

The background of the entire page is a close-up photograph of a dense carpet of bright green moss. Numerous small, dark brown, spherical spore capsules are scattered throughout the moss. Several long, thin, brownish-orange plant stems or roots cross the scene diagonally, adding texture and depth to the image.

Leitfaden
zur Torfmoosvermehrung und
-etablierung für Renaturierungszwecke

Handlungsleitfaden

Erstellt im Rahmen der Gemeinschaftsprojekte

- I. **Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Etablierung von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung, 2015–2019**

- II. **Aktivierung der Hochmoorregeneration durch Ansiedlung von Bulttorfmoosen (AktiMoos), 2019–2022**

der Stiftung Lebensraum Moor mit der Gramoflor GmbH & Co. KG
und dem Institut für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster



Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
und der Stiftung Lebensraum Moor

Autoren:

Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Hölzel, Prof. Dr. Klaus-Holger Knorr, Prof. Dr. Till Kleinebecker,
M. Sc. Peter Raabe, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Gabriela Sofia Gramann,
Stiftung Lebensraum Moor

Weitere Informationen: www.stiftung-lebensraum-moor.de



Inhaltsverzeichnis

8 Teil I: Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Etablierung von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung

8 1 Einleitung

- 8 1.1 Hochmoore als Gegenstand von Renaturierungsbemühungen
- 10 1.2 Defizite bisheriger Renaturierungsmaßnahmen
- 13 1.3 Ursachen der Ausbreitungslimitierung von Bulttorfmoosen
- 16 1.4 Ökosystemare Bedeutung von Bulttorfmoosen
- 18 1.5 Notwendigkeit einer gezielten Einbringung von Bulttorfmoosen
- 19 1.6 Vermehrung von Bulttorfmoosen als Grundvoraussetzung
- 19 1.7 Rechtliche Rahmenbedingungen der Entnahme, Vermehrung und Ausbringung von Bulttorfmoosen

22 2 Auswahl von Vermehrungsmaterial

- 22 2.1 Allgemeine Aspekte
- 25 2.2 Biologisch-ökologische Eigenschaften geeigneter Bulttorfmoosarten
- 29 2.3 Rolle der Herkunft und lokalen Adaption bei Bulttorfmoosen

32 3 Wasser und Substrat

- 32 3.1 Bewässerungstechniken
 - 33 3.1.1 Staubewässerung
 - 34 3.1.2 Überkopfbewässerung
 - 34 3.1.3 Bewässerung im Freiland
- 38 3.2 Wassermengen/Ausbringungszeitpunkt
- 39 3.3 Wasserqualität
- 39 3.4 Vermehrungssubstrate
 - 39 3.4.1 Substrateigenschaften
 - 42 3.4.2 Substrat- und Flächenvorbereitung



- 44** **4** **Ausbringungstechniken zur Vermehrung**
- 44 4.1 Fragmente oder Einzelpflanzen
- 46 4.2 Soden
- 50** **5** **Vermehrungspotenziale in Abhängigkeit von Arteigenschaften und Umweltfaktoren**
- 51 5.1 Umwelteffekte/Steuerungsfunktionen
- 52 5.2 Arteffekte & Interaktionen
- 58** **6** **Beispiele erfolgreicher Vermehrungsanlagen**
- 62** **7** **Entscheidungshilfen zur Anlage einer erfolgreichen Bulttorfmoosvermehrung**

64 **Teil II: Aktivierung der Hochmoorregeneration durch Ansiedlung von Bulttorfmoosen (AktiMoos)**

- 64** **1** **Einleitung: Ausbringung und Etablierung als nächster Schritt nach erfolgreicher Vermehrung**
- 68** **2** **Vegetations-Standortmodell als Grundlage der Maßnahmenplanung**
- 72** **3** **Torfmoosentnahme und -ausbringung**
- 72 3.1 Torfmoosentnahme
- 73 3.1.1 Schlenkentangmoose
- 73 3.1.2 Bulttangmoose
- 76 3.2 Torfmoosausbringung
- 76 3.2.1 Schlenkentangmoose
- 77 3.2.2 Fragmente von Bulttangmoosen
- 79 3.2.3 Transplantate von Bulttangmoosen

84	4	Steuernde Faktoren des Etablierungserfolges
84	4.1	Wasserstand
87	4.2	Substrat
88	4.3	Wasserchemie und Nährstoffe
89	4.4	Umgebende Vegetation
89	4.5	Ausbringungstechnik
90	5	Synthese
94	6	Risiken der Nichtetablierung und flankierende Maßnahmen
98	7	Ausblick
102		Literaturverzeichnis
108		Impressum



Torfabbau und nachfolgende Renaturierung finden heute in Nordwestdeutschland nicht mehr in naturnahen Mooren statt, sondern auf landwirtschaftlich vorgezogenen Restorfkörpern inmitten intensiv genutzter Agrarlandschaften.

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

1 Einleitung

1.1 Hochmoore als Gegenstand von Renaturierungsbemühungen

Die regulativen Funktionen von Mooren und die darauf basierenden Ökosystemdienstleistungen für die Gesellschaft sind im letzten Jahrzehnt vor allem im Zuge der Klimawandeldebatte verstärkt in das Zentrum einer intensiven wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion gerückt (Joosten & Clarke 2002, Millennium Ecosystem Assessment 2005, Kimmel & Mander 2010). Aufgrund der Eigenschaft ungestörter Moore, pflanzliches Material langfristig als Torf festzulegen, sind

Moore global von herausragender Bedeutung als natürliche Senke atmosphärischen Kohlenstoffs (Gorham et al. 2012; Loisel et al. 2014). Moore sind damit ein wichtiges Regulativ, um der Anreicherung des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre und damit der globalen Erwärmung entgegenzuwirken (Limpens et al. 2008; IPCC 2014). Im Umkehrschluss können die gewaltigen Mengen an Kohlenstoff, die im Torf von Mooren gespeichert sind, aber auch zu einer wesentlichen Quelle für Treibhausgase werden, die bei Zerstörung oder Degradation

der Moore freigesetzt werden und die Erderwärmung zusätzlich forcieren (Frolking et al. 2011). Neben ihrer Wirkung auf das Erdklima tragen Moore auf lokaler und regionaler Ebene auch wesentlich zur 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 von besonderer Bedeutung für die Erhaltung der Biodiversität (Couwenberg & Joosten 2005). Daher sind die Wiederherstellung der Lebensgemeinschaften von Mooren und der torfbildenden Prozesse zunehmend Gegenstand von Renaturierungsbemühungen.

In Niedersachsen, dem hochmoorreichsten Bundesland in Deutschland, sind intakte Moore durch Entwässerung mit nachfolgender landwirtschaftlicher Nutzung oder Torfabbau inzwischen fast vollständig, zu weit über 90 %, vernichtet oder stark verändert worden (Couwenberg & Joosten 2001). Im Gegenzug wurden im Rahmen des deutschlandweit ersten Moorschutzprogramms seit den 1980er-Jahren umfangreiche Renaturierungsmaßnahmen in einem Teil der degradierten Moore durchgeführt (NLWKN 2006). Die Renaturierungsmaßnahmen konzentrieren sich bislang schwerpunktmäßig auf die Wiedervernässung, unter anderem durch den Anstau von Entwässerungsgräben sowie den Bau von Verwallungen. Demgegenüber werden derzeit sowohl nährstoffökologische als auch biotische Komponenten bei der Renaturierung von abgetorften Hochmoorflächen nicht oder nur unzureichend

berücksichtigt und die Vorgehensweisen sind lokal teils sehr unterschiedlich. Aufgrund der engen Wechselbeziehungen zwischen Vegetation, Wasserhaushalt und Torfeigenschaften, die in ihrem Zusammenspiel die Ökosystemprozesse in Mooren steuern (Ivanov 1981), sind ganzheitliche Ansätze aber unabdingbar, um wesentliche Funktionen bezüglich Wasser-, Nährstoff- und Kohlenstoffhaushalt sowie der Habitatfunktion in absehbaren Zeiträumen zumindest teilweise wiederherzustellen (Schumann & Joosten 2008). Wie im Nachfolgenden dargelegt, fällt hierbei der Etablierung von hochmoortypischen Bulttorfmoosen aus der Gattung der Torfmoose (*Sphagnum*) eine Schlüsselfunktion zu.



Initiale Wiederbesiedlung einer wiedervernässen Torfabbaufäche mit Scheidigem Wollgras (*Eriophorum vaginatum*) und flutenden Schlenkentorfmoosen (*Sphagnum cuspidatum*)

1.2 Defizite bisheriger Renaturierungsmaßnahmen

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 circa 14 000 h Wiedervernässungsflächen nach Torfabbau; Schmatzler 2015) haben das Ziel einer möglichst vollständigen Hochmoor-Regeneration jedoch bei Weitem

noch nicht erreicht. Voruntersuchungen auf über 50 Wiedervernässungsflächen in Nordwestdeutschland im Rahmen von Studienarbeiten des Instituts für Landschaftsökologie der Universität Münster haben ergeben, dass viele hochmoortypische Pflanzenarten und insbesondere Bulttorfmoose noch nahezu vollständig fehlen. Neben einem oft zu hohen Nährstoffniveau und/oder instabilen hydrologischen Bedingungen (Price & Ketcheson 2009), ist dies wohl vor allem auf die bislang



Nach 20–30 Jahren Sukzession bilden sich unter günstigen Wasserstandsverhältnissen Schwinggrasen aus, die aber noch immer von Scheidigem Wollgras (*Eriophorum angustifolium*, *E. vaginatum*) und den flutenden Schlenkendorfmoosen (*Sphagnum cuspidatum* und *S. fallax*) dominiert werden. Trotz geeigneter Standortbedingungen fehlen Bulttorfmoose und weitere hochmoortypische Gefäßpflanzen (z. B. aus der Familie der Heidekrautgewächse) immer noch vollständig.

nicht geglückte Etablierung vieler hochmoortypischer Arten zurückzuführen (Gorham & Rochefort 2003).

Intakte Moorprofile gliedern sich typischerweise in zwei Schichten: eine obere, meist 10–50 cm mächtige Schicht mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit und unvollständiger Wassersättigung, das sogenannte Akrotelm oder der Torfbildungshorizont, sowie der wassergesättigte, sauerstofffreie Bereich darunter, das Katotelm oder der Torferhaltungshorizont. Im Gegensatz zu stark degradierten Hochmooren weisen intakte, von Natur aus nährstoffarme Hochmoore mit vorhandenem Akrotelm permanent hohe Wasserstände nahe der Geländeoberfläche sowie ein stark saures Milieu mit niedrigen pH-Werten auf (Rydin & Jeglum 2013). Torfmoose regulieren dabei nicht nur die hydrologischen, sondern auch die hydrochemischen Eigenschaften im Moor und schaffen so ein Milieu, das für konkurrierende Vegetation weniger günstig ist. Das Akrotelm muss auf Abtorfungsflächen jedoch erst wieder neu gebildet werden, damit sich gleichbleibend hohe Wasserstände, wie sie bei der Wiedervernässung mit dem Ziel einer Hochmoor-Regeneration angestrebt werden (Timmermann et al. 2009), einstellen können. Bei ganzjährigem Überstau, also zu hohem Wasserstand, siedeln sich hingegen vor allem Schlenkentangmoose wie *S. cuspidatum* und später zunehmend *S. fallax* an (Limpens et al. 2003). Infolge wechselfeuchter Bedingungen oder zu hoher Trophie kommt es häufig zu Problemen durch die Ausbreitung von



Stark schwankende Wasserstände, insbesondere auch eine zu lange und/oder zu häufige Überstauung, die häufig zur Eindämmung von Gehölzaufwuchs praktiziert wird, sind äußerst ungünstig für die Etablierung von Bulttorfmoosen.

konkurrenzkräftigen Gräsern (*Molinia caerulea*, *Juncus effusus*) und Gehölzen (*Betula pubescens*) (Tomassen et al. 2004).

Eigene Voruntersuchungen am Institut für Landschaftsökologie bestätigten, dass Zeiträume von über 30 Jahren nicht ausreichen, um über die Phase der Wiedervernässung und die initiale Besiedlung mit den sehr ausbreitungstüchtigen Arten *Sphagnum cuspidatum* und *Eriophorum vaginatum* hinaus eine weiterreichende Moorregeneration zu initiieren. Besonders gravierend ist dabei das fast vollständige Fehlen von

Bulttorfmoosen, wie beispielsweise *Sphagnum medium*, *S. papillosum* und *S. rubellum*, die als »Ökosystemingenieure« für eine Weiterentwicklung von herausragender Bedeutung sind. Das aktive Einbringen



Neben Bulttorfmoosen zählen die hochmoortypischen Zwergsträucher wie Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*) (im Bild), Moosbeere (*Vaccinium oxycoccos*) und Glockenheide (*Erica tetralix*) zu den Arten, die sich auf renaturierten Torfabbauf lächen auch nach über 30 Jahren meist nicht einstellen.

entsprechender Schlüsselarten bietet eine bislang kaum genutzte Möglichkeit, die Entwicklung von Wiedervernässungsflächen positiv zu beeinflussen (Schumann & Joosten 2008), wie dies beispielsweise in Kanada bereits erfolgreich praktiziert wird (Quinty & Rochefort 2003). Dass eine gezielte Ansiedlung von Bulttorfmoosen in Mitteleuropa bislang kaum Anwendung gefunden hat, ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass – anders als in Kanada – infolge des massiven Rückgangs an Hochmoorlebensräumen kaum noch geeignete Spenderbestände für eine großflächige Übertragung zur Verfügung stehen. Zudem fehlen in Mitteleuropa wissenschaftlich fundierte praktische Erfahrungen zur aktiven Etablierung von Bulttorfmoosen auf Wiedervernässungsflächen. Erfolge aus anderen Ländern lassen sich aufgrund andersartiger naturräumlicher Ausgangsbedingungen nur sehr bedingt auf die Gegebenheiten Nordwestdeutschlands übertragen. Insbesondere liegen kaum Erfahrungen zur künstlichen Vermehrung von Torfmoosen für Renaturierungszwecke vor. Diesem Themenkomplex nahestehende Pilotprojekte waren bislang fast ausschließlich auf den Anbau von Torfmoosen zur wirtschaftlichen Verwertung als Rohstoff für Substrate im Erwerbsgartenbau (»Sphagnum Farming«) fokussiert (Gaudig 2002, Gaudig et al. 2014).

1.3 Ursachen der Ausbreitungslimitierung von Bulttorfmoosen

Obwohl Torfmoose in der Lage sind, eine langlebige Sporenbank mit zehntausenden Individuen auszubilden (Sundberg & Rydin 2000), scheidet diese Form der Etablierung auf Torfabbauflächen aus, da die nach Abbau anstehenden unteren Torfschichten in der Regel mehrere tausend Jahre alt sind und keine keimfähigen Sporen mehr enthalten. Eine Wiederbesiedlung kann dementsprechend ausschließlich von außen durch Zuwanderung erfolgen.

Torfabbau findet in Mitteleuropa heute nicht mehr im Bereich lebender Hochmoore mit vitalen hochmoortypischen Lebensgemeinschaften statt, sondern fast durchweg auf landwirtschaftlich vorgenutzten und mehr oder weniger stark degradierten Resttorfkörpern. Oftmals handelt es sich dabei am Ende des Torfabbaus um eintönige, strukturarme Frästorfflächen in quadratkilometerweiter Ausdehnung, in deren Umfeld bestenfalls sehr kleinflächige, stark isolierte und meist auch degradierte Restvorkommen von hochmoortypischen Lebensgemeinschaften zu finden sind. In der Regel dominiert im Umfeld der Renaturierungsflächen eine intensive landwirtschaftliche Nutzung. Das fast vollständige Fehlen von vitalen Quellpopulationen auf der Landschaftsebene kann als eine Hauptursache dafür angesehen werden, dass sich Bulttorfmoose und andere Hochmoorarten nicht mehr von selbst auf Renaturierungsflächen ansiedeln können. Aber auch unter günstiger Umfeldsituation mit



In den bis auf einen Resthochmoortorfsockel von 50 cm abgetorften Renaturierungsflächen sind aufgrund des hohen Alters der Schwarztorf-Substrate keine Sporen von Torfmoosen oder Samen von hochmoortypischen Gefäßpflanzen mehr enthalten. Aus dem in der Regel landwirtschaftlich intensiv genutzten Umfeld der Renaturierungsflächen ist eine Zuwanderung kaum zu erwarten. Hier sind, wenn überhaupt, nur noch spärliche und oft isolierte Restpopulationen von hochmoortypischen Arten vorhanden. Die Wahrscheinlichkeit, dass von diesen eine Wiederbesiedlung ausgeht, tendiert nahezu gegen Null.

großflächigen und unmittelbar an Abbauflächen angrenzenden naturnahen Hochmooren, wie etwa in Kanada, erfolgt eine spontane Wiederbesiedlung, wenn überhaupt, nur sehr langsam und stark zeitverzögert (Quinty & Rochefort 2003). Obwohl Torfmoose in der Lage sind, eine große Menge an Sporen zu produzieren und diese aufgrund ihrer geringen Größe potenziell sehr effektiv ausbreitet werden können, scheidet eine



Viele Bulttorfmoose bilden in Nordwestdeutschland heute nur noch sehr unregelmäßig Sporen aus (im Bild hier kleine Sporenkapseln von *S. papillosum*). Diese können potenziell massenhaft produziert werden und sind hochmobil. Der Sporenniederschlag dürfte allerdings durch den massiven Flächenrückgang der Hochmoore in Nordwestdeutschland insgesamt drastisch zurückgegangen sein. Eingetragene Sporen von *Sphagnen* stammen heute vermutlich eher aus Südskandinavien oder den britischen Inseln als aus Nordwestdeutschland selbst.

Wiederbesiedlung neuer (Renaturierungs-) Flächen über den Weg der generativen Vermehrung aus zwei Gründen nahezu aus:
 (1) Bei Torfmoosen sinkt die Wahrscheinlichkeit der Sporenbildung mit der Vitalität (Sundberg & Rydin 2002) und der Populationsgröße (Fenton & Bergeron 2006), folglich kann bei den sehr kleinen Restpopulationen von Bulttorfmoosen in Nordwestdeutschland kaum Sporenbildung beobachtet werden.
 (2) Der sich aus einem haploiden Sporen entwickelnde Vorkeim (Protonema) stellt eine äußerst sensible Phase im Generationswechsel der Torfmoose dar, sodass sich unter

nicht vollständig optimalen Bedingungen daraus kaum Moospflanzen entwickeln können (Hajek & Vicherova 2014; Beike et al. 2015). Selbst unter optimalen Bedingungen kommen bei den meisten Arten deutlich weniger als 1 % der Sporen zur Keimung (Sundberg & Rydin 2002). Diese benötigen hierfür lokal leicht erhöhte Phosphat-Gehalte im Substrat (etwa durch Elchdung oder Laubstreu), stabile Feuchteverhältnisse sowie konkurrenzarme Schutzstellen, die vor Austrocknung schützen. Entsprechende Bedingungen für eine erfolgreiche Etablierung der Vorkeimstadien sind gerade im Bereich von größeren Abtorfungen kaum gegeben. In frühen Stadien dürften hier insbesondere die ungünstigen Wasser- und Substratverhältnisse eine erfolgreiche Etablierung vereiteln, während in späteren Phasen der Sukzession die massive Konkurrenz durch Gefäßpflanzen zunehmend von maßgeblicher Bedeutung ist. Das empirisch beobachtete fast vollständige Scheitern der Reetablierung von Bulttorfmoosen auf Renaturierungsflächen ergibt sich daher fast zwangsläufig aus dem Zusammentreffen von stark vermindertem Sporenniederschlag infolge massiver Reduktion von vitalen Sporenquellen durch Habitatzerstörung und ungünstiger Mikrohabitatstruktur auf Abtorfungsflächen in der hochsensiblen Vorkeimphase.

Die vegetative Fortpflanzung, bei der durch einfache Zellteilung oder aus Fragmenten neue Moospflanzen entstehen, spielt bei Torfmoosen auch in der Natur eine bedeutende und vermutlich sogar weitaus größere Rolle



Weder die offenen Frästorfflächen noch die meist stark vergrasteten älteren Renaturierungsstadien mit ihren meist schwankenden Wasserständen bieten geeignete Mikrostandorte für die hochsensible Sporenkeimung bei Torfmoosen. Eine Vermehrung und Ausbreitung erfolgt dementsprechend fast ausschließlich vegetativ.

als die sexuelle Vermehrung (Rydin & Jeglum 2013). Damit Moosfragmente größere Distanzen überbrücken können, bedarf es jedoch eines Ausbreitungsvektors, der Quellpopulationen mit entsprechenden Empfängerflächen verbindet. Die Neu-/Wiederbesiedlung durch Schlenkentangmoose vollzieht sich bei geeigneten Standortbedingungen aus diesem Grund eher oft rasch und kann als unproblematisch eingestuft werden. Hier fungieren vor allem Wasser- und Wattvögel als effektive Ausbreitungsvektoren, die lebende

Moosfragmente auch über größere Distanzen in neu entstandene Lebensräume einbringen können. Für die an trockenere Mikrostandorte angepassten Bulttorfmoose fehlen hingegen vergleichbar effektive Ausbreitungsvektoren, wie sie in der borealen Zone beispielsweise mobile Großsäuger wie Elche und Bären darstellen. Auch beim vegetativen Ausbreitungspfad sinkt die Ausbreitungswahrscheinlichkeit rapide mit der Abnahme potenzieller Quellpopulationen.

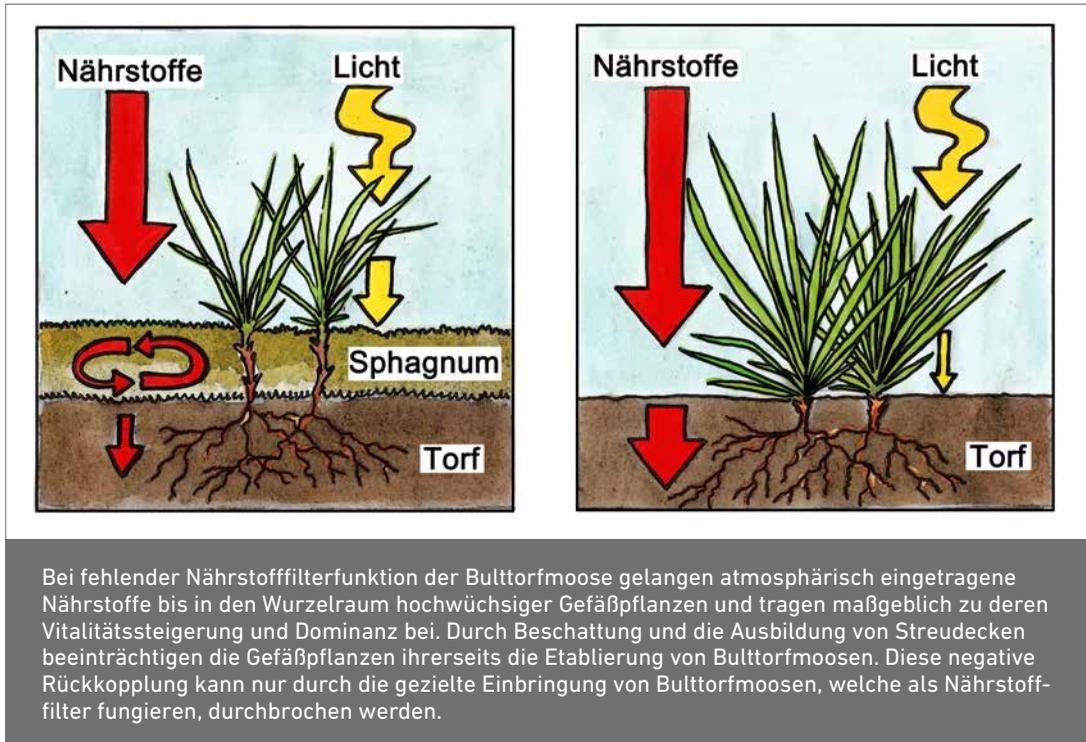


Kompakte Bulttorfmoosdecken (im Bild Mischbestand aus *S. papillosum*, *S. medium* und *S. rubellum* in Vergesellschaftung mit Heidekrautgewächsen) sind von zentraler funktionaler Bedeutung für den Licht-, Wasser- und Nährstoffhaushalt von Hochmooren. Ohne die Etablierung dieser ökologischen Schlüsselarten ist eine nachhaltige und vollständige Renaturierung von Hochmooren nicht möglich.

1.4 Ökosystemare Bedeutung von Bulttorfmoosen

Wie in kaum einem anderen Ökosystem prägen bultbildende Torfmoose den Licht-, Wasser- und Nährstoffhaushalt des Systems Hochmoor und sind als sogenannte »Ökosystemingenieure« von grundlegender Bedeutung für den Erhalt und die Wiederherstellung der ursprünglichen Ökosystemfunktionen von Hochmooren. Ihr Fehlen bedeutet nicht weniger als eine nahezu vollständige Blockade der Weiterentwicklung von Abtorfungsflächen zu einem hochmoorartigen System.

Nur Bulttorfmoose sind in der Lage, die für Hochmoore typische Balance zwischen idealer Wasserdurchlässigkeit auf der einen und hoher Speicherkapazität auf der anderen Seite zu erzeugen. Damit sind sie Schlüsselarten, um ein funktionsfähiges, nicht zu nasses und dennoch hochgradig wasserspeicherndes Akrotelm aufzubauen. Dies ist die Voraussetzung, damit Hochmoore mit ihrer Torfbildung wichtige Ökosystemfunktionen erfüllen, wie etwa die Abpufferung gegenüber hydrologischen Extremen oder die Senkenfunktion für Kohlenstoff. Funktional sind Bulttorfmoose das entscheidende Bindeglied zwischen Atmosphäre, Hydrologie, Torfkörper und Pflanzengemeinschaften im sensiblen Wirkungsgefüge eines Hochmoores und bestimmen maßgeblich dessen Stabilität und Funktionsfähigkeit. Besonders deutlich wird dies auch anhand der Funktion von Bulttorfmoosen als Filter gegenüber atmosphärisch eingetragenen Nährstoffen (Lamers et al. 2000). In intakten Hochmooren mit mehr oder weniger geschlossener Bulttorfmoosdecke nehmen die Torfmoose über die Atmosphäre eingetragene Nährstoffe wie Stickstoff (N), Kalium (K), Kalzium (Ca) und Magnesium (Mg) nahezu vollständig auf und nutzen diese für ihr eigenes Wachstum (Abb. S. 15 links). Nur ein geringer Teil gelangt tiefer in den Boden und steht den dort wurzelnden Gefäßpflanzen zur Verfügung. Die Bulttorfmoose schaffen dadurch für ihre Konkurrenten sehr ungünstige, nährstoffarme und saure Wachstumsbedingungen und reduzieren deren Vitalität im oberirdischen Konkurrenzkampf um



Bei fehlender Nährstofffilterfunktion der Bultorfmoose gelangen atmosphärisch eingetragene Nährstoffe bis in den Wurzelraum hochwüchsiger Gefäßpflanzen und tragen maßgeblich zu deren Vitalitätssteigerung und Dominanz bei. Durch Beschattung und die Ausbildung von Streudecken beeinträchtigen die Gefäßpflanzen ihrerseits die Etablierung von Bultorfmoosen. Diese negative Rückkopplung kann nur durch die gezielte Einbringung von Bultorfmoosen, welche als Nährstofffilter fungieren, durchbrochen werden.

Licht. Infolge der verminderten Vitalität der Gefäßpflanzen besteht für die Torfmoose sogar die Möglichkeit, diese zu überwachen.

