

The background of the entire page is a close-up photograph of a lush green moss carpet. Interspersed among the moss are several long, thin, brown reeds or grass blades that cross the frame diagonally. The moss is vibrant green and densely packed, with many small, dark brown, spherical spore capsules visible on its surface.

Leitfaden zur Torfmoosvermehrung für Renaturierungszwecke

Handlungsleitfaden

Erstellt im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes

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

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. Norbert Hölzel, Prof. Dr. Till Kleinebecker, Prof. Dr. Klaus-Holger Knorr, Peter Raabe,
Institut für Landschaftsökologie der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster (WWU)

Gabriela Sofia Gramann,
Stiftung Lebensraum Moor

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



Inhaltsverzeichnis

6	1	Einleitung
6	1.1	Hochmoore als Gegenstand von Renaturierungsbemühungen
8	1.2	Defizite bisheriger Renaturierungsmaßnahmen
11	1.3	Ursachen der Ausbreitungslimitierung von Bulttorfmoosen
14	1.4	Ökosystemare Bedeutung von Bulttorfmoosen
16	1.5	Notwendigkeit einer gezielten Einbringung von Bulttorfmoosen
17	1.6	Vermehrung von Bulttorfmoosen als Grundvoraussetzung
17	1.7	Rechtliche Rahmenbedingungen der Entnahme, Vermehrung und Ausbringung von Bulttorfmoosen
19	2	Auswahl von Vermehrungsmaterial
19	2.1	Allgemeine Aspekte
22	2.2	Biologisch-ökologische Eigenschaften geeigneter Bulttorfmoosarten
26	2.3	Rolle der Herkunft und lokalen Adaption bei Bulttorfmoosen
29	3	Wasser und Substrat
29	3.1	Bewässerungstechniken
30	3.1.1	Staubbewässerung
31	3.1.2	Überkopfbewässerung
31	3.1.3	Bewässerung im Freiland
35	3.2	Wassermengen/Ausbringungszeitpunkt
36	3.3	Wasserqualität
36	3.4	Vermehrungssubstrate
36	3.4.1	Substrateigenschaften
39	3.4.2	Substrat- und Flächenvorbereitung
40	4	Ausbringungstechniken zur Vermehrung
40	4.1	Fragmente oder Einzelpflanzen
42	4.2	Soden

- 46 5 Vermehrungspotenziale in Abhängigkeit von Arteigenschaften und Umweltfaktoren**
- 47 5.1 Umwelteffekte/Steuerungsfunktionen
- 48 5.2 Arteffekte & Interaktionen

- 53 6 Beispiele erfolgreicher Vermehrungsanlagen**

- 57 7 Entscheidungshilfe zur Anlage einer erfolgreichen BTM-Vermehrung**

- 59 8 Literaturverzeichnis**

- 62 9 Impressum**



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

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 Schlenkentangmoosen (*Sphagnum cuspidatum*) (Foto: Bernd Hofer)

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, dem sogenannten Akrotelm, sowie der wassergesättigte, sauerstofffreie Bereich darunter, dem Katotelm oder 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 wechsel-feuchter Bedingungen oder zu hoher Trophie kommt es häufig zu Problemen durch die Ausbreitung von konkurrenzkräftigen



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.

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 Flächen auch nach über 30 Jahren meist nicht einstellen. (Foto: Albin Blaschka)

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 Bultorfmoosen

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 vorgeutzten 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 Bultorfmoose 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 Südkandinavien 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 vergrasten 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.

