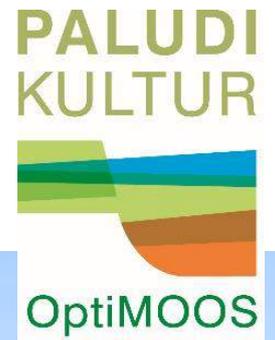


Abschlussbericht
zum Verbundprojekt OptiMOOS



Torfmooskultivierung optimieren:
Wassermanagement, Klimabilanz,
Biodiversität & Produktentwicklung

Laufzeit: 01.11.2019 – 31.12.2022

Förderer:

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz

Europäischer Fond für Regionale Entwicklung (EFRE)



Projektpartner, Auftragnehmer sowie bearbeitete Inhalte und Bearbeiter*innen

Projektpartner	Bearbeitete Inhalte	Bearbeiter*innen
Universität Greifswald	Koordination, Vegetations- entwicklung, Biomasseaufwuchs, Nährstoffe	Anja Prager Matthias Krebs Sylvia Wenzl Dr. Greta Gaudig Prof. Dr. Dr. h.c. Hans Joosten
Universität Rostock	Treibhausgase	Caroline Daun Prof. Dr. Gerald Jurasinski
Carl-von-Ossietzky-Universität Oldenburg	Libellen, technische Flächen- betreuung	Daniel Brötzmann Keno Gerwing Prof. Dr. Rainer Buchwald
Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover-Ahlem	Entwicklung Paludi- Substrat	Melanie Lüdtke Michael Emmel
Auftragnehmer		
Radboud Universität Nijmegen (Niederlande)	Nährstoffe	Sannimari Käärmelahti Dr. Gabrielle R. Quadra Dr. Ralph J.M. Temmink Dr. Christian Fritz
Dr. Dittrich & Partner Hydro- Consult GmbH	Hydrologie	Dr. Kristina Brust Dr. Andreas Wahren
DUENE e.V.	Ökonomie Spinnen Pilze	Dr. Sabine Wichmann Dr. Christoph Muster Rebecca Gebbe
Torfwerk Moorkultur Ramsloh GmbH & Co. KG	Flächeneinrichtung und –management	Silke Kumar Gunnar Koch Heinz Schmidt

Zitiervorschlag:

Gaudig, G., Brötzmann, D., Brust, K., Buchwald, R., Daun, C., Emmel, M., Fritz, C., Gebbe, R., Jurasinski, G., Käärmelahti, S., Krebs, M., Lüdtke, M., Muster, C., Prager, A., Quadra, G.R., Temmink, R.J.M., Wahren, A., Wichmann, S. & Joosten, H. (2023) Torfmooskultivierung optimieren: Wassermanagement, Klimabilanz, Biodiversität & Produktentwicklung (OptiMOOS), Abschlussbericht des Verbundprojektes. 125 S.

Inhalt

1. Hintergrund und Projektziele.....	6
2. Stand der Technik und daraus abgeleitete Projektinhalte.....	7
2.1. Wasserreinigung durch Filterbecken.....	7
2.2. Reduzierung des Oberbodenabtrags zur Verbesserung der Klimabilanz.....	8
2.3. Reduzierung des Grabenanteils zur Verbesserung der Klimabilanz.....	9
2.4. Eignung von Paludikultur-Biomasse als Ausgangsstoffe für gartenbauliche Substrate.....	9
3. Untersuchungsgebiet.....	10
4. Aufbau Feldversuch.....	12
4.1. Versuch Wasserfilterung.....	15
4.2. Versuch Minimierung Oberbodenabtrag.....	16
4.3. Versuch Minimierung Grabenanteil.....	17
4.4. Weiterführung langfristiger Feldversuch.....	18
5. Material und Methoden.....	19
5.1. Feldversuch.....	19
5.1.1. Vegetationsentwicklung und Biomasseaufwuchs.....	19
5.1.2. Zersetzungsversuch.....	20
5.1.3. Pilze.....	20
5.1.4. Wasserbedarf und Hydrologie.....	21
5.1.5. Nährstoffgehalte und Bilanzierung.....	24
5.1.6. Messung des Treibhausgas austausches.....	26
5.1.7. Libellenfauna.....	31
5.1.8. Spinnenfauna.....	32
5.1.9. Ökonomie.....	34
5.2. Klimaschrank-, Labor- und Gewächshausversuche zum Torfmooswachstum.....	35
5.2.1. Klimaschrankversuch zur Nährstoffversorgung von Torfmoosen.....	35
5.2.2. Laborversuch zur Reduktion der Toxizität von Hydrogencarbonat für <i>Sphagnum palustre</i>	36
5.2.3. Gewächshausversuch zur Reaktion von Torfmoosen auf Überstau und Austrocknung.....	37
5.3. Pflanzenbauliche Versuche mit Paludikultur-Biomasse.....	38
5.3.1. Rohstoffe und deren Aufbereitung zu Substratausgangsstoffen.....	38
5.3.2. Untersuchungen und Analysen zur Charakterisierung der Ausgangsstoffe und Substrate.....	41
5.3.3. Kulturversuche.....	42

6. Erzielte Ergebnisse.....	45
6.1. Schaffung geeigneter Wasserqualität bei Zusatzbewässerung für Torfmoos-Zielarten mittels Reinigung von Entwässerungswasser durch andere Paludikulturpflanzen.....	45
6.1.1. <i>Vegetationsentwicklung</i>	45
6.1.2. <i>Wasserbilanz</i>	46
6.1.3. <i>Wasserqualität und Nährstoffbilanz</i>	48
Feldversuch	48
Klimaschrankversuche zur Nährstoffversorgung von Torfmoosen	49
Laborexperiment zur Reduktion der Toxizität von Hydrogencarbonat	50
6.1.4. <i>Treibhausgase</i>	51
6.1.5. <i>Biodiversität</i>	53
Libellen.....	53
Spinnen	54
Flora	55
6.1.6. <i>Ökonomie</i>	55
6.1.7. <i>Zusammenfassung: Effektivität von bepflanzten Filterbecken zur Verringerung der Nährstofffracht</i>	61
6.2. Minimierung der Treibhausgasemissionen einer Torfmooskultur durch Reduzierung des Oberbodenabtrags auf Hochmoorgrünland (AP4)	62
6.2.1. <i>Entwicklung des Torfmoosrasens</i>	62
6.2.2. <i>Wasserbilanz</i>	62
6.2.3. <i>Wasserqualität und Nährstoffbilanz</i>	63
6.2.4. <i>Treibhausgase</i>	65
6.2.5. <i>Biodiversität: Flora</i>	66
6.2.6. <i>Ökonomie</i>	67
6.2.7. <i>Zusammenfassung: Effektivität von Oberbodenabtrag für die Etablierung einer Torfmoos- Paludikultur</i>	69
6.3. Minimierung der Treibhausgasemissionen einer Torfmooskultur durch Reduzierung des Anteils von Bewässerungsgräben im Produktionssystem (AP 5)	70
6.3.1. <i>Entwicklung des Torfmoosrasens</i>	70
6.3.2. <i>Wasserbilanz, Gewächshausversuch periodischer Überstau</i>	70
6.3.3. <i>Wasserqualität und Nährstoffbilanz</i>	74
6.3.4. <i>Treibhausgase, Herkunft C-Quellen zur Methanproduktion aus Gräben und Mechanismen zur Methanoxidation</i>	74
6.3.5. <i>Biodiversität: Flora</i>	76

6.3.6. Ökonomie	77
6.3.7. Zusammenfassung.....	77
6.4. Weiterführung der langfristigen Untersuchungen zu Etablierung, Wachstum, Regeneration und naturschutzfachlichem Wert der Torfmooskultur auf ehemaligem Hochmoorgrünland im Hankhauser Moor.....	77
6.4.1. Entwicklung des Torfmoosrasens	77
6.4.2. Zersetzungsversuch	79
6.4.3. Hydrologie	80
6.4.4. Wasserqualität und Nährstoffbilanz	87
6.4.5. Treibhausgase	88
6.4.6. Biodiversität.....	90
Libellen.....	90
Spinnen	94
Pilze	98
Flora	99
6.4.7. Ökonomie	103
6.4.8. Zusammenfassung.....	105
6.5. Eignung von Rohrkolben und Schilf in Kombination mit Torfmoos-Biomasse als Ausgangsstoffe für gartenbauliche Substrate (AP2).....	106
6.5.1. Literaturstudie	106
6.5.2. Charakterisierung der Substratausgangsstoffe.....	107
6.5.3. Pflanzenbauliche Versuche.....	113
7. Synthese und Schlussfolgerungen	114
8. Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit	116
9. Zitierte Literatur	119

1. Hintergrund und Projektziele

Um die Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens von 2015 zu erreichen, müssen in Bezug auf Moore 1.) die CO₂-Emissionen aus den Moorböden auf null reduziert werden, was nur durch deren Wiedervernässung erreicht werden kann und ist 2.) die Verwendung von fossilem Torf zu beenden. Gleichzeitig ist die Verfügbarkeit von hochwertigen Substratausgangsstoffen für den Erwerbsgartenbau sicherzustellen. Torfmoos-Paludikultur bietet die einzigartige Möglichkeit, diese drei Herausforderungen integrativ zu lösen.

Paludikultur erfolgt bei ganzjährig hohen Wasserständen bis zur Torfoberfläche oder darüber hinaus, bei gleichzeitiger Bewirtschaftung der Moore. Auf Hochmoorflächen ist nur der Anbau von Hochmoor-Arten sinnvoll, da die teils hohen Nährstoffansprüche von für Paludikultur relevanten Niedermoor-Pflanzenarten ohne zusätzliche Düngung langfristig nicht bedient werden können. Torfmoos ist die vielversprechendste Pflanzengattung für die nachhaltige Hochmoorbewirtschaftung, da die erzeugte Biomasse in großen Mengen im Gartenbau Anwendung finden kann. Flächenmäßig von geringerer Bedeutung ist der Anbau von Sonnentau, der auch als "Beiprodukt" von Torfmoos-Paludikultur geerntet werden kann (Baranyai *et al.* 2022).

Der Anbau von Torfmoos-Biomasse in Paludikultur auf wiedervernässten Hochmooren und die Verwendung von Torfmoos-Biomasse als hervorragender Torfersatz können einen wichtigen Beitrag für die Erreichung der Klimaschutzziele leisten. Deutschland nimmt hinsichtlich der Forschung und praktischen Umsetzung von Torfmoos-Paludikultur weltweit eine Vorreiterrolle ein. Hierzu trägt insbesondere die erfolgreiche Torfmoos-Paludikultur auf der indessen ca. 17 ha großen (brutto) Demonstrationsfläche auf ehemaligem Hochmoorgrünland im Hankhauser Moor bei, die seit 2011 in verschiedenen Projekten entwickelt wurde.

Die Produktionskette beim Torfmoos-Anbau beginnt mit der Saatgutherstellung, umfasst die Kultivierung auf einer Hochmoorfläche (von Flächenvorbereitung bis Ernte) bis zur Aufbereitung und Verwertung der produzierten Torfmoos-Biomasse z.B. für den Gartenbau (Abbildung 1).



Abbildung 1. Produktionskette bei der Torfmoos-Paludikultur

Ziel des Projektes OptiMOOS (2019-2022) war die Optimierung der Torfmoos-Paludikultur, insbesondere hinsichtlich Wassermanagement und Klimawirkung. Zwar ist der Biomasseaufwuchs der Torfmoose im Hankhauser Moor sehr hoch, jedoch wurden aufgrund nährstoffreicher Bedingungen andere als die Ziel-Torfmoosarten gefördert. Deshalb wurden in OptiMOOS Strategien zur Nährstoffreduktion vor der Bewässerung von Torfmoos-Paludikulturen erarbeitet und in Gewächshaus-, Mesokosmen- und Feldversuchen getestet. Dabei kamen auch andere Paludikulturpflanzen als Torfmoose zum Einsatz. Potentiale zur Reduktion der Klimawirkung von Torfmoos-Paludikulturen bestehen in der Reduktion des Oberbodenabtrags bei der Flächenvorbereitung sowie der Reduktion des Grabenanteils, da Gräben deutliche Treibhausgas (Methan)-Quellen sind. Beide Potentiale wurden in OptiMOOS adressiert. Im Ergebnis von OptiMOOS wurden sowohl die Nährstoffausträge in

Oberflächengewässer (durch Steigerung von Nährstoffrückhalt und -entzug), als auch die Treibhausgasemissionen durch eine Torfmoos-Paludikultur weiter reduziert. Neben der Umsetzung von Torfmoos-Paludikultur in der Fläche waren auch die Verwertung der in Paludikultur produzierten Biomasse zu einem Paludikultur-Substrat sowie die Untersuchung der langfristigen Effekte bei Etablierung, Wachstum und Regeneration einer Torfmoos-Paludikultur insbesondere im Hinblick auf Biomasseakkumulation, Nährstoffbilanz, Biodiversität und Ökonomie Schwerpunkte in OptiMOOS.

2. Stand der Technik und daraus abgeleitete Projektinhalte

2.1. Wasserreinigung durch Filterbecken

Torfmoos-Paludikulturen benötigen besonders während der Sommermonate neben dem Niederschlagswasser zusätzliches Bewässerungswasser. Dabei kann sich auch in Gebieten mit einer mittleren positiven Jahreswasserbilanz (mittlerer Jahresniederschlag übersteigt mittlere Jahresverdunstung) ein sommerliches Defizit von 300 mm ergeben. Um ein optimales Torfmooswachstum zu gewährleisten, ist dieses Defizit durch Zusatzbewässerung auszugleichen. Diese Zusatzbewässerung kann mit Wasser aus einer benachbarten Vorflut, mit während der Wintermonate zurückgehaltenem Überschusswasser oder bei qualitativer Eignung aus dem lokalen Grundwasserleiter erfolgen.

Im Hankhauser Moor wird bisher mit Entwässerungswasser aus dem angrenzenden, regelmäßig gedüngten Hochmoorgrünland über einen Vorfluter bewässert. Jedoch sind die Nährstoffgehalte des Wassers im Vergleich zu natürlichen Torfmoos-Standorten sehr hoch. Zwar wurde bislang eine hohe Torfmoos-Biomasse-Produktivität erreicht, aufgrund der hohen Nährstoffverfügbarkeit wurden jedoch andere als die Torfmoos-Zielarten sowie Gefäßpflanzen (z. B. *Juncus effusus*) gefördert, deren Anteile möglichst geringgehalten werden sollten, um einen qualitativ hochwertigen Substratrohstoff zu produzieren. Um ein optimales Wachstum der Torfmoos-Zielarten zu ermöglichen, die in natürlichen Mooren an nährstoffarme (oligotrophe) Bedingungen angepasst sind, sind die Aufrechterhaltung eines hohen Wasserstandes und die Unterdrückung von Konkurrenzarten notwendig. Letzteres kann durch die Verbesserung der Wasserqualität, insbesondere die Verringerung der Nährstofffrachten (v.a. von Stickstoff, Phosphor) erreicht werden. Die für Torfmoos-Paludikultur nachgewiesene Wasserfilterfunktion (Temmink *et al.* 2017) allein reicht nicht aus, um langfristig die Torfmoos-Zielarten zu begünstigen. Eine geeignete Strategie könnte deshalb sein, das Wasser vor seiner Nutzung zur Bewässerung von Torfmoos-Paludikulturen zu filtern. Ähnlich wie bei den ‚constructed wetlands‘ kann hierfür ein Filterbecken fungieren, in bzw. auf dem nährstoffliebende Paludikulturpflanzen, wie z.B. Rohrkolben oder Schilf wachsen (Gebremariam & Beutel, 2008, Sudarsan *et al.* 2015, Sylla *et al.* 2018, Geurts *et al.* 2020). ‚Constructed wetlands‘ (Pflanzenkläranlagen) sind künstliche Feuchtgebiete vorwiegend zur Reinigung von verschmutztem, also nährstoff- und zumeist basenreichem Abwasser mit der Nutzung der Filterfunktion durch die Vegetation, Mikroorganismen und den Boden. Bei herkömmlichen ‚constructed wetlands‘ besteht der Untergrund zumeist aus Sand oder Kies. Anders als bisher bei ‚constructed wetlands‘ erforscht, wurde in OptiMOOS erstmalig die Verwendung von saurem, nährstoffreichem Wasser (in Hochmoorbereichen) mit Torf als Untergrund getestet und hierfür mit Rohrkolben (*Typha angustifolia*) bzw. Schilf (*Phragmites australis*) bepflanzte Filterbecken angelegt.

Bei Rohrkolben kann die Torfoberfläche bis maximal 100 cm in der Wachstumsperiode überstaut werden (Oberdorfer 1994), jedoch ist die Produktivität und somit die Nährstoffaufnahme und Filterleistung höher, je geringer der Überstau ist. Geeignete Wasserstände für ein gutes Wachstum sind 10-30 cm über der Torfoberfläche. Schilf bildet bei Überstau Adventivwurzeln aus, die wesentlich stärker Mineralstoffe aufnehmen als die Rhizomwurzeln (Rodewald-Rudescu 1974). Der Überstau

sollte bei Schilf gleichmäßig hoch sein und 80 cm nicht übersteigen, um Wachstumseinbußen zu vermeiden (Engloner 2009). Neben der erwünschten Filterwirkung sind auch die Treibhausgasemissionen der Filteranlagen zu berücksichtigen. Natürliche Rohrkolben- und Schilfbestände stoßen bei Überstau ca. 4-8 t CO₂-äq. ha⁻¹ a⁻¹ aus, vor allem in Form von Methan (Couwenberg *et al.* in prep.). Um zu prüfen, wie hoch die Emissionen in den Wasserfiltern unter den Bedingungen im Hankhauser Moor sind, wurden diese in den Filterbecken gemessen. Für die Torfmoos-Paludikulturen wurde die Bedeutung als Ersatzlebensraum bereits nachgewiesen (Muster *et al.* 2015, 2020, Gaudig & Krebs 2016). Die Filtersysteme bieten zusätzliche Habitate bzw. Strukturelemente. In OptiMOOS wurde untersucht, inwiefern die Filtersysteme auch Habitate für Moor-Arten bieten können.

Ergänzend wurden in Gewächshaus- und Klimaschrankversuchen unterschiedliche Nährstoffkonzentrationen und Nährstoffverhältnisse getestet, um Schwellenwerte für wuchsmindernde Effekte für verschiedene *Sphagnum*-Arten zu ermitteln. Neben den einzelnen Elementen (insbesondere Stickstoff und Phosphor) beeinflussen die Verhältnisse der Elemente zueinander das Torfmooswachstum (vgl. Temmink *et al.* 2017, Gaudig *et al.* 2020). Zudem spielen die Hydrogencarbonat-Gehalte und die Alkalinität des Bewässerungswassers eine große Rolle: hohe Bikarbonatgehalte und Alkalinität sind toxisch für Torfmoose (Koks *et al.* 2019). Koks *et al.* (2019) schlussfolgert aus den eigenen Versuchen, dass für kationenreiches Wasser mit hoher Alkalinität zur Bewässerung von Torfmoos-Paludikulturen der Fokus auf der Senkung der Alkalinität (einschließlich des pH-Werts) liegen sollte, während die Kationenkonzentrationen erhöht bleiben können.

Grundwasser kann bei geeigneter Qualität zumindest anteilig auch für die Bewässerung von Torfmooskulturen verwendet werden, wie Versuche in Ramsloh und Twist zeigen (vgl. Gaudig *et al.* 2017, Reich *et al.* 2019). Entscheidend für die Eignung sind die Konzentration von Calcium, Hydrogencarbonat und Eisen. Im beantragten Vorhaben werden die notwendige Größe des Grundwassereinzugsgebietes sowie das Ausmaß und die Auswirkungen einer möglichen Grundwasserabsenkung in der Nähe der Anbaufläche ermittelt.

2.2. Reduzierung des Oberbodenabtrags zur Verbesserung der Klimabilanz

Der Oberboden eines intensiv genutzten Hochmoorgrünlandes ist vererdet, hat eine geringe Wasserleitfähigkeit, ist von der Grasnarbe durchwurzelt und infolge von Düngung nährstoffreich – alles ungünstige Voraussetzungen für die Etablierung von Torfmoosen. Deshalb wurde in den bisherigen Versuchen der Oberboden mit einem Bagger abgezogen. Um ein einheitliches Höhenniveau zu erreichen, wurden z. T. mehr als 50 cm abgetragen. Die Klimawirkung infolge des Oberbodenabtrags muss jedoch minimiert werden. Zum einen kann das durch eine bessere Vorbereitung und Planung zur Einrichtung einer Torfmoos-Paludikulturfläche erfolgen (z. B. detailliertere Einmessung der Oberfläche und Berücksichtigung bei der Planung hydrologischer Einheiten, ggf. Terrassenbau), zum anderen durch Verzicht bzw. Minimierung des Oberbodenabtrags. Bisherige Versuche, die Grasnarbe lediglich zu mulchen oder flachgründig zu pflügen, sind aufgrund mangelnder Wasserversorgung gescheitert. Ist die Wasserversorgung jedoch sichergestellt, ist die Etablierung von Torfmoosen nach Aufbringen von ausreichend Saatgut und mit ausreichender Pflege (Mähen des Gewächspflanzenaufwuchses) vorstellbar und wurde in OptiMOOS getestet. Da bei Wiedervernässung der durchwuzelte Oberboden ein üppiges Substrat für Methanbildung bietet, wurden die obersten 10 cm in einer weiteren Versuchsvariante im Feldversuch unter Erhalt des Mikroreliefs abgeschält. Um den Nährstoffgehalt im nicht bzw. nur geringfügig abgetragenen Oberboden zu verringern, wurde eine Kaskadennutzung getestet, indem zunächst Rohrkolben und *Sphagnum fallax* zum Nährstoffentzug bzw. –immobilisierung angebaut wurden, bevor dann Ziel-Torfmoosarten mit geringeren Nährstoffansprüchen etabliert werden können. Im Vergleich dazu wurde ein Mix von Torfmoos-Arten mit Anpassung an unterschiedliche Standortbedingungen (insbesondere Wasserstand und Nährstoffe), darunter auch

Zielarten untersucht. Die Ergebnisse dieser Versuche können zugleich im Hinblick auf die Restauration von Hochmoorgrünlandflächen mit Torfmoosausbringung relevant sein.

2.3. Reduzierung des Grabenanteils zur Verbesserung der Klimabilanz

Die Bewässerungsgräben einer Torfmoos-Paludikulturfläche emittieren Treibhausgasemissionen in Form von Methan (Günther *et al.* 2017). Als Kohlenstoffquelle in den Gräben wird der gelöste organische Kohlenstoff (DOC) angesehen, der durch das (aus der landwirtschaftlich genutzten Umgebung stammende) Bewässerungswasser eingetragen wird. Inwiefern dieser durch die Wasserfiltration reduziert werden kann, wurde in OptiMOOS analysiert. Zur Reduzierung der Methanemissionen wurden außerdem in einem neuen Feldversuch nach bisheriger Flächenvorbereitung (mit Oberbodenabtrag) unterschiedliche Möglichkeiten der Bewässerung ohne bzw. mit geringem Anteil an Gräben getestet: a) Reduzierung der Gräben durch breitere Torfmoos-Produktionsstreifen, b) Unterflurbewässerung mit Druck (gepumpt) und ohne Druck (gravimetrisch).

Insbesondere in der Etablierungsphase sind Torfmoose anfällig für unzureichende Wasserversorgung. In Bereichen mit geringer Wasserleitfähigkeit der oberflächlich anstehenden Torfe ist die Bewässerung durch den Torfkörper stark erschwert bzw. wären Bewässerungssysteme mit sehr geringem Abstand zueinander notwendig. In solchen Situationen ist eine Bewässerung über die Torfoberfläche denkbar. Die Bewässerung über Tröpfchenschläuche ist anfällig für Verunreinigungen im Wasser und erfordert einen hohen Materialeinsatz. Deshalb wurde in OptiMOOS in einem Gewächshausversuch erforscht, inwiefern sich Torfmoose bei periodischem Überstau etablieren. Um den Toleranzbereich für unterschiedliche Torfmoos-Arten zu ermitteln, wurde die Frequenz des Überstaus variiert.

Nach Etablierung des Torfmoosrasens und mit dessen Aufwachsen wird der Wasserstand angehoben, so dass die Bewässerung nicht länger über die Gräben, sondern durch den Torfmoosrasen selbst erfolgt. In OptiMOOS wurde geprüft, inwiefern und in welchem Maße die Unterlassung der Grabenpflege nach Etablierung des Torfmoosrasens zur Verringerung der Treibhausgasemissionen führt und ob bzw. wie lange die Torfmoose auf den Produktionsflächen noch ausreichend wasserversorgt sind. Wird die Torfmoos-Produktionsfläche ganz beerntet, ist mit der Neueinrichtung auch wieder die Anlage von offenen Gräben notwendig. Bleiben bei einer Ernte die untersten Bereiche der Torfmoose stehen, könnte die Wasserversorgung langfristig durch diese Schicht erfolgen und Mittelgräben überflüssig machen. Um den Wasserfluss durch den Torfmoosrasen einschätzen zu können und mittels numerischer Modelle zu berechnen, wurden in OptiMOOS die hydraulischen Eigenschaften des Torfmoosrasens gemessen. Dadurch konnte auch abgeschätzt werden, inwiefern - zumindest teilweise - der Aufbau einer hydrologischen Regulationsschicht durch Torfmoos- Biomasse (ähnlich einer Selbstregulationsschicht im Hochmoor, Joosten 1993) möglich ist, um Wassermanagement ohne Gräben zu ermöglichen und um perspektivisch den Bedarf an zusätzlicher Bewässerung zu minimieren. Neben der Bewässerung muss auch der schnelle Abfluss von überschüssigem Wasser gewährleistet sein, um einen wuchsmindernden Überstau der Torfmoose zu vermeiden. Inwiefern die unterschiedlichen Wassermanagementsysteme beide Funktionen ausreichend erfüllen, wurde in OptiMOOS untersucht.

2.4. Eignung von Paludikultur-Biomasse als Ausgangsstoffe für gartenbauliche Substrate

Die Eignung von Torfmoos-Biomasse als Ausgangsstoff für gartenbauliche Substrate wurde bereits vielfach nachgewiesen (Übersicht in Gaudig *et al.* 2018), so dass geschlussfolgert werden kann, dass Torfmoos-Biomasse ein hervorragender Torfersatz ist. Weniger Untersuchungen gab es bislang zur pflanzenbaulichen Eignung anderer Paludikulturpflanzen, wie Rohrkolben und Schilf (z.B. Grießer

2016). Da die Pflanzen die Nährstoffe zum Winter in ihre Rhizome verlagern, ist die Ernte oberirdischer Biomasse im Hinblick auf den Nährstoffentzug im Sommer am effektivsten. Die Verwendung dieses Materials führt jedoch z. B. zu einer unerwünschten erhöhten Stickstoffimmobilisierung oder einer möglichen Anreicherung von Schadstoffen, was in OptiMOOS weiter untersucht wurde, um es gezielt zu verbessern (Erntezeitpunkt, Wasserqualität). Vermutlich unterscheidet sich die Qualität der Biomasse aufgrund unterschiedlicher Wuchsbedingungen: während das bisher verwendete Material in natürlichen, eutrophen Beständen auf Niedermoorböden aufwuchs, sind pH-Wert und Stickstoffgehalt im Bewässerungswasser sowie auf Hochmoorböden voraussichtlich geringer mit entsprechenden Auswirkungen auf die Biomasse. Die Entwicklung eines Paludikultur-Substrates (Torfmoose + Schilf/ Rohrkolben) ist denkbar und wurde in OptiMOOS erforscht.

3. Untersuchungsgebiet

Der Landkreis Ammerland ist 731 km² groß und wird zu 22,3 % von Mooren bedeckt, davon 84 % Hochmoore (MoorIS 2023). Das Klima ist warm-temperat mit einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 9,8°C und einem durchschnittlichen Jahresniederschlag von 849 mm pro Jahr, wobei im Sommer der meiste Niederschlag fällt (1989–2013; Klimastationen Rastede und Oldenburg, Abbildung 2).

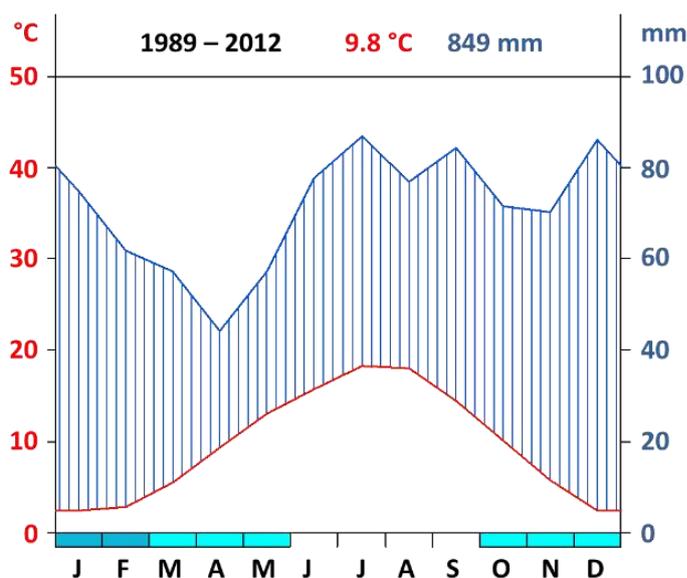


Abbildung 2. Klimadiagramm (Walter & Lieth 1967) für die Klimastationen Rastede (Niederschlag, mm) und Oldenburg (Temperatur, °C; linke vertikale Achse) in 4 bzw. 11 km Entfernung von der Versuchsfläche. Die rechte vertikale Achse zeigt den Niederschlag in mm pro Kalendermonat. Die horizontale Achse markiert die Monate, in denen Frost mit hoher Wahrscheinlichkeit auftritt (dunkelblau) und die, in denen Frost auftreten kann (hellblau). (Quelle: Brust *et al.* 2018)

Die Torfmoos-Paludikulturfläche (53° 15.80' N, 08° 16.05' E) liegt im Hankhauser Moor nahe Rastede (LK Ammerland, Niedersachsen) (Abbildung 3), was insgesamt 900 ha umfasst und weitgehend als Hochmoorgrünland oder auf kleineren Flächen für Heidelbeerkulturen bzw. Baumschulen genutzt wird. Der Bereich der Versuchsfläche war seit 1958 für die Grünlandnutzung tief entwässert, infolge dessen der Oberboden ca. 20 cm tief vererdet ist. Darunter befindet sich Torfmoos-Torf, der oberflächennah gering (H3-5, Skala nach von Post 1924) und mit zunehmender Tiefe immer stärker zersetzt ist. Die unterste der insgesamt 1,5 bis 2 m mächtigen Torfschicht bildet Niedermoor-Torf (H7), der von Sand unterlagert ist (vgl. Brust *et al.* 2018).

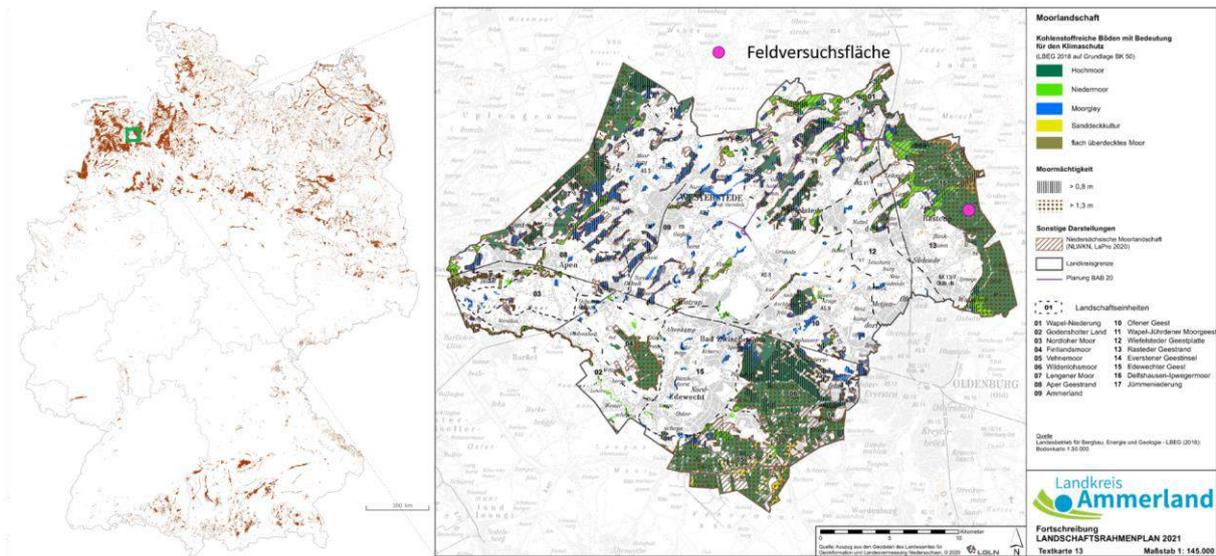


Abbildung 3. OptiMOOS Feldversuch im Moorkomplex Hankhauser Moor mit Lage in Deutschland (links; grün umrandet in der Deutschlandkarte zur Verbreitung organischer Böden (braun), Tegetmeyer *et al.* 2021) und im Landkreis Ammerland (rechts; pinker Punkt) mit Darstellung der unterschiedlichen organischen Böden.

Im Ergebnis der Vorgängerprojekte MOOSGRÜN und MOOSWEIT wurde seit 2011 im Hankhauser Moor eine ca. 14 ha große Versuchsfläche auf ehemaligem Hochmoorgrünland eingerichtet, die im Rahmen des OptiMOOS-Projektes auf 17 ha erweitert wurde (6,5 ha Netto-Torfmoos-Produktionsfläche). Im Juni 2016 wurde die Fläche weltweit erstmals maschinell geerntet. Die Produktionsflächen sind 10 m breit und von Bewässerungsgräben umgeben. Alle 20 m sind Fahrdämme aufgeschüttet, so dass es zu einer streifenartigen Struktur kommt (Abbildung 3). Die Produktionsfläche wird durch einen Bagger vom Fahrdamm aus bewirtschaftet und beerntet. Um die gleichmäßige Bewässerung zu gewährleisten, wurden automatische Systeme installiert. Das subneutral-saure, nährstoffreiche (insbesondere P, K) Bewässerungswasser wird dem Vorfluter 'Schanze' entnommen, der das Entwässerungswasser aus dem angrenzenden, regelmäßig gedüngten Hochmoorgrünland sammelt.

4. Aufbau Feldversuch

Der insgesamt 17 ha große Feldversuch zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor umfasst zahlreiche Teilbereiche, die sich im Hinblick auf Phasen im Produktionszyklus (Neueinrichtung, Wachstum, Regeneration nach Ernte) und Forschungsfragen unterscheiden (Tabelle 1). Insgesamt gibt es sieben Teilflächen, auf denen Torfmoose wachsen (F1 bis F7) und zwei Filterbecken (FB1 und FB2) (Abbildung 4). Der Vorfluter ‚Schanze‘ dient als Quelle für die direkte oder indirekte (über Filterbecken) Bewässerung der Torfmoose.



Abbildung 4. Übersicht der Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor mit Bezeichnung der einzelnen Versuchsflächen (F) und Filterbecken (FB) und Darstellung der unterschiedlichen Bewässerungen mit Wasser aus dem Vorfluter Schanze (durchgehende, blaue Pfeile) oder den beiden Filterbecken (gestrichelte, hellblaue Pfeile), Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.

Tabelle 1. Charakterisierung der einzelnen Versuchsflächen mit der jeweiligen Versuchsvariante, Größe, mittleren Wasserständen (Minimum, Maximum) in cm bezogen auf Torfmoosoberfläche (gemittelte Rasenhöhe in Bezug auf stündliche Wasserstandsmessungen im Graben der jeweiligen Variante), ausgebrachten Pflanzen (fett gedruckt: dominant) sowie die Herkunft des Bewässerungswassers.

Abkürzung (und Farbe der Umrandung in Abbildung 4)	Variante	Größe Netto-Torfmoos-Produktionsfläche (ha)	Wasserstand Mittel (Min; Max) in cm bezogen auf Torfmoosoberfläche	dominante <i>Sphagnum</i> -Arten	direkte Herkunft des Bewässerungswassers
Versuch Langzeituntersuchung					
F1	Wachstum seit 2011	0,815	-11 (-2; -26)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i>	Schanze
F2-2 (Süd)	Regeneration seit 2016	0,217	-12 (-3; -28)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i>	Schanze
F4	Wachstum seit 2016	2,8	-3 (9; -19)	<i>S. fallax</i>	Schanze
Versuch Nährstoffreduktion durch Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken					
F2-1	Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken (Einrichtung 2020)	0,434	-8 (5; -19)	Varianten: <i>S. magellanicum</i> s.l., <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i>	Filterbecken FB1
F5 Schilf	Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken (Einrichtung 2016)	0,4	-2 (6; -16)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i> , <i>S. fimbriatum</i> , <i>S. papillosum</i>	Filterbecken FB2 Schilfbepflanzung
F5 Rohrkolben	Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken (Einrichtung 2016)	0,4	-4 (6; -19)	<i>S. fallax</i> , <i>S. fimbriatum</i> , <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i>	Filterbecken FB2 Rohrkolbenbepflanzung
FB 1	Filterbecken	0,12	26 (1; 51), über Torf-oberfläche	bepflanzt mit <i>Typha angustifolia</i>	Schanze
FB 2	Filterbecken	0,16	34 (8- 48), über Torf-oberfläche	bepflanzt mit <i>Typha angustifolia</i> , <i>Phragmites australis</i>	Schanze

Abkürzung	Variante	Größe Netto-Torfmoos-Produktionsfläche (ha)	Wasserstand Mittel (Min; Max) in cm bezogen auf Torfmoosoberfläche	bepflanzt mit	direkte Herkunft des Bewässerungswassers
Versuch Minimierung Oberbodenabtrag					
F7-1	30 cm Abtrag	0,1	-2 (11; -20)	<i>S. cuspidatum</i> , <i>S. fallax</i> , <i>S. magellanicum</i> s.l., <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i> , <i>S. rubellum</i>	Filterbecken FB1 Rohrkolbenbepflanzung
F7-2	5-10 cm Abtrag	0,1	-6 (5; -30)	<i>S. cuspidatum</i> , <i>S. fallax</i> , <i>S. magellanicum</i> s.l., <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i> , <i>S. rubellum</i>	Filterbecken FB1 Rohrkolbenbepflanzung
F7-3	ohne Abtrag	0,1	1 (10; -26)	<i>S. cuspidatum</i> , <i>S. fallax</i> , <i>S. magellanicum</i> s.l., <i>S. palustre</i> , <i>S. papillosum</i> , <i>S. rubellum</i>	Filterbecken FB1 Rohrkolbenbepflanzung
Versuch Minimierung Grabenanteil					
F7-4	Unterflurbewässerung mit Druck über Dränrohre (Abstand 7,5m)	0,175	-10 (1; -31)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i>	Schanze
F7-5	Unterflurbewässerung ohne Druck über Dränrohre (7,5m Abstand)	0,175	-12 (9; -33)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i>	Schanze
F7-6	Bewässerung mit 35 m Grabenabstand	0,21	-9 (13; -22)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i>	Schanze
Versuch Bewässerung mit Wasser aus Schanze über 10 m Grabenabstand, 30 cm Oberbodenabtrag					
F2-2 (Nord)	Kontrolle	0,217	-5 (4; -19)	<i>S. fallax</i> , <i>S. palustre</i>	Schanze

4.1. Versuch Wasserfilterung

Es wurden zwei Filterbecken angelegt, indem auf 30 x 40 m (Filterbecken FB1: ca. 1.200 m²) bzw. auf ca. 140 m Länge konisch zulaufend von 4,5 auf 21 m Breite (Filterbecken FB2: ca. 1.600 m²) im Frühjahr 2020 zunächst ca. 70 cm Torf ausgehoben wurden. Im Filterbecken FB2 wurde zudem eine Spundwand längs in der Beckenmitte eingezogen, um dadurch zwei Teilbereiche zu schaffen. Im Juli 2020 wurde das Filterbecken FB1 sowie der südliche Teil von Filterbecken FB2 mit Jungpflanzen von *Typha angustifolia* sowie der nördliche Teil von Filterbecken FB2 mit Jungpflanzen von *Phragmites australis* in einem Raster von ca. 80 x 45 cm (Rohrkolben) bzw. 90 x 40 cm (Schilf) manuell bepflanzt. Unmittelbar nach der Pflanzung wurde Wasser aus dem Vorfluter 'Schanze' in die Filterbecken gepumpt, zunächst nur bis zur Torfoberfläche, um ein Aufschwimmen der frisch eingebrachten Pflanzen zu vermeiden.

Im Herbst 2020 wurde die aufgewachsene Torfmoos-Biomasse auf drei bestehenden Produktionsflächen (F2) á 10 x 215 m bis auf den alten Torfkörper abgeerntet und mit Fragmenten unterschiedlicher Torfmoos-Arten neu eingerichtet. Auf zwei der Flächen wurde *Sphagnum palustre*, auf einer weiteren Fläche *S. papillosum* inkl. ca. 10 x 10 m Bereich mit *S. magellanicum* mit jeweils ca. 80 % Ausgangsdeckung ausgebracht. Die Fragmente waren jeweils durchschnittlich 13, 11 bzw. 9 cm groß. Die Bewässerung der zwei nördlichen Flächen (je eine mit *S. palustre* und *S. papillosum*/ *S. magellanicum*) erfolgte ab Mai 2021 mit Wasser aus dem Filterbecken FB1, während die hydrologisch davon unabhängige dritte, südlich liegende Fläche (mit *S. palustre*) wie bisher mit Wasser direkt aus dem Vorfluter 'Schanze' bewässert wurde (Abbildung 4, Abbildung 5). Das Bewässerungswasser des Filterbeckens FB2 wurde ab Juni 2021 in eine 2016 eingerichtete und etablierte Torfmoos-Produktionsfläche (F5) geleitet. Deren südlicher Bereich wurde mit Wasser aus dem mit Rohrkolben beplanten Teil des Filterbeckens und der nördliche Bereich (jeweils 2 x 10 x 200 m) mit Wasser aus dem mit Schilf beplanten Teil des Filterbeckens bewässert (Abbildung 4, Abbildung 6).

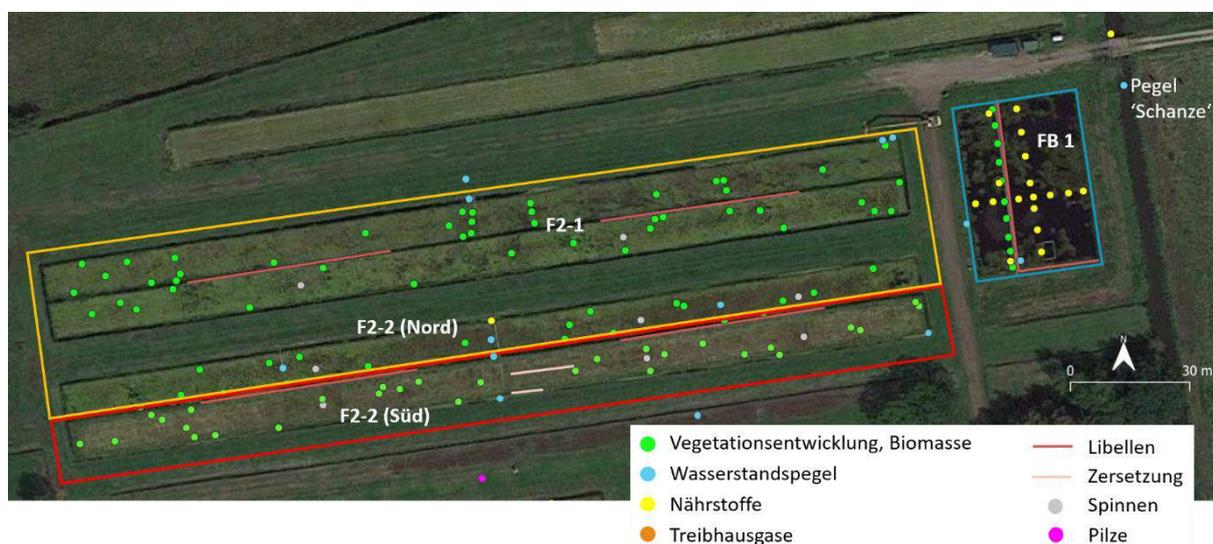


Abbildung 5. Detaillierte Lage der Flächen für die Versuche ‚Wasserfilterung‘ (Filterbecken FB1 hellblau umrandet; Torfmoos-Produktionsflächen F2-1 und F2-2 (Nord), hellorange umrandet) und ‚langfristiger Feldversuch‘ (F2-2 (Süd) (Regeneration seit 2016 und kleinflächig Wachstum seit 2011, rot umrandet) mit Untersuchungen zu Vegetationsentwicklung/ Biomasse (grüner Punkt), Wasserstand (Pegel, blauer Punkt), Nährstoffen (gelber Punkt), Spinnen (grauer Punkt), Libellen (rosa Linie), Zersetzung (apricot Linie). Lage in der gesamten Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor siehe Abbildung 4. Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.



Abbildung 6. Detaillierte Lage der Flächen für den Versuch ‚Wasserfilterung‘ (Filterbecken FB2 hellblau umrandet; Torfmoos-Produktionsflächen F5 mit Wasserspeisung aus mit Rohrkolben bzw. Schilf bepflanzten Teil im Filterbecken F2, dunkelorange umrandet) mit Untersuchungen zu Vegetationsentwicklung/ Biomasse (grüner Punkt), Wasserstand (Pegel, blauer Punkt), Nährstoffen (gelber Punkt), Treibhausgasen (oranger Punkt), Spinnen (grauer Punkt), Libellen (rosa Linie). Legende siehe Abbildung 5, Lage in der gesamten Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor siehe Abbildung 4. Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.

4.2. Versuch Minimierung Oberbodenabtrag

Um die Minimierung des Oberbodenabtrags zu untersuchen, wurden auf jeweils 50 x 20 m drei Varianten eingerichtet, in dem von der bestehenden Hochmoorgrünlandfläche:

- 1) kein Oberboden abgetragen, aber das Gras gemulcht, die Mulch-Biomasse entfernt und der Boden angewalzt wurde. Der Höhenunterschied in der Fläche betrug nach der Flächenvorbereitung 16 cm.
- 2) mittels Bagger (5 bis) 10 cm Oberboden bei Erhalt des Mikroreliefs (max. 15 cm Höhenunterschied) abgezogen wurde, was ungefähr der durchwurzelter Grünlandnarbe entspricht,
- 3) nach bisheriger Praxis mittels Bagger ca. 30 cm Oberboden abgezogen und die Oberfläche eingeebnet wurde (ohne Erhalt des Mikroreliefs, max. 10 cm Höhenunterschied).

Umlaufend sowie mittig der Länge nach wurden Bewässerungsgräben installiert, so dass die Torfmoos-Produktionsflächen wie nach bisheriger Praxis ca. 10 m breit waren (Abbildung 7). Im November 2020 wurden pro Produktionsfläche Torfmoos-Fragmente (im Mittel je Torfmoosvariante 7-13 cm lang) mit im Mittel 65% Gesamt-Ausgangsdeckung (ca. 10-20% Deckung grüner Torfmoose) in zwei unterschiedlichen Varianten ausgebracht: ein Mix aus sechs *Sphagnum*-Arten regionaler Herkunft (43% *S. papillosum*, 19% *S. cuspidatum*, 18% *S. palustre*, 10% *S. magellanicum*, 5% *S. rubellum*, 2% *S. fallax* (+ 3% Streu)) sowie nahezu reines Saatgut aus *S. fallax*. Auf den Flächen mit *S. fallax* wurden Jungpflanzen von *Typha angustifolia* (1,5 Pflanzen je m²) gepflanzt. Anschließend wurden die Gräben mit Wasser befüllt, welches zunächst aus der Schanze, ab Mai 2021 (nach Fertigstellung des Bewässerungssystems) aus dem Filterbecken FB1 entnommen wurde.



Abbildung 7. Detaillierte Lage der Flächen für die Versuche ‚Minimierung Oberbodenabtrag‘ (F7-1 bis -3, pink umrandet) und ‚Minimierung Grabenanteil‘ (F7-4 bis -6, weiß umrandet) (Varianten siehe Tabelle 1) mit Untersuchungen zu Vegetationsentwicklung/ Biomasse (grüner Punkt), Wasserstand (Pegel, blauer Punkt), Nährstoffen (gelber Punkt), Treibhausgasen (oranger Punkt), Libellen (rosa Linie). Legende siehe Abbildung 5, Lage in der gesamten Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor siehe Abbildung 4. Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.

4.3. Versuch Minimierung Grabenanteil

Für die Untersuchung der Minimierung des Grabenanteils wurden bis Herbst 2020 zunächst - wie nach bisheriger Praxis - mit einem Bagger max. 30 cm Oberboden abgezogen und anschließend verschiedene Bewässerungssysteme installiert:

- 1) „Unterflurbewässerung mit Druck“: Einbringen von perforierten Plastikrohren mit einem Durchmesser von 10 cm (normalerweise als Dränrohre genutzt und im Folgenden als solche bezeichnet) in einer Tiefe von ca. 20 cm und einem Abstand von 7,5 m auf einer 50 x 35 m großen Fläche für die Unterflurbewässerung mit Druck: hierbei wird das Bewässerungswasser in ein geschlossenes Rohr an der westlichen Stirnseite der Fläche gepumpt und von da aus über Anschlüsse in die einzelnen Dränrohre gedrückt. Die Dränrohre enden an der östlichen Stirnseite der Fläche in einen Graben mit einem Überlauf, über den überschüssiges Wasser abgeführt wird.
- 2) „Unterflurbewässerung ohne Druck“: Einbringen von Dränrohren wie bei 1) für die Unterflurbewässerung ohne Druck: hierbei wird das Bewässerungswasser in einen Graben an der westlichen Stirnseite der Fläche geleitet und läuft von da aus gravimetrisch über Anschlüsse in die einzelnen Dränrohre. Diese enden wie bei 1) in einen Graben mit Überlauf.
- 3) „Bewässerung mit Grabenabstand von 35 m“: Eine 65 x 35 m große Fläche ist umgeben von einem Ringgraben. Es wurden keine anderen Bewässerungselemente eingebracht.

Nach der Flächenvorbereitung wurden im Herbst 2020 Fragmente von *Sphagnum palustre* mit einer Durchschnittslänge von 13 cm und einer Gesamtdeckung von 70 % (ca. 10 % grüne Torfmoose) auf die vorbereitete Torfoberfläche ausgebracht und die Fläche anschließend vernässt.

4.4. Weiterführung langfristiger Feldversuch

Die ersten vier Hektar Hochmoorgrünland im Hankhauser Moor wurden 2011 in eine Torfmoos-Paludikultur umgewandelt und seither sukzessive erweitert. Um langfristige Auswirkungen hoher Nährstoffeinträge im Hinblick auf Artenverschiebung bzw. Biodiversität, Produktivität, Zersetzung, Pilzbefall, Krankheiten usw. zu untersuchen, wurde auch in OptiMOOS die Betreuung des bestehenden Feldversuches fortgesetzt. Die weltweit einzige gut funktionierende, großmaßstäbige Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur bietet zudem die einmalige Möglichkeit, um eine langfristige Erfassung der Verfahrensschritte von der Etablierung, über das Management bis hin zu wiederholten Ernten fortzuführen.



Abbildung 8. Detaillierte Lage der Flächen für den ‚langfristigen Feldversuch‘ (F1, hellgrün umrandet) mit Untersuchungen zu Vegetationsentwicklung/ Biomasse (grüner Punkt), Wasserstand (Pegel, blauer Punkt), Nährstoffen (gelber Punkt), Treibhausgasen (oranjer Punkt), Spinnen (grauer Punkt), Pilzen (pinker Punkt), Libellen (rosa Linie), Zersetzung (apricot Linie). Legende siehe Abbildung 5, Lage in der gesamten Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor siehe Abbildung 4. Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.



Abbildung 9. Detaillierte Lage der Flächen für den ‚langfristigen Feldversuch‘ (F4, gelb umrandet) mit Untersuchungen zu Vegetationsentwicklung/ Biomasse (grüner Punkt), Wasserstand (Pegel, blauer Punkt), Nährstoffen (gelber Punkt), Pilzen (pinker Punkt), Libellen (rosa Linie). Legende siehe Abbildung 5, Lage in der gesamten Feldversuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor siehe Abbildung 4. Kartenquelle Google Satellite (2023) in QGIS.

5. Material und Methoden

5.1. Feldversuch

5.1.1. Vegetationsentwicklung und Biomasseaufwuchs

Um die Vegetationsentwicklung einschätzen zu können, wurden jeweils zu Versuchsbeginn der Ausgangszustand erfasst, auf Dauerbeobachtungsflächen halbjährlich weitere Vegetationsaufnahmen durchgeführt und in unmittelbarer Nähe dieser jährlich einmal Biomasseproben (15 x 15 cm) entnommen sowie Artenlisten für die einzelnen Teilflächen erstellt. Die Torfmoos-Biomasseproben wurden in die einzelnen Bestandteile (Torfmoose, Braunmoose, Gefäßpflanzen) sortiert, bei den Schilf- und Rohrkolben-Biomasseproben war keine Sortierung notwendig. Alle Proben wurden für 48 Stunden bei 80°C getrocknet und anschließend abgewogen.

In den Filterbecken wurden für jede Variante zehn Dauerbeobachtungsflächen à 1 x 1 m entlang von Stegen über die Filterbecken hinweg eingerichtet und im Sommer Artenzusammensetzung, Deckungsgrad, Stängelanzahl, Pflanzenhöhe und Wasserstand ermittelt. Zudem wurden entlang des Filterbeckens pro Variante jeweils fünf Biomasseproben auf 1 x 1 m Flächen entnommen (Filterbecken FB1: nur August 2022, Filterbecken FB2: Juli und November 2021, August 2022). Im November 2021 wurde nach den wissenschaftlichen Untersuchungen die gesamte Biomasse (außer auf den Dauerbeobachtungsflächen) im Filterbecken FB2 über der Wasseroberfläche maschinell geerntet.

Auf den Torfmoos-Produktionsflächen wurden jeweils im Frühjahr (und Herbst) die Deckung aller und grüner (vitaler) Torfmoose, die Rasenhöhe der Torfmoose an fünf Stellen pro Dauerbeobachtungsfläche (à 25 x 25 cm) sowie die Deckung von Gefäßpflanzen, Streu und anderen Moosen, alle Deckungen auch getrennt nach Arten ermittelt. Bei jeder Dauerbeobachtungsfläche ist ein Pegelrohr installiert, in dem zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahme der Wasserstand gemessen wurde (Stichtagsmessung). Die Anzahl der Dauerquadrate und Biomasseproben pro Versuchsvariante ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2. Anzahl der Dauerquadrate und Biomasseproben für die Untersuchung der Entwicklung der Torfmoos-Produktionsflächen mit der Erfassung der Deckung der Torfmoose, Gefäßpflanzen, anderer Moose, Rasenhöhe der Torfmoose, Messung der Wasserstände und Beprobung der Biomasse.

	Anzahl Dauerquadrate	Anzahl Biomasseproben pro Jahr
F1	20	20
F2-1, F2-1 (Nord)	je 20 (Ausnahme <i>S. magellanicum</i> : 5)	je 6 (Ausnahme <i>S. magellanicum</i> : 3)
F2-2 (Süd)	15	10
F4	21	14
F5 "Schilf, Rohrkolben"	20	je 6 (Ausnahme <i>S. magellanicum</i> : 3)
F7-1 bis -3	je 20 (Ausnahme <i>S. fallax</i> bei 30 cm Abtrag: 9)	je 10 (Ausnahme <i>S. fallax</i> bei 30 cm Abtrag: 3)
F7-4 bis -6	je 20	je 7

Die Zuordnung von Pflanzenarten zu Lebensraumtypen erfolgte für Gefäßpflanzen nach FloraWeb und für Torfmoose nach Laine *et al.* (2018). Der Schutzstatus der Arten wurde online beim Rote-Liste-Zentrum (für Deutschland), für Niedersachsen mit dem Verzeichnis der in Niedersachsen besonders oder streng geschützten Arten (NLKWN 2015) und für die Bundesartenschutzverordnung für jede Art mittels wikipedia (Stand 16.03.2023) ermittelt.

Alle Karten wurden mit QGIS 3.28 ‚Firenze‘ (QGIS Development Team 2022) erstellt unter der Verwendung von Luftbildern aus dem QuickMapServices Google satellite layer.

5.1.2. Zersetzungsversuch

Bisherige Untersuchungen zeigen bereits über acht Jahre hinweg eine stete, gleichmäßige Zunahme des Torfmoos-Biomasseaufwuchses ohne Abnahme der Zuwachsrates. Unklar ist jedoch, wie hierbei die Anteile von Produktion und Zersetzung sind, weshalb im November 2021 ein Zersetzungsversuch eingerichtet wurde. Hierfür wurde Torfmoos-Biomasse aus den im Hankhauser Moor wachsenden Rasen in 5 cm Schichten entnommen, getrocknet, in Gazesäckchen (Polyamid, 150 µm Gaze, 12 x 4 cm, je 15 Wiederholungen) gefüllt und in dieselbe Schicht wieder ins Moor gebracht. Diese Untersuchung wurde auf zwei Teilflächen der Versuchsfläche durchgeführt, die sich im Wasserstand unterschieden (F1, F2, im Mittel 8 cm tiefer in Fläche F2) und jeweils am Rand und in der Mitte der Torfmoos-Produktionsfläche, um mögliche Effekte unterschiedlicher Nährstoffversorgung zu erfassen. Nach einem Jahr wurden die Gazesäckchen wieder aus dem Moor entfernt und im Labor aufbereitet. Für das Abwiegen der getrockneten Gazesäckchen wurde eine Hochpräzisionswaage (Genauigkeit 10 µg) verwendet.

An den vier Standorten wurde zeitgleich der Biomasseaufwuchs bestimmt, indem zu Versuchsbeginn im November 2021 auf sechs 15 x 15 cm Dauerquadraten in Weiterführung des jeweiligen Transektes je fünf einzelne Torfmoose mit Kabelbindern direkt unter dem Köpfchen (Wachstumspunkt von Torfmoosen) gekennzeichnet und nach einem Jahr an dieser Stelle wieder abgeschnitten wurden. Der geernteten Biomasse wurden die Köpfchen abgetrennt (kein Zuwachs) und der Biomassezuwachs für 48 Stunden bei 80°C getrocknet.

Um die Bedingungen im Untersuchungszeitraum einschätzen zu können, wurden Temperaturlogger in den einzelnen Schichten aller vier Standorte installiert, für diese vierteljährlich der Wassergehalt bestimmt sowie der Wasserstand per Datalogger erfasst.

5.1.3. Pilze

Die Untersuchungen zur Pilzgemeinschaft in einer Torfmoos-Paludikultur wurden in OptiMOOS fortgesetzt. Erforscht wurden der Einfluss von Nährstoffverfügbarkeit (Rand und Mitte der Torfmoos-Produktionsfläche), Alter der Kultur (10, 5 bzw. 2 Jahre - Entnahme auf F1, F4 und F6, siehe Abbildung 8 und Abbildung 9) und Torfmoos-Art (*Sphagnum fallax*, *S. papillosum*, *S. denticulatum*, *S. palustre*, *S. fimbriatum*, *S. magellanicum*, *S. fuscum*) auf die Zusammensetzung der Pilzflora. Dafür wurden im Juli 2021 jeweils fünf Wiederholungen innerhalb einer Fläche à 60 x 60 cm, auf denen jeweils 15 ca. 10 cm lange Torfmoos-Individuen gesammelt (insgesamt 80 Proben), gekühlt transportiert und bis zur weiteren Bearbeitung im Labor bei -80°C eingefroren. Für die DNA-Extraktion wurden die Proben zerkleinert, homogenisiert und mit dem DNeasy PowerSoil Kit (Qiagen) extrahiert. Der durchschnittliche DNA-Gehalt pro Probe betrug 25,3 ng/ µL und reichte von 9,62 bis 53,8 ng/ µL. Der Rohextrakt wurde an die LGC Genomics GmbH (Berlin, Deutschland) geschickt, die die DNA-Sequenzierung vornahm. Für die Auswertung wurden die Sequenzen mit Hilfe der dada2-Pipeline (Callahan *et al.* 2016) nach Chimären gefiltert und eine ASV-Tabelle (ASV = Amplikon-Sequenzierungsvariante) erstellt. Die Zuordnung von ASVs zu Taxa erfolgte mit USERACH (v11.0.667_win32) und der Pilzdatenbank UNITE

QIIME (v8.3, Abarenkov et al, 2021) als Referenzen. Nicht klassifizierte ASVs wurden erneut mit dem Basic Local Alignment (BLAST, max. Zielsequenz=1) durchsucht und bei >95 % Deckung in die Taxonomiedatei aufgenommen. Die Zusammensetzung der Gemeinschaft wurde mit nichtmetrischer multidimensionaler Skalierung (nMDS) auf Grundlage von Bray-Curtis-Distanzen analysiert.

5.1.4. Wasserbedarf und Hydrologie

Zur Messung der Wasserstände wurden im November 2020 ergänzend zu den aus dem Vorgängerprojekt MOOSWEIT bereits bestehenden Pegeln neue Messpegel installiert, wodurch insgesamt 45 Pegel für hydrologische Untersuchungen zur Verfügung standen (Abbildungen 5, 6, 7, 8, 9). 10 Pegel wurden mit registrierenden Datenloggern ausgestattet, die die Wasserstände stündlich aufzeichneten. Zur exakten Bestimmung der Höhenlage der Wasserstände wurden alle Pegel sowie die Überläufe aller einzelnen Teilflächen mittels Differential-GPS in mNN eingemessen.