Fehlt nun eine durchgängige Schicht aus Bultorfmoosen, so können die eingetragene Nährstoffe ungehindert bis in den Wurzelraum der Gefäßpflanzen vordringen (Lamers et al. 2000) und von diesen aufgenommen werden (Abb. oben rechts). Diese reagieren darauf mit gesteigerter oberirdischer Biomasseproduktion und setzen dadurch Moose und andere

kleinwüchsige Arten einer zunehmenden Lichtkonkurrenz aus. Die massiv gesteigerte Vitalität von Gefäßpflanzen wie *Eriophorum vaginatum*, *E. angustifolium*, *Molinia caerulea* und *Betula pubescens* in Hochmoorrenaturierungsflächen Nordwestdeutschlands ist in großen Teilen auf das Fehlen eines effektiven Nährstofffilters aus Bultorfmoosen zurückzuführen (Tomassen et al. 2003). Die daraus resultierende starke Tendenz zur Vergrasung und Verbuschung mit Birke stellt damit aktuell eines der gravierendsten Probleme



Starke Vergrasung mit *Eriophorum vaginatum*, *E. angustifolium* und *Molinia caerulea* sowie Verbuschung mit Moorbirke (*Betula pubescens*) sind aktuell ein Hauptproblem der Renaturierung von Hochmoor-Ökosystemen auf Torfabbauf Flächen in Nordwestdeutschland. Eine Hauptursache hierfür sind erhöhte atmosphärische Nährstoffeinträge, die infolge des Fehlens der Filterfunktion von Bulttorfmoosen bis in den Wurzelraum der Gräser gelangen.

in der Hochmoorrenaturierung dar und kann im Grunde nur durch die Etablierung von Bulttorfmoosen nachhaltig gelöst werden. Verschärft wird diese Situation durch erhöhte atmosphärische Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft, die teilweise Dimensionen

erreichen, die deutlich über der Filterkapazität einer vitalen Bulttorfmoosdecke liegen (Lamers et al. 2000). Auch vor diesem Hintergrund erscheint es aus ökosystemarer Sicht umso bedeutsamer, die Etablierung von Bulttorfmoosen durch gezielte Einbringung zu unterstützen. Nur so lassen sich die negativen Auswirkungen erhöhter atmosphärischer Nährstoffeinträge wie die nahezu allgegenwärtige Vergrasung und Verbuschung bei der Hochmoorrenaturierung minimieren (Tomassen et al. 2004).

1.5 Notwendigkeit einer gezielten Einbringung von Bulttorfmoosen

Da Bulttorfmoose – wie oben dargelegt – von zentraler funktionaler Bedeutung für Hochmoore sind, kann auch nur durch sie eine annähernd vollständige Renaturierung des Ökosystems Hochmoor eingeleitet werden. Da eine spontane Besiedlung/Etablierung von Wiedervernässungsflächen durch Bulttorfmoose auch nach mehr als 30 Jahren so gut wie nicht feststellbar ist, ist die Überwindung der Ausbreitungslimitierung durch aktive Einbringung eine mögliche Strategie, eine Entwicklung hin zu wachsenden Hochmooren innerhalb überschaubarer Zeiträume anzustoßen. Die aktive Einbringung von Bulttorfmoosen in abgetorfte Flächen ist vor allem auch deshalb sinnvoll, da sich diese *Sphagnum*-Arten selbst geeignete lokale hydrologisch-hydrochemische Bedingungen (Mikrohabitat) schaffen. Durch ihre Fähigkeit der hohen Wasserspeicherung und des kapillaren Wasseraufstiegs werden dauerhaft nasse Bedingungen stabilisiert. Durch die

lokale Versauerung des umgebenden Milieus werden Bedingungen geschaffen, die die Etablierung konkurrierender Arten einschränken oder gar vollständig unterdrücken. Damit wirkt die aktive Einbringung von Bulttorfmoosen auch vielen naturschutzfachlichen Problemen in wiedervernässten Mooren entgegen (z.B. zu variable Wasserstände, starkes Aufkommen von Nicht-Zielarten wie etwa Pfeifengras und Birke). Gleichzeitig können mit der gezielten Etablierung von Bulttorfmoosen bei geeigneten Vermehrungsansätzen viele weitere typische Hochmoorarten mit eingebracht werden, welche von den durch die Bulttorfmoose geschaffenen Mikrohabitatstrukturen profitieren.

1.6 Vermehrung von Bulttorfmoosen als Grundvoraussetzung

Die wenigen Restbestände von Bulttorfmoosen in Nordwestdeutschland lassen es nicht zu, in ausreichendem Umfang Spendermaterial aus existierenden Populationen am Naturstandort für die aktive Einbringung in wiedervernässte Abtorfungsflächen zu gewinnen. Anders als beispielsweise in Skandinavien und Kanada ist aufgrund der Kleinflächigkeit und Seltenheit noch existierender Restpopulationen in weiten Teilen Mitteleuropas eine direkte Entnahme der für Renaturierungsmaßnahmen erforderlichen Mengen an Bulttorfmoosen nahezu ausgeschlossen. Für die Ausbringung von Bulttorfmoosen im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen ist daher eine gezielte Vermehrung des meist sehr begrenzt vorhandenen, regionalen Spendermaterials der einzig gangbare

Weg. Nur hierdurch lässt sich die Entnahme von Individuen aus den kleinen natürlichen Restpopulationen auf ein vertretbares Maß reduzieren. Da Restbestände in der Regel nur noch in Naturschutzgebieten zu finden sind und zusätzlich strengen Artenschutzbestimmungen unterliegen (siehe unten), stellt aber selbst die Gewinnung von geringen Mengen an initialem Spendermaterial zum Zwecke der Vermehrung eine rechtlich sensible logistische Herausforderung dar. Im nachfolgenden Abschnitt soll daher gezielt auf die rechtlichen Rahmenbedingungen einer Entnahme, Vermehrung und Ausbringung von Bulttorfmoosen eingegangen werden.

1.7 Rechtliche Rahmenbedingungen der Entnahme, Vermehrung und Ausbringung von Bulttorfmoosen

Entsprechend massiver Rückgänge im vergangenen Jahrhundert sind zahlreiche Bulttorfmoose heute bereits auf den Roten Listen der meisten Bundesländer vertreten. Darüber hinaus sind alle Arten der Gattung *Sphagnum* in Anhang V der Flora-Fauna-Habitat- (FFH-)Richtlinie aufgeführt und unterliegen damit einer eingeschränkten Nutzung. Die FFH-Richtlinie erlaubt die Nutzung von Arten des Anhangs V unter der Voraussetzung, dass sie mit der Aufrechterhaltung eines günstigen Erhaltungszustandes vereinbar ist. Hierzu sind gegebenenfalls gemäß Artikel 14 der Richtlinie besondere Maßnahmen zu ergreifen. Mögliche Maßnahmen im Sinne der Richtlinie können die Festsetzung einer Entnahmekote, die Einführung eines entsprechenden Genehmigungssystems,

zeitlich oder örtlich begrenzte Entnahmeverbote oder auch die Installation von Nachzucht- und Vermehrungsprogrammen sein. Diese Maßnahmen beinhalten auch die Fortsetzung der Überwachung des günstigen Erhaltungszustandes gemäß Artikel 11.

Die FFH-Richtlinie erlaubt explizit, zu Zwecken der Forschung und des Unterrichts, der Bestandsauffüllung und Wiederansiedlung und der für diesen Zweck erforderlichen Aufzucht, einschließlich der künstlichen Vermehrung von Pflanzen, Ausnahmegenehmigungen zu erteilen. Entnahmen und Ausnahmetatbestände werden in Artikel 14 und 16 der FFH-Richtlinie geregelt.

Die Bestimmungen der FFH-Richtlinie werden im Bundesnaturschutzgesetz unter anderem in §39 (2) umgesetzt und wie folgt weiter geregelt:

§ 39 (2) Vorbehaltlich jagd- oder fischereirechtlicher Bestimmungen ist es verboten, wild lebende Tiere und Pflanzen der in Anhang V der Richtlinie 92/43/EWG aufgeführten Arten aus der Natur zu entnehmen. Die Länder können Ausnahmen von Satz 1 unter den Voraussetzungen des § 45 Absatz 7 oder des Artikels 14 der Richtlinie 92/43/EWG zulassen.

In § 45 Absatz 7 wird gleichfalls explizit auf Entnahme zu Vermehrungszwecken als Ausnahmetatbestand eingegangen:

§ 45 (7) Die nach Landesrecht für Naturschutz und Landschaftspflege zuständigen Behörden – sowie im Fall des Verbringens aus dem Ausland das Bundesamt für Naturschutz – können von den Verboten des § 44 im Einzelfall weitere Ausnahmen zulassen [...] 3. für Zwecke der Forschung, Lehre, Bildung oder Wiederansiedlung oder diesen Zwecken dienende Maßnahmen der Aufzucht oder künstlichen Vermehrung,

In den meisten Ländergesetzen, wie etwa dem Niedersächsischen Ausführungsgesetz zum Bundesnaturschutzgesetz (NAGBNatSchG) vom 19.02.2010, werden die entsprechenden Ausführungen des Bundesnaturschutzgesetzes ohne weitere Ergänzung oder Spezifizierung übernommen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Entnahme von Torfmoosen zum Zwecke der Vermehrung und Wiederansiedlung sowohl nach Bundes- und Landesrecht als auch nach europäischem Recht grundsätzlich möglich ist, im Einzelfall aber jeweils der behördlichen Genehmigung bedarf.



Der volkstümliche Name Bleichenmoos für *Sphagnum* leitet sich aus der Eigenschaft ab, dass Bulttorfmoose bei Austrocknung sehr stark ausbleichen und nahezu weiß erscheinen.

2 Auswahl von Vermehrungsmaterial

2.1 Allgemeine Aspekte

Bei der Auswahl von Hochmoor-Arten aus der Gattung *Sphagnum* sind – neben der Verfügbarkeit von Vermehrungsmaterial – im Hinblick auf den späteren Erfolg geplanter Wiederansiedlungsmaßnahmen vor allem die artenspezifischen Eigenschaften und die Standortansprüche der infrage kommenden Torfmoose von entscheidender Bedeutung. Deswegen sollte die Vermehrung von Zielarten immer mit einem begleitenden Monitoring der vorgesehenen Empfängerflächen einhergehen, um die Erfolgsaussichten

abschätzen und eine standortadäquate Artenauswahl treffen zu können. Von besonderer Relevanz sind ombrotrophente (ihre Nährstoffe vor allem aus den Niederschlägen beziehende) Bulttorfmoose, welche in der Lage sind, eine Sukzession auf periodisch überfluteten, Schlenkenmoos-dominierten Flächen einzuleiten und allmählich aus dem Überflutungsbereich der Schlenken herauszuwachsen. Solche Arten können bis zu einem gewissen Grad Wasserstandsschwankungen mit längeren Trockenphasen und zeitweisem Überstau mit stärker

mineralhaltigem Wasser tolerieren, bis die Akrotelmfunktion sukzessive aufgebaut wurde. Unter den Bulttorfmoosen weist insbesondere *S. papillosum* entsprechende »Pioniereigenschaften« auf, während *S. medium*, *S. rubellum* und *S. capillifolium* als überflutungssensitive Arten eher die höher gelegenen Bereiche der Bulte besiedeln. Weitere ombrotrophente Bulttorfmoose wie *S. angustifolium* sind aktuell in Nordwestdeutschland selten und/oder mengenmäßig von untergeordneter Bedeutung. Sie finden sich gelegentlich als Beimischung in Beständen dominanter Arten.

Auf eine Einbringung flotierender oder Schwingdecken bildender Arten wie *S. cuspidatum* und *S. fallax* kann verzichtet

werden, da es diesen häufigen und ungefährdeten Spezies in der Regel gelingt, Renaturierungsflächen selbständig zu besiedeln. Die genannten Arten ertragen zudem sehr gut etwas höhere Nährstoffniveaus, können aber Gefäßpflanzen kaum effektiv unterdrücken.

Auch häufige minerotrophente (ihre Nährstoffe vor allem aus dem Grundwasser beziehende) Torfmoose wie *S. fimbriatum*, *S. palustre* und *S. squarrosum* gehören nicht zu den engeren Zielarten im Kontext einer Hochmoorrenaturierung und bedürfen daher keiner gezielten Vermehrung.

Unterscheidung von Bulttorfmoosen von Schlenken- und Niedermoorarten

Im Unterschied zu Schlenkentorfmoosen sind Bulttorfmoose in der Lage über den Wasserstand hinaus zu wachsen und Phasen mit absinkenden Wasserständen (Trockenheit) weitgehend unbeschadet zu überdauern.

Im Unterschied zu Niedermoorarten sind Bulte bildende Torfmoose der Hochmoore an extreme Nährstoffarmut angepasst. Daher gelangen sie zur vollständigen Dominanz, sobald Wasser- und Nährstoffzufuhr ausschließlich über den Niederschlag stattfindet.

Tabelle 1: Schutzkategorien potenzieller Zielarten in der Moorrenaturierung. Nach Hassel et al. (2018) handelt es sich bei der ombrotrophenten Ausprägung der vormals in Europa als *S. magellanicum* beschriebenen Art tatsächlich um *S. medium*.

A. Ombrotrophent Bulte bis Rasen		B. Ombro-/Mesotrophent Flotierend, Schwingdecken		C. Minerotrophent Bulte bis Rasen	
<i>S. affine</i>	•••	<i>S. majus</i>	•••	<i>S. subnitens</i>	••
<i>S. fuscum</i>	•••	<i>S. flexuosum</i>	•	<i>S. teres</i>	••
<i>S. molle</i>	••	<i>S. cuspidatum</i>	o	<i>S. centrale</i>	•
<i>S. angustifolium</i>	•	<i>S. fallax</i>	o	<i>S. riparium</i>	•
<i>S. compactum</i>	•			<i>S. warnstorffii</i>	•
<i>S. medium</i>	•	D. Waldmoose		<i>S. fimbriatum</i>	o
<i>S. papillosum</i>	•	<i>S. capillifolium</i>	•	<i>S. palustre</i>	o
<i>S. rubellum</i>	•	<i>S. russowii</i>	o	<i>S. squarrosum</i>	o

Artenschutzkategorien für Nordwestdeutschland nach Meinunger & Schröder (2007), Ökologie nach Hölzer (2010)

••• = RL1, extrem selten, streng geschützt

•• = RL2, sehr selten, besonders geschützt

• = RL3, selten/gefährdet, geschützt; o = häufig/ungefährdet, nicht geschützt

A. Bulte bildende, ombrotrophente Sphagna = Zielarten des Leitfadens, an nährstoffarme Bedingungen angepasste, potenziell Torf bildende Arten

B. Flotierende, Decken bildende Arten = Im Gegensatz zu Bulttorfmoosen geeignet, um auf zeitweise hoch überstauten Flächen wieder angesiedelt zu werden, Mineral- und Nährstofftoleranz variabel

C. Minerotrophente Arten = Zwischen- und Niedermoorarten, die tolerant sind gegenüber Mineralwassereinträgen (basenreicheres Bewässerungswasser)

D. Waldmoose = Arten mit häufigen Vorkommen in schattigen, luftfeuchten Wäldern, die daher schattentolerant sind und für die Wiederansiedlung auf bewaldeten Standorten geeignet sind

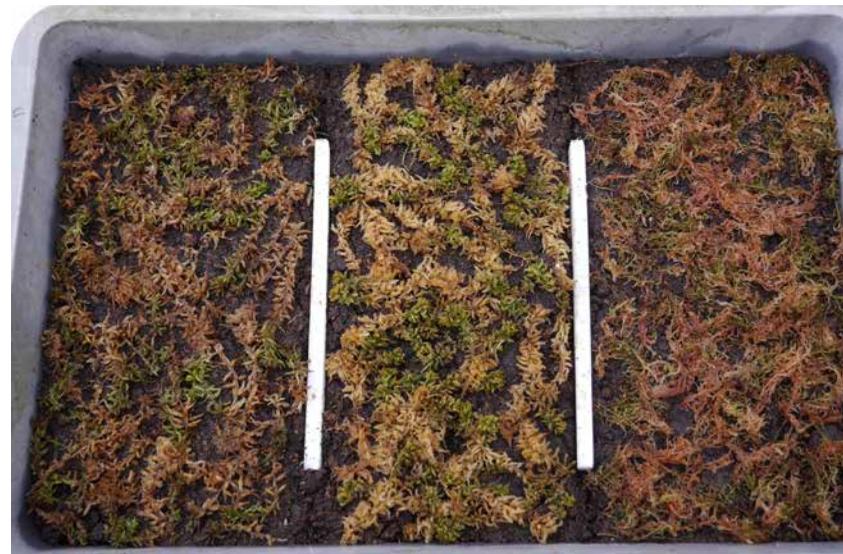
2.2 Biologisch-ökologische Eigenschaften geeigneter Bulttorfmoosarten

Alle Bulttorfmoose haben ihr Optimum unter konstant feuchten Bedingungen, unterscheiden sich jedoch in ihrer Toleranz gegenüber Wasserstandsschwankungen sowie im Nährstoff- und Lichtbedarf. Ein anspruchsvolles Moos, welches stark unter den Auswirkungen von Wasserstress leidet, aber unter optimalen Bedingungen hohe Vermehrungsraten erreicht, ist *S. rubellum*. *S. medium* bevorzugt ebenfalls dauerfeuchte, nicht zu nasse Bedingungen, ist aber deutlich unempfindlicher gegenüber längerem Trockenfallen. Als robusteste der hier getesteten Arten hat sich *S. papillosum* erwiesen. Diese Art zeigt die größte Toleranz gegenüber Wasserstandsschwankungen und Stoffeinträgen und ist damit gegebenenfalls auch unter suboptimalen Bedingungen in der Lage, sich auf einer Wiedervernässungsfläche dauerhaft zu etablieren.

Wie bei allen Moosen sind auch für Arten der Gattung *Sphagnum* gleichmäßige Feuchtebedingungen zur Aufrechterhaltung eines konstanten Wassergehalts der Köpfchen entscheidend für Photosyntheseleistung und damit das Wachstum. Die Selbstregulation der Wasserversorgung erfolgt ausschließlich über die dichte, geschlossene Wuchsform, kapillaren Wasseraufstieg und eine Wasserspeicherung in den tieferen, toten oder nicht mehr photosynthetisch aktiven Pflanzenteilen. Da zu Beginn einer Vermehrung mit losen Fragmenten noch kein kompakter Torfmoosrasen vorliegt, sind die Einzel-

pflanzen und/oder Fragmente bezüglich schwankender Wasserverfügbarkeit besonders empfindlich. Dies ändert sich erst nach einer gewissen Biomasseakkumulation und somit Ausbildung dicht gewachsener, sich selbst stabilisierender Soden.

Im Gegensatz zu Schlenkentorfmoosen besitzen Bulttorfmoose durch ihren kompakten Wuchs und die daraus resultierende



Ausgebrachte Einzelpflanzen und Fragmente in einer Schale mit circa 4 cm Weißtorfunterlage. Durch den eingeschränkten Kontakt mit dem Substrat und da die Moose noch keine sich selbst stabilisierende Einheit als Bult gebildet haben, sind die Moose in diesem Stadium sehr empfindlich. Im gezeigten Beispiel wurden die Arten (von links nach rechts) *Sphagnum medium*, *S. papillosum* und *S. rubellum* separat angezogen, um Einzelartefekte zu untersuchen.



Nach Bildung einer geschlossenen Moosdecke entwickelt sich ein guter kapillarer Aufstieg des Wassers zu den photosynthetisch aktiven grünen Teilen der Pflanzen und die Moose besitzen einen gewissen Puffer gegenüber vorübergehendem Wassermangel. Durch den dichten Wuchs und die Versauerung der Umgebung werden andere Pflanzen unterdrückt.

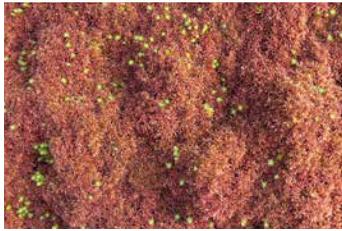
Kapillarität generell eine bessere Fähigkeit, in niederschlagsarmen Phasen auftretenden Trockenstress zu vermeiden. Trotzdem stellen auch sie bei bereits geringfügiger, beziehungsweise kurzzeitiger Unterschreitung des optimalen Wassergehaltes in den Köpfchen (*Capitulae*) ihr Wachstum ein. Bei erneut günstiger Wasserversorgung setzt sich das Wachstum fort und während der Phasen des Stillstandes tritt kaum Zersetzung und Verdichtung ein. Nur bei sehr starker Austrocknung kommt es zur nachhaltigen Schädigung. Ein zu hoher Wasserstand oder gar Überstau, besonders mit ungeeigneten Wasserqualitäten (siehe unten), führt dazu, dass Schlenkentangmoose konkurrenzstärker werden. Somit würde es bei der Vermehrung zu einer Verschiebung der Arten kommen, hin

zu unerwünschten Arten, die unter weniger günstigen Bedingungen im Freiland bereits jetzt Vorteile haben und sich dort oft selbst etablieren.

Für den späteren Etablierungserfolg, aber auch bereits bei der Vermehrung entscheidend ist somit, dass die Pflanzen ihre Fähigkeit der Selbstregulation bezüglich Wassermenge und -qualität entwickeln. Hierdurch werden die vitalen Pflanzenteile an der Oberfläche bei gleichzeitiger Akkumulation abgestorbener Biomasse in tieferen Schichten zunehmend von schwankenden Umwelteinflüssen unabhängig.

Natürlich gilt wie für alle Pflanzen auch bei *Sphagnum*, dass für optimales Wachstum eine ausreichende Beleuchtung und passende Temperaturen gegeben sein müssen. So ist das Wachstum während der Wintermonate stark eingeschränkt und eine Beimpfung der Vermehrungsanlagen im Herbst nicht empfehlenswert (wenig Biomassezuwachs macht die Moose über den Winter anfällig). Dies ist kein Widerspruch zu einer bevorzugten Ausbringung zur Wiederansiedlung im Freiland im Herbst. Im Freiland unter suboptimalen Bedingungen ohne Bewässerung ist der Herbst zu bevorzugen, während bei der Vermehrung durch Bewässerung ein ideales Wachstum im Frühjahr erreicht wird. Für ausreichende Versorgung mit Licht sollten die Vermehrungsanlagen im Freiland nur saisonal bei Bedarf oder, falls Wassermangel zu befürchten ist, mit leichter Beschattung eingerichtet werden.

Tabelle 2: Beschreibung und Bewertung von Zielarten. Basierend auf eigenen Beobachtungen und Angaben in Meinunger & Schröder (2007) und Hölzer (2010). Nach neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen handelt es sich bei der ombrotraphenten Ausprägung der vormals in Europa als *S. magellanicum* beschriebenen Art nun um *S. medium* (Hassel et al. 2018).

<i>S. rubellum</i> »Rötliches Torfmoos«	<i>S. medium</i> »Mittleres Torfmoos«	<i>S. papillosum</i> »Warziges Torfmoos«
		
<p>Ökologische Nische Bult-Fuß/Flanke, Schlenkenrand</p> <p>Eigenschaften Überstau- und austrocknungsempfindlich Gute Kapillarität Hohe Regenerationsfähigkeit</p>	<p>Ökologische Nische Flache Bulte & Teppiche</p> <p>Eigenschaften Azidophyl Niedriger Nährstoffbedarf Austrocknungstolerant Schattentolerant</p>	<p>Ökologische Nische Flutende Rasen & flache Bulte</p> <p>Eigenschaften Toleriert Überstau und mäßigen Mineralwasser- Einfluss Austrocknungstolerant</p>
<p>Bewertung Anspruchsvolle Art, ungeeignet für Standorte mit starken Wasserstandsamplituden und Mineralwassereinfluss</p>	<p>Bewertung Unempfindlich gegenüber längerem Trockenfallen, problematisch bei zu nassen Bedingungen und hohen Stickstoffeinträgen</p>	<p>Bewertung Robuste Art, größte Toleranz gegenüber Austrocknung, Überstau und erhöhten Stoffeinträgen</p>

Bei der Auswahl von Arten zur Bulttorfmoosvermehrung sollten besonders die nachfolgenden Kriterien abgewogen werden:

- Schutzwürdigkeit (Artenschutz) der Quellpopulation <-> Funktionelle Bedeutung in der Zielfläche (Nährstofffilter, Torfbildung)
- Verfügbarkeit (Seltenheit) der Quellpopulation <-> Hohe Vermehrungsraten in der Kultivierung (Multiplizierbarkeit)
- Wasser- und Substratqualität bei der Vermehrung -> Bulte bildende Moose
- wachsen am besten unter ombrotrophen (sauer, mineralstoffarm) und dauerfeuchten Bedingungen
- Aussichten auf nachhaltigen Etablierungserfolg der vermehrten Moose -> Flächen- und managementabhängig (Zielflächen)
- Langfristiges Potenzial zur Reduktion von Methanemissionen und Torfneubildung in Renaturierungsflächen (auf welchen Flächen besteht der größte Handlungsbedarf, wo sind größte Effekte einer Bulttorfmoosetablierung zu erwarten?)

Reduktion der Emissionen des starken Treibhausgases Methan durch Bulttorfmoose

Durch die Wassersättigung entsteht in Mooren auch das vergleichsweise schädliche Treibhausgas Methan. Bei hohen Nährstoffgehalten und unangepasster, leicht zersetzbarer Vegetation (Binsen, einige Seggenarten, v. a. Süßgräser und Kräuter) entsteht in nicht oder nur ungünstig renaturierten Mooren bei hohen Wasserständen vergleichsweise viel Methan, welches in die Atmosphäre entweicht. Auch hier bietet die schwer zersetzbare Streu der *Sphagnen*, insbesondere der Bulttorfmoose, einen wichtigen Vorteil, da sie aufgrund der hohen Stabilität und einer gewissen antimikrobiellen Wirkung (über den hohen Gehalt an Polyphenolen) die Methanbildung niedrig hält. Darüber hinaus bilden Moose der Gattung *Sphagnum* eine Symbiose mit methanoxidierenden Bakterien auf und in den Blättchen. Eine geschlossene Decke aus *Sphagnum*-Moosen kann daher die Methanemissionen aus Mooren deutlich reduzieren und damit die klimaförderliche Wirkung der Bindung von Kohlendioxid aus der Luft weiter verstärken. Im Gegensatz dazu kann ein starker Bewuchs mit Seggen- und Binsenarten zu stark erhöhten Emissionen führen, da diese und andere Arten Luftleitbündel (sogenannte Aerenchyme) in ihren Wurzeln ausbilden, durch die vergleichsweise große Mengen Methan freigesetzt werden.

