

Schlussbericht

zum Vorhaben

Thema:

Nachhaltigkeit von Paludikulturen (NAPALU) – unter besonderer Berücksichtigung des Stoffhaushaltes

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: 3N Kompetenzzentrum e.V.

Teilvorhaben 2: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, IÖL, PSC

Teilvorhaben 3: Johann Heinrich von Thünen-Institut

Teilvorhaben 4: Julius Kühn-Institut

Teilvorhaben 5: Universität Trier

Teilvorhaben 6: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Teilvorhaben 7: Hochschule Bremen

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 2221MT010A

Teilvorhaben 2: 2221MT010B

Teilvorhaben 3: 2221MT010C

Teilvorhaben 4: 2221MT010D

Teilvorhaben 5: 2221MT010E

Teilvorhaben 6: 2221MT010F

Teilvorhaben 7: 2221MT010G

Laufzeit: **5.11.2022 bis 28.02.2026**

Monat der Erstellung:

03/2026

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	1
	Aufgabenstellung.....	1
1.	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
2.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	3
	Arbeitspakete und Meilensteine	3
	Resümee.....	4
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	5
1.	Erzielte Ergebnisse	5
	Arbeitspaket 1: Flächenmanagement und Ernte	7
	Arbeitspaket 2: Biomassequantität und -qualität	11
	Arbeitspaket 3: Stoffhaushalt	23
	Arbeitspaket 4: Biodiversität	36
	Arbeitspaket 5: Pflanzenwachstumsmodellierung	41
	Arbeitspaket 6: Regionale Nutzungsketten.....	43
	Arbeitspaket 7: Ökonomische Bewertung	56
	Arbeitspaket 8: Öffentlichkeitsarbeit	62
2.	Verwertung	65
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	65
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	65
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende.....	65
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	66
3.	Erkenntnisse von Dritten	67
	Abbildungsverzeichnis	68
	Tabellenverzeichnis	72
	Literaturverzeichnis	74
	ANHANG.....	78
	Teilvorhaben 1: Gesamtkoordination; Untersuchungen zu Anbau und Biodiversität auf niedersächsischen Pilotflächen sowie Aufbau von regionalen Nutzungsketten	78
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	78
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	78
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	80
	Teilvorhaben 2: THG-Austausch einer bayerischen Pilotfläche und Erfassung der Effekte von Nährstoffversorgung auf Produktivität und Umweltwirkung.....	81
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	81
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	81
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	92
	Teilvorhaben 3: THG-Austausch einer niedersächsischen Pilotfläche und Modellierung der Effekte der Standortverhältnisse auf das Pflanzenwachstum.....	94
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	94
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	94
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	95
	Teilvorhaben 4: Biomassequantität und -qualität.....	97

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	97
2. Bearbeitete Arbeitspakete	97
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	98
Teilvorhaben 5: Nährstoffdynamik im Torf und Wasserqualität	104
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	104
2. Bearbeitete Arbeitspakete	104
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	105
Teilvorhaben 6: Ökonomische Bewertung.....	109
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	109
2. Bearbeitete Arbeitspakete	109
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	110
Teilvorhaben 7: Faserspritzguss, mechanische Eigenschaften und Papierformversuche	112
1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens.....	112
2. Bearbeitete Arbeitspakete	112
3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	115

I. Kurzbericht

Aufgabenstellung

Das Verbundvorhaben „Nachhaltigkeit von Paludikulturen unter besonderer Berücksichtigung des Stoffhaushaltes“ (NAPALU, FKZ 2221MT010A) zielt darauf ab, den Einfluss der Nährstoffversorgung und weiterer Faktoren (z. B. Wasserstände) auf die mittel- und langfristige Ertrags- und Qualitätsentwicklung etablierter und neu angelegter Niedermoor-Paludikulturen sowie auf Umweltauswirkungen und Verwertungsoptionen in Bayern und Niedersachsen zu quantifizieren.

Wesentliche Ziele umfassen:

- Erkenntnisse zur Nährstoffdynamik und -versorgung auf Pilotflächen.
- Quantifizierung von THG-Emissionen, Nährstoffrückhalt und Biodiversität.
- Entwicklung eines Pflanzenwachstumsmodells für Ertragsprognosen.
- Ökonomische Bewertung des Anbaus inklusive Verwertungstests (z. B. Bioraffination, Fasern).