Die Wasserhaushaltskomponenten (Evapotranspiration, Niederschlag, Zufluss, Abfluss, Versickerung) wurden durch Messungen und Modellierung quantifiziert, um Wasserbilanzen für die einzelnen Versuche im Projekt zu erstellen und für die langjährige Betrachtung zu verwenden. Dabei wurde ein bereits in Vorgängerprojekten erfolgreich entwickeltes Modellkonzept angewendet (Abbildung 10, Brust *et al.* 2018).

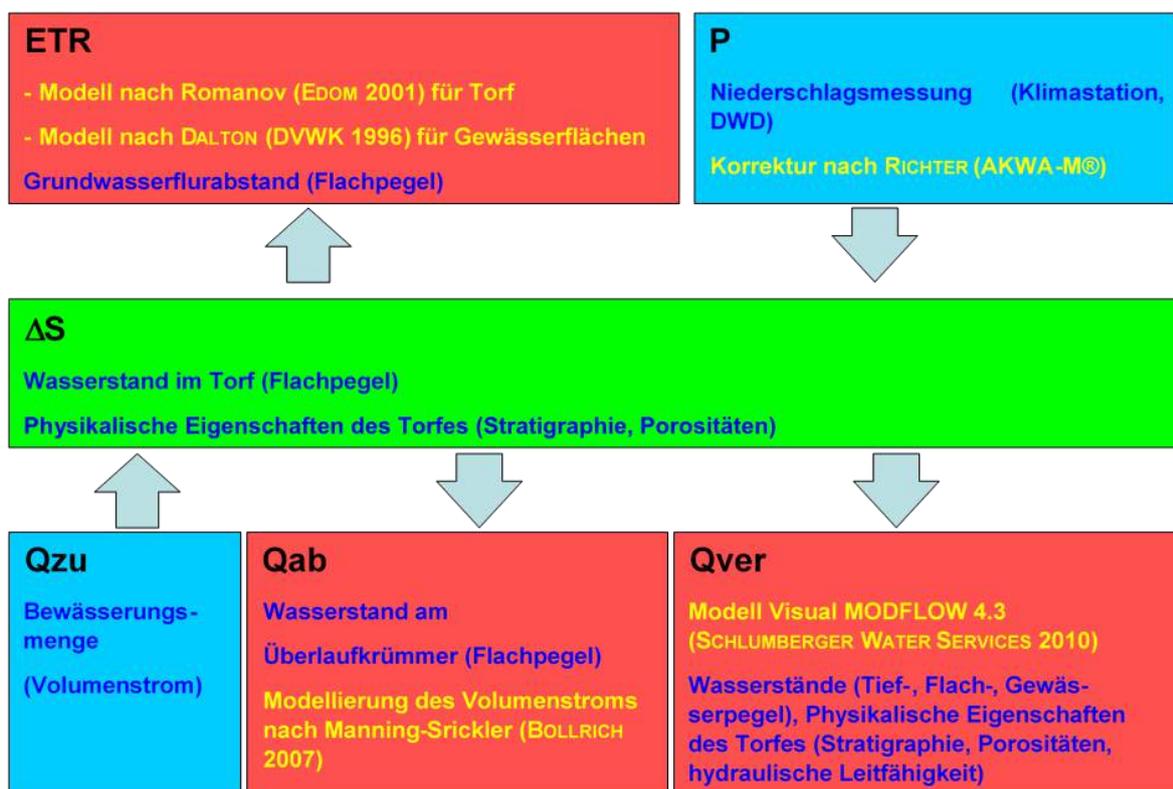
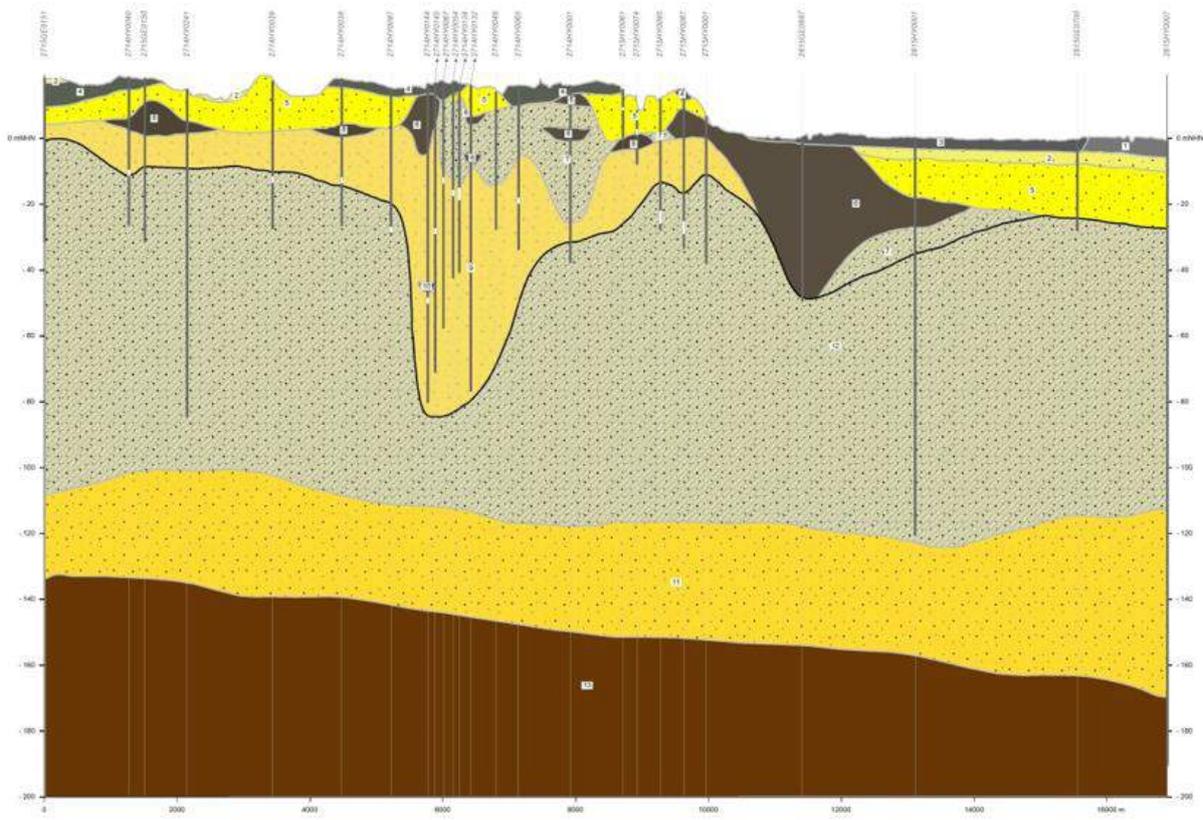


Abbildung 10. Schematische Darstellung des Modellsystems zur Berechnung der Wasserbilanz der Versuchsflächen (blau – direkte Messwerte, gelb – Modellkomponenten).

Nutzung von Grundwasser für die Bewässerung

Hydrogeologische Situation



Generallegende

Topographie

- Bundesautobahn
- Bundesstraße
- Landstraße
- Fluss, Kanal
- See
- Ortslage

- Wasserwerk, Abfalldeponie
- Wasserschutzgebiet
- Trinkwassergewinnungsgebiet
- Heilquellenschutzgebiet

Durchlässigkeit (Kf-Wert in m/s)

- sehr hoch (>1E-2)
- hoch (>1E-3 - 1E-2)
- mittel (>1E-4 - 1E-3)
- mäßig (>1E-5 - 1E-4)
- gering (>1E-7 - 1E-5)
- sehr gering (>1E-9 - 1E-7)

Thematik

- Bohrung mit BID
- Filterstrecke
- Grundwasserleiter
- Grundwasserhemmer
- Schuppe
- Quartärbasis
- Störung
- Untere Profilgrenze

- äußerst gering (>1E-9)
- sehr hoch bis hoch (>1E-3)
- mittel bis mäßig (>1E-5 - 1E-3)
- gering bis äußerst gering (<1E-5)
- stark variabel (ohne Kf-Wert)
- mäßig bis gering (>1E-6 - 1E-4)

Legende der hydrostratigraphischen Einheiten

Hydrostratigraphie / Lithologie / Durchlässigkeit

- H1.1 / Ton, Schluff / gering bis äußerst gering
- L1.2 / Sand, Kies, Muschelschill, Travertin / mittel bis mäßig
- H1.3 / Torf / gering bis äußerst gering
- H3 / Geschiebemergel/-lehm, Schluff, Ton / gering
- L3 / Sand, Kies / mittel
- H4.1 / Schluff, Ton, Torf / gering
- H4.1-L4.1 / Schluff, Ton, Torf, Sand, Feinsand, schluffig / sehr gering bis mäßig
- H4.2 / Geschiebemergel/-lehm / gering
- L4.2 / Kies, Sand / hoch
- H4.3 / Ton, Schluff / gering
- L4.3 / Sand / mittel
- H4.4-L4.3 / Ton, Schluff, Sand / äußerst gering bis mäßig
- H5.1 / Ton, Schluff / gering bis äußerst gering

Abbildung 11. Hydrostratigraphischer Profilschnitt, ca. 7 km nordwestlich der Feldversuchsfläche (NIBIS 2021).

Als Grundlage für die Ermittlung der theoretisch notwendigen Größe eines Grundwassereinzugsgebietes für eine Bewässerung einer Torfmoos-Paludikulturfläche mit Grundwasser sowie der Einschätzung der (theoretischen) Auswirkungen einer Grundwasserabsenkung diente die hydrogeologische Situation mit den unterschiedlichen hydraulischen Leitfähigkeiten in der Tiefe. Hierzu existiert

der hydrostratigraphische Profilschnitt „Jade links PS01“ (ca. 7 km nordwestlich der Feldversuchfläche, Abbildung 11) und Datenanalysen aus den Vorgängerprojekten MOOSGRÜN und MOOSWEIT sowie aus Literaturrecherche (Hofer & Pautz 2006).

Anhand dieser Daten wurde die Betrachtung für fünf verschiedene hydraulische Leitfähigkeiten im erwarteten Bereich $1 \cdot 10^{-3}$ bis $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ und für zwei unterschiedliche Mächtigkeiten (20 und 30 m, Abschätzung anhand der besser hydraulisch leitfähigen Bereiche L1.2 und L3 aus dem hydrogeologischen Schnitt) des Grundwasserleiters durchgeführt. Es erfolgte eine analytische Betrachtung des Wasserandrangs im ungespannten Grundwasserleiter in Abhängigkeit der Absenkung im stationären Zustand (Wasserstand im Brunnen und Grundwasserstand sind zeitlich unveränderlich) unter den Annahmen gemäß DUPUIT-THIEM (Busch *et al.* 1993, radialsymmetrische Anströmung, Grundwasserleiter isotrop und nur horizontale Strömungskomponente). Für den Brunnen wurde ein ausreichender Brunnenradius (Bohrlochradius) angenommen über den die benötigte Menge gefördert werden kann. Die erforderlichen Fördermengen ergeben sich aus dem Bewässerungsbedarf und wurden im Mittel mit $Q_d = 140 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und im Spitzenbedarf mit der doppelten Menge von $Q_{d,\max} = 280 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ angenommen.

Abschätzung der Reichweite der Absenkung (empirisch) und des Wasserandrangs (analytisch)

Die Reichweite der Absenkung des Wasserstandes wurde empirisch gemäß SICHARDT (Busch *et al.* 1993) berechnet:

$$R = 3000 \cdot s \cdot \sqrt{k_f}$$

R – Reichweite der Absenkung nach SICHARDT [m]

s – Absenkung [m]

Kf – hydraulische Leitfähigkeit [m s^{-1}]

Die Reichweite im stationären Zustand nimmt zu, je höher die hydraulische Leitfähigkeit ist (Abbildung 12). Die zu erwartenden Förderzeit sind hierbei zu kurz, um einen stationären Zustand des Absenkungstrichters zu erreichen, weshalb dies nicht Teil der Betrachtung ist.

Eine weitere Größe für die Betrachtung des Grundwassereinzugsgebietes ist der Wasserandrang. Er wurde für (quasi) stationäre Bedingungen im ungespannten Grundwasserleiter nach DUPUIT-THIEM abgeschätzt:

$$Q_a = \pi \cdot k_f \cdot \frac{H^2 - h^2}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$$

Qa – Wasserandrang nach DUPUIT-Thiem [$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$]

kf – hydraulische Leitfähigkeit [m s^{-1}]

H – wassererfüllte Mächtigkeit [m]

h – abgesenkter Wasserspiegel [m]

R – Reichweite der Absenkung [m]

r – effektiver bzw. wirksamer Brunnenradius [m]

Je höher die hydraulische Leitfähigkeit, umso größer ist der Wasserandrang bei gleicher Absenkung. Eine größere angenommene Mächtigkeit des Grundwasserleiters hat, vor allem bei den niedrigeren hydraulischen Leitfähigkeiten, ebenso einen großen Einfluss und ergibt gleichfalls einen höheren Wasserandrang bei gleicher Absenkung (Abbildung 12b).

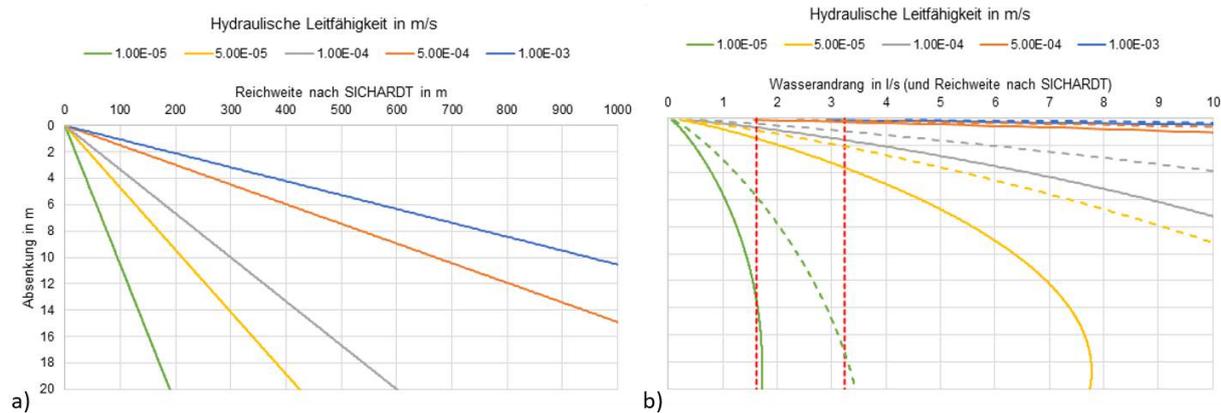


Abbildung 12. a) Reichweite nach SICHARDT in Abhängigkeit der Absenkung (empirische Berechnung unabhängig von Mächtigkeit) und b) Wasserandrang (mit Reichweite nach SICHARDT) in Abhängigkeit der Absenkung für eine Mächtigkeit von 20 m (durchgezogene Linien) und 30 m (gestrichelte Linien); mittlerer und maximaler Bedarf von 140 m³ h⁻¹ (ca. 1,6 l s⁻¹) bzw. 280 m³ h⁻¹ (ca. 3,2 l s⁻¹) sind als rote gestrichelte Linien dargestellt.

Zur Einschätzung und Charakterisierung der **hydrologischen Regulationsfähigkeit** einer neu aufgewachsenen Torfmoos-Biomasseschicht wurden ein Feldversuch zur Wasserleitfähigkeit durchgeführt und Trockenrohdichten einer neu aufgewachsenen Torfmoos-Biomasseschicht (bis zu 11 Jahre alt), von schwach zersetztem Torfmoostorf (H3-5, Oberfläche für aktuelle Praxis der Torfmoos-Paludikultur nach Hochmoorgrünlandnutzung mit Abziehen des Oberbodens) sowie degradiertem, stark zersetztem Hochmoortorf (10-20 cm Oberbodenschicht des Hochmoorgrünlandes) bestimmt. Im Juni 2022 erfolgte ein Versuch mit Wasserstandsanhhebung in einem seit 2011 aufgewachsenen 26 cm hohen Torfmoosrasen auf der Teilfläche F1, um die Wasserleitfähigkeit dieser Schicht zu ermitteln. Dazu wurde der Wasserstand in der Produktionsfläche auf 3-4 cm oberhalb des Torfes im unteren Bereich der Torfmoos-Biomasseschicht abgesenkt. Dann wurde der Wasserstand im umgebenden Graben innerhalb von 18 Stunden um 18 cm angehoben und das Ansteigen des Wassers mit Beginn des Wasserpumpens (28.06.2022) an drei Stellen in der Teilfläche F1 verteilt gemessen (Abbildung 8, R 1-3) und die hydraulische Leitfähigkeit der Torfmooschicht berechnet.

5.1.5. Nährstoffgehalte und Bilanzierung

Zur Bilanzierung der Nährstoffe wurden Proben des Oberflächenwassers in dem Vorfluter ‚Schanze‘, den Gräben und Filterbecken sowie im Porenwasser des Torfmoosrasens und des darunterliegenden Torfes genommen (siehe Temmink *et al.* 2017). Weiterhin wurden Torf- und Biomasseproben von Torfmoosen, Rohrkolben und Schilf gesammelt. Die Details zur Beprobung sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Im Oberflächen- und Porenwasser wurden nach Temmink *et al.* (2017) und Vroom *et al.* (2020) pH, elektrische Leitfähigkeit, Alkalinität und folgende Elemente gemessen: Aluminium, Calcium, Chlorid, Eisen, Kalium, Phosphor, Mangan, Magnesium, Natrium, Schwefel, Silizium, Zink sowie Ammonium, Nitrat, Phosphat. Die gleichen Elemente sowie Stick- und Kohlenstoff wurden in den Torf- und Biomasseproben bestimmt (nach Temmink *et al.* 2017).

Tabelle 3. Probenübersicht zu Oberflächenwasser, Porenwasser, Biomasse und Torf für die Untersuchungen zu Nährstoffen in den verschiedenen Feldversuchen.

Oberflächenwasserproben	Porenwasserproben (in Torfmoosrasen bzw. Torf)	Biomasse	Torfproben
Filterbecken und dadurch bewässerte Torfmoos-Produktionsflächen			
21 (in Fluss Schanze, Gräben und Filterbecken), 10 cm Tiefe, alle 2 Wochen		6 Schilf und Rohrkolben-Biomasseproben in Nov 2021	98 in Filterbecken, jährlich 1x in 20 cm Tiefe, 3 Tiefenprofile (alle 10 cm bis 190 m Tiefe), vor dem Beckenfluten 2020
Minimierung Oberbodenabtrag			
12 (Graben), 10 cm Tiefe, 5x jährlich	48 (0,5, 1, 2,5 u. 5 m vom Graben entfernt), 10 cm Tiefe, 3 Tiefenprofile (25, 50, 100 cm Tiefe), 6x in 2022	24 (0,5 u. 5 m vom Graben entfernt), 10x10 cm Flächen, 2x jährlich	
Minimierung Grabenanteil			
7 (Graben), 10 cm Tiefe, 5x jährlich	58 (Variante 30m Gabenabstand: 0.5, 1, 2.5, 5, 10, 17.5 m zum Graben; Bewässerung durch Dränrohre: 0, 0.5, 2.5, 3.75 m zum Dränrohr), 3 Tiefenprofile (25, 50, 100 cm Tiefe), 6x in 2022	24 (Variante 30m Gabenabstand: 0,5 u. 5, 17,5 m vom Graben entfernt, Bewässerung durch Dränrohre: 0,5, 3,75 m zum Dränrohr), 10 x 10 cm Flächen, 1x jährlich	
Langzeituntersuchungen			
15 (in Gräben und Filterbecken), 10 cm Tiefe, Juni 2020+2021	60 (0,5, 1, 2,5 u. 5 m vom Graben entfernt), 10 cm Tiefe, 1x jährlich 15 Tiefenprofile (5m vom Graben entfernt, 25, 50, 100 cm Tiefe), 1x jährlich	60 (0,5, 1, 2,5 u. 5 m vom Graben entfernt), 1x im Juni 2021	

5.1.6. Messung des Treibhausgas austausches

Messungen des Treibhausgas austausches und Bestimmung der Standortparameter auf dem Fahrdamm und den Torfmoos-Produktionsflächen

Bereits im Vorgängerprojekt MOOSWEIT wurden Messstationen auf dem Fahrdamm und der Torfmoos-Produktionsfläche der Teilfläche F1 eingerichtet. Die Messungen wurden von Juni 2020 bis Juni 2021 fortgesetzt. Dabei wurden die Messflächen verlegt und drei Varianten (Fahrdamm, Torfmoos-Produktionsfläche mit Ernte März 2020, Torfmoos-Produktionsfläche mit Wachstum seit Mai 2011) mit jeweils drei Rahmen angelegt (Abbildung 8). Um die Flächen betreten zu können, wurden Holzstege gebaut und auf jeder Variante drei quadratische PVC-Rahmen (0,8 x 0,8 x 0,2 m) zur Messung der THG-Emissionen dauerhaft 10 cm in den Boden eingebracht (Abbildung 13). Die CO₂- und CH₄-Flüsse wurden mit einer transparenten geschlossenen Kammer aus Polymethylmethacrylat (PMMA, "Acrylglas") (0,8 x 0,8 x 0,5 m, Livingston & Hutchinson 1995) gemessen. Die Kammer wurde mit einem Ventilator (d = 12 cm) und einem Quantumsensor (Indium Sensor, Deutschland) ausgestattet, um die photosynthetisch aktive Strahlung über die Messung der Photonenflussdichte (PPFD) während der Gasmessungen aufzuzeichnen. Des Weiteren wurde die Temperatur des Bodens in ca. 5 cm Tiefe sowie für die Dauer der Messung die Temperatur innerhalb der Kammer mit einem Thermometer erfasst.



Abbildung 13. Torfmoos-Produktionsfläche Teilfläche F1. Vordere Fläche: Ernte März 2020; hintere Fläche; Wachstum seit Mai 2011. (Foto: C. Daun)

Während der Haubenschließzeit wurden die THG-Konzentrationen in der Kammer mit infrarot- oder laserbasierten Gasanalysatoren (GasScouter G4301, Picarro; LI-820, LI-COR, USA) für mindestens 180 Sekunden mit einer Frequenz von 1 Hz gemessen. Um die tageszeitlichen Schwankungen der PPFD mit den Messungen abzudecken (wichtig für die spätere Modellierung zum Schließen der Messlücken), wurden die Haubenmessungen unter Verwendung von Netzen mit drei verschiedenen Beschattungsstufen (60 %; 80 %; 100 %) wiederholt. Die Varianten wurden alle vier Wochen gemessen mit jeweils

zwei Wiederholungen pro Variante. Bedingt durch die COVID-19-Pandemie, konnten die Varianten zwischen November 2020 und Januar 2021 nicht gemessen werden. Der Feldaufbau (Hauben und Analysator) wurde vor den Messungen mit Rauchpatronen (Hoffmann *et al.* 2018) erfolgreich auf Luftdichtheit (d.h. kein Massenfluss durch Leckagen) geprüft.

Bei allen drei Varianten wurden Pegelrohre in den Torf eingebracht und in ihnen monatlich der Wasserstand bestimmt sowie Wasserproben entnommen, die direkt im Feld auf 0,45 µm filtriert und innerhalb von maximal vier Stunden eingefroren wurden. In den Wasserproben wurden die Konzentrationen des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC), des gelösten anorganischen Kohlenstoffs (DIC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) mit einem DIMATOC 2100 (Dimatec, Essen, Deutschland) bestimmt. Die Konzentrationen von NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- und PO_4^{3-} wurden mit einem Durchflussanalysator (AA3 SEAL Auto Analyser 3HR, SEAL Analytical, Norderstedt, Deutschland) analysiert. Ein ProDSS YSI (vier Anschlüsse, von Xylem, Yellow Springs, OH, USA) wurde zur Analyse weiterer Eigenschaften des Wassers wie Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit (EC), Redoxpotential und gelöster Sauerstoff (O_2) verwendet. Weiterhin wurde pro Variante ($n = 3$) ein TMS-4 Datenlogger installiert, der viertelstündlich die Boden- (ca. 10 cm Tiefe), Bodenoberflächen- und Lufttemperatur (20 cm über Boden) sowie die Bodenfeuchte gemessen hat.

Um die Entwicklung der Vegetation innerhalb der Messrahmen zu dokumentieren, wurden monatlich ein Foto zur Bestimmung des Deckungsgrades erstellt sowie an fünf Stellen die Vegetationshöhe gemessen und der Durchschnitt berechnet.

Messungen des Treibhausgasaustausches und Bestimmung der Standortparameter im Filterbecken

Messungen des Treibhausgasaustausches fanden ausschließlich im Filterbecken FB2 statt, im Zeitraum zwischen Mai 2021 und Juli 2022 in einem Intervall von zwei bis vier Wochen. Die Messungen beschränkten sich auf CO_2 und CH_4 , da bei dauerhafter Wassersättigung keine oder nur sehr geringe N_2O -Emissionen zu erwarten sind. Zu diesem Zweck wurden im November 2020 zwei Holzstege gebaut, die quer über das durch eine Spundwand in zwei Bereiche getrennte Filterbecken FB2 verlaufen (Abbildung 6). Die Messpunkte wurden entlang der beiden Holzstege eingerichtet. Für jeden Messpunkt ($n = 10$) wurden drei nach oben offene Rohre so installiert, dass mit veränderbaren Rohren eine flexible Haube mit 65 cm Durchmesser (Günther *et al.* 2014) darüber positioniert und fixiert werden konnte. Die Messungen erfolgten in beiden Teilbereichen des Filterbeckens in unterschiedlichen Pflanzenbeständen (Schilf, Rohrkolben) mit jeweils fünf Wiederholungen (jeweils $n = 5$).

Für die Abbildung der Photosynthese und Ökosystem-Atmung (CO_2) sowie des CH_4 -Austausches erfolgten Messungen mit transparenten sowie mit nicht-transparenten, flexiblen, runden Hauben ($d = 0,65$ m), die, in Anlehnung an Günther *et al.* (2014) (Köhn *et al.* 2021), aus Polyurethanwänden mit einer Höhe zwischen 0,9 und 1,4 m gebaut wurden (Abbildung 14). Die Oberseite der Haube bestand aus Polymethylmethacrylat (PMMA, „Acrylglas“). Unterhalb dieses transparenten Deckels war ein Quantumsensor zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung installiert. Zusätzlich wurde die Haube mit einem Thermometer und drei Ventilatoren ($d = 0,12$ m) ausgestattet, um eine konstante Durchmischung der Luft in der Haube während der Messungen zu gewährleisten (Hoffmann *et al.* 2018). Die CO_2 - und CH_4 -Konzentrationen wurden während der Messungen in den geschlossenen Hauben, wie bei den Varianten auf F1, mit infrarot- oder laserbasierten Gasanalysatoren für mindestens 180 Sekunden gemessen. Die Bodentemperaturen (in ca. 5 cm Tiefe) wurden am Anfang und Ende jeder Messung mit einem Thermometer aufgezeichnet. Bei mehreren Messungen erschien die Haubentemperatur im Post-Processing der Daten als zu niedrig und wurde nach einer Prüfung auf Signifikanz mit der Lufttemperatur der Wetterstation ersetzt. Im Mai 2021 fand eine zweiwöchige Intensivmessung statt. Im Dezember 2021 konnten keine Messungen durchgeführt werden, da das Filterbecken zugefroren war.

Monatlich wurden Wasserproben an vier Stellen (in jedem Teilbereich zwei: PA1-2, PA1-5, TA1-2, TA1-5) im Filterbecken FB2 entnommen. Die Aufbereitung und Analyse erfolgte analog zu F1. Die Wasserhöhe wurde an den einzelnen Messflächen an jedem Messtag mit Hilfe eines Zollstocks bestimmt. Die Vegetationshöhe wurde monatlich ab Juli 2021 an drei Stellen innerhalb der Messrahmen gemessen und der Durchschnitt berechnet sowie die Vegetation anschließend fotografiert. Im Dezember 2021 fand die erste maschinelle Kompletternte des Filterbeckens FB2 statt.



Abbildung 14. Messung des Treibhausgasaustausches mit transparenter Haube im Filterbecken FB2 im Mai 2021. (Foto: C. Daun)

Messungen des Treibhausgasaustausches und Bestimmung der Standortparameter bei den Versuchen zur Minimierung von Oberbodenabtrag und Grabenanteil

Die Messungen des Treibhausgasaustausches fanden auf den Torfmoos-Produktionsflächen (Fläche F7-1 bis F7-3, F7-4 und F7-6) von Juli 2021 bis Juli 2022 in einem Intervall von zwei bis vier Wochen statt. Die erste Messung auf der Variante '30 cm Oberbodenabtrag' wurde erstmals im September 2021 durchgeführt. Entlang von Holzstegen wurden pro Variante jeweils drei (nur bei Variante '35 m Grabenabstand' vier) quadratische PVC-Rahmen im Abstand von 0,50 m vom Grabenrand bzw. Dränrohr zur Flächenmitte hin installiert (Abbildung 7, Abbildung 15). Bei der Variante '35 m Grabenabstand' war die Distanz zwischen den Messstellen mit ca. 4,50 m Abstand größer, um eine mögliche Varianz in Abhängigkeit vom Grabenabstand zu erfassen. Die Messungen der Treibhausgaskonzentrationen erfolgte identisch zum für F1 beschriebenen Vorgehen. Keine der Varianten konnte im Dezember 2021 gemessen werden, da sich Eis in den Rahmen befand.

Alle zwei bis vier Wochen wurden Wasserproben von jeder untersuchten Variante aus vorher installierten Pegelrohren entnommen und analog zum Verfahren für die Proben von F1 bearbeitet. Die einzelnen Varianten wurden monatlich fotografiert und die Vegetationshöhe an den vier Rahmenseiten sowie in der Mitte des Rahmens gemessen, um daraus den Mittelwert zu berechnen. Für jede Variante Minimierung Oberbodenabtrag ($n = 3$) sowie für jeden Messpunkt Minimierung Grabenanteil ($n = 7$) wurde ein TMS-4 Datenlogger zur kontinuierlichen Erfassung der bei F1 beschriebenen mikroklimatischen Parameter installiert.

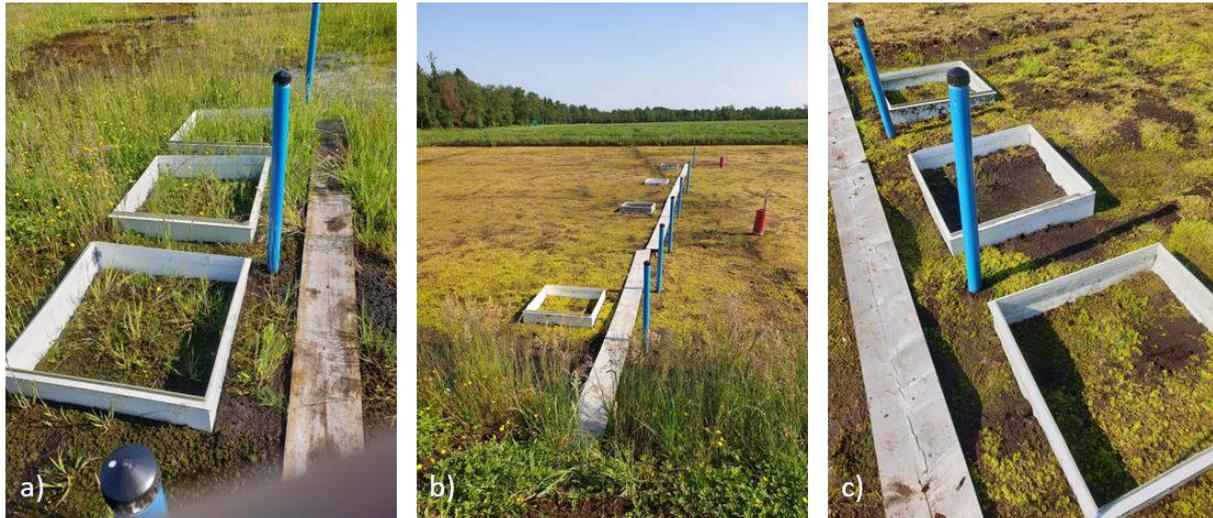


Abbildung 15. Messstellen zur Bestimmung des Treibhausgasausstausches bei a) Oberbodenabtrag 5-10 cm, b) Grabenabstand 35 m und c) Unterflurbewässerung mit Druck. (Fotos: C. Daun)

Umweltvariablen

Eine auf der Teilfläche F1 positionierte Wetterstation (F&C GmbH, Deutschland) zeichnete halbstündliche Durchschnittswerte der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe, der Luftfeuchtigkeit, der Lufttemperatur, des Niederschlags, der Windrichtung und -geschwindigkeit sowie die Photonenflussdichte (PPFD) in 2 m Höhe über der Torfmoosoberfläche auf. Zwischen dem 14.06.21 und dem 10.11.21 fiel die Wetterstation aus, sodass fehlende Werte der PPF (R² = 0,79) und Lufttemperatur (R² = 0,95) für die lückenfüllenden CO₂-Flüsse nach einer Prüfung auf Signifikanz mit Daten einer 1 km entfernten Wetterstation aufgefüllt wurden (Huth *et al.* 2021). Alle Vergleiche zwischen den Daten der Wetterstation und dem entsprechenden 30-jährigen Durchschnitt basieren auf den Daten des frei verfügbaren DWD-Rasterprodukts für die Rasterzelle, die die Torfmoos-Paludikulturfläche umschließt, um einen korrekten Vergleich mit den langfristigen Durchschnittswerten zu gewährleisten.

Als Proxy für die (potenzielle) Vegetationsentwicklung im Laufe des Jahres, wurde auf Grundlage der Lufttemperaturaufzeichnungen der effektive Temperatursummenindex (ETI) berechnet. Der ETI wurde für die Lückenfüllung der CO₂-Flüsse verwendet und in Anlehnung an Günther *et al.* (2017) als die Steigung der Kurve der effektiven Temperatursumme (> 5 °C) definiert.

Schätzung der Flüsse

Die Flüsse wurden mit der *flux()*-Funktion des Pakets *flux* für R (Jurasinski *et al.* 2022) geschätzt. Dafür wurde eine medianbasierte Regression zur Schätzung der Flüsse aus 1-Hz-CO₂- und CH₄-Konzentrationsdaten genutzt. Dabei werden die Steigungen zwischen aufeinanderfolgenden Werten mit der R-Funktion *mlbm()* (Komsta 2013) berechnet. Vor der Flussschätzung wurden alle Konzentrationswerte mithilfe von Gleichung 1 in Massen umgewandelt, wobei *M* die molare Masse von CO₂ (44 g mol⁻¹) oder CH₄ (16 g mol⁻¹), *p* der Partialdruck der Luft (101.300 Pa), *c* die Konzentration des betreffenden Gases, *R* die Gaskonstante (8,314 m³ Pa K⁻¹ mol⁻¹) und *T* die Temperatur (K) in der Kammerhaube zum Zeitpunkt der Konzentrationsmessung ist.

$$m = \frac{Mpc}{RT} \quad (1)$$

$$f = \frac{V}{A} \cdot \frac{\delta m}{\delta t} \quad (2)$$

Die Flüsse wurden anschließend unter Verwendung von Gleichung 2 geschätzt, wobei V das Volumen der Kammer (m^3), A die Fläche der gemessenen Wasser- bzw. Bodenoberfläche ($0,33 \text{ m}^2$ oder $0,64 \text{ m}^2$) und $\partial m/\partial t$ die Gasmassenänderung über die Zeit (ppm h^{-1}) ist, die sich aus der Steigung ergibt, die durch den verwendeten *fluxx*-Algorithmus bestimmt wurde. Die geschätzten Flüsse wurden visuell auf ihre Plausibilität hin überprüft (z. B. Druckartefakte während des Aufstellens der Haube, Aufwärmen des Loggers, versehentliche Fehlpositionierung am Rahmen).

Physische Störungen während des Einsatzes der Hauben können zu plötzlichem Entlassen von akkumuliertem Gas in Form von Blasen (ebullition fluxes) führen. Insbesondere CH_4 -Messungen an offenen Wasserkörpern, wie z.B. Gräben oder Filterbecken sind dafür anfällig. Wenn die Ebullitions-Flüsse über einen längeren Zeitraum integriert werden, führt dies zu einer Überschätzung der jährlichen CH_4 -Bilanz (Günther *et al.* 2017). Daher haben wir vor weiteren Analysen einen verteilungsbasierten Ausreißertest (Tukey 1977) durchgeführt. Alle CH_4 -Flüsse, die die extremsten 1,25 % an beiden Enden der Verteilung (insgesamt 2,5 %) jedes Datensatzes der einzelnen Varianten überschritten, wurden entfernt. Auf diese Weise blieben 196 für die Torfmoos-Produktionsfläche für die Teilfläche F1 (4 entfernt) und 865 Flüsse für den Versuch 'Minimierung Oberbodenabtrag' (92 entfernt) übrig. Für das Filterbecken FB2 und den Versuch 'Minimierung Grabenanteil' wurden nur die offensichtlichen Ebullitions-Ereignisse entfernt, da ansonsten durch den Ausreißertest zu viele Werte entfernt worden wären, bei denen es sich nicht um Ausreißer handelt. So blieben 1644 Flüsse für das Filterbecken FB2 und 848 für den Versuch 'Minimierung Grabenanteil' übrig (7 bzw. 2 entfernt).

Schätzung der jährlichen Bilanzen

Für die Schätzung der jährlichen CO_2 -Bilanzen für die Varianten auf F1, das Filterbecken sowie für die Versuche zur Minimierung von Oberbodenabtrag und Grabenanteil wurden künstliche neuronale Netze (KNN) nach Huth *et al.* (2021) und Daun *et al.* (2023) unter Nutzung des R-Pakets *neuralnet* (Fritsch *et al.* 2019) verwendet. KNNs sind eine statistische Methode, die aus einer Knotenschicht bestehen. Diese Knotenschicht enthält eine Eingabeschicht, eine oder mehrere versteckte Schichten und eine Ausgabeschicht. Dabei ist jeder Knoten (jedes künstliche Neuron) mit einem anderen verbunden und verfügt somit über einen entsprechenden Schwellenwert oder Gewichtung. Liegt die Ausgabe eines einzelnen Knoten über dem angegebenen Schwellenwert, wird der Knoten aktiviert. Anschließend sendet der aktivierte Knoten Daten an die nächste Schicht des Netzes. KNNs eignen sich gut für die Extrapolation von Treibhausgasflüssen auf der Grundlage relativ spärlicher zeitlicher Messungen (Bigaignon *et al.* 2020). Dabei wird ein Backpropagation-Algorithmus angewandt, um halbstündliche Zeitreihen der CO_2 -Flüsse zu erstellen. Um die mit diskontinuierlichen Flussmessungen verbundenen Unsicherheiten zu berücksichtigen, wurden 100 KNNs (zwei versteckte Schichten mit drei Knoten; vier Knoten bei dem Filterbecken und den Varianten auf F1) nach dem Zufallsprinzip mit 80 % der gemessenen Flüsse und Umwelteingangsdaten (PPFD, Lufttemperatur, ETI sowie zusätzlich der Bodentemperatur für die Varianten auf F1) für jede Variante und jedes Jahr separat trainiert. Die KNNs wurden mit den verbleibenden 20 % der gemessenen Flüsse validiert und dann auf die halbstündlichen Umweltdaten (PPFD, Lufttemperatur, ETI, Bodentemperatur) angewendet, um 100 Zeitreihen halbstündlicher CO_2 -Flüsse für jede Variante und jedes Jahr zu berechnen. Die Leistung der KNNs wurde anhand des Bestimmtheitsmaßes (R^2), des mittleren quadratischen Fehlers (Root Mean Squared Error, RMSE) und des relativen mittleren quadratischen Fehlers (RRMSE) bewertet (Bigaignon *et al.* 2020). Die CO_2 -Bilanz für jede Variante und jedes Jahr wird als mittlere jährliche CO_2 -Summe ± 1 SD aus den entstehenden 100-Zeitserien angegeben.

Für die Schätzung der jährlichen CH_4 -Bilanzen der Varianten wurden lineare Interpolation und eine Kombination aus Bootstrap- und Jackknife-Methoden verwendet, die es ermöglichten, die mit der

linearen Interpolation der Flüsse verbundene Unsicherheit abzuschätzen (Günther *et al.* 2017, Huth *et al.* 2020), basierend auf der Funktion *auc.mc()* des R-Pakets *flux*.

Allgemeine und statistische Datenanalyse

Die Durchführung aller Analysen sowie die Erstellung der Plots (R-Paket *ggplot2*, Wickham 2009) erfolgte vollständig skriptbasiert in R 4.0.3 (R Core Team R 2020). Chemische und physikalische Wasseranalysevariablen (PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , DIC- und DOC-Konzentrationen sowie pH, O_2 -Sättigung, Wassertemperatur, elektrische Leitfähigkeit (EC) und Redoxpotential) wurden mit den diffusiven CH_4 - und CO_2 -Flüssen zusammengeführt und separat mit multipler linearer Regression (schrittweise Rückwärtsselektion) analysiert. Da stark korrelierte Variablen nicht gemeinsam in einem Modell verwendet werden sollten (Dormann *et al.* 2013), wurden die erklärenden Variablen zuvor auf Interkorrelation getestet (Pearson-Korrelationskoeffizient). Nach Field (2018) sind Korrelationswerte über 0,8 ein Hinweis auf Multikollinearität. Alle Signifikanztests wurden mit $\alpha = 0,05$ durchgeführt.

5.1.7. Libellenfauna

Die Insektenordnung der Libellen (Odonata) stellt eine hervorragende Indikatorgruppe für den Zustand eines (semi-) aquatischen Lebensraumes dar. Deren Untersuchung ermöglicht es, die Bedeutung der Torfmoos-Paludikultur als Lebensraum sowohl für diese als auch (stellvertretend) für ökologisch verwandte Tiergruppen zu evaluieren und Änderungen in Abhängigkeit von der Kulturdauer zu erfassen. Im Projekt OptiMOOS wurde die Entwicklung der Biodiversität hinsichtlich der Libellenfauna in den Torfmoos-Produktionsflächen sowie in den neu angelegten Filtersystemen evaluiert, um die Bedeutung dieser Habitats als Ersatzlebensraum zu ermitteln. Hierzu wurde der Etablierungserfolg von Arten mit unterschiedlichen Habitatpräferenzen erfasst und die Artenzusammensetzung der Kulturflächen mit derjenigen naturnaher, renaturierter sowie degradierter Hochmoore verglichen. Die Untersuchungen zielen darüber hinaus auf die Erarbeitung von Managementempfehlungen für die Torfmooskultur sowie die Filterbecken ab, die das Erreichen einer möglichst hohen Biodiversität zum Ziel haben.

Die Ende 2016 im Projekt MOOSWEIT begonnenen langfristigen Untersuchungen der Libellenfauna wurden im Projekt OptiMOOS fortgesetzt und erweitert. Um die langfristige Entwicklung der Libellenfauna in der Torfmooskultur nachzuvollziehen, wurden in den Jahren 2017-2022 zwischen Mai und September alle 10-14 Tage Erfassungen der Libellen-Imagines und -Exuvien (letzte Larvenhäute vor der Metamorphose) durchgeführt. Eine Ausnahme stellt das Jahr 2019 dar, in dem mit abweichender Methodik ausschließlich Exuvien erfasst wurden, weshalb dieses Untersuchungsjahr nicht mit in die Auswertung einfließt. Die Erfassung der Imagines erfolgte durch Sichtbeobachtung, Fotodokumentation sowie ggf. Kescherfang (Bestimmung nach Dijkstra 2021). Die gesammelten Exuvien wurden mittels Leica M55 Stereomikroskop (Vergrößerung: 40x) unter Zuhilfenahme von Brochard *et al.* (2012) sowie Gerken & Sternberg (1999) bestimmt. Der Dauer der Flug- und Schlupfperiode der Libellen entsprechend wurden pro Jahr 8-12 Erfassungen durchgeführt. Für die Ermittlung des Arteninventars und der Populationsgrößen wurden auf den Torfmoos-Produktionsflächen der sich in Sukzessionsstadium und Alter unterscheidenden Teilflächen insgesamt 20 Probestrecken von jeweils 50 m Länge angelegt (Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8, Abbildung 9). Beprobte wurden: die 2011 eingerichtete und seitdem wachsende Teilfläche F1, die ebenfalls 2011 eingerichtete sowie 2016 und 2021 geerntete Teilfläche F2 und die 2016 eingerichtete und seitdem wachsende Teilfläche F4. Zusätzlich zu den an allen Teilflächen untersuchten Innengraben (zwischen zwei Torfmoos-Produktionsflächen liegend) wurden auf der Teilfläche F1 auch die Außengraben (zwischen Torfmoos-Produktionsflächen und Fahrdamm liegend) beprobt. In den zwei im Jahr 2020

eingerrichteten Filterbecken wurde jeweils ein Probestreifen von 50 m Länge entlang der Stege und des Uferbereichs angelegt.

Jeweils zu Beginn und Ende der Schlupf- und Flugzeit der Libellen wurden Messungen ausgewählter hydrochemischer Parameter (u.a. pH-Wert) an repräsentativen Gräben durchgeführt (Messgerät pH-Wert: WTW Multi 3510 IDS mit WTW SenTix 940 pH-Electrode). Um den Einfluss von Pflegemaßnahmen auf die Libellenfauna experimentell untersuchen, wurden die Innengräben der Teilfläche F1 im Jahr 2021 auf einer Länge von 180 m (Gesamtlänge der Innengräben: ca. 540 m) abschnittsweise von den Torfmoosen befreit, welche die Wasseroberfläche zunehmend verdeckten.

Alle Analysen wurden mit R 4.2.2 (R Core Team 2022) durchgeführt.

5.1.8. Spinnenfauna

Im Projektzeitraum wurden auf den Torfmoos-Produktionsflächen acht (2019) bzw. zehn (2020-2022) Standorte mit je 5 Barberfallen beprobt (Tabelle 4, Abbildung 5, Abbildung 6, Abbildung 8). Nach Möglichkeit wurden dabei identische Positionen wie in den Vorgängerprojekten untersucht.

Aufgrund von Flächenumbau standen die Standorte 5 und 6 ab 2018 nicht mehr zur Verfügung. Ab Frühjahr 2020 wurden die Ersatzstandorte 51 und 61 beprobt. Auch Standort 8 musste ab 2021 geringfügig verschoben werden. An den Standorten 2, 4 und 6 wurden nach der Frühjahrserfassung 2016 die Torfmoose geerntet. Im OptiMOOS-Projekt standen nur die Standorte 2 und 4 mit je 5 Barberfallen als Replikate für abgeerntete Standorte zur Verfügung.

Als Fallen dienten Plastikbecher mit 7,5 cm Öffnungsdurchmesser, die in linearen Transekten parallel zu den Bewässerungsgräben in der Mitte der 10 m breiten Torfmoos-Produktionsflächen mit einem Fallenabstand von jeweils 1 m angeordnet waren. Als Fangflüssigkeit diente, wie seit 2011, 4%ige Formaldehydlösung. Der Erfassungszeitraum in den Torfmoosrasen beschränkte sich, wie in den Vorgängerprojekten, auf die Monate Mai und Juni mit der größten Spinnenaktivität.

Tabelle 4. Überblick zur Spinnenerfassung auf der Torfmoos-Paludikultur-Versuchsfläche im Hankhauser Moor. Angegeben ist die Zahl der fängigen Barberfallen. Grün hinterlegt sind Flächen ohne Ernte, rot markiert sind Ernteflächen. FB – Filterbecken.

	Sto	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Teilfläche 2	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5	5	5	5	5	5	5	5	5				
	6	5	5	5	5	5	5	5	5				
	51										5	5	5
61										5	5	5	
Teilfläche 1	7				5	5	5	5	5	5	5	5	5
	8				5	5	5	5	5	5	5	5	5
	9					5	5	5	5	5	5	5	5
	10					5	5	5	5	5	5	5	5
FB	11											5	5
	12											5	5
		30	30	30	40	50	50	50	50	40	50	60	60

Ab Frühjahr 2021 wurden am Süden des Filterbeckens FB2 sowohl im mit Schilf als auch im mit Rohrkolben bepflanzten Teil jeweils fünf „schwimmende Barberfallen“ installiert. Die Barberfallen wurden dabei in ca. 20 x 20 cm große Styroporplatten eingelassen und mit Bindfaden an der Vegetation fixiert, so dass sie „Erfassungsinseln“ bildeten. Die Barberfallen in den Filterbecken waren 2021 und 2022 jeweils von Anfang Mai bis Anfang September in Betrieb.

Datenanalyse

In allen abundanzbasierten Auswertungen wurde mit normierten Abundanzen (Individuen/Falle/Tag) gerechnet. Für die Ordination wurde die Matrix der normierten Abundanzen Hellinger-transformiert (Legendre & Gallagher 2001). Die Ordination wurde mit BiodiversityR (Kindt 2022) berechnet. Die Turnover-Analysen erfolgen mit dem Skript nach Hillebrand *et al.* (2018). Alle Analysen wurden mit R 4.2.2 (R Core Team 2022) durchgeführt.

Um die Qualität der Artengemeinschaft mit Bezug auf Moorarten einzuschätzen (Refugialfunktion der Torfmooskulturen für spezialisierte Moorbewohner) wurden die Arten wie in Muster *et al.* (2015) in die drei Kategorien „PS-peatland specialists“, „PG-peatland generalists“ und „PT-peatland tolerants“ klassifiziert. Mit dem Atlas zur Verbreitung und Ökologie der Spinnen Mecklenburg-Vorpommerns (Martin 2021) und der darauf basierenden Roten Liste (Martin 2022) liegt aber eine neue Datengrundlage zur Einstufung der Arten vor, die auch für Nordwestdeutschland relevant ist. Als „PG-peatland generalists“ wurden alle Arten gewertet, deren Schwerpunktlebensraum nach Martin (2022) einem der folgenden Biotoptypen zugeordnet wurden:

- Torfmoosflächen, Schwingrasen (oms)
- Zwischenmoore (omz)
- Kalkflachmoore (omk)
- Moorwiesen, Nassgrünland (ogn)
- Moorgebüsche (gnm)

Von diesen Arten wurden alle jene als „PS-peatland specialists“ eingestuft, deren Biotopbindung zusätzlich als „stenotop“ gilt. Alle übrigen Arten gelten als „PT-peatland tolerants“.

Als quantitatives Maß für die Mooraffinität der Artengemeinschaft wird der Moorindex (MI) entworfen. Darin gehen die Arten entsprechend eines moorspezifischen Gewichtungsfaktors (m_i) ein. Folgende Gewichtungsfaktoren wurden verwendet: PS = 1, PG = 0.5, PT = 0. Der abundanzbasierte Moorindex berechnet sich nach folgender Formel:

$$MI = \frac{\sum_{i=1}^n a_i m_i}{A}$$

a_i – Abundanz der Art i in der Artengemeinschaft
 m_i – moorspezifischer Gewichtungsfaktor der Art i
 A – Gesamtabundanz der Probe

Der Moorindex kann Werte zwischen 0 und 1 einnehmen. Beim Maximalwert von 1 besteht die Artengemeinschaft ausschließlich aus stenotopen Moorspezialisten (PS-Arten). Die Nomenklatur der Spinnen folgt WSC (2022). Deutsche Spinnennamen werden nach Breitling *et al.* (2020) verwendet.

5.1.9. Ökonomie

Im Rahmen des Projektes OptiMOOS wurden die verschiedenen zu erprobenden Ansätze zur Optimierung der Torfmoos-Paludikultur ökonomisch begleitet. Für die neuen Versuche zur Wasserfilterung (Anlage von 2 Filterbecken), Minimierung Oberbodenabtrag und Minimierung Grabenanteil (Einrichtung von jeweils 3 kleinflächigen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen) wurden die Kosten der Anlage bzw. Einrichtung erfasst.

Zudem wurde angestrebt, die Erfassung von Zeitbedarf und Kosten zu Pflege bzw. Management der bestehenden Torfmoos-Paludikulturflächen im Hankhauser Moor als Langzeit-Monitoring, anschließend an die in Wichmann *et al.* (2017, 2020) veröffentlichten ökonomischen Untersuchungen zu Verfahrensgestaltung, Zeitbedarf, Kosten und Wirtschaftlichkeit der Torfmoos-Paludikultur fortzusetzen.

Die Erfassung der Einrichtungskosten und des Managements kann grob anhand der Rechnungen erfolgen, die durch Auftragnehmer gestellt wurden. Allerdings lassen sich nur wenige Rechnungen, wie z. B. die Produktion von Schilf- und Rohrkolbensenzlingen als Pflanzgut, eindeutig den Filterbecken zuordnen. Andere Rechnungen umfassen auch Arbeiten für die parallele Neuanlage der neuen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen. Häufig sind die Kosten in den Rechnungen unzureichend detailliert aufgeschlüsselt, um eine solche Zuordnung zu Einzelflächen zu ermöglichen (z. B. Erdarbeiten) oder es sind Positionen enthalten, für die die Kosten tatsächlich nur anteilig zugeordnet werden können (z. B. Baugenehmigung). Die Rechnungslegung aggregierter Kosten verhindert zudem eine Differenzierung in forschungsbedingte und praxisrelevante Kosten. Eine detaillierte Zuordnung von Kosten zu Teilflächen und Aussagen zur Übertragbarkeit auf andere Umsetzungsflächen ist somit nur durch die tägliche Dokumentation von Arbeitsschritten, Zeitbedarf und dem jeweiligen Personal- und Maschineneinsatz möglich.

Es wurde angestrebt, fortlaufend den Einsatz von Personal und Maschinen, laufende Kosten, Investitionen und Kosten für Auftragnehmer im Zusammenhang mit der Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor zu dokumentieren. Neben dem eigentlichen Auftragszeitraum im Rahmen des Projektes OptiMOOS (05/2020 bis 12/2022) wurden nach Möglichkeit auch Arbeitszeit- und Kostenbelege aus früheren Jahren seit 2016, d. h. anschließend an die erste Kulturrotation mit Ernte und Flächenerweiterung im Projekt MOOSWEIT (vgl. Wichmann *et al.* 2020), berücksichtigt. Die Daten wurden nach Möglichkeit den verschiedenen Teilflächen der Torfmoos-Paludikulturfläche zugeordnet bzw. Kosten anteilig aufgeteilt. Die Datenerhebung erfolgte durch:

- Tägliche Arbeitsblätter zur Erfassung von Arbeitsschritten und Zeitbedarf bei der Flächeneinrichtung
- Wöchentliche Arbeitsblätter für Erfassung der Management-Aufgaben und ihrer Häufigkeit
- Vor-Ort-Protokoll der Pflanzung
- Abfrage der betrieblichen Kostenansätze für Einsatzstunden von Personal und Technik
- Abfrage von Rechnungen und Quittungen im Zusammenhang mit den Torfmoos-Paludikulturflächen
- Berücksichtigung der seitens der Universität Greifswald erteilten Aufträge zu praktischen Arbeiten auf der Torfmoos-Paludikulturfläche

5.2. Klimaschrank-, Labor- und Gewächshausversuche zum Torfmooswachstum

5.2.1. Klimaschrankversuch zur Nährstoffversorgung von Torfmoosen

Um das Wachstum unterschiedlicher Torfmoos-Arten (*Sphagnum fallax*, *S. fimbriatum*, *S. magellanicum* s.l. (also *S. medium* bzw. *S. divinum*), *S. palustre*, *S. papillosum*, *S. squarrosum*) in Bezug auf die Nährstoffversorgung zu untersuchen, wurden zwei Klimaschrankversuche mit einer Dauer von jeweils 17 Wochen durchgeführt. Hierfür wurden Torfmoose aus dem Mutterpflanzenquartier in Greifswald (outdoor) in Pflanztöpfe (7 x 7 x 8 cm) überführt. Jeweils sechs Töpfe standen in einer mit Nährlösung (verändert nach van den Elzen *et al.* 2017) gefüllten Schale (19 x 24 x 10 cm) für vier Wochen zur Akklimatisierung der Torfmoose im Klimaschrank, bevor die Moose zum Versuchsbeginn an ihrem unteren Ende auf eine einheitliche Länge von 7 cm eingekürzt und pro Topf drei Einzelmoose mit Kabelbindern direkt unter ihrem Köpfchen gekennzeichnet wurden. Der Wasserstand wurde einheitlich auf 2-3 cm unter den Köpfchen eingestellt, wöchentlich zwei Mal kontrolliert und bei Bedarf durch Auffüllen mit entmineralisiertem Wasser wiederhergestellt. Zusätzlich wurden alle Moose täglich mit entmineralisiertem Wasser besprüht, um eine oberflächige Austrocknung zu verhindern. Zur Kontrolle der Wasserqualität wurden wöchentlich pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit gemessen sowie vereinzelt Wasserproben zur Bestimmung von NPK entnommen. Acht Wochen nach Versuchsbeginn wurde die bisherige Nährlösung durch eine neue ersetzt. Die Moose wurden einmal pro Woche mit unterschiedlichen Düngerlösungen besprüht (Tabelle 5).

Tabelle 5. Varianten wöchentlich applizierter Düngerlösungen in zwei Klimaschrankversuchen mit verschiedenen Torfmoos-Arten, die sich im Stickstoff- (N), Phosphor- (P)- bzw. Kalium (K)-Gehalt (in kg ha⁻¹ a⁻¹) unterscheiden.

Variante	Versuch Nr.	N	P	K
10N_PK	1	10	1,25	4
25N_PK	1 + 2	25	3,2	10
25N_<P	1	25	1,3	10
25N_<K	1	25	3,2	4
25N_no P	2	25	Ohne	10
25N_no K	2	25	3,2	ohne
40N_PK	1 + 2	40	5	16
40N_no P	2	40	Ohne	16
40N_no K	2	40	5	ohne
60N_PK	1	60	7,5	24
90N_PK	2	90	11,25	36

Bei besonders wüchsigen Moosen wurden diese am unteren Ende abgeschnitten, um eine Vermischung mit Moosen benachbarter Töpfe zu verhindern. Nach 17 Wochen erfolgte die Ernte, indem zunächst die Kabelbinder herausgesucht wurden ohne den Torfmoosverband maßgeblich zu zerstören, alle Moose auf Höhe der Kabelbinder abgeschnitten, bei allen Moosen die Köpfchen entfernt und die Biomassen für die Einzelmoose sowie der restlichen Moosbiomasse nach 24 Stunden

Trocknung bei 80°C bestimmt. In den Torfmoosköpfchen aus dem ersten Klimaschrankversuch wurden die NPK-Gehalte bestimmt (Temmink *et al.* 2017).

Beide Experimente erfolgten im Klimaschrank bei einem Tag-Nachtrhythmus von 16/8 h (hell/dunkel) mit Temperaturen 18/15°C, dauerhaft 80% Luftfeuchtigkeit, Beleuchtung bei 155-160 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ kultiviert.

5.2.2. Laborversuch zur Reduktion der Toxizität von Hydrogencarbonat für *Sphagnum palustre*

Durch Versauerung kann die toxische Wirkung von Bikarbonaten auf das Torfmooswachstum reduziert werden. Deshalb wurde in einem Laborversuch untersucht, wie sich *Sphagnum palustre* bei unterschiedlicher Wasserqualität und Wasserständen verhält. Dafür wurden Moosbüschel aus 20 Einzelmoosen mit einer Länge von 5 cm jeweils in einem separaten Becher in einer Nährlösung untergetaucht oder mit den Köpfchen 2 cm über dem Wasserstand kultiviert (Abbildung 16). Die Nährlösung variierte im pH-Wert (immer $>7,5$) sowie bei Kat- und Anionenkonzentrationen und Bikarbonatgehalten, die sehr hoch waren und verschiedenen Freilandgewässern entnommen wurden. Als Kontrolle diente eine Variante mit künstlichem 'Regenwasser' nach Koks *et al.* 2019. Untersucht wurde der Effekt einer Ansäuerung des Wassers auf die Torfmoosvitalität. Dafür wurde der pH-Wert durch Zugabe von HCl auf 4,0 eingestellt und das Wasser wöchentlich ausgetauscht.

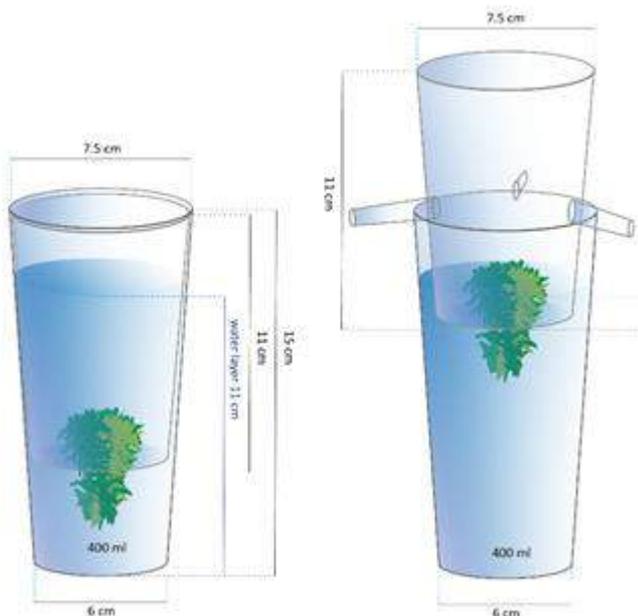


Abbildung 16. Aufbau der Becher mit den Torfmoosen und den zwei Wasserstandsvarianten; untergetaucht (links) und Wasserstand 2 cm unterhalb der Torfmoosoberfläche.

Das Experiment erfolgte in einer Klimakammer, wobei die Torfmoose im Wasserbad mit 16°C Wasser- und 20°C konstanter Raumtemperatur mit Tag/Nacht-Rhythmus von 16/8 (hell/dunkel) und einer Beleuchtung von 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (PAR) kultiviert wurden. Nach 10 Tagen Akklimatisierung unter den oben genannten Versuchsbedingungen erfolgte der 35tägige Versuch.