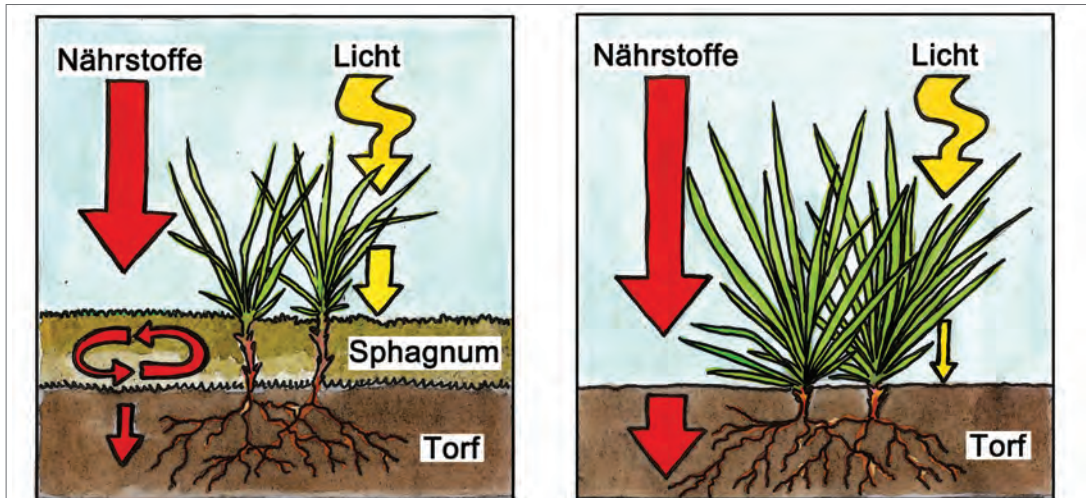


Kompakte Bulttorfmossdecken (im Bild Mischbestand aus *S. papillosum*, *S. medium* und *S. rubellum* in Vergesellschaftung mit Heidekrautgewächsen) sind von zentraler funktionaler Bedeutung für den Licht-, Wasser- und Nährstoffhaushalt von Hochmooren. Ohne die Etablierung dieser ökologischen Schlüsselarten 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 »ecosystem engineers« 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. (Abbildung in Anlehnung an Rydin & Jeglum 2013)

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

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. 2004). Die daraus resultierende starke Tendenz zur Vergrasung und Verbuschung mit Birke stellt damit aktuell eines der gravierendsten Probleme in der Hochmoorrenaturierung dar und kann im Grunde nur durch die Etablierung von



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

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 Bleichmoos für *Sphagnum* leitet sich aus der Eigenschaft ab, dass Bulttorfmoose bei Austrocknung sehr stark ausbleichen und nahezu weiß erscheinen. (Foto: Albin Blaschka)

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 häufigem Vorkommen in schattigen, luftfeuchten Wäldern, die daher schattentolerant sind und für die Wiederansiedlung auf bewaldeten Standorten geeignet sind

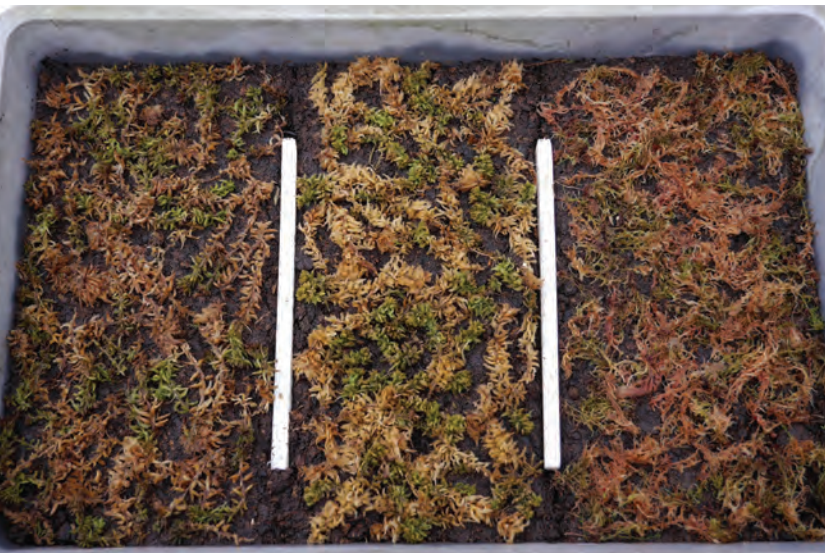
2.2 Biologisch-ökologische Eigenschaften geeigneter Bulttorfmoosarten

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 Einzelpflanzen 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 Schlenkentangmoosen 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 Einzelarteffekte zu untersuchen.