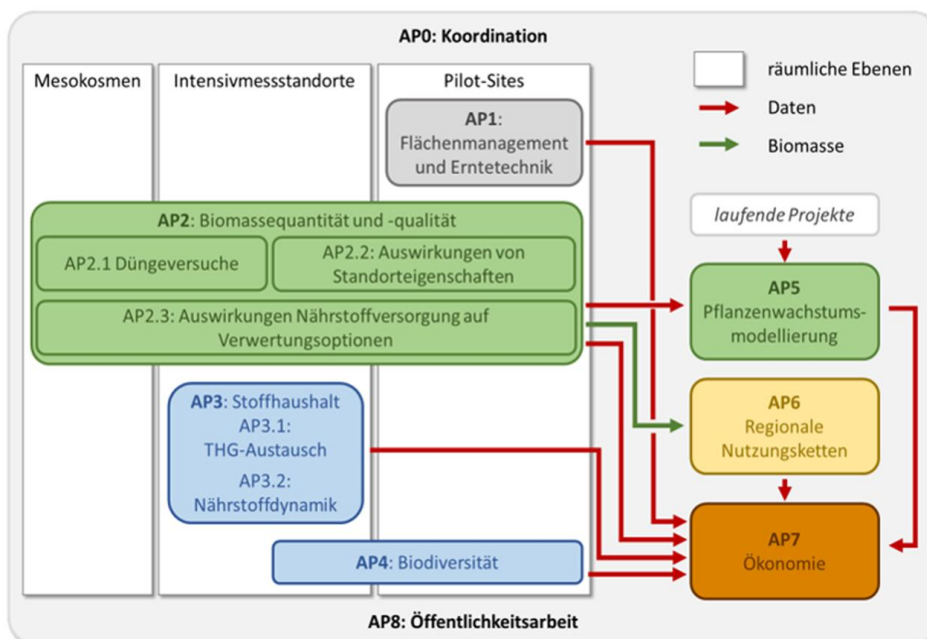


Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete und deren Informationsfluss

1. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das NAPALU-Projekt wurde als FuE-Verbundvorhaben im Rahmen des FNR-Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe – Moorbodenschutz über die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen aus der Paludikultur“ geplant und umgesetzt. Die Projektstruktur gliedert sich in acht Arbeitspakete (AP 0–8):

AP0: Koordination und Kommunikation

AP1: Flächenmanagement/Ernte

AP2: Biomassequantität und -qualität

AP3: Stoffhaushalt

AP4: Biodiversität

AP5: Modellierung

AP6: Nutzungsketten

AP7: Ökonomische Bewertung

AP8: Öffentlichkeitsarbeit

Die Durchführung und Erprobung erfolgte mit bestehenden Pilotflächen (z. B. aus MOORuse, Produktketten aus Niedermoorbiomasse) in Bayern (HSWT) und Niedersachsen (3N/NLWKN), ergänzt durch Mesokosmenversuche (JKI) und Intensivmessungen. Meilensteine umfassten z. B. Ertragsanalysen (M2.1–2.5, Monate 32–35), Treibhausgas (THG)-Quantifizierung und Verwertungstests; alle wurden in geplanter oder angepasster Form erreicht.



Abbildung 2: Lage der Pilotsites von Nord nach Süd: Bederkesa, Hohenböken, Dümmer, Mesokosmen, Langenmosen und Freisinger Moos

Der Ablauf verlief planmäßig von 15.11.2022 bis 28.02.2026, nachdem das Vorhaben kostenneutral für einige Partner vom 15.11.2025 auf den 28.02.2026 verlängert wurde.

2. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

Arbeitspakete und Meilensteine

Tabelle 1: Arbeitspakete mit Bearbeitungszeitraum und Zielerreichung

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 0 Koordination und Kommunikation (verantwortlich: 3N)	11/2022 - 02/2026	Alle Ziele erreicht
AP 1 Flächenmanagement und Ernte (verantwortlich: 3N, HSWT)	11/2022 - 02/2026	Alle Ziele erreicht
AP 2 Biomassequantität und -qualität (verantwortlich: Thünen, JKI, HSWT)	12/2022 - 02/2026	Alle Ziele erreicht
AP 3 Stoffhaushalt (verantwortlich: Thünen, Uni Trier)	01/2023 - 2/2026	Alle Ziele erreicht
AP 4 Biodiversität (verantwortlich: 3N, HSWT)	04/2023 - 2/2026	Alle Ziele erreicht
AP 5 Pflanzenwachstumsmodellierung (verantwortlich: Thünen)	01/2023 - 2/2026	Alle Ziele erreicht, außer Nährstoffkalibrierung
AP 6 Regionale Nutzungsketten (verantwortlich: 3N)	01/2023 - 2/2026	Alle Ziele erreicht
AP 7 Ökonomische Bewertung (verantwortlich: Uni Kiel)	12/2022 - 2/2026	Alle Ziele erreicht
AP 8 Öffentlichkeitsarbeit (verantwortlich: 3N)	11/2022 - 2/2026	Alle Ziele erreicht

Tabelle 2: Meilensteinplan inkl. Fälligkeit und Zielerreichung

Meilenstein (M)	Bezeichnung (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 0.1	Kick-off-Meeting durchgeführt	12/2022	Erreicht
M 0.2	Kooperationsvereinbarung unterzeichnet	01/2023	Erreicht
M 0.3	Jährliche Projekttreffen abgehalten	11/2025	Erreicht
M 1.1	Flächenmanagement auf Pilot-Sites etabliert	05/2023	Erreicht
M 1.2	Jährliche Ernten auf allen Standorten abgeschlossen	11/2025	Erreicht
M 1.3	Erntetechnik optimiert und dokumentiert	09/2024	Erreicht
M 2.1	Ergebnisse Wachstumsentwicklung Mesokosmen liegen vor	09/2024	Erreicht
M 2.2	Ergebnisse jährliche Ertrags- und Qualitätsanalysen Mesokosmen liegen vor	09/2024	Erreicht
M 2.3	Ergebnisse Qualitätsanalyse kompostiertes Paludimaterial liegen vor	09/2024	Erreicht
M 2.4	Ergebnisse Nährstoffe Mesokosmen liegen vor	08/2024	Erreicht
M 2.5	Datenauswertung Wachstums- und Biomasseentwicklung Mesokosmen abgeschlossen	08/2024	Erreicht
M 2.13	Datenauswertung Nährstoffversorgung und Biomassenentwicklung Pilot-Sites abgeschlossen	11/2025	Erreicht
M 2.14	Veröffentlichung zu Auswirkungen Nährstoffverfügbarkeit auf Biomasseentwicklung eingereicht	12/2025	Veröffentlichung in Arbeit
M 3.1	THG-Messungen auf Pilot-Sites abgeschlossen	10/2025	Erreicht
M 3.2	Nährstoffdynamik im Torf und Wasser quantifiziert	11/2025	Erreicht

