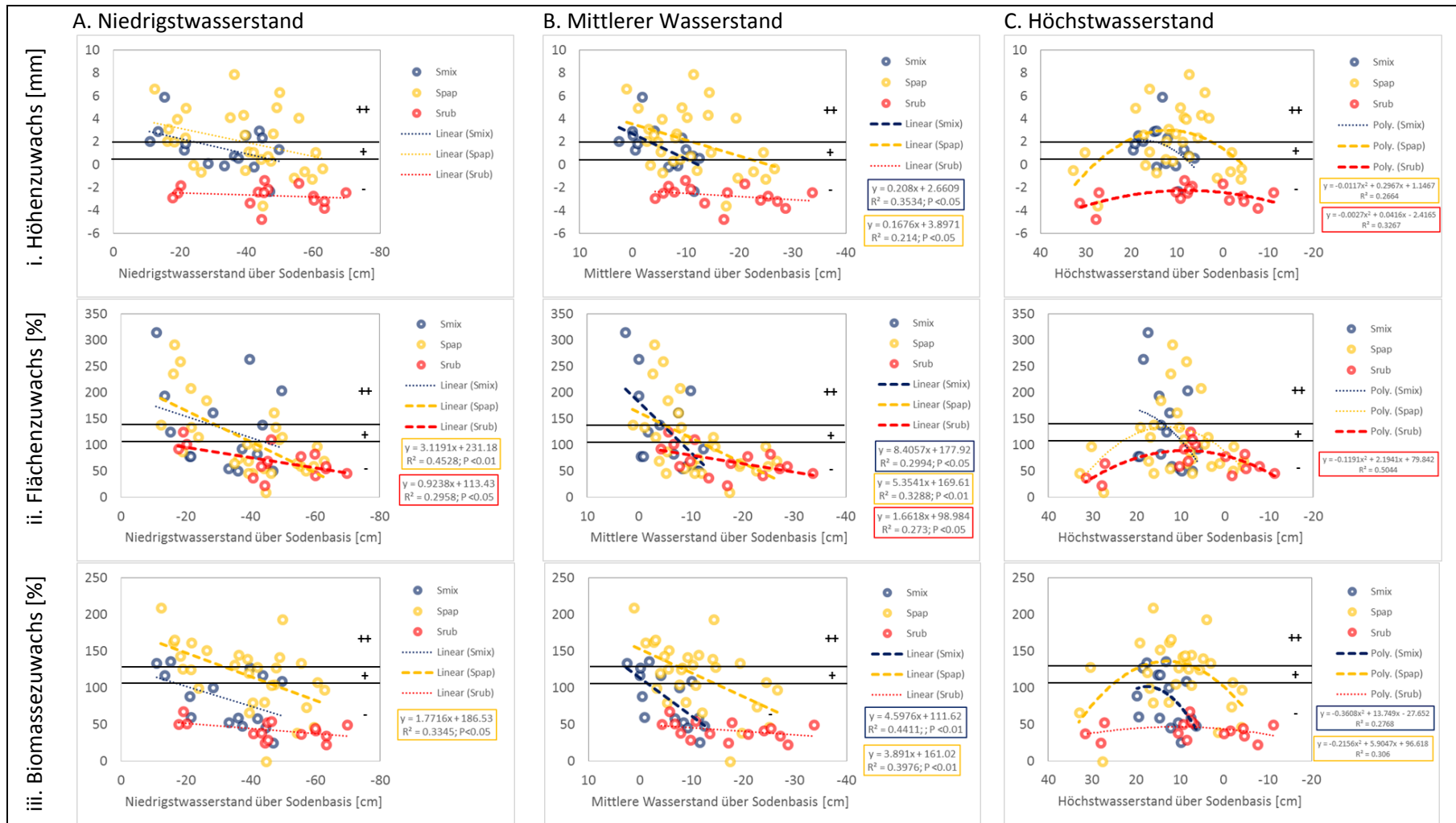
Versuchsfläche	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Sukzessionsstadium	W-T-S-I	W-T-S-II	Jun-eff-I	Eri-vag-II	Jun-eff-II	Eri-ang-I	Eri-Mol-I	Eri-vag-I	Eri-ang-II	Eri-Mol-II
A: Regenerations. (RS)	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=0]	[n=0]	[n=3x3]
Mächtigkeit der RS [cm]	11.8 \pm 2.7	13.3 \pm 3.1	5.7 \pm 1.2	7.3 \pm 1.2	4.5 \pm 1.3	10.8 \pm 1.8	10.6 \pm 2.2	k.M.	k.M.	5.3 \pm 0.8
Rohdichte [g TM cm ⁻³]	0.01 \pm 0.01	0.02 \pm 0.01	0.04 \pm 0.00	0.04 \pm 0.01	0.04 \pm 0.00	0.03 \pm 0.00	0.03 \pm 0.00	k.M.	k.M.	0.05 \pm 0.00
pH	4.46 \pm 0.27	4.24 \pm 0.04	4.45 \pm 0.11	4.74 \pm 0.14	5.04 \pm 0.21	5.00 \pm 0.11	4.50 \pm 0.05	k.M.	k.M.	4.30 \pm 0.03
Ca-%	0.11 \pm 0.02	0.05 \pm 0.01	0.28 \pm 0.04	0.12 \pm 0.01	0.18 \pm 0.07	0.23 \pm 0.01	0.11 \pm 0.01	k.M.	k.M.	0.14 \pm 0.00
C/N	51 \pm 5	61 \pm 1	31 \pm 2	40 \pm 4	32 \pm 2	33 \pm 1	39 \pm 2	k.M.	k.M.	35 \pm 1
N/P	21 \pm 3	28 \pm 3	17 \pm 4	20 \pm 2	17 \pm 3	15 \pm 1	20 \pm 1	k.M.	k.M.	19 \pm 2
P ₂ O ₅ [g l ⁻¹]	6.0 \pm 0.4	6.5 \pm 0.5	6.2 \pm 0.9	10.1 \pm 1.7	15.3 \pm 11.3	12.3 \pm 2.8	8.0 \pm 1.6	k.M.	k.M.	16.7 \pm 6.5
FTIR 1630_1090	0.45 \pm 0.02	0.36 \pm 0.03	0.65 \pm 0.06	0.59 \pm 0.04	0.57 \pm 0.06	0.66 \pm 0.07	0.53 \pm 0.04	k.M.	k.M.	0.63 \pm 0.05
B: Torf (0–10 cm u. RS)	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=0]	[n=0]	[n=3x3]
Rohdichte [g TM cm ⁻³]	0.02 \pm 0.02	0.02 \pm 0.00	0.11 \pm 0.01	0.08 \pm 0.01	0.11 \pm 0.02	0.11 \pm 0.01	0.13 \pm 0.01	k.M.	k.M.	0.09 \pm 0.00
pH	4.31 \pm 0.12	4.14 \pm 0.24	4.16 \pm 0.05	4.10 \pm 0.09	4.43 \pm 0.06	4.32 \pm 0.06	4.20 \pm 0.07	k.M.	k.M.	4.09 \pm 0.04
Ca-%	0.12 \pm 0.01	0.09 \pm 0.02	0.30 \pm 0.06	0.16 \pm 0.01	0.30 \pm 0.02	0.20 \pm 0.01	0.13 \pm 0.02	k.M.	k.M.	0.17 \pm 0.00
C/N	49 \pm 19	56 \pm 5	48 \pm 5	60 \pm 2	47 \pm 7	53 \pm 7	55 \pm 6	k.M.	k.M.	71 \pm 15
N/P	28 \pm 7	28 \pm 3	32 \pm 2	38 \pm 0	33 \pm 2	29 \pm 6	43 \pm 2	k.M.	k.M.	29 \pm 3
P ₂ O ₅ [g l ⁻¹]	3.0 \pm 1.4	2.3 \pm 0.2	2.4 \pm 0.3	2.7 \pm 1.0	5.8 \pm 1.4	4.3 \pm 1.2	2.7 \pm 0.4	k.M.	k.M.	2.4 \pm 0.2
FTIR 1630_1090	0.61 \pm 0.16	0.44 \pm 0.03	1.05 \pm 0.04	1.01 \pm 0.02	0.97 \pm 0.02	1.12 \pm 0.07	1.09 \pm 0.09	k.M.	k.M.	0.78 \pm 0.13
C: Torf (15–25 cm u. RS)	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=3x3]	[n=0]	[n=0]	[n=3x3]
Rohdichte [g TM cm ⁻³]	0.10 \pm 0.03	0.04 \pm 0.01	0.11 \pm 0.01	0.10 \pm 0.01	0.13 \pm 0.01	0.11 \pm 0.01	0.14 \pm 0.01	k.M.	k.M.	0.10 \pm 0.01
pH	4.08 \pm 0.07	4.19 \pm 0.08	4.14 \pm 0.01	3.85 \pm 0.09	4.23 \pm 0.04	4.33 \pm 0.07	4.01 \pm 0.10	k.M.	k.M.	4.05 \pm 0.03
Ca-%	0.17 \pm 0.01	0.16 \pm 0.01	0.19 \pm 0.12	0.11 \pm 0.01	0.20 \pm 0.02	0.14 \pm 0.03	0.09 \pm 0.03	k.M.	k.M.	0.19 \pm 0.01
C/N	47 \pm 1	43 \pm 1	65 \pm 12	74 \pm 5	64 \pm 8	43 \pm 2	64 \pm 5	k.M.	k.M.	85 \pm 12
N/P	45 \pm 2	43 \pm 2	35 \pm 3	42 \pm 1	38 \pm 2	52 \pm 2	47 \pm 2	k.M.	k.M.	30 \pm 2
P ₂ O ₅ [g l ⁻¹]	1.8 \pm 0.1	1.0 \pm 0.0	1.0 \pm 0.4	2.0 \pm 0.3	3.2 \pm 1.1	1.1 \pm 0.2	1.5 \pm 0.8	k.M.	k.M.	2.2 \pm 2.1
FTIR 1630_1090	0.87 \pm 0.03	0.94 \pm 0.04	1.05 \pm 0.04	1.15 \pm 0.07	1.01 \pm 0.04	1.42 \pm 0.04	1.16 \pm 0.10	k.M.	k.M.	0.83 \pm 0.09
D: Torfart (10–15 cm)	RS/WT	RS/WT	ST	ST	ST	ST	ST	ST*	ST*	ST
Zersetzungsggr. (10–15 cm)	4–5	3–5	7–8	6–8	6–7	7–8	6–8	k.M.	k.M.	6–7
Torfart (25–30 cm)	WT/ST	WT	ST	ST	ST	ST/NT	ST	k.M.	k.M.	ST
Resttorfmächtigkeit [cm]	~120	>150	~50	~50	~80	~70	~100	~80*	~50*	~80