2.3 Rolle der Herkunft und lokalen Adaption bei Bulttorfmoosen

Wie viele genetische Studien belegen (Stenøien & Såstad 1999, Gunnarson et al. 2005, Mikulaskova et al. 2014, Kyrkjeeide et al. 2016a, Yousefi et al. 2017), zeichnen sich *Sphagnum*-Moose durch eine große lokale genetische Diversität innerhalb von Populationen und eine vergleichsweise geringe genetische Differenzierung zwischen Populationen aus. Letzteres gilt auch über größere geografische Räume hinweg und selbst im kontinentalen Maßstab wie etwa die geringe genetische Differenzierung europäischer und nordamerikanischer Populationen von *S. magellanicum* zeigt (Kyrkjeeide et al. 2016b). Ursachen hierfür sind zum einen ein besonders effektiver großräumiger genetischer Austausch mittels massenhaft produzierter leicht beweglicher Sporen sowie zum anderen eine offenbar gattungstypische langsame Evolution (Stenøien & Såstad 1999). Für die Praxis der Renaturierung und Vermehrung bedeutet dies, dass insbesondere darauf zu achten ist, dass die lokale genetische Diversität und damit die Anpassungsfähigkeit an lokale Umweltgradienten (Wasserstand, pH, Licht) bei der Auswahl von Spendermaterial hinreichend abgebildet wird, während die regionale Differenzierung von weitaus geringerer Bedeutung ist. Gleichwohl empfehlen wir bei Auswahl von Spenderbeständen – analog zu den Regelungen für die Produktion von Regiosaatgut bei Gefäßpflanzen (Prasse et al. 2010) – die für das Regiosaatgut ausgewiesene Herkunftsregion zugrunde zu legen. Im Falle der Vermehrung

von Bulttorfmoosen für Renaturierungszwecke beträfe dies ohnehin fast ausschließlich die Herkunftsregion 1, nordwestdeutsches Tiefland, woraus sich eine gewisse Flexibilität bei der Auswahl und Gewinnung ergäbe. Wie aktuelle genetische Untersuchungen an Grünlandpflanzen belegen, decken die Herkunftsregionen einen erheblichen Teil der regionalen genetischen Variation innerhalb Deutschlands ab (Bucharova et al. 2017, Durka et al. 2017). Bei *Sphagnum* ist basierend auf existierenden populationsgenetischen Studien (z. B. Mikulaskova et al. 2014) insgesamt mit einer weitaus geringeren geografischen Differenzierung als bei den meisten Gefäßpflanzen zu rechnen. Umso wichtiger erscheint es, die lokale genetische Diversität im Material, das in die Vermehrung geht, hinreichend gut zu repräsentieren (Bucharova et al. 2019).

Bei der Sammlung von Vermehrungsmaterial in Freilandpopulationen ist folgendes Vorgehen anzuraten:

- 1) Da es sich bei potenziellen Spenderflächen zumeist um Schutzgebiete handelt, ist vorab eine behördliche Betretungsgenehmigung zu organisieren.
- 2) Vor der geplanten Entnahme ist eine Erkundung und gegebenenfalls eine Kartierung der Vorkommen infrage kommender Torfmoose durchzuführen. Hierbei sollten unbedingt Experten herangezogen werden, die in der Lage sind, *Sphagnen* bis auf Artenniveau sicher zu bestimmen.



Die besonders kompakten Bulte von *S. papillosum* können sowohl oberflächliche Austrocknung als auch kurzfristigen Überstau gut ertragen. Sie sind daher für Renaturierungsflächen mit relativ instabilem Wasserstand besonders geeignet.

- 3) Anschließend ist bei der zuständigen Naturschutzbehörde eine Genehmigung zu erwirken, in der Ort, Art und Umfang der Entnahme für Vermehrungszwecke festgelegt werden.
- 4) Die Sammlung von Spendermaterial sollte auf einer möglichst großen Fläche des Areals der lokalen Population erfolgen, um sicherzustellen, dass möglichst das gesamte Spektrum an lokaler genetischer Differenzierung für die Vermehrung erhalten wird.
- 5) Die Aufsammlung sollte dementsprechend räumlich nicht geklumpt, sondern möglichst stark dispergiert erfolgen.
- 6) Dies kann zum Beispiel erreicht werden, indem entlang von Linientransekten alle 1–2 m aus *Sphagnum*-Polstern Pflanzen entnommen werden. Hierbei können zum Beispiel vorgefertigte Stechzylinder von circa 5 x 5 cm Verwendung finden. Insgesamt sollten pro *Sphagnum*-Polster maximal 10–20 % der Fläche entnommen werden, um die Spenderflächen nicht zu stark zu schädigen.
- 7) Bei der Aufsammlung selbst sollte ebenfalls ein profunder *Sphagnum*-Kenner zugegen sein. Nur dadurch besteht auch die Möglichkeit, das Vermehrungsmaterial getrennt nach dominanten Arten zu sammeln und dadurch später bei der Vermehrung gewünschte Mischungsverhältnisse zu erzeugen.
- 8) Optimalerweise sollten mindestens 3–5 Populationen pro Naturraum besammelt werden, um die gesamte lokale genetische Differenzierung im Vermehrungsmaterial möglichst vollständig zu repräsentieren. Dies gilt insbesondere bei kleineren Populationen, welche möglicherweise bereits genetisch verarmt sind.



Beispielhaftes Vorgehen zur Torfmoosvermehrung auf Bewässerungstischen zur Produktion von Spendermaterial für die aktive Ausbringung: (a) Entnahme; (b) Vereinzelung/Fragmentierung/Portionierung; (c) Ausgebrachte lose Fragmente auf dünner Substratschicht; (d) Angewachsene Moosdecke nach 4 Monaten; (e) Gewachsene, intakte Soden; (f) Beimpfter Horst des Scheidigen Wollgrases in der Renaturierungsfläche



Vermehrungsanlage auf Tischen. Im Vordergrund rechts ist bereits ein deutlicher Biomassezuwachs der Moose zu sehen. Die Ausbringung im Vordergrund links erfolgte kurz vor Aufnahme des Fotos. Dieses Bild zeigt auch die Bewässerungsanlage zur Überkopfbewässerung und die Möglichkeit zur Befestigung von Vogelschutznetzen. Seitlich an den Tischen ist eine Steuerung zur Bewässerung von unten durch kontinuierlichen Anstau zu sehen. Bei den Tischen ist unbedingt auf eine stabile Unterkonstruktion zu achten, da pro Quadratmeter leicht 40–80 kg Auflage zu erwarten sind.

3 Wasser und Substrat

3.1 Bewässerungstechniken

Zur Einstellung einer für die Vermehrung optimalen Substratfeuchte kommen verschiedene Bewässerungsstrategien infrage. Ziel jeder Maßnahme ist eine konstante Wasserversorgung der Pflanzen, insbesondere wenn eine mächtige Torfunterlage fehlt. Eine genaue Regulierung des Wasserspiegels wenige Zentimeter unterhalb der Köpfchen ist dabei vor allem zu Beginn der Vermehrung sehr wichtig. Mit der Entwicklung zu

geschlossenem Torfmoosrasen und zunehmendem Längenwachstum verändert sich im Laufe der Torfmoosvermehrung die Entfernung zum Wasserspiegel. Da sich jedoch auch die Kapillarität der Moosdecke verbessert, muss der Wasserspiegel meist nicht oder nur unwesentlich nachjustiert werden. Zu beachten ist jedoch eine mit zunehmendem Wachstum gesteigerte Boden- und Pflanzenverdunstung.

Geeignete Bewässerungstechniken zur Torfmoosvermehrung

Tischvermehrung	Freilandvermehrung
<p>Vermehrung auf dünner Substratschicht</p> <p><i>Staubbewässerung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Kontrollierter Anstau durch Regulierung mit Schwimmern und Überläufen (zentimetergenau einstellbar) <p><i>Überkopfbewässerung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Sprühschläuche - Nur Regenwasser zu verwenden! <p>Vermehrung auf frischem Substrat</p> <ul style="list-style-type: none"> - Als zusätzliche Option Unterflurbewässerung (im Substrat verlegt) 	<p>Vermehrung auf gewachsenem Torf</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anlage bewässerbarer Beete (mit regulierbarem Wasserzu- und ablauf) - Periodischer Anstau (sog. Ebbe-Flut-Verfahren) - Oberflurbewässerung (Sprüh- oder Tropfschläuche an der Oberfläche)

3.1.1 Staubbewässerung

Die einfachste Methode der Bewässerung ist es, durch einen Überlauf und einen regulierbaren Wasserzulauf einen konstanten Wasserspiegel einzustellen. Dies lässt sich vor allem auf Gewächshaustischen sehr leicht einrichten. Hierzu werden in den Tischen Überläufe für die entsprechende Anstauhöhe angebracht, der Wasserzulauf erfolgt über eine Steuerung mit einem Schwimmer. Für die Steuerung des Zulaufes eignen sich beispielsweise günstige Schwimmereinsätze aus dem Sanitär- oder Gartenbedarf.

Eine konstante Staubbewässerung im Freiland ist oft nur bedingt möglich. Hierzu muss der Untergrund durch Folien abgedichtet sein, um einen Einfluss von chemisch nicht geeignetem Grundwasser zu minimieren und das Bewässerungswasser trotzdem auf der Fläche zu halten. Je nach Größe der Vermehrungsfläche sind unter Umständen mehrere Zu- und Abläufe vorteilhaft. Daher ist für die Freilandvermehrung in der Regel ein größerer Aufwand erforderlich (Flächenmodellierung, Abdichtung, Zuläufe, Abläufe).

Eine Regulierung der Wasserversorgung oder der angebotenen Wassermengen ist auch durch die Anlage einzelner Beete in unterschiedlichen Höhen und durch die Dauer eines regelmäßigen Anstaus zu erreichen (sog. Ebbe-Flut-Verfahren). Aufgrund der sehr variablen Verdunstung kommt es meist zu größeren Schwankungen im Wasserangebot und diese Technik bedarf in der praktischen Anwendung der regelmäßigen Überwachung, um längerfristig ungünstige Bedingungen für die Torfmoose, vor allem in der sensiblen Anfangsphase, zu vermeiden. Zur Minimierung der Wasserverluste kann in der Anfangsphase auch eine dünne Stroh-schicht aufgebracht werden. Insgesamt reduziert ein variables Wasserangebot die Wuchsleistung der Torfmoose gegenüber Verfahren, die eine konstante Steuerung der Bewässerung ermöglichen.

3.1.2 Überkopfbewässerung

Eine Überkopfbewässerung ist bei geeigneter Wasserqualität prinzipiell empfehlenswert. Über eine zeitliche Steuerung werden die losen Fragmente und Torfmoosköpfchen gezielt in den frühen Morgenstunden besprüht, während über den Tag die Wasserversorgung durch moderaten Anstau erfolgen kann, je nach Wasserbedarf und Speicherkapazität der Moos- beziehungsweise Substratschicht.

Wegen des größeren technischen Aufwandes und der hohen Ansprüche an die Wasserqualität sollte die Überkopfbewässerung sehr gezielt und kontrolliert eingesetzt werden. Beispielsweise empfiehlt sich diese Art der

Bewässerung zu Beginn der Vermehrung, solange durch die Einzelpflanzen oder Fragmente noch keine Kapillarität zum Vermehrungssubstrat hergestellt ist. Die Wirkung und Notwendigkeit hängt zudem sehr stark von den Niederschlagsverhältnissen ab. Während in nassen Jahreszeiten darauf verzichtet werden kann, ist in heißen und trockenen Sommern die positive Wirkung umso offensichtlicher zu erkennen. Außerdem kann eine Überkopfbewässerung bei zunehmender Entfernung und nachlassender Kapillarität zum eingestellten Wasserstand bei gleichzeitig hoher Verdunstung sinnvoll sein. In der Regel können Bultorfmoose in diesem Fall aber auch bereits für die Weitervermehrung oder die Etablierung im Freiland geerntet werden.

Wichtig bei der Überkopfbewässerung ist eine einwandfreie Wasserqualität (Regenwasser), da es durch die Verdunstung in der Moosdecke zu einer deutlichen Anreicherung von gelösten Stoffen kommt, die das Wachstum beeinträchtigen können oder gar toxisch wirken. Bei längerer Lagerung des Bewässerungswassers in Tanks oder Bassins kann es zudem zur Entwicklung von Algen kommen, was für die Überkopfbewässerung überaus problematisch und unbedingt zu vermeiden ist.

3.1.3 Bewässerung im Freiland

Generell kommen im Freiland die gleichen Bewässerungstechniken wie bei der Tischvermehrung in Betracht. Für eine genaue Steuerung der Bewässerung insbesondere

bei der Staubewässerung kann es jedoch notwendig sein, die Vermehrungsflächen oder Beete nach unten hin abzudichten, beispielsweise durch Folien. Sonst kann das Wasser häufig nicht auf konstanter Höhe in der Fläche gehalten werden. Zudem vermindert eine Abdichtung bei tiefliegenden Vermehrungsflächen den Einfluss von Grundwasser, das durch zu hohe Mineral- und/oder Nährstofffrachten den Vermehrungserfolg beeinträchtigen kann.

Nach der aufwendigen Ersteinrichtung einer Anstaubewässerung durch Flächenmodellierung und Abdichtung ist auch hier der Aufwand des Betriebs vergleichsweise niedrig und es kann danach meist problemlos eine gleichmäßige Wasserversorgung gewährleistet werden.

Die Bewässerung durch periodischen Anstau (Ebbe-Flut-Verfahren) kann im Freiland günstig sein, wenn die Einrichtung von Beeten/Becken möglich ist, da hierfür nur geringe technische Aufwendungen nötig sind. Der Wasserzulauf kann mit einfachen Rohrleitungen und drehbaren Winkelstücken reguliert werden, ebenso der Ablauf. Da die Versorgung nur periodisch bedient wird, kann dies manuell erfolgen. Die Einrichtung der Becken/Beete ist jedoch unter Umständen mit erheblichem Aufwand verbunden und es sind geeignete Gegebenheiten und entsprechende Zuläufe/Vorräte an Wasser (Teiche o. Ä.) im Gelände erforderlich.



Vermehrungsanlage im Freiland mit Anstaubewässerung in einem durch Folie nach unten abgedichteten Aufbau. Im gezeigten Bild erfolgt die Bewässerung durch im Substrat verlegte Tropfschläuche. Im Vordergrund und im Hintergrund wurden in der gezeigten Anlage größere Mengen Moosmischungen vermehrt. Im mittleren Teil der Anlage wurden Versuche mit Ausbringungsvarianten, Einzelarten und verschiedenen Mischungen in Schalen erprobt.

Eine Sprüh-/Tropfbewässerung oder Beregnung kann als alleinige Bewässerung oder in Kombination mit Anstaubewässerung eingesetzt werden. Wenn ausreichend Wasser vorhanden ist, kann durch entsprechende Bewässerung der Beete ein zu starker Einfluss des Grundwassers zurückgedrängt werden. Meist ist jedoch auch hier zur Verringerung des Wasserbedarfs eine Abdichtung mit Folie sinnvoll. Da die Bewässerung über



Vermehrungsanlage im Freiland mit periodischem Anstau (sog. Ebbe-Flut-Verfahren). Durch die kammerartige Anordnung der Beete kann das Wasser (vorwiegend Regenwasser aus dem benachbarten Speicherbecken, im Bild nicht zu sehen) besonders effektiv zur Bewässerung genutzt werden. Zur Regulierung von Zu- und Ablauf können einfache, drehbare Rohrwinkel genutzt werden.

Schläuche eine Filtration des Bewässerungswassers nötig macht, ist hier mit mehr Aufwand für den Unterhalt des Systems zu rechnen, insbesondere wenn das Wasser aus offenen Speicherbecken gewonnen wird. Wie bei der Überkopfbewässerung auf Tischen ist auch bei der Oberflurbewässerung auf Tischen oder der Beregnung im Freiland eine sehr gute Wasserqualität (Regenwasser) notwendig, da es sonst zur Veralgung oder

gar zu toxischen Effekten durch Anreicherung gelöster Salze und Nährstoffe kommen kann. Gegebenenfalls muss die Beregnung vorübergehend eingestellt werden, wenn die Wasserqualität nicht ausreichend ist. In solchen Fällen ist die Kombination mit einer kontrollierten Staubewässerung hilfreich, da hierdurch über kapillaren Wasseraufstieg weiterhin eine ausreichende Substratfeuchte gewährleistet werden kann.

Tabelle 3: Übersicht zu Bewässerungstechniken

Staubewässerung stabil oberflächennah	Staubewässerung Ebbe/Flut	Überkopfbewässerung/ Zusatzberegnung
Kontinuierliche Wasserversorgung l. d. R. automatisiert von unten über Anstau, z. B. auf Bewässerungstischen, in flachen Becken oder in mit Folie ausgelegten Beeten.	Diskontinuierliche Wasserversorgung. l. d. R. von Hand gesteuert von unten über temporär eingeschaltete Zuläufe.	Zusätzliche Beregnung von oben. l. d. R. wenn ein stabiler Anstau nur begrenzt praktikabel ist (aus Gründen begrenzter Wasserverfügbarkeit bzw. Tragfähigkeit und Dichtheit des Untergrundes).
<p>Vorteile/Zweck Einfache und genaue Regulierung des Wasserstandes. Besonders wichtig bei gering mächtigen Substratauflagen.</p> <p>Nachteile/Probleme Hoher Wasserverbrauch, da permanente Verdunstung. Zwecks optimaler Wasserversorgung sind ebene Oberflächen erforderlich.</p> <p>Optimierung/Lösung Eine sorgfältige Vorbereitung des Substrates und Untergrunds (z. B. auf höhenverstellbaren Tischen) reduziert Wachstumsstörungen. Anlage ausreichend großer Reservoirs sowie Rückführung überschüssigen Wassers vorteilhaft (stark angereichertes Wasser jedoch für die Beregnung ungeeignet).</p>	<p>Vorteile/Zweck Ohne aufwendige technische Installationen umsetzbar. Bei Substraten mit großer Wasserspeicherkapazität sowie in verdunstungsschwachen Perioden meist ausreichend.</p> <p>Nachteile/Probleme Wachstumseinbußen bei häufigem Trockenfallen. Häufigkeit und Intensität des Auftretens abhängig von Substrateigenschaften, Niederschlagsverteilung und Mikroklima. Starke Wasserstandswechsel sind kontraproduktiv.</p> <p>Optimierung/Lösung Ist eine regelmäßige, manuelle Wasserversorgung nicht durchführbar, sollten Beschattungs- oder Windschutzvorkehrungen ergriffen werden.</p>	<p>Vorteile/Zweck Niedriger Wasserverbrauch. Gewichts-entlastung für Tische.</p> <p>Nachteile/Probleme Hoher technischer Aufwand, zudem wartungsintensiv. Einhaltung hoher Wasserqualität wichtig, da ansonsten ein erhöhtes Risiko durch übermäßige Aufnahme von im Beregnungswasser angereicherten Stoffen besteht.</p> <p>Optimierung/Lösung Da die Befeuchtung der Moose vor allem in den frühen Morgenstunden erfolgt, ist zur Aufrechterhaltung hoher Vermehrungsraten auch tagsüber eine ausreichende Wasserversorgung von unten erforderlich. Bei mangelnder Regenwasserqualität kann eine vorübergehende Stilllegung notwendig werden.</p>
<p>Fazit/Empfehlung Aufwendige Erstinstandsetzung. Sobald allerdings funktionaler Betrieb besteht, ist der Aufwand für regelmäßige Kontrollen/Nachjustierungen der Schwimmertechnik und Überläufe geringer als eine manuelle Ebbe-Flut-Praxis.</p>	<p>Fazit/Empfehlung Geeignet für kleine Vermehrungsanlagen. Bei noch nicht geschlossenen Moosdecken und in verdunstungsstarken Perioden sind wechsellrockene Bedingungen zu vermeiden. Bewegliche Rolltische lassen sich witterungsabhängig in den Schatten schieben.</p>	<p>Fazit/Empfehlung Ermöglicht einen effizienten Einsatz verfügbarer Wassermengen und -qualitäten. Insgesamt jedoch mit größerem technischen Aufwand verbunden. Diffizile Regulierung der Wassergaben, um Überversorgungen zu vermeiden, besonders wenn Wasservorrat belastet ist.</p>

Weitere Bewässerungstechniken:

- a. *Anstau in tieferen Becken mit größerer Substratmächtigkeit:* Wasserspeicherung direkt unter Oberfläche möglich. Macht Wassergaben seltener notwendig, dafür erhöhter Materialbedarf pro Vermehrungseinheit. Bereits auf kleiner Skala umsetzbar, zum Beispiel um eine Spenderpopulation zu erhalten.
- b. *Schlauch-/Tröpfchenbewässerung:* Bietet sich für die automatisierte Wasserversorgung kleinerer Vermehrungsanlagen im Freiland an, als Ober- oder Unterflur-Variante. Verlegeabstand und -tiefe der Schläuche sind an Substrateigenschaften (Wasserspeicherkapazität, Kapillarität, Sickerwasserverluste) anzupassen.
- c. *Grabenanstaubewässerung:* Auf größerer Skala umsetzbar als Alternative zu automatisierter Bewässerungstechnik. Für zuverlässige Funktion hohes Maß an Höhenmodellierung erforderlich. Menge und Qualität des Wasserangebotes sowie Regulierbarkeit der Flurabstände entscheidend (in Mangel- wie in Überschusssituationen)

3.2 Wassermengen/Ausbringungszeitpunkt

Die Wasserzufuhr sollte an den jahreszeitlich schwankenden Verbrauch und die Niederschlagsverteilung angepasst werden. Ausreichend große Speicherkapazitäten helfen, um Wassermangel-Situationen vermeiden zu können. Dies ist beispielsweise durch Zisternenanlagen, die über größere Dachflächen aufgefüllt werden, zu realisieren.

Wird über das Sommerhalbjahr ein durchschnittlicher Wasserverbrauch von 20 Litern pro Quadratmeter und Woche für einen stabilen, oberflächennahen Anstau zugrunde gelegt, ist pro Quadratmeter Vermehrungsfläche ein Gesamtwasserbedarf von einem halben Kubikmeter einzukalkulieren. Unter Berücksichtigung der direkten Regenwasserspeisung während dieses Zeitraumes wäre bei einem durchschnittlichen Niederschlag

von 700 mm pro Jahr etwa 0,5 m² Dachfläche ausreichend, um den zusätzlichen Wasserbedarf zur Aufrechterhaltung eines stabilen Anstaus für 1 m² Vermehrungsfläche bedienen zu können. Daher sollte für eine 100 m² große Vermehrungsanlage das Fassungsvermögen einer Zisterne oder eines Speicherbeckens mindestens 35 Kubikmeter betragen.

Vor allem bei einer Ausbringung in einem regenarmen Frühjahr oder Frühsommer ist darauf zu achten, dass der Wasserspeicher bereits aufgefüllt wird, damit eine gleichbleibende Wasserversorgung über die gesamte Wachstumsperiode hinweg sichergestellt werden kann. Bei einer Ausbringung im Herbst wird in der Regel weniger zusätzliches Bewässerungswasser benötigt, jedoch kommt es durch die fallenden Temperaturen auch zu geringeren Zuwachsraten.

3.3 Wasserqualität

Da Bultorfmoose natürlicherweise in ausschließlich oder überwiegend regenwasser- gespeisten Hochmooren vorkommen, ist die Wasserqualität für eine erfolgreiche Vermehrung ein entscheidender Faktor. Eine Bewässerung sollte daher idealerweise mit Regenwasser erfolgen, da nur dieses die für das Vorkommen von Bultorfmoosen notwendige geringe Leitfähigkeit, Härte und Nährstoffkonzentration aufweist. Interessanterweise konnten im Praxisversuch keine negativen Auswirkungen eines erhöhten Stickstoffgehalts des Regenwassers festgestellt werden, wie er typisch für Agrarlandschaften mit intensiver Tierhaltung ist. In Ausnahmefällen kann vorübergehend oder in sehr geringem Umfang auch weiches und gering nährstoffbelastetes Grund- oder Oberflächenwasser beigemischt werden. Dessen Qualität sollte jedoch vor Verwendung eingehend chemisch analysiert werden (pH, elektrische Leitfähigkeit, wenn möglich Ammonium, Nitrat, Phosphat und gelöster organischer Kohlenstoff).

Bei einem zu großen Anteil an Grund- oder Oberflächenwasser kann es zu starken Beeinträchtigungen infolge zu hoher Mineralstoffgehalte kommen. Insbesondere durch Oberflächenwasser werden auch größere Mengen an Algenbiomasse eingetragen, was zu einer starken Veralgung der Anzuchtanlagen führen kann.

3.4 Vermehrungssubstrate

3.4.1 Substrateigenschaften

Schwach zersetzter Hochmoortorf (sog. Weißtorf) ist aufgrund seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften für die Anzucht von Torfmoosen besonders geeignet und sollte die erste Wahl sein, um austrocknungs-empfindlichen, losen Fragmenten eine gleichbleibende Substratfeuchte anzubieten. Stärker zersetzte Torfe erfordern aufgrund ihres geringeren Porenvolumens und der daraus resultierenden geringen Wasserspeicherfähigkeit eine stärkere Kontrolle der Wasserversorgung und Feuchtebedingungen und bergen bei belasteten Standorten die Gefahr der Freisetzung von Nährstoffen.



Eine Substratmischung aus 50 % feinem und mittelgrobem Weißtorf hat sich in der Torfmoosvermehrung bewährt. 40–70 Liter pro Quadratmeter entspricht einer Substratmächtigkeit von 3–5 cm.

Kennzeichnende Parameter zur Beurteilung der Wasserqualität

pH-Wert: Regenwasser als Bewässerungswasser hat typischerweise pH-Werte im leicht sauren Bereich um 5,2. Grundwasser und Oberflächenwasser mit höherer Mineralisierung haben hingegen meist pH-Werte im neutralen Bereich oder leicht darüber (6,5–8)

Elektrische Leitfähigkeit: Werte im Regenwasser liegen meist $<100 \mu\text{S cm}^{-1}$, durch lokale Staubeinträge und Staubdeposition auf Dachflächen werden meist höhere Werte in Zisternenwasser gemessen. Als Ziel sollten die Werte möglichst kleiner als $120\text{--}150 \mu\text{S cm}^{-1}$ sein.

Mineralstoffgehalt: Wichtiger als ein leicht saurer pH-Wert ist eine geringe Mineralisierung, da Bulttorfmoose natürlicherweise nur mit Regenwasser ihren Nährstoffbedarf decken. Die Calciumgehalte des Beregnungswassers sollten $<15 \text{ mg L}^{-1}$ liegen, die Gesamthärte des Wassers $<3^\circ \text{ dH}$ beziehungsweise $<0,55 \text{ mmol L}^{-1}$.

Nährstoffgehalt: Auch hier gilt, dass niedrige Gehalte erstrebenswert sind. Besonders gegenüber zu hohen Stickstoffkonzentrationen sind Bulttorfmoose empfindlich. Nitratkonzentrationen $<3\text{--}4 \text{ mg L}^{-1}$ und Ammoniumkonzentrationen $<1 \text{ mg L}^{-1}$ sollten angestrebt werden. Zu hohe Phosphatkonzentrationen ($>1 \text{ mg L}^{-1}$) sind an sich für Bulttorfmoose nicht problematisch und fördern das Wachstum, führen jedoch meist zu unerwünschtem Algenaufwuchs in der Anzucht und sind daher zu vermeiden.

Gelöster organischer Kohlenstoff: Eine hohe Belastung mit gelöstem organischen Kohlenstoff ist zu vermeiden, da dies meist auf eine ungenügende Wasserqualität hinweist (beispielsweise aus Oberflächengewässern). Eine hohe Trübung verschlechtert ganz erheblich das Wachstum der Torfmoose. Meist geht damit auch eine verstärkte Tendenz zur Veralgung einher.