Meilenstein (M)	Bezeichnung (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 3.3	Abbruchmeilenstein (18 Monate): Bewertung Nährstoffversorgungsuntersuchungen	05/2024	Erreicht - Projekt fortgeführt
M 4.1	Biodiversitätserfassung Vegetation auf allen Standorten abgeschlossen	09/2025	Erreicht
M 4.2	Biodiversitätserfassung Fauna (Brutvögel, Amphibien) abgeschlossen	09/2025	Erreicht
M 4.3	Gesamtbewertung Biodiversität aller Standorte erstellt	11/2025	Erreicht
M 5.1	Finale Modellauswahl	01/2024	Erreicht
M 5.2	Datenzusammenstellung Vorläuferprojekte abgeschlossen	06/2024	Erreicht
M 5.3	Kalibrierung Hydrologie	12/2024	Erreicht
M 5.4	Kalibrierung Nährstoffverfügbarkeit	05/2025	Nicht erreicht
M 5.5	Anwendung auf ausgewählten Pilot Sites	09/2025	Erreicht
M 5.6	Veröffentlichung eingereicht	11/2025	In Arbeit, in Kooperation mit AP7
M 6.1	Tests zur Bioraffination (Fasertrennung) durchgeführt	08/2025	Erreicht
M 6.2	Tests biobasierte Werkstoffe (Compoundierung) abgeschlossen	09/2025	Erreicht
M 6.3	Pelletierungsversuche durchgeführt und bewertet	06/2024	Erreicht
M 6.4	Regionale Verwertungskonzepte erstellt	11/2025	Erreicht
M 7.1	Governance-Analyse abgeschlossen	03/2024	Erreicht
M 7.2	Betriebswirtschaftliche Analyse abgeschlossen	11/2024	Erreicht
M 7.3	Volkswirtschaftliche Analyse abgeschlossen	03/2025	Erreicht
M 7.4	Entscheidungsexperiment (DCE) durchgeführt und ausgewertet	04/2025	Erreicht
M 7.5	Motivations- und Akzeptanzanalyse abgeschlossen	12/2025	Erreicht
M 8.1	Projektwebsite online und regelmäßig aktualisiert	03/2023	Erreicht
M 8.2	Feldtage und Workshops durchgeführt	11/2025	Erreicht
M 8.3	Abschlussveranstaltung durchgeführt	11/2025	Erreicht
M 8.4	Projektfilm fertiggestellt	11/2025	Erreicht

Resümee

NAPALU hat bewiesen, dass Paludikulturen auf wiedervernässten Niedermooren stabile Erträge, THG-Minderung und Biodiversitätsvorteile ermöglichen, aber Wasser-, Nährstoff- und Governance-Herausforderungen erfordern. Carex acutiformis sticht als klimabeste Option heraus, Typha und Phragmites eignen sich für spezifische Standorte und Verwertungen wie Faserguss oder Substratkompost.

Kern-Ergebnisse

- Biomasse & Nährstoffe: Hohe N-Gaben (D2) stabilisieren Erträge bei Typha/Phragmites (8–10 t TM/ha), erhöhen Cellulose; Carex braucht keine Düngung, Phalaris kämpft mit Binse-Konkurrenz.
- THG-Bilanz: Carex: Senke bis –14,6 t CO₂-Äq./ha·a; Typha/Phalaris oft Quellen bei Düngung/Zweischchnitt – Carex top für Neuanlagen.
- Biodiversität: 201 Arten (Vögel/Libellen stark); Typha/Phalaris fördern Rote-Liste-Arten, aber kein Ersatz für natürliche Moore – Strukturen wie Brachen empfohlen.
- Modellierung: SWAP-WOFOST prognostiziert 8–11 t/ha Phalaris bis 2050, Nährstofflimitierung offen.
- Verwertung: Machbar für Bioraffination (65% Saftausbeute), Faserguss/Compounds (bis 30% Fasern), Kompost (Typ 1 nach Auswaschung).
- Ökonomie: Defizit 2.645 €/ha ohne CO₂-Bepreisung; mit 150 €/t CO₂-Äq. positiv, Nettonutzen 1,75 Mrd. € bundesweit – Akzeptanz steigt mit Beratung/Emissionshandel.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Im NAPALU-Projekt konnte insgesamt gezeigt werden, dass die Bewirtschaftung wiedervernässter Niedermoore mit Paludikulturen unter Praxisbedingungen stabile Biomasseerträge, substanzielle Treibhausgas-Minderung und deutliche Beiträge zur Biodiversität ermöglicht, zugleich aber hohe Anforderungen an Wasserstands- und Nährstoffmanagement, an technisch angepasste Nutzungsketten und an einen geeigneten Governance-Rahmen stellt. Die Pilotflächen in Hohenböken, Bederkesa wurden über mehrere Jahre intensiv betreut; wiederkehrende Probleme mit nicht selbstansaugender und verschlammender Pumpentechnik konnten durch engmaschige Kontrollen und eine Generalüberholung der Polderinfrastruktur bis 2026 so weit stabilisiert werden, dass die Zielwasserstände weitgehend gehalten und regelmäßige Ernten von *Typha* und *Phragmites* für die Nutzung in Bioraffination, Faserguss, Compounds und Substratversuchen ermöglicht wurden. Gleichzeitig liefern die Dümmer-Flächen Praxisbelege für die Kopplung von Wasserreinigung (Rückhalt von Arzneimittlrückständen) und Biomasseproduktion.