Wöchentlich erfolgte vor dem Wasseraustausch die Messung des pH-Wertes sowie eine Wasserprobenahme in jedem Becher und wurden zur Einschätzung der Torfmoosvitalität die Moose fotografiert. Nach Versuchsende wurden die Torfmoose mit voll entionisiertem Wasser gespült und fotografiert und die Vitalität anhand eines "Grünfarben"-Index ausgewertet (Schindelin *et al.*, 2012, Woebbecke *et al.*, 1995). Die Torfmoosproben wurden in Köpfchen (0-1 cm) und Stämmchen unterteilt und Gesamtkalium und -stickstoff gemessen (siehe Temmink *et al.* 2017).

In den Wasserproben wurden Calcium, Magnesium, Natrium, Schwefel mittels Emissionsspektrometrie (ICP-OES iCAP 6000, Thermo Fischer Scientific; Bremen, Germany) und Kalium- und Chlorid-Ionen mittels Auto Analyzer system III (Bran und Luebbe GmbH, Norderstedt, Germany) ermittelt.

5.2.3. Gewächshausversuch zur Reaktion von Torfmoosen auf Überstau und Austrocknung

Unter Gewächshausbedingungen (natürliche Tageslänge, Tageslicht, sommerliche Temperaturen, Schattierung bei Bedarf) wurden zehn Varianten von Überstau getestet, die sich in Dauer und Zyklus unterschieden:

- a) 1 Tag Überstau/6 Tage Austrocknen,
- b) 3 Tage Überstau/6 Tage Austrocknen,
- c) 6 Tage Überstau/6 Tage Austrocknen,
- d) 1 Tag Überstau/3 Tage Austrocknen,
- e) 3 Tage Überstau/3 Tage Austrocknen,
- f) 6 Tage Überstau/3 Tage Austrocknen,
- g) 3 Tage Überstau/6 Tage Feuchthalten,
- h) 6 Tage Überstau/6 Tage Feuchthalten,
- i) Dauerüberstau mit 5 cm Wassersäule
- j) Dauerüberstau mit 11 cm Wassersäule.

Als Kontrolle diente eine gleichmäßige Befeuchtung der Torfmoose. Zu Beginn der Überstauphase wurde voll entionisiertes (VE) Wasser zugeführt und am Ende wieder abgegossen, ohne die Torfmoose wegzuspülen. Nur für das Feuchthalten wurden die Torfmoose täglich mit VE-Wasser besprüht, was bei Austrocknung entfiel.

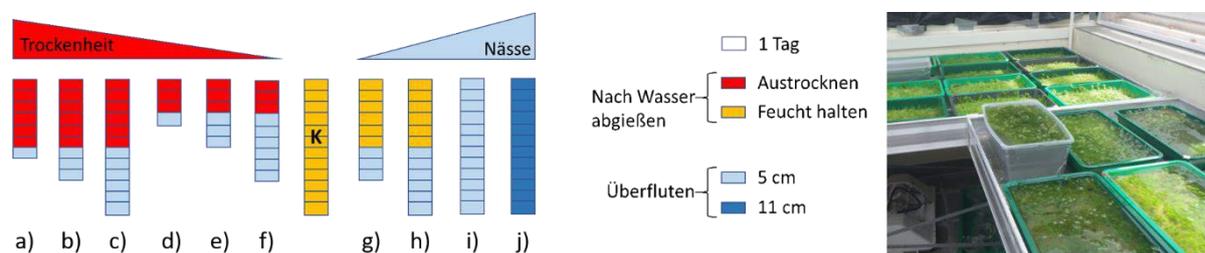


Abbildung 17. links) Varianten im Versuch zu Austrocknungs- und Überflutungstoleranz frisch ausgebrachter Torfmoose (1 Kästchen = 1 Tag, K = Kontrolle) mit Bezeichnung wie im Text; rechts) Versuchsaufbau im Gewächshaus.

Für die Versuchseinrichtung wurden Torfmoose von drei Arten mit verschiedenen Ansprüchen an die Wasserversorgung (*Sphagnum fallax* als Schlenken/Rasen-Art, *S. palustre* als Rasen-Art, *S. rubellum* als Bult-Art) auf 10 cm Länge gekürzt und mit einer Ausgangsdeckung von 80 % auf ein Vlies (als wasserspeichernde Oberfläche, aus recyceltem Polypropylen) in 5 cm hohe Saatschalen (höhere Boxen für 11 cm-Überstau) ausgelegt (Abbildung 17). Die Torfmoose wurden wöchentlich einmal mit einer Lösung nach Rudolph *et al.* (1988) besprüht. Die Standorte der einzelnen Schalen im Gewächshaus rotierten über die Versuchsdauer (drei Monate, Juni-August 2022).

Während des Versuchs wurde jeweils zum trockensten Moment im Zyklus jeder Variante der Wassergehalt der Torfmoose gemessen und der Anteil ausgetrockneter Torfmoose geschätzt. Nach 1,5 Monaten und am Ende des Versuchs wurden die Deckung der Torfmoose (gesamt und grün) und der Köpfchen geschätzt sowie am Versuchsende die Zahl der Köpfchen und der Zuwachs durch Trocknung der Biomasse für 24 Stunden bei 80°C bestimmt. Zusätzlich wurden für jeweils 100 Einzelmoose pro Torfmoosart und Variante Länge und Anzahl der Verzweigungen ermittelt.

5.3. Pflanzenbauliche Versuche mit Paludikultur-Biomasse

5.3.1. Rohstoffe und deren Aufbereitung zu Substratausgangsstoffen

Während der Projektzeit wurden unterschiedliche Rohstoffe aus Paludikultur aufbereitet, untersucht und anschließend in Pflanzenversuchen getestet, um ein torffreies gartenbauliches Substrat aus ihnen zu entwickeln. Im ersten Projektjahr wurden Schilf (*Phragmites australis*) und Rohrkolben verwendet, die nicht von der eigenen Versuchsfläche stammten. Beim Rohrkolben handelte es sich um *Typha latifolia* (Breitblättriger Rohrkolben), welcher zur Verwendung als Einblasdämmung bereits aufbereitet war. Das natürlich getrocknete Wintermaterial war hierfür bereits direkt während des Ernteprozesses auf eine Korngröße von 0,5 - 2,0 cm gehäckselt worden. Da diese Aufbereitung einen Ausgangsstoff ergab, der auch zur Verwendung in Substratmischungen geeignet erschien, wurde das Material in drei unterschiedlichen Varianten in die Untersuchungen einbezogen. Zwei der drei Varianten unterschieden sich in der Menge der enthaltenen Kolben im geernteten Bestand. Während ein Bestand geschätzt weniger als 20 % Pflanzen mit Kolben aufwies, trugen im anderen mehr als 90 % einen Samenstand (Herkunft: Anklamer Fähre, D). Die unterschiedliche Menge an Samen im Material war deutlich sichtbar. Im Folgenden werden die Ausgangsstoffe daher mit "Rohrkolben wenig Samen" und "Rohrkolben viele Samen" bezeichnet. Die dritte untersuchte Einblasdämmung stammt aus früheren Untersuchungen an der LVG Ahlem. Sie wurde dort seit 2018 trocken und bei Zimmertemperatur gelagert und wird im Folgenden als "Rohrkolben gelagert" bezeichnet. Der Standort des geernteten Feldes ist unbekannt. Die Einblasdämmungen sind in Abbildung 18 zu sehen. Sie wurden in die Untersuchungen zur Charakterisierung als Ausgangsstoffe mit einbezogen und in einem Kulturversuch getestet.



Abbildung 18. Einblasdämmungen aus Rohrkolben (*Typha latifolia*): a) Material mit max. 20 % Kolben im geernteten Bestand, b) Material mit ca. 90 % Kolben im geernteten Bestand, c) Material aus unbekannter Herkunft. (Fotos: Pilz/Nordmeyer, LWK Niedersachsen)

Ein im Februar 2021 bei Medenblik (NL) geerntetes Bündel Schilf stand noch zur Verfügung, ebenso wie einige im Winter geerntete Bündel mit Stängeln von *Typha latifolia* und *Typha angustifolia*. Diese stammten aus Ankeveen in Nordholland (NL). Die Schilf- und Rohrkolbenbündel wurden für Zerkleinerungs- und Aufbereitungsversuche sowie als Anschauungsmaterial genutzt. Während aufbereitetes Schilfmateriale aus Medenblik zur Charakterisierung von Schilf aus Winterernte verwendet wurde, wurden die Rohrkolbenstängel nicht weiter analysiert. Im Bericht wird der aus dem Schilf entstandene Ausgangsstoff mit "Schilf Fremd" bezeichnet. Nachdem Rohstoffe von der eigenen Versuchsfläche zur Verfügung standen wurde im Weiteren mit diesen gearbeitet.

Die 2022 geprüften Rohstoffe stammten ausnahmslos von der Versuchsfläche des Projektes im Hankhauser Moor im Landkreis Ammerland. Die Torfmoos-Biomasse wurde 2021 von der Fläche geerntet und professionell im Erdenwerk (Torfwerk Moorkultur Ramsloh – abgekürzt MoKuRa) aufbereitet. Somit lag das Torfmoos als fertiger Substratbestandteil vor und es war keine weitere Aufbereitung nötig. Die verwendete Biomasse von Rohrkolben (*Typha angustifolia*) und Schilf (*Phragmites australis*) wurde im Filterbecken FB2 geerntet. Untersucht wurde sowohl im Winter als

auch im Sommer geerntetes Material. Die Ernten des Sommermaterials erfolgten im Juli 2021 und im August 2022, die Wintermahd im Dezember 2021. Das Wintermaterial war bereits natürlich getrocknet, wurde jedoch für eine gute Lagerfähigkeit nochmals für einige Wochen auf Gewächshaustischen ausgebreitet, um vollständig trocknen zu können. Auf gleiche Weise wurde mit dem frischen Material der Sommerernte 2022 verfahren. Die Sommerernte 2021 hingegen wurde im Trockenschrank bei 70°C getrocknet. Aus Rücksicht auf den noch sehr jungen Pflanzenbestand wurde im Sommer 2021 nur eine geringe Menge Rohrkolben und Schilf geerntet. Dieses Material war lediglich ausreichend für Laboruntersuchungen zur Materialcharakterisierung, Kulturversuche waren nicht möglich. An den aufbereiteten Rohstoffen von der Projekt-Versuchsfläche wurden alle Untersuchungen zur Charakterisierung durchgeführt, und mit den daraus entstandenen Substraten zahlreiche Kulturversuche umgesetzt. Die im Bericht im Folgenden verwendeten Bezeichnungen für die unterschiedlichen Ausgangsstoffe finden sich in **Tabelle 6**.

Tabelle 6. Übersicht über die im Projekt verwendeten Ausgangsstoffe.

Kurzbezeichnung	Ausgangsstoff	Erntezeitpunkt	Herkunft
<i>Typha latifolia</i>			
RK wenig Samen	Einblasdämmung aus einem Bestand mit max. 20 % Kolben tragenden Pflanzen (wenig Samen)	Winter	Anklamer Fähre
RK viele Samen	Einblasdämmung aus einem Bestand mit ca. 90 % Kolben tragenden Pflanzen (viele Samen)	Winter	Anklamer Fähre
RK gelagert	mehrere Jahre alte und gelagerte Einblasdämmung (gelagert)	Winter	unbekannt
<i>Typha angustifolia</i>			
RK Hank Wi21	Rohrkolben aus dem Filterbecken FB2	Winter 2021	Hankhauser Moor
RK Hank So21		Sommer 2021	Hankhauser Moor
RK Hank So22		Sommer 2022	Hankhauser Moor
<i>Phragmites australis</i>			
SI (fremd)	zugekauftes Schilf (Fremd)	Winter 2021	Medenblik (NL)
SI Hank Wi21	Schilf aus dem Filterbecken FB2	Winter 2021	Hankhauser Moor
SI Hank So21		Sommer 2021	Hankhauser Moor
SI Hank So22		Sommer 2022	Hankhauser Moor
<i>Sphagnum</i>			
SPH	aufbereitetes Torfmoos	2021	Hankhauser Moor

Um die Rohstoffe als Substratbestandteile nutzen zu können, war zuerst eine Zerkleinerung nötig. Die produzierte Struktur sollte grob genug sein, um dem Substrat genügend Luft gefüllten Raum und Drainage zu geben, aber auch fein genug sein, um ausreichend Wasser zu halten und die Wurzeln nicht beim Wachsen zu blockieren. Die ersten Versuche zur Zerkleinerung der Rohstoffe erfolgten mit Gartenhäckslern. Es wurden zwei Modelle mit unterschiedlichem Häckselwerk getestet. Sowohl der Walzen-, als auch der Messerhäcksler lieferte keine geeignete Partikelgröße. Die Stücke der Stängel waren deutlich zu groß für eine Verwendung als Substratbestandteil. Auch ein mehrmaliges Häckseln erbrachte keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Als nächste Option wurde daher die in der LVG Ahlem vorhandene Schneidmühle (Typ SM-1 von Retsch) getestet (siehe Abbildung 29). Hiermit konnte bei der Verwendung eines Siebeinsatzes mit 10 x 10 mm Lochgröße ein geeignetes Ausgangsmaterial erzeugt werden. Es wurde ausschließlich bereits getrocknetes Material zerkleinert. Um möglichst

homogenes Material mit einer Partikelgröße kleiner 10 mm zu erhalten, wurde das Häckselgut bei Bedarf nach dem Zerkleinern nochmals über ein Sieb mit 10 mm Maschenweite geschüttet. Das Überkorn wurde dann zur weiteren Zerkleinerung wiederholt durch die Schneidmühle gegeben. Alle verwendeten Rohstoffe wurden auf diese Weise mit der Schneidmühle in der LVG Ahlem aufbereitet. Die fertig aufbereiteten Substratausgangsstoffe sind in Abbildung 20 zu sehen. Es wurde jeweils nur die benötigte Menge für den nächsten Kulturversuch und Analysen gehäckselt.

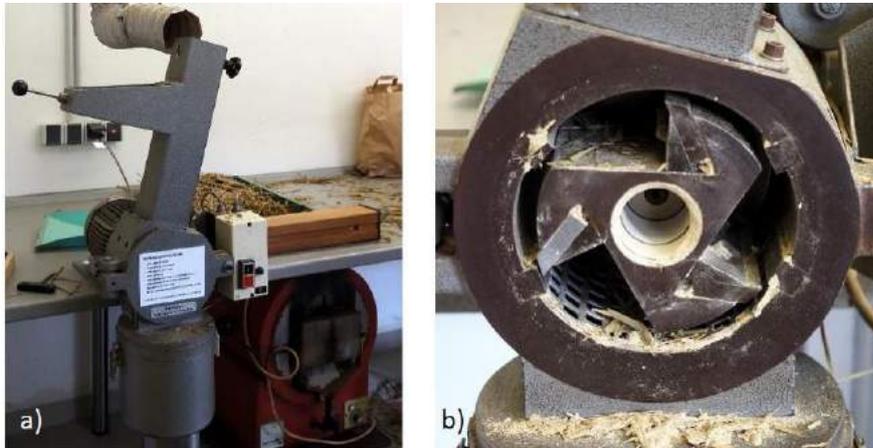


Abbildung 19. Die Schneidmühle Typ SM-1 von Retsch in der LVG Ahlem im Einsatz. a) Ansicht der ganzen Schneidmühle, bestehend aus Einfüllstutzen, Schneidwerk und Auffangbehälter. b) Das geöffnete Schneidwerk der Mühle mit Siebeinsatz. (Fotos: Pilz/ Nordmeyer, LWK Niedersachsen).

Der Großteil der trockenen Rohstoffe wurde unverarbeitet in Big Bags im überdachten Freiland gelagert. Während der Lagerung erfolgte einmal wöchentlich eine Temperaturmessung (an zwei unterschiedlichen Stellen) in den Big Bags, um eine mögliche Selbsterhitzung erkennen zu können. Um zu kontrollieren, ob die Rohstoffe durch die Lagerung im Freien nicht wieder feuchter werden, wurde einmal im Monat der Wassergehalt (mittels Trockenmasse) bestimmt. Eine gleichbleibende Qualität der Rohstoffe wäre dann nicht mehr sicher, wenn die Lagerung von feuchtem Material zur Schimmelbildung führen oder bei leicht abbaubaren Stoffen Umsetzungsprozesse begünstigen würde.

Für das Kontrollsubstrat wurden Weißtorf (Frästorf) und Schwarztorf der Firma Kekkilä-Brill Substrates GmbH verwendet.



Abbildung 20. Aufbereitung der Rohstoffe und die gebrauchsfertigen Substratausgangsstoffe. (Fotos: Pilz/ Nordmeyer, LWK Niedersachsen)

5.3.2. Untersuchungen und Analysen zur Charakterisierung der Ausgangsstoffe und Substrate

Nach ihrer Aufbereitung erfolgte die Charakterisierung der Rohstoffe, wofür verschiedene physikalische, chemische und biologische Parameter ermittelt wurden. Es wurden gezielt Untersuchungen gewählt, die Aufschluss über die Eignung als Substratbestandteil geben. Alle Untersuchungen erfolgen in Anlehnung an die in

Tabelle 7 aufgelisteten VDLUFA Methoden. Zu Beginn wurden alle Ausgangsstoffe im Umfang einer sogenannten Grundanalyse untersucht. Diese beinhaltet die Bestimmung von Rohdichte_{feucht}, pH-Wert, Salzgehalt und den löslichen Hauptnährstoffen Stickstoff (N) als Ammonium- (NH₄⁻) und Nitrat-Stickstoff (NO₃-N), Kalium (K₂O), Phosphat (P₂O₅) und Magnesium (Mg). Sie gibt Aufschluss darüber, welche Nährstoffen und welches pH-Wert Niveau ein Ausgangsstoff für das Substrat bereits mitbringt. Weiterhin wurden in den Rohstoffen von der eigenen Versuchsfläche die Gehalte an Natrium (Na) und Chlorid (Cl) bestimmt, da aus der Recherche zu Beginn des Projektes bekannt war, dass es zu einer Akkumulation dieser Stoffe in Rohrkolben und Schilf kommen kann. Hohe Gehalte an Natrium und Chlorid im Substrat führen meist zu Pflanzenschäden und erhöhen den Salzgehalt im Substrat stark, daher ist dies eine wichtige Information zur Einordnung von Beeinträchtigungen im Pflanzenwachstum. Zur allgemeinen Überprüfung auf pflanzenschädigende Stoffe in den Ausgangsstoffen wurden unterschiedliche Keimtests mit Pflanzen durchgeführt. Mittels eines sogenannten Kressetests wurde das Material auf flüchtige phytotoxische Stoffe geprüft. Der Test wurde mit 100 % des Prüfmaterials durchgeführt. Hierzu wurde ein in Kresse Saatgut getauchter Wattebausch in einem geschlossenen Gefäß über leicht angefeuchtetes Prüfmaterial gehängt. Die Kontrolle enthält Wasser anstatt eines Substratausgangsstoffes. Nach drei bis vier Tagen wird die Keimung und Gesundheit der Sprosse und Wurzeln mit der Kontrolle verglichen und bewertet. Die Bewertung erfolgte in Anlehnung an die Methode A 10.2.2 (1997) des VDLUFA. Die Überprüfung auf über die Wurzel einwirkende pflanzenschädigende Stoffe erfolgt mit der Testpflanze Chinakohl. Die Rohstoffe wurden mit Anteilen von 25 Vol.-% und 50 Vol.-% getestet. Als Mischungskomponente und als Kontrolle wurde ein selbstgemischtes Torfsubstrat (60 % Weißtorf + 40 % Schwarztorf; V+V) verwendet. Einzig das Torfmoos wurde auch in einer 100 Vol.-% Variante geprüft. Da bei Substraten möglichst die Freiheit von Unkräutern gewährleistet werden sollte, wurden die Ausgangsstoffe auf keimfähige Samen und austriebsfähige Pflanzenteile (Unkrauttest) untersucht. Dieser Test wurde ebenfalls mit einer Mischung (50 % + 50 %, V+V) der Prüfmaterialien und dem zuvor genannten Torfsubstrat durchgeführt. Weiterhin wurde zur Charakterisierung der organische bzw. mineralischen Substanz der Ausgangsstoffe der Glühverlust ermittelt. Da die verwendeten Rohstoffe einen hohen Anteil an organischer Substanz aufwiesen und bei solchen Materialien häufig eine hohe Stickstoff-Immobilisierung festgestellt wird, wurden Brutversuche durchgeführt. Diese dienen zur Beurteilung der Stabilität des Stickstoffhaushaltes. In Anlehnung an die VDLUFA Methodenvorschrift wurde die Ausgangsstoffe sowohl 20 Tage, als auch 60 Tage lang bebrütet. Die Untersuchungen erfolgen jeweils nach Erhalt der Rohstoffe und nach deren Aufbereitung. Die Biomasse aus den Sommerernten wurde somit im 3. Quartal 2021 bzw. 2022 untersucht, das zugekaufte Fremdmaterial aus Winterernte ebenfalls im 3. Quartal 2021 und die im Winter geernteten Rohstoffe von der eigenen Versuchsfläche im 4. Quartal 2021 und 1. Quartal 2022.

Um die benötigte Aufkalkung und Aufdüngung der Substrate bestimmen zu können, wurde vor den ersten Kulturversuchen zunächst die jeweiligen Mischungen der Ausgangsstoffe analysiert. Zur Ermittlung der nötigen Kalkmengen für die pH-Wert Einstellung wurden Kalksteigerungsreihen (s.g. Pufferkurven) angelegt. Weiterhin erfolgte in allen Fällen eine Analyse der gebrauchsfertigen Substratmischungen zu Versuchsbeginn und -ende. Bestimmt wurden die Rohdichte_{feucht}, der pH-Wert und Salzgehalt, sowie die Hauptnährstoffe Ammonium- und Nitrat-Stickstoff, Kalium und Phosphat. Bei Versuchen mit einer Kulturdauer von mehr als vier Wochen erfolgten auch eine oder mehrere Analysen während der Kultur, um mögliche Abweichungen vom Optimalbereich frühzeitig erkennen

und gegensteuern zu können. Analysen nach Versuchsbeginn wurden immer mit Mischproben aus allen Wiederholungen durchgeführt.

Alle Analysen und Tests wurden selbst durchgeführt. Hierzu standen das Labor und Diagnosegewächshaus der LVG Ahlem zur Verfügung. Einzige Ausnahme bildet die Bestimmung von Natrium und Chlorid, diese wurde bei der LUFA Nord-West in Oldenburg in Auftrag gegeben.

Tabelle 7. Zusammenfassung der untersuchten substratrelevanten Parameter mit Angabe der angewandten VDLUFA Methodenvorschrift. VDLUFA = Verband Deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e.V.

Untersuchungsparameter	Methode
Physikalische Parameter	
Rohdichte _{feucht} (g/l Substrat)	nach VDLUFA A 13.2.1 (1991)
Rohdichte _{trocken} (g/l Substrat)	berechnet (aus Rohdichte _{feucht} und Trockenmasse einer Probe)
Wassergehalt/Trockenmasse (%)	nach VDLUFA A 2.1.1 (1991)
Chemische Parameter	
Hauptnährstoffgehalte NH ₄ -N, NO ₃ -N, K ₂ O, P ₂ O ₅ , Mg (mg/l Substrat)	nach VDLUFA A 13.1.1 (2004) in CAT
Natrium und Chlorid (mg/l Substrat)	nach VDLUFA A 13.4.3 (2012) in H ₂ O
Salzgehalt (als KCl) (g/l Substrat)	nach VDLUFA A 13.4.1 (1991) in H ₂ O
pH-Wert	nach VDLUFA A 5.1.1 (2016) in CaCl ₂
Glühverlust/Organische Substanz (%)	nach VDLUFA A 15.2
Biologische Parameter	
Test auf keimfähige Samen und austriebfähige Pflanzenteile (Unkrauttest)	nach VDLUFA A 13.5.2 (2004)
Test auf pflanzenschädigende Stoffe (Chinakohltest)	nach VDLUFA A 10.2.1 (2016)
Test auf gasförmige Phytotoxine (Kressetest)	Methode in Anlehnung an VDLUFA A 10.2.2 (1997)
Stabilität des Stickstoffhaushaltes (Brutversuch)	nach VDLUFA A 13.5.1 (2007)

5.3.3. Kulturversuche

Um die Eignung und Einsatzgrenzen der Materialien als Bestandteil von gartenbaulichen Substraten weiter zu testen, wurden Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen der aufbereiteten Rohrkolben- bzw. Schilf-Biomasse in Kombination mit Torfmoos hergestellt.

Da im Projekt der Fokus auf der Prüfung dieser drei Paludikulturpflanzen lag, wurde den Substraten kein anderer Substratausgangsstoff zugegeben. Abbildung 21 zeigt die Substratmischungen, die am häufigsten verwendet wurden. Als Kontrollsubstrat wurde in den meisten Pflanzenversuchen ein reines Torfsubstrat aus Weiß- und Schwarztorf verwendet, um mit anderen pflanzenbaulichen Versuchen vergleichbar zu bleiben. Nur in einem Kulturversuch mit Balkentomaten bestand die Kontrolle stattdessen zu 100 Vol.% aus dem aufbereiteten Torfmoos. Die Mischungsverhältnisse der zu testenden Rohstoffe in den Substraten sind unter den jeweiligen Versuchen zu finden.

Alle Kulturversuche wurden im Gewächshaus in einer eigenen Abteilung durchgeführt (Abbildung 22). Somit war die individuelle Steuerung der optimalen Sollwerte für Heizung, Lüftung, Schattierung und Belichtung möglich. Die Bewässerung erfolgte bis zum Einwurzeln der Pflanzen per Gießgerät von oben, anschließend per Anstaubewässerung über die Tische. Es war eine bedarfsgerechte Bewässerung jeder einzelnen Wiederholung möglich. Über die Anstaubewässerung erfolgte dann auch die Düngung der Pflanzen.



Abbildung 21. Substratmischungen mit 20, 40 und 60 Vol.-% Anteilen an Rohrkolben bzw. Schilf in Kombination mit Torfmoos. Obere Reihe: Rohrkolben, Untere Reihe: Schilf. (Fotos: Pilz/Nordmeyer, LWK Niedersachsen)

Für die Kulturversuche wurden Zierpflanzen mit unterschiedlichen Ansprüchen gewählt (Tabelle 8), die zum entsprechenden Kulturzeitraum passten. Ergänzt wurden diese mit Kräutern und Gemüsepflanzen, da so auch Tests mit einer kürzeren Kulturdauer möglich waren. Neben Jungpflanzen wurden manche Pflanzenarten auch ausgesät, um den Einfluss der Substrate auf die Keimung beobachten zu können. Während zum einen die grundsätzliche Eignung der Rohstoffe getestet wurde, wurden in manchen Versuchen auch weiterführende Versuchsfragen untersucht. So wurde neben dem Einsatz von Benetzungsmittel in den Substratmischungen vor allem der Einfluss der Düngung getestet. Zum Beispiel durch unterschiedliche Nährlösungskonzentrationen bei der Bewässerungsdüngung oder zusätzliche Düngebehandlungen zu einem bestimmten Kulturzeitpunkt.



Abbildung 22. Gewächshausabteilung in der LVG Ahlem mit einzeln zu bewässernden Tischen. a) mit leeren Tischen (Foto: Lüdtkke) und b) mit Weihnachtsstern in der 1. Kulturwoche (eine Variante pro Tisch). (Foto: Pilz/Nordmeyer, LWK Niedersachsen)

Tabelle 8. Überblick über die pflanzenbaulichen Versuche mit Rohrkolben, Schilf und Torfmoos als Substratausgangsstoffe (Abkürzungen siehe Tabelle 6)

Nr.	Versuch	Pflanze	Substrate (Anteile in Vol.-%)
1	Weihnachtsstern	<i>Euphorbia pulcherrima</i> 'Allegra Red' (Lazzeri)	1) Kontrolle 100 % Torf (60 % Weiß- + 40 % Schwarztorf) 2) 25 % RK wenig Samen + 75 % Torf 3) 25 % RK viel Samen + 75 % Torf 4) 25 % RK gelagert + 75 % Torf
2	Chinakohl	<i>Brassica rapa subsp. pekinensis</i> 'Richi F1'	1) Kontrolle 100 Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 60 % RK Hank Wi21 + 40 % SPH 5) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 6) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH 7) 60 % SI Hank Wi21 + 40 % SPH
3	Balkontomate	<i>Solanum lycopersicum</i> 'Summerlast' F1 (Syngenta)	1) Kontrolle 100 % SPH 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 60 % RK Hank Wi21 + 40 % SPH 5) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 6) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH 7) 60 % SI Hank Wi21 + 40 % SPH
4	Zauber-glöckchen (link)	<i>Calibrachoa</i> MiniFamous® Uno White+Yellow Eye (Selecta One)	1) Kontrolle 100 % Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 5) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH
5	Pelargonie (link)	<i>Pelargonium zonale</i> Moonlight® Katy '13, (KLEPZ13334) (Selecta One)	1) Kontrolle 100 % Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 5) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH
6	Basilikum	<i>Ocimum basilicum</i> 'Edwina'	1) Kontrolle 100 % Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 60 % RK Hank Wi21 + 40 % SPH 5) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 6) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH 7) 60 % SI Hank Wi21 + 40 % SPH + Substratzusatz: a) ohne Benetzungsmittel b) mit Benetzungsmittel H ₂ Gro (flüssig 1,5 ml je 10 Liter Substrat)
7	Usambaraveilchen (link)	<i>Saintpaulia ionantha</i> MAXI Lena (Dümmen Orange)	1) Kontrolle 100 % Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 20 % RK Hank Wi21 + 80 % SPH 3) 40 % RK Hank Wi21 + 60 % SPH 4) 20 % SI Hank Wi21 + 80 % SPH 5) 40 % SI Hank Wi21 + 60 % SPH
8	Chinakohl	<i>Brassica rapa subsp. pekinensis</i> 'Richi F1'	1) Kontrolle 100 % Torf (80 % Weiß- + 20 % Schwarztorf) 2) 15 % RK Hank So22 + 85 % SPH 3) 30 % RK Hank So22 + 70 % SPH 4) 15 % SI Hank So22 + 85 % SPH 5) 30 % SI Hank So22 + 85 % SPH

6. Erzielte Ergebnisse

6.1. Schaffung geeigneter Wasserqualität bei Zusatzbewässerung für Torfmoos-Zielarten mittels Reinigung von Entwässerungswasser durch andere Paludikulturpflanzen

6.1.1. Vegetationsentwicklung

Filterbecken

Im **Filterbecken FB1** etablierten sich die Jungpflanzen gut und wuchsen zu kräftigen Pflanzen, bis im Frühjahr 2021 Nutrias den Bestand entdeckten und diesen innerhalb von einem Monat abfraßen, sodass keine einzige Rohrkolbenpflanze übrigblieb. Um einen neuen Bestand zu etablieren, wurden im gefluteten Filterbecken FB1 Rohrkolben-Samen ausgebracht, die jedoch nicht keimten. Infolgedessen breitete sich *Juncus effusus* (Flutterbinse) aus, die nach zwei Jahren ca. 30 % des Filterbeckens FB1 bedeckte und im Mittel einen Aufwuchs von 720 g Trockenmasse pro m² hatte.

Die Entwicklung der Rohrkolben- und Schilfpflanzen im **Filterbecken FB2** war erfolgreicher als im Filterbecken FB1. Rohrkolben breiteten sich von 14 auf 20 % Deckung bzw. 19 auf 31 Pflanzen pro m² im zweiten Jahr nur geringfügig aus, während die Schilfdeckung von 20 auf 70 % bzw. 94 auf 112 Pflanzen pro m² deutlich zunahm. Die Höhe beider Pflanzenarten nahm von 1,1 m im ersten auf 2 m im zweiten Jahr zu. Der Biomasseaufwuchs im Filterbecken FB2 umfasste ein Jahr nach der Einrichtung (Sommermahd) im Mittel ca. 210 g (Rohrkolben) bzw. 140 g Trockenmasse pro m² (Schilf) und war im Winter (Nov 2021) noch etwas höher (285 g Rohrkolben, 215 g Schilf). Im nächsten Juli 2022 wurde das Drei- bis Vierfache an Biomasse geerntet wie im Sommer des Vorjahres. Nur für Schilf konnte eine Abnahme von Pflanzenhöhe und Biomasseaufwuchs mit zunehmender Entfernung zum Zulauf festgestellt werden. Ab Sommer 2022 fingen Bisamratten an, insbesondere Rohrkolben abzufressen. Zur Bekämpfung der Bisamratten wurden durch einen Fachmann Fallen am Beckenrand aufgestellt.

In einer Rohrkolbenanbaufläche in MV wurden im Mittel geringere Höhen und Biomassen mit 160 cm und 280 g Trockenmasse pro m² zwei Jahre nach der Einrichtung ermittelt, wobei sich die Fläche sehr inhomogen etablierte (Neubert *et al.* 2022). Für dichte Bestände wurden mit 40 Pflanzen je m² und Deckung von 32 % etwas höhere Werte gemessen. In einem DBU-Projekt zum Rohrkolbenanbau im Donaumoos wurde für das zweite Bestandsjahr ein Ertrag von 890 g pro m² angegeben mit deutlich höheren Werten drei Jahre nach der Einrichtung mit 2.000 t, aufgrund der weiteren Etablierung des Bestandes (Pfadenhauer & Wild 1998). Somit ist davon auszugehen, dass der Bestand im Filterbecken sich noch weiter etabliert und weitere Untersuchungen zur Einschätzung der Produktivität notwendig sind.

Torfmoos-Produktionsflächen

Torfmoose, sowohl auf den Produktionsflächen, die mit Wasser aus dem Filterbecken FB1 (Bestand von Flutterbinse) bewässert wurden, als auch jene mit Wasser aus dem Vorfluter 'Schanze' bewässerten, bedeckten 1,5 Jahre nach der Einrichtung über 80 % der Fläche, unabhängig von der ausgebrachten Torfmoos-Art. Der Anteil der Zielarten blieb jedoch nur bei der *S. magellanicum* s.l.- und der *S. papillosum*-Variante über 85 % Deckung, während sich bei der *S. palustre*-Variante *S. fallax* ausbreitete und zwar bei Bewässerung mit Wasser aus dem Filterbecken signifikant mehr (50% Deckung) als bei Bewässerung mit Wasser aus dem Vorfluter 'Schanze' (17 %). Als Ursache hierfür scheiden unterschiedliche Wasserstände aus, denn diese waren auf allen Flächen mit durchschnittlich 5 bis 8 cm unter der Moosoberfläche vergleichbar (vgl. Tabelle 1). Auch die Wasserqualität war vergleichbar. Lediglich bei der Aufnahme der Ausgangssituation wurde für F2-2 (Nord) ein

geringfügiger Deckungsanteil (2 %) von *S. fallax* festgestellt, während diese Art auf F2-1 nicht zu finden war.

Auch bei der Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken FB2 nahm der Anteil der Zielarten ab und erreichte nach 18 Monaten im November 2022 19 % bzw. 37 % (ausgehend von 46 % bzw. 67 % im Juni 2020) bei Bewässerung aus dem mit Schilf bzw. Rohrkolben bepflanzten Teil. Die Wasserstände waren mit der Situation vor Bewässerung mit Wasser aus dem Filterbecken vergleichbar und lagen im Mittel bei 3 cm unter der Moosoberfläche (Tabelle 1). Die Nährstoffversorgung war ebenfalls ähnlich, da N, P und K-Gehalte im Bewässerungswasser aus der Schanze und dem Filterbecken keine signifikanten Unterschiede aufwiesen. Ab Sommer 2022 nutzten Bisamratten das Filterbecken FB2 und die Torfmoos-Produktionsflächen als Futterquelle und Schlafplatz, wofür Biomasse eingesammelt und aufgehäuft wurde.

Die bisherige Entwicklung der Torfmoos-Produktionsflächen nach Bewässerung mit Wasser aus Filterbecken zeigt nicht die erwünschte Wirkung. Stattdessen nimmt die Deckung der Zielarten zumeist ab. In den ersten beiden Jahren nach Bepflanzung der Filterbecken wurde nur eine geringe Reduktion an N, P und K aus dem Bewässerungswasser festgestellt. Möglicherweise stellt sich der Filtereffekt aber auch erst im weiteren Verlauf ein, weshalb weiterführende Beobachtungen notwendig sind.

6.1.2. Wasserbilanz

Beide Filterbecken wurden im Sommer 2020 mit Wasser gefüllt, wobei Filterbecken FB1 aufgrund der Nähe zum Vorfluter ‚Schanze‘, geringen Wasserständen und der tiefen Lage in 2021 noch einen unterirdischen Wasserzustrom vom Vorfluter erhielt, während später bei höheren Wasserständen die Versickerung zunahm. Die Filterbecken wurden in den Jahren 2021 und 2022 jeweils von April bis November regelmäßig mit Wasser aufgefüllt, da in diesem Zeitraum die größten Wassermengen für die Bewässerung der Torfmoos-Produktionsflächen herausgepumpt wurden. Der Wasserbedarf in den Filterbecken umfasste in 2021 1.085 m³ und in 2022 7.804 m³. Dieser hohe Unterschied ist auf einen sehr niederschlagsreichen Sommer 2021 mit geringem Wasserbedarf der zu bewässernden Torfmoos-Produktionsflächen und einem sehr trockenen Sommer 2022 mit hohem Bedarf an Bewässerungswasser zurückzuführen (Abbildung 23).

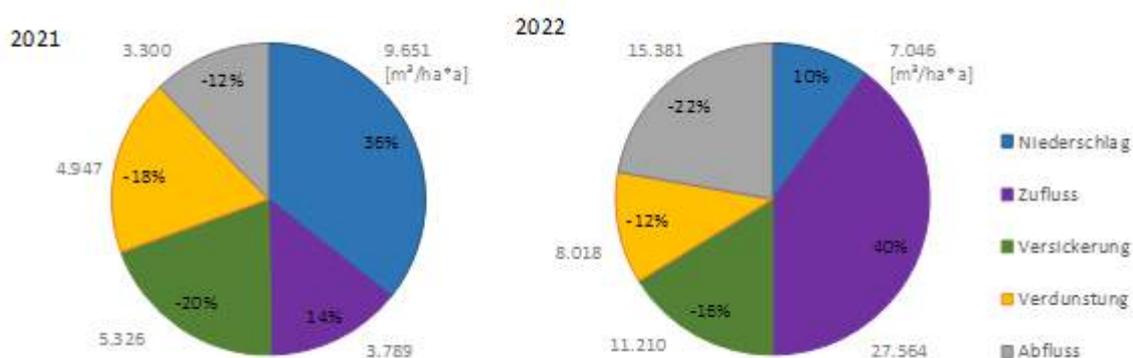


Abbildung 23. Wasserhaushaltskomponenten im Filterbecken FB2 (in m³ ha⁻¹ a⁻¹ und % an der Gesamtbilanz) der hydrologischen Jahre 2021 (links) und 2022 (rechts).

Der hohe Niederschlag in 2021 führte auch dazu, dass dessen Anteil für das Auffüllen des Filterbeckens FB2 bis zu 72 % erreichte, um die Entnahme für die Bewässerung der Torfmoos-Produktionsflächen auszugleichen, während sich dieser Anteil in 2022 aufgrund des geringeren Niederschlags auf 20 %

reduzierte. Mit dem regelmäßigen Auffüllen der Becken konnte die kontinuierliche Bewässerung der Torfmoos-Produktionsflächen über die Filterbecken gewährleistet werden.

Mit dem Wasser aus den Filterbecken FB1 und FB2 wurden die Teilflächen F2-1 und Teilfläche F5 bewässert (Abbildung 4). Die Bewässerungsmengen waren für die beiden Jahre sehr unterschiedlich, da im Jahr 2021 während der Vegetationsperiode regelmäßig Niederschlag fiel, musste im Vergleich zum trockenen Jahr 2022 deutlich weniger zusätzliches Wasser in die Flächen gepumpt werden.

Bewässerung mit Grundwasser

Für den Versuchsstandort liegen bezüglich der hydrogeologischen Eigenschaften des mineralischen Grundwasserleiters nur wenige Informationen vor. Die Betrachtung wurde daher auf Basis eines anzunehmenden Wertebereiches für relevante Parameter (hydraulische Leitfähigkeit, Mächtigkeit des Grundwasserleiters) durchgeführt. Die Daten, basierend auf der hydrogeologischen Übersichtskarte, gehen von Mächtigkeiten des Grundwasserleiters zwischen 50 und 100 m aus. Mäßige bis mittlere hydraulische Leitfähigkeiten (Abbildung 11, Layer L1.2 und L3, $1 \cdot 10^{-5} \leq k_f \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$) werden in Schichten mit einer Mächtigkeit von ca. 20 m festgestellt. Die Annahme einer Mächtigkeit des Grundwasserleiters von 20 bzw. 30 m zur Berechnung des Wasserandrangs ist somit als konservativ anzusehen (

Abbildung 12), da auch aus tieferen Schichten Grundwasser diesem Bereich zuströmt. Für die genauere Planung eines oder mehrerer Förderbrunnen sind daher weitere (hydro-)geologische Untersuchungen zu empfehlen (z.B. Probebohrungen am Standort zur Charakterisierung der mineralischen Bereiche, Pumpversuche), eine erste Abschätzung ist jedoch möglich.

Bei hydraulischen Leitfähigkeiten $> 5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ ergeben sich bei einer Fördermenge von $140 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ Absenkungen $< 2 \text{ m}$ und bei $280 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} < 4 \text{ m}$ (Tabelle 9). Bei einer größeren Mächtigkeit des Grundwasserleiters nehmen diese Werte weiter ab. Für geringe hydraulische Leitfähigkeiten von $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ ergeben sich vor allem bei einer Mächtigkeit von 20 m sehr schnell sehr große Absenkungen bzw. ist eine hohe Fördermenge nicht möglich.

Tabelle 9. Absenkung bei definierten Förderraten von $Q_d = 140 \text{ m}^3/\text{h}$ und $Q_{d,\text{max}} = 280 \text{ m}^3/\text{h}$, berechnet mit Reichweite nach SICHARDT, * $Q_{d,\text{max}}$ wird nicht erreicht.

Absenkung in m bei		Hydraulische Leitfähigkeit in m s^{-1}				
		$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Mächtigkeit 20 m	Q_d	13,4	1,5	0,7	<0,1	<0,1
	$Q_{d,\text{max}}$	-*	3,7	1,6	0,3	0,1
Mächtigkeit 30 m	Q_d	5,8	0,9	0,4	<0,1	<0,1
	$Q_{d,\text{max}}$	17,3	2,1	1,0	0,2	<0,1

Für diese berechneten Absenkungen ergeben sich Reichweiten (im stationären Zustand, vgl. Abbildung 12) weit unter 50 m bei hydraulischen Leitfähigkeiten von $1 \cdot 10^{-4} \leq k_f \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$ und unter 100 m für $5 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$.

Für die geforderten Förderraten ergeben sich nur geringe Absenkungen und Reichweiten unter 100 m bis weit unter 50 m für $k_f > 5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ im stationären Endzustand, sodass eine Grundwasserentnahme gut möglich ist. Da die Bewässerung nur periodisch stattfindet, gibt es immer Ruhezeiten verbunden

mit einem Wiederanstieg des Wassers. Je nach hydraulischer Leitfähigkeit und Pumpzeit kann somit auch davon ausgegangen werden, dass die Absenkung im Grundwasserleiter somit noch geringer ausfällt als berechnet.

Für eine geringere hydraulische Leitfähigkeit im Bereich $1 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$ scheint eine Förderung unter den getroffenen Annahmen (5 Zoll wirksamer Brunnenradius, Mächtigkeit $\leq 30 \text{ m}$) mit einem einzelnen Brunnen nicht sinnvoll, weshalb sich der Einsatz mehrerer Brunnen anbietet, sodass die Förderraten je Brunnen geringer ausfallen und sich die Grundwasserabsenkung und Reichweiten reduzieren (

Abbildung 12). Generell ist eine Entnahme über mehrere Brunnen sinnvoll, um den Einflussbereich der Wasserentnahmen zu verringern.

Aufgrund der von Südwesten in Richtung Nordosten gerichteten Grundwasserströmung wäre eine Positionierung des bzw. der potentiellen Förderbrunnen im Anstrom der Versuchsfläche sinnvoll. Je nach genauer hydrogeologischer Situation verlagert sich somit der Absenkungstrichter in Richtung Anstrom und die Versuchsfläche im Abstrombereich wäre weniger beeinflusst. Alternativ wäre eine Positionierung östlich der Versuchsfläche auf der anderen Seite des Vorfluters ‚Schanze‘ möglich. Steht dieses Gewässer hydraulisch mit dem Grundwasserleiter in Verbindung, liefert es zusätzlich Wasser für die Brunnenförderung und bewirkt eine geringere Absenkung als bisher abgeschätzt.

Grundsätzlich ist damit eine Grundwasserförderung mittels einer oder mehrerer Brunnen für Bewässerungszwecke der Versuchsfläche im Hankhauser Moor möglich. Weitere hydrogeologische Untersuchungen wären für eine genauere Planung hinsichtlich Bohrtiefe, Dimensionierung, Anzahl der Brunnen und genaue Positionierung notwendig.

6.1.3. Wasserqualität und Nährstoffbilanz

Feldversuch

Wasserquelle für das Befüllen beider Filterbecken war der Vorfluter ‚Schanze‘, wobei das Wasser in FB1 direkt und in FB2 über einen mit der ‚Schanze‘ verbundenen Graben eingeleitet wurde (Abbildung 4). Diese Zwischenstufe führte dazu, dass sich die Qualität des Wassers an den Zuläufen für die beiden Filterbecken unterschied (Abbildung 24). Die deutlich höheren Phosphor-Werte im Wasser am Zulauf für Filterbecken FB2 zeigen den stärkeren Einfluss von angrenzenden Grabenhängen (‚Schanze‘-Graben und tieferes Becken), aus denen Phosphor ausgespült wurde. Dieser Effekt trat in FB1 erst im Filterbecken selbst auf, weshalb hier die Phosphor-Konzentration am Überlauf deutlich höher war als am Zulauf (Tabelle 10).

Um die Filterleistung der Filterbecken beurteilen zu können, wurden u.a. Nährstoffkonzentrationen im Wasser am Zulauf und an der Entnahmestelle für die Bewässerung der Torfmoos-Produktionsflächen am anderen Ende der Filterbecken verglichen und dabei festgestellt, dass sich die Konzentrationen aller Elemente mit Ausnahme von Phosphor zwar verringerten, zumeist jedoch nur geringfügig (Tabelle 10). Nur für Kalium und Eisen wurde im Filterbecken FB2 eine Verringerung von mindestens 50 % festgestellt, im mit Rohrkolben bepflanzten Teil stärker als bei Schilf.

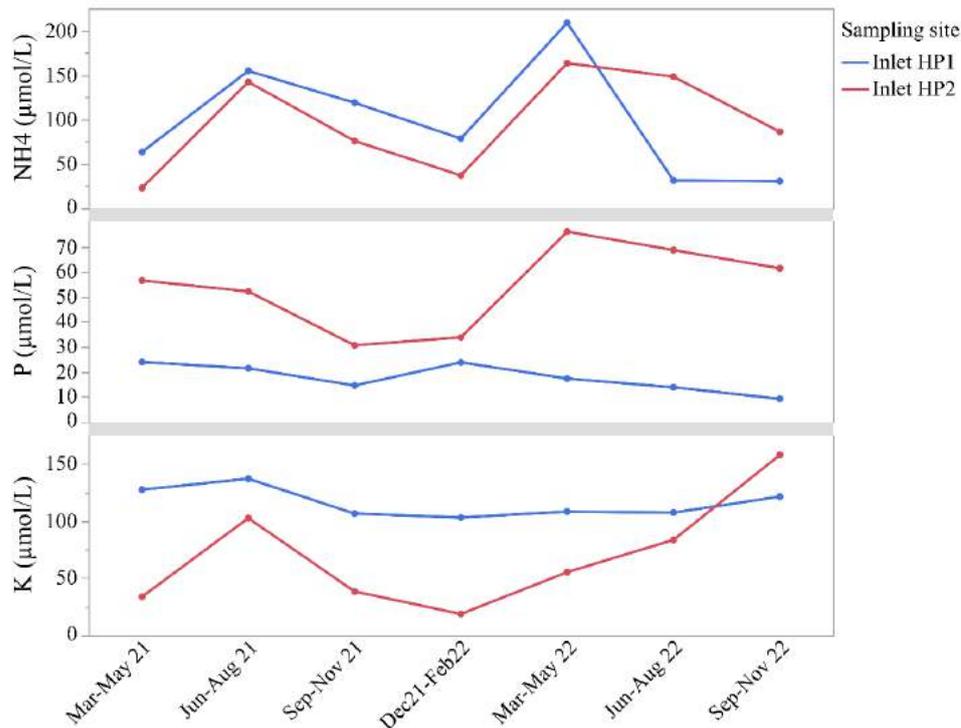


Abbildung 24. Konzentrationen ($\mu\text{mol l}^{-1}$) von Ammonium (NH_4^+), Phosphor (P) und Kalium (K) in den Oberflächenwasserproben am Zulauf der Filterbecken FB1 (blaue Linie) und FB2 (rote Linie) von 03/2021-11/2022.

Im Torfuntergrund der Becken ließ sich eine Anreicherung insbesondere von Calcium und Eisen feststellen. Eine solche Anreicherung wird durch Literaturangaben bestätigt (u.a. Salehzadeh & Rezaie 2017, Gacia *et al.* 2019). Zusammengefasst sind die Wasserqualitäten am Zulauf, an der Entnahme (entgegengesetzten Ende des Filterbeckens) und in den Gräben, wo das Wasser aus den Filterbecken eingeleitet wurde, nicht signifikant verschieden. Inwieweit infolge der Weiterentwicklung der Rohrkolben- und Schilfbestände mit der Zeit eine substantielle Filterleistung erreicht werden kann, muss weiter untersucht werden.

Tabelle 10. Filterleistung der Filterbecken FB1 und FB2 mit unterschiedlichen Pflanzen: über den Untersuchungszeitraum 03/2021-11/2022 gemittelte Reduktionsraten einzelner Elemente im Wasser von der Quelle zum Überlauf in %, negative Werte zeigen eine Erhöhung an.

in %	K	Mg	Na	S	P	Fe	NH_4	Ca	Cl
FB1 (Binse)	42	11	11	48	-162	27	29	40	13
FB2 (Schilf)	48	7	23	26	-3	65	31	34	29
FB2 (Rohrkolben)	59	4	28	27	0	75	22	36	32

Klimaschrankversuche zur Nährstoffversorgung von Torfmoosen

Sphagnum fallax wurde als bestwüchsige Torfmoos-Art identifiziert, sowohl in der Länge als auch in der Biomasse (im Mittel $900 \text{ g Trockenmasse m}^{-2}$), während *S. magellanicum* s.l. und *S. squarrosum* am wenigsten Biomasse (im Mittel 675 g bzw. 605 g m^{-2}) produzierten. Für alle getesteten Arten wurde bei geringer Stickstofffracht ($10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) eine gleiche oder sogar bis 16 % höhere Biomasseproduktivität als bei einer Stickstofffracht wie im Hankhauser Moor ($25 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) festgestellt (Tabelle 11). Eine ausgeglichene Stöchiometrie (von NPK) vorausgesetzt, wachsen einzelne Arten (*S. fallax*, *S. papillosum*, *S. magellanicum* s.l.) selbst bei einer sehr hohen Stickstofffracht ($60 - 90 \text{ kg N ha}^{-1}$)

¹ a⁻¹) genauso gut wie bei 25 kg N ha⁻¹ a⁻¹. Sobald die Verfügbarkeit von Kalium oder Phosphor sinkt und damit die Stöchiometrie nicht mehr ausgeglichen ist, verringert sich der Biomassezuwachs bei den meisten Arten (Tabelle 11).

Das Verhältnis von Stickstoff und Phosphor bzw. Kalium im Torfmoosköpfchen gibt Auskunft über eine mögliche Limitierung des Wachstums. Das NP-Verhältnis war im Mittel zwischen 8 und 12 und bei allen Düngevarianten mit Ausnahme der Variante '25 kg N ha⁻¹ a⁻¹, <P' (hier max. 14) ähnlich, was nach Aerts *et al.* (1992) zwar keine P-Limitation anzeigt, sich aber bei NP 14 im weiteren Verlauf dahin entwickeln könnte. Dahingegen stieg das NK-Verhältnis mit zunehmender Stickstoffverfügbarkeit von 1,0 bis 1,7 im Mittel (max. 2,8) bei gleichbleibender K-Konzentration im Torfmoosköpfchen, was aber bei keiner Düngevariante eine K-Limitation bedeutet (vgl. Bragazza *et al.* 2004). Auch bei den Varianten mit verringerter Zugabe von P bzw. K lag im Versuchszeitraum keine Limitation vor. Ähnliche NP- und NK-Verhältnisse wurden bei Versuchen mit hohen Stickstofffrachten im Gewächshaus (Gaudig *et al.* 2020) und im Feld (Temminck *et al.* 2017) festgestellt.

Tabelle 11. Effekt unterschiedlicher Nährstoffverfügbarkeit auf den Biomassezuwachs einzelner Torfmoos-Arten im Klimaschrankversuch im Vergleich zu den Bedingungen im Hankhauser Moor (25 kg N ha⁻¹ a⁻¹). Varianten und Abkürzungen siehe Tabelle 5.

	kg N	25				40				60	90
	10	<K	no K	<P	no P	(1)	(2)	no K	no P		
<i>S. fallax</i>	+	-		+		+		-	-	-	
<i>S. magellanicum</i> -Komplex		-	-		-			-	-		-
<i>S. palustre</i>	+	-	-	-	-		-	-	-	-	-
<i>S. papillosum</i>	+	-		-		-	-	-		-	+
<i>S. squarrosum</i>		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>S. fimbriatum</i>			-				-	-	-		-

Laborexperiment zur Reduktion der Toxizität von Hydrogencarbonat

Das Laborexperiment zeigte, dass die Ansäuerung (auf 4,0) des Kationen- und Bikarbonatreichen Wassers mit ursprünglich hohen pH-Werten (>7,5) Bikarbonat entfernt, die Kationenkonzentration verändert und weniger bis keine Schädigungen von *Sphagnum palustre* Moosen verursachte und damit die Qualität des Bewässerungswassers und Eignung verbessern kann. Während die Torfmoose mit 2 cm Wasserstand unterhalb der Köpfchen auch ohne zusätzliche Ansäuerung die höheren Kationen- und Bikarbonatgehalte sowie pH-Werte >7,5 vertrugen, blieben die überflutet wachsenden Torfmoosen ausschließlich vital bei einer Ansäuerung des Bewässerungswassers. Für Anbauflächen mit starken Wasserstandsschwankungen oder der Notwendigkeit die Moose durch Überstau zu bewässern, ist die Wasserqualität, insbesondere der Bikarbonatgehalt, des Bewässerungswassers besonders zu berücksichtigen. Inwieweit diese Ergebnisse im Feld übertragbar sind, ist bislang weitgehend unbekannt.

6.1.4. Treibhausgase

Im Filterbecken FB2 wurden die höchsten CO₂-Gesamtflüsse (sowohl Aufnahme als auch Emission) im Juni 2022 (-2196 bzw. 855 g m⁻² h⁻¹) für den Teilbereich mit *Typha angustifolia* gemessen (Abbildung 25). Darüber hinaus waren bei beiden Varianten saisonale Variationen der CO₂-Flüsse zu beobachten. Im Mittel ist die CO₂-Abgabe im gesamten Zeitraum geringfügig höher als die Aufnahme. Die Spannweite der CO₂-Gesamtflüsse ist im zweiten Jahr nach der Einrichtung des Filterbeckens FB2 größer als im ersten, vermutlich verursacht durch den gemessenen höheren Biomasseaufwuchs. Inwieweit sich die CO₂-Gesamtflüsse zukünftig verändern, muss weiter beobachtet werden. In anderen Projekten wurden in älter als dreijährigen Beständen von *Typha latifolia* Höchstwerte von bis zu 30 t Trockensubstanz ha⁻¹ a⁻¹ oberirdischer Biomasse ermittelt (Geurts *et al.* 2020). Steigt der Biomasseaufwuchs in den kommenden Jahren weiter an, wird das Filterbecken FB2 wahrscheinlich langfristig eine CO₂-Senke, da mehr Kohlenstoff aufgenommen werden kann.

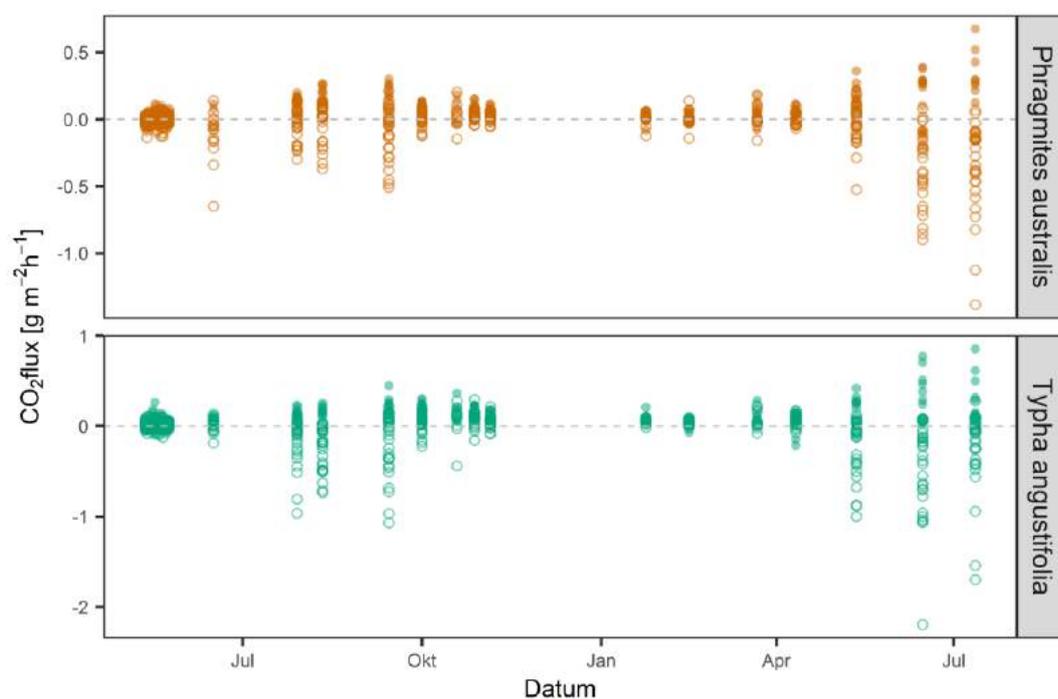


Abbildung 25. Gemessene dunkle (Punkte) und transparente (Kreise) CO₂-Flüsse (in g m⁻² h⁻¹) für die Varianten '*Phragmites australis*' und '*Typha angustifolia*' aus dem Filterbecken FB2 von 05/2021 bis 07/2022.

Im Gegensatz zu CO₂ lässt sich bei beiden Varianten kein saisonaler Trend der CH₄-Gesamtflüsse feststellen (Abbildung 26). Die Emissionen steigen kontinuierlich über die Zeit an, wohingegen die Aufnahme bei beiden Pflanzenarten konstant bleibt. Die CH₄-Abgabe ist geringfügig höher als die CH₄-Aufnahme und bei Schilf größer als bei Rohrkolben. Die Messpunkte wurden nicht, wie das restliche Filterbecken, im Dezember 2021 geerntet. Dadurch kam es wahrscheinlich zu einem Eintrag von abgestorbenem Pflanzenmaterial bzw. leicht abbaubaren organischen Verbindungen, welche die Methanogenese in Filterbecken FB2 erhöht haben könnte. Zum derzeitigen Zeitpunkt lässt sich nicht sagen, ob das Filterbecken weiterhin eine CH₄-Quelle darstellt, wie es bei offenen Wasserflächen generell der Fall ist (Schrier-Uijl *et al.* 2011, Köhn *et al.* 2021). Ein leichter Trend zu höheren CH₄-Emissionen lässt sich jedoch im zweiten Jahr nach der Einrichtung des Filterbeckens 2 erkennen. Daher wären weitere Messungen über mehrere Jahre sinnvoll, um zu analysieren, ob die CH₄-Emissionen weiter steigen oder sich auf ein bestimmtes Niveau einpendeln und wie sich eine Ernte der oberirdischen Biomasse auswirkt bzw. bei wie sich bei ausbleibender Ernte der weitere Eintrag von abgestorbenem Pflanzenmaterial auswirkt. Das Luftleitgewebe (Aerenchym) im Innern von Schilf und

Rohrkolben führt dazu, dass CH₄ aus dem Torf in die Atmosphäre abgegeben wird (Günther *et al.* 2013). Steigt mit den nächsten Jahren das Biomassewachstum an, werden infolgedessen die CH₄-Emissionen gegebenenfalls auch dadurch höher.