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 Wasserquantität und -qualität entwickeln. Hierdurch werden die vitalen Pflanzenteile an der Oberfläche bei gleichzeitiger Akkumulation abgestorbener Biomasse in tieferen Schichten zunehmend von schwankenden Umwelteinflüssen unabhängiger.

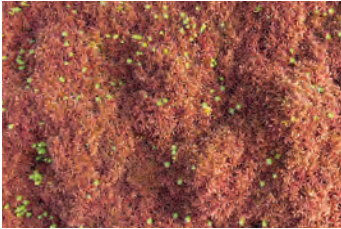

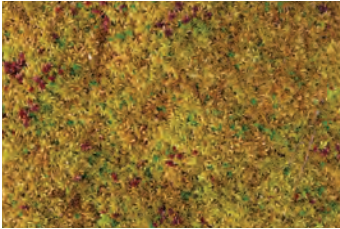
Natürlich gilt wie für alle Pflanzen auch bei *Sphagnum*, dass für optimales Wachstum eine ausreichende Beleuchtung und passende



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.

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). 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 ombrotrophenten 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 Azidophil 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 Treibhausgas 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 & Sâstad 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 & Sâstad 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 ausgewiesenen Herkunftsregion zugrunde zu legen. Im Falle der Vermehrung

von Bulttorfmoosen für Renaturierungszwecke beträfe dies ohnehin fast ausschließlich die Herkunftsregion 1, nordwestdeutsches Tiefland. 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:

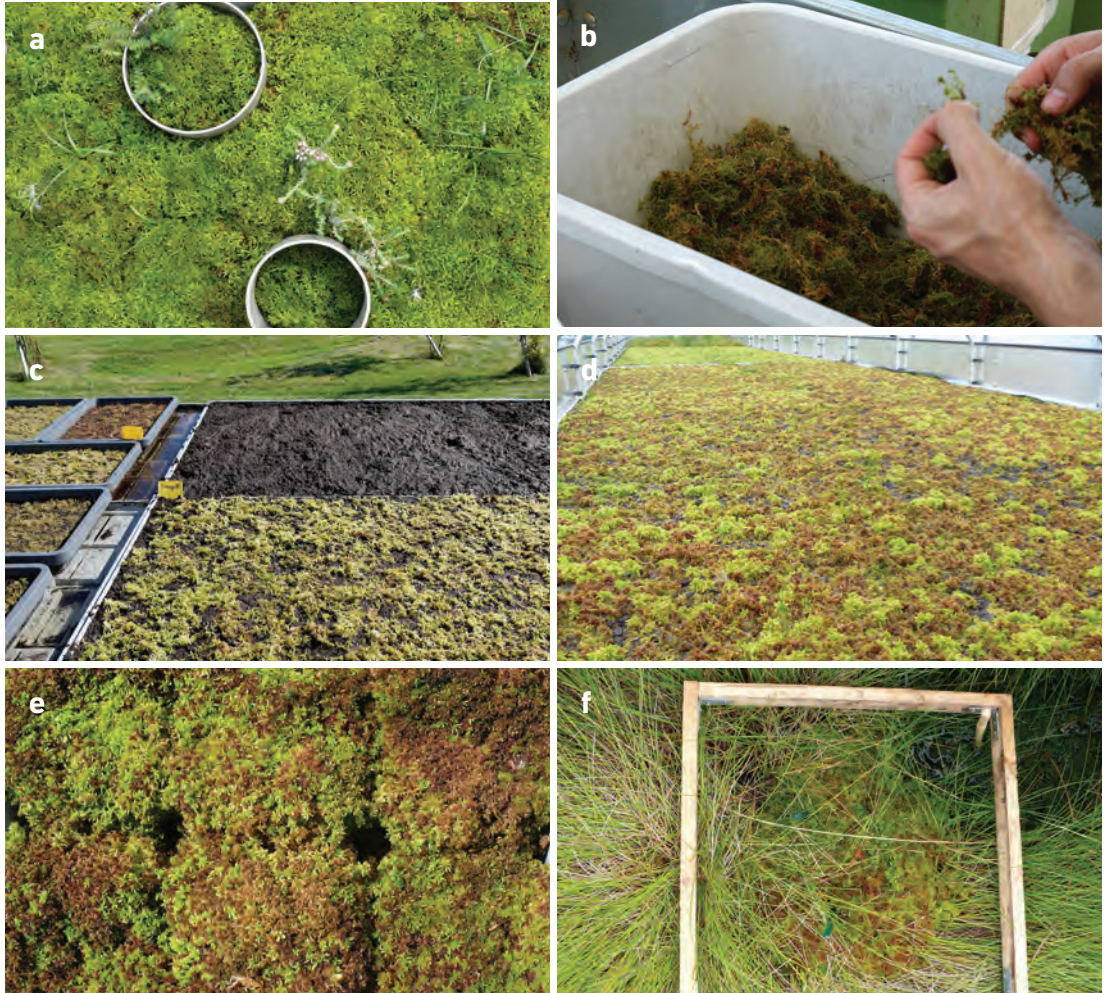
- 1) Da es sich bei potenziellen Spenderflächen zumeist um Schutzgebiete handelt, ist vorab eine behördliche Betretungsgenehmigung zu organisieren.
- 2) Vor der geplanten Entnahme ist eine Erkundung und gegebenenfalls eine Kartierung der Vorkommen infrage kommender Torfmoose durchzuführen. Hierbei sollten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