Die mesokosmischen Düngungsversuche und die Biomasseaufnahmen auf Pilotflächen zeigen, dass bei *Typha angustifolia*, *Typha latifolia* und *Phragmites australis* nur hohe stickstoffbasierte Nährstoffgaben (D2) langfristig stabile Erträge sichern, während in ungedüngten Varianten ab dem 4. Jahr deutliche Ertragsdepressionen auftreten; zugleich erhöht hohe N-Versorgung den Cellulosegehalt und verbessert bei Schilf die Reetqualität (längere Halme, geringere Wasseraufnahme im Tauch-Saug-Test), was die Eignung für hochwertige Dachreet- und Faseranwendungen bestätigt. Für Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) zeigt sich eine starke Konkurrenz durch Flatterbinse, stabile Phalaris-Erträge von rund 7–8 t TM/ha werden nur bei hoher N-Nachlieferung erreicht. Dies unterstreicht die grundsätzliche N-Abhängigkeit vieler Paludikultur-Systeme. Kompostierungsversuche belegen, dass insbesondere *Typha*-Biomasse nach Kompostierung und ggf. einem Auswaschschritt Substratkompost-Qualität (Typ 1) erreicht und sich damit für gartenbauliche Substrate eignet, während ein klarer Düngungseffekt auf die Kompostqualität weniger eindeutig ist als der Arteffekt. Im Stoffhaushalt wurde am Intensivmessstandort Freisinger Moos nachgewiesen, dass *Carex acutiformis* auch ohne Nährstoffrückführung Erträge um 8–9 t TM/ha erzielt und gleichzeitig die höchsten CO₂-Senkenleistungen (bis etwa –14,6 t CO₂-Äquivalente/ha·a) bei vergleichsweise geringen CH₄-Emissionen aufweist, womit *Carex* aus Klimaschutzsicht die bevorzugte Paludikultur für neue Standorte ist. *Typha*-Bestände benötigen demgegenüber eine hohe N-Versorgung zur Ertragssicherung (etwa 8 t TM/ha), reagieren sehr sensitiv auf temporär abgesenkte Wasserstände und fungieren unter allen Varianten als Netto-THG-Quelle, sodass *Typha* für dauerhaft nasse, natürlich nährstoffreiche Standorte ohne zusätzliche Düngung empfohlen wird. Für *Phalaris* im Zwei-Schnitt-System zeigen die Daten einerseits die Möglichkeit, Erträge um 10 t TM/ha mit flüssigem Biogasgärrest zu stabilisieren, andererseits aber sehr hohe THG-Quellenfunktionen (bis 24 t CO₂-Äquivalente/ha·a), sodass aus Klimaschutzsicht eine Ein-Schnitt-Nutzung ohne Düngung und mit konstant hohem Wasserstand vorzuziehen ist; angepasste Entzugsdüngung vermeidet dabei messbare Nitratüberschüsse und hält NH₃-Verluste bei standortangepasster Applikation sehr gering.

Die großflächigen Kartierungen von Vegetation, Heuschrecken, Libellen und Vögeln an vier Standorten zeigen, dass Paludikulturen insgesamt 201 Arten beherbergen und etwa drei Viertel aller im Gesamtgebiet nachgewiesenen Pflanzen- und Vogelarten sowie 85% der Heuschrecken- und 97% der Libellenarten auch in bewirtschafteten Paludikultur-Beständen vorkommen; besonders *Typha*- und *Phalaris*-Flächen weisen hohe Libellen- und Brutvogeldiversität mit bemerkenswerten Anteilen Roter-Liste-Arten auf, während *Carex*-Bestände artenärmer, aber klar von konventionellem Wirtschaftsgrünland abgegrenzt sind und typische Feuchtwiesenarten fördern. Aus naturschutzfachlicher Sicht sind bewirtschaftete Paludikulturen zwar kein vollwertiger Ersatz für nährstoffarme Niedermoore und Pfeifengraswiesen, können aber – bei konsequenter Integration von Strukturelementen wie Brachen, Hochstaudenfluren, Flachwasserzonen, Pufferstreifen und zeitlich gestaffelten Mahdregimen – wertvolle Brut- und Rückzugsräume insbesondere für gefährdete Vogel- und Libellenarten bereitstellen.

Mit SWAP-WOFOST steht erstmals ein prozessbasiertes Pflanzenwachstumsmodell zur Verfügung, das Blattfläche und Ertrag von *Phalaris* für drei Wasserstandsklassen unter hoher Nährstoffversorgung mit hoher Genauigkeit abbildet und für Klimaszenarien (RCP 4.5) bis 2050 stabile Erträge von 8–11 t/ha unter wiedervernässten Bedingungen projiziert; die Validierung zeigt jedoch klar, dass eine Nährstofflimitierung

derzeit nicht realistisch erfasst wird, sodass die Kopplung von Wasser-, Nährstoff- und Wachstumsdynamik ein wichtiger offener Forschungsbedarf bleibt.