Torfeigenschaften

physikalisch	chemisch
<p><i>Torfart/Zersetungsgrad</i> Schwach zersetzte Weißtorfe (von Post: H2–H5)</p> <p><i>Partikelgröße</i> Mischung aus 50 % feinen [2–7 mm] und 50 % mittelgroben [7–15 mm] Fraktionen</p> <p>+ Biologische Beikraut- und Schädlingsfreiheit</p> <p>+ Naturreinheit = keine Zusatzstoffe (wie z. B. Perlite)</p>	<p>pH [H2O] 3.4–3.9</p> <p><i>Mineralstoffgehalte</i> Total Ca: 0.3–1.0 Massen-% Total Mg: 0.1–0.2 Massen-% C/Ca: 49–55</p> <p><i>Nährstoffgehalte</i> Total K: 0.03–0.04 Massen-% Total P: 0.02–0.03 Massen-% C/N: 46–50 C/P: 1860–2250 N/P: 38–45 N/K: 25–32</p>

Bei dem verwendeten Substrat ist besonders darauf zu achten, dass es keine unerwünschten Beikräuter enthält, weder in Form lebender Pflanzenteile noch in Form einer Bodensamenbank. Durch den Konkurrenzdruck der Beikräuter würde der Vermehrungserfolg deutlich verringert und zusätzliche Pflegemaßnahmen erforderlich. Ein geeignetes, »sauberes« Substrat ist beispielsweise Weißtorf aus aktiver Abtorfung tieferer, samenfreier Schichten. Bei oberflächennaher Gewinnung müssen zur Reduzierung des Samenpotenzials gegebenenfalls eine Dämpfung des Substrats

durchgeführt oder oberflächennahe Torfe verworfen werden.

Vor allem bei Vermehrung im Freiland muss die auf gewachsenem Torf vorzufindende Situation daher vorab stets kritisch überprüft werden. Gegebenenfalls ist bei belasteten Standorten ein Oberbodenabtrag durchzuführen, um angereicherte Nährstoffe sowie unerwünschte Diasporen und Wurzeln zu entfernen.

3.4.2 Substrat- und Flächenvorbereitung

Für eine gleichbleibende Feuchte über oberflächennahen Anstau ist bereits bei der Anlage der Vermehrungsfläche darauf zu achten, dass eine homogene Substratmächtigkeit und Lagerungsdichte hergestellt wird, um die Entfernung zum Wasserstand optimal einstellen und konstant halten zu können. Eine bewährte Vorgehensweise ist, das Substrat gleichmäßig dick auszubreiten und die Fläche noch vor dem Belegen mit Torfmoosen vollständig mit Wasser zu sättigen. Dadurch lassen sich infolge von Quell- und Sackungsvorgängen entstehende unebene Oberflächen ohne Beeinträchtigung der Fragmente beseitigen. Kleinere Unebenheiten lassen sich durch leichtes Andrücken ausgleichen. Größere Höhenunterschiede können durch glattes Abziehen eingeebnet werden. Zu locker gelagerte Bereiche oder

tiefe Löcher sollten mit zusätzlichem Material aufgefüllt werden, um lokales Einsinken und kümmerlichen Wuchs der Moose zu vermeiden. Besonders bei ungleichmäßiger Substratdicke oder nicht funktionstüchtigen Überläufen kann es stellenweise zu einem nachteiligen Überstau und einer Überversorgung kommen.

Trotz der guten Wasserspeicher- und Leitfähigkeit von Weißtorf ist bei geringmächtigen Auflagen zu berücksichtigen, dass diese bei ausbleibender Wasserversorgung schnell austrocknen können. Insbesondere bei starkem Wasserentzug durch Verdunstung während regenarmer Hitzeperioden im Sommer ist der zusätzliche Wasserbedarf groß und eine Aufrechterhaltung der Versorgung entscheidend, um hohe Vermehrungsraten zu erzielen.

Methoden zur Vermehrung auf Tischen und im Freiland

Tischvermehrung

Vermehrung in Schalen

- Erleichtert die Entnahme und den Transport von gewachsenen Soden
- Prädestiniert für kleinere Mengen

Vermehrung auf Vlies

- Zur Verbesserung der Wasserspeicherkapazität der Substratschicht und großflächigeren Anzucht

Freilandvermehrung

Vermehrung auf gewachsenem Torf

- Nach Oberbodenabtrag (Entfernung von durchwurzeltten und ggf. mit Nährstoffen belasteten Schichten)
- Unebenheiten sind auszugleichen

Vermehrung auf frischem Substrat

- Zum Beispiel auf Folie aufgebrachter Weißtorf



Die Wiederbenetzbarkeit getrockneter Torfe mit Wasser ist stark eingeschränkt. Das Substrat sollte daher erst nach einem Quellvorgang durch intensives Wässern beimpft werden. Wichtig ist, dass das Substrat im wassergesättigten Zustand genügend Stabilität besitzt, um spätere Sackungen und kümmerliches Wachstum der Torfmoose zu vermeiden. Dauerhaft zu nasse Stellen werden bei oberflächennahem Anstau bevorzugt von Algen befallen.

4 Ausbringungstechniken zur Vermehrung

Auf die Frage nach der idealen Ausbringungstechnik gibt es keine allgemeingültigen Antworten. Die Wahl sollte sich nach der Art der Anlage (Dimension, Substrat, Bewässerung) und dem verfügbaren Spendermaterial (Zielarten, Menge) richten sowie nach Möglichkeit sukzessive aufeinander abgestimmt werden.

4.1 Fragmente oder Einzelpflanzen

Die Ausbringung von Torfmoosen zu Renaturierungszwecken in Form von Fragmenten oder Einzelpflanzen wird beispielsweise in Kanada bereits seit Jahren erfolgreich praktiziert. Hierzu werden Fragmente oder einzelne Moose gleichmäßig auf der abgetorften Fläche ausgestreut (Quinty &

Rochefort 2003). Wichtig sind hierbei günstige hydrologische Bedingungen in Form eines gleichmäßigen, hohen Wasserstandes, da die Fragmente und Einzelpflanzen noch nicht hydrologisch an die unterliegenden Torfe angeschlossen sind. Damit ist der kapillare Wasseraufstieg in der Anfangsphase stark eingeschränkt und es besteht die Gefahr der Austrocknung bei vorübergehendem Absinken des Wasserspiegels.

Unter stabilen hydrologischen Bedingungen auf Pflanztischen oder in geeigneten Vermehrungsanlagen im Freiland mit stabiler Wasserversorgung ist dieser Ansatz besonders erfolgversprechend, da hier mit vergleichsweise wenig Material (30–60 g Trockenmasse pro m²) rasch ein geschlossenes Torfmoospolster generiert werden kann. Je nach Art und Startmenge führt die Ausbringung ganzer Fragmente bei optimaler Versorgung nach 6 bis 18 Monaten zu einer vollständigen Bedeckung der Fläche und nach 18 Monaten zu Biomassezuwächsen zwischen 350 und 900 g Trockenmasse pro m².

Versuche mit zerkleinerten Fragmenten (< 1 cm) zeigten, dass die erzielbaren Vermehrungsraten im Vergleich zu ganzen Pflanzen (2–8 cm) deutlich niedriger ausfallen. Besonders Torfmoose aus der Sektion *Sphagnum* reagierten auf eine Zerkleinerung empfindlich. Bei einem Vertreter aus der Sektion *Acutifolia* (*S. rubellum*) zeigten hingegen auch kleine Pflanzenteile eine hohe Regenerationsfähigkeit.



Bultorfmoose und gleichzeitig mit etablierte hochmoortypische Begleitvegetation nach 12 Monaten in der Vermehrung auf Tischen mit Anstaubewässerung und ergänzender Überkopfbewässerung. Die Ausbringung erfolgte hier als Einzelpflanzen. Im Bild ist auch der seitlich angebrachte Windschutz (Bleche) zu erkennen, durch den die Verdunstung bei starkem Wind verringert werden soll.



Eine generelle Anwendung dieser Technik ist daher als selektiv und risikoreich einzustufen, da sie von vielen potenziellen Zielarten nicht toleriert wird. Nur unter optimalen Bedingungen und bei bestimmten Arten genügen bereits kleinste Bruchstücke eines Moores, um daraus neue Pflanzen entstehen zu lassen (Poschlod & Pfadenhauer 1989). Darüberhinaus kann angesichts der langsamen initialen Wachstumsraten kleiner Fragmente nur unter optimalen Bedingungen ausgeschlossen werden, dass sich andere Pflanzengruppen wie Algen und Gräser schneller ausbreiten und die Vermehrung stark beeinträchtigen. Insgesamt birgt das Arbeiten mit zerkleinerten Fragmenten also ein hohes Risiko (vgl. Beike et al. 2015).

Da Moose generell nur begrenzt in der Lage sind ihren Wasserbedarf zu regulieren, kann sich zum Schutz vor Austrocknung von Fragmenten und ganzer Pflanzen eine temporäre Beschattung positiv auswirken. Beispielsweise können zur Verbesserung von Oberflächenfeuchte und Mikroklima eine lockere Strohschicht (200–300 g/m²) oder alternativ auch ein dünnes Textilvlies über die Torfmoose gespannt werden.

4.2 Soden

Die Ausbringung von Bulttorfmoosen zur Vermehrung in Form von Soden erscheint zunächst vielversprechend, da die intakten Soden besseren kapillaren Anschluss an die Wasservorräte bieten und eine vergleichsweise stabile interne Wasserregulierung aufweisen. Da Bulttorfmoose in Sodenform



Vermehrungsschale auf Bewässerungstisch mit zerkleinerten Fragmenten der Art *S. papillosum* (Ausbringungsmenge: 25 g Trockenmasse pro Quadratmeter) zu Beginn der Vermehrung (links) sowie nach 14 Monaten mit starker Algenbildung (rechts)

kürzere Trockenphasen gut überstehen, lassen sich damit Reserven bilden, die bei unregelmäßiger Bewässerung und eingeschränkter Überwachungsmöglichkeit sinnvoll sein können.

Ein entscheidender Nachteil der Ausbringung von Soden liegt darin begründet, dass der größte Zuwachs vor allem auf die Ränder der Soden beschränkt ist und es deutlich länger dauern kann, eine flächige Moosbedeckung zu erreichen. Im Bereich des »Sphagnum Farmings« hat sich daher diese Art der Ausbringung trotz ihrer augenscheinlichen Vorteile nicht durchsetzen können. Für eine weniger auf Zeit und Ertrag ausgerichtete Renaturierung kann der Ansatz bei unstablen Verhältnissen und extensiver Betreuung jedoch durchaus sinnvoll sein.



Beimpfte Freilandvermehrungsfläche mit Fragmenten und Soden mit Bewässerung im Ebbe-Flut-Verfahren. Da bei diesem Verfahren häufiger schwankende Wasserstände auftreten können, kann eine Beimpfung mit in sich stabileren Soden sinnvoll sein.

Tabelle 4: Übersicht Ausbringungstechniken

Lose, ganze Fragmente (Einzelpflanzen mit Capitula)	Zerkleinerte Fragmente (Pflanzenteile/Bruchstücke)	Moosmischungen
Manuelle Vereinzelung der Verzweigungen von gezupftem Material.	Maschinelle Zerkleinerung. Gebräuchlich im Zuge von großflächigen Entnahmen und Ausbringungen.	Kombination von Fragmenten unterschiedlicher Artenzusammensetzung zwecks Vermehrung in Mischkultur.
<p>Vorteile</p> <p>Unbeschädigte, vitale Pflanzen sind für die vegetative Regeneration von großer Bedeutung.</p> <p>Je homogener die Vereinzelung der Pflanzen, desto homogener kann vermischt, portioniert und ausgestreut werden.</p> <p>Nachteile</p> <p>Die Vereinzelung von Hand ist arbeitsintensiv.</p> <p>Zu locker oder stark geklumpt ausgestreuten Fragmenten fehlt der Kontakt zum Substrat.</p>	<p>Vorteile</p> <p>Die Vereinzelung von Hand entfällt.</p> <p>Leichter, großflächiges Ausstreuen in Verbindung mit Maschineneinsatz.</p> <p>Nachteile</p> <p>Bei starker Zerkleinerung (< 1 cm) besteht die Gefahr, dass der Schaden größer ist als der Nutzen bzw. dass intolerante Arten ausgesiebt werden.</p> <p>Regenerationsfähigkeit der Arten variiert stark mit Fragmentlänge und Köpfdichte.</p> <p>Bei permanentem Anstau begünstigen langsame Wachstumsraten die Ausbreitung von Algen.</p>	<p>Vorteile</p> <p>Vielfältige Mischungsverhältnisse sind möglich.</p> <p>Potenziell höhere Anpassungs- und Widerstandsfähigkeit gegenüber stark schwankenden Feuchtebedingungen.</p> <p>Günstigstenfalls gegenseitige Förderung von Arten.</p> <p>Nachteile</p> <p>Trotz optimaler Wasserversorgung können artspezifische Unterschiede in den Zuwachsraten aus ungleichen Ausbringungsverhältnissen in Bezug auf die Anteile lebender Moosköpfchen zu abgestorbenen Stämmchen resultieren.</p>

Weitere Hinweise zu Ausbringungstechniken:

- Leichtes Andrücken der Fragmente oder Einzelpflanzen verbessert den Kontakt zum darunterliegenden Substrat.
- Lose Fragmente sind tendenziell empfindlicher gegenüber Schwankungen in der Wasserversorgung und starker direkter Sonneneinstrahlung.
- Zum Schutz empfindlicher Fragmente und zur Verbesserung des Mikroklimas kann zu Beginn sowie vorübergehend eine Beschattung vorteilhaft sein.
- Anstatt geschlossene Moosdecken zu vereinzeln und flächig als Fragmente auszubreiten, können auch intakte Soden zugeschnitten und punktuell verpflanzt werden. In diesem Fall findet die Ausbreitung jedoch überwiegend lateral statt und ist damit geringer. Die Technik eignet sich insbesondere für die Beimpfung von Vermehrungsfeldern im Freiland mit instabiler Wasserversorgung oder zur Anlage einer Erhaltungszucht/Diasporenbank.

Das Vorgehen bei der Vermehrung richtet sich nach Art und Menge des Spendermaterials, den Substrat- und Wasserqualitäten sowie den Zielen der Vermehrung (Mono- oder Mischkultur, Tisch oder Freilandvermehrung)

<p>1. Entnahme a. Wildbestand b. Erhaltungszucht c. Vermehrungszyklen (abnehmende Naturnähe)</p>	<p>2. Polster vereinzeln (»Fragmentieren«) Je sorgfältiger und schonender, desto besser die Regenerationsfähigkeit. Möglichst hoher Anteil an vitalen Moosköpfchen</p>	<p>3. Ggf. Arten vermischen Bei Entnahme aus verschiedenen Beständen/ Zyklen sind unterschiedliche Wassergehalte und Fragmentlängen zu berücksichtigen</p>
<p>4. Portionieren z.B. 50 g Trockenmasse bzw. 1 000 g Frischmasse pro Quadratmeter (TM:FM-Verhältnis 1:20)</p>	<p>5. Verteilen/Ausstreuen von Hand, solange keine geeigneten Maschinen zur Ausbringung verfügbar</p>	<p>6. Zusätzliche Maßnahmen Locker liegende Fragmente leicht an das Substrat andrücken. Angießen von oben nur mit reinem Regenwasser. Ggf. beschatten</p>



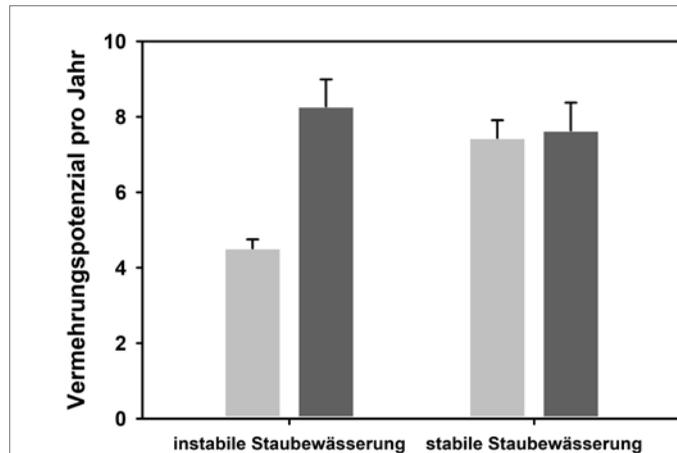
Bei ausbleibender Wasserversorgung an warmen Sommertagen ist einsetzender Trockenstress einfach und schnell am Ausbleichen der Astspitzen zu erkennen.

5 Vermehrungspotenziale in Abhängigkeit von Arteigenschaften und Umweltfaktoren

5.1 Umwelteffekte/Steuerungsfunktionen

Prinzipiell gilt, dass die das Wachstum fördernden oder hemmenden Wirkungen von Umwelteinflüssen abhängig sind von ihrer Intensität und Dauer sowie den Optimal- und Toleranzbereichen der betrachteten Arten sowie begleitenden Interaktionen. Durch viele Studien in kühleren Klimaten ist beispielsweise bekannt, dass unter hydrologisch günstigen Bedingungen die Wachstumsraten von *S. rubellum* ausreichen, um diese Art verhältnismäßig schnell, innerhalb von circa 10–20 Jahren auf zunächst vegetationlosen, renaturierten Torfabbauflächen wiederanzusiedeln (cf. McCarter & Price 2013). Die global betrachtet höchsten Wachstumsraten für *S. papillosum* werden wiederum aus feuchten Klimaten mit langen und warmen Sommern berichtet (Krebs et al. 2016). Zwecks Produktion ausreichender Mengen an Spendermaterial in überschaubaren Zeiträumen (2–3 Vegetationsperioden) ist es daher naheliegend, die im jahreszeitlichen Verlauf Mitteleuropas zeitlich begrenzt auftretenden optimalen Wachstumsbedingungen, wo immer es möglich ist, durch gezielte Bewässerung saisonal auf konstant günstigem Niveau zu halten (v. a. während sommerlicher Trockenphasen) – ähnlich dem »Sphagnum-Farming«. Experimente bestätigen, dass sowohl mit einer Überkopfbewässerung bei instabilem Anstau als auch einer ausschließlichen, dann aber stabilen Wasserzufuhr von unten über Staubewässerung, durchschnittlich etwa doppelt so hohe Vermehrungspotenziale erschlossen werden können als mit einer instabilen Wasserversorgung

(s. Grafik unten). Dies ist auf kontinuierliches Wachstum unter gleichbleibend optimalen Feuchtebedingungen zurückzuführen, da für die Aufrechterhaltung hoher Photosyntheseleistung der Wassergehalt nicht zu stark abfallen sollte. Eigene Feldstudien zeigen, dass die Geschwindigkeit, mit der Torfmoose Kohlenstoff fixieren, besonders in aktiven Phasen stark abgebremst werden kann, sobald der Wassergehalt der Capitula unter 85–80% fällt und die Moose anschließend zunehmend in einen latenten Ruhezustand übergehen.



Vermehrungspotenzial (Vielfache der Ausgangsbiomasse pro Jahr mit 325 Vegetationstagen [Tagesmitteltemperatur > 2 °C]) von Bultorfmoosen (*S. medium*, *S. papillosum* und *S. rubellum* zusammengefasst) mit instabiler (links) und stabiler (rechts) Staubewässerung sowie mit saisonal zusätzlicher Überkopfbewässerung mit aufgefangenem Regenwasser (hell – ohne; dunkel – mit). Die Ergebnisse belegen klar, dass negative Effekte einer instabilen Wasserversorgung von unten durch gezielte Überkopfbewässerung ausgeglichen werden.

Eine zusätzliche Überkopfbewässerung bei stabiler Wasserzufuhr von unten durch Anstau bringt nach vorliegenden Erkenntnissen keine weiteren Vorteile, kann je nach Wasserqualität jedoch zu unerwünschten Artverschiebungen während der Vermehrung führen.

Weitere Umweltfaktoren, die unmittelbaren Einfluss auf den Wasserverbrauch haben, sind die Temperatur in Trockenphasen (insbesondere in heißen Sommern), starker Wind oder hohe Einstrahlung bei trockener Witterung sowie Interaktionen mit Begleitpflanzen (siehe nachstehendes Kapitel).

5.2 Arteffekte & Interaktionen

Je nach Art unterscheiden sich die bei optimaler Wasserversorgung potenziell zu erzielenden Vermehrungsraten und die dafür erforderliche Form der Bewässerung. Versuche mit Monokulturen haben gezeigt, dass eine instabile Stau- mit zusätzlicher Überkopfbewässerung für die Arten *S. rubellum* und *S. medium* sehr gut geeignet ist (Tab. 5). Durch eine Überkopfbewässerung mit simultan stabilem Anstau wurde für *S. papillosum* das größte Vermehrungspotenzial erschlossen, während die zuerst genannten Arten kleinere Wachstumseinbußen zeigten. In Anbetracht der Tatsache, dass eine Überkopfbewässerung häufig technisch nicht möglich ist, sind folglich auch mit einer ausschließlichen Staubewässerung – wenn diese stabil ist – annähernd hohe Vermehrungsraten für alle drei Arten zu erzielen (durchschnittliche Einbußen von 9–16 % im



Vermehrungsanlage auf Tischen mit seitlich angebrachten Blechen als Windschutz zur Reduzierung zu starker Austrocknung. Im gezeigten Beispiel wurden gezielte Versuche mit Einzelarten und Mischungen untersucht, wofür sich die Anlage in einzelnen Schalen besonders eignet.

Vergleich zum jeweiligen artspezifischen Optimum). Unter stabilem Anstau kommt es somit in Mischungen nur zu vernachlässigbaren Verschiebungen in der Artenzusammensetzung, was zum Erhalt möglichst gleichbleibender Anteile der Moosarten an der Mischung beiträgt.

Zeitweise Überversorgung durch zusätzliche Überkopfbewässerung bei stabilem oder

nur permanent hohem Anstau (< 1 cm unter Geländeoberfläche GOF) kann sich in erster Linie für *S. medium* und *S. rubellum* im Vergleich zur optimalen Bewässerung (2–4 cm unter GOF) stärker negativ auswirken (Einbußen von 22–26 %), während bei *S. papillosum* nur geringfügige Einbußen zu erwarten sind (minus 9 %). Demzufolge sind bei Überversorgung stärkere Verschiebungen in der Artenzusammensetzung möglich.



Die Fähigkeit, neue Köpfchen zu bilden, welche sich durch Längenwachstum der Stämmchen zunehmend verzweigen und bei vertikalem Wuchs dicht anordnen, ist ein wesentliches Merkmal erfolgreicher vegetativer Vermehrung. Hier zu sehen sind (a) *S. papillosum*, (b) *S. medium* und (c) *S. rubellum*.

Bei allen getesteten Bulttorfmoosen gleichermaßen treten jedoch die mit Abstand stärksten Wachstumseinbußen bei Trockenstress infolge zeitweiligen Wassermangels bei instabilem Anstau auf (Einbußen von 42–70 %). In der Praxis der Vermehrung haben sich häufige Wechsel zwischen Nass- und Trockenphasen als besonders ungünstig für *S. rubellum* erwiesen (Raabe et al. 2018). Um Wassermangelsituationen vorzubeugen, bieten sich gerade bei dieser Art zusätzliche Maßnahmen zur Herabsetzung der bodennahen Temperaturen und der Austrocknung durch Wind an (z.B. temporäre Beschattung, Strohbedeckung, seitlicher Windschutz).

Tabelle 5: Artspezifische potenzielle Vermehrungsraten pro Jahr (a); als Vielfaches der Ausgangsbiomasse (bei Ausbringungsmengen von 30–60 g Trockenmasse pro Quadratmeter) von *Sphagnum*-Monokulturen unter optimaler Wasserversorgung (a): *S. rubellum* & *S. medium* = Instabile Stau- plus Überkopfbewässerung; *S. papillosum* = stabile Stau- plus Überkopfbewässerung) und (b–d) darauf bezogene durchschnittliche prozentuale Einbußen der Vermehrungsraten unter suboptimalen Bewässerungstechniken

	<i>S. rubellum</i>	<i>S. medium</i>	<i>S. papillosum</i>
a) Optimale Versorgung	9–11	7–8	7–9
b) Stabile Staubewässerung	<–20–10 %	<–10 %	<–20–10 %
c) Zeitweise Überversorgung	<–30–20 %	<–30–20 %	<–10 %
d) Zeitweiser Wassermangel	>–50 %	<–50–40 %	<–50–40 %

Eine Aufrechterhaltung hoher Vermehrungsraten bei besonders schnell austrocknenden Arten lässt sich weiterhin durch eine gemeinsame Anzucht mit stärker wasserspeichernden Moosen oder durch begleitende Gefäßpflanzen erreichen. Für *S. rubellum* konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass die Anwesenheit weiterer Arten wie *S. papillosum* und *S. medium* ausreicht, um den eigenen Wasserbedarf während 1- bis 2-wöchiger Trockenphasen decken zu können, während Monokulturen keinerlei Zuwachs verzeichneten (Raabe et al. 2018). Als sogenannte »Ammenpflanzen« können grasartige Gefäßpflanzen wiederum bis zu einem gewissen Grad das Mikroklima ebenfalls positiv beeinflussen, indem sie Schatten spenden und darüber hinaus als Kletterhilfen dienen

(Sliva & Pfadenhauer 1999). Bei zu starker Beschattung in Verbindung mit hoher Wasserverfügbarkeit können jedoch besonders die an Volllicht adaptierten Bulttorfmoose (z. B. *S. papillosum*, *S. rubellum*) zur Ausdünnung (genannt Etiolierung) neigen und werden dadurch anfälliger für Trockenschäden bei mangelnder Wasserverfügbarkeit (Clymo 1973).

Die schnelle Erreichung einer kompakten Wuchsform durch von Beginn an gesunden und kräftigen Wuchs der ausgestreuten Fragmente hat nach bisherigen Erfahrungen entscheidenden Anteil daran, dass Bulttorfmoose zeitweise auftretende Trockenphasen zunehmend besser überstehen. Sobald eine geschlossene, kompakte Moosdecke (> 95 % Deckung; ab circa 3 cm Mooshöhe) erreicht

wurde, können zugeführte Wassermengen schließlich gezielt reduziert werden, um negative Effekte durch stark aufkonzentriertes Wasser (Salz-, Mineralstoffeinträge mit dem Bewässerungswasser) zu vermeiden und die Pflanzen für eine Ausbringung abzuhärten (cf. Hajek & Vicherova 2014).

Zur Kontrolle des Zuwachses stellt die Entwicklungsdauer bis zum Erreichen einer geschlossenen Moosdecke ein im Vergleich zu anderen Methoden einfach anzuwendendes Maß dar (Deckungsgrad > 95 %). Mit einer Ausbringungsmenge von 60 g Trockenmasse pro Quadratmeter kann mit *S. rubellum* bereits nach einer Wachstumsperiode von 6 Monaten (Mai–Oktober) eine nahezu vollständige Deckung erreicht werden. Demgegenüber erreichen die Arten *S. papillosum* und *S. medium* eine geschlossene Deckung – inklusive winterlicher Wachstumsruhe – etwa um 6 bis 9 Monate später. Dies spiegelt sich auch durch Unterschiede im Höhen- und Biomassezuwachs wider (Tab. 5). Zu berücksichtigen ist, dass die Zuwachsraten unterschiedlich großer Arten bei gleicher anfänglicher Ausbringungsmenge stark mit der Anzahl der enthaltenen Individuen sowie dem Anteil photosynthetisch aktiver und somit regenerationsfähiger Pflanzenteile in Verbindung stehen. Dies hängt mit der Fähigkeit der Teilung vorhandener Wachstumstriebe zusammen, was bei zahlreichen vorhandenen Köpfchen dazu führt, dass sich diese schneller verzweigen und somit einen Vorsprung sowohl im Hinblick auf lateralen Flächen- als auch vertikalen Höhenzuwachs



Zur Kontrolle der Zuwachsraten angelegter Vermehrungsvarianten können verschiedene Wachstumsparameter herangezogen werden. Für einen Vergleich sollten einheitliche Methoden verwendet werden (z. B. Deckungs-, Höhen-, Köpfchen- oder Biomassezuwachs).

herausbilden können (Tuitilla et al. 2003). Bei Bestimmung der relativen Zunahme der Individuendichte können die am Anfang und am Ende eines Vermehrungszyklus enthaltenen Moosköpfchen durch Auszählen erfasst werden. Hier belaufen sich die Vermehrungsraten der produktivsten Art *S. rubellum* nach 18 Monaten auf das 8- bis 11-Fache, während die Raten für *S. medium* um bis zu 45 % niedriger ausfallen können, da diese Art insbesondere zu nasse Bedingungen infolge von Überversorgung nicht gut verträgt (Limpens et al. 2003).