- 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.



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.

- 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>Staubewässerung</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 Staubewässerung

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 Staubewässerung 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 Wachstumsleistung 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



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.

bei der Staubebewässerung 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 Anstaubebewässerung 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.

Eine Sprüh-/Tropfbewässerung oder Beregnung kann als alleinige Bewässerung oder in Kombination mit Anstaubebewässerung 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 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.



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.

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. Gewichtsentslastung 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 Befuchtung 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 fest-

gestellt 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 austrocknungsempfindlichen, 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 Bultorfmoose 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 Bultorfmoose 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 Bultorfmoose 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 [2–7mm] 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	Freilandvermehrung
<p><i>Vermehrung in Schalen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Erleichtert die Entnahme und den Transport von gewachsenen Soden - Prädestiniert für kleinere Mengen <p><i>Vermehrung auf Vlies</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zur Verbesserung der Wasserspeicherkapazität der Substratschicht und großflächigeren Anzucht 	<p><i>Vermehrung auf gewachsenem Torf</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Nach Oberbodenabtrag (Entfernung von durchwurzelter und ggf. mit Nährstoffen belasteter Schichten) - Unebenheiten sind auszugleichen <p><i>Vermehrung auf frischem Substrat</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Zum Beispiel auf Folie aufgebracht 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

abgetorfte 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 TM/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 TM/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. Eine generelle



Bulttorfmoose und gleichzeitig mit etablierte hochmoortypische Begleitvegetation nach 12 Monaten in der Vermehrung auf Tischen mit Anstaubbewässerung 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.



Vermehrungsschale auf Bewässerungstisch mit ganzen Fragmenten der Art *S. papillosum* (Ausbringungsmenge: 30 g Trockenmasse pro Quadratmeter) zu Beginn der Vermehrung (links) sowie nach 14 Monaten (rechts)

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 kürzere Trockenphasen gut überstehen, lassen sich damit Reserven bilden, die bei unregelmäßiger Bewässerung und



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)