Im Bereich Bioraffination und Materialnutzung wurde die grundsätzliche technische Machbarkeit der Fraktionierung und stofflichen Verwertung von Paludikultur-Biomasse bestätigt: Labortests mit Blattmaterial ergaben Saftausbeuten von rund 65% bei plausiblen Proteingehalten, ein erster industrieller Bioraffinationsversuch mit Nasswiesen-Biomasse scheiterte zunächst an Verstopfungen der Anlage, was die Notwendigkeit einer vorgelagerten Zerkleinerung und Prozessanpassung unterstreicht. Im Faserspritzguss konnten aus reiner Biomasse von *Carex*, *Phalaris*, *Phragmites* und *Typha* mechanisch belastbare Formteile hergestellt werden; *Phragmites* und *Typha* zeigten dabei die besten mechanischen Kennwerte, während *Phalaris* tendenziell eine Zumischung von Papierfasern erfordert, und industrielle Fasergussversuche mit Nasswiesenballen belegten die prinzipielle Verarbeitbarkeit, machten aber auch deutlich, dass schaubildende Inhaltsstoffe ausgewaschen und Grobpartikel durch geeignete Aufbereitung reduziert werden müssen. In der Compoundierung mit biobasierten Thermoplasten (PLA, PHA) ließen sich für alle untersuchten Paludikultur-Biomassen stabile Compounds herstellen; mit PLA-Matrix sind bis zu 30 Masse-% Paludi-Fasern im Spritzguss und bis zu 20 % in 3D-Druck-Verfahren verarbeitbar, wobei *Phragmites* und *Typha* die besten mechanischen Eigenschaften liefern und eine feinere Vermahlung die Zugfestigkeit signifikant erhöht – ein zentraler Hebel für anwendungsreife Produkte.

Die ökonomische Bewertung zeigt, dass Paludikulturen ohne Inwertsetzung der Klimaschutzleistung im Mittel jährliche betriebswirtschaftliche Defizite von rund 2.645 €/ha aufweisen und damit gegenüber intensiver Milchviehhaltung klare Opportunitätskosten verursachen; einzelne Kulturen wie *Typha angustifolia* können bei hohen Biomassepreisen (z.B. 300 €/t für Dämmstoffe) die Rentabilitätsschwelle erreichen. Werden die Treibhausgasminderungen jedoch monetarisiert (z.B. ab dem 1. Jahr mit 150 €/t CO₂-Äquivalent), werden in der Mehrzahl der Szenarien positive Einkommensbeiträge erzielt, insbesondere bei *Phragmites* mit hoher Sequestrierungsleistung (ca. 24,8 t CO₂-Äquivalente/ha·a), und auf volkswirtschaftlicher Ebene resultiert – trotz zusätzlicher Investitions- und Monitoringkosten – ein jährlicher Nettonutzen von etwa 1,75 Mrd. €, womit Paludikultur als kosteneffiziente Klimaschutzmaßnahme im Mittelfeld anderer Optionen eingeordnet werden kann. Gleichzeitig macht die Governance-Analyse deutlich, dass spezifische Förderinstrumente für Paludikultur bislang nur punktuell existieren, der aktuelle Politikmix widersprüchliche Anreize setzt und Skalierung ohne verlässliche CO₂-Bepreisung, angepasste Agrarumweltmaßnahmen und bessere Koordination kaum zu erwarten ist; eine Akzeptanzstudie mit 202 Landwirtinnen und Landwirten belegt eine starke Status-quo-Präferenz, zeigt aber hohe Zahlungsreduktionen bei produktiver Nasswiesennutzung statt Nutzungsaufgabe und eine klare Präferenz für Emissionshandelslösungen sowie für umfassende Beratung und Weiterbildung.

Über alle Arbeitspakete hinweg ist NAPALU damit als Erfolg zu bewerten: Es liefert belastbare Daten zu Erträgen, Stoffhaushalt, Biodiversität und Wirtschaftlichkeit zentraler Paludikulturen, entwickelt ein anwendbares Wachstumsmodell, demonstriert mehrere vielversprechende Verwertungspfade und hat die Ergebnisse bereits in zahlreiche Fachvorträge, Poster, eine geplante Open-Access-Publikation zu Umweltfolgen der Nährstoffrückführung und eine europäische Synthesestudie eingespeist, während offene Punkte vor allem in der Abbildung von Nährstofflimitierung in Modellen, der technischen und wirtschaftlichen Skalierung von Bioraffination und Faseranwendungen, der langfristigen Governance-Weiterentwicklung und der weiteren Steigerung der landwirtschaftlichen Akzeptanz liegen.

Arbeitspaket 1: Flächenmanagement und Ernte

Die Pilot Sites Hohenböcker Moor und Bederkesa wurden kontinuierlich durch das 3N Kompetenzzentrum betreut und überprüft. Bei jedem Termin wurde der Zustand fotografisch dokumentiert. Überprüft wurden die Wasserstände im Polder, das Funktionieren der Pumpen, der Zustand der PV-Anlage in Hohenböken, die Entwicklung der Pflanzenbestände und aufgetretene Schäden durch Tiere und Witterung. Ggf. wurden kleine Pflege- und Reparaturarbeiten durchgeführt. In den Wintermonaten wurden die Flächen ca. einmal im Monat besucht, in den Sommermonaten ca. zwei- bis dreimal im Monat. Mit Beginn der Vegetationsperiode 2026 wurden die Polder in Hohenböken und Bederkesa generalüberholt und sowohl die Technik als auch die Zuwegung, Deiche, Zäune uvm. gewartet und freigeschnitten. Die Ernten, Transporte und Verarbeitungsschritte wurden geplant und durchgeführt. Die Pilot Site Langenmosen wurde durch die HSWT betreut.