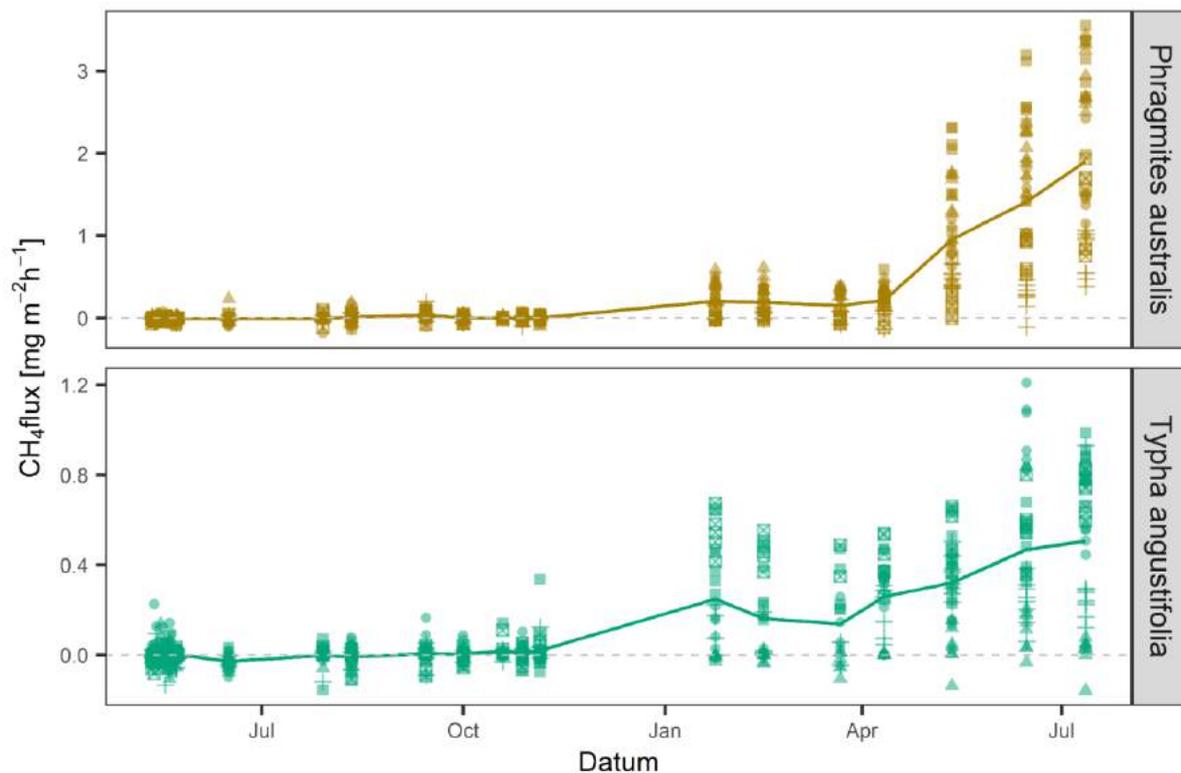


Abbildung 26. Gemessene CH₄-Flüsse (in mg m⁻²h⁻¹) für die Varianten '*Phragmites australis*' und '*Typha angustifolia*' aus dem Filterbecken FB2 von 05/2021 bis 07/2022. Angegeben sind die einzelnen Messpunkte (Formen), zusammen mit den damit verbundenen mittleren Flüssen (farbige Linie, alpha = 0,5).

Tabelle 12. vorläufige jährliche Bilanzen (in g m⁻² a⁻¹ ± SD) von CO₂ und CH₄ für die Varianten '*Phragmites australis*' sowie '*Typha angustifolia*' des Filterbeckens FB2 von 05/2021 bis 07/2022. Die Klimawirkung der Varianten wurde anhand des 100-jährigen globalen Erwärmungspotenzials (GWP100) von CH₄ (=27) bewertet (Forster *et al.* 2021)

	CO ₂ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	CH ₄ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	THG-Bilanz in CO ₂ -äq (in t ha ⁻¹ a ⁻¹)
<i>Phragmites australis</i>	69,3 ± 49,5	2,5 ± 0,67	1,4 ± 0,52
<i>Typha angustifolia</i>	50,7 ± 125	1,2 ± 0,24	0,83 ± 1,3

Die CO₂-Bilanzen von Schilf und Rohrkolben im Filterbecken FB2 (Tabelle 12) können nur als vorläufig angesehen werden. Das Bestimmtheitsmaß R² lag bei beiden Varianten im Bereich von 0,27-0,39. Das bedeutet, dass das ausgewählte Modell und die darin befindlichen unabhängigen Variablen (Lufttemperatur, PPF, ETI) zur Bilanzierung der CO₂-Flüsse nur einen geringen Teil der Wirklichkeit abdecken. Es muss zukünftig untersucht werden, welche anderen Parameter eine Rolle für die CO₂-Bilanzierung spielen, z.B. Wasser- und Vegetationshöhe, die Temperatur des Sedimentes, Nährstoffe sowie die Pflanzenphänologie.

6.1.5. Biodiversität

Libellen

Bereits im ersten Untersuchungsjahr konnten unmittelbar nach Einrichtung der Filterbecken insgesamt 11 Libellenarten beobachtet werden. Mit fortschreitender Etablierung der Rohrkolben- und Schilfbestände wurden mit den zwei Folgejahren insgesamt 20 Arten erfasst (vgl. Abbildung 27), von denen 12 als sicher bodenständig gelten. Der Anteil moortypischer Arten hat sich im Verlauf der Etablierung kontinuierlich erhöht und lag 2022 bei 25 % aller in den Filterbecken erfassten Arten.

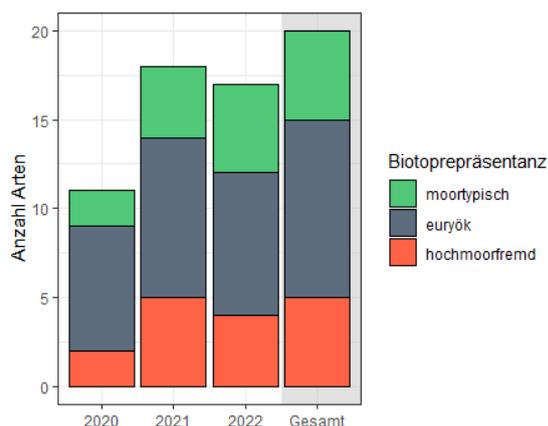


Abbildung 27. Entwicklung der Artenzusammensetzung der Libellen (Imagines und Exuvien) in den 2020 eingerichteten Filterbecken FB1 und FB2.

Neben fünf moortypischen Arten konnte mit *Brachytron pratense* (Früher Schilfjäger) eine Art nachgewiesen werden, die typischerweise in Röhricht- und Großseggenbeständen beheimatet ist, darüber hinaus aber auch in dystrophen Sekundärgewässern innerhalb von Mooren vorkommt (Lohr 2021). Den Großteil der in den Filterbecken bodenständigen Arten machen jedoch euryöke Vertreter aus (50 % der Arten, 79 % der Exuvien), gefolgt von moortypischen Arten (25 % der Arten, 20 % der Exuvien). Die dominierenden bodenständigen Arten sind *Sympetrum striolatum* (Große Heidelibelle) und *S. vulgatum* (Gemeine Heidelibelle) mit insgesamt 68 % der Exuvien. Bei den beobachteten Imagines zeigt sich indes eine andere Verteilung: hier macht *Ischnura elegans* (Große Pechlibelle), eine in Niedersachsen weitverbreitete, sich jedoch in Hochmooren selten reproduzierende Art (Quante & Burkart 2021), 37 % der beobachteten Imagines aus. Drei in den Filterbecken nachgewiesene Arten werden auf der Roten Liste Niedersachsen/Bremen (Tiefeland West) (Baumann *et al.* 2021) geführt: *Ischnura pumilio* (Kleine Pechlibelle) (RL 3, gefährdet), *B. pratense* sowie *Sympetrum danae* (Schwarze Heidelibelle) (RL V, Vorwarnliste).

Die 2020 angelegten Filterbecken haben die Torfmooskultur um einen Lebensraum mit Stillgewässercharakter erweitert und fügen somit dem Mosaik aus nassen Habitaten ein weiteres, die Strukturvielfalt erhöhendes Element hinzu. Die Ernte des über der Wasseroberfläche stehenden Pflanzenmaterials ist außerhalb der Flugzeit der Libellen - also im Herbst/Winter - unproblematisch, da zum Beginn der folgenden Libellensaison genügend Schlupfmöglichkeiten in Form von vertikaler Vegetation für die Libellenlarven vorhanden sind. Bei einer Ernte innerhalb der Flugzeit der Libellen (Nährstoffzug ist im Sommer am höchsten) ist von einer Störung des Lebensraums auszugehen, die mit dem Verlust von Schlupfmöglichkeiten sowie einer starken visuellen Veränderung des Habitats einhergeht. Von großer Bedeutung für die Habitatwahl der Imagines ist die Sichtbarkeit der Wasseroberfläche (Wildermuth 1994). Eine komplette Verdeckung der Wasseroberfläche durch Pflanzenmaterial, wie etwa 2021 zeitweise im südlichen Filterbecken durch *Azolla spec.* (Algenfarn), gilt es deshalb durch entsprechende Pflegemaßnahmen zu vermeiden.

Spinnen

Im Projektzeitraum wurden insgesamt 907 (824 adulte) Spinnen im Filterbecken FB2 erfasst, davon 297 (258) im Jahr 2021 und 610 (566) im Jahr 2022. Insgesamt wurden 11 Spinnenarten nachgewiesen, neun im mit Schilf bepflanzten und sieben im mit Rohrkolben bepflanzten Teil (Tabelle 13). Arten- und Individuendichten waren im zweiten Untersuchungsjahr höher als im ersten, lagen aber immer noch deutlich unter den Werten auf den Torfmoos-Paludikulturflächen. Das Filterbecken mit Schilf wurde stärker durch Spinnen besiedelt als das mit Rohrkolben bewachsene (Abbildung 28).

Tabelle 13. Nachweise von Spinnenarten im Filterbecken FB2 in den Jahren 2021 und 2022 (Anzahl adulter Individuen).

Art (wiss. Name)	Deutscher Name	Schilf (Sto. 11)		Typha (Sto. 12)	
		2021	2022	2021	2022
<i>Arctosa leopardus</i>	Leoparden-Wühlwolf	3			
<i>Bathyphanes gracilis</i>	Gewöhnlicher Erdweber		3		1
<i>Bathyphanes setiger</i>	Sumpferdweber		2		
<i>Erigone atra</i>	Gewöhnliche Glückspinne		2		1
<i>Gnathonarium dentatum</i>	Buckel-Zwergzahn	1	4		3
<i>Pachygnatha clercki</i>	Große Dickkieferspinne			1	
<i>Pardosa amentata</i>	Uferlaufwolf			1	
<i>Piratula hygrophila</i>	Waldpirat		1		
<i>Piratula latitans</i>	Kleiner Pirat		2		
<i>Pirata piraticus</i>	Tümpelpirat	130	252	86	259
<i>Pirata piscatorius</i>	Großer Pirat	22	27	14	9

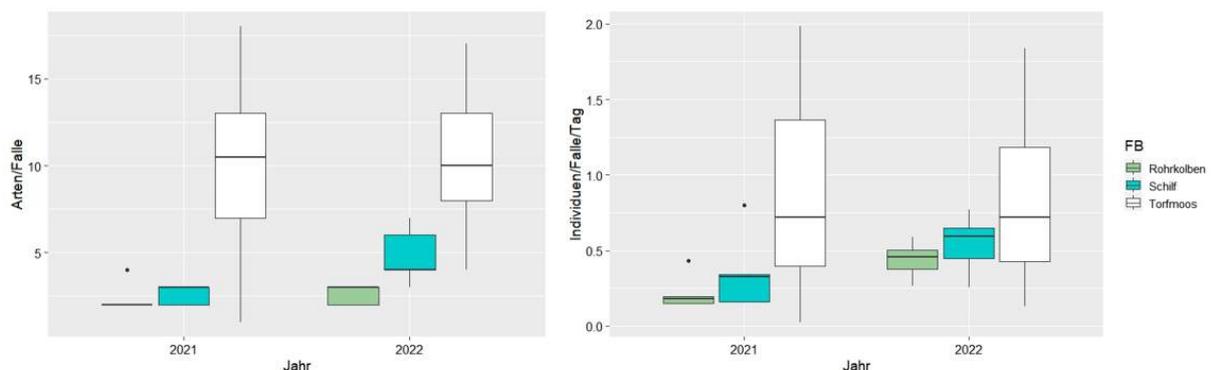


Abbildung 28. Artendichten (links) und Aktivitätsdichten (rechts) in den Filterbecken im Vergleich zu den Torfmoos-Produktionsflächen.

Die Spinnenfauna im Filterbecken FB2 stellt im Wesentlichen ein Subset der Artengemeinschaft der Torfmoosrasen dar. Die absolut dominante Art ist der auf der Wasseroberfläche umherlaufende Tümpelpirat *Pirata piraticus*. Aber auch der Große Pirat *Pirata piscatorius* (RL Deutschland: stark gefährdet), der als besonders wertgebende Art für die Versuchsfläche herausgestellt wurde (Muster *et al.* 2015), findet in den Filterbecken geeignete Lebensbedingungen.

Als Rarität wurde im Filterbecken mit Schilf im Juli und August 2022 je ein Weibchen des Sumpferdwebers *Bathyphanes setiger* nachgewiesen. Die Art gilt deutschlandweit als „sehr selten“ (Abbildung 29) und nach der Roten Liste als „stark gefährdet“ (Blick *et al.* 2016). Da *Bathyphanes*

setiger eine herbstaktive Art ist, kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie auch auf der übrigen Fläche vorkommt, aber durch den Erfassungszeitraum Mai-Juni bisher unentdeckt blieb.



Abbildung 29. Verbreitung von *Bathyphantes setiger* in Deutschland. Quelle AraGes (2022).

Flora

In den Filterbecken (FB1 und FB2) wurden neben den beiden gepflanzten Arten (*Typha angustifolia* und *Phragmites australis*) 13 weitere, spontan vorkommende Arten beobachtet (davon 11 nur in FB2, vgl. Tabelle 26). Dabei handelt es sich vor allem um Arten der Röhrichte (*Typha latifolia*), Schwimmdecken (z.B. *Lemna minor*) und Submersgesellschaften (z.B. *Utricularia vulgaris*). Beschränkt auf das FB2 kam als neue und invasive Art *Azolla spec.* (einziger Farn auf den gesamten Untersuchungsflächen) vor, konnte dort aber nur lokal und vorübergehend Dominanz entfalten und sich nicht in andere Gräben ausbreiten.

Auf der mit gefiltertem Wasser (aus FB1) versorgten Torfmoos-Produktionsfläche von Teilfläche F2-1 wurden ein Drittel mehr Arten nachgewiesen als auf der Fläche F2-2 Nord, die mit Wasser aus dem Vorfluter ‚Schanze‘ bewässert wurde. Die unterschiedliche Artenzahl ist jedoch weniger auf die Unterschiede in der Wasserqualität zurückzuführen als vielmehr darauf, dass F2-1 mit Material verschiedener Torfmoosarten und -herkünfte (Tabelle 1) und dem damit verbundenen größeren Spektrum an Diasporen eingerichtet wurde (als F2-1).

Das Bewässern mit Wasser aus den entweder mit Schilf oder Rohrkolben bepflanzten Becken führte auf den beiden Torfmoos-Produktions-Teilflächen von F5 zu nahezu gleicher Artenausstattung und werden deshalb in Tabelle 26 zusammengefasst betrachtet.

6.1.6. Ökonomie

Anlage der Filterbecken

Der Bau der Filterbecken erfolgte vom 29.06.-07.08.2020 lasergesteuert mittels Raupenbagger durch Erdaushub und Bau eines umlaufenden Deiches. Beim Filterbecken FB1 wurden Pütten unterschiedlicher Tiefe einbezogen, die ca. 10 Jahre vorher für einen Versuch angelegt worden waren. Die

Bepflanzung erfolgte mit Rohrkolben. Für Filterbecken FB2 wurde eine Spundwand gesetzt, um einen nördlichen mit Schilf und einen südlichen mit Rohrkolben bepflanzten Bereich getrennt untersuchen zu können. Für die Wasserversorgung der beiden Filterbecken wurden Pumpen eingesetzt, die bereits zur Zuführung von Bewässerungswasser für die bestehenden Torfmoos-Produktionsflächen vorhanden waren. Mit Einbindung der Filterbecken erfolgte jedoch ein Umbau der Wasserführung und die Neuinstallation von Zuleitungen, weiteren Pumpen (jeweils 2 Stück pro Filterbecken) und Bewässerungsleitungen zu den Torfmoos-Produktionsflächen, die mit drei manuellen Schiebern (Filterbecken FB1 → F7-1 bis -3; Betrieb Zeitschaltuhr) bzw. zwei automatischen Schiebern (Filterbecken FB2 → F5) ausgestattet wurden. Die Flächengröße von Filterbecken FB1 beträgt 1.200 m² (brutto), wobei die Pütten nicht bepflanzte wurden (netto, ohne Pütten: 955 m²). Das Filterbecken FB2 ist 1.650 m² groß.

Pflanzgut und Bepflanzung der Filterbecken

Den Auftrag für die Lieferung von Rohrkolben und Schilf-Pflanzen erhielt die Firma BGS Ingenieurbiologie und -ökologie GmbH. Die Anzucht erfolgte jedoch durch den Mitbewerber Wasserpflanzen Grajczyk. Die Pflanzen wurden am 22.07.2020 geliefert und am 27.-28.07.2020 per Hand gepflanzt. Für Schilf wurden 37 Multitopfpaletten à 73 Löchern (4,5 x 5,5 cm) geliefert, mit einer Pflanzzahl von Ø 2,4 je Ballen und einer Wuchshöhe von Ø 29,7 cm (gemessen an 50 Ballen). Für Rohrkolben (*Typha angustifolia*) wurden 42 Multitopfpaletten à 104 Löcher (3,5 x 4,5 cm) geliefert.

Nach dem Austopfen wurde auf Grund der Vielzahl von Pflanzen je Ballen der Großteil der Rohrkolben-Ballen geteilt (vgl. Abbildung 30). Es wurden nicht alle verfügbaren Pflanzen benötigt, sondern ca. 5.000 Rohrkolben-Pflanzen und ca. 2.100 Schilf-Pflanzen gesetzt. Bei Rohrkolben wurde das ursprünglich geplante Pflanzraster (80 cm Reihenabstand, 90 cm in der Reihe) auf 80 x 45 cm geändert. Bei Schilf wurde wegen ausreichend Pflanzmaterial ebenfalls nochmal zwischen den Reihen versetzt nachgepflanzt (40 x 90 cm).

Schilf wurde im Jahr 2020 mit einem Einzelpreis von 0,46 € und *Typha angustifolia* mit 0,37 € angeboten. Hinzu kommen Verpackung, Fracht und Mehrwertsteuer (7%, 16%), so dass Gesamtkosten von 3.173,27 € netto bzw. 3.363,08 € brutto in Rechnung gestellt wurden (Anhang, Tabelle 2). Die Kosten für die Setzlinge lagen höher als für Rohrkolben im Parallel-Projekt Paludi-PRIMA (2019: 0,27 €/Pfl.; Alternativangebot 0,33 €/Pfl.; *T. latifolia* und *T. angustifolia*, netto, ohne Fracht), jedoch im Vergleich mit Literaturwerten – und ungeachtet möglicher Preisänderungen – im mittleren Bereich (Tschoeltsch 2008: 0,20 bzw. 0,30 €/Pfl., Schätzl *et al.* 2006: 0,40 €/Pfl., Dahms 2009: 0,44 €/Pfl., Geurts & Fritz 2018: 0,30-0,85 €/Pfl.) (Neubert *et al.* 2022).

Bei der Pflanzung waren 5-7 Arbeitskräfte über 1,5 Tage für ca. 12 Stunden vor Ort, so dass sich eine Pflanzleistung von ca. 100 Pflanzen pro AKh ergibt. Bei einem Lohnansatz von 21,50 €¹ entstehen Pflanzkosten von ca. 0,22 € je Pflanze, zzgl. geringem Maschineneinsatz für den Feld-Transport des Pflanzguts. Im Projekt Paludi-PRIMA entstanden hingegen bei einer maschinellen Pflanzung von insgesamt 50.000 Setzlingen mit Forstpflanztechnik (4,5 Tage, 8,5 ha) deutlich höhere Kosten von 0,40 € (Alternativangebot: 0,55 €/Pfl.), was auch einem Vielfachen von Literaturwerten für die Pflanzung von Rohrkolben bzw. Schilf entspricht (Schätzl *et al.* 2006: 0,05 €/Pfl. bei 10.000 Pfl./ha; Dahms 2009: 0,12 €/Pfl. bei 5.000 Pfl./ha) (Neubert *et al.* 2022).

¹ Lohnansatz für ständig Beschäftigte, Arbeitgeberbrutto, zzgl. Sonderzahlungen (Urlaubsgeld, Weihnachtsgeld, Zuschläge für Sonn-/Feiertage) sowie Berücksichtigung von Urlaubs- und Krankheitstagen; schr. Mitteilung, Oksana Bukhovets, KTBL, 25.03.2022



Pflanzgut

- Schilf: ~2100 Pfl.-Ballen
- Austopfen
- Rohrkolben teilen:
~ 5000 Pfl.-Ballen



Pflanzschema anlegen

- Schnur spannen
+ versetzen
- Pflanzlöcher



Pflanzung

- Pflanzen zubringen
- Pflanzen setzen



Wassermanagement

- Drainrohre kappen
- Erste "Flutung"



Abbildung 30. Arbeitsschritte bei der Bepflanzung der Filterbecken FB1 und FB2 mit Schilf- und Rohrkolben-Setzlingen (Fotos: Sabine Wichmann)

Zeitbedarf und Gesamtkosten der Filterbecken

Der Zeitbedarf für die Anlage und Bepflanzung des Filterbeckens FB1 betrug 33 % des Zeitbedarfs für Filterbecken FB2 (Abbildung 31). Bei einer Korrektur anhand der unterschiedlichen Flächengrößen, erhöht sich der Anteil nur geringfügig auf 45 %. Ausschlaggebend für den mindestens doppelten

Aufwand bei der Anlage des Filterbeckens FB2 war das Setzen der Spundwand sowie die Abdichtung des Beckens durch Einsetzen von Holzbohlen im Bereich von alten Dränrohren (Abbildung 30, unten links). Auch der Pflanzaufwand betrug im Filterbecken FB1 nur 62 % vom Filterbecken FB2, da bei Filterbecken FB2 eine vollflächige Pflanzung erfolgte (keine Pütten ausgespart) sowie die größere Fläche und auch das nachträgliche Verdichten des ursprünglichen Pflanzschemas durch Nachsetzen von Pflanzen in Lücken (s.o.) längere Laufwege erforderte.

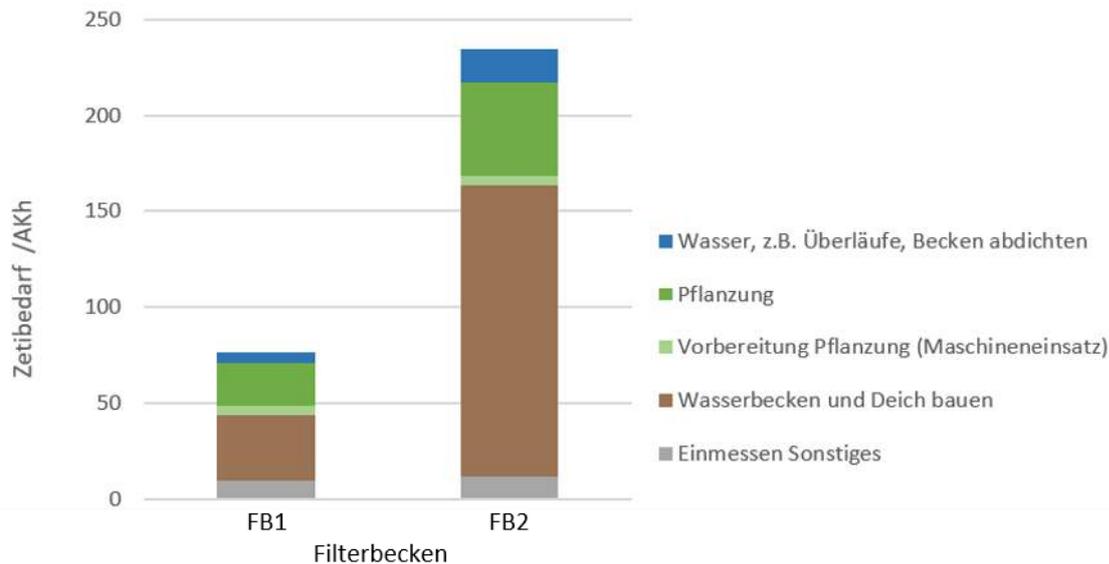


Abbildung 31. Zeitbedarf der Einrichtung von Filterbecken FB1 und FB2.

Die Kosten der Anlage der Filterbecken umfassen neben dem Zeitbedarf für Personal und dem Lohnansatz, auch Einsatzzeit und Stundensätze für Maschinen (Bagger, Schlepper), Pflanzgut und Material. Die in Abbildung 30 dargestellten Arbeiten zur Anlage und Bepflanzung der Filterbecken, inkl. Ankauf von Setzlingen und Spundwand, belaufen sich auf 5.332 € (Filterbecken FB1) und 23.704 € (Filterbecken FB2) bzw. 4,41 € und 14,37 € je m² Fläche von Filterbecken (Tabelle 14). Werden diese Kosten auf die Torfmoos-Produktionsflächen umgelegt, die jeweils von dem gereinigten Wasser bevorteilt werden (Tabelle 15), belaufen sich die Kosten auf 0,73 € m⁻² für Filterbecken FB1 und 2,96 € m⁻² für Filterbecken FB2.

Hinzu kommen die erheblichen Kosten für die Bewässerungsinfrastruktur (Rohrleitungen, Pumpen, Schaltschränke etc.) und die Arbeitsleistung von Fremdfirmen. Generell war die Beauftragung des Umbaus des Bewässerungssystems mit 45.649 € sehr kostenintensiv. Nicht alle Kosten sind den von den Filterbecken bevorteilten Torfmoos-Produktionsflächen zuzuordnen und einige Kosten sind versuchsbedingt wie z.B. je eine Pumpe für die Teilflächen von Filterbecken FB2 oder separate Zuläufe für die drei kleinflächigen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen F7-1, F7-2, F7-3. Dennoch wurde in Absprache mit dem verantwortlichen Wissenschaftler an der Universität Greifswald eine Aufteilung der Einzelpositionen zu den beiden Filterbecken bzw. sonstigen Kosten vorgenommen. Dabei zeigt Abbildung 32 deutlich, dass die Bewässerungsinfrastruktur mit 76 % (Filterbecken FB1) und 42 % (Filterbecken FB2) einen maßgeblichen Anteil der Kosten der Filterbecken verursacht. Bezogen auf die bevorteilte Torfmoos-Produktionsfläche ergeben sich somit Kosten von 3,06 und 5,14 € je m² (Tabelle 14). Bezogen auf die Daten zur Anlage der Torfmoos-Produktionsflächen im Jahr 2016 erhöhen sich die Einrichtungskosten einer Torfmooskultur von 9,84 € je m² (Wichmann *et al.* 2020) bei Anlage von Filterbecken um 31 % bzw. 52 % auf 12,90 € je m² bzw. 14,98 € je m².

Tabelle 14. Kosten Filterbecken ohne und mit Installation der Bewässerungstechnik und Fremdfirmenleistungen (in Euro).

Kosten Filterbecken	FB1	FB2	FB1+FB2
Anlage der Becken	3.512,83	14.012,58	17.525,42
Ankauf Spundwand	0,00	6.807,59	6.807,59
Ankauf Setzlinge	1.342,54	1.830,73	3.173,27
Pflanzung	476,58	1.053,50	1.530,08
Gesamt	5.331,95	23.704,41	29.036,36
€ je m² Filterbecken	4,41	14,37	10,15
€ je m² bevorteilte Fläche	0,73	2,96	1,89
Zzgl. Installation Bewässerung	17.099,10	17.389,61	34.497,71
Gesamt	22.431,06	41.103,01	63.534,07
€ je m² bevorteilte Fläche	3,06	5,14	4,14

Tabelle 15. Bezeichnung der von der Wasserreinigung bevorteilten Flächengrößen und Teilflächen.

Teilfläche	Flächengröße [m ²]	FB1 [m ²]	FB2 [m ²]
F2-1, F2-2	4.340	X	
F7-1, F7-2, F7-3	3.000	X	
F5-1, F5-2	4.000		X
F5-3, F5-4	4.000		X
Gesamt	15.340	7.740	8.000

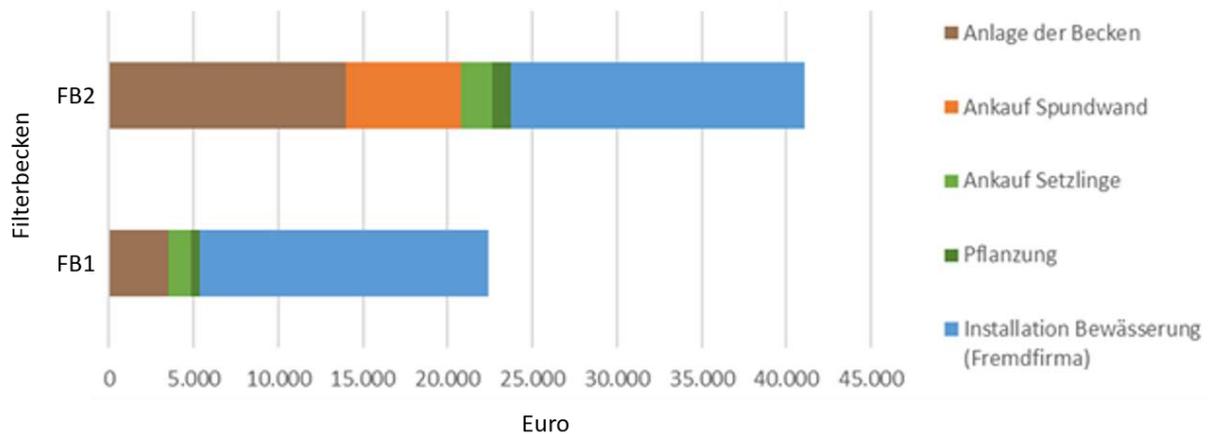


Abbildung 32. Gesamtkosten der Filterbecken FB1 und FB2.

Kosten-Nutzen-Verhältnis

Offen bleibt zunächst die Frage, ob die Investitionen in die Reinigung von Bewässerungswasser betriebswirtschaftlich lohnend sind. Die Erfassung von Zeitbedarf und Kosten der Anlage der Filterbecken stellt zwar Praxiszahlen für eine Bewertung bereit, bisher kann der mögliche Nutzen jedoch nicht nachgewiesen oder gar quantifiziert werden. Der Effekt des gereinigten Wassers auf die Torfmoosproduktion hinsichtlich Arten-zusammensetzung und Produktivität muss längerfristig untersucht werden. Ob sich mögliche Effekte in höheren Erlösen widerspiegeln, die die enormen Zusatzkosten bei der Einrichtung einer Torfmooskultur rechtfertigen, kann derzeit nicht beurteilt werden. Unklar ist zudem, ob Probleme wie die Fraßschäden durch Nutria und Bisamratten gelöst werden können.

Opportunitätskosten für die in Anspruch genommene Fläche wurden nicht berücksichtigt, da die Filterbecken neben der erhofften Reinigungsleistung für das Bewässerungswasser auch weiteren Nutzen erbringen:

- 1) Rohrkolben- und Schilfbiomasse kann jährlich geerntet werden und – wie u.a. im Projekt OptiMOOS gezeigt – ebenfalls als Substratausgangsstoff für den Gartenbau genutzt werden, z B. in Kombination mit Torfmoosen als Paludi-Substrat. Bei Annahme eines Ertrags von $5 \text{ t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, eines Volumengewichts von 30 kg TM m^{-3} und einer Zahlungsbereitschaft von 10 € m^{-3} ergibt sich ein Ertrag von 167 € m^{-3} sowie ein Erlös von ca. $1.667 \text{ € je Hektar}$. Hierdurch können die hohen Einrichtungskosten – ungeachtet der ebenfalls zu deckenden Erntekosten – somit nur minimal um $0,17 \text{ € je m}^2$ reduziert werden.
- 2) Die Filterbecken dienen neben der Wasserreinigung und der Biomasseproduktion zudem der Wasserspeicherung und des Wasserrückhalts. Neben den unmittelbaren Vorteilen der Wasservervorratung für die Torfmoosfläche, kann der Wasserrückhalt gesellschaftlich honoriert werden. Im Hankhauser Moor sind derzeit beide Aspekte nicht relevant, da durch die Lage der Fläche am Vorfluter (Schanze) bisher auch in Trockenzeiten keine Wasserknappheit herrschte und in Niedersachsen keine Honorierung sogenannter blauer Dienstleistungen erfolgt.

Angesichts des aktuellen Wissensstandes und unter den bisherigen Rahmenbedingungen erscheint es sinnvoller, die verfügbare Fläche für die Anlage von Torfmoos-Produktionsflächen zu nutzen. Perspektivisch wird der Wasserrückhalt jedoch an Bedeutung gewinnen. Schilf und Rohrkolben könnten ohne Weiteres einen Anteil von 25 % in Paludi-Substraten stellen. Wenn ein mittlerer Torfmoosertrag von $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ angenommen wird und die Rohstoffe im Flächen-Zusammenhang produziert werden sollen, wäre für die Filterbecken ein Anteil von 15 % der Produktionsfläche

erforderlich. Maßgeblich für den Flächenanteil der Filterbecken wäre jedoch die Größe, um den erforderlichen Wasserrückhalt bzw. die angestrebte Wasserreinigung zu erzielen. Beim aktuellen Verhältnis von Filterbecken und bevorteilter Fläche beträgt der Anteil der Filterbecken 14 % bzw. 17 %.

6.1.7. Zusammenfassung: Effektivität von bepflanzten Filterbecken zur Verringerung der Nährstofffracht

- Die **Etablierung** von Rohrkolben und Schilf auf Hochmoorflächen ist prinzipiell möglich, mit ähnlicher Biomasse-Produktivität wie bei anderen Flächen im Niedermoor. Ob ähnliche Erträge auch nach der Etablierungsphase erreicht werden können, gilt es weiter zu beobachten. Grundsätzlich liefern die Filterbecken Biomasse, die als Substratrohstoff geeignet sind.
- Für Bestandserhalt ist eine **Schädlingsbekämpfung** notwendig, insbesondere gegen Nutria und Bismarckeule.
- **Wasserfilterung**: Bisher konnte keine effiziente Wasserfilterung nachgewiesen werden. Zwar wurden am Ende der Filterstrecke etwas geringere Nährstoffgehalte festgestellt als im Zulaufwasser, diese Unterschiede waren aber nicht signifikant.
- Das ist vermutlich auch Ursache dafür, dass die Förderung von **Ziel-Torfmoosarten** durch Bewässerung mit Schilf- oder Rohrkolben-gefiltertem Wasser aus den Filterbecken weder bei der Etablierung eines neuen Torfmoosrasens auf Teilfläche F2, noch beim Wachstum eines etablierten Torfmoosrasens auf Teilfläche F5 beobachtet wurde.
- **Treibhausgase**: Die Filterbecken waren in der Etablierungsphase eine leichte Treibhausgasquelle, im Wesentlichen verursacht durch Methanemissionen. Inwiefern die Filterbecken zukünftig zu THG-Senken werden, hängt vom Biomasseaufwuchs und den Erntemengen ab. Zudem ist die Weiterentwicklung des Modells notwendig, um gesicherte Aussagen treffen zu können.
- **Biodiversität**: Mit der Einrichtung der Filterbecken wurde die Torfmoos-Paludikulturfläche um einen weiteren Lebensraumtyp erweitert, was zu einer Erhöhung der Strukturvielfalt führte. Das ist insbesondere für Libellen von Vorteil. Es konnten weitere, z.T. Rote Liste Libellen- und Spinnenarten nachgewiesen werden. Die Ernte der Filterbecken wird außerhalb der Flugzeit von Libellen empfohlen.
- **Ökonomie**: Die Investitionskosten für die Einrichtung der Filterbecken sind sehr hoch (Steigerung um ca. 30 bzw. 50 % pro Torfmoos-Produktionsfläche). Aufwand und Nutzen sind bislang unausgewogen.
- **Nährstoffversorgung von Torfmoosen**: Alle im Laborexperiment getesteten Torfmoos-Arten zeigten gutes Wachstum auch bei hoher Stickstofflast (bis 90 kg), eine ausgeglichene Stöchiometrie (von NPK) vorausgesetzt. Als wüchsigste Art wurde ein weiteres Mal *Sphagnum fallax* identifiziert, die jedoch keine Zielart ist. Es wird geschlossen, dass sich *S. fallax* bei hoher Nährstofffracht, auch bei geringer Phosphor- bzw. Kaliumverfügbarkeit immer durchsetzen wird, solange der Wasserstand ausgeglichen hoch ist. Um Ziel-Torfmoosarten zu fördern, scheint demnach weniger die Wasserqualität, als vielmehr der Wasserstand eine Rolle zu spielen. Hohe Konzentrationen von Hydrogencarbonat im Wasser schädigen die Torfmoose insbesondere bei Überstau. Diese kann durch Ansäuerung des Wassers (mit HCl) reduziert werden.
- Wenn für die Bewässerung der Torfmoos-Produktionsflächen nicht ausreichend Oberflächenwasser (z.B. aus einem Vorfluter) zur Verfügung steht, ist die Entnahme von **Grundwasser**

denkbar. Diese sollte insbesondere bei geringer Leitfähigkeit und Mächtigkeit des Grundwasserleiters bevorzugt aus mehreren Brunnen über die Anbaufläche verteilt erfolgen, die bevorzugt im Grundwasseranstrombereich installiert wurden.

6.2. Minimierung der Treibhausgasemissionen einer Torfmooskultur durch Reduzierung des Oberbodenabtrags auf Hochmoorgrünland (AP4)

6.2.1. Entwicklung des Torfmoosrasens

Die Torfmoose auf beiden Varianten mit Oberbodenabtrag etablierten sich innerhalb eines Jahres (Deckung grüner Torfmoose im Mittel 90%), während die Deckung grüner Torfmoose auf der Variante ohne Oberbodenabtrag unter 20% blieb. Dabei gab es keine Unterschiede zwischen den Torfmoosvarianten (*Sphagnum*-Mix und *S. fallax*). Jedoch hatte sich zwei Jahre nach der Einrichtung die Artenzusammensetzung geändert: während sie sich auf der Variante mit Oberbodenabtrag 30 cm kaum veränderte (leichte Zunahme von *S. fallax* zu Lasten von *S. palustre/ S. papillosum* und *S. magellanicum*), nahmen auf der Variante mit geringerem Oberbodenabtrag *S. cuspidatum* von 19 auf 55% und *S. fallax* von 2 auf 18 % zu, *S. rubellum* verschwand, dafür trat *S. fimbriatum* mit 5 % neu auf und der Anteil von *S. palustre/S. papillosum* verringerte sich von 61 auf 17%. Die Rasen erreichten nach zwei Jahren auf der Fläche mit 30 cm Oberbodenabtrag mit 8 cm eine signifikant geringere Höhe als bei geringerem und fehlendem Oberbodenabtrag (im Mittel 13 cm). Als wesentliche Ursache hierfür ist die unterschiedliche Gefäßpflanzendeckung zu nennen, die sich trotz Mahd einstellte: im April 2022 bedeckten Gefäßpflanzen 65 % bei der Variante ohne Oberbodenabtrag (sechs Mal Mahd in 2021), 26 % bei der Variante mit geringen Oberbodenabtrag (zwei Mahdtermine in 2021) und 6 % bei der Variante mit 30 cm Oberbodenabtrag (keine Mahd). Die gepflanzten Rohrkolben konnten sich jedoch nicht etablieren. Auf der Variante ohne Oberbodenabtrag konnte nur bei der *S. fallax*-Variante nach zwei Jahren Biomasse geerntet werden ($130 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), während bei beiden Varianten mit Oberbodenabtrag im Mittel $370 \text{ g m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ Trockenmasse aufgewachsen war, unabhängig von der Artenzusammensetzung.

6.2.2. Wasserbilanz

Die Wasserstände in den jeweils drei in identischer Anordnung (1 m, 2,5 m und 5 m Abstand zum Bewässerungsgraben) eingerichteten Pegeln pro Teilfläche gaben Aufschluss darüber, inwiefern der Oberbodenabtrag vor der Flächeneinrichtung notwendig ist, um das Bewässerungswasser gleichmäßig und mit geringem Zeitversatz in die Fläche zu bekommen. Es wurde unabhängig von der Abtragstiefe festgestellt, dass der Wasserstand im Mittel mit zunehmender Entfernung zum Graben tiefer war. Im Vergleich zum Wasserstand in 1 m und in 5 m Entfernung zum Graben war der bei der Variante ‚30 cm Oberbodenabtrag‘ im Mittel 0,6 cm und bei ‚5-10 cm Oberbodenabtrag‘ 1,1 cm tiefer, während bei der Variante ‚ohne Oberbodenabtrag‘ bereits in 2,5 m Entfernung zum Graben 2,6 cm tiefere Wasserstände festgestellt wurden. Dabei lagen die Grabenwasserstände bei ‚30 cm Oberbodenabtrag‘ 6-8 cm, bei ‚5-10 cm Oberbodenabtrag‘ 4-5 cm und bei der Variante ‚ohne Oberbodenabtrag‘ 4-5 cm über dem mittleren Wasserstand auf der gesamten Teilfläche. Während die Wasserstände im Mittel 1 cm über bis 3 cm unterhalb der Torfmoosoberfläche lagen (Tabelle 1 **Abbildung 1**), waren die Schwankungen der Variante ‚ohne Oberbodenabtrag‘ von -26 bis 10 cm (bezogen auf Torfmoosoberfläche) im Vergleich zu -30 bis 5 cm bei ‚5-10 cm Oberbodenabtrag‘ und -20 bis 11 cm bei ‚30 cm Oberbodenabtrag‘ am höchsten.

Die Entwässerung von Torfen trägt dazu bei, dass dieser mineralisiert und die Wasserleitfähigkeit abnimmt. Durch den Oberbodenabtrag wird diese obere degradierte Schicht des Torfes entfernt. Das ließ sich auch im Feldversuch zur ‚Minimierung des Oberbodenabtrags‘ feststellen. Die höchsten

Leitfähigkeiten im Oberboden und damit geringsten Unterschiede der Wasserstände in der Fläche wurden für die Varianten mit Oberbodenabtrag festgestellt. Das zeigte sich auch an den höheren Wasserstandsschwankungen für die Variante ‚ohne Oberbodenabtrag‘, da hier die Nachlieferung von Wasserverlusten durch das Grabenwasser sowie ein Abfließen von überschüssigem Niederschlagswasser langsamer war. Insgesamt funktionierte die Bewässerung bei allen 3 Varianten, Torfmoos-etablierung und -wachstum war möglich, wobei durch das Mikrorelief bei ‚5-10 cm Oberbodenabtrag‘ und ‚ohne Oberbodenabtrag‘ Teile der Torfmoos-Produktionsflächen zeitweilig bis zu 27 cm überstaut waren.

Der Vergleich der beiden hydrologischen Jahre 2021 und 2022 zeigt einen deutlichen Unterschied in der Größenordnung des Wasserbedarfs (Niederschlag plus Zufluss): im Jahr 2021 wurden $11.060 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ benötigt, im Jahr 2022 $14.871 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Dieser Bedarf konnte im Jahr 2021 zu 88,5 % über den Niederschlag gedeckt, die restliche Menge musste durch Zusatzbewässerung ausgeglichen werden. Im Jahr 2022 gab es besonders in der Vegetationsperiode nur wenig Niederschlag, nur die Hälfte des Wasserbedarfs konnte durch den Niederschlag gedeckt werden. Um die Wasserstände dennoch kurz unterhalb der Torfmoosoberkante zu halten, war somit viel Zusatzbewässerung notwendig. Die Verlustkomponenten sind in beiden Jahren ähnlich aufgeteilt, wobei die Verdunstung 26 % der Verluste ausmachte.

Aufgrund der tieferen Lagen und demzufolge tieferen Wasserständen auf den Flächen mit 30 cm bzw. 5-10 cm Oberbodenabtrag wurde ein unterirdischer Wasserzustrom von den benachbarten höher gelegenen Flächen beobachtet. Dieser Zufluss war in 2022 bei beiden Flächen größer verglichen mit 2021. Dies ist zurückzuführen auf geringe Niederschläge während der Vegetationsperiode in 2022.

6.2.3. Wasserqualität und Nährstoffbilanz

Der Versuch mit unterschiedlichen Abtragstiefen des Oberbodens zeigt starke Unterschiede für die drei Varianten hinsichtlich der Zusammensetzung der Nährstoffe und deren Verfügbarkeiten (Abbildung 33). Während bei ‚30 cm Oberbodenabtrag‘ die niedrigsten pH-Werte und Werte für Bikarbonat, NH_4^+ , P, K, Ca und Fe im Porenwasser festgestellt wurden, waren bei 5-10 cm Oberbodenabtrag S und Mg sowie bei der Variante ohne Oberbodenabtrag Na und Cl am geringsten.

Insgesamt wurde eine deutliche Reduktion der Nährstoffe schon bei ‚5-10 cm Oberbodenabtrag‘ beobachtet, was zeigt, dass diese Abtragstiefe ausreichend ist, um hohe Nährstoffverfügbarkeiten aus dem degradierten Oberboden aufgrund der entwässerungsbasierten Vornutzung stark zu verringern.

In der Köpfchenbiomasse der Torfmoose bei ‚30 cm Oberbodenabtrag‘ wurde zwei Jahre nach der Ausbringung der Torfmoose teilweise N/K Verhältnisse >3 ermittelt, die eine K-Limitation des Torfmooswachstums anzeigen (Bragazza *et al.* 2004), was sich auch in den geringsten gemessenen K-Gehalten im Porenwasser bestätigt. Für die Varianten ohne und 10 cm Oberbodenabtrag wurden keine Limitationen festgestellt.

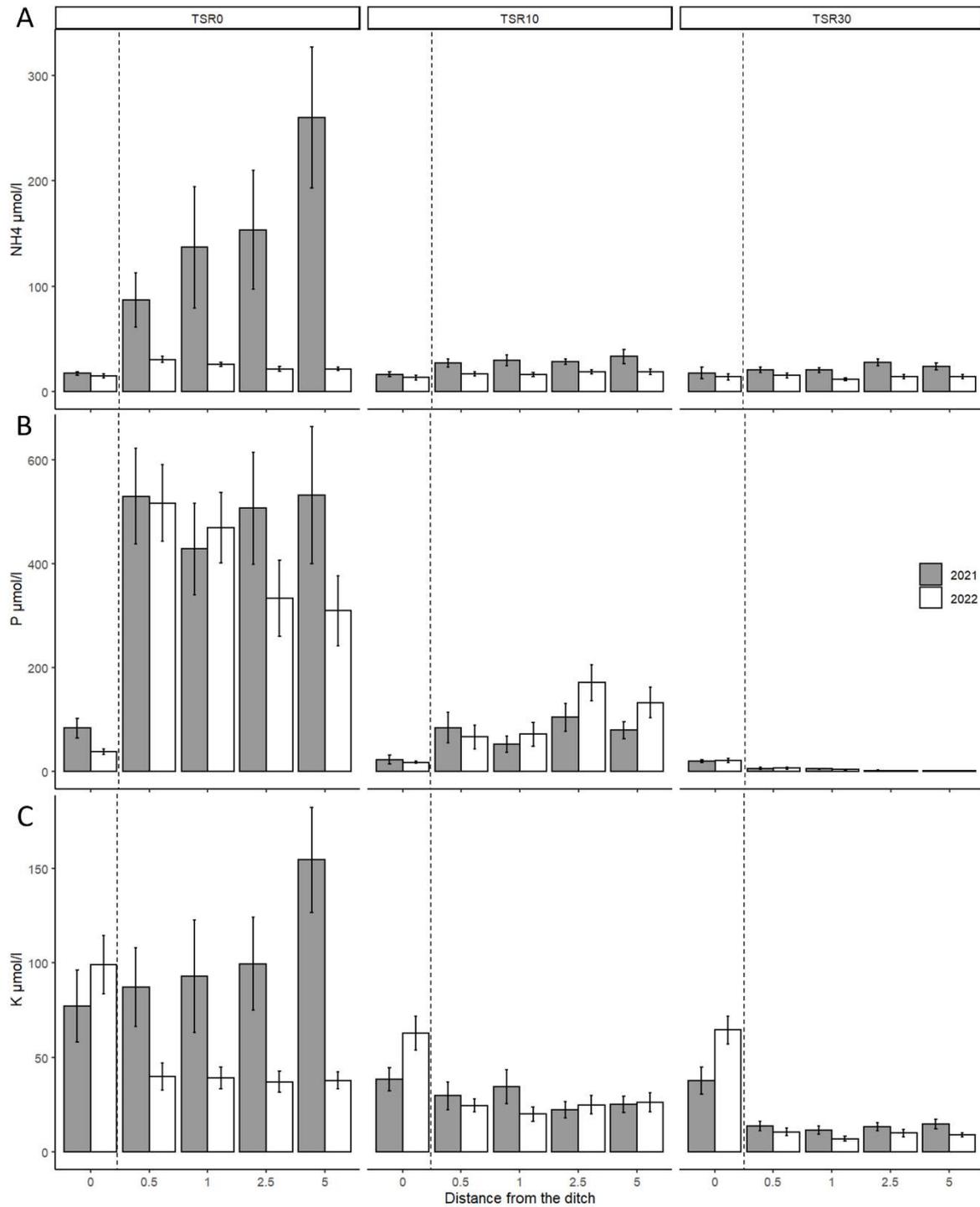


Abbildung 33. mittlere NH_4^+ , P und K Konzentrationen ($\mu\text{mol/l}$) im Porenwasser (10 cm unterhalb der Oberfläche von Wasser bzw. Torf) in verschiedenen Entfernungen (m) zum Bewässerungsgraben (0 m = Graben) in den Jahren 2021 (n=80) und 2022 (n=96). Die Balken zeigen die Mittelwerte \pm Standardfehler. (aus Käärmelahti *et al.* in Vorb.)

6.2.4. Treibhausgase

Alle Varianten zeigen eine Saisonalität der CO₂-Flüsse über den Jahresverlauf, besonders stark bei der Variante 'ohne Oberbodenabtrag'. Hier wurden außerdem die höchsten CO₂-Aufnahmen (-1917 g m⁻² h⁻¹) und -Abgaben (1718 g m⁻² h⁻¹) festgestellt, vor allem in den Sommermonaten (Abbildung 34). Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Variante 'Oberbodenabtrag 5-10 cm', mit höheren CO₂-Aufnahmen als -Abgaben. Die Variante 'Oberbodenabtrag 30 cm' dient als Referenz für die bisherige Torfmoos-Produktionsfläche. Vergleicht man sie mit den Varianten 'Ernte 2021' und 'Wachstum seit 2011' auf der Teilfläche F1 ist sie von den CO₂-Aufnahmen und -Abgaben ähnlich der Variante 'Ernte 2021'. Die Einrichtung des Versuches zur Minimierung des Oberbodenabtrags mit Beimpfung durch Torfmoos-Fragmente fand im November 2020 statt. Möglicherweise haben die 10 Monate der Etablierung ausgereicht, um das Wachstum der Torfmoose auf den gleichen Stand wie nach der Ernte zu bekommen. Zu Beginn der Messungen im September 2021 bedeckten Torfmoose innerhalb der Rahmen im Mittel 50 %, die sich bis April 2022 auf 70 % ausbreiteten. Die CO₂-Bilanzen zeigen, dass die Variante 'Oberbodenabtrag 5-10 cm' eine größere CO₂-Senke als die Kontrollvariante 'Oberbodenabtrag 30 cm' war (Tabelle 16). Beachtet werden muss jedoch, dass die ersten Messungen auf der Kontrollvariante erst im September 2021 stattfanden und daher die CO₂-Aufnahme eventuell unterschätzt wird.

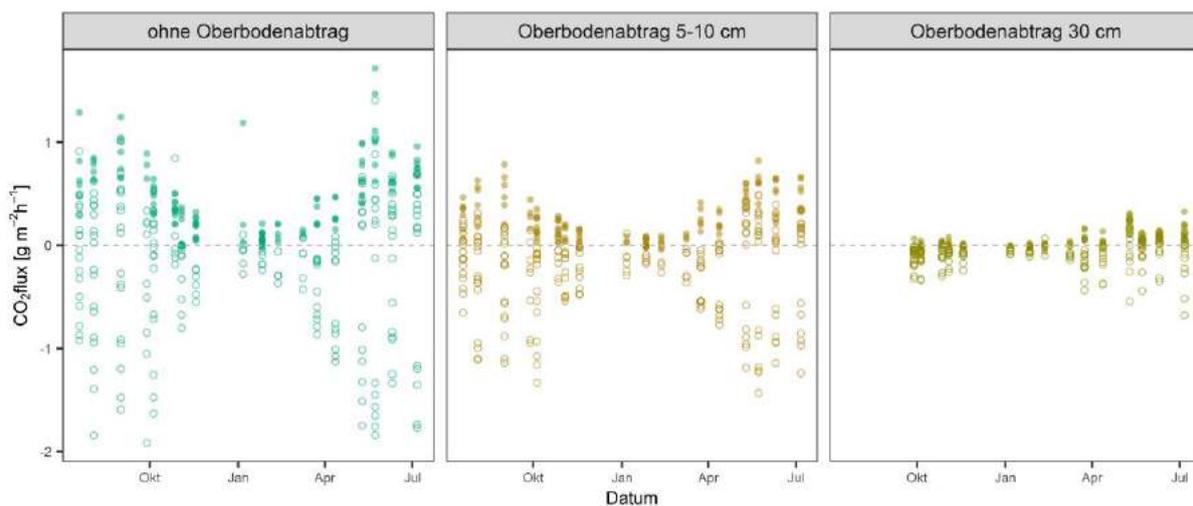


Abbildung 34. Gemessene dunkle (Punkte) und transparente (Kreise) CO₂-Flüsse (in g m⁻² h⁻¹) für die Varianten 'ohne Oberbodenabtrag', 'Oberbodenabtrag 5-10 cm' und 'Oberbodenabtrag 30 cm' von 07/2021 bis 07/2022 bzw. 09/2021 bis 07/2022 für 'Oberbodenabtrag 30 cm'.

Die CH₄-Flüsse unterscheiden sich stark in den einzelnen Varianten. Die Variante 'ohne Oberbodenabtrag' hat mit Abstand die höchsten CH₄-Emissionen (höchster Wert Mai 2022: 135 mg m⁻² h⁻¹) (Abbildung 35), was sich mit den Erwartungen deckt. Vor allem in den Sommermonaten bis in den Herbst hinein wurden sehr hohe Werte gemessen. Als wesentliche Ursache hierfür ist die Kombination aus hoher Gefäßpflanzendeckung von 50 bis 70 % innerhalb der Rahmen (vgl. Kapitel 6.2.1) und häufigem Überstau (bis 27 cm) wahrscheinlich. Bei der Variante 'Oberbodenabtrag 5-10 cm' lässt sich ein kontinuierlicher Anstieg der CH₄-Flüsse in der zweiten Messhälfte erkennen, die jedoch deutlich niedriger sind als bei der Variante ohne Oberbodenabtrag und in dem Bereich liegen, der bereits für die Projekte MOOSWEIT und OPTIMOOS auf Teilfläche F1 festgestellt wurde. Die Variante 'Oberbodenabtrag 30 cm' zeigte von allen Varianten die geringsten CH₄-Emissionen und teilweise sogar CH₄-Aufnahmen.

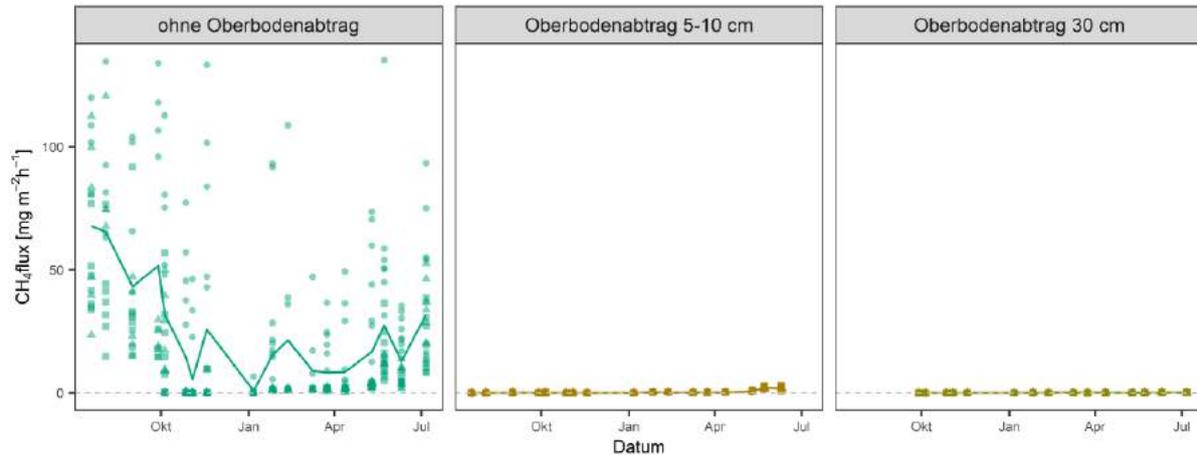


Abbildung 35. Gemessene CH₄- Flüsse (in mg m⁻² h⁻¹) für die Varianten ‘ohne Oberbodenabtrag’, ‘Oberbodenabtrag 5-10 cm’, ‘Oberbodenabtrag 30 cm’ von 07/2021 bis 07/2022 bzw. 09/2021 bis 07/2022 für ‘Oberbodenabtrag 30 cm’. Angegeben sind die einzelnen Messpunkte (Formen), zusammen mit den damit verbundenen mittleren Flüssen (farbige Linie, alpha = 0,5).

Wie aus Tabelle 16 ersichtlich, sind die Torfmoos-Produktionsflächen unabhängig vom Umfang des Oberbodenabtrags CO₂-Senken, mit einer besseren Bilanz als die Varianten auf Teilfläche F1. Das Modell besitzt hier einen besseren R² von 0,83 bei allen Varianten. Jedoch ist die Variante ‘ohne Oberbodenabtrag’ eine Quelle für CH₄ ohne erkennbare Abnahme, so dass geschlossen wird, dass bei anhaltend hoher Gefäßpflanzendeckung (und geringer Torfmoosdeckung) und gleichzeitigem Überstau die CH₄-Emissionen so hoch bleiben würden. Dahingegen wird bei den Varianten mit Oberbodenabtrag auf der Torfmoos-Produktionsfläche insgesamt Kohlenstoff festgelegt, nach derzeitigem Stand vergleichbar viel.

Tabelle 16. Jährliche Bilanzen (in g m⁻² a⁻¹ ± SD) von CO₂ und CH₄ für die Varianten ‘ohne Oberbodenabtrag’, ‘Oberbodenabtrag 5-10 cm’ und ‘Oberbodenabtrag 30 cm’ des Versuches Minimierung Oberbodenabtrag von 07/2021 bis 07/2022. Die Klimawirkung der Varianten wurde anhand des 100-jährigen globalen Erwärmungspotenzials (GWP100) von CH₄ (=27) bewertet (Forster *et al.* 2021).

	CO ₂ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	CH ₄ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	THG-Bilanz in CO ₂ -äq (in t ha ⁻¹ a ⁻¹)
ohne Oberbodenabtrag	-927 ± 182	212 ± 33,4	47,9 ± 9,2
Oberbodenabtrag 5-10 cm	-1164 ± 160	1,8 ± 0,61	-11,2 ± 1,6
Oberbodenabtrag 30 cm	-1209,0 ± 96,4	0,46 ± 0,14	-11,9 ± 0,96

6.2.5. Biodiversität: Flora

Bei den in 2020 neu eingerichteten Teilflächen F7-1 bis -3) wurden, unabhängig von der Höhe des Oberbodenabtrages, ähnlich viele Pflanzenarten (31-33) beobachtet (Tabelle 26). Jedoch gab es deutliche Unterschiede sowohl in der jeweiligen Artenzusammensetzung (Anteile an verschiedenen Lebenstraumtypen, Abbildung 36) als auch bei der Gesamtdeckung der Gefäßpflanzen (Abbildung 37). Ein Oberbodenabtrag von 30 cm resultierte im höchsten Anteil an Gesamtmoor- (wie auch Hochmoor)Arten bei gleichzeitig niedrigstem Anteil an Grünlandarten, während es bei der Variante ‚ohne Oberbodenabtrag‘ umgekehrt war.

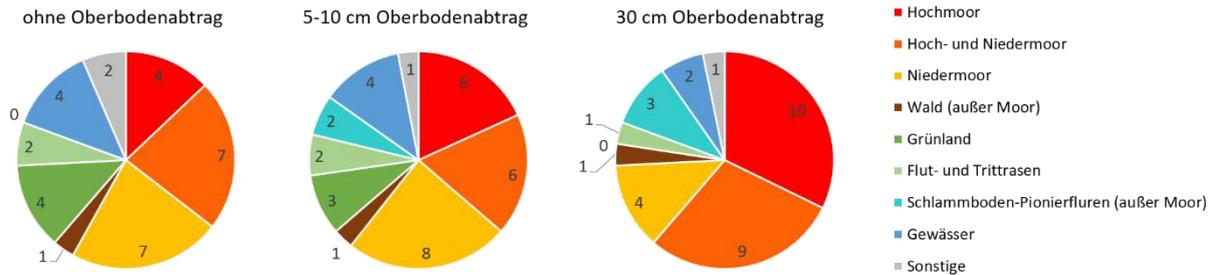


Abbildung 36. Pflanzenartenanzahl (Gefäßpflanzen und Moose, gesamter Projektzeitraum) pro Lebensraumtyp für die Teilflächen im Versuch zur Minimierung des Oberbodenabtrags F7-1 bis-3.