Tabelle 6: Artspezifische Vermehrungsraten (Vielfache der Ausgangsbiomasse) unter dauerfeuchten Bedingungen mit kontinuierlicher Speisung von Regenwasser über Stau- und Überkopfbewässerung. TM: Trockemasse; Cap: Capitulae (Köpfchen)

		<i>S. rubellum</i>	<i>S. medium</i>	<i>S. papillosum</i>
Ausbringungsverhältnis		1:12	1:11	1:9
Start-Biomasse [g TM/m ²]		60	60	60
Start-Köpfchendichte [Cap/m ²]		4,400	2,000	2,100
> 95 % Deckung		6 Monate	15 Monate	12 Monate
Mooshöhe [mm]	6 M	37 ±2	30 ±2	31 ±3
	12 M	45 ±4	37 ±3	41 ±4
	18 M	92 ±9	74 ±13	79 ±11
Vermehrungsrate Biomasse	18 M	11–15-fach	5–12-fach	9–13-fach
Vermehrungsrate Köpfchendichte	18 M	9–11-fach	6–10-fach	8–9-fach

Wachstumsperioden: 6 Monate = Mai–Oktober; 12 Monate = Mai–April d. Folgejahres;

18 Monate = Mai–Oktober d. Folgejahres

Wenngleich sich je nach Art spezifische Unterschiede feststellen lassen, zeigen bisherige Experimente, dass unter Anwendung einheitlicher Bewässerungs- und Ausbringungstechniken für alle getesteten Zielarten auch in Moosmischungen vergleichbar hohe Vermehrungsraten erreicht werden können. Wichtigste Voraussetzungen im frühen Stadium der Vermehrung sind dabei eine konstante Bewässerung mit Regenwasser und die volle Regenerationsfähigkeit des Moosmaterials (Raabe et al. 2018). Da bei einer praxisorientierten Vermehrung mit dem Ziel der Wiederansiedlung artenreicher

Torfmoos-Gesellschaften einheitliche Bedingungen am einfachsten umgesetzt werden können, empfiehlt sich die Vermehrung von Moosmischungen unterschiedlicher Artenzusammensetzung nicht nur aus »pragmatischen« Gründen. Besonders im Hinblick auf den Etablierungserfolg auf Flächen mit eingeschränkter Wasserverfügbarkeit haben sich Moosmischungen als vorteilhaft herausgestellt, da sensible Arten (v.a. *S. rubellum*) von der höheren Wasserhaltekapazität robusterer Arten (v.a. *S. papillosum*) profitieren.



Auch im Freiland kann die Vermehrung in Kisten erfolgen, ähnlich der Vermehrung auf Tischen. Damit lassen sich gezielte Versuche kontrollierter anlegen und die Soden sind leicht entnehmbar. Wichtig ist ein guter Kontakt zum unterliegenden, wassergesättigten Substrat, damit Feuchtigkeit kapillar aufsteigen kann.

6 Beispiele erfolgreicher Vermehrungsanlagen

Zur Vermehrung und Sicherstellung der Verfügbarkeit von Spendermaterial wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes unterschiedliche Versuchsanlagen sowohl auf Tischen als auch im Freiland getestet. Als entscheidende Erfolgsfaktoren erwiesen sich eine sorgfältige Planung der Anlage unter Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten. Für den reibungslosen Betrieb und die Aufrechterhaltung der Anlagen waren zudem eine regelmäßige Überwachung und Instandhaltung sowie

die Möglichkeit der laufenden Optimierung ausschlaggebend. Hierzu ist es ratsam, in überschaubaren Dimensionen zu beginnen und auf kleinerer Skala zu experimentieren, um aus anfänglichen Fehlern lernen und nachjustieren zu können.

Als besonders geeignet für eine rasche und effiziente Vermehrung seltener Bulltorfmoose haben sich Bewässerungstische herausgestellt. Hier lassen sich die für hohe Vermehrungsraten optimalen

Wachstumsbedingungen (Substrat und Bewässerung) bereits auf kleiner Fläche (10 m²) sehr gut umsetzen und sie sind in der alltäglichen Praxis gut zu beherrschen. Bislang konnte dieser Ansatz mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen (Stellfläche, Moosmaterial, Wassermengen und Personaleinsatz) auf einer Fläche von 100 m² erfolgreich realisiert werden. Als günstig erwies sich dabei, die Tische im Freiland aufzustellen, um die Moose durch die wechselnden Witterungsbedingungen abzu härten. Eine Vermehrung im Gewächshaus hat sich dagegen als eher ungünstig erwiesen, da es vermehrt zu Pilzbefall oder zu einer massiven Ausbreitung von Algen kam.



Solange Spendermaterial und Erfahrungen in der Torfmoosvermehrung begrenzt sind, ist eine Anzucht in Schalen auf Bewässerungstischen prädestiniert für die Erprobung unterschiedlicher Ausbringungs- und Bewässerungstechniken.

Da auf Tischen nur geringe Substratmächtigkeiten (< 5 cm) aufgebracht werden können, ist eine konstante Wasserversorgung über oberflächennahen Anstau oder Überkopfbewässerung ein grundlegender Erfolgsfaktor – besonders zur Deckung des Feuchtebedarfs infolge hoher Verdunstungsraten während wachstumsstarker Phasen im Sommer. Auch hat sich gezeigt, dass Wind eine rasche Austrocknung der Torfmoosköpfchen bewirken kann und damit die Zuwachsraten erheblich reduziert werden. Um negative Effekte des Windes zu minimieren, haben sich circa 20 cm hohe Schutzwände (z. B. Bleche, Plexiglas) an den Tischseiten als effektive Maßnahme erwiesen, mit der die oberflächennahe Windgeschwindigkeit und damit der Wasserverlust der Torfmoosköpfchen reduziert werden kann. Zum Schutz vor Vogelfraß, Pick- und Wühltätigkeit können die Tische durch ein Netz geschützt werden.

Für die Ableitung überschüssigen Wassers nach starken Regenfällen sind ein leichtes Gefälle und ein funktionsfähiger Überlauf erforderlich. Dies ist umso wichtiger, je geringer die Substratmächtigkeit und die Entfernung der wachsenden Moose zum Wasserstand sind, da es auch bei ständig zu nassen Bedingungen zu reduziertem Wachstum und damit zu einer geringeren Produktion von Spendermaterial kommt. Eine Deckung des Feuchtebedarfs über gezielte Überkopfbewässerung ist eine effiziente Methode zur bedarfsoptimierten Versorgung, besonders in den frühen Morgenstunden. In trockenen Perioden sollte aber auch hier



Neben der Flächenherrichtung (links) ist die Verfügbarkeit von Wasser mit ausreichender Qualität (rechts) eines der größten Hindernisse für eine Vermehrung im Freiland.

tagsüber ein ausreichendes Wasserangebot an der Oberfläche eingehalten werden. In tieferen Wannen mit einem größeren Wasserspeichervermögen und guter Wasserleitfähigkeit des Substrates ist grundsätzlich auch ein tieferer Einstau praktikabel (bis ± 15 cm unter der Oberfläche).

Eine Alternative zu Gewächshaustischen, insbesondere für die Produktion von Spendermaterial im größeren Stil (> 100 Quadratmeter), stellt die Vermehrung im Freiland dar. Für eine erfolgreiche Anzucht ist jedoch auch hier die möglichst genaue Einstellung der Wasserstände essenziell, wodurch vor allem im Hinblick auf die Herrichtung der Flächen mit einem erhöhten technischen Aufwand zu rechnen ist. Im Pilotversuch bewährt hat

sich ein Ansatz mit einer automatisierten Bewässerungsanlage (Unterflurbewässerung oder Oberflurberegnung mit entsprechender Steuerung über Pumpen) und einer wannenförmigen Abdichtung der Vermehrungsbeete durch eine Folie und Überläufe (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Anlage von kammerartigen Beeten vereinfacht zudem die Einrichtung im Gelände und verbessert die Kontrollierbarkeit der Wasserversorgung. Wie auf Tischen können die Fragmente auch in Kisten oder Schalen angezogen werden, um die spätere Ausbringung als Soden leichter zu gestalten.

Bei der Standortwahl sollten bezüglich Substrat- und Wasserqualitäten grundsätzlich die gleichen Anforderungen angestrebt werden,

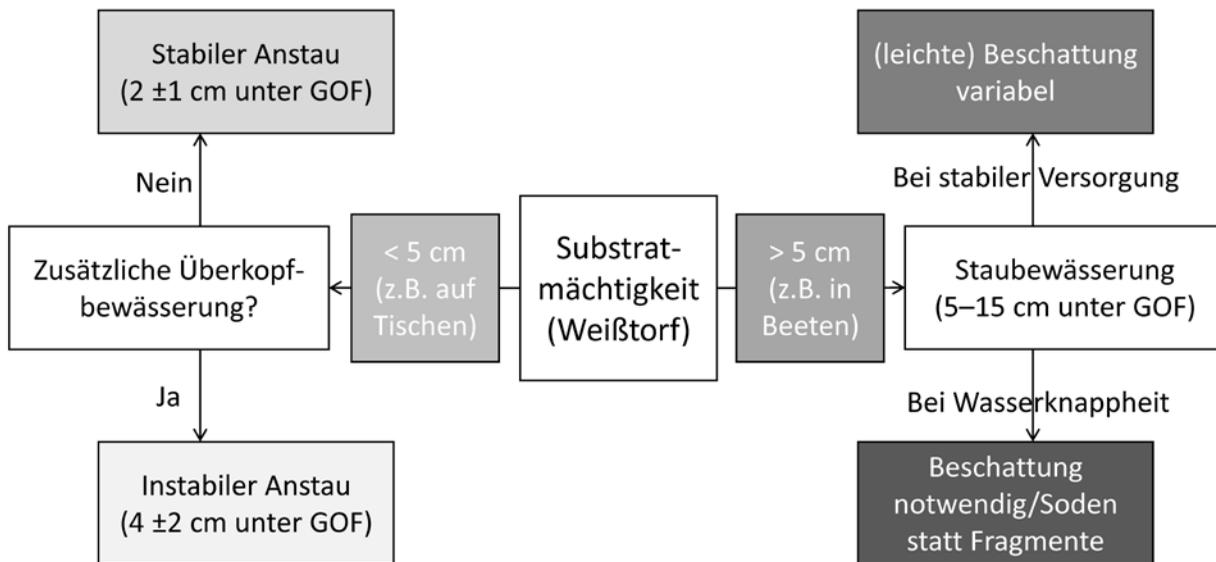
wie sie bei einer Tischvermehrung gelten, damit auch hier eine Vermehrung anspruchsvoller Arten gelingen kann. Erfahrungsgemäß ist die Verfügbarkeit ganzjährig ausreichender Wassermengen und -qualitäten eines der größten Hindernisse und es können vor allem im Freilandmaßstab nicht immer optimale Bedingungen gehalten werden. So können trotz günstiger Resttorfeigenschaften (Wasserhaltekapazität, Nährstoffarmut) die für eine konstante Bewässerung erforderlichen Wassermengen schlicht fehlen. Möglicherweise bietet sich ein ausreichend großes Wasserreservoir zur Nutzung an, aber der starke Zersetzungsgrad des Torfes und die Wasserqualität (Mineralisierungsgrad, Nährstoffe) sind begrenzende Faktoren. Es empfiehlt sich daher, zunächst die Umgebungsbedingungen hinsichtlich der Möglichkeiten zur Regulierung der Wasserversorgung (Wasserspeicherbecken, Höhenunterschiede) zu erkunden, um die erforderlichen Maßnahmen zur Herrichtung des Vermehrungssubstrates (Oberbodenabtrag, Auftrag von frischem Substrat in Folie) und Steuerungsmöglichkeiten der Bewässerung (manuelle Zu- und Abläufe, Installation von Technik) abwägen zu können. Die potenziell geeignetsten Standorte in einem hydrologisch günstigen Umfeld finden sich meist in unmittelbarer Nähe zu naturnahen Flächen oder optimal wiedervernässten Bereichen mit guter Torf- und Wasserqualität. Da im Vergleich zu einer Vermehrung auf Tischen trotzdem mit zeitweise weniger optimalen Bedingungen zu rechnen ist, sollten zunächst entweder nur robuste Arten und/

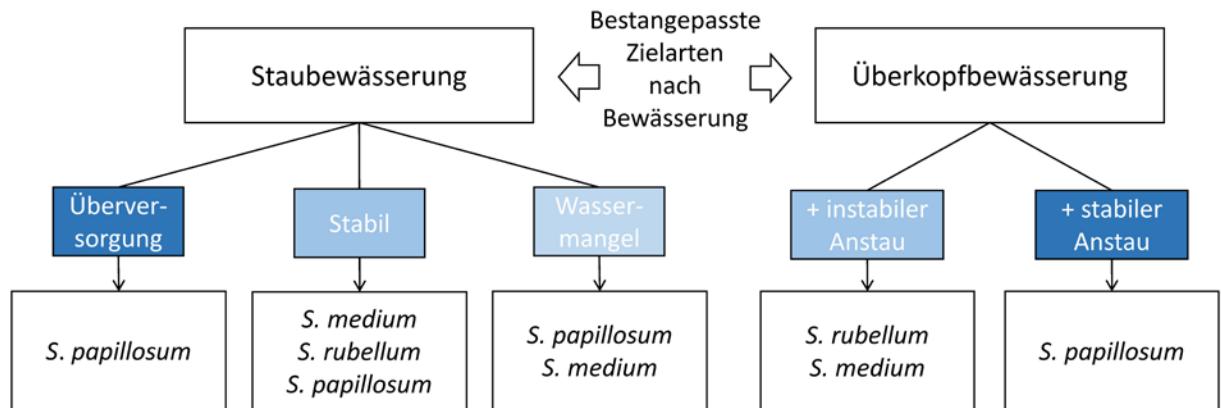


Um Wasserverluste zu minimieren, können flache Mulden mit Folie ausgelegt werden, welche anschließend mit frischem Weißtorfsubstrat (~10 cm) und Bewässerungstechnik versehen werden.

oder Mischungen als Fragmente ausgebracht und bei Bedarf beziehungsweise vorsorglich geschützt werden oder es sollte die Ausbringung von austrocknungsempfindlichen Arten nach Möglichkeit in Sodenform erfolgen.

7 Entscheidungshilfen zur Anlage einer erfolgreichen Bultorfmoosvermehrung





Alternativ: Moosmischungen mit unterschiedlicher Artenzusammensetzung

Entscheidungshilfe für die Auswahl von Zielarten entsprechend der Bewässerungstechnik. Werden bestimmte Arten einerseits durch vorgegebene Bewässerungsmöglichkeiten aufgrund von Unterschieden in Wachstumsoptima bevorzugt, so können andererseits bei Einsatz von Mischungen auch Unterschiede in der Toleranz gegenüber der Wasserqualität zu Verschiebungen in der Artenzusammensetzung führen.



Erntereife Bulttorfmoose auf einem Vermehrungstisch im Freiland. Zwischen den üppigen Torfmoospolstern finden sich auch zahlreiche weitere typische Hochmoorpflanzen wie Weißes Schnabelried (*Rhynchospora alba*) und Moosbeere (*Vaccinium oxycoccos*). Nun stellt sich die Frage, wo und in welcher Weise die vermehrten Bulttorfmoose auf Renaturierungsflächen ausgebracht werden können.

Teil II: Aktivierung der Hochmoorregeneration durch Ansiedlung von Bulttorfmoosen (AktiMoos)

1 Einleitung: Ausbringung und Etablierung als nächster Schritt nach erfolgreicher Vermehrung

Nach erfolgreicher Vermehrung stellt die qualifizierte Ausbringung von Torfmoosen den logischen nächsten Schritt der Renaturierung abgetorfte Hochmoorflächen dar. Während hierzu aus Kanada und dem Baltikum bereits zahlreiche erfolgreiche Anwendungsbeispiele vorliegen, fehlten entsprechende Erfahrungen aus Nordwestdeutschland oder auch den benachbarten Niederlanden bislang nahezu vollständig. Auch lassen sich die großskalig in Kanada angewandten Methoden der »Moss Layer Transfer Technique« (González, E. & Rochefort, L. 2014) kaum auf nordwestdeutsche oder niederländische Verhältnisse übertragen, insbesondere wegen der fast vollständigen Degeneration der Moore hier und damit fehlender Spenderflächen für die Übertragung der Vegetation. Die diesem Leitfaden zugrunde liegenden Untersuchungen im Rahmen zweier von der DBU geförderten Projekte sowie eine umfangreiche Literaturrecherche zeigen jedoch, dass eine erfolgreiche Etablierung von Bulttorfmoosen nach Abtorfung auch in Nordwestdeutschland grundsätzlich möglich und praktikabel sein kann. Hierzu sollen im Nachfolgenden die ökohydrologischen Voraussetzungen anhand eines Vegetations-Standortmodells, die Ausbringungstechniken sowie die den Etablierungserfolg steuernden Faktoren kompakt dargestellt und erörtert werden. In den abschließenden Kapiteln liefern wir zusammenfassende Handreichungen zur praktischen Anwendung und geben aus unserer Sicht einen kurzen Ausblick auf die Grenzen und Perspektiven einer erfolgreichen Hochmoorrenaturierung.



Sehr junge Stadien mit offener Pioniervegetation auf anstehendem Schwarztorf ohne Akrotelm eignen sich aufgrund stark schwankender Feuchtebedingungen und dem Fehlen von Ammenpflanzen kaum zur Etablierung von Bulttorfmoosen.

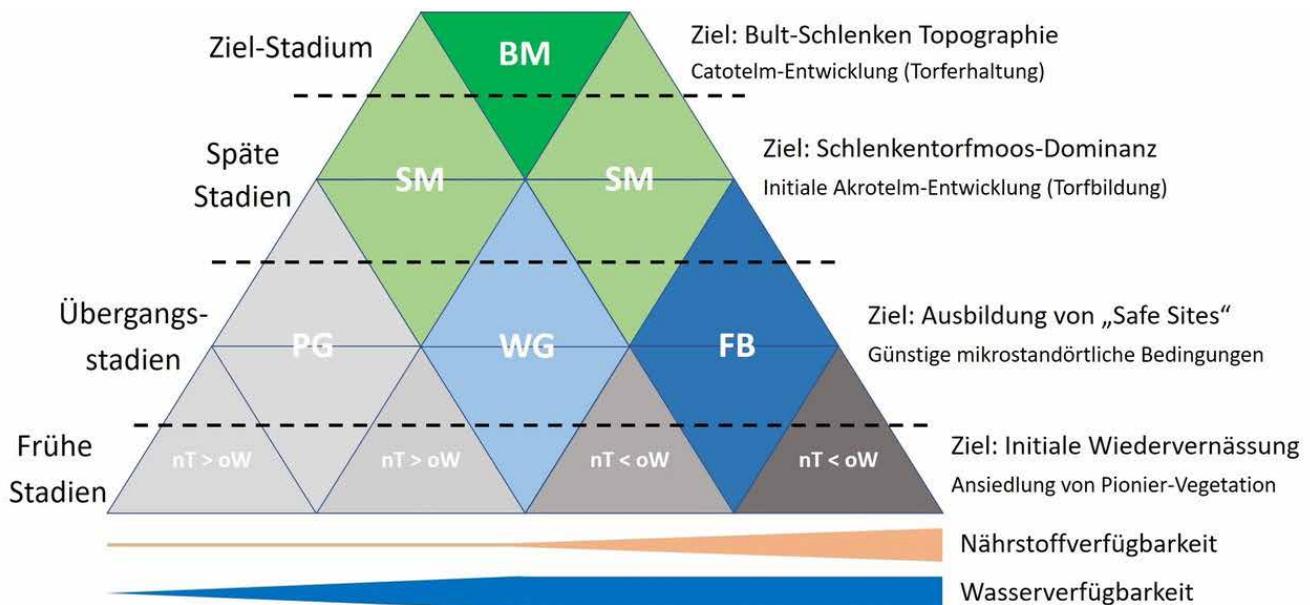


Ältere Wiedervernässungen zeichnen sich je nach Alter, Wasserstand und Trophie durch eine Vielzahl von unterschiedlichen Sukzessionsstadien der Vegetation aus. Im Rahmen des zweiten Forschungsprojektes (Teil II) wurde deren Eignung für die Etablierung von Bulttorfmoosen eingehend untersucht.

Bevor wir mit unseren Ausführungen beginnen, möchten wir vorab auf drei wichtige Grundsätze der Ausbringung von Bulttorfmoosen verweisen:

- I) Wenn immer möglich, sollte auf Vermehrungsmaterial regionaler Herkunft zurückgegriffen werden, wenngleich aufgrund geringer regionaler genetischer Differenzierung bei der Gattung *Sphagnum* prinzipiell auch weiter entfernt entnommenes Material eingesetzt werden kann (Kap. 2.3). Wichtig ist, dass in dem Vermehrungsmaterial möglichst die gesamte lokale genetische Differenzierung, z. B. im Hinblick auf Wasserstände, abgebildet wird.
- II) Aufgrund der Knappheit von Spender-/Vermehrungsmaterial sollte eine Ausbringung nur an Standorten mit günstigen ökologischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Etablierung erfolgen.
- III) Bei der Ausbringung ist ein »geordnetes« und nachvollziehbares Vorgehen absolut notwendig. Dieses kann durch eine eingehende und möglichst punktgenaue Dokumentation der Ausbringungsmaßnahmen und ein regelmäßiges Monitoring des Maßnahmenenerfolgs gewährleistet werden. Zugleich können hieraus wesentliche Erkenntnisse zur Optimierung zukünftiger Renaturierungsmaßnahmen gezogen werden.

2 Vegetations-Standortmodell als Grundlage der Maßnahmenplanung



Sukzessionsmodell typischer Stadien der Vegetationsentwicklung auf Hochmoorstandorten nach Torfabbau und Wiedervernässung. Das größte Potenzial zur erfolgreichen Etablierung/ Wiederansiedlung von Bulttorfmoosen besteht in späten Stadien. Abkürzungen:
 BM = Bulttorfmoos-Dominanz; SM = Schlenkentorfmoos-Dominanz; PG = Pfeifengras-Dominanz;
 WG = Wollgras-Dominanz; FB = Flatterbinsen-Dominanz; nT = nackter Torf; oW= offenes Wasser

Handlungsempfehlungen zur Etablierung von Bulttorfmoosen lassen sich am besten anhand idealtypischer Modellszenarien beschreiben, wohlwissend, dass zwischen den hier dargestellten Stadien und Zuständen zahlreiche fließende Übergänge bestehen (Abb. 1, Tab. 1). Die hierzu vorgenommenen Differenzierungen orientieren sich an den in der Hochmoorrenaturierung allgemein bekannten Sukzessionsstadien (Eigner & Schmatzler 1991, Drachenfels 2011). Diesen liegen neben dem Faktor Zeit vor allem Gradienten des mittleren Wasserstands und dessen Schwankungsamplituden sowie der Trophie (Nährstoffausstattung) zugrunde. Im Gelände gut erkennbar sind diese Sukzessionsstadien bereits in einem Alter von 5–15 Jahren anhand der dominierenden Vegetation. Im Einzelnen lassen sich dabei folgende Stadien unterscheiden:

- a) Von Besenheide (*Calluna vulgaris*) dominierte Stadien. Diese stellen sich mittelfristig auf stark oligotrophen, nicht mit Nährstoffrückständen belasteten Standorten ein, die sich jedoch durch einen tief liegenden mittleren Wasserspiegel von circa 30–60 cm unter Flur auszeichnen. In diesen meist sehr artenarmen Zwergstrauchgesellschaften tritt häufig als kodominante Art das Pfeifengras (*Molinia caerulea*) auf.
- b) Reine Pfeifengrasstadien mit Dominanz von *Molinia caerulea*. Diese Stadien, in denen das Pfeifengras mit alleiniger Dominanz auftritt, zeichnen sich durch



Stadien, in denen neben Wollgräsern größere Anteile des Pfeifengrases (*Molinia caerulea*) zu finden sind, kennzeichnen Standorte mit phasenweise sehr tiefen Wasserständen (< 25 cm unter Flur) und starken Wasserstandamplituden zwischen Winter und Sommer.

- einen höheren mittleren Wasserstand bei gleichzeitig starken Schwankungsamplituden aus, wobei insbesondere während der Vegetationsperiode im Wurzelraum der Gräser fast durchweg keine wasser-gesättigten Bedingungen herrschen.
- c) Wollgras-Pfeifengrasstadien. In diesen Stadien zeigt die Kodominanz von Scheidigem Wollgras (*Eriophorum vaginatum*) und Pfeifengras, dass hier bereits während der Vegetationsperiode höhere mittlere Wasserstände und geringere Schwankungsamplituden vorherrschen. Unter dem Einfluss von mineralhaltigerem Grundwasser kann in diesen Stadien *Eriophorum vaginatum* teilweise oder ganz durch Schmalblättriges Wollgras (*Eriophorum angustifolium*) ersetzt werden.



Reine Wollgrasstadien kennzeichnen Standorte mit ganzjährig hohen Wasserständen nahe der Bodenoberfläche (> 25 cm unter Flur), wie sie beispielsweise auf Schwingrasen zu finden sind. Für eine erfolgreiche Bultorfmoosetablierung bieten diese Stadien gewöhnlich sehr gute Voraussetzungen.

- d) Wollgrasstadium mit Dominanz von *Eriophorum vaginatum*. Dieses Stadium ist gekennzeichnet durch konstant hohe Wasserstände, die sich nahezu ganzjährig knapp unter oder über der Bodenoberfläche bewegen und nur vergleichsweise geringe saisonale Schwankungen aufweisen. Auch hier kann unter dem Einfluss von stärker mineralhaltigem Grundwasser *Eriophorum angustifolium* zur Dominanz kommen.
- e) Von Flatterbinse (*Juncus effusus*) dominiertes Stadium. Dieses zunehmend häufig anzutreffende Stadium ähnelt hydrologisch in starkem Maße dem zuvor beschriebenen Wollgrasstadium,

unterscheidet sich von diesem jedoch deutlich in trophischer Hinsicht durch merklich erhöhte Ca-, N- und P-Gehalte im Torfsubstrat, die zumeist auf eine längere landwirtschaftliche Nutzung der Standorte vor dem Torfabbau zurückzuführen sind. Die Dominanz der Flatterbinse ist dementsprechend auf Konkurrenzvorteile gegenüber den Wollgräsern aufgrund eines deutlich erhöhten Nährstoffniveaus zurückzuführen.



Stadien mit hochwüchsigen und oft sehr biomassereichen Beständen der Flatterbinse (*Juncus effusus*) kennzeichnen ebenfalls Standorte mit ganzjährig recht hohen Wasserständen, die sich aber gleichzeitig durch ein merklich höheres Nährstoffniveau auszeichnen, wobei es sich meist um Rückstände einer ackerbaulichen Vornutzung handelt. Da in den letzten Jahren vermehrt ehemals ackerbaulich genutzte Flächen in den Torfabbau gingen, sind entsprechende Flatterbinsenstadien aktuell stark in Zunahme begriffen.