Hohenböken

Die Fläche Hohenböken (Polder Hohenböcker Moor) ist eine der Pilot-Sites des NAPALU-Projekts in Niedersachsen, etabliert aus Vorgängerprojekten, mit Anbau von Rohrkolben (*Typha latifolia*) und Schilf (*Phragmites australis*) unter Paludikultur-Bedingungen. Sie dient der Untersuchung von Anbau, Erträgen, Stoffhaushalt, THG-Bilanzen und Biodiversität, mit regelmäßiger Betreuung durch das 3N Kompetenzzentrum (Foto-Dokumentation, Wasserstände, Pumpen/PV-Anlage, Pflanzenentwicklung).

Managementmaßnahmen

- Pachtverträge/Genehmigungen verlängert (April 2023, Meilenstein M1.1 erreicht).
- Verwallungen, Gräben und Zuwegungen gemäht und freigeschnitten (2023/2024/2025/2026).
- Schäden durch vermutlich Nutrias in den Verwallungen behoben. Abstimmung mit Jägerschaft (Nutria-Bekämpfung verstärkt).

Ernten und Verarbeitung

Tabelle 3: Ernten auf der Fläche Hohenböken

Jahr/Monat	Fläche/Art	Ertrag (skaliert/ha)	Details
Feb 2023	Rohrkolben	~1,3 t TM	Erste Mahd (Vorgängerprojekt); Biomasse stark binsenvermischt (>50%).
Nov 2023	Teilfläche (20 m²), Rohrkolben	~1,3 t TM	Zweite Mahd; binsenvermischt; Transport/Trocknung/Häckseln (JKI); Schilf nicht geerntet (schlechte Entwicklung).
Feb 2024 (22.02.)	1.300 m², Typha latifolia	17 m³	Freischneider; 2 m³ zu JKI (Trocknung/Häckseln für AP6); Rest für Substrat-Tests.
Dez 2024 (12.12.)	200 m², Rohrkolben	1 m³	Teilernte; Wiegen/Trocknen/Häckseln (Lohnunternehmer, für AP6); ~50% Binsenanteil, Schilf langsam etablierend.
Februar 2025	200m², Rohrkolben	2 m²	Teilernte, Mahdgut stark mit Binsen durchsetzt

Weitere Aktivitäten

- Pressetermin (27.07.2023).
- Exkursionen (08.12.2023 mit Konsortium).
- Biodiversitätsaufnahmen (Vegetation/Vögel/Libellen/Heuschrecken, 2023/2024).
- THG-/Nährstoff-Monitoring (Teil des AP3).
- Biomasse weiterverarbeitet (Trocknen/Zerkleinerung/Mahlen), Probenplan via Cloud koordiniert.

Im Verlauf des Projekts hat sich gezeigt, dass die ursprünglich installierte Pumpentechnik nicht optimal auf die Anforderungen des Flächenbetriebs abgestimmt war. Die vorhandene Grabenpumpe war nicht selbstansaugend, sodass sie bei niedrigem Wasserstand im Graben trockenfiel und nur manuell wieder in Betrieb genommen werden konnte. Die dadurch notwendige, sehr hohe Kontrollfrequenz war in der Praxis

nicht wirtschaftlich umsetzbar. In der Folge wurde zeitweise zu wenig Wasser auf die Fläche gefördert, was Trockenphasen begünstigt hat, in denen sich die Binse stark etablieren konnte.

Zusätzlich ist eine zweite Pumpe, die Wasser aus dem vorderen Graben in die Fläche fördern sollte, im Winter beschädigt worden. Durch unzureichenden Witterungsschutz in der Holzkiste konnte Wasser in das Gehäuse eindringen, was zum Frostschaden beigetragen hat. Insgesamt hat sich gezeigt, dass die eingesetzte Pumpentechnik nicht dauerhaft für den Außeneinsatz unter den gegebenen Standortbedingungen geeignet war.

Auf Basis dieser Erfahrungen wurden nach einer Begehung mit einer Fachfirma die Pumpen und die Zulauftechnik grundlegend überarbeitet und ausgetauscht. Es kommen nun selbstansaugende, für den Außeneinsatz geeignete Pumpen mit angepasster Schutz- und Zulauftechnik zum Einsatz. Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, die Fläche in der kommenden Vegetationsperiode zuverlässig mit Grabenwasser zu versorgen und die Wasserstände zielgerichtet zu steuern, sodass die projektierten Paludikultur-Bestände sich künftig deutlich stabiler entwickeln können.

Bederkesa

Die Fläche Bederkesa (Polder Bad Bederkesa I/II) in Niedersachsen stellt eine Pilotfläche des NAPALU-Projekts dar. Sie wurde im Rahmen mehrerer Vorgängerprojekte etabliert und dient heute als Demonstrations- und Untersuchungsstandort für Paludikultur unter nassen Standortbedingungen. Auf der Fläche werden insbesondere Rohrkolbenarten (*Typha latifolia* und *Typha angustifolia*; breit- und schmalblättriger Rohrkolben) sowie Schilf (*Phragmites australis*) kultiviert.

Die Rohrkolbenbestände haben sich bislang sehr gut entwickelt und zeigen eine hohe Bestandsdichte bei gleichzeitig geringem Auftreten von Beikräutern. Die Schilfbestände hingegen sind derzeit noch schwächer ausgeprägt und teilweise stark mit Binsen sowie weiteren Begleitpflanzen durchsetzt. Allerdings ist eine allmähliche Verbesserung der Bestandsentwicklung zu beobachten.