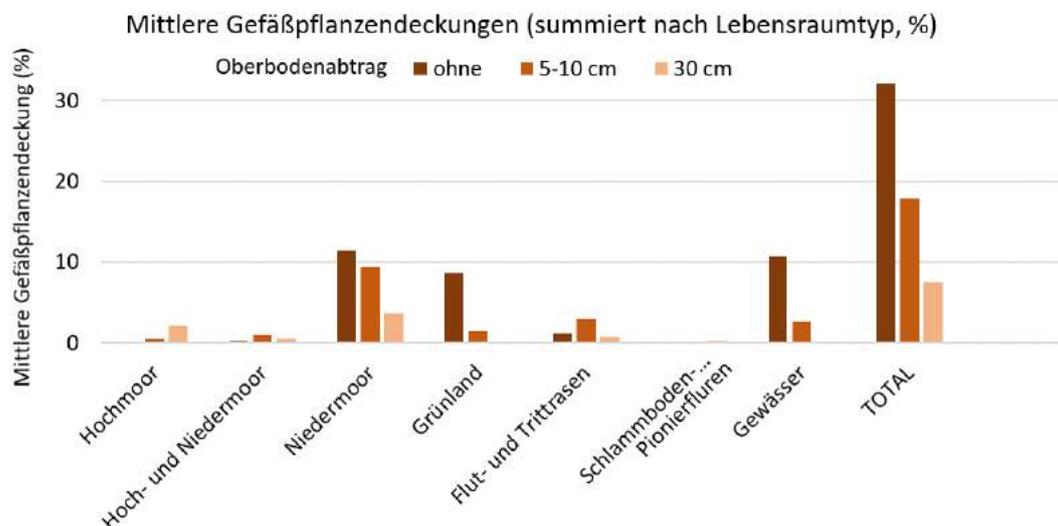


Abbildung 37. Mittlere Deckungen der Gefäßpflanzen in den Dauerquadraten im November 2022 (% ,aufsummiert nach Lebensraumtypen, n=20/30) in Abhängigkeit von der Variante im Versuch zur ‚Minimierung des Oberbodenabtrags‘.

6.2.6. Ökonomie

Allgemeine Arbeiten

Zur Einrichtung der kleinflächigen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen waren allgemeine Aufgaben erforderlich wie die Beantragung der Baugenehmigung (160,50 €) sowie der Erhöhung der Wasser-Entnahmemengen (105,00 €). Auch weitere Arbeiten unmittelbar auf der Fläche wie vorbereitende Arbeiten (Einmessen, Mulchen) und nicht klar einzelnen Flächen zuzuordnende Arbeiten (Erdreich verfahren für Dämme, Deiche richten etc.) sind nicht parzellenscharf, sondern nur allgemein für F7 auszuweisen (Abbildung 38). Auch hinsichtlich von Materialkosten (z.B. Kabel, KG-Rohre) oder Leihgebühren für zusätzliche Technik ist überwiegend keine klare Zuordnung möglich. Ein zusätzlicher Bagger (Hitachi Kompaktbagger) wurde z.B. gemietet, um Kabel zu verlegen, für den Wegebau und um schwarze Bewässerungsrohre zu ziehen.

Zeitbedarf und Kosten der Einrichtung

Wie zu erwarten, steigt der Zeitbedarf bei den Varianten zum Oberbodenabtrag (jeweils 0,1 ha) mit der Menge des Abtrags: F7-1 > F7-2 > F7-3 (Abbildung 38). Hier entstehen keine spezifischen

Materialkosten; die Bewässerung erfolgt über Gräben. Der größte Zeitbedarf wurde durch Fläche F7-6 verursacht. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass diese Fläche auch etwas größer ist (60 x 35 m, 0,21 ha) als F7-4 und F7-5 (50 x 35 m, 0,175 ha). Bei Korrektur des Zeitbedarfs anhand der unterschiedlichen Flächengrößen bleibt das Verhältnis $F7-4 < F7-5 < F7-6$ bestehen. Gleichzeitig zeigen die auf einen Hektar hochgerechneten Werte einen im Verhältnis höheren Zeitaufwand beim Oberbodenabtrag (Abbildung 38). Eine analoge Hochrechnung des allgemeinen Zeitbedarfs für F7 ist nicht sinnvoll, da nur einige der Arbeiten mit größerer Fläche einen größeren Zeitbedarf haben. Grundsätzlich ist auf Skaleneffekte hinzuweisen: je größer die Flächen, desto geringer die anteiligen Kosten.

Der Zeitbedarf kann auch als Orientierung für die unterschiedlichen Einrichtungskosten (v.a. Personal- und Maschineneinsatz) für die verschiedenen Varianten dienen. Für F7-4 und F7-5 wurden jedoch zusätzlich Dränrohre angeschafft und Spezialtechnik (Schlitzfräse, Dränagepflug) gemietet. Bei F7-6 wurden keine Dränrohre zur Bewässerung verlegt, sondern ein umlaufender Graben ausgehoben. Für eine variantenspezifische Quantifizierung der Einrichtungskosten sind die Parzellen jedoch zu klein und die verfügbaren Kostendaten nicht detailliert genug.

Laut Rechnung der die Baumaßnahmen ausführenden Firma an die Uni Greifswald wird die Flächenvorbereitung ‚Minimierung Oberbodenabtrag‘ mit 6.672,00 € angesetzt, die Flächenvorbereitung ‚Minimierung Grabenanteil‘ mit 12.904,00 € sowie das Ausbringen von Torfmoosen mit 8.940,00 € (jeweils netto). Eine detaillierte Aufschlüsselung der Kosten, die ggf. eine Zuordnung zu Teilflächen ermöglicht hätte, ist jedoch nicht erfolgt.

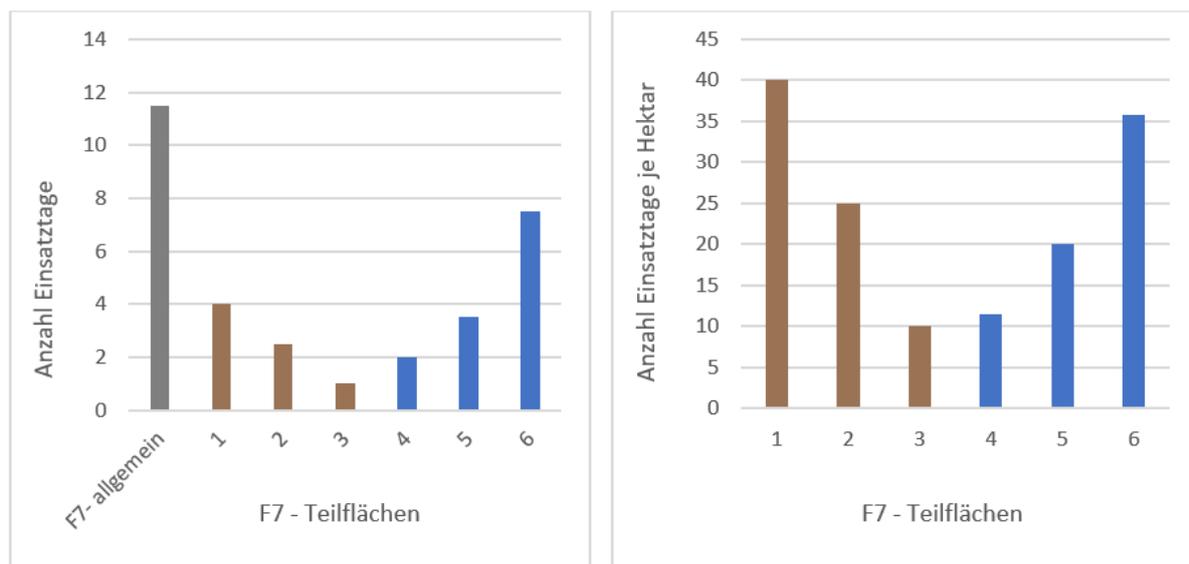


Abbildung 38. Zeitbedarf für die Anlage der kleinflächigen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen: grau – allgemeine Arbeiten, braun – verringerter Oberbodenabtrag, blau – reduzierter Grabenanteil; links reale Einsatztage, rechts hochgerechnet auf einheitliche Flächengröße

Kosten-Nutzen-Verhältnis

Fläche F7-3 erforderte – flächenkorrigiert – den geringsten Einrichtungsaufwand. Die vegetationsökologischen Untersuchungen im Projekt OptiMOOS zeigten jedoch eine erheblich schlechtere und unzureichende Etablierung der Torfmoose nach minimierter Flächenvorbereitung im Vergleich zu einem Bodenabtrag von 5-10 cm bzw. 30 cm sowie bei F7-2 einen geringeren Anteil von Ziel-Torfmoosarten als bei F7-1.

Fläche F7-6 weist – flächenkorrigiert – ähnlich hohe Einrichtungskosten auf wie F7-1. Das erscheint plausibel, da in beiden Fällen ein Becken mit 30 cm Oberbodenabtrag und umlaufenden Gräben

angelegt wurde. Zu erwarten wäre, dass Fläche F7-6 auf Grund eines fehlenden Mittelgrabens und ggf. erster Skaleneffekte etwas geringeren Aufwand erfordern würde als F7-1. Dass es sich umgekehrt verhält, ist vermutlich auf die geringe Differenzierung der Arbeitszeiten aufgrund der sehr kleinflächigen Parzellen zurückzuführen. Zudem ist es überraschend, dass der Zeitbedarf für die Varianten mit 30 cm Oberbodenabtrag zuzüglich Verlegen von Dränrohren zur Bewässerung und nur ein bzw. zwei Gräben statt eines Ringgrabens im Verhältnis niedriger ist. Hierbei handelt es sich jedoch um eine unzureichende Erfassung der Arbeiten. Neben dem für Einrichtung und Management der Torfmoos-Paludikulturfläche zuständigen Mitarbeiter (Urlaub im Zeitraum 28.9.-09.10.2020) waren im Herbst 2020 drei weitere Mitarbeitende auf der Fläche tätig, um Überläufe einzubauen (KG-Rohre) und auch die Dränrohre bei F7-4 und F7-5 einzuziehen (mdl. Mitteilung Matthias Krebs, Uni Greifswald). Diese Arbeiten wurden jedoch nicht auf den täglichen Arbeitszetteln dokumentiert und konnten somit nicht einbezogen werden.

Grundsätzlich verhindert die Kleinflächigkeit der Torfmoosparzellen eine belastbare Kostenerfassung sowie die fortlaufende Bewertung der Varianten hinsichtlich unterschiedlichen Nutzens (Torfmoosproduktivität, Zielarten, Wasserversorgung, Nährstoffhaushalt und Kohlenstoffbilanz) eine abschließende Einschätzung.

6.2.7. Zusammenfassung: Effektivität von Oberbodenabtrag für die Etablierung einer Torfmoos-Paludikultur

- Es kann geschlussfolgert werden, dass bereits der Abtrag von 5 bis 10 cm des degradierten Oberbodens zu einer deutlichen Reduktion der Nährstoffverfügbarkeit, insbesondere von Phosphor und Kalium führt sowie die Wasserleitfähigkeit des oberflächlich anstehenden Torfes verbessert. Beides führte zu einer schnellen Etablierung und Biomasseakkumulation von Torfmoos, jedoch war der Anteil der Ziel-Torfmoosarten bei geringerem Oberbodenabtrag (5-10 cm) im Vergleich zu 30 cm Oberbodenabtrag deutlich geringer. Bei Torfmoosen auf einer Fläche mit umfangreichem Oberbodenabtrag (30 cm) gab es Hinweise auf eine Kalium-Limitation des Wachstums. Dahingegen wurden auf der Fläche ohne Oberbodenabtrag hohe Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumgehalte im Torf sowie die höchsten Mikroreliefunterschiede (bis 16 cm), eine geringere Wasserleitfähigkeit und die größte Wasserstandsamplitude festgestellt, was einerseits zu einer hohen Gefäßpflanzendeckung und andererseits zu geringer Etablierung von Torfmoosen führte. Inwiefern die Torfmoosetablierung langfristig auch auf wiedervernässten Flächen ohne Oberbodenabtrag gelingen kann, gilt es weiter zu untersuchen.
- Auf den Torfmoos-Produktionsflächen mit Oberbodenabtrag wird Kohlenstoff festgelegt, die **THG-Bilanz** (ohne Berücksichtigung des abgetragenen Kohlenstoffs) ist positiv. Dahingegen bleibt die Flächen ohne Oberbodenabtrag eine erhebliche Kohlenstoffquelle, was maßgeblich an den hohen Methanemissionen liegt. Im Vergleich zum Oberbodenabtrag von 30 cm bedeutet der Abtrag von 5-10 cm geringeren Kohlenstoffaustrag und dazu geringeren (ökonomischen) Aufwand bei ähnlicher THG-Bilanz nach der Installierung, so dass aus Klimaschutzperspektive der geringere Abtrag (5-10 cm) die zu bevorzugende Variante ist.
- Der Versuch, eine **Aushagerung mithilfe gepflanzter Rohrkolben** zu erreichen, ist gescheitert. Die Pflanzen sind eingegangen.

6.3. Minimierung der Treibhausgasemissionen einer Torfmooskultur durch Reduzierung des Anteils von Bewässerungsgräben im Produktionssystem (AP 5)

6.3.1. Entwicklung des Torfmoosrasens

Zwei Jahre nach der Einrichtung bedeckten Torfmoose bei Unterflurbewässerung ca. 80 % der Fläche und damit vergleichbar viel wie bei der parallel nach herkömmlicher Methode (Grabenabstand 10 m) eingerichteten Fläche. Bei 35 m Grabenabstand erreichte die Deckung grüner Torfmoose 55% und die Rasenhöhe 4 cm. Mit ca. 8 cm waren die Torfmoosrasen bei Unterflurbewässerung ungefähr doppelt so hoch, wohingegen die Gefäßpflanzendeckung (insbesondere *Juncus effusus*) auf allen Flächen ähnlich gering (< 15 %) war. Der Biomassezuwachs umfasste bei 35 m Grabenabstand mit 160 g Trockenmasse $\text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$ weniger als bei Unterflurbewässerung (im Mittel 260 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$) und 10 m Grabenabstand (290 $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1}$), die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant.

6.3.2. Wasserbilanz, Gewächshausversuch periodischer Überstau

Für alle getesteten Varianten wurden mit 9 bis 12 cm unterhalb der Torfmoosoberfläche vergleichbare mittlere Wasserstände festgestellt, mit einer Spanne von 13 cm Überstau bis 33 cm unterhalb der Torfmoosoberfläche (Bezugspunkt Grabenwasserstand, Tabelle 1). Die Wasserstände in den Flächen sind insbesondere auf der Variante mit ‚35 m Grabenabstand‘ zeitweise auf bis zu 33 cm unter Torfmoosoberfläche abgesunken (Stichtagsmessungen bei den Dauerquadraten), da der Grabenwasserstand auf Wasserzulauf schneller reagiert als die Wasserstände in Mitte der Anbaufläche. Grundsätzlich zeigte sich, dass in allen drei Teilflächen das Wasser auch bis in die Flächenmitte geleitet werden konnte, dennoch mit deutlichen Unterschieden zwischen den Varianten (Abbildung 39, Abbildung 40, Abbildung 41). Bei der ‚Unterflurbewässerung mit Druck‘ waren die Wasserstände auf der gesamten Fläche im Jahresverlauf gleich und die Wasserstandsunterschiede während eines Messzeitpunktes überwiegend geringer als 5-10 cm (Abbildung 40). Die Wasserverteilung funktionierte demnach gut. Die Wasserstände bei der ‚Unterflurbewässerung ohne Druck‘ sinken mit zunehmender Entfernung vom Zulaufgraben und sind in 32 m Entfernung im Mittel 5 cm tiefer. Das Wasser fließt ohne Pumpe also langsamer in die Fläche und die Wasserverteilung funktioniert etwas schlechter. Im Frühjahr 2022 wurde festgestellt, dass die Dränrohre mit Wurzeln zugewachsen und verstopft waren, was die Wasserführung durch die Rohre mindestens stark reduzierte. Danach erfolgte die Bewässerung über den Zulaufgraben mit Wasseraufstau und einer Überrieselung der Fläche bis zum Überlauf. Die Wasserstände waren im Sommer 2022 trotz geringerer Niederschläge im Vergleich zum Vorjahr ähnlicher und lagen zu gleichen Messzeitpunkten im Mittel 6 cm in der jeweiligen Teilfläche auseinander (Spanne zwischen Max u. Min). Die tiefsten Wasserstände wurden in 32 m Entfernung vom Zulauf festgestellt, die Wasserverteilung über die gesamte Fläche funktionierte gut mit dem Überrieselungsregime und mindestens stark reduzierter Wasserleitung durch die Rohre (Abbildung 39, Abbildung 40).

Der Unterschied bei der weitesten Entfernung zwischen den Dränrohren bei 3,75 m war in den Sommermonaten mit 3-4 cm im Mittel gering und somit eine gute Wasserleitung bei Dränrohr-Abständen von 7,5 m gewährleistet (Abbildung 39, Abbildung 40). In den Wintermonaten lag der Wasserstand in 3,75 m Entfernung meist über dem in 0,5 m Entfernung zum Dränrohr. Das weist auf ein gut funktionierendes Abfließen von Überschusswasser über die Dränrohre aus der Fläche hin.

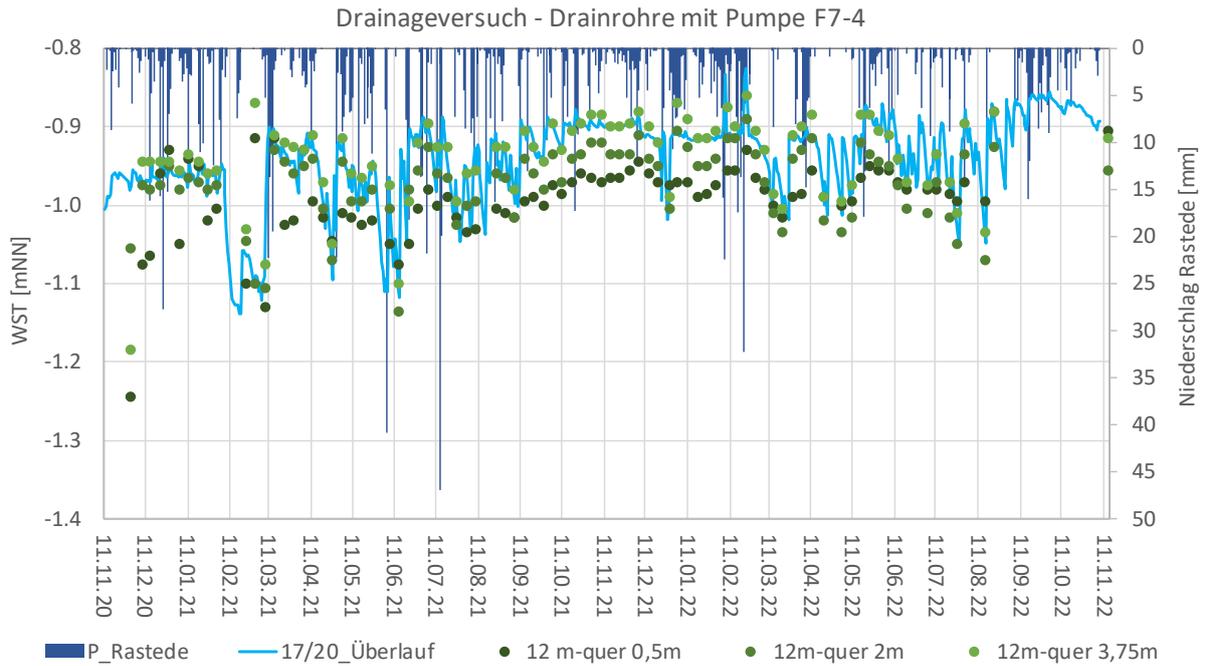


Abbildung 39. Wasserstände auf der Teilfläche F7-4 (Variante ‚Unterflurbewässerung mit Druck‘) im Untersuchungszeitraum 11/2020-11/2022. P_Rastede - tägliche Niederschlagssumme in mm, 17/20_Überlauf - Wasserstand am Überlauf, 12m – 12 m Entfernung zum Zulauf und quer Abstand zum Dränrohr mit 0,5, 2,0 und 3,75 m.

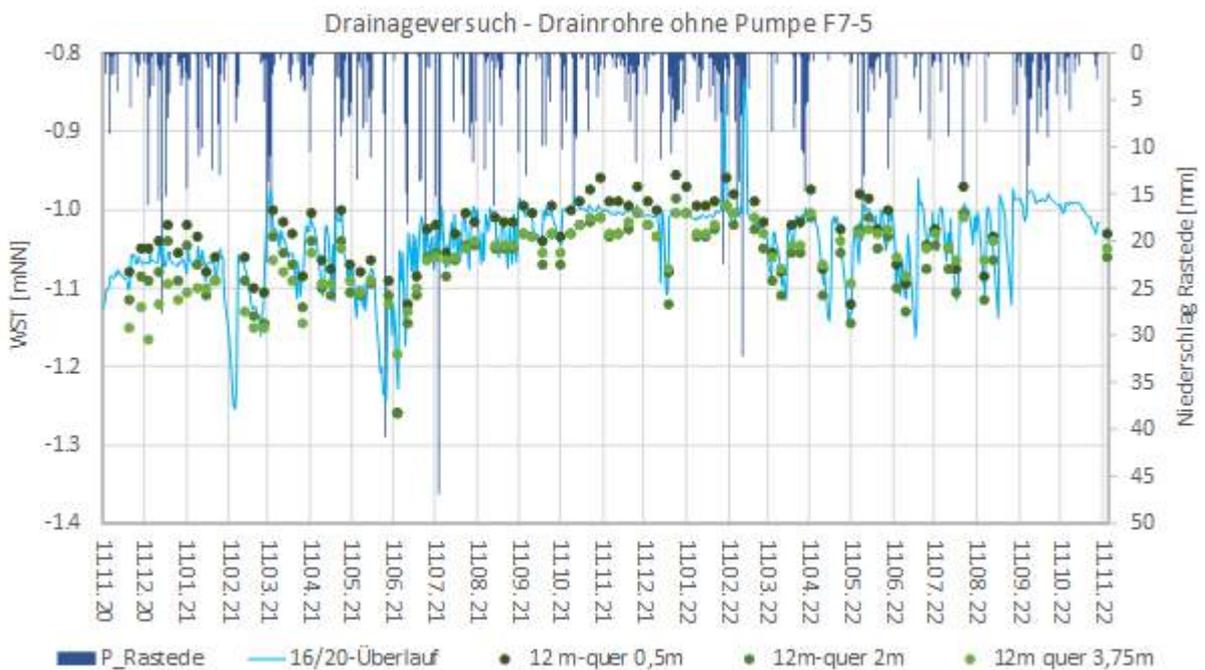


Abbildung 40. Wasserstände auf der Teilfläche F7-5 (Variante ‚Unterflurbewässerung ohne Druck‘). Abkürzungen siehe Abbildung 39.

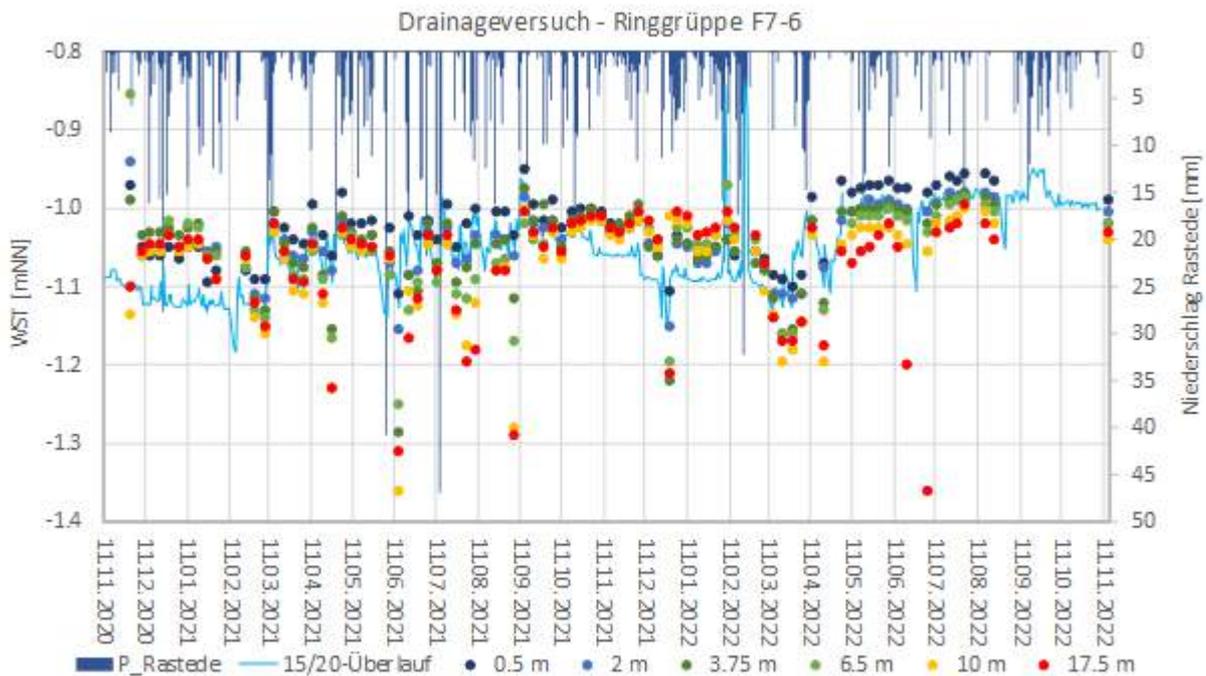


Abbildung 41. Wasserstände auf der Teilfläche F7-6 (Variante ‚35 m Grabenabstand‘). P_Rastede - tägliche Niederschlagssumme in mm, 15/20_Überlauf - Wasserstand am Überlauf und den unterschiedlich weit vom Graben entfernten Messpegeln in 0,5; 2; 3,75; 6,5; 10 und 17,5 m Abstand (in einem Transekt liegend, Abbildung 7).

Bei der Variante ‚35 m Grabenabstand‘ konnten die Torfmoose in der Flächenmitte nicht dauerhaft mit gleichbleibend hohen Wasserständen versorgt werden (Abbildung 41). Mit hohen Wasserständen im Graben auf Niveau der Grabenoberkante ließ sich das Wasserdefizit in der Flächenmitte im Sommer reduzieren. Nach Niederschlägen wurde regelmäßig ein Wasserüberstau auf Teilen der Fläche beobachtet, da die Entwässerung über den Graben und Überlauf nicht schnell genug möglich war. Es zeigte sich, dass bei ‚35 m Grabenabstand‘ große Wasserstandsschwankungen nicht so schnell ausgeglichen werden konnten.

Gewächshausversuch zum periodischen Überstau

Im Ergebnis des Überstauversuches erreichten grüne Torfmoose nach drei Monaten in Abhängigkeit der Überstauvariante unterschiedliche Deckungsgrade und Zuwächse (Tabelle 17). Diese waren bei Feuchthalten nach Abgießen und der Variante mit 3 Tagen Austrocknung mit \varnothing 86-87 % Deckung (Ausnahme 1 Tag Überstau (3 Tage Austrocknen mit 48 %) und \varnothing 49-57 g Trockenmasse m^{-2} im Mittel höher als bei der Kontrolle (\varnothing 64 %, 48 g m^{-2}). Zwar erreichte die Deckung grüner Torfmoose bei beiden Dauerüberstau-Varianten ähnliche Werte wie bei der Kontrolle und waren die Torfmoose länger als bei der Kontrolle, aber es wurden deutlich weniger Biomasse und Köpfchen gebildet. Bei allen Varianten mit längerer Austrocknung als Überstau bedeckten grüne Torfmoose weniger Fläche als bei der Kontrolle, aber nur bei der trockensten Variante (1 Tag Überstau/ 6 Tage Austrocknung) wuchs deutlich weniger Biomasse zu (23 g m^{-2}), waren die Torfmoose kürzer und wurden weniger neue Köpfchen gebildet. Auf Artebene etablierte sich *S. palustre* hinsichtlich Deckung grüner Torfmoose und Torfmoosköpfchen sowie Biomassezuwachs am besten. *S. fallax* erreichte vergleichbare Deckungen grüner Torfmoose wie *S. palustre*, bei den Varianten mit Dauerüberstau sogar höhere, bildete aber weniger Köpfchen und Biomasse. *S. rubellum* wuchs am schlechtesten.

Tabelle 17. Mittlere Deckung grüner Torfmoose (%), Trockenmassezuwachs (in g m⁻²), Mittlere Anzahl der Wachstumspunkte pro m² und mittlere Länge (in cm) drei Monate nach Versuchsbeginn (über alle drei Arten gemittelt sowie mittlerer Wassergehalt, der während der Versuchsdauer vor jedem Überstauereignis bestimmt wurde (in %); ¹Varianten siehe Kapitel 5.2.3; * = signifikant verschieden von Kontrolle (C) nach Kruskal-Wallis-Test mit R-Paket pgrirmess.

Varianten ¹	Mittl. Deckung an grünen Torfmoosen (%; n=9)	Mittl. Zunahme d. Trockenmasse (g m ⁻² ; n=9)	Mittl. Anzahl d. Wachstumspunkte (Capitula + Innovationen) (pro m ² ; n=18)	Mittl. Mooslänge (cm; n=300)	Mittl. Wassergehalt der Torfmoose (%)
1Ü6TA	24 (±7)	23 (±10)	4.900 (±2.600)*	11,4 (±3,4)	52 (±33, n=117)*
3Ü6TA	45 (±22)	37 (±19)	11.900 (±6.700)	14,1 (±4,8)*	70 (±30, n=89)*
6Ü6TA	59 (±19)	39 (±15)	8.600 (±3.500)	14,6 (±4,8)*	73 (±28, n=72)*
1Ü3TA	48 (±9)	57 (±17)	9.300 (±3.200)	15,1 (±5,3)*	87 (±12, n=198)*
3Ü3TA	86 (±6)	49 (±21)	8.600 (±4.000)	14,8 (±5,1)*	90 (±8, n=143)*
6Ü3TA	53 (±12)	29 (±10)	7.700 (±1.900)	15,9 (±5,1)*	92 (±85, n=90)*
C	64 (±15)	48 (±16)	9.700 (±3.100)	12,6 (±4,1)	93 (±4, n=72)
3Ü6TF	87 (±8)	57 (±13)	7.400 (±2.800)	15,6 (±5,6)*	93 (±11, n=90)
6Ü6TF	87 (±6)	51 (±11)	7.200 (±3.400)	17,1 (±5,6)*	95 (±2, n=72)
DÜ11cm	71 (±9)	24 (±13)	8.400 (±2.300)	14,5 (±5,3)*	96 (±1, n=78)
DÜ5cm	69 (±11)	18 (±10)	4.800 (±1.800)*	16,8 (±5,2)*	96 (±2, n=81)*

Um Unterschiede im Wachstum zu erklären, wurde nach jeder Austrocknungsphase bzw. vor erneutem Überstauen (bei der Kontrolle und den Dauerüberstau-Varianten einmal wöchentlich) der Wassergehalt in den Torfmoosen bestimmt. In allen Varianten mit Austrocknung waren die Torfmoose signifikant trockener und nur mit Dauerüberstau 5 cm signifikant nasser als die Kontrolle. Bei der trockensten Behandlung (1 Tag Überstau/6 Tage Austrocknung) enthielt das grobblättrige *Sphagnum palustre* mit 87 % 2,5 – 3 mal so viel Wasser wie die feinblättrigen Arten *S. rubellum* und *S. fallax* (n=369). Die verschiedenen Wassergehalte der Torfmoose wirkten sich stärker auf die Deckung grüner Torfmoose und Köpfchen sowie auf Trockenmassezuwachs und Mooslängen aus als auf die Gesamtdeckung der Torfmoose oder die Köpfchenanzahl.

Zusammenfassend wird geschlussfolgert, dass:

- 1) gelegentlicher Überstau zusätzlich zu gleichmäßigem Feuchthalten die Etablierung im Vergleich zu gleichmäßigem Feuchthalten ohne Überstau begünstigte. Als ähnlich günstig erwies sich die Kombinationen aus moderater und von der Dauer her ausgeglichener Austrocknung und Überstau (jeweils 3 Tage). Der Wassergehalt war bei allen genannten Varianten vergleichbar.
- 2) Überflutung länger toleriert wurde als Austrocknung. Torfmoose sollten möglichst so kurz wie möglich, besser gar nicht austrocknen.
- 3) *S. palustre* von den drei getesteten Arten am besten Wasser halten konnte und sich am besten etablierte, während *S. rubellum* als Bultart am schlechtesten wuchs und
- 4) von den drei getesteten Arten *S. fallax* am besten mit Dauerüberstau zurechtkam.

6.3.3. Wasserqualität und Nährstoffbilanz

Alle drei Versuchsflächen zur Minimierung des Grabenanteils zeigten eine ähnliche Spanne hinsichtlich der gemessenen Elemente, pH-Werte und Alkalinität im Gaben- bzw. Porenwasser. Dennoch wurden Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt. Die geringsten Mittelwerte wurden für pH, Bikarbonat, P, K und Fe bei der Variante ‚35 m Grabenabstand‘ gemessen, die geringsten NH_4^+ -Konzentrationen bei der gravimetrischen Bewässerungsvariante und die geringsten Na-, Cl-, Mg-, Ca- und S-Konzentrationen bei der Variante mit Druckbewässerung. Die höchsten Werte für Na, Ca und Cl wurden bei der Variante ‚35 m Grabenabstand‘ mit bis zu 2.000 μmol Na, 1.200 μmol Ca und 5.800 μmol Cl pro Liter gemessen, wobei die Werte mit größerer Entfernung vom Graben zunahm (Messpunkte 10 und 17,5 m Entfernung zum Graben) und zu den Messzeitpunkten September und November 2022 am höchsten waren. Wilcox (1984) hat einen leichten Wachstumsrückgang von *Sphagnum recurvum*-Gruppe bei einer Cl-Konzentration von 5.100 $\mu\text{mol l}^{-1}$ beobachtet. Das ist auf eine erhöhte Evapotranspiration im sehr warmen und trockenen Sommer 2022 zurückzuführen, was zu einer Akkumulation der Elemente in den Torfmoosköpfchen führt. Diese hohen Akkumulationen fehlen in den beiden Varianten mit den Bewässerungsrohren und Bewässerungsabständen von 7,5 m. Das bestätigt die schlechtere Wasserversorgung mit zunehmender Grabenentfernung (siehe Kapitel 6.3.2), wobei bislang keine Konzentrationen festgestellt wurden, die das Torfmooswachstum beeinträchtigen.

P- und K-Konzentrationen nahmen mit der Tiefe (10, 25, 50 und 100 cm, Messpunkt: Mitte der Versuchsfläche) in allen Varianten zu. Aufgrund der Abnahme von P und K mit zunehmender Entfernung zum Bewässerungsgraben bzw. -rohr wird eine Auswaschung infolge der weitestgehend kontinuierlich hohen Wasserstände vermutet. N/P-Verhältnisse von im Mittel 5 zeigen nach Aerts *et al.* (1992) eine N-Limitation an, die aufgrund hoher N-Einträge jedoch ausgeschlossen werden kann. Dahingegen deuten N/K-Werte von 4,3 im Mittel eine leichte K-Limitation an (vgl. Bragazza *et al.* 2004).

6.3.4. Treibhausgase, Herkunft C-Quellen zur Methanproduktion aus Gräben und Mechanismen zur Methanoxidation

Bei beiden Varianten zeigt sich eine CO_2 -Saisonalität mit höheren Aufnahmen und Abgaben in den Sommermonaten, stärker ausgeprägt bei der Variante ‚Unterflurbewässerung mit Druck‘ (Abbildung 42). Hier ist die höchste CO_2 -Abgabe (410 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) und -Aufnahme (934 $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$) im Mai 2022 zu verzeichnen. Bei der Variante ‚Grabenabstand 35 m‘ wiesen die Messungen direkt neben dem Graben im Mittel die höchsten CO_2 -Aufnahmen auf, was mit einer besseren Wasserversorgung und Torfmoosetablierung zusammenhängt. Die Vegetationsaufnahmen in den Messrahmen zeigten eine Abnahme der Torfmoos-Deckung von Grabennähe bis zur Flächenmitte. Dahingegen sind sowohl Torfmoos-Deckung als auch CO_2 -Aufnahmen und -Abgaben bei allen Messpunkten der Variante ‚Unterflurbewässerung mit Druck‘ ähnlich.

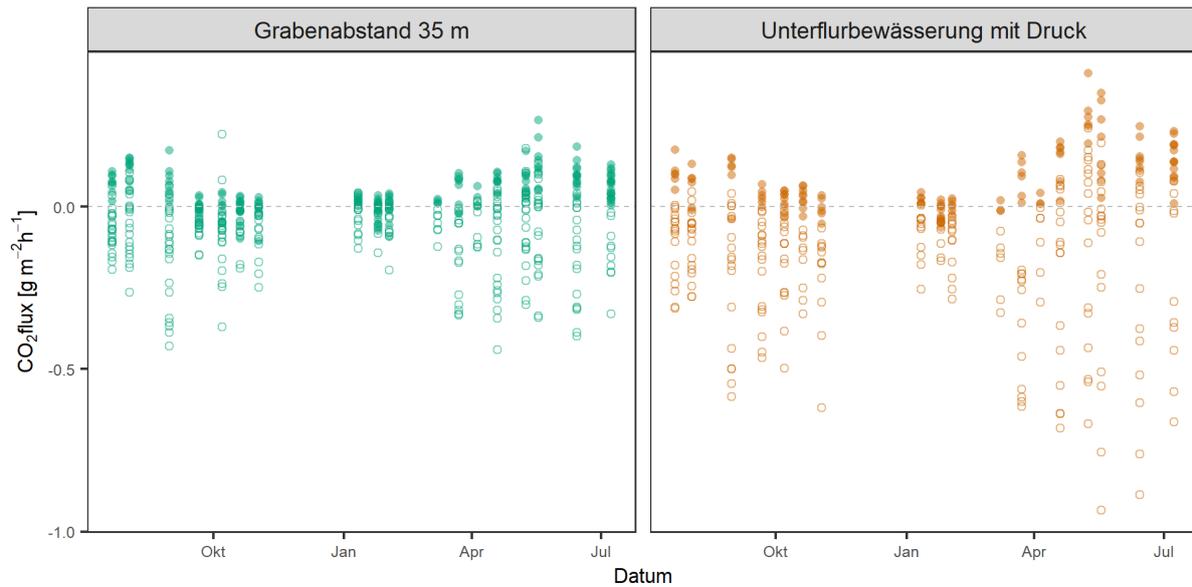


Abbildung 42. Gemessene dunkle (Punkte) und transparente (Kreise) CO₂-Flüsse (in g m⁻² h⁻¹) für die Varianten ‘Grabenabstand 35 m’ und ‘Unterflurbewässerung mit Druck’ von 07/2021 bis 07/2022.

Die CH₄-Emissionen sind bei der Variante ‘Unterflurbewässerung mit Druck’ höher als bei der Variante ‘Grabenabstand 35 m’ (Abbildung 43). Bei der Variante ‘Grabenabstand 35 m’ sind, neben vergleichsweise geringen CH₄-Emissionen, über den kompletten Messzeitraum geringe CH₄-Aufnahmen zu beobachten. Die höchsten CH₄-Emissionen wurden bei dem am weitesten vom Graben entfernt Messpunkt verzeichnet, was vermutlich auf Überstau nach Regenereignissen zurückzuführen ist. Absolut gesehen, waren die Werte jedoch ausgesprochen gering (höchster Wert Mai 2022: 0,65 mg m⁻² h⁻¹) und wichen nicht stark von den anderen Messpunkten ab.

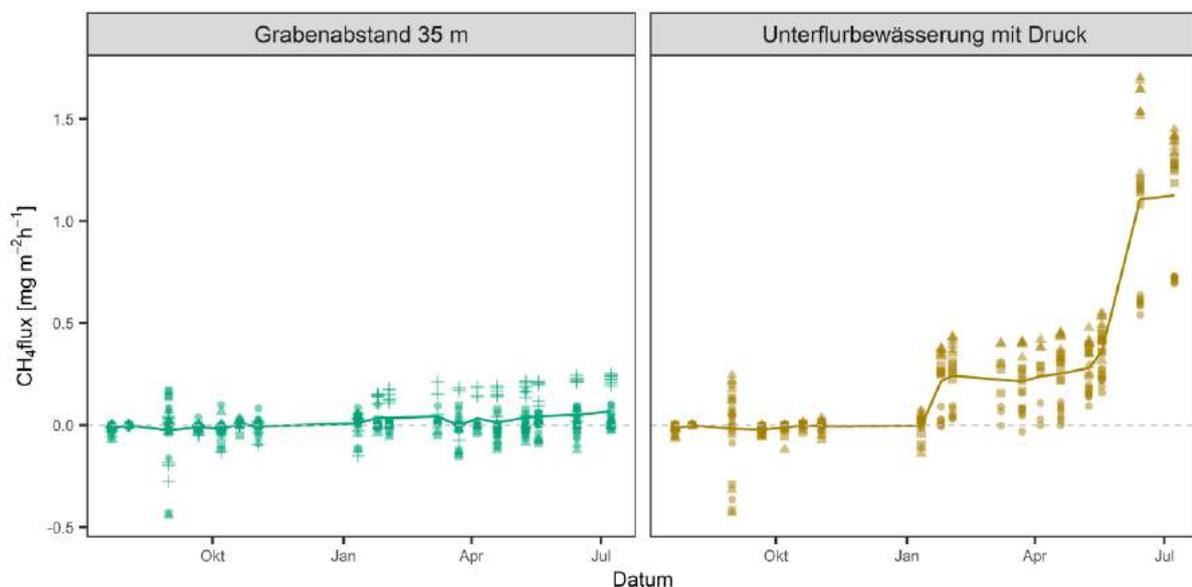


Abbildung 43. Gemessene CH₄-Flüsse (in mg m⁻² h⁻¹) für die Varianten ‘Grabenabstand 35 m’ und ‘Unterflurbewässerung mit Druck’ von 07/2021 bis 07/2022. Angegeben sind die einzelnen Messpunkte (Formen), zusammen mit den damit verbundenen mittleren Flüssen (farbige Linie, alpha = 0,5).

Weiterhin blieben die CH₄-Flüsse relativ konstant, mit einem leichten Anstieg in den Sommermonaten 2022. Die CH₄-Flüsse der Variante ‘Unterflurbewässerung mit Druck’ hingegen stiegen kontinuierlich an und erreichten im Juni 2022 die höchsten Werte (1,5-1,7 mg m⁻² h⁻¹). Vor allem zwei Messpunkte zeigten hohe CH₄-Emissionen, die immer leicht überstaut waren. Inwieweit die CH₄-Emissionen auf

beiden Varianten weiter steigen, muss zukünftig erforscht werden. Nach gegenwärtigem Stand waren die CH₄-Bilanzen für das Messjahr geringer, als die CH₄-Bilanzen auf den Torfmoos-Produktionsflächen auf Teilfläche F1. Die CO₂-Bilanzen veranschaulichen, dass beide Varianten CO₂-Senken sind, stärker jedoch die Variante 'Unterflurbewässerung mit Druck' aufgrund des hier besseren Torfmooswachstums (Tabelle 18, vgl. Kap. 6.3.1). Dahingegen war der CH₄-Fluss bei der Variante 'Unterflurbewässerung mit Druck' ungefähr 14x höher als beim 'Grabenabstand 35 m', jedoch auf einem geringen Niveau. Es ist zu berücksichtigen, dass das Modell für die CO₂-Bilanzierung der Variante "Grabenabstand 35 m" nur einen R² von 0,52 aufweist. Daher fehlen wahrscheinlich wichtige Parameter, die die CO₂-Flüsse beeinflussen. Diese könnten unter anderem die Bodentemperatur oder der Wasserstand sein. Das Auslesen der Datalogger für die Bodentemperatur steht noch aus. Eine Neuberechnung mit diesen Parametern wäre sinnvoll und sollte für die Zukunft in Betracht gezogen werden.

Tabelle 18. Jährliche Bilanzen (in g m⁻² a⁻¹ ± SD) von CO₂ und CH₄ für die Varianten 'Grabenabstand 35 m', und 'Unterflurbewässerung mit Druck' des Versuches Minimierung Grabenabstand von 07/2021 bis 07/2022. Die Klimawirkung der Varianten wurde anhand des 100-jährigen globalen Erwärmungspotenzials (GWP100) von CH₄ (=27) bewertet (Forster *et al.* 2021)

	CO ₂ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	CH ₄ (in g m ⁻² a ⁻¹ ± SD)	THG-Bilanz in CO ₂ -äq (in t ha ⁻¹ a ⁻¹)
Grabenabstand 35 m	-395 ± 85,9	0,13 ± 0,08	-3,9 ± 0,85
Unterflurbewässerung mit Druck	-902 ± 148	1,82 ± 0,44	-8,5 ± 1,5

6.3.5. Biodiversität: Flora

Die Teilflächen im Rahmen des Versuches zur Minimierung des Grabenanteils F7-4 bis -6 wiesen eine einander sehr ähnliche Artenausstattung auf und wurden deshalb zusammengefasst betrachtet (Tabelle 26). Mit insgesamt 33 Pflanzenarten waren hier weniger Arten zu finden als auf den zeitgleich eingerichteten, benachbarten Flächen für den Versuch zur Minimierung des Oberbodenabtrags, da auf letztgenannten mehr Torfmoosarten ausgebracht wurden und insbesondere bei fehlendem Oberbodenabtrag deutlich mehr Gefäßpflanzen(arten) aufwuchsen. Deshalb ähnelt das Artenspektrum bei Gefäßpflanzen auf den Teilflächen F7-4 bis -6 denen der Teilflächen F7-2 und -3 stärker als dem auf der Teilfläche F7-1 (ohne Oberbodenabtrag).

6.3.6. Ökonomie

Siehe Darstellungen in Kapitel 6.2.6.

6.3.7. Zusammenfassung

- Bei einem **Grabenabstand von 35 m** waren die Torfmoose nur suboptimal wasserversorgt. Mit zunehmendem Abstand vom Graben wurden tiefere Wasserstände und häufigerer Überstau festgestellt, verursacht durch eine langsamere Wasserzufuhr bzw. –ablauf. Diese Situation zeigte sich auch an der Nährstoffverfügbarkeit: zur Flächenmitte hin wurden weniger Phosphor und Kalium gemessen, während sich Calcium und Chlorid anreicherten. Neben der langsameren Torfmoos-Etablierung gilt es hier weiter zu untersuchen, inwieweit eine Nährstofflimitation durch P und K oder Nährstoffanreicherungen das Torfmooswachstum einschränken könnten.
- Dahingegen war die Wasserversorgung bei **Unterflurbewässerung** in beiden Varianten ähnlich gut wie bei der herkömmlichen Methode mit 10 m Grabenabstand, was auch an der guten Nährstoffverfügbarkeit ersichtlich war. Das führte zu einer besseren Torfmoosetablierung und einem besseren Torfmooswachstum als auf der Fläche mit einem Grabenabstand von 35 m und damit auch zu einer besseren THG-Bilanz.
- Im Projektverlauf wurde festgestellt, dass die Wasserführung über die **Dränrohre** nachließ. Ursache hierfür war das Zuwachsen mit Wurzeln aufwachsender Gefäßpflanzen. Eine Reinigung der Dränrohre erwies sich als sehr schwierig bis nicht machbar. Nach Ausbildung eines Torfmoosrasens ist die Wasserversorgung jedoch durch Überrieselung mit Wasser aus dem Graben an der Stirnseite der Fläche möglich. Dränrohre sind demnach nur einmalig und nur für die Etablierungsphase für die Bewässerung der Torfmoose geeignet.
- In einem Gewächshausversuch konnte gezeigt werden, dass gelegentlicher **Überstau** die Torfmoosetablierung begünstigt. Eine Austrocknung sollte so kurz wie möglich sein und besser gar nicht erfolgen. *Sphagnum palustre* wurde als die Torfmoosart identifiziert, die am besten das Wasser halten konnte, während *S. fallax* Überstau am besten vertragen hat.

6.4. Weiterführung der langfristigen Untersuchungen zu Etablierung, Wachstum, Regeneration und naturschutzfachlichem Wert der Torfmooskultur auf ehemaligem Hochmoorgrünland im Hankhauser Moor

6.4.1. Entwicklung des Torfmoosrasens

Das **Wachstum** der Torfmoose hielt auch 11 Jahre nach der Einrichtung an: die Torfmoos-Rasenhöhe nahm weiterhin zu und erreichte im Mai 2022 im Mittel 27 cm (Abbildung 44). Dahingegen war die Menge der akkumulierten Torfmoos-Biomasse 2022 geringer als im Vorjahr und umfasste 38 t Trockenmasse ha⁻¹, der Unterschied zum Vorjahr ist jedoch nicht signifikant. Die mittlere Akkumulationsrate nahm von zuvor ca. 4,4 t ha⁻¹a⁻¹ (bis 2021) ab auf 3,5 t ha⁻¹a⁻¹ im Jahr 2022. Dahingegen erreichte die Akkumulationsrate auf einer 2016 eingerichteten Fläche nach sechs Jahren Wachstum im Mittel 5 t ha⁻¹a⁻¹, da hier vermutlich die Zersetzung (anteilig) geringer war als auf der elf Jahre alten Fläche F1.

Die Deckung der **Zielarten** *S. palustre* bzw. *S. papillosum* nahm auf F1 zu Gunsten von *S. fallax* und *S. cuspidatum* weiter ab und betrug im Jahr 2022 nur noch 1 %, auf F4 kamen die Zielarten quasi nicht

vor. Die mittlere Deckung von Gefäßpflanzen nahm auf F1 stetig ab und umfasste seit 2019 < 5 %. Die Pflegemahd führte also langfristig zu einem substantiellen Zurückdrängen von Gefäßpflanzen. Braunmoose bedeckten 9 % im April 2022 und damit geringfügig mehr als die Jahre zuvor. Auf F4 kamen kaum Braunmoose vor und Gefäßpflanzen bedeckten die Fläche im Mittel mit 17 % (Juni 2022).

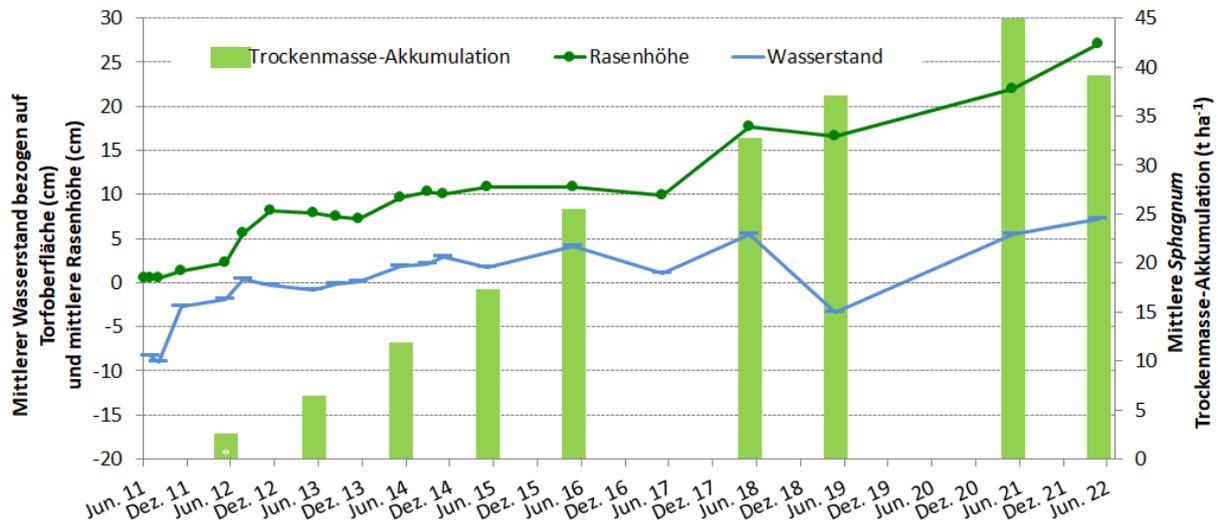


Abbildung 44. Entwicklung von mittlerer Torfmoos-Rasenhöhe (cm) und mittlerer Torfmoos-Trockenmasse-Akkumulation ($t\ ha^{-1}$) sowie mittlerer Wasserstand bezogen auf die Torfoberfläche (cm) auf den Teilflächen F1+F2 (bis April 2016) bzw. F1 (ab Mai 2017). Der niedrige Wasserstand im Juni 2019 ist auf eine kurzzeitige manuelle Absenkung in Vorbereitung auf die Ernte zurückzuführen.

Die **Regeneration** der Torfmoos-Produktionsfläche (*S. papillosum*-Variante) war sechs Jahre nach der Ernte abgeschlossen, als die Deckung der grünen Torfmoose 97% erreichte. Indessen war der Rasen im Mittel 11 cm hoch, wobei ca. 8 cm neu aufgewachsen waren. Insgesamt waren 2022 im Mittel 22 t Trockenmasse ha^{-1} akkumuliert, was einer Rate von $3,7\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ entspricht. Unter Berücksichtigung der nach der Ernte im Mittel verbliebenen $8,3\ t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ ist der Biomassezuwachs im Vergleich zu den Wachstumsflächen (F1 und F4) geringer. Auch daran ist erkennbar, dass die Regeneration wesentlich langsamer verlief als die Etablierung auf der zeitgleich neu eingerichteten Teilfläche F4, bei der im Mittel 90 % Deckung grüner Torfmoose bereits nach drei Jahren erreicht war. Der Anteil der Ziel-Sphagnum-Art war sechs Jahre nach der Ernte ähnlich wie vorher (ca. 60 %), wie auch für *S. fallax* (34 %) und *S. cuspidatum* (2 %). Die Abnahme von *S. cuspidatum* gegenüber 2019 ist durch den deutlich niedrigeren Wasserstand zu erklären, die mit Neueinrichtung der benachbarten und hydrologisch verknüpften Torfmoos-Produktionsfläche (*S. palustre*) abgesenkt wurde und seither im Mittel 12 cm unter der Moosoberfläche betrug. Auf den Teilflächen F1 und F4 mit signifikant höheren Wasserständen als auf der Regenerationsfläche waren im Jahr 2022 nahezu artenreine Bestände von *S. fallax* zu beobachten. Die Gefäßpflanzendeckung nahm während der Projektlaufzeit auf der Regenerationsfläche nicht weiter zu und betrug im Juni 2022 im Mittel 17 %. Dahingegen nahm die Deckung der Braunmoose seit 2019 auf 7 % Deckung zu.

Tabelle 19. Deckung, Rasenhöhe, Wasserstände (bezogen auf Torfmoosoberfläche) und Akkumulationsrate von Torfmoos im Juni 2022 auf den in den Jahren 2011 (F1) und 2016 (F4) eingerichteten und seither unbeernteten Flächen sowie auf der Regenerationsfläche (F2) sechs Jahre nach der Ernte. Für Rasenhöhe, Wasserstand und Akkumulationsrate sind Mittelwerte sowie (in Klammern) Minimum- und Maximalwerte dargestellt, für die Deckungen nur die Mittelwerte. Die Wasserstände wurden aus stündlichen, autonomen Messungen (Wasserstandslogger) im Graben der jeweiligen Flächen für den Zeitraum 06/2020- 05/2021 bezogen auf die mittlere Torfmoosrasenhöhe berechnet. Für Fläche F4 wurden die Torfmoosrasenhöhen und der Wasserstand dazu exemplarisch für den zwei Torfmoos-Produktionsflächen berechnet, wo im Graben der Wasserstandslogger installiert war.

	F1 ('Wachstum')	F2 ('Regeneration')	F4 ('Wachstum')
Beschreibung	Einrichtung 2011, keine Ernte	Einrichtung 2011, Ernte in 2016	Einrichtung 2016, keine Ernte
Jahre seit Einrichtung (F1, F4) bzw. Ernte (F2)	11	6	6
Gesamtdeckung Mooschicht (%)			
<i>S. palustre/ S. papillosum</i>	1	57	0
<i>S. fallax</i>	85	34	99
<i>S. cuspidatum</i>	5	2	0
Braunmoose	9	7	1
Rasenhöhe (cm)	26 (17-34)	11 (6-18)	20 (13-28)
Akkumulationsrate Torfmoos-Trockenmasse (g m ⁻² a ⁻¹)	345 (135-420)	370 (200-665)	495 (240-665)

6.4.2. Zersetzungsversuch

Im Ergebnis des Zersetzungsversuches wurde auf beiden Teilflächen F1 und F2 ein durchschnittlicher Biomasseverlust von 20 % festgestellt. Der Biomasseverlust war am Rand der Torfmoos-Produktionsfläche um 18 % (F1) bzw. 25% (F2) höher als in der Mitte. Mit zunehmender Tiefe nahm der Biomasseverlust ab und war in der obersten Schicht mit durchschnittlich 30 % am höchsten. Auf Artebene verlor auf F2 *S. fallax* in der obersten Schicht mit durchschnittlich 41 % signifikant die meiste Biomasse und auf F1 *S. palustre* in der obersten Schicht mit durchschnittlich 33 %, jedoch nicht signifikant verschieden von den anderen Moosarten.

Der Biomassezuwachs im Zeitraum November 2021 bis November 2022 umfasste im Mittel 410 g Trockenmasse m⁻², auf F1 mit 450 g mehr als auf F2 mit 370 g m⁻², wobei auf beiden Teilflächen der Zuwachs am Rand ca. 11 % höher war als in der Mitte der Torfmoos-Produktionsfläche.

Die Ergebnisse des Zersetzungsversuches bestätigen die Ergebnisse der Biomassebestimmung auf F1. Wenn von den in 2021 festgestellten 43 t Trockenmasse ca. 20 % zersetzt werden und zugleich 4,5 t neuer Trockenmasse zuwachsen, ergibt das 38,5 t akkumulierte Trockenmasse pro ha in 2022 genau die für 2022 bestimmte Menge (vgl. Abbildung 44).

Der Wasserstand auf F1 betrug im Mittel 7 cm unter der Moosoberfläche und war damit höher als auf F2 (im Mittel 15 cm, Tabelle 20). Der Wassergehalt der Mooschichten, die sich nicht unter Wasser

befanden, betrug im Durchschnitt 95 %, wobei dieser mit zunehmender Tiefe zunahm. Die Bodentemperatur war mit zunehmender Tiefe ausgeglichener.

Mit zunehmendem Wassergehalt der Torfmoosbiomasse und höheren Wasserständen, also geringerem aeroben Einfluss sowie zunehmendem Alter der Biomasse sinkt deren Zersetzungsrate (Golovatskaya & Nikonova 2017, Ekström *et al.* 2022), was die Ergebnisse in unserem Feldversuch bestätigt. Breeuwer *et al.* (2008) und Ekström *et al.* (2022) finden keinen Zusammenhang zwischen Temperatur und Zersetzungsrate, weshalb wir auch einen geringen Einfluss der Temperaturabnahme auf die ebenfalls mit der Tiefe abnehmende Temperatur vermuten.

Tabelle 20. Mittlerer Wasserstand und mittlere Torfmoos-Rasenhöhe für den Feldversuch zur Zersetzung auf den Flächen F1 und F2 sowie der Lage am Grabenrand (Rand) und in der Mitte der Produktionsfläche liegend mit 5 m Entfernung zum Graben (Mitte). Wasserstand (Mittelwert, Minimum, Maximum) ist berechnet aus 4 Messzeitpunkten und jeweils 5 Messungen, bezieht sich auf Torfmoosoberfläche.

	F1 Mitte	F1 Rand	F2 Mitte	F2 Rand
Wasserstand (cm)	-7 (-5- -11)	-7 (-4- -13)	-14 (-6- -21)	-16 (-13- -21)
Rasenhöhe (cm)	29	31	18	19

6.4.3. Hydrologie

Langjähriges Wassermanagement, Wasserbilanzen und Wasserhaushaltskomponenten

Die Wasserstände auf den Torfmoos-Produktionsflächen der Teilflächen F1 und F2 schwanken über neun Jahre und auf den Teilflächen F4 und F5 über fünf Jahre nur geringfügig, maximal um 20 cm mit Ausnahme von F4 (Abbildung 45, Abbildung 46). Die Torfmoosrasen benötigen konstante Wasserstände wenige Zentimeter unterhalb der Moosoberfläche. Diese konnten durch aktives **Wassermanagement** mit zusätzlicher Bewässerung im Sommer und Ablassen von Überschusswasser im Winter gewährleistet werden. Die Wasserstände wurden mit dem Wachsen der Torfmoose angehoben (F1, 4 und 5, Abbildung 45, Abbildung 46). Inwieweit und wie schnell der Grabenwasserstand auch in der gesamten Produktionsfläche eingestellt werden kann, wurde für die Flächen F1 und F2 untersucht, indem Pegel im Graben und auf den Torfmoos-Produktionsflächen installiert wurden. Die Wasserstände waren im Graben und den Torfmoos-Produktionsflächen nahezu gleich (Abbildung 45). Das weist auf eine hohe horizontale Wasserleitfähigkeit durch die neu aufgewachsene Torfmooschicht hin, die ein sehr präzises Wassermanagement durch das Einstellen gewünschter Wasserstände in den Gräben ermöglicht.

Größere Wasserstandschwankungen wurden in dem Vorfluter Schanze festgestellt (Abbildung 45). Die Amplitude betrug knapp einen Meter, während die mittleren Wasserstände bei -1,5 mNN lagen. Überflutungen durch die Schanze, die z. T. Wasserstände über dem Geländeniveau der Anbauflächen hatte, wurden durch die Fahrdämme und Rückstauklappen in den Überläufen, die Überschusswasser in die Schanze entwässerten, verhindert.