Anhang 4-5. Ergebnisse zur vegetationskundlichen Charakterisierung der für die Etablierungsexperimente ausgewählten Monitoringflächen. Die Übersicht umfasst Mittelwerte (\pm Standardabweichung) von Deckungsgraden und Vegetationsstruktur-Parametern, die in Aufnahmequadraten entlang von (A) Transekten (TK) und (B) um die Soden-Beimpfungsstellen (BS) herum erfasst wurden, sowie (C) die Produktivität und Stöchiometrie von Gefäßpflanzen (GP) auf ausgewählten Versuchsflächen im Vechtaer Moor (A1–5, B1–5). Abkürzungen: STM = Schlenken-Torfmoos; BTM = Bult-Torfmoos (T1 und T2a bzw. T2b zusammengefasst, Abk. siehe Tab. 3-6); Eri vag = *Eriophorum vaginatum*; Eri ang = *E. angustifolium*; Mol cae = *Molinia caerulea*; Jun eff = *Juncus effusus*; GP = alle grasartigen Gefäßpflanzen; VBG = Verbuschungsgrad; \uparrow = Zunahme der Variablen zw. 2015 und 2016; \downarrow = Abnahme der Variablen; k.M. = kein Monitoring.

Versuchsfläche	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5
Sukzessionsstadium	W-T-S-I	W-T-S-II	Jun-eff-I	Eri-vag-II	Jun-eff-II	Eri-ang-I	Eri-Mol-I	Eri-vag-I	Eri-ang-II	Eri-Mol-II
Flächenalter (2015)	~18	~20	~17	~15	~15	~17	~17	~12	~9	~12
Abbauverfahren	Sodenstich	Sodenstich	O-U-V	Frästorf	Frästorf	Frästorf	Frästorf	Frästorf	O-U-V	O-U-V
LW-Nutzung vor Abbau	nein	nein	Extensiv	nein	(Extensiv)	nein	nein	nein	nein	nein
A: Transektkartierung (TK)	[n=6]	[n=6]	[n=3]	[n=5]	[n=5]	[n=6]	[n=6]	[n=6]	[n=3]	[n=3]
TK-15: STM-Deckung [%]	57 \pm 20	91 \pm 8	48 \pm 16	53 \pm 17	55 \pm 29	65 \pm 27	86 \pm 12	15 \pm 16	39 \pm 27	60 \pm 30
TK-16: STM-Deckung [%]	64 \pm 28 \uparrow	95 \pm 3 \uparrow	35 \pm 7 \downarrow	48 \pm 17 \downarrow	43 \pm 26 \downarrow	79 \pm 20 \uparrow	73 \pm 25 \downarrow	k.M.	k.M.	44 \pm 27 \downarrow
TK-15: GP-Deckung [%]	68 \pm 15	20 \pm 16	58 \pm 26	52 \pm 23	75 \pm 26	51 \pm 24	73 \pm 19	88 \pm 18	53 \pm 31	68 \pm 21
TK-16: GP-Deckung [%]	56 \pm 13 \downarrow	11 \pm 5 \downarrow	77 \pm 10 \uparrow	51 \pm 12	49 \pm 6 \downarrow	63 \pm 16 \uparrow	47 \pm 18 \downarrow	k.M.	k.M.	58 \pm 21 \downarrow
TK-16: Eri vag / Eri ang [%]	42 \pm 11/ 1 \pm 2	2 \pm 1/ 5 \pm 1	23 \pm 18/ 5 \pm 5	51 \pm 15/ 2 \pm 2	10 \pm 15/ 1 \pm 2	12 \pm 13/56 \pm 5	16 \pm 8/21 \pm 15	k.M.	k.M.	5 \pm 6/ 3 \pm 4
TK-16: Mol cae / Jun eff [%]	11 \pm 7/ 0	3 \pm 5/ 0	6 \pm 7/ 35 \pm 8	0 / 0	0 / 41 \pm 17	0 / 0	10 \pm 11/ 0	k.M.	k.M.	51 \pm 21/ 0
TK-15: GP-Streu [%]	31 \pm 11	3 \pm 1	8 \pm 3	26 \pm 10	30 \pm 15	33 \pm 29	37 \pm 21	57 \pm 15	75 \pm 13	37 \pm 25
TK-16: GP-Streu [%]	23 \pm 8 \downarrow	8 \pm 6 \uparrow	17 \pm 3 \uparrow	13 \pm 3 \downarrow	35 \pm 12 \uparrow	27 \pm 13 \downarrow	30 \pm 12 \downarrow	k.M.	k.M.	22 \pm 8 \downarrow
TK-15+16: VBG	2	1	3	3	2	2	2	2	4	3
B: Beimpfungsstellen (BS)	[n=6]	[n=6]	[n=6]	[n=6]	[n=6]	[n=5*]	[n=6]	[n=6]	[n=6]	[n=6]
BS-16: BTM-Deckung [%]	27 \pm 9	47 \pm 17	16 \pm 4	36 \pm 12	13 \pm 3	17 \pm 7	32 \pm 15	13 \pm 4	10 \pm 7	14 \pm 3
BS-16: STM-Deckung [%]	30 \pm 12	45 \pm 15	17 \pm 6	9 \pm 6	10 \pm 15	20 \pm 13	57 \pm 11	2 \pm 2	29 \pm 25	30 \pm 22
BS-16: GP-Deckung [%]	46 \pm 8	21 \pm 11	65 \pm 4	56 \pm 15	43 \pm 9	45 \pm 14	23 \pm 8	71 \pm 12	56 \pm 21	59 \pm 11
BS-16: Eri vag / Eri ang [%]	39 \pm 6/ 1 \pm 1	20 \pm 11/ 2 \pm 2	1 \pm 1/ NA	56 \pm 15/ NA	0/ 0	10 \pm 24/35 \pm 9	0 / 6 \pm 4	k.M.	k.M.	0 / 3 \pm 3
BS-16: Mol cae / Jun eff [%]	3 \pm 2 / 0	0 / 0	0/ 58 \pm 9	0 / 0	0/ 42 \pm 10	0 / 0	16 \pm 10/ 0	k.M.	k.M.	57 \pm 12/ 0
BS-16: GP-Streu [%]	28 \pm 5	10 \pm 8	24 \pm 4	17 \pm 5	43 \pm 5	35 \pm 9	14 \pm 4	19 \pm 7	26 \pm 9	20 \pm 5
BS-16: GP-Höhe [cm]	37 \pm 5	18 \pm 4	72 \pm 9	38 \pm 6	64 \pm 4	34 \pm 3	25 \pm 10	27 \pm 7	26 \pm 7	32 \pm 5
BS-16: Blattflächenindex	1.2 \pm 0.7	0.7 \pm 0.3	1.9 \pm 0.5	1.8 \pm 0.8	2.0 \pm 0.9	2.1 \pm 0.7	1.1 \pm 0.2	k.M.	k.M.	1.8 \pm 0.4
C: Biomasse (BS+TK 2016)	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2+2]	[n=2]	[n=2]	[n=2+2]
BS+TK: GP-Biomasse[g/m ²]	122 \pm 28	60 \pm 25	258 \pm 114	126 \pm 48	335 \pm 111	178 \pm 23	154 \pm 58	180 \pm 65	352 \pm 39	161 \pm 40
BS+TK: C/N GP-Biomasse	56 \pm 1	49 \pm 5	39 \pm 2	47 \pm 7	42 \pm 5	45 \pm 5	47 \pm 2	k.M.	k.M.	42 \pm 4
BS+TK: N/P GP-Biomasse	21 \pm 2	28 \pm 7	12 \pm 1	18 \pm 3	11 \pm 1	14 \pm 1	19 \pm 4	k.M.	k.M.	24 \pm 4

Anhang 4-6. Zusammenfassende Flächencharakterisierung ausgewählter Vergleichsgruppen (A-I, A-II, B-I, B-II) mit Vergleich des Etablierungserfolgs von Bulttorfmoosen nach Anwendung verschiedener Ausbringungsvarianten (T1–T4). Die Übersicht umfasst Standorteigenschaften (Mittelwert \pm Standardabweichung) auf (I) Ebene der Versuchsflächen und (II) Ebene der Soden-Beimpfungsstellen sowie Etablierungserfolg (a–c: %-Fälle mit positivem Zuwachs; d–e: Wiederfindungsraten) nach (III) Soden- und (IV) Fragment-Ausbringung. Erläuterungen: III = Ausbringung als intakte Soden; * = prozentualer Anteil eingebrachter Soden, die nach 18 Monaten mindestens 2 der nachfolgenden Kriterien erfüllten: Höhenzuwachs > 0 mm; Lateraler Flächen- und Biomasse-Zuwachs > - 50%. IV = Ausbringung als lose Fragmente; ** = prozentualer Anteil beimpfter Bereiche mit wiedergefunden Einzelpflanzen nach 30 Monaten.