Die Fläche wird regelmäßig durch das 3N Kompetenzzentrum betreut. Die Betreuung umfasst unter anderem die fotografische Dokumentation der Bestandsentwicklung, die Kontrolle und Dokumentation der Wasserstände, die Überwachung der Pumpentechnik sowie die Beobachtung der allgemeinen Pflanzenentwicklung.

Managementmaßnahmen

- Pachtverträge/Genehmigungen verlängert (April 2023, M1.1 erreicht).
- Sommerpflege: Verwallungen gemäht (2023/2024/2025/2026).
- Schäden: Kleine Löcher in Verwallungen (vermutlich Mäuse, funktionslos).

Ernten und Verarbeitung

Tabelle 4: Ernten auf der Fläche Bederkesa

Jahr/Monat	Fläche/Art	Ertrag	Details
Nov 2023	20 m ² je breit-/schmalblättriger Rohrkolben, Schilf	(genaue Zahlen offen)	Erste Ernte; Rohrkolben gut; Transport/Trocknung/Häckseln (JKI); Biomasse für AP6.
März 2024 (14.03.)	Vollfläche, Rohrkolben (<i>Typha</i> spp.)	7 m ³	PistenBully (Meyer-Luhdorf, nach Brutvogelkontrolle/Ministerin-Besuch 07.03.); zu JKI (Trocknen/Zerkleinern für AP6/Dämmstoff-Tests RoNNi).
Nov 2024 (11.11.)	200 m ² je Schilf, <i>T. latifolia</i> , <i>T. angustifolia</i>	je Art 1 m ³	Teilmahd; Wiegen/Trocknen/Häckseln (Lohnunternehmer, für AP6); Schilf binsen-/beikrautdurchsetzt.
Februar 2025	200 m ² je Schilf, <i>T. latifolia</i> , <i>T. angustifolia</i>	7 m ³	Geerntet und aufbereitet durch Firma Lehnhoff
Februar 2026	Vollflächig <i>T. latifolia</i> , <i>T. angustifolia</i>	64 Big Bags	Geerntet und Aufbereitet durch Firma Wittrock (Rhede), Projekt PaludiFarming

Weitere Aktivitäten

- Exkursion (09.11.2023, Uni Kassel: Vortrag/Exkursion).
- Biodiversitätsaufnahmen (Vegetation/Vögel/Libellen/Heuschrecken, 2023/2024/2025).
- THG-/Nährstoff-Monitoring (AP3).

Die Fläche Bederkesa 1 präsentiert sich insgesamt in einem guten Zustand; die Bestände haben sich trotz einzelner Herausforderungen positiv entwickelt. Lediglich während einer Trockenphase konnte sich die Binse in Teilbereichen stärker etablieren.

Ursächlich war vor allem eine zeitweilige Verschlammung der Grabenpumpe, durch die die Wasserversorgung des Polders für etwa ein bis zwei Monate eingeschränkt war und die Fläche trockener lag als geplant. Dieses Thema wurde jedoch erfolgreich durch einen klar strukturierten Arbeitsplan und regelmäßige Kontrollbesuche adressiert, sodass die Wasserführung inzwischen wieder stabil ist. Für die Zukunft sollte vor allem die Stromversorgung der Anlage optimiert werden: Derzeit erfolgt sie über eine provisorische Steckverbindung zum benachbarten Bauhof. Perspektivisch ist entweder eine feste elektrische Anbindung oder eine autarke Lösung (z.B. eigenständige Energieversorgung) anzustreben, um den Betrieb robuster und unabhängiger zu gestalten.

Dümmer

Schilfpolder am Dümmer

Der Schilfpolder am Dümmer ist ein etabliertes Demonstrationsobjekt, auf dem aktuell vor allem die Nutzung der vorhandenen Schilfbiomasse und die Integration in regionale Wertschöpfungsketten im Vordergrund stehen. Nachdem der Polder einige Jahre brach gefallen war, konnte im Rahmen von NAPALU eine erneute Nutzung angestoßen werden: Zunächst wurde 2023 eine kleine Teilfläche händisch geerntet, 2024 und 2025 folgten erste großflächige Ernten mit angepasster Technik.

Die Ernte 2024 wurde mit einem Brielmaier-Motormäher durchgeführt, rund 4 m³ Schilfbiomasse wurden zur weiteren Aufbereitung (Wiegen, Trocknen, Häckseln) an einen Lohnunternehmer gegeben und anschließend für werkstoffliche Versuche (u. a. Faserspritzguss, Spritzguss/3D-Druck) zur Verfügung gestellt. Ende 2024 wurde die Gesamtfläche im Auftrag der Naturschutzstation Dümmer erneut gemäht; auch diese Biomasse wird gezielt in den Arbeitspaketen zur Materialentwicklung genutzt. Damit trägt der Polder dazu bei, Praxiserfahrungen zur Ernte und stofflichen Nutzung von Schilf unter Paludi-Bedingungen zu gewinnen.

Rohrglanzgrasfläche / Nasswiese am Dümmer

Die Nasswiese im Vogelschutzgebiet „Westliche Dümmerniederung“ ist eine großflächige, extensiv genutzte Fläche mit einem hohen Anteil an Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und weiteren Feuchtwiesenarten. Sie wird von der Staatlichen Moorverwaltung betreut und projektunabhängig regelmäßig im Spätsommer gemäht; die Nutzung im Projekt baut auf diesen bestehenden Pflegemaßnahmen auf.