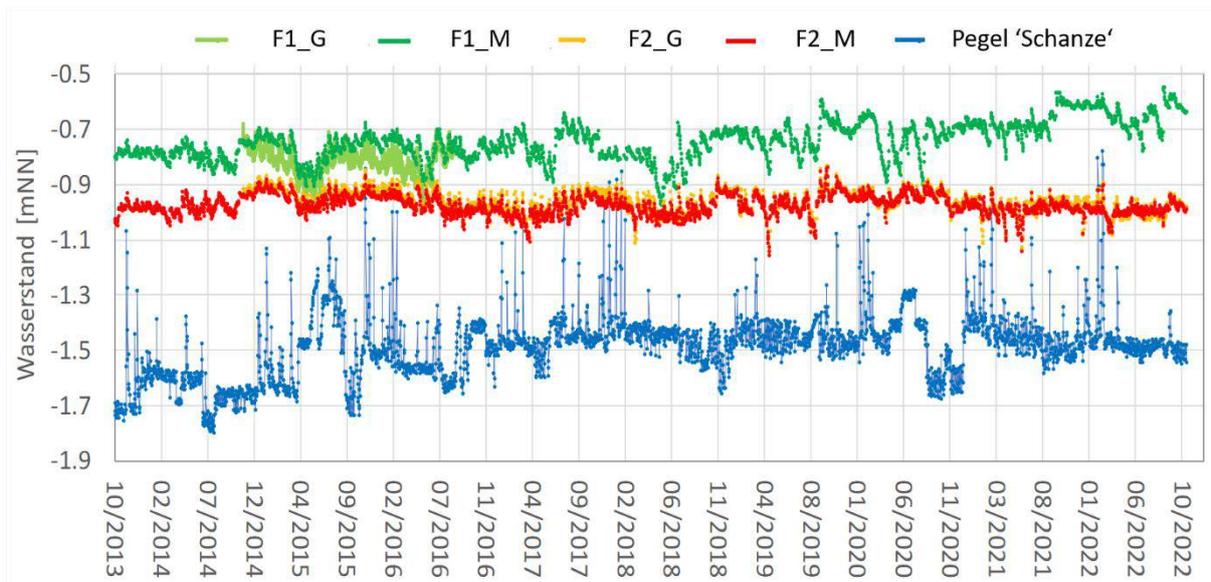


Abbildung 45. Wasserstände der Teilflächen F1 (Flachwasserpegel F1_G und F1_M, G = Graben, M = Torfmoos-Produktionsflächenmitte), F2 (F2_G und F2_M), sowie Oberflächenwasserpegel im Vorfluter ‚Schanze‘ (in mNN) im Zeitraum 01.10.2013 bis 08.11.2022. Aufgrund der unterschiedlichen absoluten Höhen der Torfoberflächen für die einzelnen Teilflächen bzw. der Wasseroberfläche des Vorfluters ‚Schanze‘ haben die Wasserstände unterschiedliche Niveaus.

Der Zusammenhang zwischen Wasserstand und Niederschlag wird für die Flächen F4 und F5 dargestellt (Abbildung 46) und zeigt ein Ansteigen der Wasserstände um bis zu 3 cm bei Niederschlägen von ca. 5 mm d⁻¹, wobei die Wasserstände innerhalb von 10-15 h wieder absanken.

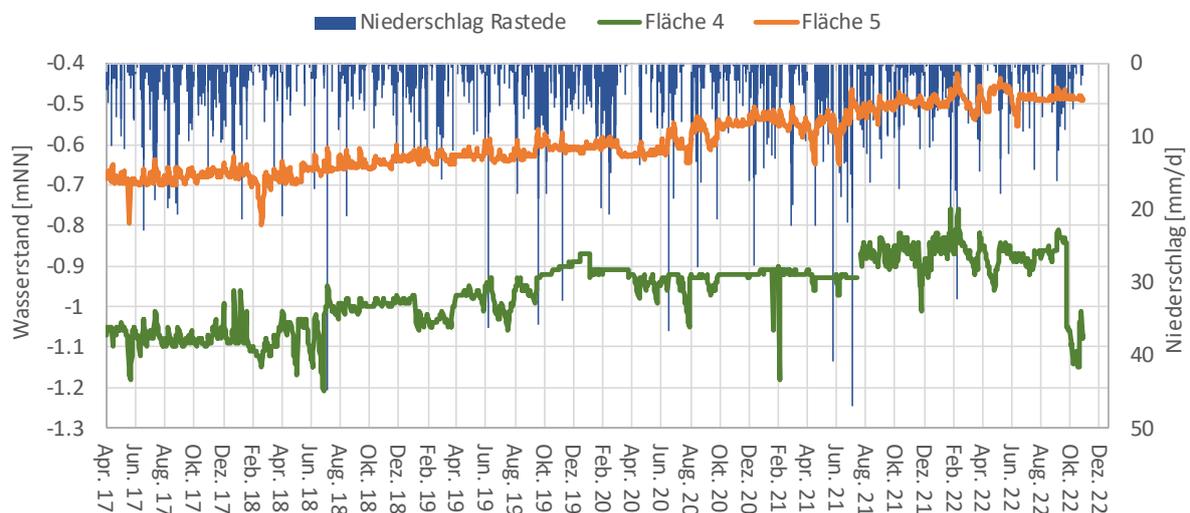


Abbildung 46. Wasserstände auf den Teilflächen F4 und F5 (grüne und orange Linie, jeweils am Überlauf gemessen) sowie Niederschlag der Station Rastede (blaue Balken) im Zeitraum von 04/2017 bis 12/2022.

Die langjährige Betrachtung der einzelnen **Wasserhaushaltskomponenten** zeigt eine große Variabilität der Einzelkomponenten (Abbildung 47). Die Jahre 2021 und 2022 unterschieden sich z.B. stark hinsichtlich der Wasserversorgung über den Niederschlag. 2021 fiel insbesondere in den Sommermonaten regelmäßig Niederschlag, so dass es nur 2 % zusätzlicher Bewässerung bedurfte, während diese im Jahr 2022 18 % Anteil an der **Wasserhaushaltsbilanz** hatte und viel größere Bewässerungsmengen gebraucht wurden. Ursache hierfür waren hohe Temperaturen und hohe

Einstrahlung im Jahr 2022, die zu einem größeren Wasserverlust über die Verdunstung führten. Zusätzlich erhöhten geringere Niederschlagsmengen das Wasserdefizit. So fielen in den Monaten April bis Oktober 2021 in Summe 617 mm Niederschlag, im gleichen Zeitraum 2022 nur 342 mm. Der Abfluss in den beiden Jahren 2021 und 2022 war anteilig und in der Menge vergleichbar, trotz unterschiedlicher Niederschlagsmengen.

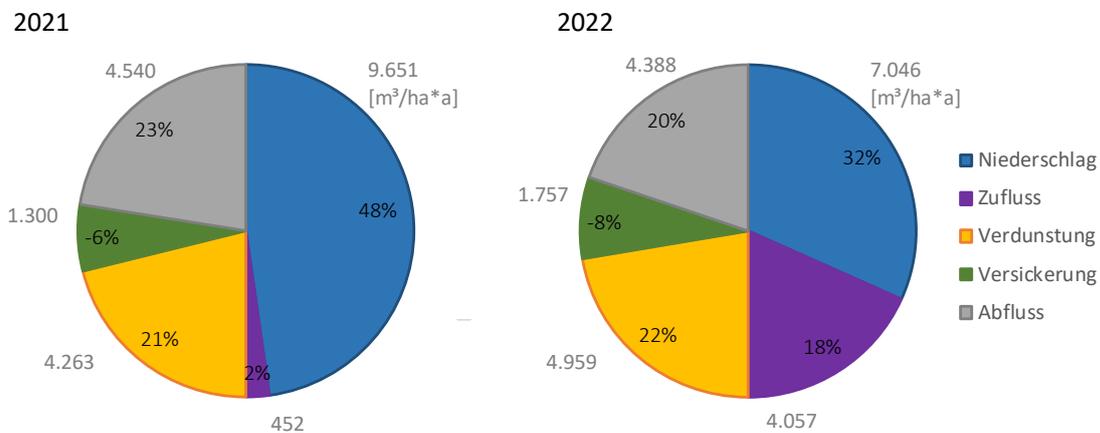


Abbildung 47. Wasserhaushaltskomponenten der hydrologischen Jahre 2021 und 2022 für die Teilfläche F4.

Der zusätzliche **Wasserbedarf** betrug in 2021 ca. 450 m³ pro Hektar und in 2022 4.060 m³. Dass 2021 besonders nass und 2022 besonders trocken war, zeigt die von Brust *et al.* (2018) ermittelte durchschnittliche Bewässerungsmenge von jährlich 1.600 m³ pro Hektar für die Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor, wobei maximale Bewässerungsmengen von ~6.400 m³ ha⁻¹ a⁻¹ bei mehreren aufeinanderfolgend trockenen Jahren berechnet wurden. Die Langzeitmessreihe seit 2011 liefert somit wertvolle Informationen über den Wasserbedarf von Torfmoos-Paludikulturflächen auch unter extremen Witterungsbedingungen.

Deutliche Unterschiede zwischen Anbauphasen (Aussaat, Etablierung des Moosrasens, Vollständige Deckung mit Torfmoosen, nach Ernte) sind aus Sicht des Wasserbedarfs nicht abzuleiten. Der Wasserbedarf für eine optimal versorgte Torfmoos-Paludikultur ist viel mehr abhängig vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre und von den Versickerungsströmen (in Abhängigkeit der lokalen Wasserstandsgradienten an den Rändern der Anbaufläche).

Für die Torfmoosernte wird der Wasserstand auf der zu beerntenden Anbaufläche im Vorfeld je nach Witterung bis zu 14 Tage vorher auf bis zu 30 cm unterhalb des ursprünglichen Niveaus abgesenkt. Erfahrungen zur Ernte in Vorgängerprojekten zeigten, dass zu nasse Torfmoose schwer mit einem Balkenmäher abgeschnitten werden können und zu schwer waren. Nach der Ernte wird der Wasserstand wieder auf wenige Zentimeter unterhalb der Torfmoosoberfläche (nach Abschneiden verbliebene Torfmoosstängel oder neu ausgestreute Torfmoosfragmente) angehoben. Aufgrund der tiefen Absenkung wird dafür viel Wasser zusätzlich benötigt. Wählt man jedoch den Absenktermin günstig für eine Zeit mit den geringsten Wasserdefiziten (Ende Herbst/Beginn Winter) kann diese Wassermenge in ein bis zwei Monaten wieder ausschließlich durch den Rückhalt von Niederschlagswasser aufgefüllt werden. Es würde somit kein größerer Zusatzwasserbedarf entstehen, die enormen Winterabflüsse von den Flächen würden sich lediglich um die entstandene Differenz reduzieren. Erntetermine, die eine Wasserstandsabsenkung benötigen sind daher aus Sicht des Wasserbedarfs immer zwischen Mitte Oktober und Mitte Januar zu planen.

Wasserstandsunterschiede in der Torfmoos-Paludikulturfläche

Um Auswirkungen der hohen Wasserstände der Torfmoos-Produktionsflächen auf deren Umgebung einzuschätzen, wurden Daten auf angrenzenden Flächen, v.a. auf Fahrdämmen ausgewertet (Abbildung 48). Die Wasserstände der direkt an die Torfmoos-Produktionsflächen von F4 und F5 angrenzenden Pegel (P-1, 2, 3 und P-6, Abbildung 48) zeigten eine zeitnahe Reaktion auf gefallene Niederschläge mit höheren Anstiegen der Wasserstände als auf den Produktionsflächen. Die Amplituden der Pegel waren unterschiedlich hoch. Geringe Wasserstandsschwankungen im Pegel zwischen den Teilflächen F4 und F7 (P-1) weisen auf einen konstanten Wasserfluss und damit auch Wasserverlust von der Teilfläche F4 hin, die zumeist höhere Wasserstände im Vergleich zum nördlich angrenzenden Graben hatte. Der Pegel westlich von F4 (P-2) hat insbesondere in den trockenen Sommermonaten höhere Wasserstände als die nördlich (P-1) und südlich gelegenen Pegel (P-6), was darauf zurückzuführen ist, dass er sich im Anstrombereich des Grundwassers befindet und dadurch, insbesondere im Sommer deutlich, ein Absinken des Wasserstandes verringert wird (Abbildung 48). (Abbildung 48).

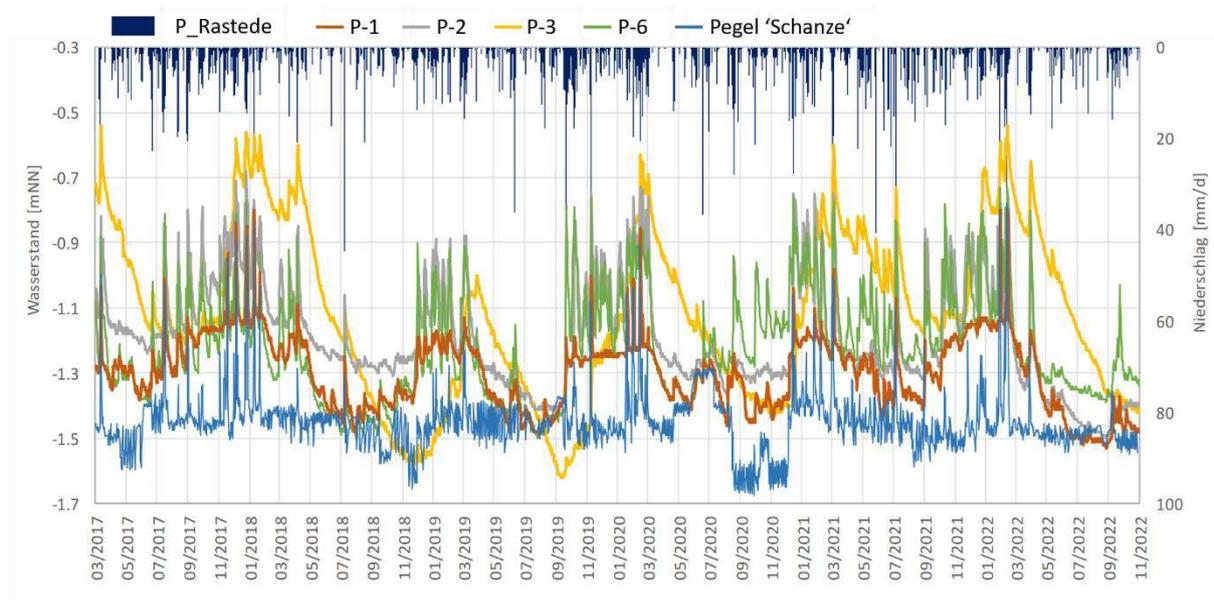


Abbildung 48. Wasserstände in der Anbaufläche mit verschiedenen Pegeln (Linien) sowie Niederschlag der Station Rastede (blaue Balken) und Wasserständen der Schanze (hellblaue Linie) im Zeitraum von 03/2017 bis 11/2022.

Am stärksten schwankte der Wasserstand im Pegel P-3 zwischen F4 und Vorfluter ‚Schanze‘. Hier wurden in den Wintermonaten höhere Werte sowie ganzjährig langsamere Reaktionszeiten sowohl im An- als auch im Abstieg der Wasserstände gemessen. Ursache dafür waren deutlich geringere hydraulische Leitfähigkeiten des umliegenden Bodens und somit geringerer Einfluss durch unterirdische Anströme (in Richtung Schanze) sowie die stärkeren Wasserstandsanstiege direkt nach Niederschlägen.

Im Sommer 2021 fielen regelmäßig Niederschläge, was sich in den Wasserständen aller Pegel zeigt (Abbildung 48), die für diesen Zeitraum höher waren als in den Vorjahren. Die Einrichtung des Filterbeckens FB2 am Südrand der Fläche hatte Einfluss auf die Wasserstände des in der Nähe südlich gelegenen Pegels (P-6). Dadurch, dass die Wasserstände in dem Filterbecken konstant hochgehalten wurden und Wasser aus dem Filterbecken versickert, sank auch der Wasserstand in diesem Pegel weniger stark ab.

Neben Verdunstung und den oberirdischen Abflüssen stellten die unterirdischen Abflüsse eine wichtige Verlustgröße dar (Abbildung 47). Hauptursachen dafür waren die Lage der Anbauflächen in entwässerter Umgebung und Wasserständen über denen in der Umgebung zum einen sowie konstant hohe Wasserstände auch in sehr trockenen Perioden und einer hohen hydraulischen Leitfähigkeit der oberflächennahen Torfe zum anderen. Der Umfang der Versickerung war abhängig von der absoluten Höhe und Lage der Teilflächen zueinander sowie deren Entfernung zur entwässerten Umgebung und deren Ausrichtung zum Grundwasserstrom.

Während die vertikale Versickerung aufgrund einer unterlagernden Stauschicht und hohen Grundwasserständen eine untergeordnete Rolle spielte, war die horizontale Versickerung hoch. Sie war umso höher je größer der Unterschied zwischen den hohen Wasserständen der Anbaufläche und den tieferen Wasserständen der Umgebung, insbesondere die die Torfmoos-Paludikulturfläche nördlich und südlich umgebenen Gräben mit tiefen Wasserständen im Sommer (Abbildung 49).

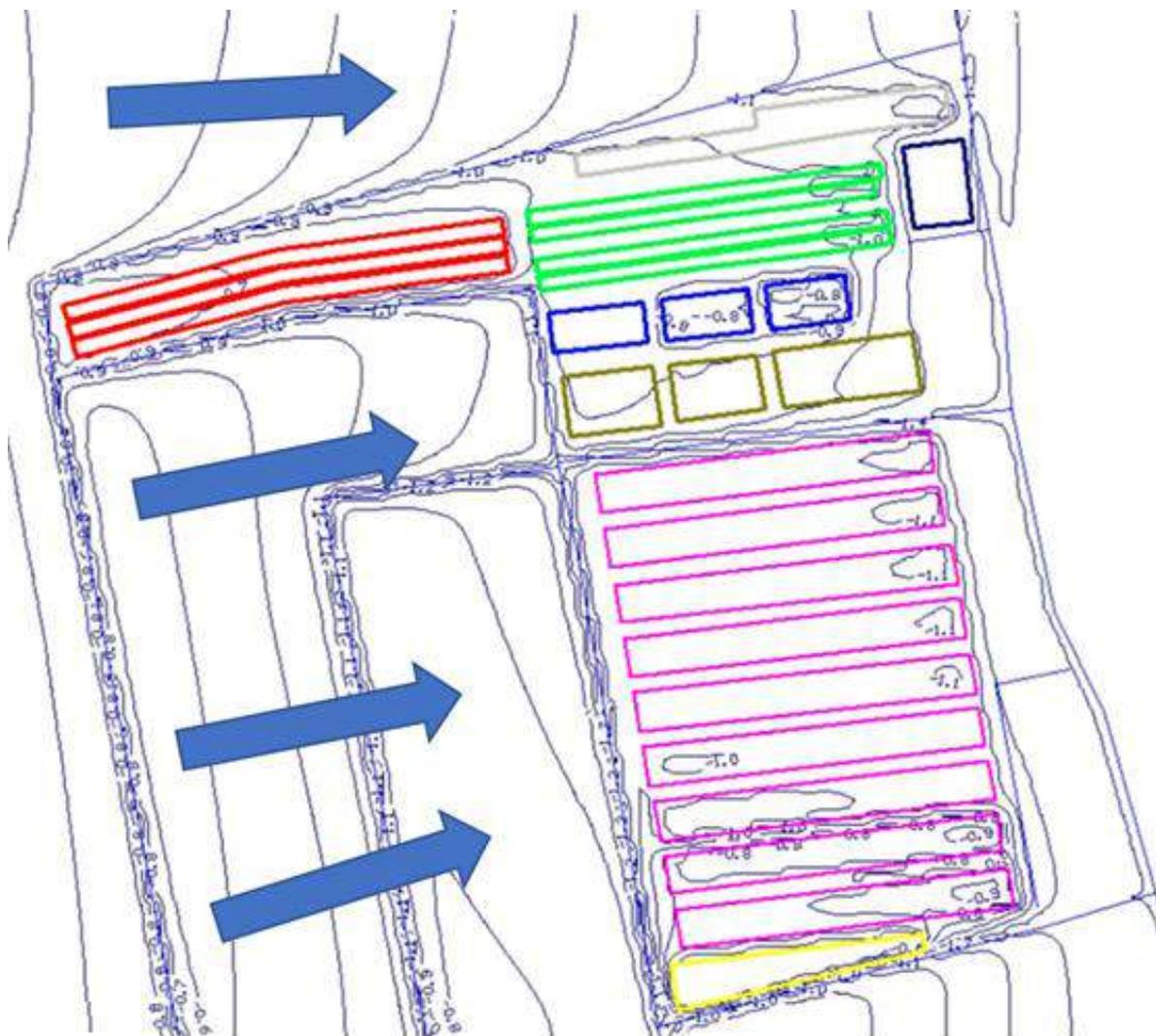


Abbildung 49. Modellergebnis Visual-MODFLOW auf Basis von Wasserstandsmessungen im Juni 2022; Moorwasserisohypsen (grau Linien) für die Torfmoos-Paludikulturfläche und Umgebung mit Torfmoos-Produktionsflächen (farbig umrandet) und Entwässerungsgräben und Vorfluter ‚Schanze‘ (blaue Linien). Großräumige Grundwasserströmung von West nach Ost (blaue Pfeile).

Innerhalb der Torfmoos-Paludikulturfläche verringerten unterirdisch abströmende Wassermengen einer Teilfläche Wasserverluste von anderen Teilflächen (z.B. F1 zu F2). Das kann bei der Flächeneinrichtung berücksichtigt werden, insbesondere, wenn die Wasserstände der Anbaufläche über dem lokalen Grundwasserspiegel liegen. Wenn es von den örtlichen Gegebenheiten her möglich ist, empfiehlt sich die Anpassung des Wasserspiegelgefälles innerhalb der Anbaufläche an das natürliche Wasserspiegelgefälle der Umgebung, d. h. die Wasserspiegelunterschiede zwischen benachbarten Teilflächen/Gräben geringzuhalten. Der horizontale Wasserverlust nimmt ab je größer die Flächen werden, wobei die Anbauflächen mit möglichst wenig Anteil an Randfläche angelegt werden sollten. Innerhalb der Anbauflächen sind große Unterschiede in den absoluten Zielwasserständen (in mNN) zu vermeiden. Lassen sich Unterschiede in den absoluten Zielwasserständen nicht vermeiden, sollte der absolute Zielwasserstand innerhalb der Anbaufläche zu den entwässerten Rändern hin abnehmen. Wenn die unterirdischen Verluste sehr gering gehalten werden können (beispielsweise bei der Nutzung eines kompletten Moores für Torfmoos-Paludikultur) ist zu berücksichtigen, dass auch zu viel Wasser das Torfmooswachstum beeinträchtigt. Liegen Flächen so tief, dass die Wasserstände unter denen der Umgebung liegen, ist bei der Ableitung von Überschusswasser (z.B. nach Starkregen) entsprechend Energie aufzubringen (Pumpen).

Einfluss hoher Wasserstände auf die Umgebung

Um den Einfluss der hohen Wasserstände auf den Torfmoos-Produktionsflächen auf die Umgebung zu bewerten, wurden die Wasserstände der Pegel auf einer Hochmoorgrünlandfläche westlich von F4 (P-4) und auf der Torfmoos-Produktionsfläche von F4 (P-5) verglichen (Abbildung 50). Zwischen beiden Pegeln verläuft ein Entwässerungsgraben, der die Torfmoos-Anbaufläche im Osten begrenzt. Es zeigt sich, dass das Anheben der Wasserstände auf der Torfmoos-Produktionsfläche keinen Einfluss auf die Wasserstände außerhalb der Anbaufläche hat. Die Wasserstände auf F4 wurden mit dem Torfmooswachstum im langjährigen Verlauf angehoben. Die Wasserstände im Pegel westlich von F4 hingegen bleiben in einer unveränderten Höhe und waren weiterhin vom umliegenden Grundwasserleiter beeinflusst, wie die innerjährlichen Schwankung der Wasserstände zeigten (Abbildung 50). Ebenso sanken die Wasserstände auf der an F4 westlich angrenzenden Fläche in trockenen Zeiten, wie Sommer 2018 und 2022 mit bis zu 45 cm Unterschied tiefer als die Wasserstände der Torfmoos-Produktionsfläche von F4, wobei die Pegel ca. 25 m voneinander entfernt liegen.

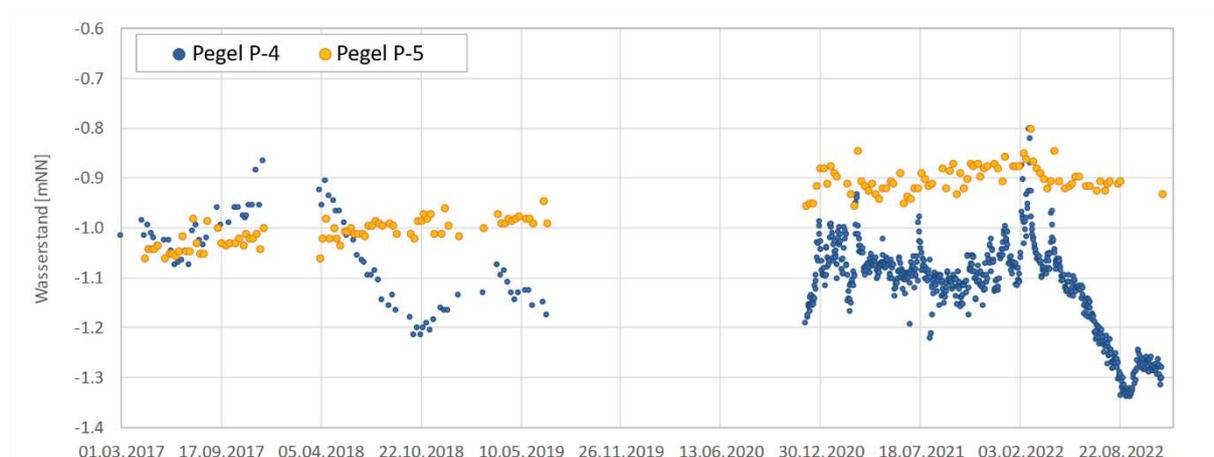


Abbildung 50. Wasserstände in den Pegeln westlich von Teilfläche F4 (Hochmoorgrünland) (P-4, blaue Punkte) und auf der Torfmoos-Produktionsfläche von F4 (P-5, orange Punkte) im Zeitraum 03/2017 bis 12/2022.

Hydrologische Regulationsschicht

Um die Eignung einer neu aufgewachsenen Torfmooschicht als hydrologische Regulationsschicht einzuschätzen, wurden die Wasserleitfähigkeit sowie Fähigkeiten zur Wasserspeicherung und -rückhalt bzw. Reduzierung von Wasserverlusten untersucht und unter Einbeziehen von einschlägiger Literatur weiter durchdacht.

Im Versuch zur **Wasserleitfähigkeit** mit Wasserstandsanhhebung auf der Teilfläche F1 stieg der Wasserstand im Graben (Pegel R1) unmittelbar mit der Wasserzufuhr durch das Anstellen der Pumpen an, während in den Pegeln in den Torfmoos-Produktionsflächen erst nach mehreren Stunden ein Anstieg zu beobachten war (Abbildung 51, Pegel R2+3). Es wurden hydraulische Leitfähigkeiten von 20 und 40 m d⁻¹ berechnet. Das sind sehr hohe Wasserleitfähigkeiten, wie sie auch für sehr gering zersetzte Hochmoortorfe (H1-3) beschrieben werden (Tiemeyer *et al.* 2017, Baden & Eggelsmann 1963, Zinke & Edom 2006). Somit kann durch diese Schicht das Wasser schnell zugeführt werden, um Wasserverluste auszugleichen sowie in Zeiten von Wasserüberschuss (z.B. nach Starkregenereignissen) das Wasser abgelassen werden, um den Überstau von Torfmoosen zu vermeiden.

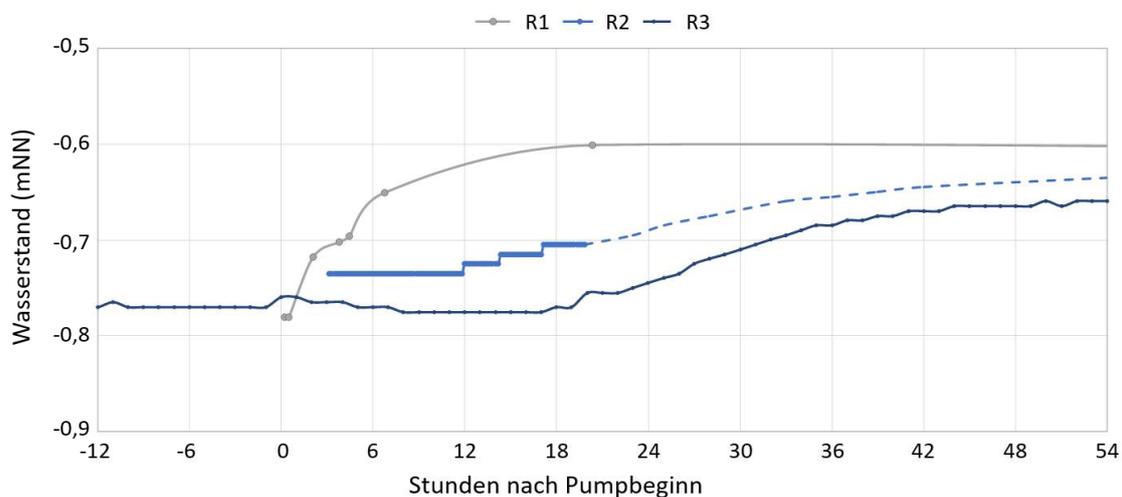


Abbildung 51. Anstieg der Wasserstände in Pegeln mit Pumpbeginn (in Stunden) nach Ablassen von Wasser bis auf ca. 4 cm über der alten Torfoberfläche innerhalb eines 26 cm hohen Torfmoosrasens für drei verschiedene Standorte (im Graben (R1) und innerhalb der Torfmoos-Produktionsfläche (R2, R3) von Teilfläche F1 (Lage siehe Abbildung 8)).

Zur Untersuchung der Fähigkeit zur **Wasserspeicherung** und **Wasserhaltung** der Torfmooschicht im Vergleich zum unterliegenden Torfkörper wurden die Trockenrohdichten bestimmt. Die Trockenrohdichte der Torfmoos-Biomasseschicht ist mit 0,01-0,04 g cm⁻³ sehr gering im Vergleich zum unterliegenden (alten) schwach zersetzten Torfmoos-Torf mit 0,06 g cm⁻³ in der Torfmoos-Paludikulturfläche nach Oberbodenabtrag und dem vererdeten Torf in den obersten 10-20 cm ohne Oberbodenabtrag bei Grünlandnutzung mit 0,25 g cm⁻³. Die sehr geringe Trockenrohdichte der Torfmoos-Biomasseschicht lässt einen hohen Anteil von Grobporen vermuten, die für lebende Torfmoosrasen und sehr schwach zersetzte Torfmoos-Torfe mit > 85 % ermittelt wurden (Edom *et al.* 2010). Dadurch kann in dieser Schicht mehr Wasser aufgenommen werden ohne starke Wasserstandsänderung im Vergleich zu den Torfen mit kleineren und weniger Porenräumen. Somit kann diese Torfmoos-Biomasseschicht auch eingeschränkt (mit Vermeidung von Überstau der Torfmoose) für die Speicherung von Wasser dienen. Zugleich führen Wasserverluste durch Verdunstung zu einer geringeren Wasserstandsabsenkung als im Torf. Zudem bestimmt die Elastizität der Torfmoos-Biomasseschicht, wie stark sich der relative Wasserstand in Bezug auf die Torfmoosoberfläche ändert und Überstau und Austrocknung der wachsenden Torfmoose (oberste ca.

5 cm) abpuffern kann. Dabei nehmen die Wirkungsgrade der Wasserspeicherung, -haltung und Elastizität mit der Mächtigkeit der Torfmoos-Biomasseschicht zu. Um hierzu genauere Angaben treffen zu können, sind Messungen zum Aufquellen und Zusammenschrumpfen der Mooschicht bei Wasserzufuhr sowie Wasserverlusten (Messung der ‚Moos‘atmung) notwendig.

Damit die Regulationsschicht die oben genannten Eignungsparameter erfüllt, sind die **Torfmoos-Arten** entscheidend, die diese bilden. Hierbei zeigt sich, dass dafür strukturstabile Torfmoos-Arten (z.B. *Sphagnum palustre*, *S. papillosum*, *S. rubellum*) notwendig sind. Bei einem hohen Anteil von Arten, die schnell zersetzt werden (z.B. *S. fallax*), nimmt der Anteil der Grobporen schneller ab und ist die Wasserleitfähigkeit der Torfmoos-Biomasseschicht eingeschränkt. Dadurch erfolgt nach Starkregenereignissen der Ablauf des Wassers nicht ausreichend schnell und wachstumshemmende Algen können sich etablieren, wie im Vorgängerprojekt MOOSWEIT in der Regenerationsphase nach Ernte des oberen Teils eines maßgeblich aus *S. fallax* bestehenden, fünfjährigen Torfmoosrasens auf Teilfläche F2 beobachtet.

Die Möglichkeit zur **Verringerung der Wasserverluste durch Verdunstung** ist im Vergleich zur nassen Torfschicht nur eingeschränkt möglich. Aufgrund der dunkleren Farbe von vegetationsfreien Torfen ist hier die Reflektion des einstrahlenden Sonnenlichtes (Albedo) geringer (7- 10 % Reflektionsstrahlung) als bei der helleren Torfmoos-Biomasseschicht (grün 15- 25 % und weiß > 50 % Reflektionsstrahlung, Succow & Joosten 2001, Van Wijk & Scholte Ubing 1963). Dadurch nehmen (vegetationsfreie) Torfe mehr Strahlungsenergie auf, was eine höhere Verdunstungskühlung und damit Wasserverlust zur Folge hat. Die Neueinrichtung einer Torfmoos-Paludikulturfläche auf einer nicht abgeernteten Torfmoos-Biomasseschicht würde deshalb den Bedarf an Bewässerungswasser reduzieren.

Die Untersuchungen zeigen, dass in dem künstlichen System einer Torfmoos-Paludikultur zwar eine hydrologische Regulationsschicht durch neu aufgewachsene Torfmoos-Biomasse gebildet werden kann, die Vorteile für das Wassermanagement der Torfmoos-Produktionsflächen bietet, jedoch keine Selbstregulationsschicht wie in natürlichen Hochmooren.

6.4.4. Wasserqualität und Nährstoffbilanz

Auch zehn Jahre nach der Einrichtung der Torfmoos- Anbaufläche in 2011 werden auf den Torfmoos-Produktionsflächen hohe Mengen an Kohlenstoff und Nährstoffen durch das Wachstum der Torfmoose in deren Biomasse aufgenommen, aus Nährstoffen vor Ort, Bewässerungswasser und atmosphärischen Einträgen. Dies führte zu einer neuen, 30 cm dicken organischen Schicht, die 2.600 kg ha⁻¹ a⁻¹ Kohlenstoff, 56 kg Stickstoff, 3,2 kg Phosphor und 9,0 kg Kalium gebunden hat. Die Nährstoffkonzentrationen im Porenwasser waren niedrig und blieben in der obersten Torfschicht im Laufe der Zeit relativ stabil, während die Ammoniumkonzentrationen im Torfprofil bis zu einer Tiefe von 100 cm innerhalb von 10 Jahren stark von 400-700 auf 0-50 µmol l⁻¹ abnahmen. Auch nach 10 Jahren Bewässerung mit nährstoffreichem Wasser und jährlichen atmosphärischen N-Einträgen von 21 kg N ha⁻¹ a⁻¹ (UBA 2022) sind keine nährstoffbedingten Hemmungen des Torfmooswachstums festzustellen. Neben dem Bewässerungswasser können die Fahrdämme indirekt Nährstoffquellen für die Torfmoos-Produktionsflächen sein, indem Nährstoffe ausgespült werden und in das Bewässerungswasser gelangen. Die Nährstoffgehalte in den Fahrdämmen sind weiterhin hoch und denen von konventionell genutzten Hochmoorgrünlandflächen ähnlich, nehmen im Laufe der Zeit aber langsam ab (1,3- bis 2fach geringerer Gehalt an N, P, K).

6.4.5. Treibhausgase

Der Fahrdamm war wie im Vorgängerprojekt MOOSWEIT (Daun *et al.* 2023) wieder eine deutliche CO₂-Quelle. Die höchste CO₂-Abgabe wurde hier in den Sommermonaten Juni-August 2020 gemessen (Abbildung 52). In dieser Zeit wurden Flüsse deutlich über 2 g m⁻² h⁻¹ erfasst, was auf eine sehr starke Verarmung hinweist. Die höchste Aufnahme fand hingegen im Mai 2021 statt. Die Torfmoos-Produktionsflächen zeigten, wie der Fahrdamm, eine ausgeprägte Saisonalität der CO₂-Flüsse, die bei der Variante 'Wachstum seit 2011' deutlich stärker zu sehen war. Die maximalen Flüsse auf den Torfmoos-Produktionsflächen waren 2-3 Mal niedriger als auf dem Fahrdamm (Abbildung 53). Die höchsten CH₄-Flüsse wurden im Juli-September 2020 auf den beiden Torfmoos-Produktionsflächen beobachtet und gehen im Jahr 2021 deutlich zurück. Der Fahrdamm erwies sich als leichte CH₄-Senke.

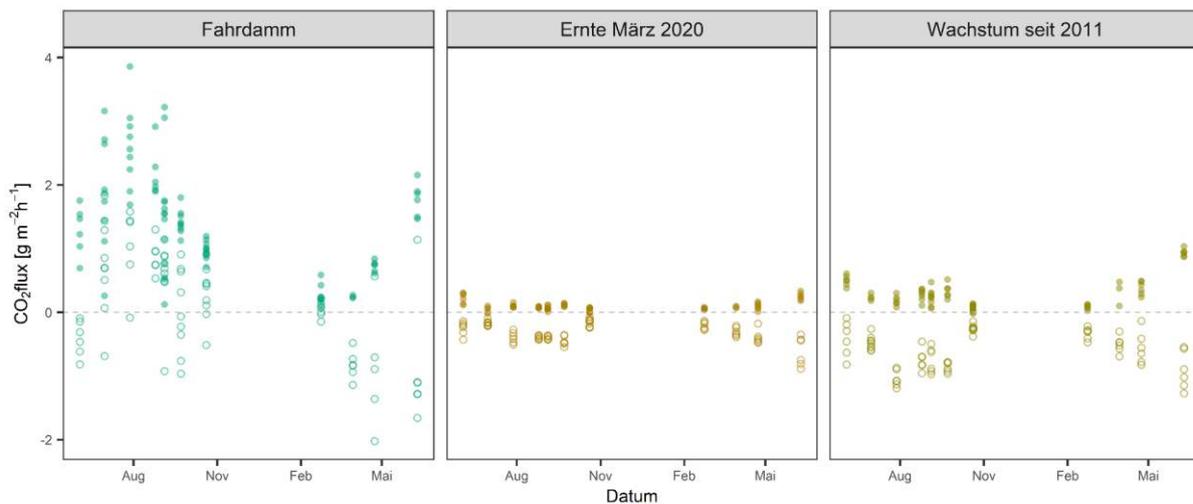


Abbildung 52. Gemessene dunkle (Punkte) und transparente (Kreise) CO₂-Flüsse (in g m⁻² h⁻¹) für die Varianten 'Fahrdamm', 'Ernte März 2020' und 'Wachstum seit 2011' von 06/2020 bis 06/2021.

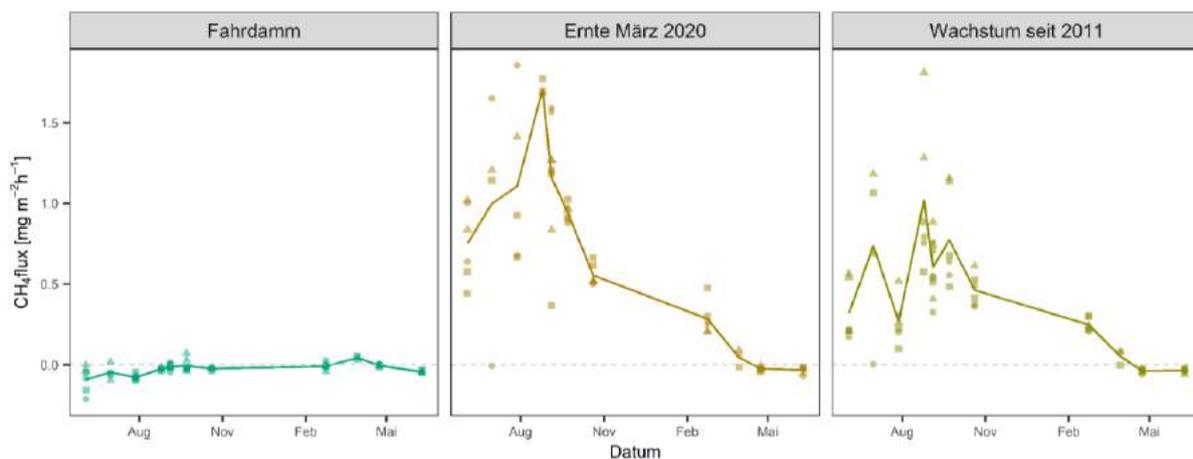


Abbildung 53. Gemessene CH₄-Flüsse (in mg m⁻² h⁻¹) für die Varianten 'Fahrdamm', 'Ernte März 2020' und 'Wachstum seit 2011' von 06/2020 bis 06/2021. Angegeben sind die einzelnen Messpunkte (Formen), zusammen mit den damit verbundenen mittleren Flüssen (farbige Linie, alpha = 0,5).

Tabelle 21. Jährliche Bilanzen (in $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1} \pm \text{SD}$) von CO_2 und CH_4 für die Varianten ‘Fahrdamm’ und ‘Torfmoos-Produktionsflächen Wachstum seit Mai 2011’ aus dem MOOSWEIT Projekt von 10/2017 bis 10/2018 sowie für die Varianten ‘Fahrdamm’, ‘Ernte März 2020’ und ‘Wachstum seit 2011’ aus dem Projekt OptiMOOS von Teilfläche F1 von 06/2020 bis 06/2021. Die Klimawirkung der Varianten wurde anhand des 100-jährigen globalen Erwärmungspotenzials (GWP100) von CH_4 (=27) bewertet (Forster *et al.* 2021)

MOOSWEIT (10.2017-10.2018)	CO_2 (in $\text{g m}^{-2} \text{a}^{-1} \pm \text{SD}$)	CH_4 (in $\text{mg m}^{-2} \text{a}^{-1} \pm \text{SD}$)	THG-Bilanz in CO_2 -Äq (in $\text{t ha}^{-1} \text{a}^{-1}$)
Fahrdamm	3.082 ± 984	$1,1 \pm 0,7$	$31,1 \pm 9,8$
Torfmoos-Produktionsflächen Wachstum seit Mai 2011	-586 ± 269	$1,7 \pm 0,5$	$-5,4 \pm 2,7$
OptiMOOS (06.2020-06.2021)			
Fahrdamm	3.328 ± 1.528	$-0,16 \pm 0,08$	$33,2 \pm 15,3$
Torfmoos-Produktionsflächen nach Ernte März 2020	-868 ± 97	$4,7 \pm 0,76$	$-7,4 \pm 0,99$
Wachstum seit Mai 2011	-843 ± 240	$3,1 \pm 0,70$	$-7,6 \pm 2,4$

Die CO_2 -Emissionen aus dem Fahrdamm sind im Vergleich zu den Messungen bis 2019 leicht gestiegen, aber möglicherweise zu hoch kalkuliert, da Messungen in den Wintermonaten fehlen, in denen für den Fahrdamm bei den Messungen bis 2019 überwiegend CO_2 -Aufnahmen festgestellt wurden. Dennoch entsprechen sie dem aktualisierten Emissionsfaktor für entwässerte ungenutzte Flächen auf organischen Böden in Deutschland in Höhe von durchschnittlich 26.03 (2.56 – 39.60) t CO_2 -Äq. $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ (Tiemeyer *et al.* 2020). Da der Fahrdamm die größte CO_2 -Quelle der gesamten Torfmoos-Paludikultur darstellt, sollte deren Flächenanteil reduziert werden (Daun *et al.* 2023). Die Torfmoos-Produktionsflächen fungieren auch im 11. Anbaujahr als CO_2 -Senke mit einer höheren Aufnahme als bei den Messungen bis 2019. Auch daran ist ersichtlich, dass die Nettoprimärproduktivität weiterhin hoch bleibt.

Dahingegen sind die CH_4 -Umsätze auf den Torfmoos-Produktionsflächen gestiegen und erreichten ihr Maximum im August 2020. Der Ausstoß ist bei der Variante ‘Ernte März 2020’ höher als bei der Variante ‘Wachstum seit Mai 2011’. Möglicherweise hat die Ernte im März 2020 und der damit einhergehende Torfmoos-Aufwuchs einen Einfluss auf die CH_4 -Emissionen (Putkinen *et al.* 2018). Somit könnte auch die kontinuierliche CH_4 -Abnahme im Laufe des Jahres bis auf Vorernte-Niveau erklärt werden, da die Deckung der Köpfchen wieder ca. 80 % erreicht hatte und die Torfmoose über den Wasserspiegel hinausgewachsen waren. Zudem hatten sich bei der Variante ‘Wachstum seit Mai 2011’ Gräser (insbesondere *Dactylis glomerata*) etabliert, welche vermehrt CH_4 an die Atmosphäre abgeben (Knoblauch *et al.* 2015), die jedoch beding durch die Vegetationsperiode ab Februar 2021 abgestorben waren. Nach der Fortführung der Messungen im Februar 2021 waren keine Gräser mehr auf der Variante ‘Wachstum seit März 2011’ vorzufinden und die CH_4 -Emissionen entsprechend niedriger. Ab Juni 2021 wuchsen die Gräser wieder auf der Variante. Inwieweit sich das auf die CH_4 -Emissionen auswirkt, kann aufgrund der Beendigung der Messungen leider nicht nachvollzogen werden. Es wird jedoch vermutet, dass die dann wieder auftretenden Wurzel-Exsudate die CH_4 -Emissionen wieder ansteigen lassen.

6.4.6. Biodiversität

Libellen

Im Zeitraum von 2017 bis 2022 wurde im Untersuchungsgebiet mit insgesamt 27 Libellenarten eine hohe Artenvielfalt mit z.T. großen Populationen nachgewiesen. Das Artenspektrum umfasst 33 % der in Deutschland und 39 % der in Niedersachsen/Bremen bodenständigen Arten. Die Summe der erfassten Arten setzt sich aus 24 in der Torfmooskultur sowie 3 weiteren in den Filtersystemen nachgewiesenen Arten zusammen (Abbildung 54). Von den 24 in der Torfmooskultur nachgewiesenen Arten sind 9 als moortypisch einzustufen. Besonders hervorzuheben sind dabei *Aeshna juncea* (Torf-Mosaikjungfer) sowie die eng an Torfmoose gebundene und deutschlandweit vom Aussterben bedrohte Art *Aeshna subarctica* (Hochmoor-Mosaikjungfer). Beide Arten gelten im westlichen Tiefland Niedersachsens als stark gefährdet und konnten im Untersuchungsgebiet über mehrere Jahre hinweg sowie in unterschiedlichen Sukzessionsstadien der Torfmooskultur nachgewiesen werden. Weiterhin hervorzuheben ist der Nachweis von *Leucorrhinia rubicunda* (Nordische Moosjungfer), einer Charakterart der Tieflandmoore (Jödicke *et al.* 2021). Ein Bodenständigkeitsnachweis konnte für *L. rubicunda* bislang nicht erbracht werden, die Art wurde ausschließlich 2018 beobachtet.

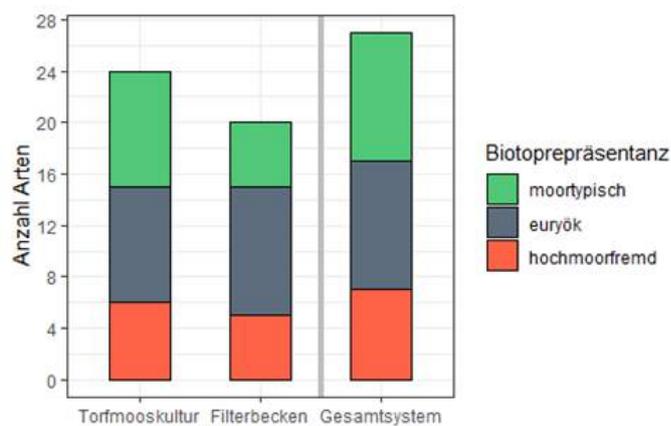


Abbildung 54. Anzahl der im Untersuchungsgebiet nachgewiesenen Arten, dargestellt nach Biotoprepräsentanz und Kulturform (Torfmoos-Paludikultur: 2017-2022; Filterbecken: 2020-2022)

Mehrere der auf den Kulturflächen nachgewiesenen Arten werden als gefährdet, stark gefährdet oder vom Aussterben bedroht in der Roten Liste Niedersachsen/Bremen (Baumann *et al.* 2021) und/oder der Roten Liste Deutschlands (Ott *et al.* 2015) geführt. Insgesamt 9 der nachgewiesenen Arten werden in mindestens einer der beiden Roten Listen geführt (Tabelle 22). Hervorzuheben ist, dass 6 der erfassten und auf den Roten Listen geführten Arten einer moortypischen Libellenfauna zuzuordnen sind und 5 von diesen sich sicher in den Produktionsflächen reproduzieren.

Zu den dominierenden Arten bei der Erfassung der Imagines zählten im Jahr 2022 *Ischnura elegans* (27,0 %), *Libellula quadrimaculata* (22,8 %), *Ceriagrion tenellum* (13,1 %), *Coenagrion puella* (12,8 %) und *Sympetrum danae* (11,9 %). Hier zeigt sich eine klare Veränderung im Vergleich zu 2017, in dem *Ischnura pumilio* (36,3 %) als Pionierart den größten Anteil der Imagines ausmachte. Bei der Erfassung der Exuvien zeigt sich im Jahr 2022 eine deutliche Dominanz der Heidelibellen mit *S. vulgatum* (32,2 %), *S. danae* (22,0 %) und *S. striolatum* (17,7 %), aber auch *L. quadrimaculata* (18,6 %) zählt zu den dominierenden Arten. Im Vergleich zu 2017 sind stark steigende Anteile der beiden moortypischen Arten *S. danae* (13,1 % auf 22,0 %) und *L. quadrimaculata* (10,9 % auf 18,6 %) zu verzeichnen.

Tabelle 22. Im Untersuchungsgebiet erfasste Arten der Roten Liste Deutschlands (Ott *et al.* 2015) sowie Niedersachsens/Bremens (Tiefland West) (Baumann *et al.* 2021), Zeitraum: 2017-2022; V: Arten der Vorwarnliste, 1: vom Aussterben bedroht, 2: stark gefährdet, 3: gefährdet, *: nicht gefährdet.

Art	RL Deutschland	RL NDS/B (TW)	Bodenständig im Projektgebiet	moortypisch	Nachweis in Torfmooskultur	Nachweis in Filterbecken
<i>Ceriagrion tenellum</i>	V	*	x	x	x	x
<i>Ischnura pumilio</i>	V	3	x	-	x	x
<i>Aeshna juncea</i>	V	2	x	x	x	-
<i>Aeshna subarctica</i>	1	2	x	x	x	-
<i>Brachytriton pratense</i>	*	V	-	-	-	x
<i>Somatochlora metallica</i>	*	V	-	-	x	-
<i>Leucorrhinia pectoralis</i>	3	*	x	x	x	-
<i>Leucorrhinia rubicunda</i>	3	3	-	x	x	-
<i>Sympetrum danae</i>	*	V	x	x	x	x

Der Anteil der Bodenständigkeitsnachweise moortypischer Arten auf den Torfmoos-Produktionsflächen ist im zeitlichen Verlauf von Flächeneinrichtung bis Etablierung des Torfmoosrasens deutlich gestiegen, wie sich beispielhaft in der 2016 eingerichteten Teilfläche F4 gezeigt hat (2017: 9 %, 2020: 53 %, 2022: 38 % moortypische Arten). Betrachtet man die gesamte Torfmoos-Paludikulturfläche, so hat sich der Anteil der Bodenständigkeitsnachweise moortypischer Arten seit Beginn der Untersuchungen deutlich erhöht und lag 2022 bei 44 % (Abbildung 55).

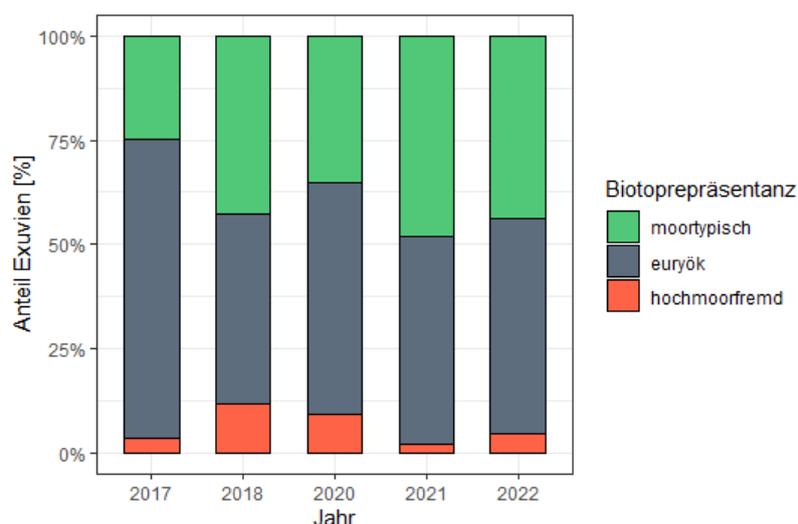


Abbildung 55. Prozentualer Anteil moortypischer, euryöker und hochmoorfremder Arten an den Exuvien (gesamte Torfmoos-Paludikulturfläche) 2017-2022.

Die vergleichende Erfassung der Exuvien an den Innen- und Außengräben der Teilfläche F1 zeigt hohe Anteile moortypischer Arten in den Innengräben, während euryöke Arten dort nur einen kleinen Anteil ausmachen (Abbildung 56). Der Zusammenbruch der Individuenzahlen im Jahr 2020 ist sehr wahrscheinlich eine Folge der nahezu nicht mehr sichtbaren Wasseroberfläche (siehe Pflegemaßnahmen). An den Außengräben zeigt sich hingegen eine Dominanz euryöker Arten und ein geringerer Anteil moortypischer Arten, wobei die Individuenzahl dort insgesamt höher ist. Der Unterschied wird bedingt durch das Zusammenwirken verschiedener Umweltfaktoren:

- Der Einfluss der Nährstofffracht aus der Bewässerung (Ursprung: Schanze) ist in den Innengräben geringer, da diese von den Außengräben durch einen stark mit Torfmoosen verwachsenen Grabenabschnitt getrennt sind. Dieser Umstand reduziert auch die Fließgeschwindigkeit in den Innengräben der Teilfläche F1.
- Bedingt durch die unmittelbare Nähe der Außengräben zu den Fahrdämmen, deren Vegetation sich von derjenigen der Torfmoos-Produktionsflächen grundsätzlich unterscheidet sowie durch die intensivere Pflegemahd und das Mulchen der Fahrdämme kommt es zu Randeffekten.
- Der gemessene pH-Wert ist in den Innengräben deutlich geringer (Durchschnitt 2020-2022: pH 4,38) als in den Außengräben (Durchschnitt 2020-2022: pH 6,06) und ähnelt damit stärker den hochmoormoortypischen Gewässern.

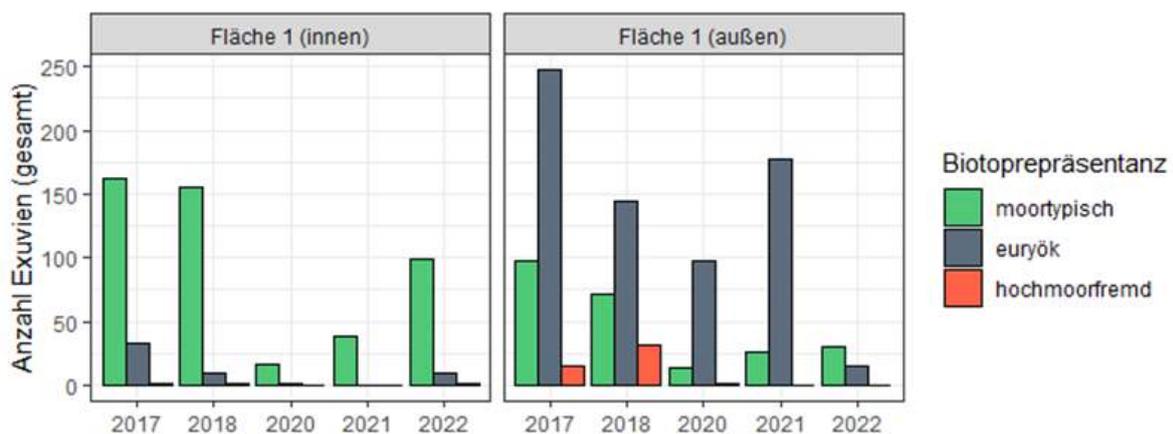


Abbildung 56. Vergleichende Darstellung der Gesamtzahlen nachgewiesener Libellen (Exuvien) in den Innen- und Außengräben der Fläche 1, geordnet nach Biotoprepräsentanz.

Eine zukünftige Vergrößerung der Torfmoos-Produktionsfläche durch eine Verringerung der Anzahl/Fläche der Fahrdämme wäre deshalb höchstwahrscheinlich mit einer Zunahme moortypischer Arten verbunden.

Vergleich mit einer anderen Torfmoos-Paludikulturfläche sowie mit naturnahen, renaturierten und degradierten Hochmoorstandorten

In einem anderen Torfmoos-Paludikulturprojekt in der Nähe von Twist (LK Emsland, Niedersachsen) wurde in den Jahren 2017 und 2018 ebenfalls die Libellenfauna untersucht (Zoch & Reich 2020). Die beiden Flächen wurden 2015 auf stark zersetztem industriell abgebautem Schwarztorf (Drenth: 2,8 ha) bzw. auf einer 2008 wiedervernässten Abtorfungsfläche (Provinzialmoor: 2,3 ha) angelegt. In den zwei Untersuchungsjahren konnten 18 Arten (4 bodenständig, 7 moortypisch) in Drenth und 17 Arten (5 bodenständig, 8 moortypisch) im Provinzialmoor erfasst werden. Auf beiden Flächen wurden jeweils 4 Arten der Roten Liste Niedersachsen (Tiefeland West) nachgewiesen, hervorzuheben sind dabei *A. juncea* und *L. rubicunda*, die jeweils als Imago beobachtet werden konnten.

In der Gegenüberstellung mit einigen ausgewählten Mooren im Nordwesten Niedersachsens zeigt sich, dass sich die Gesamtanzahl moortypischer Arten in der Torfmoos-Paludikultur auf einem ähnlich hohen Niveau befindet (Tabelle 23). Vergleicht man die Artenzusammensetzung auf den Torfmoos-Paludikulturflächen im Hankhauser Moor mit derjenigen in naturnahen Mooren, so fällt das Fehlen einiger moortypischer Arten auf, insbesondere *Leucorrhinia dubia* (Kleine Moosjungfer), *Somatochlora arctica* (Arktische Smaragdlibelle) sowie *Coenagrion lunulatum* (Mond-Azurjungfer). Weiterhin sind die moortypischen Arten *L. rubicunda*, *L. pectoralis* und *Enallagma cyathigerum* zwar mit Einzelnachweisen auf der Torfmoos-Paludikulturfläche vertreten, jedoch sind die Individuenzahlen im Projektgebiet vergleichsweise gering. Größere Gewässer mit seicht auslaufender Verlandungszone, deren Randbereiche von moortypischen Libellen hauptsächlich besiedelt werden, fehlen auf der Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor derzeit. Auch die Filterbecken stellen aufgrund von steilen Uferzonen, fehlendem Torfmoosbewuchs sowie dichtem Rohrkolben- und Schilfbestand (Zielbild) kein geeignetes Gewässer für die oben genannten Arten dar.

Tabelle 23. Artenkennzahlen verschiedener Moore im Nordwesten Niedersachsens und der Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor (mit und ohne Filterbecken) im Vergleich (Untersuchungsjahr in Klammern; Bodenständigkeit durch Exuviennachweis belegt; Rote Liste Niedersachsen/Bremen, Tiefland West)

Artenzahl	Bockhorner Moor (2020)	Neudorfer Moor (2020)	Stapeler Moor zentral (2020)	Stapeler Moor Süd (2020)	Spolsener Moor (2020)	Dänikhorster Moor (2020)	Fintlandsmoor (2020)	Leegmoor (2021)	Restmoor Dreesberg (2022)	Torfmooskultur Hankhausen (2017-2022)	Torfmooskultur + Filterbecken Hankhausen (2017-2022)
Gesamt	20	27	17	17	20	21	19	16	18	24	27
Moortypisch	10	11	9	9	11	9	8	9	10	9	10
Bodenständig	13	20	11	8	13	12	11	9	7	22	22
Rote Liste (NDS, TW)	6	9	6	5	7	4	4	5	6	6	7

Pflegemaßnahmen und Ernte

Die Bewässerungsgräben mit ihren randlichen Gefäßpflanzen sind wichtige Reproduktionshabitate der Libellen, was beim Management der Flächen zu beachten ist. Unterhaltung der Bewässerungsgräben, Pflegemahd sowie Ernte stellen unterschiedlich starke Eingriffe in Reproduktionshabitate der Libellen dar. Durch die Pflegemahd wird die Anzahl der für die Larven zur Verfügung stehenden Schlupfmöglichkeiten reduziert, während mit der Entkrautung der Gewässer eine erhebliche Störung des Larvalhabitats einhergeht. Demgegenüber steht die Verringerung der sichtbaren Wasseroberfläche bei Unterlassung der Grabenpflege, wodurch diese von den Imagines bei der Eiablage weniger als potenzielle Reproduktionsgewässer erkannt werden. Für die Pflege wird deshalb eine mosaikartige Mahd im Rotationsverfahren (vgl. Wildermuth & Küry 2009) empfohlen, um Rückzugsorte sowie Schlupfmöglichkeiten zu erhalten. Die Reinigung der Gräben sollte nach Notwendigkeit und – gerade im Hinblick auf die mehrjährige Entwicklungszeit einiger Großlibellenlarven – entweder jährlich rotierend oder aber nur abschnittsweise erfolgen.