I. Flächen-Charakteristika (BS+TK)	A-I: A1+A2+A4		A-II: A3+A5		B-I: B1+B2		B-II: B3+B4+B5	
Gefäßpflanzen-Biomasse [g/m ²]	103 \pm 47 [n=12]		297 \pm 112 [n=8]		166 \pm 43 [n=8]		266 \pm 109 ^{B3+4} /161 \pm 40 ^{B5}	
C/N Gefäßpflanzen	51 \pm 6 [n=12]		40 \pm 4 [n=8]		46 \pm 3 [n=8]		42 \pm 4 [n=3 ^{B5}]	
C/N Regenerationsschicht	50 \pm 10 [n=9]		32 \pm 2 [n=6]		36 \pm 4 [n=6]		35 \pm 1 [n=3 ^{B5}]	
C/N Torf (0–10 cm)	55 \pm 11 [n=9]		48 \pm 5 [n=6]		54 \pm 6 [n=6]		71 \pm 15 [n=3 ^{B5}]	
C/N Torf (15–25 cm)	55 \pm 15 [n=9]		64 \pm 9 [n=6]		54 \pm 12 [n=6]		85 \pm 12 [n=3 ^{B5}]	
pH Regenerationsschicht	4.50 \pm 0.31 [n=9]		4.74 \pm 0.36 [n=6]		4.75 \pm 0.29 [n=6]		4.30 \pm 0.03 [n=3 ^{B5}]	
pH Torf (0–10 cm)	4.18 \pm 0.17 [n=9]		4.29 \pm 0.16 [n=6]		4.26 \pm 0.09 [n=6]		4.09 \pm 0.04 [n=3 ^{B5}]	
pH Torf (15–25 cm)	4.04 \pm 0.17 [n=9]		4.19 \pm 0.05 [n=6]		4.17 \pm 0.19 [n=6]		4.05 \pm 0.03 [n=3 ^{B5}]	
Wasserstands-Ampl. [cm] 06/15-12/16	28–59		44–57		27–54		56–72	
II. Charakteristika der Soden-Beimpfungsstellen (BS-2016)	T1-Pap [n=9]	T2a-Mix1 [n=9]	T1-Pap [n=6]	T2a-Mix1 [n=6]	T1-Pap [n=5]	T2b-Rub [n=6]	T1-Pap [n=9]	T2b-Rub [n=9]
Mittl. Wst. [cm u. Sode] 06/15-12/16	4.7 \pm 3.9	2.8 \pm 4.7	10.7 \pm 2.2	9.4 \pm 4.6	7.0 \pm 1.9	9.4 \pm 4.6	20.2 \pm 4.9	23.1 \pm 6.4
Deckung Bult-Torfmoose [%]	37 \pm 17	36 \pm 13	14 \pm 4	15 \pm 4	31 \pm 19	20 \pm 5	13 \pm 6	12 \pm 4
Deckung Schlenken-Torfmoose [%]	31 \pm 22	25 \pm 17	10 \pm 10	17 \pm 12	34 \pm 21	45 \pm 23	15 \pm 16	25 \pm 28
Deckung Gefäßpflanzen [%]	38 \pm 18	44 \pm 20	52 \pm 15	56 \pm 13	23 \pm 15	33 \pm 22	61 \pm 16	63 \pm 17
Deckung GP-Streu [%]	19 \pm 13	20 \pm 10	34 \pm 11	33 \pm 11	23 \pm 16	24 \pm 9	22 \pm 8	21 \pm 6
Mittl. Vegetationshöhe [cm]	30 \pm 11	32 \pm 11	68 \pm 9	69 \pm 8	28 \pm 11	30 \pm 8	29 \pm 6	27 \pm 8
III. Etablierungserfolg Soden								
a) Höhenzuwachs [%-Fälle > 5mm]	78%	89%	83%	50%	100%	0%	33%	0%
b) Laterale Zuwachs [%-Fälle > 10%]	89%	78%	0%	0%	60%	17%	0%	0%
c) Biomassezuwachs [%-Fälle > 10%]	78%	56%	67%	0%	80%	0%	22%	0%
d) Etablierungsrate [%-Fälle *]	100%	100%	100%	33%	63%	17%	44%	0%
IV. Etablierungserfolg Fragmente	T3 [n=9]	T4 [n=9]	T3 [n=6]	T4 [n=6]	T3 [n=6]	T4 [n=6]	T3 [n=9]	T4 [n=9]
e) Etablierungsrate [%-Fälle**]	89%	78%	50%	50%	100%	67%	11%	0%



Anhang 4-7. Regressionen zur Ableitung hydrologischer Richtwerte. Die Abbildungen (a–j) zeigen Zusammenhänge zwischen (A) Niedrigst-, (B) mittlerem sowie (C) Höchst-Wasserstand und dem (i) Höhen-, (ii) Flächen- sowie (iii) Biomassezuwachs von in Sodenform transplantierten Bulttorfmoosen (Smix = Moosmischung/Mix1; Spap = *S. papillosum*; Srub = *S. rubellum*) 18 Monate nach der Ausbringung. Lineare und polynomiale Regressionen (dicke Trendlinie = signifikant [p < 0.05]; dünne Trendlinie = n.s.) zur Ableitung hydrologischer Richtwerte zur Vorhersage des Etablierungserfolgs (i.S. eines positiven Zuwachses) von in Sodenform ausgebrachten Bulttorfmoosvarianten.



Bringing back the rare – biogeochemical constraints of peat moss establishment in restored cut-over bogs

Peter Raabe, Christian Blodau, Norbert Hölzel, Till Kleinebecker, and Klaus-Holger Knorr
University of Münster, Institute of Landscape Ecology, Münster, Germany (p.raabe@uni-muenster.de)

In rewetted cut-over bogs in north-western Germany and elsewhere almost no spontaneous recolonization of hummock peat mosses, such as *Sphagnum magellanicum*, *S. papillosum* or *S. rubellum* can be observed. However, to reach goals of climate protection every restoration of formerly mined peatlands should aim to enable the re-establishment of these rare but functionally important plant species. Besides aspects of biodiversity, peatlands dominated by mosses can be expected to emit less methane compared to sites dominated by graminoids.

To assess the hydrological and biogeochemical factors constraining the successful establishment of hummock *Sphagnum* mosses we conducted a field experiment by actively transferring hummock species into six existing restoration sites in the Vechtaer Moor, a large peatland complex with active peat harvesting and parallel restoration efforts. The mosses were transferred as intact sods in triplicate at the beginning of June 2016. Six weeks (mid-July) and 18 weeks later (beginning of October) pore water was sampled in two depths (5 and 20 cm) directly beneath the inoculated *Sphagnum* sods as well as in untreated control plots and analysed for phosphate, ferrous iron, ammonia, nitrate and total organic carbon (TOC). On the same occasions and additionally in December, the vitality of mosses was estimated. Furthermore, the increment of moss height between July and December was measured by using cranked wires and peat cores were taken for lab analyses of nutrients and major element inventories at the depths of pore water sampling.

Preliminary results indicate that vitality of mosses during the period of summer water level draw down was strongly negatively related to plant available phosphate in deeper layers of the residual peat. Furthermore, increment of moss height was strongly negatively related to TOC in the upper pore waters sampled in October. Concentration of ferrous iron in deeper pore waters was in general significantly higher beneath *Sphagnum* sods compared to control plots suggesting a direct impact of hummock mosses on microsite soil moisture conditions. However, with an increase of water levels towards winter season accompanied by increase of ferrous iron and concurrent increase of phosphate in pore waters of the upper peat layers the vitality was strongly positively related to plant available phosphate. This suggests that actively transferred hummock mosses suffering temporarily from desiccation during the dry summer season are able to recover also under relatively higher trophic conditions as long as water level and redox state favour an optimal supply of required water nutrients.



Bringing back the rare - hydrological and biogeochemical constraints of peat moss establishment

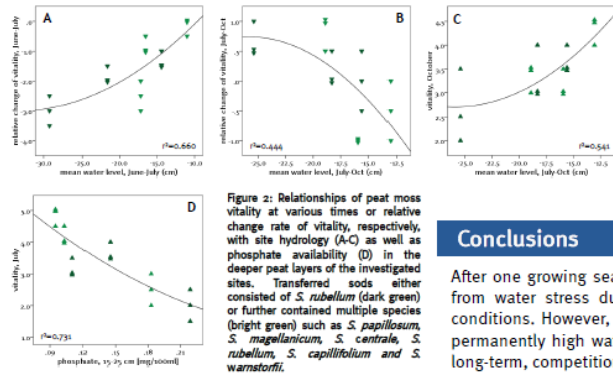
Peter Raabe, Till Kleinebecker, Christian Blodau, Norbert Hölzel & Klaus-Holger Knorr

Introduction

In rewetted cut-over bogs in north-western Germany and elsewhere almost no spontaneous recolonization of hummock peat mosses can be observed. However, to reach goals of climate protection every restoration of formerly mined peatlands should aim to enable the re-establishment of rare but typical plant species. To assess the hydrological and biogeochemical factors constraining the successful establishment of hummock peat mosses we conducted a field experiment by actively transferring hummock *Sphagnum* species into six existing restoration sites in Vechtaer Moor, Lower Saxony.

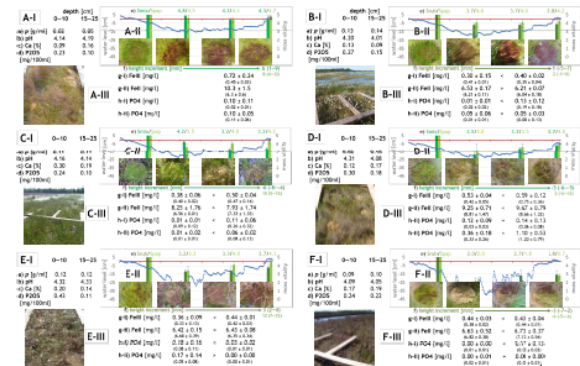
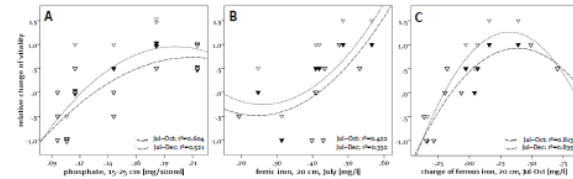
Methods

Mosses were transferred as intact sods in triplicate at the beginning of June 2016. Six weeks (July) and 18 weeks later (October) pore water was sampled in two depths (5 and 20 cm) directly beneath the inoculated *Sphagnum* sods as well as in untreated control plots and analyzed for phosphate, iron, ammonia, nitrate and total organic carbon (TOC). On the same occasions and additionally in December, the vitality of mosses was estimated. Furthermore, the increment of moss height between July and December was measured by using cranked wires and peat cores were taken for lab analyses of nutrients and major elements at the depths of pore water sampling.