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

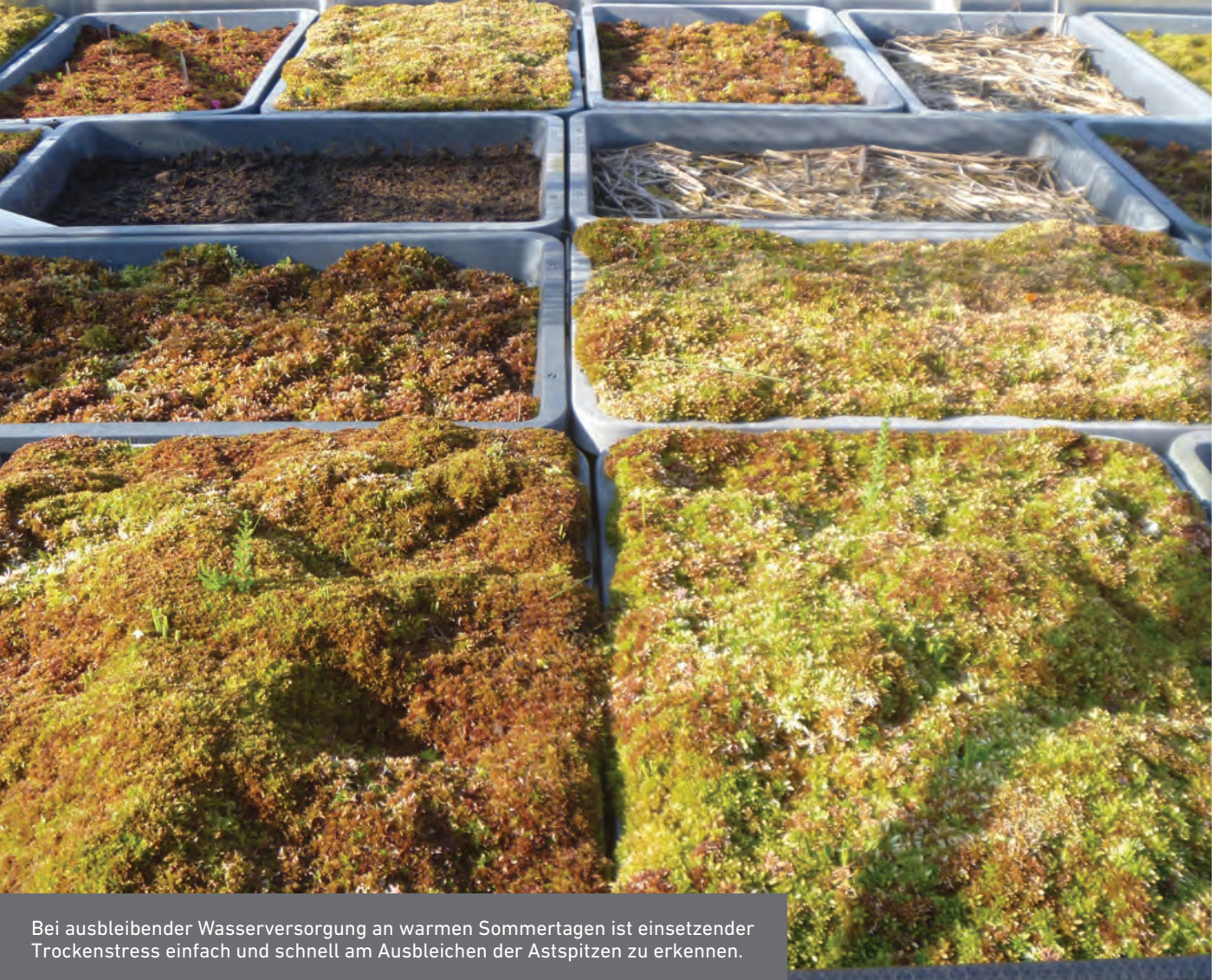
Lose, ganze Fragmente (Einzelpflanzen mit Capitula)	Zerkleinerte Fragmente (Pflanzenteile/Bruchstücke)	Moosmischungen
Manuelle Vereinzelung der Verzweigungen von gezupftem Material.	Maschinelle Zerkleinerung. Gebräuchlich im Zuge von großflächigen Entnahmen und Ausbringungen.	Kombination von Fragmenten unterschiedlicher Artenzusammensetzung zwecks Vermehrung in Mischkultur.
<p style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">Vorteile</p> <p>Die Vereinzelung von Hand entfällt.</p> <p>Leichter, großflächiges Austreuen in Verbindung mit Maschineneinsatz.</p> <p style="text-align: center;">Nachteile</p> <p>Bei starker Zerkleinerung (< 1 cm) besteht die Gefahr, dass der Schaden größer ist als der Nutzen bzw. dass intolerante Arten ausselektiert werden.</p> <p>Regenerationsfähigkeit der Arten variiert stark mit Fragmentlänge und Köpfchendichte.</p> <p>Bei permanentem Anstau begünstigen langsame Wachstumsraten die Ausbreitung von Algen.</p>	<p style="text-align: center;">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 style="text-align: center;">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>