Nach der 2021 erfolgten partiellen Freiräumung der in Fläche F1 gelegenen Innengräben – 65 m von 200 m Untersuchungsstrecke wurden von den in die Gräben hineinwachsenden Torfmoosen befreit, so dass die Wasseroberfläche wieder sichtbar war – zeigte sich 2022 insbesondere für die moortypischen Arten sowohl bei den Imagines als auch bei den Exuvien ein starker Zuwachs der Individuenzahlen. Die mit 65 m Streckenlänge nur etwa halb so langen, freigeräumten Grabenabschnitte wiesen z.T. eine Verdoppelung der Individuenzahlen moortypischer Arten auf, verglichen mit den nicht gepflegten Grabenabschnitten (135 m Streckenlänge, Abbildung 57). Der Anteil euryöker sowie hochmoorfremder Arten erhöhte sich in den gepflegten Grabenabschnitten nur leicht. Besonders hervorzuheben ist an dieser Stelle der erneute Bodenständigkeitsnachweis von *A. subarctica* in einem der gepflegten Grabenabschnitte. Es ist davon auszugehen, dass die Bewässerungsgräben bei vollständigem Zuwachsen der Wasseroberfläche nicht mehr als Reproduktionshabitat wahrgenommen werden. Ein periodisches Freiräumen der Gewässeroberfläche wird bei starker Verringerung der sichtbaren Wasseroberfläche empfohlen.

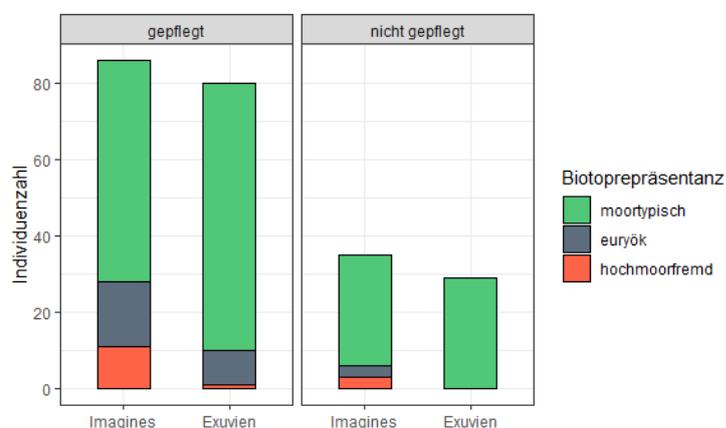


Abbildung 57. Vergleichende Darstellung der Individuenzahlen von Imagines und Exuvien (2022) in gepflegten und nicht gepflegten Strecken; Streckenlänge gepflegte Abschnitte: 65 m, ungepflegte Abschnitte: 135 m

Die Ernte der Torfmoose stellt im Vergleich zur Pflegemahd eine stärkere visuelle Veränderung des Lebensraumes dar. Da die Gräben während der Ernte nicht beeinträchtigt werden, ist der Larvallebensraum der Libellen hingegen nicht betroffen. Nach erfolgter Ernte zeigt sich ein allgemeiner (temporärer) Rückgang der Individuenzahlen, jedoch sind hier euryöke Arten in einem höheren Maße betroffen als moortypische Arten. Es empfiehlt sich, pro Jahr nur einen Teilbereich der Gesamtkultur zu ernten, um Ausweichhabitate für die Imagines bestehen zu lassen. Da die Ernte einen temporären Verlust von Schlupfmöglichkeiten bedeutet, sollte sie möglichst nach der Flugzeit der Libellen erfolgen.

Spinnen

Im Projektzeitraum (2019-2022) wurden 9309 Spinnen (8369 adulte) auf den Torfmoos-Paludikulturflächen erfasst. Seit Einrichtung der Fläche in 2011 wurden nunmehr 26.492 Spinnen (23.426 adulte) auf der Torfmoos-Paludikultur-Versuchsfläche im Hankhauser Moor erfasst. Bisher wurden 80 Spinnenarten und eine Weberknechtart nachgewiesen.

Entwicklung der Artengemeinschaft der Torfmooskulturen

Die Werte für Artenvielfalt und Abundanz der Spinnenfauna auf den Torfmoos-Produktionsflächen haben seit ca. 2013 ein Plateau erreicht (Muster *et al.* 2020), das generell auch im Projektzeitraum aufrechterhalten wird. Dennoch bleibt die Artengemeinschaft von hoher Dynamik geprägt. Sowohl die Arten-basierten als auch die Abundanz-basierten Turnover-Raten (SERa) bleiben hoch (Abbildung 58),

der Artenaustausch liegt bei 30-40 % zwischen aufeinanderfolgenden Jahren, bei der Abundanz werden Werte knapp unter 50% erreicht.

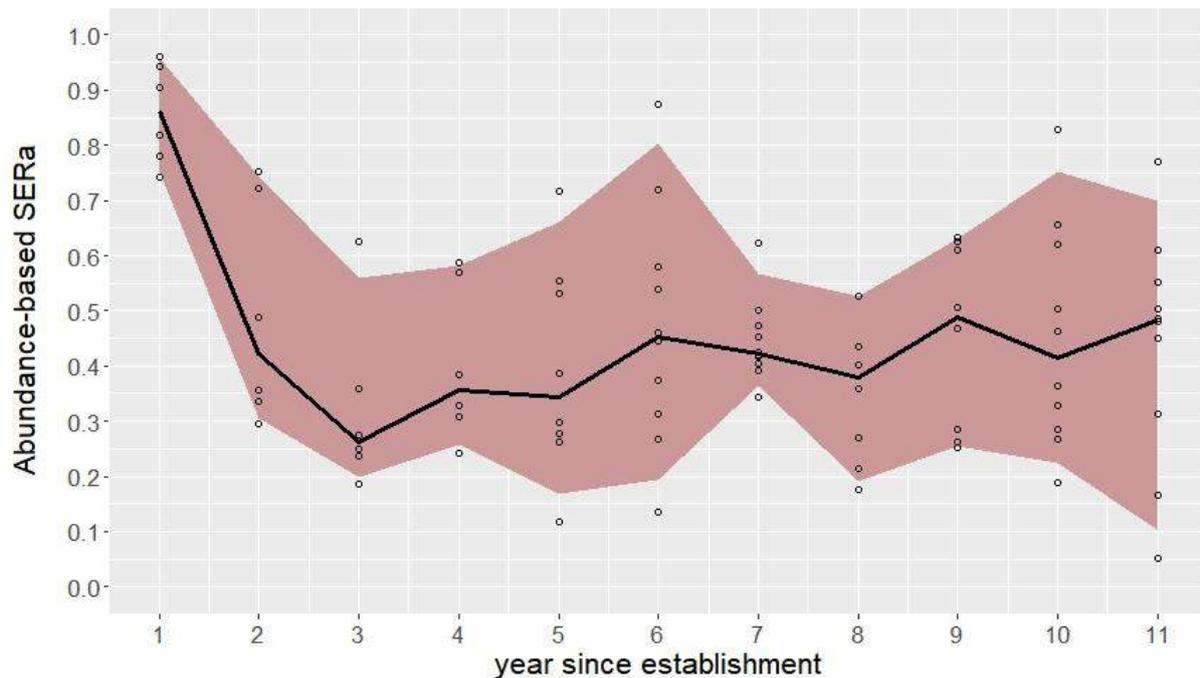


Abbildung 58. Jährliche Turnover-Raten (SERa) in den Torfmooskulturen Hankhausen basierend auf Abundanz. Gezeigt werden Median und 5%-95% Konfidenzintervall.

Tabelle 24. Im Projektzeitraum 2019-2022 neu auf der Versuchsfläche nachgewiesene Spinnenarten.

Art (wiss. Name)	Deutscher Name	2019	2020	2021	2022
<i>Hypomma cornutum</i>	Baum-Buckelköpfchen	1			
<i>Pardosa tenuipes</i>	Westlicher Laufwolf	1			
<i>Tallusia experta</i>	Breitborster	2	1	7	10
<i>Zelotes latreillei</i>	Latreilles Schwarzspinne	1		2	
<i>Clubiona reclusa</i>	Riedsackspinne		1		
<i>Pardosa agrestis</i>	Ackerlaufwolf		2		2
<i>Philodromus collinus</i>	Kiefernflachstrecker		1		
<i>Pisaura mirabilis</i>	Listspinne		3		
<i>Clubiona compta</i>	Kleine Rindensackspinne			1	
<i>Walckenaeria vigilax</i>	Schlichtes Zierköpfchen				2

Auch im Projektzeitraum wurden jedes Jahr neue Spinnenarten auf der Versuchsfläche nachgewiesen (Tabelle 24). Bei den meisten dieser Arten dürfte es sich um Zufallsfänge aufgrund von Verdriftung aus benachbarten Lebensräumen handeln. Es gibt jedoch auch Arten wie den Breitborster *Tallusia experta*, der seit der Erstbesiedlung 2019 konstant und mit zunehmender Bestandstendenz nachgewiesen wurde.

Die Ordination (Abbildung 59) bringt einige interessante Tendenzen zum Ausdruck. Auffällig ist die stärkere Diversifizierung der Fläche in den letzten Jahren, was sich in der deutlich größeren Fläche widerspiegelt, die im Ordinationsraum eingenommen wird. Besonders offensichtlich wird dies für die Jahre 2021 und 2022. Diese Tendenz geht einher mit einer zunehmenden Separierung der Standorte

von Teilflächen F1 und F2, wiederum besonders ausgeprägt seit 2021. Seit 2020 liegen die ermittelten Arten- (Abbildung 61) und Individuendichten auf Teilfläche F1 deutlich über denen von Teilfläche F2.

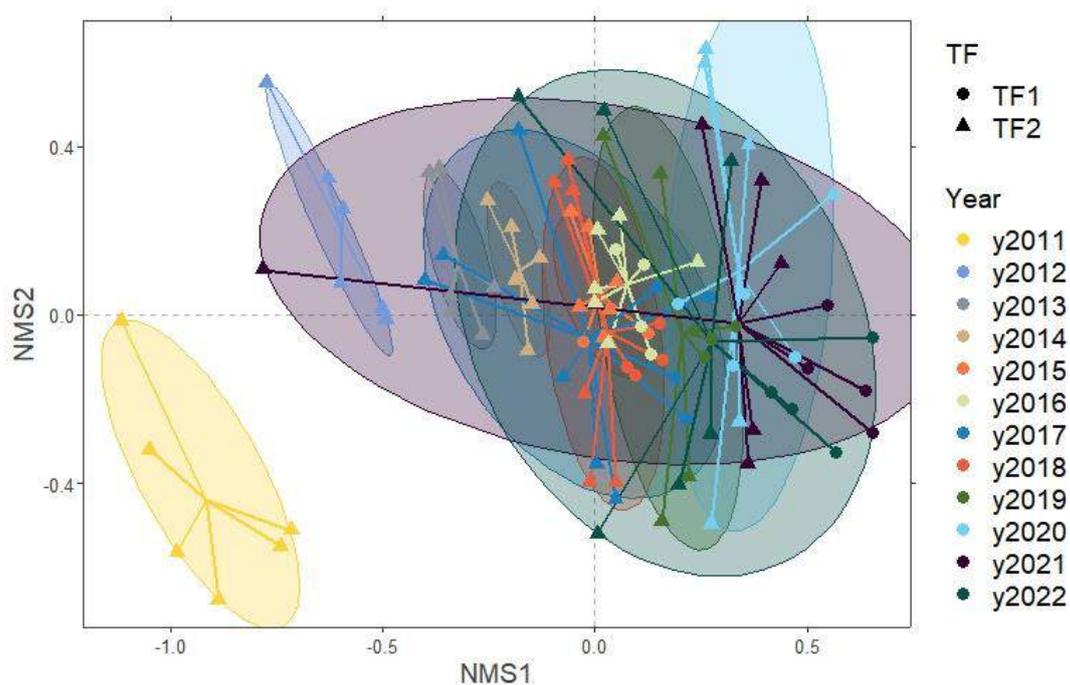


Abbildung 59. NMS-Ordination (stress=0.188) der Untersuchungsstandorte 2011-2022 anhand der Spinnenfauna mit Anzeige der Teilflächen (TF1 – Teilfläche 1, TF2 – Teilfläche 2).



Abbildung 60. Räumliche Verteilung der Nachweise der Spinnenart Moorhocklings *Attulus caricis* auf den Teilflächen F1 (links) und F2 (rechts) der Versuchsfläche zur Torfmoos-Paludikultur im Hankhauser Moor (schwarze Punkte und Nummern stellen die Anzahl der Funde dar).

Eine Reihe von Spinnenarten – vor allem solche, welche die Versuchsfläche erst zu einem vergleichsweise späten Zeitpunkt erreichten – zeigen eine deutliche Bevorzugung für Teilfläche F1. Darunter finden sich wertgebende Arten, wie das Dickkopf-Stirnchen *Araeoncus crassiceps*, das Kugelkopf-Raubrüstchen *Erigonella ignobilis*, das Kammalpenspinnchen *Cnephalocotes obscurus* und der Sumpfhockling *Attulus floricola*. Besonders auffällig ist dieses Verteilungsmuster auch beim Moorhockling *Attulus caricis* (Abbildung 60), einer stark gefährdeten, stenotopen Moorart unter den Springspinnen, welche 2015 erstmals in einem Einzelindividuum auf der Fläche nachgewiesen wurde. Seit 2019 wird die Art regelmäßig und mit zunehmender Tendenz vor allem in Teilfläche F1 erfasst.

Die Faktoren, welche die zunehmende Divergenz der Spinnengemeinschaften der Teilflächen F1 und F2 bedingen, sind noch unklar. Möglicherweise spielt die höhere Störungsfrequenz auf Teilfläche F2 durch Ernte, höhere Mahdfrequenz und weitere Bewirtschaftungsmaßnahmen eine Rolle.

Einfluss der Torfmoosernte

Der Einfluss der Torfmoosernte in weiten Bereichen der Teilfläche F2 im Sommer 2016 zeigt sich zunächst in einem leichten Anstieg der Turnover-Raten im Folgejahr (Abbildung 58: Jahr 6 nach Einrichtung der Fläche). In den auf die Ernte folgenden drei Jahren (2017-2019) sind signifikante Rückgänge in Artendichte (Abbildung 53. Gemessene CH₄-Flüsse (in mg m⁻² h⁻¹) für die Varianten 'Fahrdamm', 'Ernte März 2020' und 'Wachstum seit 2011' von 06/2020 bis 06/2021. Angegeben sind die einzelnen Messpunkte (Formen), zusammen mit den damit verbundenen mittleren Flüssen (farbige Linie, alpha = 0,5). Abbildung 61) und Abundanz auf den von der Ernte betroffenen Standorten gegenüber nicht abgeernteten Referenzflächen der Teilfläche F2 zu verzeichnen. Ab dem vierten Jahr nach der Ernte sind solche quantitativen Unterschiede nicht mehr feststellbar.

Werden mit dem Moorindex qualitative Aspekte der Artengemeinschaft einbezogen, zeigt sich ein interessantes Ergebnis. Auf den abgeernteten Flächen ist eine signifikante Erhöhung des Anteils moorspezifischer Arten festzustellen (Abbildung 62), die ebenfalls für drei Jahre nachweisbar ist bevor es zur Nivellierung kommt.

Zumindest bei kleinflächiger Ernte und bei einer Verzahnung von Flächen unterschiedlicher Wuchsdauer und -höhe der Torfmoose ist durch die Ernte keine nachhaltige Veränderung der Spinnengemeinschaften nachweisbar.

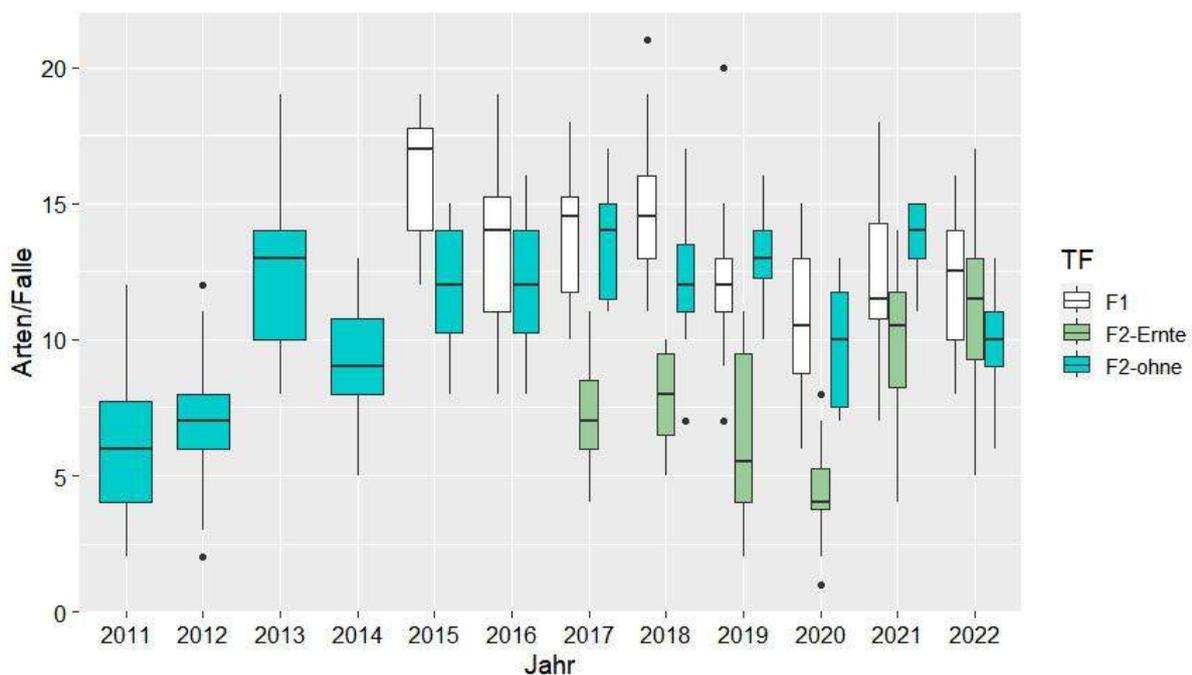


Abbildung 61. Entwicklung der Artendichte (Arten/Falle/Jahr) auf den Teilflächen F1 und F2 mit bisher nicht abgeernteten (F2-ohne) und im Sommer 2016 abgeernteten Bereichen (F2-Ernte).

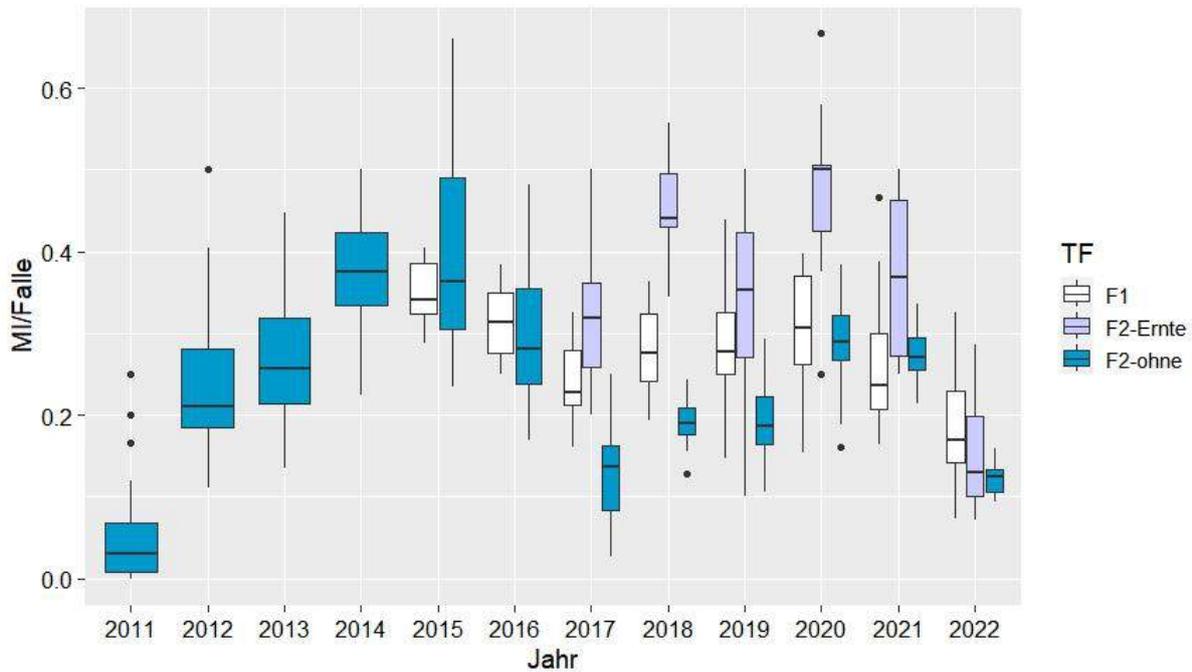


Abbildung 62. Entwicklung der Individuenanteile moorspezifischer Spinnenarten (Moorindex (MI)/Falle/Jahr) auf den Teilflächen F1 und F2 mit bisher nicht abgeernteten (F2-ohne) und im Sommer 2016 abgeernteten Bereichen (F2-Ernte).

Pilze

Der Sequenzdatensatz enthielt 2.427.585 Rohdaten. Nach der Filterung wurde ein Durchschnitt von $98,4\% \pm 0,5\%$ (2.389.936 Reads) erhalten. Alle 80 Proben waren von hoher Qualität mit durchschnittlich $135,5 \pm 56,7$ ASVs. Insgesamt wurden 1604 einzigartige ASVs als Pilze klassifiziert, 23,7 % wurden auf Ebene von Familien oder tiefer annotiert, 3,8 % (270 ASVs) auf Artniveau, darunter 196 eindeutige Artnamen (Tabelle 25).

Tabelle 25. Überblick über die Amplikon-Sequenzvarianten (ASVs) und die taxonomische Zuordnung. Die Anzahl der ASVs sowie eindeutige taxonomische Namen, die der entsprechenden taxonomischen Tiefe zugeordnet sind sowie der kumulative %-Anteil der Gesamtzahl der ASVs, die der jeweiligen taxonomischen Ebene zugeordnet sind.

ASVs	1604
<i>ASVs zugeordnet zu</i>	
Art	270/ 196 (3,8 %)
Gattung	618/ 251 (12,5 %)
Familie	797/ 186 (23,7 %)
Ordnung	1114/ 94 (39,4 %)
Klasse	1241/ 32 (56,89 %)
Stamm	1458/ 10 (77,81 %)
Reich (Pilze)	1604/ 1 (100 %)

Es wurde ein signifikanter Unterschied zwischen den Proben in der Mitte der Torfmoos-Produktionsfläche und am Rand festgestellt (Abbildung 63), so dass von einer Beeinflussung durch

Nährstoffe, insbesondere von Phosphor auszugehen ist (vgl. Vroom *et al.* 2020). Deutliche Unterschiede in der Pilzgemeinschaft wurden auch bei den Proben von den älteren Flächen (5-10 Jahre) im Vergleich zu Proben von der zwei Jahre alten Fläche festgestellt. Dahingegen unterschied sich die Zusammensetzung der Pilze bei den verschiedenen Torfmoos-Arten kaum.

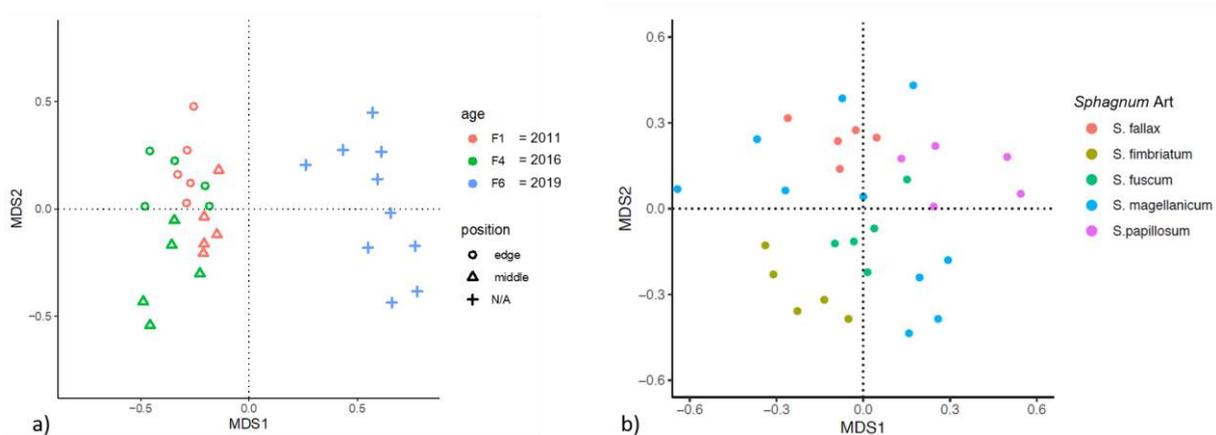


Abbildung 63. Nicht-metrische mehrdimensionale Skalierung (nMDS) von a) *Sphagnum fallax*, beprobt in unterschiedlich alten Kulturen (2, 5, 10 Jahre) und an unterschiedlicher Position auf den Torfmoos-Produktionsflächen (Rand, Mitte) sowie b) verschiedenen Torfmoos-Arten in einer 2 Jahre alten Kultur.

Ascomyceten dominierten das Mykobiom in allen Proben, gefolgt von Basidiomyceten und Rozellomyceten. Die Proben zeigten eine hohe Abundanz von ASV_3 (Ascomycota), enthielten aber auch andere reichlich vorhandene Taxa wie ASV_2 (Agaricales), ASV_31 (Pleosporales), Cladosporiaceae, Didymosphaeriaceae und Gloniaceae. Es konnten nur wenige potenziell pathogene/parasitäre Pilztaxa im Datensatz gefunden bzw. (nicht eindeutig) bis auf Artniveau identifiziert werden. Möglicherweise handelt es sich bei ASV_2 (Agaricales) um *Sphagnurus paluster* (Sumpfgraublatt), einem parasitären Pilz, der zu Nekrosen (und Absterben) bei Torfmoosen führt.

Flora

Die in OptiMOOS fortgeführten Langzeituntersuchungen ergaben für die älteste Teilfläche F1 (Wachstum seit 2011) die höchste Artenzahl. Mit 47 Pflanzenarten wurden auf F1 dreimal so viele Arten wie auf der 2016 eingerichteten Teilfläche F4 nachgewiesen und fast anderthalb Mal so viele Arten wie auf F2-2 (Süd), die zwar auch 2011 eingerichtet, aber 2016 abgeerntet wurde (Tabelle 26).

Von 17 in den Gräben (alle zusammengefasst) beobachteten Arten kommen einige ausschließlich in den Gräben vor (andere sonst auch nur noch in den Filterbecken). Damit tragen die offenen Wasserflächen stark zur Biodiversität der Torfmoos-Paludikulturflächen im Projekt bei (Tabelle 26).

Für alle Teilflächen in OptiMOOS (inkl. Gräben, exkl. Fahrdämme) zusammengefasst wurden insgesamt 16 Moosarten (inkl. sieben *Sphagnum*-Arten: zwei davon neu eingebracht) und 68 Gefäßpflanzen (12 davon neu) beobachtet. Die beobachteten Pflanzenarten ließen sich einem breiten Spektrum an Lebensraumtypen zuordnen, die sowohl den (hoch)moortypischen Charakter, die Nutzungsgeschichte sowie die aktuelle Nutzung der Feldversuchsflächen als auch deren Insellage mit Umgebungseinfluss widerspiegeln: Neben Arten der Frisch- und Feuchtwiesen wuchsen Vertreter der Trittrassen und Unkrautfluren, Röhrichte, Bruchwälder und Feldgehölze, Gewässer, Schlamm-Pionierfluren und der Moore, neben oligotraphenten auch eutraphente Arten (Abbildung 64). Von den 45 Moorarten kamen auch hochmoortypische Moos- und Gefäßpflanzenarten auf den Versuchsflächen vor, von denen elf

einen Schutzstatus (Rote Liste Deutschland) innehaben (Tabelle 26). Vermutlich wurden sie mit dem Torfmoos-„Saatgut“ ausgebracht oder siedelten sich spontan an.

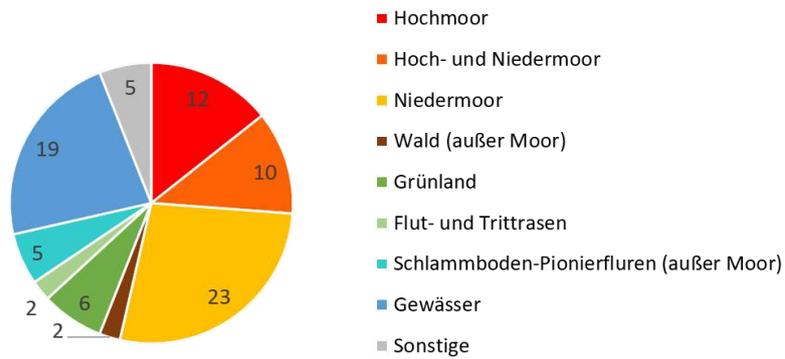


Abbildung 64. Pflanzenartenanzahl (Gefäßpflanzen und Moose) pro Lebensraumtyp auf der gesamten Torfmoos-Paludikulturfläche und im OptiMOOS Projektzeitraum.

Tabelle 26. Verzeichnis der auf der gesamten Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor vorkommenden Pflanzenarten, Lebensraum-Zuordnung und Schutzstatus. In OptiMOOS neue Arten sind rot gekennzeichnet. * Hassel *et al.* (2018) folgend, ist das Vorkommen von *S. magellanicum* auf Feuerland (Chile) beschränkt. Bei Vorkommen außerhalb Feuerlands handelt es sich demnach um *S. medium* oder *S. divinum*. Da in OptiMOOS die Zuordnung morphologisch nicht immer eindeutig möglich war (v.a. nicht nach Kultur unter gleichen Bedingungen), wird vorläufig „*S. magellanicum sensu lato*“ als Bezeichnung im Projektkontext genutzt.

	Botanischer Pflanzenname	F1	F2-2 Süd	F4	F5	F2-1	F2-2 Nord	F7-1	F7-2	F7-3	F7-4,5,6	FB1	FB2	Gräben	Zuordnung zu Lebensraumtyp	Schutzstatus			
		Wachstum seit 2011	Regeneration seit 2016	Wachstum seit 2016 Wasser aus Schanze	mit Wasser aus Filterbecken 2	mit Wasser aus Filterbecken 1	mit Wasser aus der Schanze	ohne Bodenabtrag (nur Mulchen)	mit Bodenabtrag 5-10 cm	mit Bodenabtrag 30 cm (=Kontrolle)	Minimierung Grabenananteil seit 2020	Filterbecken 1	Filterbecken 2			Verzeichnis d. in Niedersachsen besonders od. streng geschützten Arten (NLKWN, 1.1.2015)	RL Deutschland, nach Rote-Liste-Zentrum, 16.3.2023	BArtSchV, Wikipedia, 16.3.2023	
MOOSE	<i>Aulacomnium palustre</i>	x	x		x	x	x			x	x				Hoch- und Niedermoor				
	<i>Campylopus introflexus</i>	x													Neophyt in Küstendünen				
	<i>Pohlia spec.</i>	x													nicht zuordenbar				
	<i>Polytrichum commune</i>							x	x	x					Wald				
	<i>Polytrichum strictum</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Hochmoor				
	<i>Riccia fluitans</i>													x	Gewässer				
	<i>Ricciocarpos natans</i>	x	x												Gewässer		3	2	
	<i>Sphagnum cuspidatum</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Hoch- und Niedermoor		V		x
	<i>Sphagnum fallax</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Hoch- und Niedermoor				x
	<i>Sphagnum fimbriatum</i>	x				x		x	x	x	x				Hoch- und Niedermoor				x
	<i>Sphagnum magellanicum s.l.*</i>					x		x	x	x	x				Hochmoor		3	3	x
	<i>Sphagnum palustre</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Hoch- und Niedermoor				x
	<i>Sphagnum papillosum</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Hochmoor		3	3	x
<i>Sphagnum rubellum</i>								x	x	x				Hochmoor				x	
<i>Straminergon stramineum</i>	x			x	x	x	x	x	x	x				Hoch- und Niedermoor					
<i>Warnstorfia fluitans</i>	x				x									Hoch- und Niedermoor					
FARN	<i>Azolla spec.</i>												x		Gewässer: stehend u. langsam fließend				
GEFÄSS-PFLANZEN-Gehölze	<i>Alnus glutinosa</i>	x													Bruch- und Auenwald: Niedermoor				
	<i>Betula pubescens</i>	x	x		x										Bruch- und Auenwald: Hoch- u. Niedermoor				
	<i>Quercus robur</i>		x												Misch-Wald				
	<i>Salix aurita</i>	x					x								Bruchwald, Moorgebüsch, Flachmoor				
	<i>Salix cinerea</i>										x				Schlammboden-Pionierflur: Niedermoor				
GEFÄSSPFLANZEN-Kräuter	<i>Bidens cernua</i>	x												x	Schlammboden-Pionierflur: Niedermoor				
	<i>Callitriche palustris</i>							x						x	Gewässer, Schlammflur, reich				
	<i>Calluna vulgaris</i>				x										Hochmoor, Heide				
	<i>Cardamine pratensis</i>	x	x					x	x						Niedermoor: Feuchtwiesen, Brüche				
	<i>Cirsium palustre</i>		x												Staudenfluren, Niedermoor				
	<i>Drosera intermedia</i>		x							x					Hochmoor		3	3	x
	<i>Drosera rotundifolia</i>	x	x		x	x	x		x	x	x				Hochmoor		3	3	x
	<i>Epilobium palustre</i>	x	x	x		x	x	x		x	x				Hoch- und Niedermoor			V	
	<i>Erica tetralix</i>	x	x	x	x	x					x				Hochmoor, Heide			V	
	<i>Galium palustre</i>		x												Niedermoor, Feuchtwiesen				
	<i>Glechoma hederacea</i>							x							Saumgesellschaften, Hochstaudenfluren				
	<i>Gnaphalium uliginosum</i>									x					Schlammboden-Pionierfluren				
	<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	x	x	x	x	x	x		x						Niedermoor, Moorwälder				
	<i>Lemna minor</i>							x					x	x	Gewässer, reich				
	<i>Lemna trisulca</i>												x	x	Gewässer, reich				
<i>Lotus pedunculatus</i>	x				x						x			Feuchtwiesen, arm: Niedermoor					
<i>Lycopus europaeus</i>														Gewässer, reich, Bruchwald					

	Botanischer Pflanzenname	F1	F2-2 Süd	F4	F5	F2-1	F2-2 Nord	F7-1	F7-2	F7-3	F7-4,5,6	FB1	FB2	Gräben	Zuordnung zu Lebensraumtyp	Schutzstatus			
		Wachstum seit 2011	Regeneration seit 2016	Wachstum seit 2016 Wasser aus Schanze mit Wasser aus Filterbecken 2	mit Wasser aus Filterbecken 1	mit Wasser aus Filterbecken 1	ohne Bodenabtrag (nur Mulchen)	mit Bodenabtrag 5-10 cm	mit Bodenabtrag 30 cm (=Kontrolle)	Minimierung Gra- benanteil seit 2020	Filterbecken 1	Filterbecken 2	Verzeichnis d. in Nie- dersachsen beson- ders od. streng geschützten Arten (NLR, 1.1.2015)			RL Deutschland, nach Rote-Liste-Zentrum, 16.3.2023	BARTSchV, Wikipedia, 16.3.2023		
GEFÄSSPFLANZEN-Kräuter	<i>Lysimachia vulgaris</i>					x			x					x	Gewässer, reich, Feuchtwiesen				
	<i>Lythrum salicaria</i>													x	Feuchtwiesen: Niedermoor				
	<i>Oenanthe aquatica</i>								x		x			x	Gewässer, reich, Bruchwald				
	<i>Persicaria amphibia</i>	x													Gewässer, reich				
	<i>Peucedanum palustre</i>								x						Gewässer, Röhrichte				
	<i>Potentilla erecta</i>	x													Niedermoor: arm, Feuchtwiesen, Heiden				
	<i>Potentilla palustris</i>						x								Niedermoor und Zwischenmoor				
	<i>Ranunculus flammula</i>		x												Niedermoor, Gewässer: reich				
	<i>Ranunculus lingua</i>								x						Niedermoor: Röhrichte, Großseggenriede	3		3	x
	<i>Ranunculus repens</i>	x							x	x		x			Flut- und Trittrasen, Unkrautfluren				
	<i>Rorippa palustris</i>														Schlamm Boden-Pionierflur				
	<i>Rumex acetosa</i>	x										x			Frischwiesen				
	<i>Rumex acetosella</i>	x													Unkrautfluren, Halbtrockenrasen				
	<i>Spirodela polyrhiza</i>								x				x		Gewässer, reich				
	<i>Trifolium repens</i>		x									x			Trittrasen, Frischwiesen				
<i>Utricularia vulgaris</i>													x	Gewässer, reich				3	
<i>Vaccinium oxycoccus</i>	x	x			x	x				x				Hochmoor				3	
<i>Viola palustris</i>	x													Niedermoor: arm, Bruchwald					
GEFÄSSPFLANZEN-Grasartige	<i>Agrostis stolonifera</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	Frisch-Feuchtwiesen, Flutrasen				
	<i>Alopecurus geniculatus</i>		x					x	x						Niedermoor: Feuchtweiden				
	<i>Alopecurus pratensis</i>	x	x					x	x						Frischwiesen				
	<i>Anthoxanthum odoratum</i>							x							Grünland, Zwergstrauchheiden				
	<i>Carex canescens</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				Moore, arm, Bruchwald				
	<i>Carex pseudocyperus</i>		x												Gewässer, reich, Bruchwald				
	<i>Carex rostrata</i>			x											Hoch- und Niedermoor, arm, Bruchwald				
	<i>Catabrosa aquatica</i>								x	x		x			Röhrichte an/in Fließgewässern				
	<i>Deschampsia cespitosa</i>		x						x	x	x	x			Niedermoor: Feuchtwiesen				
	<i>Eriophorum angustifolium</i>	x	x	x	x	x	x				x	x			Hoch- u. Zwischenmoor				V
	<i>Eriophorum vaginatum</i>	x	x							x					Hochmoor				V
	<i>Glyceria maxima</i>											x			Röhrichte an/in Fließgewässern				
	<i>Holcus lanatus</i>	x	x	x					x	x	x	x			Feucht- und Frischwiesen				
	<i>Juncus articulatus</i>	x	x	x			x	x		x	x	x	x		Moore, arm, Kriech- u. Trittrasen, Feuchtwiesen				
	<i>Juncus bufonius</i>	x					x	x		x	x	x			Schlamm Boden-Pionierflur				
	<i>Juncus bulbosus</i>	x					x	x		x	x	x	x		Schlamm Boden-Pionierflur, arm				
	<i>Juncus effusus</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Nassweiden, Feuchtwiesen, Kriech- und Trittrasen				
	<i>Juncus ranarius</i>	x									x	x			Schlamm Boden-Pionierflur				
	<i>Juncus subnodulosus</i>	x	x												Niedermoor, arm, Feuchtwiesen				3
	<i>Molinia caerulea</i>	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			Hoch- u. Niedermoor, Feuchtwiesen, Bruchwald				
	<i>Phragmites australis</i>	x	x				x	x				x		x	Gewässer, reich, Bruchwald				
	<i>Poa compressa</i>	x							x	x	x	x			Stauden- und Unkrautfluren, reich				
	<i>Poa palustris</i>	x							x	x	x	x			Staudenfluren, Feuchtwiesen, Niedermoor, reich				
	<i>Poa trivialis</i>	x							x	x	x	x			Frischwiesen, Staudenfluren, Feuchtwiesen				
<i>Rhynchospora alba</i>	x				x	x				x				Hoch- und Zwischenmoore, arm, Bruchwald				3	
<i>Typha angustifolium</i>										x				Gewässer, Röhrichte, reich					
<i>Typha latifolia</i>										x				Gewässer, Röhrichte, reich					
Ges.	84 Arten	48	34	16	19	28	19	31	33	31	33	6	12	17		7		14	10

6.4.7. Ökonomie

Anhand der täglichen Dokumentation der Arbeitsgänge und der jeweiligen Teilflächen konnten Zeitpunkt, Häufigkeit und Einsatzort verschiedener Managementaufgaben erfasst werden (Zusammenfassung in Tabelle 27). Für das Jahr 2022 entstand eine Datenlücke, da durch den Flächenbetreuer vor Ort aufgrund eines Missverständnisses keine Vordrucke zur Arbeitszeiterfassung ausgefüllt wurden. Im Vergleich zu den Vorjahren sind für 2022 jedoch keine entscheidenden Abweichungen anzunehmen. Zum Flächenmanagement gehören folgende Aufgaben:

- Regelmäßige / typische Arbeiten: Kontrolle der Wasserstände, Pflegemahd Torfmoos-Produktionsflächen, Fahrdämme mulchen
- Seltener: Gräben reinigen; Überläufe und Durchlässe (KG-Rohre in den Fahrdämmen) reinigen und spülen mit Trecker und Pumpe
- Sonderaufgaben: Sturmschäden – Aufarbeiten umgestürzter Bäume, Einweisung/Begleitung von Dienstleistern, z.B. Reparatur oder Neueinstellung elektronischer Steuerung, Wegebau/ -ausbesserung; Erneuerung Container, Reparatur- und Aufräumarbeiten (Technik, Schuppen etc.)

Für die Betreuung der gesamten Torfmoos-Paludikulturfläche im Hankhauser Moor ist ein Vollzeitmitarbeiter ca. Dreiviertel des Jahres ausgelastet. In den Wintermonaten ab Ende November/Dezember bis inklusive Februar/März fallen kaum Arbeiten auf der Fläche an.

Tabelle 27. Häufigkeit (Anzahl der Umsetzung) der wichtigsten Managementaufgaben auf den jeweiligen Teilflächen in den Jahren 2016 bis 2021.

Arbeitsgang	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Unkrautmanagement auf Torfmoos-Produktionsflächen	1-7	3-7	5-8	2-8	1-5	1-4
Mulchen der Fahrdämme	6	3-5	6	3-5	2-4	4-5
Säuberung der Gräben	1	1-2	2	0-2	1	1

Gegenüber dem Unkrautmanagement in der 1.Kulturrotation von 2011-2016 (vgl. Wichmann *et al.* 2020) wurde nicht mehr ein Einachs-Mäher eingesetzt (Mähgut blieb liegen), sondern die Mahd erfolgte mittels Bagger und Mähkorb vom Fahrdamm aus, da eine Befahrung der Flächen aufgrund geringerer Tragfähigkeit nicht mehr möglich war. Im Jahr 2020 konnte auf Grund der Einrichtung von Filterbecken und kleinflächigen Torfmoos-Paludikultur-Testflächen die Flächenpflege nur in verringertem Umfang mittels Bagger ausgeführt werden. Im Juli bis September 2020 übernahm der technische Mitarbeiter in OptiMOOS einen Teil der Flächenpflege per Motorsense. Parallel zum Projekt OptiMOOS erfolgte die Entwicklung einer raupenbasierten, ferngesteuerten Maschine durch die Firma Mera Rabeler (Prototyp in Abbildung 65), um zukünftig Management und Ernte ohne Fahrdämme realisieren zu können.

Für regelmäßige Sichtkontrollen der gesamten Fläche (17 ha) und des Wassermanagements sind 2 Stunden pro Woche anzunehmen. Die Häufigkeit der Pflege der einzelnen Torfmoos-Produktionsflächen schwankt zwischen ein- und achtmal pro Jahr (Tabelle 27). Hintergrund der Unterschiede ist zum einen der Aufwuchs und der tatsächliche Pflegebedarf, der z.B. im ersten Jahr der Einrichtung oder nach der Ernte geringer ist. Zum anderen sind es auch zeitliche Arbeitskapazitäten wie etwa die

Konkurrenz mit anderen Aufgaben, Krankheit, Urlaub etc. Eine geringere Häufigkeit von Managementmaßnahmen könnte Managementkosten reduzieren. Allerdings ist zu beachten, dass sich bei stärkerem Aufwuchs der Zeitbedarf erheblich erhöht, da für jede Arbeitsbreite des Mähkorbs (4 m) 2-3 oder sogar bis fünfmal angesetzt werden muss. Als grobe Faustzahl kann bei regelmäßiger Mahd ein Zeitbedarf von 10-20 h ha⁻¹, bei sporadischer Mahd ca. 40 h ha⁻¹ beim Einsatz von Bagger und Mähkorb angesetzt werden (Sommer 2021). Zum Teil erfolgte im Zuge der Baggermahd eine Ausmahd der Gräben (innen und außen), was ebenfalls den Zeitbedarf beeinflusst. Bei Mahd per Motorsense betrug die Flächenleistung im Sommer 2020 ca. 2-5 h pro Streifen (10-25 h ha⁻¹).



Abbildung 65. Prototyp zur Pflege von Torfmoosstreifen, August 2022 (Quelle: Firma Mera Rabeler).

Erheblich effizienter als Bagger und Motorsense wäre die Mahd mit einem Einachser mit größerer Arbeitsbreite (z.B. Brielmaier) oder perspektivisch auch durch autonome Pfliegeroboter. Die Pflegemahd hätte einen geringeren Arbeitszeitbedarf, müsste jedoch sehr regelmäßig erfolgen, damit keine dichte Streuauflage entsteht, die das Torfmooswachstum einschränkt. Bei Spezialgeräten stellt sich zudem die Frage nach den Investitionskosten und den Einsatzzeiten. Eine Anschaffung wird erst bei entsprechend größerer Fläche interessant. Aktuell werden hingegen die vor Ort in Hankhausen bereits gebundene Technik und Arbeitskraft durch die aufwändige Pflegemahd ausgelastet.

Während für die Jahre 2011-2016 eine detaillierte Erfassung aller Managementkosten wie z.B. Arbeits- und Maschineneinsatz, Strom/Telefon, Material und Fremdfirmen erfolgte (Wichmann *et al.* 2020), konnte für die anschließende Periode 2016 bis 2022 aufgrund von später sowie unvollständiger Datenbereitstellung keine vergleichbare sowie vergleichende Quantifizierung erfolgen.

Im Zeitraum vom 01.05.2020 bis 31.12.2022 konnte keine Ernte durch ökonomische Untersuchungen begleitet werden. Anhand der Auswertung der Arbeitszeitdokumentation war jedoch nachvollziehbar, dass folgende Ernten durchgeführt wurden: 17.07.2018 (F1, Ernteversuch mit CO₂-Messung), 29.+30.04.2019 (F2, Streifen 1, für Saatgut), 23.03.2020 (F1, Streifen 1, für Substrat), 26.-30.10.2020 (F2, Streifen 1, für Saatgut) sowie 2.11.-6.11.2020 (F2-2, 2-3, 3 bis auf den Torf für Substrat). Da eine Erfassung von Zeitbedarf und Maschineneinsatz bisher nur bei der Torfmoosernte im Jahr 2016 durchgeführt werden konnte, wäre es sinnvoll, zukünftige Ernte ökonomisch zu begleiten.

6.4.8. Zusammenfassung

Wachstum

- Auch elf Jahre nach der Einrichtung nahm die Torfmoos-Rasenhöhe weiter zu und hielt die hohe Biomasseakkumulationsrate von 4 t Torfmoos-Trockenmasse ha⁻¹ im Mittel an. Das führte auch zu einer anhaltend hohen Aufnahme von Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Kalium sowie gleichbleibenden Nährstoffkonzentrationen im Porenwasser, also keiner Anreicherung. Bislang wurden im Hinblick auf das Torfmooswachstum weder Nährstofflimitation noch -toxizität festgestellt. In der gesamten Biomasse waren nach zehn Jahren Wachstum 2.600 kg C, 56 kg N, 3,2 kg P, 9 kg K pro Hektar und Jahr festgelegt. Die Torfmoos-Produktionsflächen fungierten auch im 11. Anbaujahr als CO₂-Senke.
- Dennoch ist die **THG-Bilanz** des gesamten Produktionssystems negativ, es werden THG freigesetzt, jedoch substantiell weniger als im Vergleich zur Vornutzung als Hochmoorgrünland. Ursache hierfür ist der hohe Anteil von Fahrdämmen, die viel CO₂ ausstoßen. Perspektivisch ist deshalb die Verringerung von Oberbodenabtrag und des Anteils der daraus errichteten Fahrdämme angeraten.
- Im 12. Anbaujahr wurde trotz hoher Produktivität erstmalig eine Abnahme der Biomasseakkumulation um ca. 10 % infolge stärkerer Zersetzung festgestellt. Hält dieser Trend an bzw. bleibt die Menge der akkumulierten Biomasse auf dem derzeitigen Niveau, ist abzuleiten, dass sich ein **Gleichgewicht** zwischen neuem Biomasseaufwuchs (Produktivität) und Zersetzung einstellt, so dass auch bei weitergeführter Bewirtschaftung keine höheren Erträge erzielt werden können und spätestens jetzt geerntet werden sollte. Für eine Absicherung dieses Ergebnisses sind weiterführende Beobachtungen notwendig.
- **Aufbau einer hydrologischen Regulationsschicht:** Belässt man den unteren (älteren), schon etwas zersetzten Teil der aufgewachsenen Torfmoos-Biomasseschicht auf der Produktionsfläche, kann diese als Untergrund für eine Neueinrichtung dienen, was insbesondere bei einer geringen Leitfähigkeit des alten Torfes oder zum Ausgleich des Mikroreliefs sinnvoll erscheint. Infolge ihrer hohen Wasserleitfähigkeit und ihrer Elastizität, mit dem Wasserstand zu schwanken („Schwamm-sumpfigkeit“), was Überstau und Austrocknung der Torfmoose abpuffert, wären so optimale Bedingungen für die Etablierung und Wachstum eines neuen Torfmoosrasens geschaffen, eine Dicke von mindestens 10 cm vorausgesetzt. Zudem würde diese Schicht als Wasserspeicher dienen und würde mehr Kohlenstoff längerfristig festgelegt bleiben (carbon farming). Voraussetzung dafür ist jedoch, dass diese Schicht aus strukturstabilen Torfmoos-Arten (z.B. *Sphagnum palustre*, *S. papillosum*, *S. rubellum*) gebildet wurde.
- Infolge der regelmäßigen Mahd nahm die Deckung von **Gefäßpflanzen** weiter ab, was im Hinblick auf Torfmoos-Wachstum und Rohstoffqualität für die Verwendung in gärtnerischen Substraten erstrebenswert ist. Zukünftig könnten die Kosten für die Pflegemahd durch den Einsatz eines autonomen Pfleroboters reduziert werden.
- **Wassermanagement:** Der Wasserstand wurde mit dem Wachstum der Torfmoose angehoben. Bei gleicher Niederschlagssumme ist der Bewässerungsbedarf geringer, wenn der Niederschlag gleichförmig verteilt ist im Vergleich zu einzelnen Starkregenereignissen. Um den Bedarf an zusätzlichem Bewässerungswasser zu reduzieren, ist die Torfmoosernte (mit vorherigem Absenken des Wasserstandes) im Winterhalbjahr empfohlen, wenn das notwendige Wasser für das erneute Anheben des Wasserstandes durch den Niederschlag erfolgen kann.
- **Biodiversität:** Die Torfmoos-Paludikultur hat sich als langfristiges Ersatzhabitat für (Hochmoor-)Arten, von denen viele Rote Liste-Arten sind erwiesen, insbesondere bei angepasstem

Management (Mosaikernte, Grabenoffenhaltung). Es hat sich gezeigt, dass die Pilzgemeinschaft von Alter der Kultur und Nährstoffverfügbarkeit abhängig ist, jedoch kaum von der Torfmoos-Art.

Ernte und Regeneration

- Nach der Ernte stiegen die Methanemissionen auf den Torfmoos-Produktionsflächen kurzzeitig an, was vermutlich jedoch mit dem hohen Wasserstand (Überstau?) auf der Untersuchungsfläche in Verbindung steht. Wenn der Wasserstand etwas abgesenkt werden würde, sind geringere Methanemissionen zu erwarten.
- Erst sechs Jahre nach Ernte hatte sich wieder eine geschlossene Decke von Torfmoosköpfchen gebildet und damit deutlich langsamer und mit weniger Biomasseaufwuchs als auf den Flächen, die zeitgleich zur Ernte neu eingerichtet wurden. Daraus wird geschlussfolgert, dass das Abschneiden der obersten Torfmooschicht und Stehenlassen des unteren Rasenteils zur Regeneration als großflächige **Erntemethode** ungeeignet ist. Wenn die untere Schicht (z.B. für die bessere hydrologische Regulation) stehen gelassen wird, dann ist die Ausbringung von neuem Saatgut notwendig, die richtige Zusammensetzung der verbliebenen Biomasseschicht vorausgesetzt (s.o.).
- Der Anteil der **Torfmoos-Zielarten** war sechs Jahre nach der Ernte so hoch wie zuvor, möglicherweise infolge niedrigeren Wasserstands.
- **Biodiversität:** Durch die Ernte wurde vorübergehend die Artenvielfalt und -häufigkeit der Spinnen-Individuen verringert und das Vorkommen an moorspezifischen Spinnenarten erhöht.

6.5. Eignung von Rohrkolben und Schilf in Kombination mit Torfmoos-Biomasse als Ausgangsstoffe für gartenbauliche Substrate (AP2)

6.5.1. Literaturstudie

Um zu Beginn des Teilvorhabens (Anfang 2021) einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand und die Nutzung von Rohrkolben und Schilf als Ausgangsstoffe für Substrate zu bekommen, wurde hierzu recherchiert und die gesammelten Ergebnisse in einer Literaturstudie zusammengefasst (Lüdtke 2021).

Im Fokus standen die substratrelevanten physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften sowie Aufbereitungsmethoden und pflanzenbauliche Experimente. Ökologische oder ökonomische Aspekte wie z.B. Nachhaltigkeit, Verfügbarkeit oder Preis der Ausgangsstoffe wurden außer Acht gelassen, da der Schwerpunkt des Teilprojektes hauptsächlich im Bereich der gartenbaulichen Nutzung lag. Es wurde überwiegend Literatur in deutscher und englischer Sprache gesichtet und Experten befragt. Viele Ergebnisse waren jedoch noch nicht veröffentlicht bzw. Versuche noch nicht abgeschlossen.

Auch trotz unterschiedlicher Versuchsansätze und eingeschränkter Vergleichbarkeit konnte geschlussfolgert werden, dass Rohrkolben und Schilf durchaus als Substratbestandteile verwendet werden können, wobei Rohrkolben eher geeignet erscheint als Schilf. In der Literaturstudie identifizierte Herausforderungen bei der Verwendung von Rohrkolben und Schilf als Substratausgangsstoffe, konnten bei den eigenen Untersuchungen berücksichtigt werden, z.B. die bessere Eignung von Material aus der Winterernte. Biomasse aus dem Sommer enthält meist sehr hohe Chlorid- und Salzgehalte, was in Kultursubstraten zu Pflanzenschäden führen kann. Zudem scheint der Volumenanteil im Substrat begrenzt möglich zu sein. Insbesondere bei der Aufbereitung sind noch viele Fragen offen, aber ebenso das Potential, um Eigenschaften anzupassen. Hierbei spielt

der Stickstoffhaushalt beider Materialien die wichtigste Rolle. Die meisten Untersuchungen zeigten, dass es in den Rohstoffen zur Immobilisierung von Stickstoff kommt, was in Substraten unerwünscht ist. Hierzu gibt es bereits Kompostierungsversuche mit vielversprechenden Ergebnissen z.B. im Projekt MoorUse (Hochschule Weihenstephan-Triesdorf). Auch Verfahren die von anderen Ersatzstoffen bekannt sind, wie beispielsweise die Imprägnierung bei Holzfasern, könnten in Betracht kommen, wurden bisher aber nicht untersucht. Ebenso fehlen bislang Daten, in wieweit die verschiedenen Rohrkolben-Arten sich in den Substrateigenschaften unterscheiden. Die Recherche hat hierzu keine gesicherten Ergebnisse liefern können, da zu wenige Daten vorlagen. Die umfassende Prüfung der Rohstoffe steht demnach noch am Anfang, wie die Recherche auch zeigte.

Da bei keinen anderen Untersuchungen Rohrkolben und Schilf mit Torfmoos kombiniert wurden, waren die Erfahrungen über Mischungsanteile, Düngung, Kalkung und Bewässerung im Falle des eigenen Projektes auch grundsätzlich selbst zu sammeln.

6.5.2. Charakterisierung der Substratausgangsstoffe

Physikalische und chemische Parameter

In Tabelle 28 sind die ermittelten Werte von Rohdichte und organischer Substanz zusammengefasst. Alle Ausgangsstoffe weisen eine hohe organische Substanz und eine geringe Rohdichte auf.

Tabelle 28. Rohdichten der untersuchten Substratausgangsstoffe.

Ausgangsstoff	Org. Substanz [% TM]	Rohdichte [g/l]	
		frisch	trocken
<i>Sphagnum</i>			
Torfmoos	92,5	405	65
<i>Rohrkolben (Typha angustifolia)</i>			
Sommer 2021	92,6	135	49
Sommer 2022	96,4	105	70
Winter 2021	97,5	115	40
<i>Rohrkolben (Typha latifolia)</i>			
wenig Samen	93,8	80	35
viele Samen	92,9	150	57
<i>Schilf (Phragmites australis)</i>			
Sommer 2021	94,4	180	84
Sommer 2022	97,2	140	96
Winter 2021	98,2	215	60
Schilf Fremd	95,2	220	156

Die Ergebnisse der chemischen Analysen der verschiedenen Substratausgangsstoffe sind in Tabelle 29 und Tabelle 30 zusammengefasst.

Tabelle 29. Analysenergebnisse von im Winter geerntetem Schilf und Rohrkolben (*Typha latifolia*) unterschiedlicher Herkunft.

Ausgangsstoff	pH-Wert (CaCl ₂)	Nährstoffgehalte (CAT-Methode) [mg/l Substrat]						Salz [g/l]
		NH ₄ -N	NO ₃ -N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	
<i>Typha latifolia</i>								
Rohrkolben wenig Samen	5,8	< 1	< 1	< 1	49	70	47	0,29
Rohrkolben viele Samen	6,4	15	< 1	15	137	414	69	0,71
Rohrkolben gelagert	5,6	19	< 1	19	93	146	77	0,42
<i>Phragmites australis</i>								
Schilf Fremd	5,3	14	< 1	14	8	76	n.b.*	0,23

* Werte wurden nicht bestimmt (n.b.).

Tabelle 30. Analysenergebnisse der torfhaltigen Kontrolle und der aufbereiteten Ausgangsstoffe von der Versuchsfläche in Hankhausen.

Ausgangsstoff	pH-Wert (CaCl ₂)	Nährstoffgehalte (CAT-Methode) [mg/l Substrat]						(H ₂ O) [mg/l]		Salz [g/l]
		NH ₄ -N	NO ₃ -N	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	Na	Cl	
Torf										
Kontrolle	3,1	17	< 1	17	3	11	99	n.b.*	n.b.*	0,15
<i>Sphagnum</i>										
Torfmoos	4,2	64	< 1	64	27	88	96	36	72	0,25
Rohrkolben (<i>Typha angustifolia</i>)										
Sommer 2021	5,7	13	< 1	13	318	791	121	577	1240	2,66
Sommer 2022	6,0	69	< 1	69	147	541	167	776	1368	2,42
Winter 2021	6,1	< 1	< 1	< 1	11	52	106	106	123	0,25
Schilf (<i>Phragmites australis</i>)										
Sommer 2021	5,4	12	< 1	12	351	1604	101	67	797	2,97
Sommer 2022	5,9	64	< 1	64	128	878	166	149	736	2,23
Winter 2021	5,7	< 1	< 1	< 1	27	204	108	68	171	0,31

* Werte wurden nicht bestimmt (n.b.).

Die Analyseergebnisse der Torfmischung für das Kontrollsubstrat zeigen, wie erwartet, einen niedrigen pH-Wert und geringe Nährstoffgehalte. Hierbei wird eine Ähnlichkeit des Torfmooses zum Torf deutlich. Zwar bringt das Torfmoos minimal höhere Nährstoff- und Salzgehalte und einen höheren pH-Wert mit, jedoch sind diese immer noch im niedrigen Bereich. Niedrige Werte sind bei Ausgangsstoffen von Vorteil, da Substraten dann individuell durch Düngung und Kalkung für den entsprechenden Zweck angepasst werden können. Hohe Gehalte in Ausgangsstoffen, wie die von z.B. Kalium in den Rohstoffen aus der Sommerernte, lassen sich ohne weitere Behandlung nur durch Mischung mit nährstoffarmen Bestandteilen wieder ausgleichen. Ebenso, wenn das Material bereits einen hohen pH-Wert mit sich

bringt. Die Absenkung des pH-Wertes in einem Substrat ist schwieriger als seine Anhebung. Somit sind niedrige pH-Ausgangswerte von Vorteil. Für die meisten Kulturen sind pH-Werte von pH 5,5 bis 6,0 wünschenswert, aber es gibt auch Kulturen die ein saureres Milieu ($\text{pH} \leq 5,0$) bevorzugen. Die Ausgangsstoffe aus Rohrkolben und Schilf lagen jedoch alle oberhalb dieses Wertes. Für die eigenen Versuche war der niedrige pH-Wert des Torfmooses als Mischungspartner somit von Vorteil, da so auch der pH-Wert der Mischungen niedriger war und gut durch Kalkung angepasst werden konnte.