Results

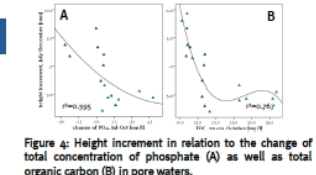
During period of summer water level draw down vitality of mosses primarily suffers from unfavorable hydrologic conditions. Furthermore, lower water levels facilitate phosphate availability in deeper layers of the residual peat, which thus was strongly negatively related to moss vitality at an early stage in the season (Fig.1+2).



Subsequently, mosses suffering the most on sites with oxic conditions in summer showed strongest recovery towards the wetter winter season if redox state changed, characterized by an increase of ferrous iron. Moreover, decreasing concentrations of ferrous iron resulted in a decline of vitality if conditions were previously less oxic (Fig. 2+3). However, even though mosses partially were able to recover vitality the height increment was strongly negatively related to increasing total concentrations of phosphate as well as with TOC in the deeper pore waters sampled in October (Fig. 4).

Conclusions

After one growing season, it is suggested that actively transferred hummock mosses suffering temporarily from water stress during the dryer summer period are able to recover under relatively higher trophic conditions. However, significant growth of mosses can only be observed if both requirements are fulfilled, permanently high water levels and a redox state favoring an optimal supply of required nutrients. On the long-term, competition with vascular plants is expected to become more important.



Working Groups Ecosystem Research & Ecohydrology
Heisenbergstr. 2, D- 48149 Münster, Germany

p.raabe@uni-muenster.de
www.uni-muenster.de/Oekosystemforschung/en/

Anhang 6-3. Abstract zum Tagungsbeitrag auf dem Sphagnum Symposium 2016 in Khanty-Mansiysk.

GROWTH TRAJECTORIES OF HUMMOCK SPECIES MIXTURES –

LESSONS LEARNED REGARDING THE OPTIMIZATION OF DONOR MATERIAL PRODUCTION
FOR BOG RESTORATION

Peter Raabe^{1,2}, Christian Blodau², Norbert Hölzel¹, Till Kleinebecker¹ & Klaus-Holger Knorr²

¹ Group Biodiversity and Ecosystem Research, Institute of Landscape Ecology, University of Muenster, Heisenbergstr. 2, 48149 Muenster, Germany, p.raabe@uni-muenster.de

² Group Ecohydrology and Biogeochemistry, Institute of Landscape Ecology, University of Muenster

Introduction

In rewetted cut-over bogs in north-western Germany almost no spontaneous recolonization of rare hummock peat mosses can be observed (Rosinski, 2012). It is unclear to which degree colonization is slowed down due to the mismatch between their high ecological requirements, making them incapable to withstand longer periods of unfavorable conditions, although during early successional stages the abiotic site conditions appear to be often appropriate (Raabe et al., 2013), or due to dispersal limitation because of the generally low level of remaining diaspores as a result of long history in land-use in this region (Couwenberg & Joosten, 2001).

A preliminary study, within the framework of a project aiming at clarifying possible reasons for the lack of successful establishment as well as testing approaches to facilitate the establishment of hummock peat mosses, revealed that the transfer of intact sods leads to significantly higher success in establishing hummock mosses compared to the spreading of loose fragments. We also found that basically all species under study responded positively to additional sprinkling in terms of height growth if grown in monoculture.

Here, we investigated three different hummock moss species compositions. By comparing growth trajectories, we aim to answer the following questions:

1. How does additional sprinkling during breeding promote growth rates and does it induce shifts in species composition towards predominance of hummock moss species/morphs which are more likely less adaptive to field conditions (e.g. more drought sensitive, less adaptive to mineral-rich waters) and thus less suitable to initiate succession from currently prevailing restoration stages (mostly pioneer stages characterized by less stable conditions) to later successional stages.
2. What are potential implications for larger scale transfer of hummock peat mosses to restoration sites?

1

Methods

Multiplication of diaspores was established in June 2015. Planting bowls (n=24) were filled with low decomposed peat and water level was adjusted closely below surface by using rain water which was previously retained in a reservoir to ensure irrigation throughout the year, in particular during the drier summer periods.

Based on availability of donor material three different mixtures of moss species were prepared and subjected to two treatments, with and without additional sprinkling. Each species mixture treatment combination was run in triplicate. The initial total cover of all moss fragments (TMC_{TUN}) as well as the share of selected species in terms of volume were used to determine initial contribution to total cover (ICTC).

$$ICTC = TMC_{TUN} * \text{volume fraction of species} / 100$$

Monitoring of growth characteristics was conducted after three (September) as well as six months (December). This included again estimates of total moss cover as well as measurements of height increment and counting of capitula for a defined area by distinguishing between three groups: 1) *S. papillosum* (which may also include *S. centrale*), 2) *S. magellanicum*, and 3) *S. capillifolium* (mainly this species, but also other members of the section *Acutifolia* were found, such as *S. rubellum* and *S. warnstorffii*). Contribution of each species to total cover in December was calculated according to following equations.

$$\text{Mixture A: a) } CTC_{Spap} = (DC_{Spap} / (DC_{Spap} + (DC_{Smag} * 1.2))) * TMC$$

$$\text{b) } CTC_{Smag} = TMC - CTC_{Spap}$$

Mixture B & C:

$$\text{a-i) } S. \text{ capillifolium - without sprinkling: } CTC_{Scap-no} = DC_{Scap} / 13.000 * TMC$$

$$\text{a-ii) } S. \text{ capillifolium - with sprinkling: } CTC_{Scap-yes} = DC_{Scap} / 9.800 * TMC$$

$$\text{b) } CTC_{Spap} = (DC_{Spap} / (DC_{Spap} + (DC_{Smag} * 1.2))) * (TMC - CTC_{Scap-no/yes})$$

$$\text{c) } CTC_{Smag} = (DC_{Smag} * 1.2 / (DC_{Spap} + (DC_{Smag} * 1.2))) * (TMC - CTC_{Scap-no/yes})$$

CTC = Contribution to total cover (%); DC = Density of *Sphagnum* (capitula/m²); TMC = Total moss cover (%)

By using species- as well as treatment-specific size factors to translate number of capitula per counted area into the percentage share of total moss cover as a comparable unit we were finally able to calculate shift in species composition after six months of different treatment.

2

Preliminary results

According to calculations, the contribution of species at the beginning of the experiment ranged between 9% and 37% (fig. 1 A-/B-/C-i) and six month later between 11% and 56% (fig. 1 A-/B-/C-iv).

In general, additional sprinkling of hummock moss mixtures during the first six month of donor material production (June–December) leads to a faster increase of total moss cover (fig. 1-A-iv: 93 vs. 88%; -B-iv: 97 vs. 93%; -C-iv: 95 vs. 91%) and moss height (on average 20% higher, fig. 1-A-v–C-v). In most cases, the stronger response correlates well with a more rapid formation of new capitula (fig. 1-A-ii–C-iii). Moreover, as expected sprinkling induces significant shifts in species composition compared to control treatments which did not experience additional water. However, different responses in height growth during the second six month provides first signs that height growth follows different trajectories if additional sprinkling is not being reactivated after winter break. Field observations are needed to further confirm our hypothesis if and how different watering treatments during breeding influences establishment of hummock mosses under field conditions.

Potential reasons and implications for restoration will be presented subsequently.

Acknowledgements

This research was done in cooperation with Stiftung Lebensraum Moor and the company Gramoflor with financially support of the German Federal Environmental Foundation (DBU).

References

- COUWENBERG J. & JOOSTEN H. (2001). Bilanzen um Moorverlust - Das Beispiel Deutschland. In: Succow M. and Joosten H. (eds), Landschaftsökologische Moorkunde. Schweizerbart, Stuttgart, pp. 409-411.
- RAABE P., HÖLZEL N. & KLEINEBECKER T. (2013). Wasserregime und Nährstoffe wiedervernässter Hochmoorflächen in Nordwest-Deutschland - Welche Eigenschaften begünstigen den Renaturierungserfolg? Poster. DGMT Jahrestagung, Freising
- ROSINSKI E. (2012). Renaturierungspotential von industriell abgetorften Hochmoorflächen in Nordwest-Deutschland. Masterarbeit. Institut für Landschaftsökologie. Münster.

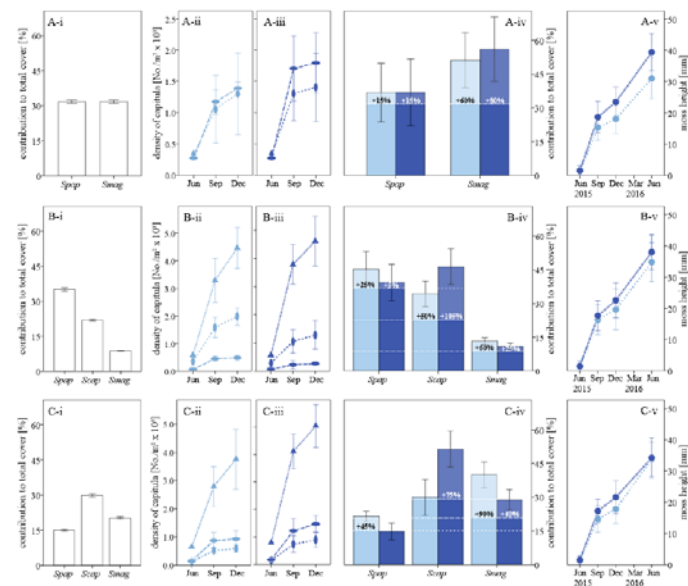


Fig. 1: Initial species composition (-i) as well as respective composition after six month of breeding (-iv; without [bright-blue] and with additional sprinkling [dark-blue]; horizontal lines added as visual aids to compare with initial composition) for three different hummock peatmoss mixtures (A = 50 vol-% *S. papillosum* [*Spap*] + 50 vol-% *S. magellanicum* [*Smag*]; B = 54 vol-% *Spap* + 33 vol-% *S. capillifolium* [*Scap*] + 13 vol-% *Smag*; C = 45 vol-% *Scap* + 32 vol-% *Smag* + 23 vol-% *Spap*), density of capitula (-ii/-iii) shown separately for each species (flat oval = *Smag*; upright oval = *Spap*; triangle = *Scap*) if represented within a mixture (-ii: without; -iii: with sprinkling; note different y-axis scales) and average moss height over a period of 12 months (-v; bright-blue = without; dark-blue = with sprinkling; sprinkling was deactivated during the second six month).