Das Stadium a eignet sich nicht, das Stadium b nur sehr bedingt für eine Re-Etablierung von Bulttorfmoosen. Im Folgenden werden wir uns daher schwerpunktmäßig auf die Stadien c, d und e konzentrieren, während bei a und b vor Versuchen der Bulttorfmoos-etablierung zunächst hydrologische Optimierungsmaßnahmen erfolgen müssen.

Dem hier verwendeten Sukzessionsmodell liegt die Annahme zugrunde, dass durch die Dominanz typischer Arten der frühen und Übergangsstadien erst die nötigen Voraussetzungen (Wasserstandsberuhigung, Akrotelmbildung und entsprechende bodenhydrologische Bedingungen) entstehen müssen (Timmermann et al. 2009). Erst dann kann durch gezielte Einbringung von Bulttorfmoosen als funktionale Schlüsselarten nachfolgender Stadien auch deren Wiederansiedlung erfolgreich verlaufen und damit verbunden eine vollständige Hochmoorregeneration eingeleitet werden.



Stadien mit Schmalblättrigem Wollgras (*Eriophorum angustifolium*) sind auch später im Sommer leicht an der rostroten Verfärbung der Blätter zu erkennen und kennzeichnen Standorte mit einem stärkeren Einfluss durch mineralhaltiges Grundwasser. Oft handelt es sich dabei um Standorte mit einem sehr dünnen oder teilweise durchbrochenen Sockel aus Schwarztorf, wodurch die hydrologischen Bedingungen, insbesondere im Sommer bei allgemein absinkenden Grundwasserständen, häufig eher instabil und schwankend sind.



Entnahme von Torfmoosfragmenten durch Zupfen per Hand

3 Torfmoosentnahme und -ausbringung

3.1 Torfmoosentnahme

Die Entnahme von Torfmoosen für Renaturierungszwecke kann entweder aus naturnahen Flächen, z. B. alten bäuerlichen Handtorfstichen oder vorhandenen »Heile-Haut-Flächen«, erfolgen oder aus zum Zwecke der Produktion größerer Ausbringungsmengen eigens angelegten Vermehrungskulturen wie z. B. bewässerten Gewächshaustischen oder Torfmooskultivierungsfeldern (Graf et al. 2017, Raabe et al. 2019). In vielen Regionen, z. B. Nordwestdeutschland oder den Niederlanden, werden die für eine Entnahme von naturnahen Standorten notwendigen Populationsgrößen bei Bulltorfmossen bereits

vielfach unterschritten. Hier ist eine gezielte Torfmoosvermehrung für Renaturierungszwecke meist der einzig gangbare Weg, um eine Wiederansiedlung zu bewerkstelligen. Die hierfür notwendigen Konzepte und Methoden wurden in Teil I dieses Leitfadens dargestellt. Spezifische Aspekte, die es bei der Entnahme von Torfmoosen aus naturnahen Flächen und aus Vermehrungsanlagen zu beachten gilt, sind in Tab. 1 gegenübergestellt. Generell sind sowohl für eine Entnahme am Naturstandort als auch für die Ausbringung im Vorfeld naturschutzrechtliche Genehmigungen einzuholen.

Tabelle 1: Besonderheiten der Entnahme von Torfmoosen aus naturnahen Flächen oder künstlichen Vermehrungsanlagen (siehe Teil 1 dieses Handlungsleitfadens).

Entnahme am Naturstandort	Entnahme aus Vermehrungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> - Entnahme von Schlenkentangmoos- und Bulttangmoosarten. - Entnahme von Bulttangmoosen meist durch Kleinflächigkeit der wenigen Restpopulationen eingeschränkt. - Entnahmestellen schwierig erreichbar. - Genehmigungspflichtig. 	<ul style="list-style-type: none"> - In der Regel nur Entnahme von Bulttangmoosen, aber auch begleitende Vermehrung von Schlenkentangmoosarten möglich. - Entnahmen sind einfacher handhabbar. - Nach einmaliger Genehmigung und fortlaufender Nachzucht sind Entnahmen nahezu beliebig oft möglich bzw. wiederholbar. - Vervielfältigung der immer gleichen Individuen (genetische Einschränkung). - Bei Neuaufnahme von Material in die Zwischenvermehrung ist die Herkunft zu dokumentieren.

3.1.1 Schlenkentangmoose

Schlenkentangmoose können meistens recht einfach aus einem Naturstandort oder aus umliegenden Renaturierungsflächen, auf denen sich diese Arten bereits in größeren Populationen etabliert haben, entnommen werden. Eine Entnahme dieser meist schwimmenden oder locker gelagerten Arten kann beispielsweise mit einem Eimer oder per Hand erfolgen. Die am häufigsten vorkommenden Arten *Sphagnum cuspidatum* und *S. fallax* sollten möglichst unterschieden werden, da *S. fallax* merklich nährstoff- und mineralreichere Standorte bevorzugt (Hölzer 2010). Diese Eigenschaft sollte möglichst zum Zielstandort passen (Abb. 1, Tab. 1).

3.1.2 Bulttangmoose

Eine Entnahme von Bulttangmoosen kann sowohl in Form von Einzelpflanzen und kleiner Polster als auch in Form größerer kompakter Soden erfolgen. Am naturnahen Standort erfolgt die Entnahme zur Schonung des Bestandes überwiegend in Form einer Sammlung per Hand, bei der Gruppen von Einzelpflanzen bis hin zu kleinen Polstern aus bestehenden Torfmoorrasen herausgezupft werden. Da die entsprechenden Sammlungen später vor allem als Einzelpflanzen oder Fragmente ausgestreut werden sollen, reicht es aus, die lebenden oberen 10 cm zu entnehmen. Die Entnahme sollte gleichmäßig über den Bestand verteilt in Abständen von mindestens 50 cm erfolgen.



Entnahme von Torfmoossoden mithilfe eines Stechzylinders

Eine Person mit ausgewiesenen Kenntnissen zur Artbestimmung bei Torfmoosen sollte die Sammlung koordinieren, Hinweise zu Artmerkmalen und Kleinstandorten geben und das Material bereits während der Entnahme sichten und überprüfen. Die Sammlung am Naturstandort ist stets möglichst störungsarm und bestandsschonend durchzuführen.

Bulttorfmoose können aufgrund ihrer kompakten Wuchsform am Naturstandort auch als zusammenhängende Soden entnommen werden, wodurch synergistische Beziehungen zwischen den Torfmoosstämmchen bezüglich Mikroklima, Wasserhaushalt und Konkurrenzkräft erhalten bleiben. Bei Ausbringung auf Wiederherstellungsflächen verspricht dies gegenüber der flächigen Ausbringung

vor allem Vorteile auf wechsellässigen Standorten infolge einer gesteigerten Resilienz bei Trocken- und Überstauphasen (Granath et al. 2010, Taylor & Price 2015) sowie einer gesteigerten Konkurrenzkräft gegenüber Gefäßpflanzen. Die Entnahme erfolgt, indem etwa handtellergroße Bündel bis zu einer Länge von circa 5–10 cm von Hand aus dem Bult gezogen oder großflächigere Soden von circa 30 cm x 30 cm bis zu einer Höhe von etwa 15 cm mit einem scharfen Werkzeug herausgeschnitten werden. Die Entnahmestelle sollte etwas zusammengedrückt und/oder mit Fragmenten nachgeimpft werden, um das »Schließen« des Bultes zu begünstigen. Auch wenn Transplantate generell widerstandsfähiger sind als lose Fragmente, sind eine vorsichtige Vorgehensweise bei der Entnahme und eine schnelle Einbringung in die Empfängerfläche wichtig.



Gewächshaustisch mit *S. papillosum* nach der Entnahme von Soden

Durch den Mangel an naturnahen Spenderbeständen gestaltet sich gerade die Entnahme von Bulttorfmoossoden in größerem Umfang häufig als problematisch. In vielen Regionen ist daher eine Zwischenvermehrung in Vermehrungsanlagen oft die einzige Option, um eine Bulttorfmoosetablierung mittels Sodenübertragung zu ermöglichen (Raabe et al. 2019; 2019). Bei der Entnahme von Tischen (Aufstellung im Freiland) wurden gute Erfahrungen mit Soden gemacht, welche in einer Höhe von circa 4–10 cm und mit einem Durchmesser oder einer Kantenlänge von circa 20 cm als runde beziehungsweise quadratische Transplantationseinheiten von Hand, mittels Stechzylindern oder Schneidwerkzeug ausgestochen beziehungsweise zugeschnitten wurden. Die Transplantate werden in der Regel auf einer dünnen Schicht Weißtorf vorgezogen und mit diesem ausgepflanzt.

Hinsichtlich der Sodengröße gibt es derzeit nur wenige Referenzwerte zur Beurteilung notwendiger/idealer Dimensionen (Grundfläche, Höhe und ihr Verhältnis zueinander) und Eigenschaften (Artenzusammensetzung, Pflanzendichte, Wasserkapazität) unter verschiedenen Standortbedingungen. Die Angaben in diesem Handlungsleitfaden sind daher zunächst Anhaltspunkte, die auf bisher vorliegenden Erfahrungen beruhen, ohne dabei den Anspruch auf Vollständigkeit oder umfangreiche Repräsentativität zu erheben. Generell haben sich aber eine gewisse Mindestgröße (Durchmesser 10–15 cm) und eine möglichst kompakte Sodenstruktur



Entnommene Sode, fertig für den Transport zur Empfängerfläche

für eine erfolgreiche Etablierung auf der Empfängerfläche als vorteilhaft erwiesen. Ferner sind zunächst weniger anspruchsvolle Arten wie *S. papillosum* zu bevorzugen. Das Vorhandensein weiterer, auch anspruchsvollerer Arten im Soden kann sich ebenso als günstig erweisen, da die eingebrachten Soden bei einem breiteren Artenspektrum durch Dominanzverschiebungen auf unterschiedliche Standortbedingungen reagieren können.

3.2 Torfmoosausbringung

Eine Übertragung von Torfmoosen erfolgt üblicherweise entweder durch eine flächige Ausbringung von ganzen Torfmoospflanzen oder deren Fragmenten oder durch eine eher punktuelle Transplantation von Torfmoos-soden (Quinty & Rochefort 2003, Cagampan & Waddington 2008, Breeuwer et al. 2010, Chimner et al. 2017).

Die Torfmoosausbringung kann prinzipiell im Herbst oder Frühjahr durchgeführt werden. Beide Optionen zeigen Vor- und Nachteile, vor allem bedingt durch den Verlauf der Witterung. Die meisten Autoren empfehlen in Abwägung der Faktoren eine Ausbringung im Herbst. Bei einer Ausbringung im Frühjahr ist die Wasserversorgung durch die gespeicherten Wassermengen aus dem Winter zwar i. d. R. sehr gut und zusammen mit steigenden Temperaturen im Frühjahr bieten sich gute Bedingungen für das Torfmooswachstum. Durch die hohe Wassersättigung sind die Flächen jedoch teils sehr schlecht begehbar. Darüber hinaus kann das Risiko eines trockenen Frühjahrs den Erfolg der Etablierung gefährden. Bei einer raschen Austrocknung kann die Etablierung sich stark verzögern oder gänzlich misslingen. Die Ausbringung im Herbst bietet hingegen die Vorteile, dass die Flächen im ausgehenden Sommer trockener und somit besser begehbar oder befahrbar sind und anschließender Niederschlag eine gute Wasserversorgung ermöglicht. Zudem kann durch geeignete Begleitmaßnahmen die Wasserhaltung im Winter optimiert werden, so dass im Falle einer drohenden Trockenheit

im anschließenden Frühjahr ausreichende Wasserreserven zur Verfügung stehen. In Kanada und im Baltikum werden großflächige Vegetationsausbringungen mit begleitenden Maßnahmen zur Optimierung der Flächen (Drainageverschluss, Nivellierung, Parzellierung, u. Ä.) daher auch fast ausschließlich im Herbst durchgeführt. Die Ausbringung im Herbst ergänzt sich zudem sehr gut mit der Vermehrung wie sie in Teil I dieses Leitfadens beschrieben ist: Durch die optimale Versorgung der Torfmoose in Vermehrungsanlagen (v. a. Bewässerung) ist hier ein Start der Anzucht im Frühjahr eine sehr gute Option. Nach oftmals nur etwa 18 Monaten kann zum Ende des folgenden Sommers bereits ausreichend Spender-Biomasse entnommen und diese dann direkt im Herbst ausgebracht werden.

3.2.1 Schlenkentangmoose

Die Ausbringung von Schlenkentangmoosen ist vergleichsweise einfach und mit wenig Aufwand durchführbar. Die meist schwimmenden Arten können in Eimern gesammelt und transportiert und anschließend in möglichst überflutete Bereiche ausgebracht werden. Da Wellenschlag ungünstig für die Ausbreitung der Torfmoose ist, sollten die Ufer flach sein und einige Gefäßpflanzen oder Torfstrukturen das Wasser beruhigen. In frühen Sukzessionsstadien kann die Ausbringung von Schlenkentangmoosen Schwankungen des Wasserstandes abmildern und die Akrotelmentwicklung beschleunigen (Tomassen et al. 2004). Über den erforderlichen Mindestmaterialbedarf zur Initiierung beziehungsweise Beschleunigung



Ausbringung abgeschöpfter Schlenkenarten und Wollgras als Begleitvegetation (Josef Gramann)

einer großflächigen Aktrotelmentwicklung ist wenig bekannt. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass je früher und je mehr Schlenkentangmoose eingebracht und etabliert werden, diese die Wiederansiedlungsmaßnahmen von Bulttangmoosen durch Schaffung geeigneter Bedingungen wie eine gleichmäßige Wasserverfügbarkeit, einen idealen pH-Wert etc. begünstigen. Wenn die Möglichkeit einer Auswahl besteht, sollte bevorzugt die Schlenkenart *S. cuspidatum* übertragen werden, da *S. fallax* sehr konkurrenzstark gegenüber anderen Torfmoosarten ist und dies nachfolgende Bemühungen beeinträchtigen kann.

3.2.2 Fragmente von Bulttangmoosen

Unter günstigen Bedingungen, v. a. geringe Schwankungen des Wasserstands, hohe Wasserstände, aber nur kurze Überstauphasen mit guter Wasserqualität, kann die

Ansiedlung von Bulttangmoosen in Form von Fragmenten bereits in frühen und Übergangsstadien gelingen. Dennoch reichen die Standorttoleranz und das Wachstum der Bulttangmoose oftmals nicht aus, um sie neben den Schlenkentangmoosen bereits früh erfolgreich anzusiedeln, da sie empfindlich sowohl auf Überstau als auch auf Austrocknung reagieren (Tuittila et al. 2003). Bei günstigen hydrologischen Bedingungen, wie beispielsweise in optimal modellierten Abtorfungsflächen, kann eine Ausbringung auch in vegetationsfreie Flächen erfolgen. Ausschlaggebend dabei ist, dass der Kontakt zum offenen und wassergesättigten Substrat sichergestellt werden kann, z. B. durch Andrücken oder Anwalzen.



Großflächige Aufbringung von Torfmoosfragmenten mit einer Strohschicht nach Abtorfung, Nivellierung und Drainageverschluss (Ruhingu, Estland)



Werden Fragmente von Bulttorfmoosen zu dünn ausgestreut, gelingt es diesen kaum, sich gegenüber der Konkurrenz von Schlenkentangmoosen durchzusetzen.

Eine flächendeckende Ausbringung von Torfmoosfragmenten erfolgt in der Regel auf vegetationslosen Torfflächen, um die Bildung eines geschlossenen Torfmoosrasens zu beschleunigen. Prinzipiell kann die Ausbringung von Torfmoosfragmenten auch punktuell auf konkurrenzarmen offenen Torfstellen oder wenig überfluteten Rasen von Schlenkentangmoosen erfolgen. Zur Ausbringung können auch gezielt vegetationsarme Störstellen in dichter Gefäßpflanzenvegetation geschaffen werden. Die Schichtdicke der ausgebrachten Fragmente sollte wenige Zentimeter nicht übersteigen (Campeau & Rochefort 1996, Gaudig et al. 2017). Auf einer Torfmooskultivierungsfläche in Nordwestdeutschland

führte die Einbringung von circa $90 \text{ m}^3/\text{ha}$ nach 36 Monaten zu einer flächigen Torfmoosdeckung (Gaudig et al. 2014). Quinty & Rochefort (2003) empfehlen ein Verhältnis von 1:10 zwischen Entnahme- und Ausbringungsfläche. Die Ausbringung von ganzen Torfmoosstämmchen ohne eine vorgelagerte Zerkleinerung führt meist zu einem schnelleren Bestandsschluss und stärkerem Höhenwachstum der Torfmoose (Hölzel et al. 2018). Um auf offenen Torfflächen die sensiblen Bulttorfmoosfragmente in der Etablierungsphase vor einer zu starken Austrocknung oder Verschlammung bei Starkregen zu schützen, hat sich eine Abdeckung mit Stroh bewährt, die in einer Ausbringungsmenge von etwa 300 g/m^2 erfolgen sollte (Quinty & Rochefort 2003). In (zeitweise) überstauten Bereichen können Torfmoosfragmente auch durch ein natürliches Netz, z. B. aus Kokosfasern, vor einer Abdrift bewahrt werden.

Auch zur flächigen Ausbringung von Bulttorfmoosen in von Schlenkentangmoosen dominierten Bereichen (Tab. 1: Szenario 3) können Fragmente prinzipiell eingesetzt werden. Hierfür eignen sich in erster Linie größere Arten aus der Sektion *Sphagnum* wie *S. papillosum* (Smolders et al. 2003, Robroek et al.), die als besonders lange und reichverzweigte Pflanzen (5–10 cm) in zusammenhängenden Büscheln flach über den vorhandenen Schlenkentangmoosrasen ausgebreitet und gut angedrückt werden. In Kleinversuchen konnte dabei eine erfolgreiche Etablierung innerhalb von

drei Vegetationsperioden beobachtet werden (Raabe et al. 2019). Wichtig ist gerade bei Fragmenten, dass eine stabile Wasserverfügbarkeit besteht (Brown et al. 2017). Die Fragmente sollten jedoch nicht auf zu tiefem Niveau in geschlossene Torfmoosrasen eingebracht werden. Je nach Witterungsverlauf sind sie dann unter Umständen dauerhaft zu nassen Bedingungen ausgesetzt und werden folglich schnell von Schlenkentangmoosen überwachsen. Die Schaffung von konkurrenzfreien Störstellen durch Entfernen der lebenden Schlenkentangmoose ist jedoch nicht notwendig (Gunnarsson & Söderström 2007). Zur Reduzierung von Konkurrenz der Torfmoosarten untereinander kann stattdessen das Setzen von Stecklingen der Hochmoorzwergsträucher wie Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*) oder Moosbeere (*Vaccinium oxycoccos*) beitragen, die den Bulttorfmoosen als Klettergerüst dienen (Malmer et al. 1994), und darüber hinaus in Trockenperioden das Mikroklima positiv beeinflussen (Farrick et al. 2009). Sind dagegen schnellwüchsige und konkurrenzkräftige Schlenkentangmoosarten wie beispielsweise *S. fallax* an mit Nähr- und/oder Mineralstoffen belasteten Standorten dominant, kann die Schaffung von Störstellen oder eine Transplantation der Bulttorfmoose mittels Soden sinnvoll sein.

3.2.3 Transplantate von Bulttorfmoosen

Im Gegensatz zur Ausbringung von Pflanzenfragmenten erfolgt die Ausbringung ganzer Transplantate in der Regel nicht flächendeckend. Der Einsatz von Transplantaten in Form von Pflanzenbündeln beziehungsweise



Konzentrierte Fragmentausbringung von Hand. Wichtig ist, dass durch festes Andrücken ein direkter Kontakt mit dem Bodensubstrat hergestellt wird. Bei dieser Form der Ausbringung besteht die Gefahr, dass die Fragmente bei Überstau verdriftet werden.

Soden bietet gegenüber Fragmenten jedoch den Vorteil, dass Bulttorfmoose in Übergangs- und späten Stadien der Sukzession mit stärkerer Konkurrenz durch Gefäßpflanzen erfolgversprechender eingebracht werden können (siehe auch Teil I dieses Handlungsleitfadens). Auf Flächen mit starken Wasserstandsschwankungen empfiehlt es sich, möglichst tiefreichende Soden (> 10–15 cm) in die mit Schlenkentangmoosen behangenen Saumbereiche von Gefäßpflanzen zu transplantieren.



Sodentransport und Equipment für Transplantation auf einer Wollgras-Pfeifengrasfläche. Die Ausbringung von Bulttorfmoossoden bedarf gründlicher Planung und Vorbereitung.

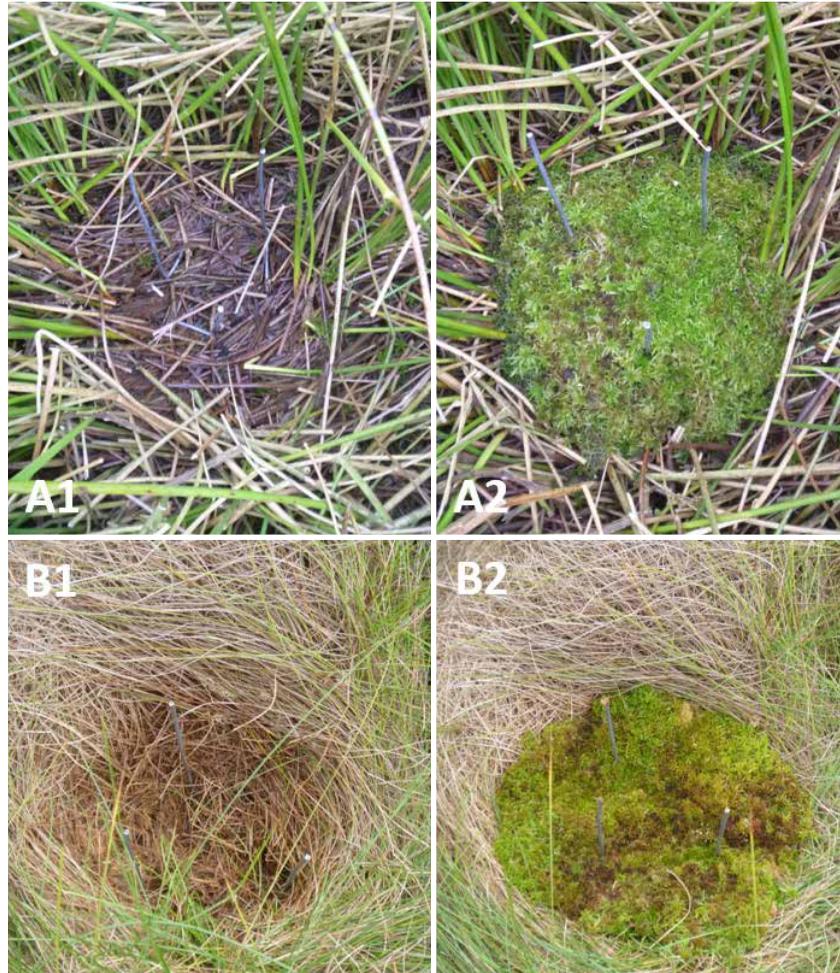
Während bei späteren Stadien von Schwingrasen die Wasserverfügbarkeit meist optimal ist, kann eine Sodenausbringung auf schwach tragfähigen jungen Schwingrasenflächen problematisch sein. Insbesondere bei fehlender Durchwurzelung sinken Soden in der Regel tiefer ein, sobald sie Wassersättigung erreicht haben, und können deshalb wie einzelne Fragmente komplett überwachsen werden, auch bekannt als »Overtopping«-Effekt (Anderpoorten & Goffinet 2009). Auf einem festen und wassergesättigten Untergrund können sich Bulttorfmoose hingegen auch in flachen Soden (3–10 cm) ausreichend lange gegenüber Schlenkentangmoosen behaupten, bis sie wiederum ihre Nachbarn

konzentrisch überwachsen. Damit zur Vermeidung von Konkurrenz zwischen den Torfmoosen positive Rückkopplungen mit Gefäßpflanzen wirksam werden können, scheint es vorteilhaft zu sein, wenn die bultbildenden Arten von Beginn an mit Begleitvegetation verwachsen sind (vgl. Rydin 2009). Dies kann bei Vermehrungsanlagen (siehe Teil I dieser Handlungsempfehlungen) oder bei Entnahme aus naturnahen Flächen meist gut sichergestellt werden, da sich hier auch die Begleitvegetation etablieren kann und ebenfalls vermehrt wird.

Damit die durch Transplantation von Soden beabsichtigten selbstregulierenden Effekte erzielt werden können, empfiehlt es sich, die folgenden Punkte zu beachten:

- Soden sollten nach ihrer Entnahme kompakt bleiben. Je nach Moosart und Wuchsform sollte daher ein günstiges »Fläche-zu-Höhe«-Verhältnis berücksichtigt werden, um ein Auseinanderfallen und somit eine schnellere Austrocknung zu vermeiden (unerwünschte Transplantationseffekte).
- Es ist vorteilhaft, wenn Soden mit Durchwurzelung beziehungsweise einer durchwurzelten Substratunterlage entnommen werden.
- Soden sollten weder zu hoch noch zu tief gepflanzt werden. Es empfiehlt sich, möglichst passende Pflanzlöcher vorzubereiten. Dies ist umso wichtiger je kleiner und höher eine Sode ist.

- Zur Festlegung der Ausbringungshöhe ist es ratsam, sich am langjährigen mittleren Wasserstand und der Schwankungsamplitude zu orientieren.
- Soden sollten möglichst lange Kontakt zu wassergesättigten Bodenschichten haben.
- Streu sowie ober- und unterirdische Pflanzenteile unterhalb der Pflanzstelle sind möglichst zu entfernen.
- Nach dem Einpflanzen und Andrücken sollte sich die Köpfchen-Oberfläche einer Sode etwas oberhalb der Geländeoberfläche befinden. Dies verringert die Häufigkeit von Verschlammung bei Starkregen auf offenem Torf beziehungsweise das Risiko des »Overtoppings« in späten Stadien infolge von Unterschieden zwischen Bulttorfmoos- und Schlenkentangmoosarten beim Aufschwimmen beziehungsweise Einsinken unter Wassersättigung auf weichem Untergrund.
- Soden wie auch Fragmente werden i. d. R. nicht bei vollem Wassergehalt ausgebracht. Die Startfeuchte kann deshalb unter Umständen nicht ausreichen, damit die Pflanzen eine lange Trockenphase sofort nach der Transplantation unbeschadet überstehen. Oberflächenstrukturen, die Windschutz bieten und Regenwasser sammeln, können hier Abhilfe schaffen.



Sodenausbringung in grasdominierte Bereiche, oben in Flatterbinse (*Juncus effusus*), unten in Scheidigem Wollgras (*Eriophorum vaginatum*). Die Soden werden in eine händisch vorgeformte Vertiefung platziert (vorher: A1, B1; nachher: A2, B2). Wichtig ist auch hier, durch vorsichtiges Andrücken einen direkten Kontakt zum darunterliegenden Substrat herzustellen.



Sodenausbringung in von Schlenkentangmoosen dominierte Bereiche mit wenig Gräsern. In einer solchen Situation sollte der Soden noch circa 2–3 cm aus dem Schlenkentangmoosrasen herauschauen (B). Das vorgeformte Pflanzloch (A) darf dementsprechend nicht zu tief sein, um ein Überwachsen durch die Schlenkentangmoose zu verhindern.