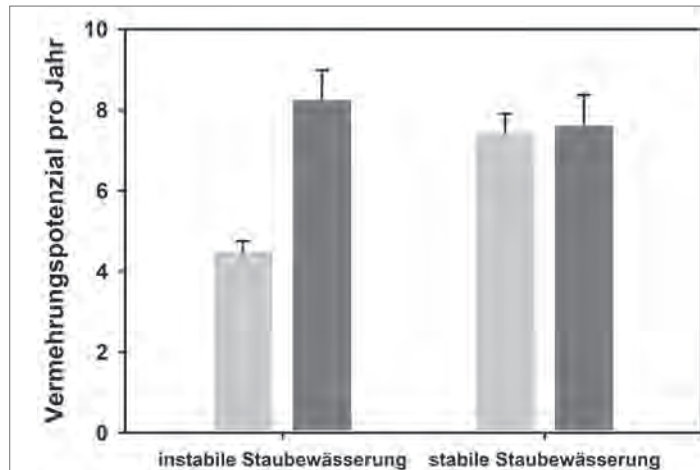
Bei ausbleibender Wasserversorgung an warmen Sommertagen ist einsetzender Trockenstress einfach und schnell am Ausbleichen der Astspitzen zu erkennen.

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, 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 Vergleich zum



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.

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 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, Strohbdeckung, seitlicher Windschutz).

Tabelle 5: Artspezifische potenzielle Vermehrungsraten pro Jahr (a); als Vielfache 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 wieder (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 Vermehrungszykluses 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 (cf. Limpens et al. 2003).

Tabelle 6: Artspezifische Vermehrungsraten (Vielfache der Ausgangsbiomasse) unter dauerfeuchten Bedingungen mit kontinuierlicher Speisung von Regenwasser über Stau- und Überkopfbewässerung

		<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-fache	5–12-fache	9–13-fache
Vermehrungsrate Köpfchendichte	18 M	9–11-fache	6–10-fache	8–9-fache

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 Bulttorfmoose haben sich Bewässerungstische

herausgestellt. Hier lassen sich die für hohe Vermehrungsraten optimalen Wachstumsbedingungen (Substrat und Bewässerung) bereits auf kleiner Fläche (10 m^2) 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 m^2 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



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

Pilzbefall oder zu einer massiven Ausbreitung von Algen kam.

Da auf Tischen nur geringe Substratmächtigkeiten ($< 5 \text{ cm}$) 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



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

Methode zur bedarfsoptimierten Versorgung, besonders in den frühen Morgenstunden. In trockenen Perioden sollte aber auch hier 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.