To mix or not to mix – benefits of introducing diverse *Sphagnum* mixtures in bog restoration

Peter Raabe, Norbert Hölzel, Till Kleinebecker, and Klaus-Holger Knorr

Spontaneous recolonization of hummock peat mosses in rewetted cut-over bogs in north-western Germany can rarely be observed. Whether this is either a result of poor site conditions or dispersal limitation has long been questioned. Slow pace of restoration seems here to be a combination of both – mismatch between high ecological requirements of hummock-forming species and very often at least temporarily unfavorable site conditions, as well as generally low level of viable source populations in a widely altered landscape. Recently, field trials have revealed that on numerous existing restoration sites an establishment of selected mosses can successfully be initiated. However, since diaspores of local origin are scarce and protected, propagation of donor material is needed to provide significant amounts for further reintroduction measures to achieve the full potential for ecosystem recovery. With this approach, several questions are being raised, concerning the appropriate use of available species and water.

Therefore, we conducted a cultivation experiment with mainly three different *Sphagnum* species, which were taken from a small local relic population. In a first phase, mosses were multiplied by setting up four different species mixtures. Subsequently two different watering treatments were applied (constant water supply from below, with or without additional sprinkling, by using collected rain water). After a growing period of 18 month (June 2015 – November 2016) biomass accumulation ranged between 425 and 507 g DW m⁻², which corresponds to an increase of 970 % and 1120 % respectively. Measured capitula nitrogen content (ranging between 9.4 and 14.4 mg N g⁻¹) showed a significant negative relationship with biomass accumulation for *S. magellanicum*. In contrast, significant positive relationships became apparent for *S. papillosum* and *S. rubellum*. This fits well as an explanation that species-specific effects of nitrogen on moss growth can induce shifts in species composition. Nonetheless, within each mixture no significant differences could be detected between the watering treatments with regard to both, the entire yield as well as each species share.

Furthermore, during a second phase (June – October 2017) additionally two alternating wet/dry cycles were applied, by simulating supply disruptions at either one- or two-week intervals. Since species mixtures until this point were clearly cultivated under optimal conditions, this was done to test their establishment ability under unstable field conditions. Preliminary results indicate that almost all multispecies combinations maintain high biomass accumulation rates (up to 317 g/m², +68 % in 20 weeks) without significant shifts in species composition, regardless under which watering treatment, while the lowest rates were observed for a mixture containing almost exclusively *S. rubellum* in the treatment with unstable water supply and no additional sprinkling. Thus, species mixtures which contain also *S. magellanicum* and *S. papillosum* possess by far higher potentials to successfully establish at restoration sites with fluctuating water levels. To establish more sensitive species early in the restoration process too, the cultivation of mixtures appears to be the most promising approach.



Raabe, P., Hölzel, N., Kleinebecker, T., Gramann, J., Gramann, G. & K.-H. Knorr

¹ Institute of Landscape Ecology, WWU Münster

² Gramoflor GmbH & Co.KG, Vechta

³ Stiftung Lebensraum Moor, Vechta

To mix or not to mix

Benefits of introducing diverse Sphagnum mixtures in bog restoration

Introduction

Spontaneous recolonization of hummock peat mosses in rewetted cut-over bogs in north-western Germany can rarely be observed. Whether this is either a result of poor site conditions or dispersal limitation has long been questioned. Slow pace of restoration seems here to be a combination of both – mismatch between high ecological requirements of hummock-forming species and very often at least temporarily unfavorable site conditions (particularly hydrological), as well as generally low level of viable source populations to be found in a widely altered landscape. Recently, field trials have revealed that on numerous existing restoration sites an establishment of hummock-forming Sphagnum species can successfully be initiated. However, since dispersal of local origin are scarce and protected, propagation of target species is needed to provide significant amounts of donor material for reintroduction measures to achieve the full potential for ecosystem recovery. With this approach, several questions are being raised, concerning the cultivation of available species in relation to water conditions. Here, we tested if combination of Sphagnum species belonging to different morphological clades has an effect on single- and multi-species productivity, and if different interspecific interactions occur under common practice water supply treatments.

Methods

To study the effects of variation in water availability on compositional changes in hummock peat moss mixtures four species combinations were selected. Donor material contained up to 3 target species, which descended from a small local relic population and were cultivated for 24 month before experiment started (05/15–05/17, Fig. 1). Up to this point, breeding on greenhouse tables included two continuous water supply treatments (supply from below, with and without additional sprinkling) by using rain water (Fig. 2). Thereafter, 6 subtreatments were created and further exposed to 4 periodically varying water supply treatments for 20 weeks to test for effects on productivity as well as interactions between species (Fig. 3–7). Biomass was sampled at the beginning and end of experiment to determine relative productivity rates. To analyse for species interactions in the water treatments, we calculated relative neighbour effects by using relative biomass change of each species growing in the mixtures with different co-occurrence.



Figure 1. Propagation of donor material on greenhouse tables in planting boxes filled with white peat, discolor transfer and transplantation to restoration sites to initiate recolonization of peat-forming vegetation on rewetted cut-over bogs in NW-Germany.

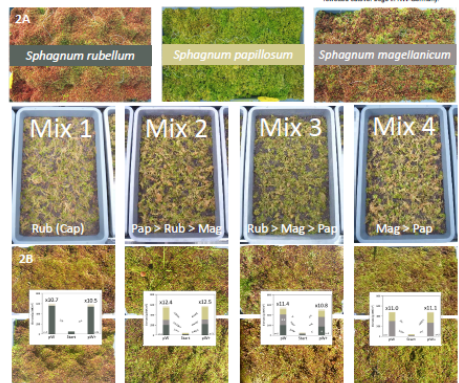


Figure 2. Sphagnum species (A) used for testing mixtures in the experiment. Mix 1 consisted of species belonging to Acutifolia group (mainly *S. rubellum*). Mix 4 was obtained by combination of *S. magellanicum* and *S. papillosum* (Columbium group). Mix 2 and Mix 3 are different combinations of these two species groups. B: Results of previous cultivation under constant water supply conditions, where additional sprinkling had no effect on average total biomass accumulation, but partly significant shifts in species share occurred compared to initial composition (** in Mix 3).

Conclusions

- Propagation of peat moss mixtures is possible in order to provide diverse and resilient donor material for active sod transfer to initiate regeneration of cutover bogs.
- In particular, species which are commonly anticipated to rely on capillary water supply may benefit from co-occurring mosses with higher water-retention capacities, especially under frequently changing water supply conditions.
- If restoration aims to establish more sensitive species, in particular to hydrological variations, early in the regeneration process too, the introduction of functionally diverse mixtures appears to be a promising restoration approach.
- To achieve this, cultivation of Sphagnum mixtures under constant water supply conditions has shown that initial species composition is mostly being preserved.

Results

Biomass production

Under simulated conditions here, the lowest biomass accumulation rates were observed for the Acutifolia mixture (Mix1; mainly *S. rubellum*) in the treatments with unstable water supply and no additional sprinkling. However, biomass increase of *S. rubellum* was generally higher in culture with Sphagnum group species. In contrast, relative production rates of *S. magellanicum* were lower in the mixed cultures with *S. rubellum* than in combination with *S. papillosum* alone. The overall most productive species *S. papillosum* did not show a difference in productivity between species combinations (Fig. 3).

Correlations between relative change in biomass and relative change in species share of single species in given mixtures imply that Sphagnum mosses have to increase biomass by around 50% to maintain a stable share if cultivated together with other species (Fig. 4).

However, the average relative change in biomass of single species within mixtures ranged from +0% for the Acutifolia mixture with unstable water supply (Fig. 6.1b+c) to +60% for the Sphagnum mixture under various water supply conditions (Fig. 6.4a-c).

Species interactions

Out of 60 possible interactions, significant facilitation effects occurred in 12 cases and competitive effects in 7, respectively (Fig. 7A-F). In mixtures, competition occurred mostly for *S. magellanicum*, where 25% of interactions were negative, while facilitation occurred in 6% of cases for *S. papillosum* and in 67% for *S. rubellum*. While *S. rubellum* was facilitated mostly under non-sprinkled conditions, *S. papillosum* was strongly facilitated under permanent water supply with additional sprinkling. Competitive effects on *S. magellanicum* occurred under various water supply conditions, but mostly when growing as the subdominant species.

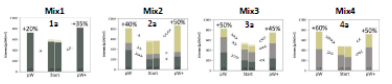


Figure 3. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).

Permanent water supply treatments (pW/pW+)

In general, biomass increase of *S. rubellum* was highest without additional sprinkling (Fig. 5). The greater increase in Mix 2 and Mix 3 compared to Mix 1 (Fig. 6.1a-2a) can be attributed to facilitation by the respective dominant co-occurring species (Fig. 7A).

Reduced growth of *S. magellanicum* in Mix 2 with additional sprinkling (Fig. 6.2a) can be explained by competition with *S. papillosum*, which is promoted by *S. rubellum* (Fig. 7B).

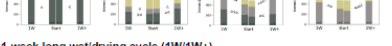


Figure 4. Relation between relative change in biomass and in species share of Sphagnum mosses growing in mixtures.

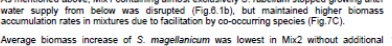


Figure 5. Relative increase in biomass of tested Sphagnum species (RUB = *S. rubellum*; PAP = *S. papillosum*; MAG = *S. magellanicum*) cultivated in different mixtures.