»Safe Sites« mit günstigen mikrostandörtlichen Bedingungen für die Etablierung können sich sowohl im Zentrum eines Bults (C) als auch zwischen zwei Bulten (D) finden.

- Auf offenem Torf ist es insbesondere bei der Ausbringung vor dem Sommer ratsam, die Beimpfungsstellen mit Stroh zu umschließen, während die Soden nur teilweise bedeckt oder leicht beschattet werden.

Für die Ausbringung von kleineren Torfmoosbündeln ist es sinnvoll, mit einem Stock oder den Händen eine Vertiefung vorzubereiten, die Torfmoossoden einzusetzen und anzudrücken. Dadurch ist ein sofortiger Kontakt zum umgebenden Substrat sichergestellt. Ideale Standorte sind Randbereiche von Poldern mit Schlenkentangmoosen und/oder Wollgrasbeständen. Durch die gute Verankerung im Untergrund und den Schutz vor Witterungseinflüssen durch vorhandene Gefäßpflanzen ist hier ein hoher Ansiedlungserfolg gegeben. Idealer Zeitpunkt ist eine Ausbringung in Herbst, wenn die sonst sehr nassen Randbereiche der Polder betreten werden können.



Im Rahmen des Vorhabens wurden umfangreiche Etablierungsexperimente angelegt und wissenschaftlich begleitet. Diese dienen vor allem dazu, Informationen darüber zu erhalten, welche Faktoren den Etablierungserfolg maßgeblich beeinflussen. Im Vordergrund künstlich angelegte Torfbänke aus Schwarزتorf, im Hintergrund vegetationsreiche ältere Sukzessionsstadien eines eines Unterfeldes, wie es bereits während der Abtorfung im sogenannten Ober-Unterfeld-Verfahren entsteht und durch Vegetation besiedelt wird.

4 Steuernde Faktoren des Etablierungserfolges

Nachfolgend wird dargelegt und erörtert, welche Faktoren den Etablierungserfolg eingebrachter Bulttorfmoose maßgeblich bestimmen, um daraus wesentliche Schlussfolgerungen für die Renaturierungspraxis abzuleiten. Die zugrundeliegenden Befunde stammen aus einer Serie von Etablierungsexperimenten, die im Rahmen dieser Projekte angelegt und teilweise über mehrere Jahre hinweg einem Monitoring unterlagen. Die erzielten Ergebnisse werden ergänzt und verglichen mit anderen Befunden aus der Literatur.

4.1 Wasserstand

Optimal für die Etablierung von Bulttorfmoosen sind Wasserstände, die sich überwiegend wenige bis maximal 25 cm unter der Bodenoberfläche bewegen, während sich mit zunehmender Schwankungsamplitude der Etablierungserfolg deutlich verringert. Dies gilt sowohl für ein zu tiefes Absinken der Wasserstände im Sommer als auch im Hinblick auf einen winterlichen Überstau. Beides wirkt sich jeweils negativ auf den Etablierungserfolg aus. Selbst bei vergleichsweise hohen und stabilen

Sommerwasserständen wirkt sich ein winterlicher Überstau ausgesprochen negativ aus und kann bis zum fast völligen Absterben der eingebrachten Bulttorfmoose führen. Diese ausgeprägte Sensitivität der ausgebrachten Bulttorfmoose gegenüber Überflutung war insgesamt sehr überraschend und hat weitreichende Konsequenzen für die Renaturierungspraxis, worauf später noch eingegangen wird. Bezüglich der Sensitivität gegenüber Wasserständen und deren Schwankungsamplitude zeigten sich auch deutliche artspezifische Unterschiede. So konnte bei *S. rubellum* in einem Etablierungsexperiment mit Soden nach 6 Jahren nur bei einem mittleren Wasserstand von 7 cm unter Flur und einer mittleren Schwankungsamplitude



Die hoch aufragenden Bulte von Pfeifengras (*Molinia caerulea*) und Scheidigem Wollgras (*Eriophorum vaginatum*) zeugen von stark ausgeprägten Wasserstandschwankungen, welche sich sehr negativ auf den Etablierungserfolg der Bulttorfmoose auswirken.



Auch monatelange winterliche Überstauungen von bis zu mehreren Dezimetern Höhe wirken sich ebenfalls negativ auf die Bulttorfmoosetablierung aus.

zwischen Sommer und Winter von 10 cm eine erfolgreiche Etablierung festgestellt werden. Demgegenüber war im gleichen Experiment die Etablierung von *S. papillosum* auch bei einem mittleren Wasserstand von 21 cm unter Flur und einer mittleren Jahresamplitude von 20 cm noch sehr erfolgreich, während *S. medium* diesbezüglich eine Mittelstellung einnahm.

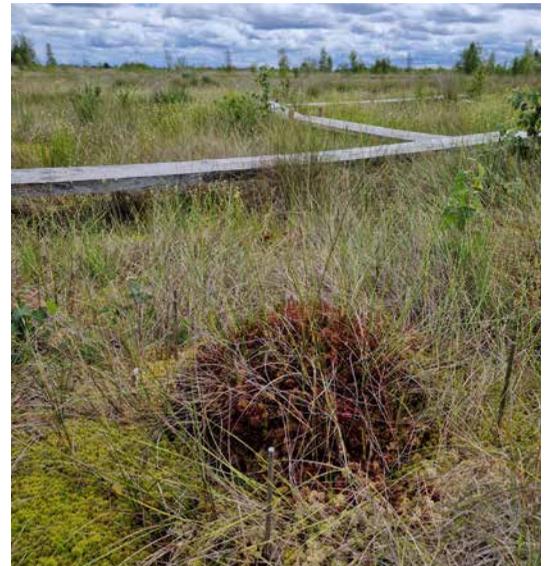


Nach einer längeren sommerlichen Trockenperiode ist in einem transplantierten Soden das feuchtigkeitsbedürftige *S. rubellum* (dünne Ästchen) bereits vollständig ausgebleicht, während das robustere *S. papillosum* (dicke Ästchen) immer noch grün ist.

Bei Flächen mit besonders hohem Etablierungserfolg und deutlichem lateralen und Höhenwachstum der eingebrachten Soden handelt es sich nicht selten um ältere schwingrasenartige Bestände mit oszillierender Oberfläche, wodurch eine für Bulttorfmoose stets optimale Wasserversorgung vorhanden ist. Wenn es gelingt, Wasserstände möglichst konstant einzustellen, können aber selbst auf nackten Torfbänken bei Sodenübertragungen mit Strohabdeckung sehr gute Etablierungserfolge erzielt werden. Dies gilt erneut insbesondere für *S. medium* und *S. papillosum*, während sich *S. rubellum* auch hier als gegenüber Austrocknung besonders empfindliche Art zeigt. Aber selbst unter optimalen Wasserstandsbedingungen zeigte *S. rubellum* gegenüber *S. medium* und *S. papillosum* einen deutlich geringeren lateralen Zuwachs, was im Gegensatz zu dessen klar überlegenen Zuwachsraten bei der Tischvermehrung steht (Teil I, Tab. 6).

Neben direkten Effekten haben Wasserstände und Wasserstandsfluktuationen über die Vegetationszusammensetzung, Wasserchemie und Nährstoffverhältnisse auch

weitere indirekte Effekte auf den Etablierungserfolg. Deren relative Bedeutung und Interaktionen sind jedoch teilweise schwer voneinander zu trennen. Insgesamt handelt es sich bei den Wasserstandsverhältnissen zweifellos um den mit Abstand wichtigsten Faktor für den Etablierungserfolg eingebrachter Bulttorfmoosarten und ohne entsprechende Wasserhältnisse sollten keine Etablierungsversuche erfolgen, sondern zunächst die Hydrologie adressiert werden.



Schwingrasen mit oszillierender Oberfläche bietet optimale Bedingungen für die Etablierung von Bulttorfmoosen. Hier gedeiht selbst das gegenüber Austrocknung so sensible *S. rubellum*. Im Bild zu sehen ist die Entwicklung eines pyramidenartigen Bults sieben Jahre nach der Sodenübertragung.



Angezogener Torfmoosrasen auf Gewächshäustisch mit unterliegendem Weißtorf-Substrat. Die mit dem Soden übertragene Weißtorfschicht führte zu keinem besseren Etablierungserfolg.

4.2 Substrat

Weißtorf ist aufgrund seiner größeren Porosität und damit verbunden seiner größeren Wasserleitfähigkeit und Wasserspeicherkapazität besonders geeignet für die Etablierung von Bulttorfmoosen. Der wesentlich dichtere und im für Torfmoose günstigen Bereich kaum wasserhaltende Schwarztorf erscheint dagegen deutlich weniger geeignet. In einem Etablierungsexperiment, in dem Bulttorfmoossoden mit und ohne eine circa 4 cm mächtige Weißtorfaufgabe übertragen wurden, zeigten sich jedoch keine signifikant positiven Effekte des Weißtorfsubstrats. Vielmehr scheint der Weißtorf auf Standorten mit tieferen Wasserniedrigständen nach Austrocknung infolge seiner Grobporigkeit wie eine Kapillarsperre zu wirken, die aufgrund der sehr groben Poren einen kapillaren Feuchtenachschub von unten unterbindet. Vermutlich ist dies der Grund,

warum auf Weißtorfunterlagen teilweise sogar schlechtere Etablierungsergebnisse erzielt wurden. Auch hier erwies sich jedoch letztlich der Wasserstand als dominierender Faktor. Basierend auf unseren abgeschlossenen Untersuchungen kann eine Zugabe von Weißtorf bei der Sodenverpflanzung bislang nicht empfohlen werden. Gleichwohl sind die positiven Effekte noch vorhandener Weißtorfaufgaben bei der Hochmoorrenaturierung insgesamt auch in unseren Untersuchungen unübersehbar, so etwa für die Ausbildung von Schwingrasendecken. Zudem besteht bei stark degeneriertem Schwarztorf die Gefahr einer schlechten Benetzbarkeit nach vorübergehender Austrocknung und/oder leichte Erodierbarkeit loser Fraktionen.



In einem Schwingrasen aus Schlenkentangmoosen und Wollgräsern frisch gebildetes organisches Substrat (Akrotelm). Die Ausbildung eines lockeren Akrotelms verbessert die hydrologische Selbstregulation der Standorte und hat einen sehr positiven Einfluss auf die Etablierung von Bulttorfmoosen.

Sehr bedeutsam für den Etablierungserfolg erscheint demgegenüber in älteren vegetationsreichen Stadien die Mächtigkeit der seit Beginn der Wiedervernässungsmaßnahmen neu gebildeten Akrotelmschicht. Es zeigt sich, dass die Etablierung umso erfolgreicher verläuft, je mächtiger eine lockerere Schicht aus abgestorbenen Pflanzenteilen ausgebildet ist. Hauptursache hierfür ist vermutlich, dass

ab einer Schichtdicke von circa 10–15 cm ein deutlich verbessertes Wasserspeicher- und Wassernachlieferungsvermögen während sommerlicher Trockenphasen besteht und/oder eine durch die grobe Porosität und Oszillationsfähigkeit verbesserte Selbstregulation bei Regenereignissen.

4.3 Wasserchemie und Nährstoffe

Die Etablierung von Bulttorfmoosen verlief am erfolgreichsten auf betont oligotrophen Standorten, während auf Standorten mit Nährstoffvorbelastung (oft infolge landwirtschaftlicher Vornutzung) zumeist geringere Etablierungserfolge festgestellt wurden. Besonders deutlich werden trophische Unterschiede anhand der Nährstoffverhältnisse im frisch gebildeten Akrotelm. Dabei sind nährstoffbelastete Standorte gekennzeichnet durch Calciumgehalte $> 0,15$ Gew. %, C/N-Verhältnisse < 40 und N/P-Verhältnisse < 20 im frischen Torfsubstrat sowie enge N/P-Verhältnisse von < 15 in der Gefäßpflanzenbiomasse. Hierbei handelt es sich insbesondere um von Flatterbinse (*Juncus effusus*) dominierte Stadien, teilweise aber auch um solche, in denen das stärker minerotrophe Schmalblättrige Wollgras (*Eriophorum angustifolium*) oder Pfeifengras (*Molinia caerulea*) vorherrschen. Der negative Einfluss höherer Trophie auf die Bulttorfmoosetablierung dürfte dabei insbesondere auf indirektem Wege über die Konkurrenz durch Gefäßpflanzen und nährstoffaffine Schlenkentangmoose wie *S. fallax* erfolgen.



Atmosphärische Stickstoffeinträge, oft in Verbindung mit sommerlicher Austrocknung, können zu einer starken Vergrasung (im Bild *Eriophorum vaginatum*) und zur Ausbildung mächtiger verdämmender Streufilzdecken führen. Bei zu starker Gefäßpflanzendeckung sinkt der Etablierungserfolg von Bulttorfmoosen, wobei insbesondere die laterale Ausbreitung beeinträchtigt wird.

4.4 Umgebende Vegetation

Die größten Etablierungserfolge konnten fast durchweg auf Flächen mit geringer Gefäßpflanzenbiomasse um 100 g/m^2 Gefäßpflanzenhöhe und -deckung erzielt werden. Dabei handelt es sich meist abermals um betont oligotrophe Standorte mit hohen mittleren Wasserständen, die von Scheidigem Wollgras (*Eriophorum vaginatum*) und Schlenkentangmoosen (*S. cuspidatum*) dominiert werden. Im Kontrast hierzu stehen Stadien mit der nährstoffaffinen Flatterbinse (*Juncus effusus*), die sich durch eine dreifach erhöhte Gefäßpflanzenbiomasse von circa 300 g/m^2 und eine nahezu doppelte Wuchshöhe auszeichnen. Auch bei relativ günstigen Wasserverhältnissen kommt es hier bei konkurrenzschwächeren Arten wie *S. rubellum* und *S. medium* zu einem deutlichen Rückgang des Etablierungserfolgs, während das konkurrenzstärkere *S. papillosum* sich weitgehend zu behaupten vermag. Treten eine höhere Gefäßpflanzenbiomasse von $> 250 \text{ g/m}^2$ und eine Gefäßpflanzendeckung von $> 60 \%$ in Verbindung mit ungünstigeren mittleren Wasserstandsverhältnissen auf, so verringert sich der Etablierungserfolg aber auch bei *S. papillosum* deutlich und *S. medium* und *S. rubellum* fallen wegen des Konkurrenzdrucks vollständig aus.

4.5 Ausbringungstechnik

In den im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Ausbringungsversuchen zeigten sich Soden im Vergleich mit Fragmenten eindeutig überlegen. Die Überlegenheit der Soden steigt, je ungünstiger der Standort



Als Soden ausgebrachte Bultorfmoose können sich im Vergleich zu Fragmenten sowohl gegenüber Schlenkentangmoosen als auch gegenüber Gefäßpflanzen besser durchsetzen und sind weniger empfindlich gegenüber Austrocknung.

hinsichtlich des Wasserhaushalts, der Trophie und der Gefäßpflanzenkonkurrenz ist. Unsere Ergebnisse sind damit weitgehend in Einklang mit Befunden aus der Literatur. Überzeugende und teils spektakuläre Erfolge mit der großflächigen Ausbringung von Fragmenten sind bislang vorrangig unter den für Torfmoose allgemein günstigen klimatischen Bedingungen der borealen oder subborealen Zone gelungen (Quinty & Rochefort 2003). Beispiele der erfolgreichen Anwendung in nemoralen Tiefland-Hochmooren bleiben bislang auf wenige Versuche mit optimalen, stark kontrollierten Wasserständen und offenen Substratoberflächen beschränkt (Gaudig et al. 2014). Unter den suboptimalen Rahmenbedingungen, wie sie heute vielfach etwa im Nordwesten Mitteleuropas vorherrschen und die sich aktuell durch den rezenten Klimawandel noch verschärfen, ist eine Ausbringung von Bultorfmoosen in Sodenform wohl auch zukünftig eindeutig zu präferieren.



Die Ausbringung von Bulttorfmoosen auf eigens dafür angelegten Torfbänken zeigte bei konstant gehaltenen Wasserständen erstaunlich positive Etablierungsergebnisse. Für die Praxis dürfte dieses Verfahren aufgrund der hierfür notwendigen umfangreichen Vorarbeiten und der obligatorischen Gewährleistung konstanter Wasserstände aber kaum von Bedeutung sein. Stattdessen empfehlen sich fortgeschrittenere Stadien der Vegetationsentwicklung wie das hier links abgebildete Wollgrasstadium mit *Eriophorum vaginatum*, die den Bulttorfmoosen Gerüststrukturen und Schutz vor Witterungsextremen bieten und deren initiale Akrotelmbildung zugleich die Wirkung von Trockenphasen deutlich abmildert.

5 Synthese

In der nachfolgenden Zusammenschau werden die wesentlichen Befunde zur Etablierung von Bulttorfmoosen für Renaturierungszwecke zu praxisrelevanten Kernaussagen zusammengefasst:

1. *Sphagnum*-Torfmoose wachsen überwiegend im Frühjahr und Herbst und leiden im Sommer häufig unter Trockenheit, während Gefäßpflanzen hauptsächlich im Sommer wachsen. Daher sollten
2. Etablierungsmaßnahmen bevorzugt im Herbst, gegebenenfalls im zeitigen Frühjahr durchgeführt werden, um die zu Beginn empfindlichen Moose bzw. Moosfragmente nicht zu zeitig nach Ausbringung der Trockenheit sowie verstärkter Konkurrenz mit Gefäßpflanzen auszusetzen.
2. Eine Etablierung sollte schwerpunktmäßig auf Standorten mit ganzjährig hohen Wasserständen (wenige bis 25 cm

unter Flur) und vergleichsweise geringer Schwankungsamplitude durchgeführt werden. Länger andauernde Überstauungen (mehrere Wochen) können zu einem raschen Absterben der Bulttorfmoose führen und sind daher unbedingt zu vermeiden. Als besonders günstig erwiesen sich Schwinggrasen mit oszillierenden Oberflächen, die ganzjährig einen optimalen Wasserstand nahe der Bodenoberfläche sicherstellen.

3. Auf betont oligotrophen Standorten mit geringer Nährstoffbelastung verläuft eine Etablierung in der Regel besonders erfolgreich. Nährstoffbelastete Standorte sind gut erkennbar anhand deutlich erhöhten Ca-Gehalten und niedrigeren C/N- und N/P-Verhältnissen sowohl in der Gefäßpflanzenbiomasse als auch im frischen Torfsubstrat. Aus vegetationskundlicher Sicht handelt es sich bei belasteten Standorten oft um Bestände mit Dominanz der Flatterbinse (*Juncus effusus*) oder auch um Wollgrasstadien (*Eriophorum vaginatum*, *E. angustifolium*) sowie deren Übergänge zu Pfeifengrasstadien (*Molinia caerulea*), die sich durch ein besonders üppiges Wachstum der dominierenden Gräser (oft > 300 g Trockenbiomasse pro m²) auszeichnen und zugleich zur Ausbildung dichter Streufilzdecken neigen.
4. Am erfolgreichsten ist eine Etablierung bei einem möglichst geringen Konkurrenzdruck durch Gefäßpflanzen (optimal circa 100 g Trockenbiomasse pro m²)

oder Schlenkentangmoose (insbesondere *S. fallax*). Mit zunehmender Gefäßpflanzen- und Streudeckung verschlechtern sich die Etablierungsbedingungen zusehends, vor allem hinsichtlich der Möglichkeiten einer lateralen Ausbreitung der eingebrachten Bulttorfmoose.

5. Eine Bulttorfmoosetablierung sollte in der Regel auf Flächen erfolgen, auf denen nach Wiedervernässung und Besiedlung durch Wollgräser (insbesondere *Eriophorum vaginatum*) und Schlenkentangmoose (insbesondere *S. cuspidatum*) bereits die Bildung eines mindestens 10 cm mächtigen Akrotelms (lockere, schwammartige und grobporige Schicht aus abgestorbenem Pflanzenmaterial) über dem in der Regel anstehenden dichten Schwarztorf stattgefunden hat. Die Wasserversorgung der Bulttorfmoose wird dadurch in niederschlagsarmen Perioden durch optimale Wasserhalteeigenschaften und eine Oszillationsfähigkeit der Oberfläche deutlich verbessert. Eine Bulttorfmoosetablierung auf nackten Bänken aus Schwarztorf ist demgegenüber nur zu empfehlen, wenn auch in trockenem, niederschlagsarmen Perioden ein gleichbleibend hoher und stabiler Wasserstand gewährleistet werden kann, etwa durch das Zupumpen von Wasser aus benachbarten Flächen oder Reservoirs, da dem Schwarztorf die Fähigkeit zur hydrologischen Selbstregulation fehlt.



Mischungen mit einem hohen Anteil an breitblättrigen Sphagnum-Arten zeichnen sich in der Regel durch eine größere Wasserspeicherkapazität bzw. Austrocknungstoleranz aus und bleiben daher länger feucht, wenn der Wasserstand unter eine bestimmte Schwelle fällt, ab der die kapillare Wasserversorgung nicht mehr gegeben ist. Die Bildung von Sporen ist unter diesen Bedingungen keine Seltenheit.

6. Eine Ausbringung von Bulttorfmoossoden hat insbesondere unter ungünstigen Feuchte- und Konkurrenzbedingungen wesentliche Vorteile. Das Ausstreuen von Fragmenten ist nur bei sehr günstigen Feuchtebedingungen, möglichst optimal modellierten Oberflächen und unter geringem Konkurrenzdruck durch Gefäßpflanzen und/oder nährstoffaffine Schlenkentangmoose (*S. fallax*) zu empfehlen.
7. Bei der Vermehrung wie auch bei den Etablierungsexperimenten erwies sich *S. papillosum* als besonders robuste und widerstandsfähige Art, die auch unter ungünstigeren hydrologischen Bedingungen, höheren Trophieniveaus und stärkerem Konkurrenzdruck durch Gefäßpflanzen in der Lage ist, sich erfolgreich zu etablieren und lateral auszubreiten. Sowohl gegenüber zeitweiser Überflutung als auch gegenüber Austrocknung zeigte sich die Art aufgrund ihrer sehr kompakten und robusten Struktur mit Abstand am wenigsten empfindlich. Demgegenüber gelang eine erfolgreiche Etablierung von *S. rubellum* nur unter optimalen Wasserstands-, Nährstoff- und Konkurrenzbedingungen, während *S. medium* diesbezüglich eine Mittelstellung einnimmt.

8. Für die Renaturierungspraxis leitet sich daraus die Empfehlung ab, unter den für eine Bulttorfmoosetablierung häufig eher suboptimalen hydrologische Bedingungen Nordwestdeutschlands schwerpunktmäßig auf *S. papillosum* zu setzen und die beiden anderen Arten nur in geringen Anteilen beizumischen, um nach Ausbildung einer geschlossenen Torfmoosdecke eine spätere Sukzession und Nischendifferenzierung zu gewährleisten. Mischungen mit Dominanz von *S. rubellum* oder *S. medium* sollten in der Etablierungsphase demgegenüber nur unter optimalen Wasserstands-, Trophie- und Konkurrenzverhältnissen Verwendung finden. Allgemein ist davon auszugehen, dass verschiedene Arten unterschiedliche Wachstums- und Überlebensoptima haben. Daher bieten Moosmischungen anstelle streng definierter Einzelarten generell Vorteile und ermöglichen eine an den jeweiligen Standort angepasste natürliche Selektion und Nischendifferenzierung.



Überlaufrohr zur Vermeidung langanhaltender winterlicher Überstauungen einer Renaturierungsfläche, die im Extremfall zum Ausfall eingebrachter Bultorfmoose führen können. Im Zuge des Klimawandels werden begleitende regulatorische Maßnahmen zur Kontrolle der Wasserstände auf Renaturierungsflächen weiter an Bedeutung gewinnen.

6 Risiken der Nichtetablierung und flankierende Maßnahmen

Wie in den Abschnitten 4 und 5 bereits beschrieben, bergen verschiedenste Faktoren das Risiko einer Nichtetablierung. Dieses Risiko sollte vor Beginn der Maßnahmen soweit wie möglich minimiert werden. Dies gilt insbesondere dann, wenn Bulttorfmoose aus Naturflächen entnommen werden und diese wertvollen Flächen so trotz mangelnder Aussicht auf eine erfolgreiche Wiederansiedlung der Moose beeinträchtigt werden. Aber auch die Sinnhaftigkeit von Vermehrungsanlagen ist bei ausbleibenden Etablierungserfolgen grundsätzlich in Frage zu stellen.

Werden Bulttorfmoose in Sodenform eingebracht, so sind diese sowohl bei Material aus Vermehrungsanlagen als auch von Naturstandorten häufig bereits mit typischen Begleitarten verwachsen. So konnten in diesem Projekt regelmäßig Übertragungen und sekundäre Ausbreitungen von typischen Gefäßpflanzen der Hochmoore wie Weißem Schnabelried (*Rhynchospora alba*), Rundblättrigem Sonnentau (*Drosera rotundifolia*), Moosbeere (*Vaccinium oxycoccos*), Rosmarinheide (*Andromeda polifolia*) und Glockenheide (*Erica tetralix*) beobachtet werden. Fehlen diese Arten nach der Bulttorfmoosetablierung noch teilweise oder vollständig, so können diese vergleichsweise einfach durch das punktuelle Einbringen von Einzelpflanzen, Stecklingen oder Rhizomen etabliert werden, was in der Folge meist zu einer raschen vegetativen Vermehrung und Ausbreitung der genannten Arten führt.



Nach dem Ausbringen von Bulttorfmoossoden im Frühjahr auf nacktem Torf (A) ist es besonders empfehlenswert, zusätzlich Stroh (B) auszubringen, da sonst vor allem im Sommer weit mehr Wasser verdunstet, als normalerweise durch Niederschlag fällt.

Der größte Risikofaktor in den verschiedenen Stadien der Hochmoorregeneration liegt zweifellos im temporären Wassermangel beziehungsweise der sommerlichen Austrocknung der Standorte. Betroffene Flächen finden sich in Nordwestdeutschland häufig, sei es aufgrund einer problematischen Reliefierung (oft bei Handtorfstichen),



Wenngleich Bulttorfmoose eine längere Überstauung (> 4 Wochen) nach dem Ausbringen von Soden besser zu tolerieren scheinen als nach dem Ausbringen von Fragmenten, kann dies auch ein Nachteil sein, vor allem dann, wenn sie in der Zwischenzeit von Schlenkentangmoosen überdeckt werden. Das Risiko einer Nichtetablierung kann in diesem Fall auf natürliche Weise durch die Beimpfung von Ammenpflanzen oder eines tragfähigen Akrotelms verringert werden.

durch unterschiedliche Niveaus der Abtorfung oder aufgrund von Wasserverlusten an der Basis oder in Gräben. Besonders bei durch den Klimawandel bedingten längeren Trockenphasen im Frühjahr und Sommer können in Zukunft hydrologische Pufferzonen zunehmend wichtig werden. Das Wasser sollte, auch bei nicht optimaler Qualität, soweit irgend möglich in der Fläche gehalten werden. Neben dem Ausbleiben von Niederschlägen sind die Gründe für Wassermangel und Trockenheit vielfältig und erfordern meist eine großräumigere hydrologische Betrachtung. Durch die Nutzung benachbarter Flächen liegen die Grundwasserspiegel in der Umgebung der Moorkörper meist tiefer und über unzureichend abgedichtete Strukturen (z. B. Gräben) oder bei Durchstoßen der Moorbasis (z. B. bei geringer Niedermoortorfunterlage wurzelechter Hochmoore) gehen große Mengen Wasser verloren. Hier können in problematischen Fällen nur größere Eingriffe helfen, wie z. B. die Anlage von

größeren, tief begründeten Dämmen, aufstauenden Schichten, Dichtwänden oder die Schaffung größerer Pufferzonen mit hohem Wasserspiegel und Wasserrückhaltevermögen.