In den Ausgangsstoffen aus Winterernte waren die Stickstoff- und Magnesiumgehalte gering, ebenso die Phosphat- und Kaliumgehalte. Einzig das Material mit vielen Samen wies einen deutlich höheren Kaliumgehalt auf. Im Material aus der Sommerernte waren die Nährstoffgehalte, wie zu erwarten, wesentlich höher. Zwar sind auch hier die Stickstoffgehalte niedrig, dafür die Kaliumgehalte jedoch wesentlich höher. In Kombination mit den ebenfalls hohen Natrium- und Chloridgehalten ergeben sich so hohe Salzfrachten in den Ausgangsstoffen, die während der Kultur zu Schäden an den Pflanzen führen können. Dies spiegelt sich auch in der Höhe der Salzgehalte wieder. Die Inhaltsstoffe im Material aus der Sommerernte unterscheiden sich insbesondere bei den Phosphat- und Kaliumwerten, diese liegen im zweiten Jahr etwas niedriger. Der Natriumgehalt ist hingegen etwas höher, während Chlorid auf einem ähnlichen Niveau liegt. Die Ursache hierfür könnte z.B. in Schwankungen der zur Verfügung stehenden Menge der Inhaltsstoffe in den Filterbecken liegen. Auch der Wasserspiegel und das Erntedatum können eine Rolle spielen, denn in 2022 erfolgte die Ernte einen Monat später als im Vorjahr (Wichmann & Wichtmann 2009, Hartung & Meinken 2021).

Die untersuchten Parameter der Ausgangsstoffe liegen im Material aus der Winterernte in einem für Substrate geeigneten Bereich. Die hohen Kalium-, Natrium- und Chloridgehalte im Material aus der Sommerernte sind kritisch zu betrachten und bei den Mischungsanteilen als Substratbestandteil zu beachten, falls sie dennoch verwendet werden.

Biologische Parameter – Keimpflanzentests und Brutversuch

Zur Charakterisierung der biologischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe wurden verschiedene Keimtests durchgeführt. Die Ergebnisse vom Nachweis keimfähiger Samen und austriebfähiger Pflanzenteile (Unkrauttest) sowie vom Nachweis auf gasförmige pflanzenschädigende Stoffe (Kressetest) sind in Tabelle 31 zu sehen.



Abbildung 66. Unkrauttest von gehäckseltem Rohrkolben mit vielen Samen im Material. Geerntet von einem Bestand mit ca. 90 % Pflanzen mit Samenständen.

Während die Ausgangsstoffe von der eigenen Versuchsfläche unkrautfrei sind, sind die zugekauften Materialien alle als stark verunkrautet zu bewerten. Hierfür ist einerseits sicherlich der Anteil an Samenständen im verarbeiteten Material verantwortlich, so wurde insbesondere in dem Rohrkolbenmaterial mit hohem Anteil an Kolben im geernteten Bestand ('RK viele Samen') viele

Keimlinge von Rohrkolben gezählt (siehe Abbildung 66). Andererseits wurden die zugekauften Ausgangsstoffe aus *Typha latifolia* maschinell geerntet und hierbei direkt gehäckselt. Unkräuter können so direkt während des Ernteprozesses ins Material gelangt sein. Hierfür spricht, dass nicht nur Rohrkolben und Schilfkeimlinge im Unkrauttest gefunden wurden. Das Ausgangsmaterial von der Versuchsfläche hingegen enthielt fast gar keine Samenstände im aufbereiteten Material, und sofern sie bei der Aufbereitung sichtbar waren, wurden die Kolben per Hand aussortiert. Daher sollte bei einer Verwendung als Substratausgangsstoff die Kolbenbildung des Bestandes im Blick behalten werden oder das Material einer Behandlung unterzogen werden, um Unkrautfreiheit zu gewährleisten (z.B. Dämpfung).

Tabelle 31. Ergebnisse des Unkrauttests und des Kresstests aller Substratausgangsstoffe.

Ausgangsstoff	Unkrauttest		Kresstest
	Anzahl Pflanzen/Liter	Bewertung	Bewertung
<i>Sphagnum</i>			
Torfmoos	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Rohrkolben (<i>Typha angustifolia</i>)			
Sommer 2021	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Sommer 2022	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Winter 2021	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Rohrkolben (<i>Typha latifolia</i>)			
wenig Samen	6,7	stark verunkrautet	keine Schäden zu erwarten
viele Samen	236	stark verunkrautet	Schäden möglich
gelagert	26,7	stark verunkrautet	keine Schäden zu erwarten
Schilf (<i>Phragmites australis</i>)			
Sommer 2021	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Sommer 2022	0	weitgehend unkrautfrei	Schäden möglich
Winter 2021	0	weitgehend unkrautfrei	keine Schäden zu erwarten
Schilf Fremd	6,7	stark verunkrautet	keine Schäden zu erwarten

Der Kresstest zeigte weitestgehend keine gasförmigen Phytotoxene in den Ausgangsstoffen. Ausnahmen bildeten das Rohrkolbenmaterial mit vielen Samen („RK viele Samen“) und das aus der Sommerernte 2022 von der Versuchsfläche im Hankhauser Moor („RK Hank So22“). In beiden Fällen blieben die Wurzeln der Kresse hier kürzer als bei der Test-Kontrolle, Schäden waren jedoch nicht zu sehen. Ein negativer Einfluss dieser Ausgangsstoffe auf das Pflanzenwachstum ist somit nicht ausgeschlossen.

Die Ergebnisse der Tests zur Prüfung auf pflanzenschädigende Stoffe, die durch Aufnahme über die Wurzeln wirken (Chinakohl-Test), sind in Tabelle 32 dargestellt. Eine pflanzenschädigende Wirkung liegt vor, wenn die relative Frischmasse $\leq 85\%$ des Wertes bei der Kontrolle erreicht. Die relative Frischmasse der Tests mit 25 Vol.-% Prüfmaterialanteil liegen alle oberhalb dieses Wertes. Bei der Verwendung von 50 Vol.-% Prüfmaterial zeigten sich beim Schilf aus den beiden Sommerernten und

dem zugekauften Material eine geringere Masse. Die Probe mit 50 Vol.-% Rohrkolben aus Sommerernte in 2022 liegt auch nur knapp über dem Grenzwert. Diese Ausgangsstoffe sollten somit in geringeren Anteilen in Substratmischungen verwendet werden. Eine Keimhemmung ist bei keinem der Ausgangsstoffe aufgetreten.

Tabelle 32. Relative Frischmasse (FM) in Bezug auf die Kontrolle und Keimrate in Prozent aus den Chinakohl-Tests der getesteten Ausgangsstoffe mit unterschiedlichen Prüfmaterialanteilen im Substrat (Mittelwerte, n=4 Töpfe mit je 25 Pflanzen).

Ausgangsstoff	25 Vol.-% Prüfmaterial		50 Vol.-% Prüfmaterial	
	FM (r) [%]	Keimrate [%]	FM (r) [%]	Keimrate [%]
Rohrkolben (<i>Typha angustifolia</i>)				
Sommer 2021	120,2	92,0	96,7	98,7
Sommer 2022	103,1	98,7	85,2	100,0
Winter 2021	105,0	96,0	105,7	93,3
Rohrkolben (<i>Typha latifolia</i>)				
wenig Samen	97,7	96,0	98,7	93,3
viele Samen	99,2	94,7	99,0	98,7
gelagert	95,3	93,3	93,7	94,7
Schilf (<i>Phragmites australis</i>)				
Sommer 2021	93,8	89,3	23,5	94,7
Sommer 2022	94,3	97,3	55,5	98,7
Winter 2021	109,2	96,0	99,8	97,3
Schilf Fremd	91,1	100,0	70,6	97,3
Sphagnum				
Torfmoos	115,9	93,3	123,0	94,7
	100 Vol. % Prüfmaterial			
	FM (r) [%]	Keimrate [%]		
	137,2	93,3		

Die Stabilität des Stickstoffhaushaltes wurde mittels Brutversuchen analysiert. Die Bebrütung erfolgte bei allen Ausgangsstoffen über 20 Tage, bei einigen wurde der Zeitraum, abweichend von der Methode, auf 60 Tage verlängert, um die weitere Entwicklung im Material verfolgen zu können. Die Ergebnisse der Brutversuche sind in Tabelle 33 zu finden. Der VDLUFA empfiehlt (beruhend auf der Bebrütungsdauer von 20 Tagen) leicht instabile Materialien mit einem maximalen Volumenanteil von 40 Vol.-% mit stabilen Ausgangsstoffen zu Substraten zu mischen. Nicht stabile Ausgangsstoffe mit einer Veränderung des Stickstoffgehaltes unter 250 mg N/l sollten zu höchstens 20 Vol.-% Anteil eingesetzt werden. Weiter wird empfohlen Materialien die darüber liegen nicht als Ausgangsstoffe für Substrate zu verwenden.

Tabelle 33. Veränderung des Mineralstickstoff-Gehaltes in den getesteten Ausgangsstoffen über einen Bebrütungszeitraum von 20 und 60 Tagen.

Ausgangsstoff	Stickstoffhaushalt nach 20 Tagen Bebrütung		Stickstoffhaushalt nach 60 Tagen Bebrütung	
	ΔN mg/l	Bewertung	ΔN mg/l	Bewertung
Torf				
Kontrolle	-27	Stabil	-80	leicht instabil
<i>Sphagnum</i>				
Torfmoos	18	Stabil	-105	leicht instabil
Rohrkolben (<i>Typha angustifolia</i>)				
Sommer 2021	-231	nicht stabil	-257	nicht stabil
Sommer 2022	-333	nicht stabil	-	-
Winter 2021	-22	Stabil	-188	nicht stabil
Winter 2021 WH	-310	nicht stabil	-	-
Rohrkolben (<i>Typha latifolia</i>)				
wenig Samen	-99	leicht instabil	-233	nicht stabil
viele Samen	-250	nicht stabil	-456	nicht stabil
Schilf (<i>Phragmites australis</i>)				
Sommer 2021	-169	nicht stabil	-236	nicht stabil
Sommer 2022	-489	nicht stabil	-	-
Winter 2021	-117	leicht instabil	-241	nicht stabil
Winter 2021 WH	-361	nicht stabil	-	-
Schilf Fremd	-764	nicht stabil	-1018	nicht stabil

Anmerkung: Aus der Bewertung ergeben sich die folgenden Empfehlungen der VDLUFA für die Verwendung als Substratbestandteil. Grün = zu 100 Vol. % einsetzbar, Gelb = zu max. 40 Vol. % einsetzbar, Orange = zu max. 20 Vol. % einsetzbar, Rot = es sollte kein Einsatz als Substratausgangsstoff erfolgen.

Während Torf und Torfmoos über 20 Tage einen stabilen Stickstoffhaushalt aufwiesen und erst bei einer Bebrütung von 60 Tagen leicht instabil reagierten, ist die Mehrheit der anderen Substratausgangsstoffe als nicht stabil zu beurteilen. Es werden teilweise hohe Mengen Stickstoff immobilisiert. Die im Winter 2021 von der Versuchsfläche geernteten Ausgangsstoffe Rohrkolben und Schilf wurden nach 9 Monaten Lagerung erneut getestet (Winter 2021 WH). Hier zeigte sich eine deutliche Abweichung zu der Bewertung aus dem ersten Testansatz. Sowohl Rohrkolben, als auch Schilf zeigen in der Wiederholung (WH) einen als 'nicht stabil' beurteilten Stickstoffhaushalt. Ob diese Unterschiede auf Veränderungen im Rohstoff während der Lagerung beruhen, ist im Nachhinein nicht nachzuvollziehen. Wiederholte Bestimmungen bei beiden Materialien lieferten ähnliche Ergebnisse. Ausgehend von diesen Ergebnissen ist der Einsatz von Rohrkolben und Schilf in gärtnerischen Substraten ohne weitere Vorbehandlung als kritisch zu beurteilen. Die Stickstoff-Immobilisierung ist in jedem Fall bei der Verwendung zu beachten.

Anzumerken ist, dass die Ansätze mit Rohrkolben und Schilf alle zu einer Verpilzung während der Bebrütung neigten, besonders stark das Material aus Sommerernte.

Zusammenfassung

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften von im Winter geernteten Material werden als kompatibel mit den Anforderungen an Substratausgangsstoffe bewertet. Die Nährstoffgehalte sind niedrig, die pH-Werte noch in einem akzeptablen Bereich. Das im Sommer geerntete Material erfüllt diese Anforderungen nicht. Die hohen Gehalte an unerwünschten und pflanzenschädigenden Inhaltsstoffen wie z.B. Chlorid sprechen gegen eine Verwendung der Biomasse aus Sommerernte. Dies zeigt sich bei Schilf auch in den Keimtests. Jedoch wären geringe Volumenanteile im Substrat wahrscheinlich möglich. Für eine Einschränkung der Volumenanteile spricht sowohl bei Winter-, als auch bei Sommerernte der instabile Stickstoffhaushalt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen somit eine Eignung von Rohrkolben und Schilf aus Winterernte als Substratausgangsstoffe in einem begrenzten Volumenanteil und eine stark begrenzte Eignung von Ausgangsstoffen aus Sommerernte.

6.5.3. Pflanzenbauliche Versuche

Eine ausführliche Darstellung der Ergebnisse für alle durchgeführten pflanzenbaulichen Versuche gibt Lütke *et al.* (2022). Zusammengefasst wurde festgestellt, dass Substratmischungen aus Rohrkolben und Schilf in Kombination mit Torfmoos eine funktionierende und gleichwertige Alternative zu einem Torfsubstrat sein können (z. B. Abbildung 67). Es traten keine Schäden oder Mangelerscheinungen bei den Testpflanzen auf und in den Mischungen wuchsen verkaufsfähige Pflanzen heran.

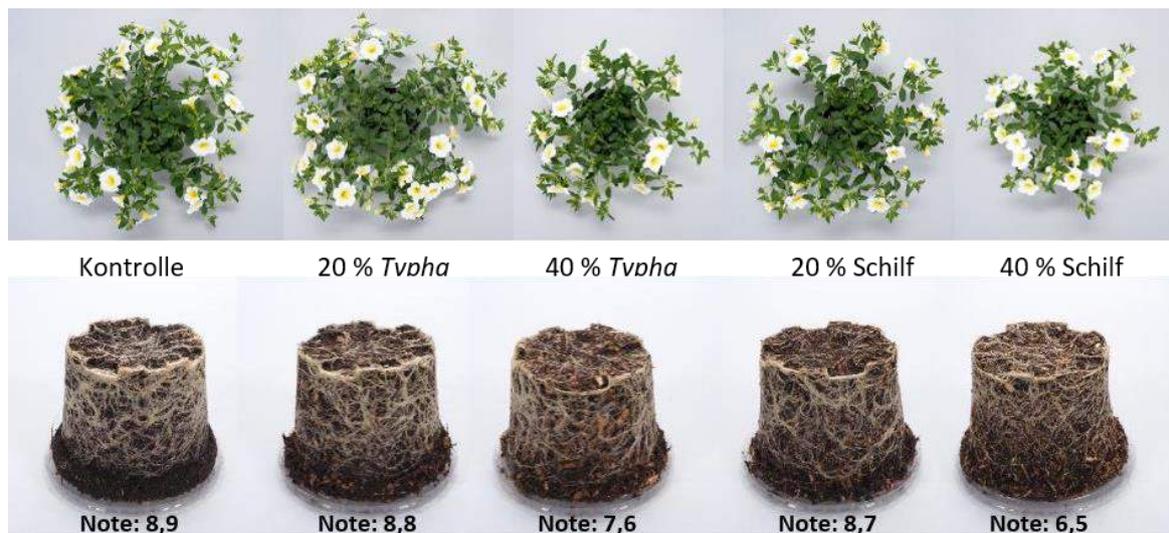


Abbildung 67. Erscheinungsbild zum Versuchsende von *Calibrachoa* MiniFamous® Uno White+Yellow Eye in einem Torfsubstrat (Kontrolle) und Mischungen mit steigendem Anteil an Rohrkolben (*Typha*) bzw. Schilf in Kombination mit Torfmoos zu Versuchsende. Obere Reihe: Pflanzenaufsicht, untere Reihe: Durchwurzelung der Ballen mit Boniturnoten. Die Durchwurzelung der Ballen wurde mit Noten von 1 (keine Wurzeln sichtbar) bis 9 (vollständig durchwurzelt) bewertet (Mittelwerte, n=60). (Fotos: Pilz/Nordmeyer, LWK Niedersachsen)

In den Paludikultur-Substraten mit einem Anteil von 20 Vol.- % Rohrkolben bzw. Schilf aus Winterernte war die Wachstumsleistung der kultivierten Pflanzen weitestgehend vergleichbar mit denen in einem torfhaltigen Substrat. Mit steigenden Anteilen konnte in den Versuchen allerdings eine Ertragsminderung, bzw. ein verzögertes Wachstum, festgestellt werden. Neben Frischmasse und Pflanzengröße nahm insbesondere die Durchwurzelung der Ballen in den Testmischungen ab. Eine besondere Herausforderung stellte die Stabilität des pH-Wertes im Kulturverlauf dar. Hier sind Anpassungen an die Düngerwahl je nach verwendetem Gießwasser zu beachten. Bei der Bewässerung konnten keine Unterschiede zwischen den Substraten belegt werden. Allerdings erfordert die

Einschätzung der Ballenfeuchtigkeit zur Beurteilung des Wasserbedarfs eine Umgewöhnung, wenn dies durch Anheben der Töpfe erfolgt. Die Paludikultur-Substrate werden mit steigendem Rohrkolben und Schilf-Anteil immer leichter. So kann sich direkt nach dem Gießen ein Topf mit einer Mischung aus 40 Vol.- % Schilf + 60 Vol.- % Torfmoos beim Anheben leichter anfühlen als ein Topf mit Torf. Hier ist, wie bei allen neuen Substratausgangsstoffen, eine Umgewöhnung nötig. Gleiches gilt für die Düngung. Die Immobilisierung von Stickstoff durch Rohrkolben und Schilf ist nicht ausgeschlossen, auch wenn in den eigenen Versuchen keine Mangelerscheinungen nachgewiesen werden konnten.

7. Synthese und Schlussfolgerungen

Im Ergebnis der Forschungen im OptiMOOS-Projekt lässt sich folgendes ‘best practice’-Produktionssystem für die Torfmoos-Paludikultur ableiten (vgl. Abbildung 68), um insbesondere Treibhausgas-Emissionen und Nährstoffausträge zu minimieren und zugleich optimales Torfmooswachstum zu ermöglichen:

- **Oberbodenabtrag:** geringer Abtrag von 5-10 cm mit Erhalt des Mikroreliefs
- **Fahrdamm:** ohne Fahrdamm zwischen den Produktionsflächen, d.h. Fahrdämme nur an den Stirnseiten für die Bewirtschaftung der Produktionsflächen und als Begrenzung der gesamten Produktionsfläche (zur Einpolderung); Rückbau bestehender Fahrdämme zwischen den Produktionsflächen. Das erfordert die Entwicklung von Maschinen, die die Produktionsflächen befahren können, ohne den Torfmoosrasen bzw. die alte Torfoberfläche (im Zuge der Ernte) zu schädigen.
- **Bewässerungssystem:**
 - Wasserzufuhr über ein automatisches Pumpsystem aus nahegelegenen Gräben, Flüssen, Grundwasser (mehrere Brunnen über Fläche verteilt) ggf. mit Zwischenspeicherung auch von überschüssigem Regenwasser; die Filterleistung von mit Rohrkolben bzw. Schilf bepflanzten Filterbecken konnte bislang nicht nachgewiesen werden
 - offene Gräben nur an den Stirnseiten der Produktionsflächen für die Wasserzufuhr auf der einen und dem Wasserablauf auf der gegenüberliegenden Seite; Überläufe in den Vorfluter oder zur Zwischenspeicherung sind der Flächengröße anzupassen, um einen zügigen Ablauf von Überschusswasser zu gewährleisten
 - für Wasserversorgung in der Fläche sind Rillen besser als unterirdische Drainagerohre, die innerhalb von 1-2 Jahren verstopfen; Rillen werden in 5-10 m Abständen zwischen den Gräben gezogen, was insbesondere während der Etablierungsphase wichtig ist, wenn die Bewässerung durch Torfkörper erfolgt; Rillen können vergleichbar schnell und einfach erneuert werden; kurze Überstauphasen bzw. Überrieselung sind wachstumsfördernd
 - Gräben regelmäßig offenhalten zur Erhöhung der Biodiversität (Lebensraum für Libellen)

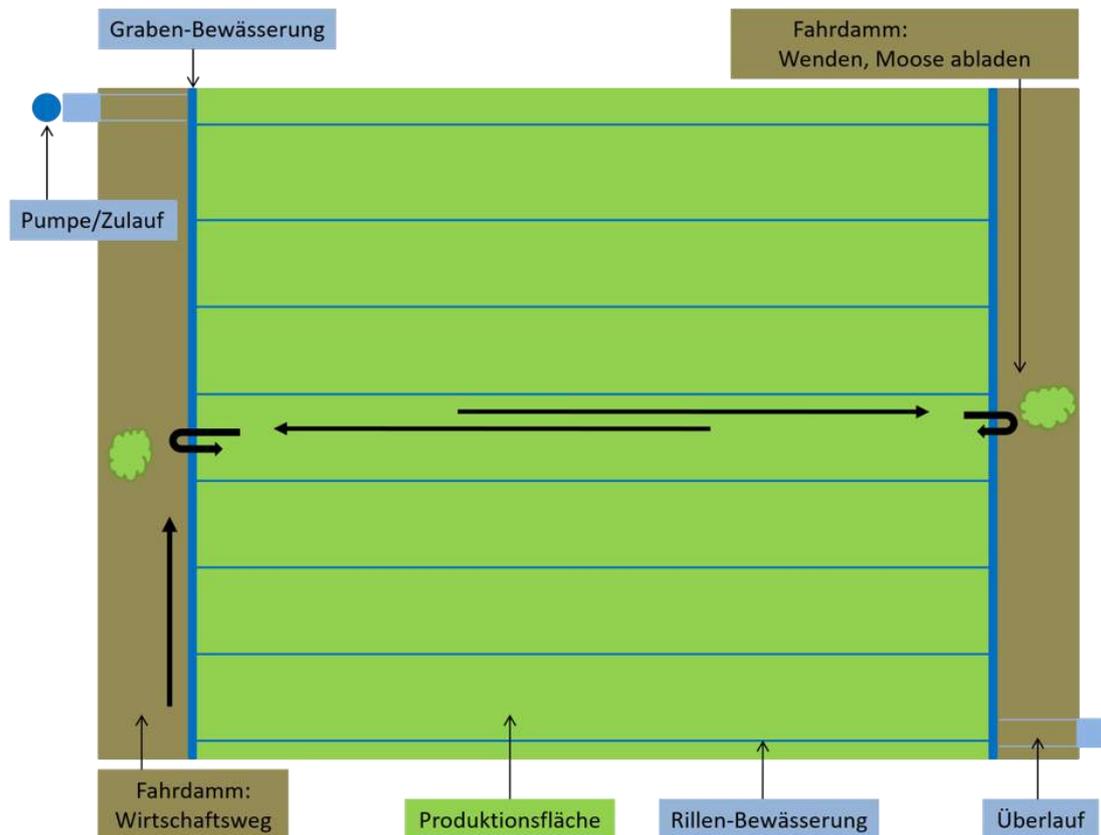


Abbildung 68. Schema für 'best practice' Flächeneinrichtung bei Befahren der Produktionsfläche mit Bewässerungsfahrzeugen (Aufsicht). Abstand zwischen den Bewässerungsgräben ca. 10 m.

Als weiteres Ergebnis der Forschungen im OptiMOOS-Projekt lassen sich folgende Verbesserungen für das Produktionsverfahren resümieren:

- **Pflege/ Management:** Das automatische Bewässerungssystem hat sich über 11 Jahre bewährt. Die Pflegemahd sollte zukünftig mit einem autonomen Roboter erfolgen. Die langfristige Dominanz von Ziel-Torfmoosarten kann wahrscheinlich weniger über die Nährstoffverfügbarkeit (einschl. Stöchiometrie) als vielmehr über einen geringeren Wasserstand aufrechterhalten werden, wobei dann von Produktivitätseinbußen auszugehen ist.
- **Ernte:** Anstatt der Ernte der oberen Torfmooschicht und anschließender Regeneration der stehengebliebenen Restschicht sollte die gesamte aufgewachsene Biomasse bis zur (alten) Torfoberfläche abgeerntet und verwertet und die Fläche anschließend neu eingerichtet werden. Dabei können die obersten (grünen) 5 cm des Torfmoosrasens in einem ersten Schnitt abgeerntet und bei Eignung als Saatgut für die Neueinrichtung verwendet werden. Zum Erhalt bzw. zur Erhöhung der Biodiversität sollte die Ernte mosaikartig erfolgen. Bei einer geringen Leitfähigkeit des unterliegenden (alten) Torfes, zum Ausgleich des Mikroreliefs oder zur längerfristigen Festlegung von Kohlenstoff (carbon farming) ist es sinnvoll, einen Teil des aufgewachsenen Torfmoosrasens stehen zu lassen und darauf Saatgut für die schnelle Etablierung eines gut wüchsigen Torfmoosrasens auszubringen.

In OptiMOOS-Projekt wurde erstmalig erfolgreich ein Paludikultursubstrat entwickelt. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine Eignung von Rohrkolben und Schilf aus Winterernte als Substrat-

ausgangsstoffe in einem begrenzten Volumenanteil und eine stark begrenzte Eignung von Ausgangsstoffen aus Sommerernte. In Kombination mit Torfmoos-Biomasse ist ein 100%iges Paludikultursubstrat weitestgehend ohne Qualitätsverlust möglich.

Die Ziele des OptiMOOS Projektes, Wasser- und Nährstoffmanagement, Klimabilanz, Biodiversität von Torfmoos-Paludikultur zu optimieren und ein Paludikultursubstrat zu entwickeln, wurden erreicht. Auch wenn sich weitere Detailfragen ergeben haben, ist das Verfahren praxisreif. Jetzt ist es Aufgabe der Politik, die Rahmenbedingungen so umzugestalten, dass (Torfmoos-)Paludikultur für Landwirte eine echte Alternative darstellt und rentabel wird. Nur dann kann auch der Nachfrage nach gesicherter Rohstofflieferung von nachwachsender Torfmoos-Biomasse in zertifizierter hoher Qualität für die Substratindustrie und den Gartenbau bedient werden.

Das Land Niedersachsen spielt bei der Umsetzung von Torfmoos-Paludikultur eine herausragende Rolle. Es ist nicht nur das moorreichste Bundesland, sondern beheimatet mit etwa 208.000 ha über 80 % der Hochmoorflächen in Deutschland. Anders als Niedermoore sind Hochmoore ausschließlich regenwassergespeiste Ökosysteme, die aufgrund dessen unter nährstoffarmen Bedingungen insbesondere durch das Vorkommen von Torfmoosen aufwachsen. Derzeit werden über 70 % der Hochmoorflächen entwässert, um sie landwirtschaftlich (v.a. als Hochmoorgrünland) zu nutzen. Für die Erreichung der Klimaschutzziele ist die Wiedervernässung der Moore notwendig und das in einem erheblich höheren Tempo als bislang. Berechnungen des Greifswald Moor Centrum zeigen, dass durchschnittlich ca. 37.000 ha Moorflächen in Niedersachsen pro Jahr wiedervernässt werden müssen, wenn die Klimaneutralität bis 2040 erreicht werden soll. Das entspricht ungefähr der Größenordnung der innerhalb der letzten 40 Jahre wiedervernässten Flächen (Barthelmes *et al.* 2021). Paludikultur bietet die Möglichkeit wiederzuvernässen und zugleich die Produktionsfunktion der Moore aufrechtzuerhalten sowie Landwirten eine dauerhafte Einkommensquelle zu sichern.

8. Veröffentlichungen und Öffentlichkeitsarbeit

wissenschaftliche Publikationen

Borg Dahl, M., Krebs, M., Unterseher, M., Urich, T. & Gaudig, G. (2020) Temporal dynamics in the taxonomic and functional profile of the *Sphagnum*-associated fungi (mycobiomes) in a *Sphagnum* farming field site in Northwestern Germany. *FEMS Microbiology Ecology*, 96, 11, 1–11; doi: 10.1093/femsec/fiaa204

Daun, C., Huth, V., Gaudig, G., Günther, A., Krebs, M. & Jurasinski, G. (2023) Full-cycle greenhouse gas balance of a *Sphagnum* paludiculture site on former bog grassland in Germany. *STOTEN*, 877, 162943; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162943>

Gaudig, G. (2019) *Sphagnum* growth and its perspectives for *Sphagnum* farming. Dissertation, Universität Greifswald. ([pdf](#))

Gaudig, G., Krebs, M. & Joosten, H. (2020) *Sphagnum* growth under N-saturation: interactive effects of water level and P or K fertilization. *Plant Biology*, doi:10.1111/plb.13092

Gaudig, G., Prager, A., Krebs, M. (in Vorb.) Parameters for fast *Sphagnum* lawn establishment.

Käärmelahti, S.A., Fritz, C., Quadra, G.R., Erize Gardoki, M., Gaudig, G., Krebs, M. & Temmink, R.J.M. (einger.) Topsoil removal for *Sphagnum* establishment on rewetted agricultural bogs: opportunities and challenges. *Biogeochemistry*.

- Käärmelahti, S.A., Temmink, R.J.M., van Dijk, G., Prager, A., Kohl, M., Gaudig, G., Koks, A.H.W., Krebs, M., Liu, W., Vroom, R.J.E., Peters, R.C.J.H. & Fritz, C. (akzeptiert) Nutrient dynamics of 12 *Sphagnum* species during establishment on a rewetted bog. *Plant Biology*.
- Muster, C., Krebs, M. & Joosten, H. (2021) Seven years of spider community succession in a *Sphagnum* farm. *Journal of Arachnology* 42(2), 119–131. doi: 10.1636/0161-8202-48.2.119
- Temmink, R.J.M., Vroom, R., van Dijk, G., Käärmelahti, S.A., Koks, A.H.W., Joosten, H., Krebs, M., Gaudig, G., Brust, K., Lamers, L.P.M., Smolders, A.J.P. & Fritz, C. (einger.) Regenerating carbon and nutrient accumulation in degraded peatlands: 10 years *Sphagnum* paludiculture. *Biogeochemistry*.
- Vroom, R., Temmink, R.J.M., van Dijk, G., Joosten, H., Lamers, L.P.M., Smolders, A.J.P., Krebs, M., Gaudig, G. & Fritz, C. (2020) Nutrient dynamics of *Sphagnum* farming on rewetted peat grassland in NW Germany. *STOTEN*, 726, 138470, 1–11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138470
- Wichmann, S. (2021) The economics of paludiculture: Costs & benefits of wet land use options for degraded peatlands - with a focus on Reed and *Sphagnum* moss. Dissertation, Universität Greifswald. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:9-opus-63374>
- Wichmann, S., Krebs, M., Kumar, S., Gaudig, G. (2020) Paludiculture on former bog grassland: Profitability of *Sphagnum* farming in North West Germany. *Mires and Peat*, 26, 08, 1–18. doi: 10.19189/MaP.2019.SNPG.StA.1768

Weitere Publikationen

- GMC & DVL (2021) Vorgaben zum Grünlanderhalt bei der Umstellung auf Paludikultur. Informationspapier, Februar 2021. <https://www.greifswaldmoor.de/informationen/informationen.html>
- GMC (2022) Stellungnahme des Greifswald Moor Centrum zum Antrag „Förderung von Moorschutz in Niedersachsen“ ([pdf](#))
- Lüdtke, M. (2021) Die Nutzung von Rohrkolben (*Typha spp.*) und Schilf (*Phragmites australis*) als Substratausgangsstoff [Literaturstudie]. Bericht zum Arbeitspaket 2: Paludikultur-Substrat im Projekt OptiMOOS, Landwirtschaftskammer Niedersachsen. ([link](#))
- Lüdtke, M. (2021) OptiMOOS: Ein gärtnerisches Kultursubstrat aus Paludikulturpflanzen? Jahresbericht der Norddeutsche Kooperation im Gartenbau, 2020/2021, 9–10, Landwirtschaftskammer Niedersachsen. <https://norddeutsche-kooperation.de/archiv/>
- Lüdtke, M. (2022) OptiMOOS - Beiträge aus dem Projektblog: OptiMOOS: Ein gärtnerisches Kultursubstrat aus Paludikulturpflanzen? [Blogeintrag]. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Veröffentlicht am 10.08.2022 ([link](#))
- Lüdtke, M. und Emmel, M. (2022) Torfersatz dank Paludikulturen. Jahresbericht 2022 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Landwirtschaftskammer Niedersachsen. ([link](#))
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022) Ein gärtnerisches Kultursubstrat aus Paludikulturen – Substratentwicklung im Projekt OptiMOOS. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. ([link](#))
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022a) Torffreie Kultursubstrate aus Paludikultur [Poster Präsentation]. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Moor- und Torfkunde e.V., Freiburg in Breisgau, 02. - 04.06.2022
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022b) Torffreie Kultursubstrate aus Paludikultur [Poster Präsentation]. Tagung Torfminderungskonzepte, Freisingen & Digital, 21. – 22.06.2022 ([link](#))

- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022c) Torffreie Kultursubstrate aus Paludikultur [Poster Präsentation mit Informationsstand]. Ahlemer Friedhofsnachmittag, Hannover-Ahlem, 16.08.2022
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022d) Torffreie Kultursubstrate aus Paludikultur [Poster Präsentation]. Fachtagung Rohrkolben und Schilf - Moorschutz und Produkte, Oldenburg, 01.12.2022.
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022e) Projekt OptiMOOS: Wachstum von *Calibrachoa* in torffreien Paludikultur-Substraten aus Rohrkolben, Schilf und Torfmoos. Versuche im deutschen Gartenbau 2022, Versuchsbericht Zierpflanzen, Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover-Ahlem. www.hortigate.de
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022f) Projekt OptiMOOS: Wachstum von *Pelargonium zonale* in torffreien Paludikultur-Substraten aus Rohrkolben, Schilf und Torfmoos. Versuche im deutschen Gartenbau 2022, Versuchsbericht Zierpflanzen, Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover-Ahlem. www.hortigate.de.
- Lüdtke, M., Emmel, M., Beßler, B. (2022g) Projekt OptiMOOS: Wachstum von *Saintpaulia ionantha* in torffreien Paludikultur-Substraten aus Rohrkolben, Schilf und Torfmoos. Versuche im deutschen Gartenbau 2022, Versuchsbericht Zierpflanzen, Lehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Hannover-Ahlem. www.hortigate.de
- Wichmann, S., Nordt, A., Schäfer, A. (2022) Lösungsansätze zum Erreichen der Klimaschutzziele und Kosten für die Umstellung auf Paludikultur. Hintergrundpapier zur Studie „Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050“. Hg. v. Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt (DEHSt). Berlin. ([pdf](#))

Öffentlichkeitsarbeit

- 04.09.2020 öffentlicher Feldtag mit verschiedenen thematischen Stationen auf der Versuchsfläche im Hankhauser Moor
- 2021 Nachhaltigkeitsbericht der Universität Oldenburg
- 26.05.2021 Besuch der nds. Landwirtschaftsministerin Barbara Otte-Kinast in Hankhausen
- 14.07.2022 Besuch der nds. Landtagsfraktion B90/Grüne
- 30.05.2022 Besuch einer Delegation aus Finnland
- 04.06.2022 Bundeslandwirtschaftsminister Cem Özdemir am Greifswald Moor Centrum -> Torfmoosmutterpflanzenquartier und Torfmoos-Paludikultur
- 24./25.08.2022 Firma Gramoflor am Greifswald Moor Centrum → alternative Substratausgangsstoff, u.a. Rohrkolben-Anbau
- 22.09.2022 Besuch Delegation Amt für Klimaschutz und Mobilität der Stadt Oldenburg
- 22.09.2022 Besuch einer Delegation aus dem Baltikum
- Beratung zum Business Case Torfmoos-Paludikultur: Firma ZukunftMoor GmbH ([link](#)), z.B. 22.06.2022, Greifswald, 19.01.2023, online, 17.03.2023, online

+ zahlreiche Medienberichte, u.a.

21.08.2022 ARD Sendung mit der Maus, Sachgeschichte: Klima Folge 5: Landwirtschaft ([link](#))

20.04.2022 arte „Paradiese aus Menschenhand - Die Rückkehr der Moore“

05.04.2022 KATAPULT M-V „Kunst und Klimakrise - Moos der Uni Greifswald in Venedig“

27.03.2022 Neue Westfälische Zeitung „Niedersachsens Moore müssen wiedervernässt werden“

21.03.2022 Hamburger Abendblatt „Torffreie Erde - so denken Hobbygärtner auch ans Klima“

9. Zitierte Literatur

Aerts R., Wallen B., Malmer N. (1992) Growth-limiting nutrients in *Sphagnum*-dominated bogs subject to low and high atmospheric nitrogen supply. *Journal of Ecology*, 80, 131–140.

AraGes (2022) Atlas der Spinnentiere Europas. – <https://atlas.arages.de/> (24. November 2022).

Baden, W. & Eggelsmann, R. (1963) Zur Durchlässigkeit der Moorböden. *Z. Kulturtechn.*, 4, 226–254.

Baranyai, B., Krebs, M., Oehmke, C. & Joosten, H. (2022) Total biomass and annual yield of *Drosera* on cultivated *Sphagnum* in north-west Germany. *Mires and Peat*, 28, Art. 31, 19pp.; doi: 10.19189/MaP.2020.OMB.StA.1995

Barthelmes, A., Abel, S., Barthelmes, K.-D., Couwenberg, J., Kaiser, M., Reichelt, F., Tanneberger, F. & Joosten, H. (2021) Evaluierung von Moor-Wiedervernässungen in Deutschland – Ergebnisse, Erfahrungen und Empfehlungen. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 171, 121–148.

Baumann, K., Kastner, F., Borkenstein, A., Burkart, W., Jödicke, R., & Quante, U. (2021) Rote Liste der in Niedersachsen und Bremen gefährdeten Libellen mit Gesamtartenverzeichnis, 3. Fassung – Stand 31.12.2020. *Inform.d. Naturschutz Niedersachs.*, 40(1/2021), 3–37.

Bigaignon, L., Fieuzal, R., Delon, C., & Tallec, T. (2020). Combination of two methodologies, artificial neural network and linear interpolation, to gap-fill daily nitrous oxide flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 291, 108037.

Blick, T., Finch, O.-D., Harms, K.H., Kiechle, J., Kielhorn, K.-H., Kreuels, M., Malten, A., Martin, D., Muster, C., Nährig, D., Platen, R., Rödel, I., Scheidler, M., Staudt, S., Stumpf, H. & Tolke, D. (2016) Rote Liste und Gesamtartenliste der Spinnen (Arachnida: *Araneae*) Deutschlands. *Naturschutz und Biologische Vielfalt*, 70(4), 383–510.

Bragazza, L., Tahvanainen, T., Kutnar, L., Rydin, H., Limpens, J., Hájek, M., ... & Gerdol, R. (2004) Nutritional constraints in ombrotrophic *Sphagnum* plants under increasing atmospheric nitrogen deposition in Europe. *New Phytologist*, 609–616.

Breeuwer, A., Heijmans, M., Robroek, B. J., Limpens, J., & Berendse, F. (2008) The effect of increased temperature and nitrogen deposition on decomposition in bogs. *Oikos*, 117(8), 1258–1268.

Breitling, R., Merches, E., Muster, C., Duske, K., Grabolle, A., Hohner, M., Komposch, C., Lemke, M., Schäfer, M., Blick, T. (2020) Liste der Populärnamen der Spinnen Deutschlands (Araneae). *Arachnologische Mitteilungen*, 59, 38–62.

Brochard, C., Groenendijk, C., van der Ploeg, E., & Termaat, T. (2012) Fotogids Larvenhuidjes van Libellen: KNNV Uitgeverij, 320 S.

- Brust, K., Krebs, M., Wahren, A., Gaudig, G. & Joosten, H. (2018) The water balance of a Sphagnum farming site in north-west Germany. *Mires and Peat*, 20(10), 1–12.
- Busch, K. F., Luckner, L., & Tiemer, K. (1993) Geohydraulik, Lehrbuch der Hydrogeologie. Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Callahan, B. J., McMurdie, P. J., Rosen, M. J., Han, A. W., Johnson, A. J. A., & Holmes, S. P. (2016) DADA2: High-resolution sample inference from Illumina amplicon data. *Nature methods*, 13(7), 581–583.
- Couwenberg, J., Reichelt, F. & Jurasinski, G. (in Vorb.) Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy: an update of the GEST-list.
- Daun, C., Huth, V., Gaudig, G., Günther, A., Krebs, M. & Jurasinski, G. (2023) Full-cycle greenhouse gas balance of a *Sphagnum* paludiculture site on former bog grassland in Germany. *STOTEN*, 877, 162943; <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162943>
- Dijkstra, K.-D. B. (2021) Libellen Europas - Der Bestimmungsführer. 2., aktualisierte und ergänzte Auflage. Dijkstra, K.-D. B. / Schröter, A. (Hrsg.), Levington, R. (Ill.). Bern: Haupt, 336 S.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D. & Lautenbach, S. (2013) Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36, 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Edom, F., Münch, A., Dittrich, I., Keßler, K., & Peters, R. (2010) Hydromorphological analysis and water balance modelling of ombro- and mesotrophic peatlands. *Advances in Geosciences*, 27, 131–137.
- Engloner, A.I. (2009) Structure, growth dynamics and biomass of reed (*Phragmites australis*) – A review, *Flora*, 204, 331–346.
- Field, A. (2018) Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics. 5th edition. ed. SAGE Publications, Thousand Oaks, CA.
- FloraWeb (Stand 15.03.2023, Herausgeber Bundesamt für Naturschutz). <https://www.floraweb.de/>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W. & Dufresne, J.L. (2021) Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. 210 pp. Online at: In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B. (Eds.), IPCC Sixth Assessment Report. Cambridge University Press. ([pdf](#)) (Aufgerufen am 27.03.2023).
- Fritsch, S., Günther, F. & Wright, M.N. (2019) Training of Neural Networks: R package. Online at: <https://CRAN.R-project.org/package=neuralnet>, aufgerufen am 13.02.2023.
- Gacia, E., Bernal, S., Nikolakopoulou, M., Carreras, E., Morgado, L., Ribot, M., Isnard, M., Sorolla, A., Sabater, F., & Martí, E. (2019) The role of helophyte species on nitrogen and phosphorus retention from wastewater treatment plant effluents. *Journal of Environmental Management*, 252, 109585. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109585>
- Gaudig, G. & Krebs, M. (2016) Torfmooskulturen als Ersatzlebensraum - Nachhaltige Moornutzung trägt zum Artenschutz bei. *Biologie in unserer Zeit*, 46/4, 251–257 DOI: 10.1002/biuz.201610600
- Gaudig, G., Krebs, M. & Joosten, H. (2017) Sphagnum farming on cut-over bog in NW Germany: Long-term studies on *Sphagnum* growth. *Mires and Peat*, 20(4), 1–19. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.238

- Gaudig, G., Krebs, M. & Joosten, H. (2020) *Sphagnum* growth under N-saturation: interactive effects of water level and P or K fertilization. *Plant Biology*, doi:10.1111/plb.13092
- Gaudig, G., Krebs, M., Prager, A., Wichmann, S. and 30 others (2018) Sphagnum farming from species selection to the production of growing media: a review. *Mires and Peat*, 20(13), 1–30. DOI: [10.19189/MaP.2018.OMB.340](https://doi.org/10.19189/MaP.2018.OMB.340)
- Gebremariam, S.Y. & Beutel, M.W. (2008) Nitrate removal and DO levels in batch wetland mesocosms: Cattail (*Typha* spp.) versus bulrush (*Scirpus* spp.). *Ecological Engineering*, 34, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.06.005>
- Gerken, B., & Sternberg, K. (1999) *Die Exuvien europäischer Libellen*. Höxter, Jena: Arnika & Eisvogel, 354 S.
- Geurts, J. & Fritz C. (2018) Paludiculture pilots and experiments focus on cattail and reed in the Netherlands. Technical report CINDERELLA project, Radboud University Nijmegen, 72 p.
- Geurts, J.J.M., Oehmke, C., Lambertini, C., Eller, F., Sorrell, B.K., Mandiola, S.R., Grootjans, A.P., Brix, H., Wichtmann, W., Lamers, L.P.M., Fritz, C. (2020) Nutrient removal potential and biomass production by *Phragmites australis* and *Typha latifolia* on European rewetted peat and mineral soils. *Science of the Total Environment*, 747. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141102>
- Golovatskaya, E. A., & Nikonova, L. G. (2017) The influence of the bog water level on the transformation of *Sphagnum* mosses in peat soils of oligotrophic bogs. *Eurasian Soil Science*, 50, 580–588.
- Grießer, S. (2016) Torfersatzsubstrate für den Erwerbsgartenbau - Ein Beitrag für nachhaltige Landnutzung in Niedersachsen. Diss. Uni Vechta.
- Günther A., Schenzle E., Jurasinski G. (2014) Flexible chambers for greenhouse gas measurements in tall vegetation. <https://doi.org/10.13140/2.1.2923.4241>
- Günther, A., Jurasinski, G., Huth, V., Glatzel, S. (2013) Opaque closed chambers underestimate methane fluxes of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 2151–2158. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3524-5>
- Günther, A., Jurasinski, G., Albrecht, K., Gaudig, G., Krebs, M., Glatzel, S. (2017) Greenhouse gas balance of an establishing *Sphagnum* culture on a former bog grassland in Germany. *Mires and Peat*, 20, 1–16. <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.210>
- Hartung, C., & Meinken, E. (2021, 11. März). Suitability of fen plants as growing media constituent in terms of chloride content [Poster Präsentation]. Virtual Conference Renewable Resources from Wet and Rewetted Peatlands - RRR 2021, Digital.
- Hassel, K., Kyrkjeeide, M. O., Yousefi, N., Prestø, T., Stenøien, H. K., Shaw, J. A., & Flatberg, K. I. (2018) *Sphagnum divinum* (sp. nov.) and *S. medium* Limpr. and their relationship to *S. magellanicum* Brid. *Journal of Bryology*, 40(3), 197–222.
- Hillebrand, H., Blasius, B., Borer, E.T., Chase, J.M., Downing, J.A., Eriksson, B.K. et al. (2018) Biodiversity change is uncoupled from species richness trends: Consequences for conservation and monitoring. *Journal of Applied Ecology*, 55, 169–184.
- Hofer, B. & Pautz, B. (2006). Integriertes Gebiets-Entwicklungs-Konzept Hankhauser Moor, Hydrologie/Folgelandschaft. 16 S.
- Hoffmann, M., Pehle, N., Huth, V., Jurisch, N., Sommer, M., Augustin, J. (2018) A simple method to assess the impact of sealing, headspace mixing and pressure vent on airtightness of manually closed chambers. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 181, 36–40. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600299>

- Huth, V., Günther, A., Bartel, A., Gutekunst, C., Heinze, S., Hofer, B., Jacobs, O., Koebsch, F., Rosinski, E., Tonn, C., Ullrich, K., Jurasinski, G. (2021) The climate benefits of topsoil removal and *Sphagnum* introduction in raised bog restoration. *Restoration Ecology*, 1–9. <https://doi.org/10.1111/rec.13490>
- Huth, V., Günther, A., Bartel, A., Hofer, B., Jacobs, O., Jantz, N., Meister, M., Rosinski, E., Urich, T., Weil, M., Zak, D., Jurasinski, G. (2020) Topsoil removal reduced in-situ methane emissions in a temperate rewetted bog grassland by a hundredfold. *Science of the Total Environment*, 721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137763>
- Jödicke, R., Baumann, K., Pix, A., & Borkenstein, A. (2021) *Leucorrhinia rubicunda* – Nordische Moosjungfer. In Baumann, K., Jödicke, R., Kastner, F., Borkenstein, A., Burkart, W., Quante, U., & Spengler, T. (Hrsg.), *Atlas der Libellen in Niedersachsen/Bremen*. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Libellen in Niedersachsen und Bremen, Sonderband (282-286): NIBUK.
- Joosten, H. (1993): Denken wie ein Hochmoor: Hydrologische Selbstregulation von Hochmooren und deren Bedeutung für Wiedervernässung und Restauration. *TELMA*, 23, 95–115.
- Jurasinski, G., Koebsch, F., Günther, A., Beetz, S. (2022) flux: Flux rate calculation from dynamic closed chamber measurements: R package. Online auf: <https://CRAN.R-project.org/package=flux>, aufgerufen am 13.02.2023.
- Käärmelahti, S.A., Fritz, C., Quadra, G.R., Erize Gardoki, M., Gaudig, G., Krebs, M. & Temmink, R.J.M. (einger.) Topsoil removal for *Sphagnum* establishment on rewetted agricultural bogs: opportunities and challenges. *Biogeochemistry*.
- Kindt, R. (2022): BiodiversityR: Package for Community Ecology and Suitability Analysis. R package version 2.14-4.
- Knoblauch, C., Spott, O., Evgrafova, S., Kutzbach, L. & Pfeiffer, E-M. (2015) Regulation of methane production, oxidation, and emission by vascular plants and bryophytes in ponds of the northeast Siberian polygonal tundra. *Biogeoscience*, 120, 2525–2541. <https://doi.org/10.1002/2015JG003053>
- Köhn, D., Welpelo, C., Günther, A. & Jurasinski, G. (2021) Drainage Ditches Contribute Considerably to the CH₄ Budget of a Drained and a Rewetted Temperate Fen. *Wetlands*, 41. <https://doi.org/10.1007/s13157-021-01465-y>
- Koks, A., Dijk, G. V., Smolders, A. J. P., Lamers, L. P. M., & Fritz, C. (2019) The effects of alkalinity and cations on the vitality of *Sphagnum palustre* L. *Mires and Peat*, 24, Art. 25, 1–14. DOI: 10.19189/MaP.2018.OMB.392
- Komsta, L. (2013) mblm: Median-Based Linear Models: R-package. Online auf: <https://CRAN.R-project.org/package=mblm>, aufgerufen am 13.02.2023.
- Laine, J., Flatberg, K. I., Harju, P., Timonen, T., Minkinen, K. J., Laine, A., ... & Vasander, H. T. (2018) *Sphagnum* mosses: the stars of European mires. *Sphagna Ky*.
- Legendre, P., & Gallagher, E. D. (2001) Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia*, 129, 271–280.
- Lohr, M. (2021) *Brachytriton pratense* - Früher Schilfjäger. In: Baumann, K., Jödicke, R., Kastner, F., Borkenstein, A., Burkart, W., Quante, U., & Spengler, T. (Hrsg.) *Atlas der Libellen in Niedersachsen/Bremen*. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Libellen in Niedersachsen und Bremen, Sonderband (195–198): NIBUK.

- Lüdtke, M. (2021) Die Nutzung von Rohrkolben (*Typha* spp.) und Schilf (*Phragmites australis*) als Substratausgangsstoff [Literaturstudie]. Bericht zum Arbeitspaket 2: Paludikultur-Substrat im Projekt OptiMOOS, Landwirtschaftskammer Niedersachsen. ([link](#))
- Lüdtke, M., Emmel, M. & Beßler, B. (2022) Ein gärtnerisches Kultursubstrat aus Paludikulturen – Substratentwicklung im Projekt OptiMOOS. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. ([link](#))
- Martin, D. (2021) Atlas zur Verbreitung und Ökologie der Spinnen (Araneae) Mecklenburg-Vorpommerns. 2 Bände. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern.
- Martin, D. (2022) Rote Liste der Webspinnen (Araneae) Mecklenburg-Vorpommerns. 3. Fassung. Stand: April 2022. Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern. Im Druck.
- Muster, C., Gaudig, G., Krebs, M. & Joosten, H. (2015) Sphagnum farming: the promised land for peat bog species? – *Biodiversity and Conservation*, 24, 1989–2009. DOI: 10.1007/s10531-015-0922-8
- Muster, C., Krebs, M. & Joosten, H. (2020) Seven years of spider community succession in a Sphagnum farm. *Journal of Arachnology*, 48, 119–131.
- Neubert, J., Köhn, N., Haldan, K., Kuprina, K. & Wichmann, S. (2022) Paludikultur in die Praxis bringen: Integration – Management – Anbau. Schlussbericht zum Projekt Paludi-PRIMA. Förderkennzeichen: 22026017. Universität Greifswald. 82 S. (pdf)
- NIBIS (2021) Niedersächsischen Bodeninformationssystem. <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>.
- NLKWV (2015) Verzeichnis der in Niedersachsen besonders oder streng geschützten Arten - Tabelle Teil A: Wirbeltiere, Pflanzen und Pilze, Aktualisierte Fassung 01.01.2015 (pdf)
- Nordström, E., Eckstein, R. L., & Lind, L. (2022) Edge effects on decomposition in *Sphagnum* bogs: Implications for carbon storage. *Ecosphere*, 13(9), e4234.
- Oberdorfer, E. (1994) Pflanzensoziologische Exkursionsflora. Ulmer Verlag, 1050 S.
- Ott, J., Conze, K.-J., Günther, A., Lohr, M., Mauersberger, R., Roland, H.-J., & Suhling, F. (2015) Rote Liste und Gesamtartenliste der Libellen Deutschlands mit Analyse der Verantwortlichkeit, dritte Fassung, Stand Anfang 2012 (Odonata). *Libellula Supplement*, 14, 395–422.
- Pfadenhauer, J. & Wild, U. (1998) Rohrkolbenanbau in Niedermooren – Integration von Rohstoffgewinnung, Wasserreinigung und Moorschutz zu einem nachhaltigen Nutzungskonzept. DBU-Abschlussbericht, 119 S.
- Putkinen, A., Tuittila, E.-S., Siljanen, H.M.P., Bodrossy, L. & Fritze, H. (2018) Recovery of methane turnover and the associated microbial communities in restored cutover peatlands is strongly linked with increasing *Sphagnum* abundance. *Soil Biology and Biochemistry*, 116, 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.005>
- QGIS Development Team (2022). QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Quante, U., & Burkart, W. (2021) *Ischnura elegans* - Große Pechlibelle. In Baumann, K., Jödicke, R., Kastner, F., Borkenstein, A., Burkart, W., Quante, U., & Spengler, T. (Hrsg.) Atlas der Libellen in Niedersachsen/Bremen. Mitteilungen der Arbeitsgemeinschaft Libellen in Niedersachsen und Bremen, Sonderband (126–128): NIBUK.
- R Core Team (2022) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. – <https://www.R-project.org/> (24. November 2022).

- R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Online auf: <https://www.r-project.org>
- Reich, M., Zoch, L., Grobe, A., Tiemeyer, B. & Oestmann, J. (2019) Abschlussbericht für die Projekte MoosKult und KlimDivMoos. Deutsche Bundesstiftung Umwelt. (pdf)
- Rodewald-Rudescu, L. (1974). Das Schilfrohr (*Phragmites communis* Trinius). Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 302 S.
- Rote-Liste-Zentrum (<https://www.rote-liste-zentrum.de/>), Stand 16.03.2023
- Rudolph, H., Kirchhoff, M. & Gliessmann, S. (1988) *Sphagnum* culture techniques. In: Glime, J.M. (ed.) Methods in Bryology. Proceedings of the Bryological Methods Workshop, Mainz. Hattori Botanical Laboratory, Nichinan, 29–34.
- Salehzadeh, M., & Rezaie, H. (2017) Performance Removal Nitrate and Phosphate from Treated Municipal Wastewater Using *Phragmites Australis* and *Typha Latifolia* Aquatic Plants. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 47.3(88), 59–67. (pdf)
- Schätzl, R., Schmitt, F., Wild, U. & Hoffmann, U. (2006) Gewässerschutz und Landnutzung durch Rohrkolbenbestände. *Wasserwirtschaft*, 96, 24–27.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., ... & Cardona, A. (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nature methods*, 9(7), 676–682.
- Schrier-Uijl, A.P., Veraart, A.J., Leffelaar, P.A., Berendse, F. & Veenendaal, E.M. (2011) Release of CO₂ and CH₄ from lakes and drainage ditches in temperate wetlands. *Biogeochemistry*, 102, 265–279. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9440-7>
- Succow, M. & Joosten, H. (Hrsg.) (2001) Landschaftsökologische Moorkunde. 2. völlig neu bearbeitete Auflage, Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, 622 S.
- Sudarsan, J.S., Roy, R.L., Baskar, G., Deeptha, V.T. & Nithiyantham, S. (2015) Domestic wastewater treatment performance using constructed wetland. *Sustainable Water Resources Management*, 1, 89–96. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0008-5>
- Sylla, A., Rihani, M., Amine, J., Assobhei, O. & Etahiri, S. (2018) Exploitation of *Phragmites australis* (Reeds) in Filter Basins for the Treatment of Wastewater. *Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 56–67. <https://doi.org/10.3923/jest.2018.56.67>
- Tegetmeyer, C., Barthelmes, K.-D., Busse, S. & Barthelmes, A. (2021) Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. 2., überarbeitete Fassung. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 01/2021 (Selbstverlag, ISSN 2627-910X), 10 S.
- Temmink, R.J.M., Fritz, C., van Dijk, G., Hensgens, G., Lamers, L.P.M., Krebs, M., Gaudig, G. & Joosten, H. (2017) Sphagnum farming in a eutrophic world: The importance of optimal nutrient stoichiometry. *Ecological Engineering*, 98, 196–205. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2016.10.069.
- Tiemeyer, B., Bechtold, M., Belting, S., Freibauer, A., Förster, C., Schubert, E., ... & Drösler, M. (2017). Moorschutz in Deutschland—Optimierung des Moormanagements in Hinblick auf den Schutz der Biodiversität und der Ökosystemleistungen. *BfN Skripten*, 462, 320 S.
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E.A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., Leiber-Sauheitl, K. and 2 others (2020) A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, 109, 1–14 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>

- Tschoeltsch, S. (2008) Reet: Vom Anbau bis zum Dach. Das Reetprojekt aus der Eider-Trene-Sorge Niederung. 61 S.
- Tukey, J.W. (1977) Exploratory data analysis. Addison-Wesley Pub. Co, Reading, Mass., 688 pp.
- UBA (Umweltbundesamt) 2022. Hintergrundbelastungsdaten Stickstoff, 2013–2015. ([link](#))
- van den Elzen, E., Kox, M.A.R., Harpenslager, S.F., Hensgens, G., Fritz, C., Jetten, M.S.M., Ettwig, K.F. & Lamers, L.P.M. (2017) Symbiosis revisited: phosphorus and acid buffering stimulate N₂ fixation but not Sphagnum growth. *Biogeosciences*, 14, 1111–1122. doi: 10.5194/bg-14-1111-2017.
- Van Wijk, W. R., & Scholte Ubing, D. W. (1963) Radiation. Physics of plant environment. North-Holland Pub. Co., Amsterdam, 62-101.
- von Post, L. (1924) Das genetische System der organogenen Bildungen Schwedens. Comite internat. Peddologie. IV. Comm. Nr. 22 IV. internat. bodenkundl. Konferenz.
- Vroom, R., Temmink, R.J.M., van Dijk, G., Joosten, H., Lamers, L.P.M., Smolders, A.J.P., Krebs, M., Gaudig, G. & Fritz, C. (2020) Nutrient dynamics of Sphagnum farming on rewetted peat grassland in NW Germany. *STOTEN*, 726, 138470, 1–11. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138470
- Walter, H. & Lieth, H. (1967) Klimadiagramm-Weltatlas. VEB Gustav Fischer Verlag, Jena, 256 S.
- Wichmann, S. & Wichmann, W. (Hrsg.) (2009) Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt “Energiebiomasse aus Niedermooren (ENIM)” Institut für Botanik und Landschaftsökologie, Universität Greifswald. ([pdf](#))
- Wichmann, S., Krebs, M., Kumar, S. & Gaudig, G. (2020) Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. *Mires and Peat*, 26, 08, 1–18. doi: 10.19189/MaP.2019.SNPG.StA.1768
- Wichmann, S., Prager, A. & Gaudig, G. (2017) Establishing *Sphagnum* cultures on bog grassland, cut-over bogs, and floating mats: procedures, costs and area potential in Germany. *Mires and Peat*, 20(3), 1–19. DOI: 10.19189/MaP.2016.OMB.235
- Wickham, H. (2009) ggplot2. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-98141-3>
- Wikipedia (Stand 16.3.2023) <https://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia>
- Wilcox, D.A. (1984) The effects of NaCl deicing salts on *Sphagnum recurvum* P. beav. *Environmental and Experimental Botany*, 24(4), 295–304. doi: 10.1016/0098-8472(84)90026-1.
- Wildermuth, H. (1994) Habitatselektion bei Libellen. *Advances in Odonatology*, 6, 223–257.
- Wildermuth, H., & Küry, D. (2009) Libellen schützen, Libellen fördern. Leitfaden für die Naturschutzpraxis. *Beiträge zum Naturschutz in der Schweiz*, 31/2009.
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995) Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 259–269.
- WSC (2022). World Spider Catalog. Version 23.5. Natural History Museum Bern. <http://wsc.nmbe.ch> (24. November 2022).
- Zinke, P., & Edom, F. (2006). Hydraulische und hydrologische Erklärung von Ökotoptstrukturen am Regenmoor Kriegswiese im mittleren Erzgebirge. *Archiv Naturschutz and Landschaftsforschung*, 45(2), 43–60.
- Zoch, L., & Reich, M. (2020) Torfmooskultivierungsflächen als neuer Lebensraum für Moorlibellen. *Libellula*, 39(1/2), 27–48.