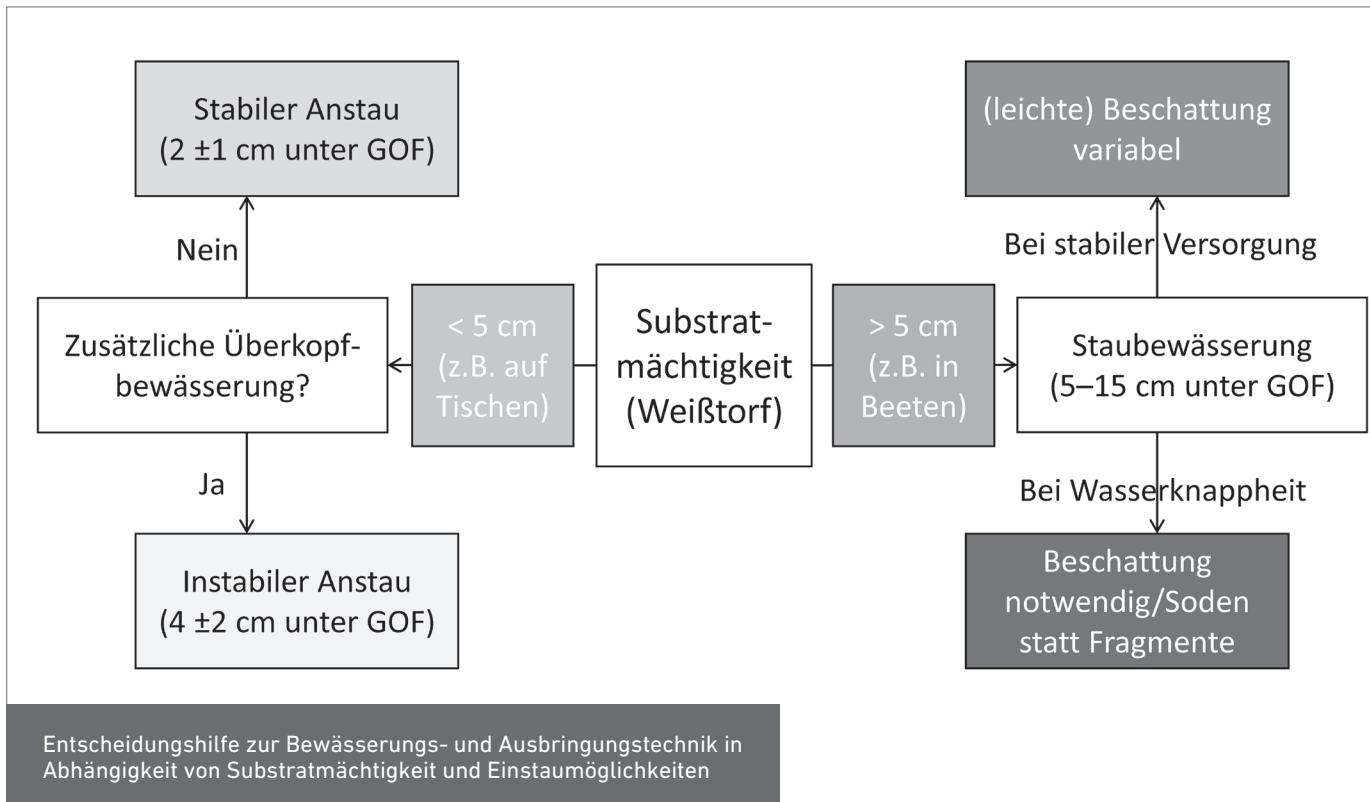


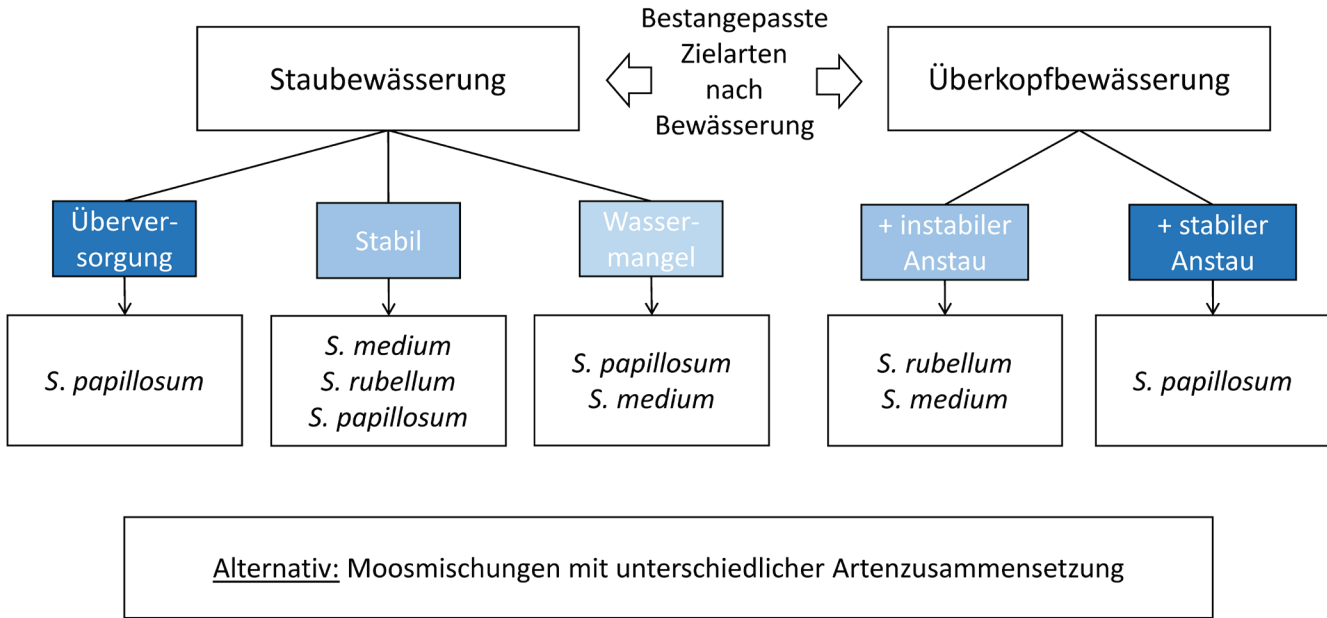
Um Wasserverluste zu minimieren, können flache Mulden mit Folie ausgelegt werden, welche anschließend mit frischem Weißtorfsubstrat (~10 cm) und Bewässerungstechnik versehen werden.

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/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 Vermehrung von Bultorfmoosen





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.

8 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.
- 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.
- 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. and Joosten, H. (eds), *Landschaftsökologische Moorkunde*. Schweizerbart, Stuttgart, 409–411.
- Couwenberg, J. & Joosten, H.** (2005): Self-organization in raised bog patterning: the origin of microtopo zonation and mesotope diversity. *Journal of Ecology* 93: 1238–1248.
- 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.
- Frolking, S.; Talbot, J.; Jones, M. C.; Treat, C. C.; Kauffman, J. B.; Tuittila, E.-S. & 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.
- Gorham, E. & L. 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.
- 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.
- Hájek, T. & Vicherová, E. W.** (2014): Desiccation tolerance of *Sphagnum* revisited. A puzzle resolved. *Plant biology* (Stuttgart, Germany) 16 (4), 765–773.
- Hassel, K.; Kyrkjæide, 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.

- 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 (Vodooobmen 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.; 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.
- 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.