Innerhalb der Fläche kann eine kleinräumige Variabilität der Feuchte positiv zu bewerten sein, bieten doch trockenere Bereiche Schutz vor zu langem Überstau im Winter und feuchtere Mulden Rückzugsorte und Überdauerungsorte für Moorvegetation in Trockenphasen. Trockenere Strukturen können aus Wällen oder Dämmen herrühren, feuchtere Mulden entstehen beispielsweise bei der Entnahme von Material zur Abdichtung von Gräben. Zu trockene Bedingungen lassen sich meist bereits aus der Vegetation ableiten. Eine Dominanz von Besenheide (*Calluna vulgaris*) und/oder Pfeifengras (*Molinia caerulea*) zeigt klar an, dass vor dem Versuch einer Bulttorfmoosetablierung oder zumindest begleitend die Hydrologie verbessert werden muss. Auch Birkenaufwuchs trägt nachhaltig zu hohen Wasserverlusten durch Transpiration bei. Eine regelmäßige Entkusselung kann hier Abhilfe schaffen.

Auch zu viel Wasser kann den Etablierungserfolg beeinträchtigen. Zu langer Überstau in den Wintermonaten wird von Bulttorfmoosen meist nicht toleriert und die Etablierung ist gefährdet. Daher ist bei hohen Wasserständen eine Begleitvegetation wichtig, an der die Bulttorfmoose hochranken und so die richtige Höhe bezüglich des Wasserspiegels halten können. Bei hohen Wasserständen und

ohne Begleitvegetation kommt es zudem zu Wellenschlag, welcher die Ausbreitung von Torfmoosen erschwert oder gar verhindert. In solchen Fällen breitet sich die Verlandung nur langsam vom Rand oder von einzelnen Strukturen aus. Trotzdem sollte wegen des zunehmenden Risikos des Wassermangels im Frühjahr und Sommer so viel Wasser wie möglich in der Fläche gehalten werden. Dies kann durch eine kluge Anlage der Flächen gelingen, z. B. durch Parzellierung, Schaffung von Pufferspeichern in existierenden Strukturen, gezielte und regulierbare Überläufe, kleinskalige, kaskadenartige Anstauung von Drainagen mit nur geringen Geländehöhenunterschieden und ähnlichen Vorkehrungen.

Ein hoher Nährstoffstatus der Fläche ist ein weiterer wesentlicher Faktor, der eine erfolgreiche Etablierung verhindern kann. Hohe Nährstoffverfügbarkeit bedingt meist eine hohe Konkurrenz durch unerwünschte Vegetation (Flutterbinse u. Ä., siehe Sukzessionsstadien), insbesondere auch bei Freilegung des nackten Torfes. Hierzu wurden in der Vergangenheit umfangreiche Versuche zum Oberbodenabtrag, insbesondere bei landwirtschaftlicher Vornutzung, durchgeführt. Ein Oberbodenabtrag stellt natürlich einen erheblichen Arbeits- und Kostenfaktor dar. Es lässt sich damit jedoch die Nährstoffbelastung der Fläche und der Druck durch hochmooruntypische Vegetation nachhaltig und definiert reduzieren. Hier ist zu beachten, dass das entfernte Material auch wieder einen Einfluss auf die Fläche ausübt, wenn es beispielsweise um die Fläche herum als

Verwallung aufgebracht wird. Da dieser Einfluss aber nur am Rand besteht, ist er weitaus weniger problematisch und der vergleichsweise stark zersetzte Torf kann das Wasser durch geringe Leitfähigkeiten gut in der Fläche halten. Während sich in der Praxis ein Oberbodenabtrag von 30 cm als Orientierung etabliert hat, sollte möglichst die Tiefe der Torfdegradation und Nährstoffanreicherung bestimmt werden, um die Abtragtiefe effektiv, aber dennoch so gering wie notwendig zu halten.

Auch bei Abtorfungsflächen kann eine übermäßige Nährstoffbelastung eintreten, wenn Einträge aus noch in landwirtschaftlicher Nutzung befindlichen Nachbarflächen nicht beachtet werden. Hier können trennende Strukturen, idealerweise aus gewachsenem Torf, und eine angepasste Wasserführung auf den noch drainierten Flächen möglicherweise Abhilfe schaffen. Derartige Situationen bringen jedoch meist aufgrund der Kleinskaligkeit nachhaltige Probleme in der Hydrologie mit sich.

Mittel- bis langfristig ließen sich die Renaturierungschancen auch durch eine Absenkung der atmosphärischen Stickstoffeinträge aus der Landwirtschaft deutlich verbessern. Zusammen mit hydrologischen Veränderungen im Zuge des rezenten Klimawandels bergen atmosphärische Stickstoffeinträge aktuell zweifelsohne das größte Hemmnis bei der Wiederherstellung funktional intakter Hochmoorökosysteme.



Ältere großflächige Wiedervernässungen mit viel offenem Wasser und allmählich fortschreitender Schwingrasenentwicklung. Die Herausforderung der nächsten Jahrzehnte wird es sein, im Zuge des Klimawandels entsprechende Flächen mittelfristig wieder in sich hydrologisch selbst regulierende Treibhausgassenken zu verwandeln. Hierzu ist neben einer flexiblen und fachlich fundierten Maßnahmenplanung begleitend auch weitere wissenschaftliche Grundlagenforschung notwendig.

7 Ausblick

Bemühungen, die Regeneration eines sich selbst regulierenden Moorökosystems zu initiieren, werden in Zukunft aus den genannten Gründen – hydrologische Störungen, fehlende Quellpopulationen der Zielvegetation, Eutrophierung, atmosphärische Stickstoffdeposition u. a. – immer wichtiger werden. Die Überwachung des Zustandes und der Entwicklung möglichst großer Renaturierungsflächen erfordert zudem langfristige Messungen, die nur mit fachlicher Kompetenz und/oder wissenschaftlicher Begleitung durchgeführt werden sollten. An dieser Stelle weisen die Autoren ausdrücklich auf das hohe Interesse von Forschungs- und Bildungseinrichtungen (Universitäten, Hochschulen) an derlei Aufgaben hin. In einigen Ländern wurden durch derartige Kooperationen weitreichende und grundlegende Kenntnisse gewonnen (z. B. Niederlande, Kanada, baltische Staaten). Neue Renaturierungs- und Managementkonzepte sind notwendig, da sie einen wertvollen Beitrag zum besseren Verständnis und zum Erhalt der nachhaltigen Leistungsfähigkeit von Hochmoorökosystemen leisten können. An vielen Beispielen wird sichtbar, dass gegenwärtige Ansätze der Renaturierung oft nicht zum Ziel führen – aus verschiedensten Gründen, die an dieser Stelle nicht vollumfänglich behandelt werden können. Entsprechende Begleitmaßnahmen und Etablierungsansätze, wie sie in diesem Handlungsleitfaden aufgezeigt werden, können die Erfolge deutlich beschleunigen und damit auch die dem Torfabbau folgenden Renaturierungen besser und nachvollziehbar einleiten. In gut entwickelten



Maßnahmen zur Etablierung von Bulttorfmoosen erfordern neben einer sorgfältigen Planung auch ein regelmäßiges Monitoring des Maßnahmen-erfolgs, um im konkreten Fall Fehlentwicklungen entgegenzuwirken und grundsätzlich wichtige Erkenntnisse für zukünftige Renaturierungsmaßnahmen zu gewinnen.

Renaturierungsflächen sollten zusätzliche Maßnahmen selbstverständlich nur bei Bedarf und zielgerichtet durchgeführt werden. Es sollte von Fall zu Fall entschieden werden, welche Maßnahmen tatsächlich notwendig und sinnvoll sind. Vielerorts sind sicherlich zunächst weitere Untersuchungen notwendig, oft im Hinblick auf die Hydrologie, um festzustellen, wo großflächigere Ansiedlungen von Bulttorfmoosen aussichtsreich sind.



Die Wiederansiedlung der für Hochmoore typischen Zielvegetation ist am erfolgreichsten in älteren, meist abgelegenen Sukzessionsstadien mit zum Zeitpunkt der Ausbringung bereits gut entwickelten, aber zunächst artenarmen Torfmoos-Schwingdecken. Längerfristige Studien werden zeigen, inwieweit sich punktuelle Torfmoosausbringungen weiterhin erfolgreich in der Fläche ausbreiten und den Lebensraum verändern.

Die tolerantesten Arten, die eingesetzt werden können, sind *S. papillosum* und *S. medium*, obwohl auch diese ihre größten Etablierungsraten in der Regel nur bei konstant hohen Wasserständen erzielen. Sie vertragen jedoch am besten winterlichen Überstau. Bei nicht ausreichender Kenntnis der Arten und/oder problematischen Bedingungen kann es klug und vorteilhaft sein, auf Mischungen zu setzen, um nicht das gesamte eingesetzte Material zu verlieren. Obwohl eine Dominanz von Schlenkentangmoosen und ein dichter Bestand von *E. vaginatum* ohne Akrotelm bei zeitweilig hohen Wasserständen einem naturnahen Moor bereits wieder ähnelt (derartige Bilder werden häufig in den Medien verbreitet), könnte ein lückiger Bestand von *E. angustifolium* oder *Juncus effusus* mit minerotrophen *Sphagna* wie *S. fallax* oder *S. squarrosum* eher die Regeneration eines ombrotrophen Moores mit entsprechenden Bultarten gewährleisten, auch wenn dies zeitweise zu erhöhten Methanemissionen durch die Gefäßpflanzenvegetation bei gleichzeitig hohen Wasserspiegeln führen kann.

Die Auswahl und Umsetzung eines Renaturierungskonzeptes und dessen Erfolg hängen nicht zuletzt von dessen Zielen und Budget ab. Um beurteilen zu können, ob ein Standort für die Ansiedlung von Torfmoosen geeignet ist, können Indikatoren wie die vorherrschende Vegetation, die oberirdische Biomasse und der Nährstoffgehalt, die Wasserstände und die Wasserhaltefähigkeit des Oberbodens etc. herangezogen werden.

Ein Monitoring der Boden-, Wasser- und Pflanzenchemie ist unbedingt zu empfehlen, wird sich aber in der Praxis vermutlich auf einige wenige Schlüsselvariablen beschränken müssen.

Die nicht unerheblichen Herausforderungen und Risiken, vor allem aber die großen Chancen der Hochmoorregeneration aufzuzeigen, dazu soll dieser kompakte Handlungsleitfaden für die Vermehrung und Etablierung von Bultangmoosen beitragen. Vorauszusetzen ist in jedem Einzelfall die Berücksichtigung der vorherrschenden Standortfaktoren, eine umfassende und vorausschauende Planung und eine längerfristige Begleitung der Flächen, um bei Bedarf frühzeitig korrigierend einwirken zu können.

Literaturverzeichnis

- Beike, A. K.; Spagnuolo, V.; Lüth, V.; Steinhart, F.; Gómez, J.-R.; Krebs, M.; Adamo, P.; Asensio, A. I. R.; Ferndández, J. A.; Giordano, S.; Decker, E. L. & Reski, R.** (2015): Clonal in vitro propagation of peat mosses (*Sphagnum* L.) as novel green resources for basic and applied research. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 11(3), 1037–1049.
- Breeuwer, A.; Heijmans, M. M. P. D.; Robroek, B. J. M. & Berendse, F.** (2008): The effect of temperature on growth and competition between *Sphagnum* species. – *Oecologia* 156: 155–167.
- Breeuwer, A.; Heijmans, M. M. P. D.; Robroek, B. J. M. & Berendse, F.** (2010): Field Simulation of Global Change: Transplanting Northern Bog Mesocosms Southward. – *Ecosystems* 13: 712–726.
- Brown, C.M.; Strack, M. & Price, J. S.** (2017): The effects of water management on the CO₂ uptake of *Sphagnum* moss in a reclaimed peatland. – *Mires and Peat* 20: 1–15.
- Bu, Z.-J.; Zheng, X.-X.; Rydin, H., Moore, T. & Ma, J.** (2013): Facilitation vs competition: Does interspecific interaction affect drought responses in *Sphagnum*? – *Basic and Applied Ecology* 14: 574–584.
- Bucharova, A.; Bossdorf, O.; Hölzel, N.; Kollmann, J.; Prasse, R. & Durka, W.** (2019): Mix and match: regional admixture provenancing strikes a balance among different seed-sourcing strategies for ecological restoration. *Conserv Genet* (2018): 1–11.
- Bucharova, A.; Michalski, S.; Hermann, J.-M.; Heveling, K.; Durka, W.; Hölzel, N.; Kollmann, J. & Bossdorf, O.** (2017): Genetic differentiation and regional adaptation among seed origins used for grassland restoration: lessons from a multispecies transplant experiment. *Journal of Applied Ecology* 54 (1): 127–136.
- Cagampan, J. P. & Waddington, J. M.** (2008): Net ecosystem CO₂ exchange of a cutover peatland rehabilitated with a transplanted acrotelm. – *Écoscience* 15 (2): 258–267.
- Campeau, S. & Rochefort, L.** (1996): *Sphagnum* regeneration on bare peat surfaces: field and greenhouse experiments. – *Journal of Applied Ecology* 33: 599–608.
- Chimner, R.A., Cooper, D.J., Wurster, F. C. & Rochefort, L.** (2017): An overview of peatland restoration in North America: where are we after 25 years? – *Restoration Ecology* 25: 283–292.
- Clymo, R. S.** (1973): The Growth of *Sphagnum*: Some Effects of Environment. *Journal of Ecology* 61(3): 849–869.
- 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. von** (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 Landschaftspfl. Niedersachs. Heft A/4*: 1–326. Hannover.
- Durka, W.; Michalski, S. G.; Berendzen, K. W. et al.** (2017): Genetic differentiation within multiple common grassland plants supports seed transfer zones for ecological restoration. *Journal of Applied Ecology* 54, 116–126.

- Edom, F.** (2001): Moorlandschaften aus hydrologischer Sicht (chorische Betrachtung). In: Succow, M; Joosten, H. (Eds.): Landschaftsökologische Moorkunde, Schweizerbart, Stuttgart, 185–228.
- Eigner, J. & Schmatzler, E.** (1991): Handbuch des Hochmoorschutzes. – Kilda-Verlag, Greven.
- Farrick, K.K. & Price, J. S.** (2009): Ericaceous shrubs on abandoned block-cut peatlands. Implications for soil water availability and *Sphagnum* restoration. – *Ecohydrology* 2 (4): 530–540.
- Frolking, S.; Talbot, J.; Jones, M. C.; Treat, C. C.; Kauffman, J. B.; Tuittila, E.-S.M.; Roulet, N.** (2011): Peatlands in the Earth's 21st century climate system. *Environ. Rev.* 19, 371–396.
- Gaudig, G.** (2002): Das Forschungsprojekt: »Torfmoose (*Sphagnum*) als nachwachsender Rohstoff: Etablierung von Torfmoosen – Optimierung der Wachstumsbedingungen«. *TELMA* 32: 227–242.
- Gaudig, G.; Fengler, F.; Krebs, M.; Prager, A.M.; Schulz, J.; Wichmann, S. & Joosten, H.** (2014): *Sphagnum* farming in Germany – a review of progress. – *Mires and Peat* 13 (2013/14): 1–11.
- Gaudig, G.; Fengler, F.; Krebs, M.; Prager, A.M., Schulz, J.; Wichmann, S. & Joosten, H.** (2014): *Sphagnum* farming in Germany – a review of progress. – *Mires and Peat* 13 (08): 1–11.
- Gaudig, G.; Krebs, M. & Joosten, H.** (2017): *Sphagnum* farming on cut-over bog in NW Germany: Long-term studies on *Sphagnum* growth. – *Mires and Peat* 20 (4): 1–19.
- González, E. & Rochefort, L.** (2014): Drivers of success in 53 cutover bogs restored by a moss layer transfer technique. – *Ecological Engineering* 68: 279–290.
- 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. M.; Lehman, C.; Dyke, A., Clymo D. & Janssens, J.** (2012): Long-term carbon sequestration in North American peatlands. *Quat. Sci. Rev.*, 58: 77–82.
- Graf, M.; Bredemeier, B.; Grobe, A.; Köbbing, J. F.; Lemmer, M.; Oestmann, J.; Rammes, D.; Reich, M., Schmilewski, G.; Tiemeyer, B. & Zoch, L.** (2017): Torfmooskultivierung auf Schwarztorf: ein neues Forschungsprojekt in Niedersachsen. – *Telma* 47: 109–128.
- Granath, G.; Strengbom, J. & Rydin, H.** (2010): Rapid ecosystem shifts in peatlands: Linking plant physiology and succession. – *Ecology* 91: 3047–3056.
- Gunnarsson, U.; Hassel, K. & Söderström, L.** (2005): Genetic structure of the endangered peat moss *Sphagnum angermanicum* in Sweden: A Result of historic or contemporary processes? *Bryologist* 108: 194–203.
- 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*. – *Biological Conservation* 135: 450–458.
- Hájek, T. & Vicherová, E. W.** (2014): Desiccation tolerance of *Sphagnum* revisited. A puzzle resolved. *Plant biology* (Stuttgart, Germany) 16 (4), 765–773.
- Hassel, K.; Kyrkjeeide, M. O.; Yousefi, N.; Prestø, T.; Stenøien, H. K.; Shaw, J. A. & Flatberg, K. I.** (2018): *Sphagnum divinum* (sp. nov.) and *S. medium* Limpr. and their relationship to *S. magellanicum* Brid. *Journal of Bryology* 40 (3), 197–222.

- Hölzel, N.; Kleinebecker, T.; Knorr, K.; Raabe, P. & Gramann, G.** (2019): Leitfaden zur Torfmoosvermehrung für Renaturierungszwecke. – Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück.
- Hölzer, A.** (2010): Die Torfmoose Südwestdeutschlands und der Nachbargebiete. Weissdorn-Verlag Jena: 247.
- 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.; Barros, V. R.; Dokken, D. J.; Mach, K. J.; Mastrandrea, M. D.; Bilir, T. E.; Chatterjee, M.; Ebi, K. L.; Estrada, Y. O.; Genova, R. C.; Girma, B.; Kissel, E. S.; Levy, A. N.; MacCracken, S.; Mastrandrea, P. R. and White, L. L. (eds.)]. 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.
- Joosten, H. & D.; 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.
- Kimmel, K. & Mander, M.** (2010): Ecosystem services of peatlands: implications for restoration. *Prog Phys Geogr*, 34 (4): 491–514.
- Krebs, M.; Gaudig, G. & Joosten, H.** (2016): Record growth of *Sphagnum papillosum* in Georgia (Transcaucasus): rain frequency, temperature and microhabitat as key drivers in natural bogs. *Mires and Peat* 18(1): 1–16.
- Kyrkjeeide, M. O.; Hassel, K.; Flatberg, K. I.; Shaw, A. J.; Brochmann, C. & Stenøien, H. K.** (2016a): Long-distance dispersal and barriers shape genetic structure of peatmosses (*Sphagnum*) across the Northern Hemisphere. *Journal of Biogeography* 43: 1215–1226.
- Kyrkjeeide, M. O.; Hassel, K.; Flatberg, K. I.; Shaw, A. J.; Yousefi, N., & Stenøien, H. K.** (2016b): Spatial genetic structure of the abundant and widespread peatmoss *Sphagnum magellanicum* Brid. *PLoS One* 11: e0148447.
- 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.
- 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.
- Limpens, J.; Tomassen, H. B. M. & Berendse, F.** (2003): Expansion of *Sphagnum fallax* in bogs. Striking the balance between N and P availability. – *Journal of Bryology* 25 (2): 83–90.
- 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.
- Malmer, N.; Svensson, B. M. & Wallen, B.** (1994): Interactions between *Sphagnum* mosses and field layer vascular plants in the development of peat-forming systems. – *Folia Geobot Phytotax* 29: 483–496.
- McCarter, C. P. R. & Price, J. S.** (2013): The hydrology of the Bois-des-Bel bog peatland restoration. 10 years post-restoration. *Ecological Engineering* 55, 73–81.
- Meinunger, L. & Schröder, W.** (2007): Verbreitungsatlas der Moose Deutschlands. – Hrsg. O. Dürhammer für die Regensb. Bot. Ges., 3 Bd., 2044 S., Regensburg.
- Mikulášková, E.; Hájek, M.; Veleba, A.; Johnson, M. G.; Hájek, T. & Shaw, J. A.** (2014): Local adaptations in bryophytes revisited: the genetic structure of the calcium-tolerant peatmoss *Sphagnum warnstorffii* along geographic and pH gradients. *Ecol Evol.* 5(1): 229–242.

- Millennium Ecosystem Assessment** (2005): Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis Report. Washington DC, Island Press.
- NLWKN Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz** (2006): 25 Jahre Niedersächsisches Moorschutzprogramm – Eine Bilanz. Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen 3: 150–188.
- Poschlod, P. & Pfadenhauer, J.** (1989): Regeneration vegetativer Sprossteilchen von Torfmoosen. Eine vergleichende Studie an neun *Sphagnum*-Arten. TELMA, 19: 77–88
- Prasse, R.; Kunzmann, D. & Schröder, R.** (2010): Entwicklung und praktische Umsetzung naturschutzfachlicher Mindestanforderungen an einen Herkunftsnachweis für gebietseigenes Wildpflanzensaatgut krautiger Pflanzen. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt (DBU FKZ: 23931), Hannover. <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-23931.pdf>.
- 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 (St. Albert, AB) & New Brunswick Department of Natural Resources and Energy (Fredericton, NB), Canada, 106 pp. – http://www.gret-perg.ulaval.ca/uploads/tx_centrecherche/Peatland_Restoration_guide_2ndEd.pdf, accessed 09 Jul 2019.
- 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.
- Raabe, P.; Hölzel, N.; Gramann, G.; Kleinebecker, T. & Knorr, K.-H.** (2019): Entwicklung und Erprobung von Verfahren zur Etablierung von Bulttorfmoosen in wiedervernässten Hochmooren nach Abtorfung. – Abschlussbericht zum Forschungsprojekt (DBU-AZ: 31995-33/0), Münster.
- Rydin, H.** (2009): Population and community ecology of bryophytes. – Bryophyte biology 10.
- Rydin, H. & Jeglum, J.** (2013): The Biology of Peatlands. Oxford University Press, New York, USA.
- Schmatzler, E.** (2015): Moornutzung und Moorschutz in Niedersachsen – Geschichtlicher Rückblick und zukünftige Entwicklung. TELMA Beiheft 5: 19–38.
- Schumann, M. & Joosten, H.** (2008): Global Peatland Restoration Manual. International Mire Conservation Group, Institute of Botany and Landscape Ecology, Universität Greifswald, Deutschland.
- Sliva, J. & Pfadenhauer, J.** (1999): Restoration of cut-over raised bogs in southern Germany - comparison of methods. Applied Vegetation Science 2(1): 137–148.
- Smolders, A. J. P.; Tomassen, H. B. M.; van Mullekom, M.; Lamers, L. P. M. & Roelofs, J. G. M.** (2003): Mechanisms involved in the re-establishment of *Sphagnum*-dominated vegetation in rewetted bog remnants. – Wetlands Ecology and Management 11 (6): 403–418.
- Stenøien, H. K. & Sæstad, S. M.** (1999): Genetic structure in three haploid peat mosses (*Sphagnum*). Heredity, 82, 391–400.
- Sundberg, S. & Rydin, H.** (2000): Experimental evidence for a persistent spore bank in *Sphagnum*. New Phytologist, 148, 105–116.
- Sundberg, S. & Rydin, H.** (2002): Habitat requirements for establishment of *Sphagnum* from spores. J. Ecol. 90: 268–278.
- Taylor, N. & Price, J.** (2015): Soil water dynamics and hydrophysical properties of regenerating *Sphagnum* layers in a cutover peatland. – Hydrological Processes 29 (18): 3878–3892.
- Timmermann, T.; Joosten, H. & Succow, M.** (2009): Restaurierung von Mooren. In: Zerbe S. & G. Wiegler (eds): 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.** (2004): Development of floating rafts after the rewetting of cut-over bogs: The importance of peat quality. – *Biogeochemistry* 71: 69–87.
- Tomassen, H. B. M.; Smolders, A. J. P.; Limpens, J.; Lamers, L. P. M. & Roelofs, J. G. M. R.** (2004): Expansion of invasive species on ombrotrophic bogs: desiccation or high N deposition? *Journal of Applied Ecology* 41: 139–150.
- Tuittila, E.-S.; Vasander, H. & Laine, J.** (2003): Success of re-introduced *Sphagnum* in a cut-away peatland. – *Boreal Environmental Research* 8: 245–250.
- Vanderpoorten, A. & Goffinet, B.** (2009): Introduction to bryophytes, Bryophytes in a changing world. – Cambridge University Press.
- Yousefi, N.; Hassel, K.; Flatberg, K. I.; Kemppainen, P.; Trucchi, E.; Shaw, A. J.; Kyrkjeeide, M. O.; Szövényi, P. & Stenøien, H. K.** (2017): Divergent evolution and niche differentiation within the common peatmoss *Sphagnum magellanicum*. *American Journal of Botany*, 104: 1060–72.

Impressum

Herausgeber

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück
www.dbu.de

Stiftung Lebensraum Moor
Gabriela Sofia Gramann
Tannenhof 16, 49377 Vechta
www.stiftung-lebensraum-moor.de

Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Institut für Landschaftsökologie, AG Biodiversität und Ökosystemforschung
Heisenbergstr. 2, 48149 Münster
Prof. Dr. Dr. h.c. Norbert Hölzel
www.uni-muenster.de/Oekosystemforschung

AG Ökohydrologie und Stoffkreisläufe
Prof. Dr. Klaus-Holger Knorr
www.uni-muenster.de/Ecohydrology

AG Biodiversität und Ökosystemforschung & AG Ökohydrologie und Stoffkreisläufe
M. Sc. Peter Raabe
www.uni-muenster.de/Oekosystemforschung und www.uni-muenster.de/Oekohydrologie

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Landschaftsökologie und Ressourcenmanagement, IFZ für Umweltsicherung
Prof. Dr. Till Kleinebecker
Heinrich-Buff-Ring 26–32, 35392 Gießen
www.uni-giessen.de/fbz/fb09

Gramoflor GmbH & Co. KG
Josef Gramann
Diepholzer Straße 173, 49377 Vechta
www.gramoflor.de

Verantwortlich

Prof. Dr. Markus Große Ophoff

Gestaltung

Helga Kuhn/Birgit Stefan

Bildnachweis

S. 7 Bernd Hofer
S. 10, 19 Albin Blaschka
S. 15 Dora Schilling (2019), in Anlehnung an Rydin & Jeglum 2013
S. 22 Albin Blaschka
S. 74 unten Klaus-Holger Knorr

Fotos, sofern nicht anders angegeben:

Norbert Hölzel, Till Kleinebecker, Klaus-Holger Knorr, Peter Raabe,
Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Institut für Landschaftsökologie;
Gabriela Sofia Gramann, Stiftung Lebensraum Moor und Gramoflor GmbH & Co. KG

DBU-Projektleitung

Dr. Reinhard Stock

Druck

Druckerei Niemeyer GmbH & Co. KG

Stand

Oktober 2022

Gedruckt auf 100 Prozent Recyclingpapier



Wir fördern Innovationen

Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Postfach 1705, 49007 Osnabrück
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück
Telefon: 0541 | 9633-0
Telefax: 0541 | 9633-690
www.dbu.de