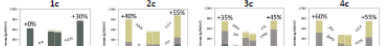


Figure 6. Relative increase in biomass of tested Sphagnum species in relation to different watering treatments.

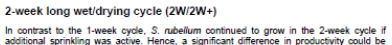


Figure 7. Significant species interactions between co-occurring species in 3-species mixtures (Mix 2, Mix 3) based on the calculation of RNEI proposed by Arns et al. (2004). Black arrows indicate competition; white indicate facilitation.

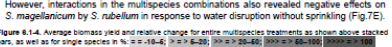


Figure 8. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).

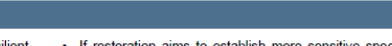


Figure 9. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).

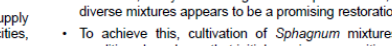


Figure 10. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).



Figure 11. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).



Figure 12. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).



Figure 13. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).



Figure 14. Average biomass yield and relative change for entire multispecies treatments as shown above stacked bars, as well as for single species in % (a-e: 1b-4c). ** indicates significant difference in relative biomass increase between water supply treatments of Mix 1 (Acutifolia).

TELMA	Band 48	Seite 71 - 80	2 Abb., 1 Tab.	Hannover, November 2018
-------	---------	---------------	----------------	-------------------------

Vermehrung und Ansiedlung von Bulttorfmoosen in der Hochmoorrenaturierung – erste Ergebnisse eines Pilotprojekts im Landkreis Vechta (Niedersachsen)

Propagation and establishment of hummock peat mosses in bog restoration – first results of a pilot study in Vechta, Lower Saxony

PETER RAABE, TILL KLEINEBECKER, KLAUS-HOLGER KNORR, NORBERT HÖLZEL und GABRIELA GRAMANN

Zusammenfassung

Seit den 1980er Jahren werden in Nordwestdeutschland industriell abgetorfte Hochmoorflächen als Folgenutzung für die Renaturierung hergerichtet und wiedervernässt. Bei der Mehrzahl dieser Renaturierungsflächen wurde das Ziel einer Hochmoorregeneration jedoch noch nicht erreicht. Gründe dafür sind neben instabilen hydrologischen Bedingungen und teilweise unpassendem Nährstoffniveau vor allem der Mangel an hochmoortypischen Pflanzenarten, insbesondere an Bulte bildenden Torfmoosen, deren spezifische Eigenschaften essentiell für die Regeneration von Hochmooren und deren Ökosystemfunktionen sind. Hauptursache hierfür ist das heute meist vollständige Fehlen von Spenderpopulationen im Umfeld der Abbaufäche. Ein 2015 gestartetes Forschungsprojekt der Stiftung Lebensraum Moor, des Substratherstellers Gramoflor und des Institutes für Landschaftsökologie der WWU Münster zielt darauf ab, die Ausbreitungslimitierung von Bulttorfmoosen durch aktive Ausbringung auf Renaturierungsflächen zu überwinden. Erste Ergebnisse des von der Deutschen Bundesumweltstiftung DBU geförderten Vorhabens werden Ende 2018 in Form einer Handlungsempfehlung für die Vermehrung von seltenen regionalen Bulttorfmoosen publiziert.

Abstract

In northwestern Germany rewetting measures have been carried out since the 1980s to restore raised bogs which were strongly altered by cultivation and peat harvesting. Successful establishment of hummock peat mosses, which form the essential part of peat-forming vegetation, has rarely been observed, but is a prerequisite for the regeneration of bog-typical ecosystem functions. Most relevant constraints are unfavorable abiotic site conditions, but also dispersal limitation because of lacking viable source populations in the immediate surroundings must be considered as an important factor limiting the success of a

restoration project. Here, we report on first results of a research project of Stiftung Lebensraum Moor in cooperation with the company Gramoflor and the University of Münster which aims to develop techniques for the establishment of hummock peat mosses in rewetted cut-over bogs. General recommendations on the propagation of diaspores for providing of donor material in bog restoration will be published by the end of 2018.

1. Einleitung

Obwohl das Wissen zur Renaturierung von Hochmooren spätestens seit den 1990er Jahre kontinuierlich angestiegen ist (TIMMERMANN et al. 2009), steht in Nordwestdeutschland bei der Wiederherstellung abiotischer Standortbedingungen nach Torfabbau bislang die Einleitung und Aufrechterhaltung von Wiedervernässung im Vordergrund (NLWKN 2006). Vielerorts wird eine erfolgreiche Etablierung von Zielarten jedoch auch aufgrund von Diasporen- und Ausbreitungslimitierung erschwert (LAVOIE et al. 2003, HÖLZEL et al. 2009). So zeigt die Praxis, dass die alleinige Wiedervernässung nicht notwendigerweise die Wiederbesiedlung durch hochmoortypische Vegetation zur Folge hat, insbesondere wenn Quellpopulationen der potentiell torfbildenden Hochmoor-Torfmoos-Gesellschaften im direkten Umfeld der Flächen fehlen und über lange Distanzen und Zeiträume zuwandern müssen (NICK 1986, 2001). Eigene Voruntersuchungen bestätigten, dass bisherige Betrachtungszeiträume zu kurz sind, um eine spontane Wiederbesiedlung durch die ökologisch-funktional so bedeutsamen Bulttorfmoose zu beobachten (SIEG et al. 2010). In der Regel geht die Sukzession nach Wiedervernässung auch nach 30 Jahren kaum über ein initiales Stadium aus Wollgräsern (*Eriophorum vaginatum*, *E. angustifolium*) und flutenden Torfmoosen (*Sphagnum cuspidatum*, *S. fallax*) hinaus (ROSINSKI & TILLMANN 2011).

Die aktive Einbringung von Zielarten stellt hierbei eine vielversprechende Möglichkeit dar, die Regeneration von degradierten Hochmooren gezielt zu beschleunigen und wird beispielsweise in Kanada bereits seit geraumer Zeit in frühen Phasen der Renaturierung großflächig praktiziert (QUINTY & ROCHEFORT 2003). Die besondere Bedeutung von Bulttorfmoosen für die Rückgewinnung der Regulationsleistungen von Hochmooren wird dabei vor allem durch ihre Eigenschaft als „ecosystem engineer“ deutlich (VAN BREEMEN 1995). Eine erfolgreiche Etablierung dieser Arten kann daher ausschlaggebend für den weiteren Sukzessionsverlauf sein, wenn es gelingt die bekannten selbstverstärkenden Rückkopplungsmechanismen Wasserspeicherung und Versauerung zu aktivieren (WADDINGTON et al. 2015). Aufgrund des kaum noch vorhandenen Spendermaterials nach Torfabbau (Bunkerde) als auch aufgrund des Fehlens von größeren vitalen Spenderpopulationen im direkten Kontakt zu Renaturierungsflächen, ist in Mitteleuropa wenig über limitierende Faktoren und steuernde Mechanismen bei der Etablierung bekannt (SLIVA & PRADENHAUER 1999; ROBROEK et al. 2009). Erfolgreich erprobte Techniken aus anderen Ländern lassen sich wiederum nur bedingt auf die Gegebenheiten in Nordwestdeutschland übertragen (TUITILA et al. 2003; POULIOT et al. 2011). Die etwa im Vergleich zu Kanada grundsätzlich anderen Bedingungen in Bezug auf Klima, Wasserhaushalt, Substrat

und Nährstoffeintrag sowie der maßgebliche Mangel an Spendermaterial machen die Entwicklung von spezifischen an die regionalen Standortverhältnisse angepassten Etablierungstechniken bei der Hochmoorrenaturierung notwendig (MONEY & WHEELER 1999).

Die Ideen zu den dargestellten Vorhaben wurde im Hinblick auf Realitätsnähe und spätere Umsetzbarkeit bewusst als Kooperation zwischen Renaturierungspraktikern (Stiftung Lebensraum Moor, Gramoflor GmbH & Co. KG) und Wissenschaft (Institut für Landschaftsökologie, WWU Münster) entwickelt. Ausgangspunkt ist die Motivation, durch gezielte Maßnahmen die Etablierung von Bulttorfmoos-Gesellschaften in wiedervernässten Mooren aktiv zu fördern und damit die Entwicklung industriell abgetorfeter Hochmoorflächen zu lebenden, naturnahen Hochmooren zu beschleunigen. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Rahmenbedingungen wird im Projekt vor allem die Überwindung des Diasporen Mangels mittels aktiver Vermehrung und anschließender Einbringung unter unterschiedlichen Wasserstands-, Substrat- und Vegetations-Bedingungen erprobt und wissenschaftlich begleitet. Darauf aufbauend sollen Konzepte und Handlungsempfehlungen zu Vermehrung und Etablierung entwickelt werden, um eine nachhaltig positive Entwicklung der Flächen im Sinne des Moor-, Klima- und Biodiversitätsschutzes zu ermöglichen, die über das durch rechtliche Vorgaben geforderte Maß hinausgehen und die Regeneration hochmoortypischer Lebensgemeinschaften und zentraler Ökosystemfunktionen einleiten.

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse der wissenschaftlichen Begleitung des Projekts fokussieren zunächst auf die Vermehrung von Bulttorfmoosen, ergo die Produktion von Spendermaterial zur Ausbringung auf Renaturierungsflächen (Abb. 1). Ziel ist die Identifikation der wichtigsten Faktoren und Techniken (z.B. bezgl. Bewässerung) für die erfolgreiche Vermehrung von Bulttorfmoosen (Bulte bildende Torfmoose der Gattung *Sphagnum*; z.B. *S. magellanicum*, *S. papillosum*, *S. rubellum*) und ob es diesbezüglich artspezifische Unterschiede gibt.

2. Methoden und Ergebnisse

2.1 Torfmoosvermehrung

In einem Vorversuch wurde der Schwerpunkt zunächst auf die Vermehrung des aus einer kleinen lokalen Quellpopulation entnommenen Arteninventars gelegt, um ausreichende Mengen an Spendermaterial zu generieren. Auf zunächst 20 m² Gewächshausfläche wurden mit Weißtorf gefüllte Schalen mit Fragmenten von 4 Arten versehen. Die Ergebnisse dieser Testreihe bestehend aus zwei Generationen und zwei Beregnungsvarianten sind in Tabelle 1-I zusammengefasst. Infolge unterschiedlicher Ausbringungsmengen, Zerkleinerungsstufen und unterschiedlicher Wasserversorgung waren bei der mittleren Produktivität sowohl innerhalb als auch zwischen den Arten große Unterschiede festzustellen (Tab. 1-I).