- 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.
- 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 and New Brunswick Department of Natural Resources and Energy. Québec.
- Raabe, P.; Kleinebecker, T.; Knorr, K.-H.; Hölzel, N. & Gramann, G.** (2018): Vermehrung und Ansiedlung von Bulttorfmoosen in der Hochmoorrenaturierung – erste Ergebnisse eines Pilotprojekts im Landkreis Vechta (Niedersachsen). TELMA 48: 71–80.
- 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.
- 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.
- 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.
- Timmermann, T.; Joosten, H. & Succow, M.** (2009): Restaurierung von Mooren. In: Zerbe S. & G. Wiegleb (eds): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa. Spektrum, Heidelberg: 55–93.
- Tuittila, E.-S.; Vasander, H. & Laine J.** (2003): Success of re-introduced Sphagnum in a cut-away peatland. Boreal Environmental Research: 8, 245–250.
- Yousefi, N.; Hassel, K.; Flatberg, K. I.; Kempainen, P.; Trucchi, E.; Shaw, A. J.; Kyrkjæide, 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.

9 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

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

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/Ecohydrology

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

Verantwortlich

Prof. Dr. Markus Große Ophoff

Gestaltung

Helga Kuhn

Bildnachweis

Fotos, sofern nicht anders angegeben:

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

DBU-Projektleitung

Dr. Reinhard Stock

Druck

Druck- und Verlagshaus Fromm, Osnabrück

Stand

Februar 2019

Gedruckt auf 100 % 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