Daran anschließend wurden in einem zweiten Vermehrungsexperiment 4 weitere Moosmischungs-Varianten bei konstant hohem Wasserstand getestet. Nach einer Wachstumsperiode von ebenfalls 18 Monaten waren durchschnittliche Biomasserträge zwischen 479 und 616 g TM m⁻² zu verzeichnen, was im Mittel einer Verachtfachung der Ausbringungsmenge pro Jahr entspricht (Tab. 1-IIa). Während innerhalb der ersten 6 Monate annähernd 100 % Moosdeckung erreicht wurden, legte das Höhenwachstum im zweiten Jahr deutlich zu (Abb. 2). Zusätzliche Beregnung beschleunigte vor allem zu Beginn den Deckungsanstieg, was den Vorsprung beregneter Varianten beim Höhenwachstum erklärt. Trotz dieser frühen Unterschiede in Bezug auf Moosdeckung und -höhe infolge einer Zusatzberegnung unterschieden sich die Varianten mit Beregnung in Bezug auf die absolut gebildete Trockenmasse jedoch nur unwesentlich von denen ohne Beregnung bei stabiler Wasserversorgung von unten.



Abb. 1: Torfmoosvermehrung auf Bewässerungstischen und im Freiland zur Produktion von Spendermaterial für aktive Ausbringung auf Renaturierungsflächen. (Fotos © Peter Raabe)
Peat moss propagation on irrigation tables and in the field to produce donor material for bog restoration.

Tab. 1: Übersicht mittlerer Wachstumsraten von auf Bewässerungstischen vermehrten Torfmoosvarianten. Pap = *Sphagnum papillosum*; Mag = *S. magellanicum*; Rub = *S. rubellum*; G = Generation (F1 = aus intakten Soden entnommenes Spendermaterial; F2 = bereits einmal vegetativ vermehrtes Spendermaterial, z.T. gehäcksel); Z = Artenzusammensetzung (bei Mischung); V = Variantenanzahl (mit jeweils 3 Wiederholungen); TM-0 = Ausbringungsmenge (g TM m⁻²); D-14 = Moosdeckung in % nach 14 Monaten; H-14 = Mooshöhe in mm nach 14 M.; TM-18 = Biomasse in g TM m⁻² nach 18 M.; HZ-20 = Höhenzuwachs in mm über 20 Wochen; TM-Z-20 = Trockenmassezuwachs in g TM m⁻² über 20 W.; TM-Z = relativer Trockenmassezuwachs in % über 20 W. NS = Niederschlagssumme; AT = Anzahl Tage mit Tagesmitteltemperatur >2°C; DT = Durchschnittstemperatur über den Zeitraum von AT.

Overview of average growth rates of peat mosses propagated on irrigation tables. Pap = *Sphagnum papillosum*; Mag = *S. magellanicum*; Rub = *S. rubellum*; G = Generation (F1 = donor material from intact moss sods; F2 = donor material which has already been vegetatively propagated, partly chopped); Z = species composition (mixtures); V = number of variants (with 3 repetitions at a time); TM-0 = output (g TM m⁻²); D-14 = moss cover in % after 14 months; H-14 = moss height in mm after 14 months; TM-18 = biomass in g TM m⁻² after 18 months; HZ-20 = height growth in mm during 20 weeks, TM-Z-20 = dry matter growth in g TM m⁻² during 20 weeks; TM-Z = relative dry matter growth in % during 20 weeks; NS = precipitation; AT = number of days with daily mean temperature >2°C; DT = average temperature over the period of AT.

		Testvariante		Wachstumsparameter				
I	Art	G/Z	Bewässerung	V	TM-0	D-14	H-14	TM-18
Vorversuch	Pap (p)	F1	-A: Anstau (instabil)	6	25–30	27–97	5–30	12–339
	Mag (m)	+		6	29–44	47–97	8–49	28–418
	Rub (r)	F2	-B: Anstau (inst.) plus Zusatzberegnung (ZB)	6	31–48	71–99	9–64	166–693
	Mix1	r/m/p		4	28–42	46–95	7–18	82–528
Zyklus I (09/13–03/2015): NS = 1022 mm (ZB: +300 mm); AT >2°C = 503 (90 %); DT = 10.3 °C								
IIa	Art	Z	Bewässerung	V	TM-0	D-14	H-14	TM-18
Moosmischungen	Mix2	m/p	-C: Anstau (stabil)	2	44	>99	46–53	479–482
	Mix3	r/m/p		2	50	>99	48–50	521–549
	Mix4	p/r/m	-D: Anstau (stabil) plus ZB	2	46	>99	49–52	572–575
	Mix5	r		2	57	>99	48–52	602–616
Zyklus IIa (06/15–11/2016): NS = 1028 mm (ZB: +395 mm); AT >2°C = 494 (92 %); DT = 12.7 °C								
IIb	Art	Z	Bewässerung	V	HZ-20	TM-Z-20	TM-Z	
Nass-Trocken-Zyklen	Mix2	m/p	-C/-C+: stabiler Anstau, ohne/mit (+) ZB	6	6–36	233–286	50–62	
	Mix3	r/m/p	-1W/-1W+/-2W/-2W+;	6	8–33	194–301	36–57	
	Mix4	p/r/m	1- bzw. 2-wöchiger Anstau-Wechsel, ohne/mit (+) ZB	6	8–23	118–303	29–53	
	Mix5	r		6	-5–25	5–216	1–36	
Zyklus IIb (06–10/2017): NS = 344 mm (ZB: +140 mm); AT >2°C = 140 (100 %); DT = 16.2 °C								

Aufbauend auf diesen Beobachtungen wurden in einer zweiten Phase von Juni bis Oktober 2017 die Effekte von zwei Nass-Trocken-Zyklen in alternierenden Intervallen von einer bzw. zwei Wochen untersucht. Da sich die konstanten Bedingungen bis zu diesem Zeitpunkt als optimal für eine Vermehrung von Torfmoosmischungen herausstellten, sollte nun ihre Ansiedlungsfähigkeit unter instabilen Freilandbedingungen simuliert und untersucht werden. Die erst teilweise ausgewerteten Ergebnisse lassen bereits jetzt deutlich werden, dass artenreichere Moosmischungen im Gegensatz zu einer Mischung, die fast ausschließlich nur *S. rubellum* enthielt, auch bei häufig wechselnder Wasserversorgung weiterhin hohe Biomasse-Zuwachsraten aufweisen (bis zu 303 g TM m⁻², + 60 % in 20 Wochen, Tab. 1-IIb siehe oben), ohne signifikante Verschiebungen in der Artenzusammensetzung. *S. rubellum* besitzt demnach in Kombination mit *S. magellanicum* und *S. papillosum* ein weit größeres Potential, sich erfolgreich auf Renaturierungsflächen mit fluktuierendem Wasserstand zu etablieren, als in Monokultur. Für eine erfolgreiche Etablierung und Einnischung sensiblerer Arten erscheint die Vermehrung von Artenmischungen vielversprechend.

Welche Aussichten ergeben sich daraus für die Entwicklung von wiedervernässten Torfabauflächen zu lebenden Hochmooren? Hier bedarf es weiterer Untersuchungen, um den Vermehrungsansatz mit Moosmischungen zu optimieren, damit die Wiederansiedlung

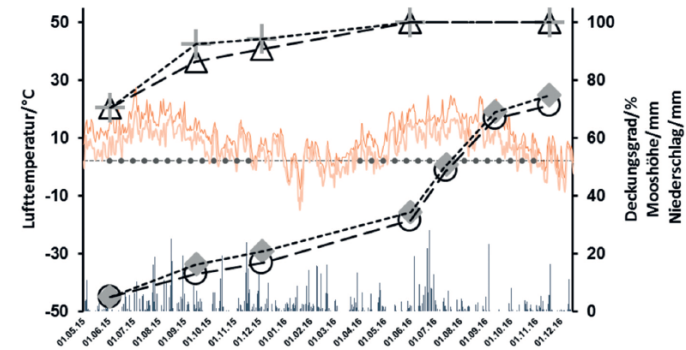


Abb. 2: Mittleres Wachstum der untersuchten Moosmischungen (Mix2–Mix5) mit (grau) und ohne (weiß) Zusatzberegnung. Unterer Verlauf = Mooshöhe; oberer Verlauf = Moosdeckung. Lufttemperatur: dunkel = Tagesmittelwert; hell = Tagestiefstwert. Niederschlagsbalken = Tagessumme; gepunktete Linie = Zeitraum mit aktivierter Zusatzberegnung (1 mm/m²/d). Average growth of investigated moss mixtures (Mix2–Mix5) with (grey) and without (white) additional sprinkling. Lower curve = moss height; upper curve = moss cover. Air temperature: dark = day average; bright = day minimum. Rainfall bar = day total; dotted line = period with additional sprinkling activated (1 mm/m²/d).

von Bultorfmoosen nachhaltigen Erfolg haben kann. Aus diesen und anderen bisher in der Torfmoosvermehrung erzielten Ergebnissen werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, die Ende 2018 erscheinen sollen.

2.2 Etablierungsexperimente im Freiland

Aus dem Artenpool der Torfmoosvermehrung wurden für die Erprobung von Etablierungsverfahren zwei Arten, die sich hinsichtlich Produktivität und ökologischer Potenz (*S. rubellum*, *S. papillosum*) unterscheiden, und eine Moosmischungsvariante ausgewählt und auf zehn in Sukzession befindlichen wiedervernässten ehemaligen Abbauflächen ausgebracht (Abb. 1). Die Flächen unterschieden sich hinsichtlich aktueller Vegetation, Wasserstandsdynamik, Nährstoffniveau, Abbautechnik, Alter und Vormutzung. Die vorhandene Pioniervegetation wurde auf kleiner Fläche beimpft und Ausbringungsform (Sode, lose Fragmente), Artenzusammensetzung (nur bei Sodenform) sowie Menge (nur bei Fragmenten) des Spendermaterials variiert. Insbesondere Effekte der hydrologischen Standortbedingungen auf den Etablierungserfolg wurden unter Beimpfung von Ammenpflanzen (z. B. *Eriophorum vaginatum*) und Torfmoos-Schwingrasen im Vergleich zu weniger günstigen Ansiedlungspunkten getestet. Nach 18 Monaten konnten auf den untersuchten Flächen in 7 % - 69 % der in Sodenform ausgebrachten Fälle ein Etablierungserfolg (i. S. eines positiven Zuwachses) festgestellt werden. Die Ergebnisse variierten vor allem in Abhängigkeit von Standortbedingungen, der Moosvariante sowie der zugrunde gelegten Messmethode (gemessen wurde der Höhen-, Flächen- und Biomassezuwachs).

Diese Etablierungsexperimente verfolgen das Ziel, einen möglichst großen Bereich unterschiedlicher Ausgangsbedingungen abzudecken, um die für eine Ansiedlung von Bultorfmoosen limitierenden Standortfaktoren zu identifizieren und um die Erfolgsaussichten aktiver Einbringungen unter gegenwärtigen Bedingungen besser einschätzen zu können. Im Zuge der über die Dauer der ersten zwei Projektjahre durchgeführten Maßnahmen mit begleitendem Monitoring liegen bereits grundlegende vegetationskundliche, hydrologische und biogeochemische Charakterisierungen der Flächen vor, die für die Einschätzungen der Etablierungschancen auf anderen Flächen mit vergleichbaren Sukzessionsstadien herangezogen werden können.

3. Ausblick

Die bislang auf kleinräumiger Skala gewonnenen Erkenntnisse bezüglich der Voraussetzungen und steuernden Mechanismen für eine erfolgreiche Vermehrung von Bultorfmoosen unter kontrollierbaren Bedingungen und der anschließenden Etablierung auf geeigneten Empfängerflächen, bilden einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der Renaturierungspraxis. Unter günstigen Bedingungen (stabile Wasserversorgung, geringe Nährstoffbelastung) sind innerhalb vergleichsweise kurzer Zeit stabile Erfolge bei Vermehrung und Etablierung festzustellen. Unsere vorläufigen Ergebnisse bestätigen aber

auch, wie stark die hydrologischen Verhältnisse eine Etablierung beeinflussen (RAABE et al. 2016). Darüber hinaus lassen sich sowohl die über längere Zeiträume ablaufenden Interaktionen mit der bereits etablierten Vegetation als auch zwischen den ausgebrachten Moosen noch nicht endgültig abschätzen (RAABE et al. 2018).

Nichtsdestotrotz bilden die erarbeiteten wissenschaftlichen und praktischen Grundlagen und Erfahrungen eine Ausgangsbasis, um den steigenden Ansprüchen an Qualität und Erfolg von Renaturierungsmaßnahmen zu genügen. Es wird daher in einem weiterführenden Projekt ab 2019 die Durchführung und Nachhaltigkeit der aktiven Einbringung von Bultorfmoosen unter praxisnahen Bedingungen überprüft, auch um die Erreichbarkeit von Renaturierungserfolgen besser einschätzen zu können. Gegenstand ist dabei die Kombination von bislang auf kleiner räumlicher und zeitlicher Skala erfolgreich erprobter Etablierungstechniken mit weiterführenden Renaturierungsansätzen, wie der aktiven Gestaltung eines Mikroliefs und die Prüfung optimaler Dimensionen der auszubringenden Moossoden sowie deren räumliche Anordnung in Wiedervernässungsflächen. Unter Nutzung vorhandener Infrastruktur (funktionierende Vermehrungsstationen, eingerichtete Versuchsflächen, existierende Vorinformationen) werden sowohl verschiedene Ausbringungsstrategien weiterentwickelt als auch eine Vermehrung unter Freilandbedingungen in praxisrelevantem größerem Maßstab angestrebt. Wenngleich die Erfüllung wichtiger Etablierungsvoraussetzungen (Flächeneignung, Diasporenverfügbarkeit) einen wesentlichen Erfolgsfaktor darstellt, so wird zuletzt auch die Umsetzbarkeit darüber entscheiden, ob eingeleitete Maßnahmen erfolgreich verlaufen und schließlich in die Praxis der Renaturierung übernommen werden.

Anhand der in beiden Projekten gewonnenen Erkenntnisse sollen im Bereich Moor- und Klimaschutz Wege zur nachhaltigen Regeneration und Erhaltung von Mooren als Kohlenstoffsenken (Klimawandel) und wertvollen Habitaten (Biodiversität) aufgezeigt und so ein relevanter Beitrag zu Moorschutzprogrammen geleistet werden.

4. Literaturverzeichnis

- HÖLZEL, N. mit Beiträgen von REBELE, F., ROSENTHAL, G. & EICHBERG, C. (2009): Ökologische Grundlagen und limitierende Faktoren der Renaturierung. – In: ZERBE, S. & G. WIEGLEB (Hrsg.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa: 23 - 53; Heidelberg (Spektrum Akademischer Verlag).
- LAVOIE, C., GROSVERNIER, P., GIRARD, M. & MARCOUX, K. (2003): Spontaneous revegetation of mined peatlands: An useful restoration tool? – *Wetlands Ecology and Management* **11**: 97-107.
- MONEY, R.P. & WHEELER, B.D. (1999): Some critical questions concerning the restorability of damaged raised bogs. – *Applied Vegetation Science* **2**: 107-116.
- NLWK (2006): 25 Jahre Niedersächsisches Moorschutzprogramm – Eine Bilanz. – *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen* **3**: 150-188.

- NICK, K.-J. (1986): Aussichten der Entwicklung von wiedervernässten Torfabbaulflächen. – *Natur und Landschaft* **61**: 48-50.
- NICK, K.-J. (2001): Ergebnisse und Erkenntnisse aus der Wiedervernässung des Leegmoores. – In: BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrsg.): *Moorregeneration im Leegmoor/Emsland nach Schwarztorfabbau und Wiedervernässung.* – *Angew. Landschaftsökologie* **38**: 163 - 204; Bonn-Bad Godesberg.
- QUINTY, F. & ROCHEFORT, L. (2003): *Peatland Restoration Guide*, second edition. Canadian *Sphagnum* Peat Moss Association and New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Québec; Québec.
- POULIOT, R., ROCHEFORT, L., KAROFELD, E. & MERCIER, C. (2011): Initiation of *Sphagnum* moss hummocks in bogs and the presence of vascular plants: Is there a link? – *Acta Oecologica* **37**: 346-354.
- RAABE, P., BLODAU, C., HÖLZEL, N., KLEINEBECKER, T. & KNORR, K.-H. (2016): Bringing back the rare – biogeochemical constraints of peat moss establishment in restored cut-over bogs. *European Geosciences Union General Assembly*, 17-22 April, Vienna, Austria.
- RAABE, P., HÖLZEL, N., KLEINEBECKER, T. & KNORR, K.-H. (2018): To mix or not to mix – benefits of introducing diverse *Sphagnum* mixtures in bog restoration. *European Geosciences Union General Assembly*, 7-12 April, Vienna, Austria.
- ROBROEK, B.J.M., VAN RUIJVEN, J., SCHOUTEN, M.G.C., BREEUWER, A., CRUSHELL, P.H., BERENDSE, F. & LIMPENS J. (2009): *Sphagnum* re-introduction in degraded peatlands: The effects of aggregation, species identity and water table. – *Basic and Applied Ecology* **10**: 697-706.
- ROSINKSI, E. & TILLMANN, C. (2011): Evaluation der Hochmoorrenaturierung in Süd-Niedersachsen; Münster.
- SIEG, B., KLEINEBECKER, T. & HÖLZEL, N. (2010): Evaluation of large scale bog restoration in north-western Germany – Lessons from 30 years of practice. *Proceedings 7th European Conference on Ecological Restoration*. 23-27 August. Avignon, France.
- SLIVA, J. & PFADENHAUER, J. (1999): Restoration of Cut-Over Raised Bogs in Southern Germany: A Comparison of Methods. *Applied Vegetation Science* **2**: 137-148.
- TIMMERMANN, T., JOOSTEN, H. & SUCCOW, M. (2009): Restaurierung von Mooren. – In: ZERBE S. & G. WIEGLEB (Hrsg.): *Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa*: 55 - 93; Heidelberg (Spektrum).
- TUITILA, E.-S., VASANDER, H. & LAINE, J. (2003): Success of re-introduced *Sphagnum* in cut-away peatland. – *Boreal Environmental Research* **8**: 245-250.
- VAN BREEMEN, N. (1995): How *Sphagnum* bogs down other plants. – *Trends Ecol Evol* **10**: 270-275.
- WADDINGTON, J.M., MORRIS, P.J., KETTRIDGE, N., GRANATH, G., THOMPSON, D.K. & MOORE, P.A. (2015): Hydrological feedbacks in northern peatlands. *Ecology* **8**: 113-127.

Anschriften der Verfasser:

P. Raabe,
 Prof. Dr. K.-H. Knorr,
 Prof. Dr. N. Hölzel
 Institut für Landschaftsökologie
 Westfälische Wilhelms-Universität Münster (WWU)
 Heisenbergstraße 2
 D-48149 Münster
 E-Mail: p.raabe@uni-muenster.de
 E-Mail: kh.knorr@uni-muenster.de
 E-Mail: nhoelzel@uni-muenster.de

Prof. Dr. T. Kleinebecker
 Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement
 Justus-Liebig-Universität Gießen (JLU)
 Heinrich-Buff-Ring 26-32,
 D-35392 Gießen
 E-Mail: till.kleinebecker@umwelt.uni-giessen.de

G. Gramann
 Stiftung Lebensraum Moor
 Tannenhof 16
 D-49377 Vechta
 E-Mail: info@stiftung-lebensraum-moor.de

Manuskript eingegangen am 1. Oktober 2018