Für NAPALU ist die Fläche vor allem als Demonstrator für die Kombination aus wiedervernässter Nutzung, Stoffrückhalt und Biomassebereitstellung relevant: Durch die Fläche wird Wasser aus einer nahegelegenen Kläranlage geleitet, und Untersuchungen der Universität Trier zeigen, dass Arzneimittelrückstände in Teilen in der Fläche zurückgehalten werden können. 2024 wurde ein Rundballen der Nasswiesen-Biomasse für den ersten industriellen Bioraffinationsversuch bereitgestellt; die gewonnenen Erkenntnisse fließen direkt in die Optimierung der Prozessführung und in weitere Versuchsreihen zur stofflichen Nutzung (z. B. Faserspritzguss, Papier-/Faserguss) ein (AP6).

Insgesamt stärkt der Dümmer-Standort damit die Aussagekraft des Projekts: Der Schilfpolder liefert Praxisdaten und Material für Schilf-basierte Produkte, während die Nasswiese zeigt, wie Rohrglanzgrasbestände zugleich zur Wasserreinigung und als Rohstoffquelle genutzt werden können.

Langenmosen

Bei der Untersuchungsfläche in Langenmosen handelt es sich um die zweitältesten Niedermoor-Paludikulturfläche Deutschlands und die größte in Bayern. Sie wurde im Rahmen des MOORuse-Projekts im Sommer 2018 eingerichtet und wird seitdem mit mindestens einer Winterernte (Dezember bis Februar) bewirtschaftet. Gepflanzt wurden *Typha angustifolia* und *Carex acutiformis*, *Phalaris arundinacea* wurde eingesät. Seit 2021 werden Teilflächen von *Carex* und *Phalaris* zusätzlich als 2-Schnittnutzung (Juli sowie Dezember bis Februar) bewirtschaftet, um langfristige Ertragsstabilität und Veränderungen der Artenzusammensetzung im Vergleich zur einmaligen Winterernte zu untersuchen. Die Fläche dient zudem der Sammlung praktischer Erfahrungen zum Grundwassermanagement in Paludikulturen. Zwischen 2018 und 2022 zeigte sich, dass eine zu späte Winterernte, besonders bei *Phalaris arundinacea*, zu Qualitätsverlusten führen kann, weshalb die Ernte 2023 und 2024 bereits Anfang Dezember erfolgte. 2023 lagen die Wasserstände in allen Varianten deutlich unter dem Zielniveau (Abbildung 45). Daher wurden Anfang März 2024 verlandete Quer- und Längsgräben erneuert und die Wassereinleitung durch eine kleine Staustufe verbessert, was zu deutlich höheren Wasserständen führte. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits die Wiedervernässung kleiner Flächen (≈ 5 ha) standortabhängig komplex ist und Zielwasserstände nicht in jedem Jahr erreicht werden können. Zudem sind regelmäßige Wartung und ausreichende Ressourcen für die wasserbauliche Infrastruktur notwendig, etwa in mehrjährigen Intervallen, idealerweise über bestehende Strukturen wie Wasser- und Bodenverbände organisiert.

Arbeitspaket 2: Biomassequantität und -qualität

Die Ergebnisse aus den Mesokosmenversuchen zeigen, dass nur die hohen Stickstoffgaben (D2-Variante) die Erträge von Rohrkolben (*Typha angustifolia* und *T. latifolia*) und Reet/Schilf (*Phragmites australis*) steigern und stabilisieren, die moderaten Gaben (D1) blieben ohne klaren Effekt. In den Kontrollen ohne Nährstoffnachlieferung ließ sich ab dem 4. Jahr eine Ertragsdepression beobachten. Beim Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) führte die höhere Nährstoffgabe zu einer geringfügig besseren Konkurrenzfähigkeit gegenüber der Flatterbinse (*Juncus effusus*), die sonst dominierte. Im Bezug auf die Faserqualität sorgte die höhere Nährstoffgabe zu einer Steigerung des Cellulosegehaltes und Reduzierung des Hemicellulosegehaltes bei Rohrglanzgras und breitblättrigem Rohrkolben. Der Ligningehalt blieb stabil. Beim Schilf sorgte die D2-Variante für längere Halme und eine generell bessere Reetqualität. Die Untersuchung zur Eignung als Substratausgangsstoff für den Gartenbau zeigte, dass nach Kompostierung und anschließender Auswaschung Typ-1-Substratkompost-Qualität erreicht werden kann. Die Qualität war hier eher artspezifisch als abhängig von der Nährstoffvariante. In den folgenden Abschnitten werden die entsprechenden Arbeitspakete und Schritte genauer beschrieben und die Ergebnisse dokumentiert.

Arbeitspaket 2.1: Mesokosmenversuche (Düngeversuche)

Bei der Dosierung des Überflutungswassers wurde in erster Linie darauf geachtet, Konzentrationen zu wählen, die hinsichtlich der Nitratkonzentration einem belasteten Gewässer der Nitrat-Wasser-Klasse III - IV (Variante D1) bzw. IV (Variante D2) entsprechen. Da die Überflutungsereignisse in einem Zeitfenster von 5 Wochen im Frühjahr erfolgen und zudem aber auch näherungsweise einer Entzugsdüngung entsprechen sollten, waren weitere Stickstoffquellen (in Form von Ammonium und Harnstoff), aber auch P- und K-Quellen erforderlich. So wurden für die Ansätze der Nährlösungen die mineralischen Flüssigdünger Wuxal (Grünpflanzen und Palmendünger) und CANNA MONO N27% genutzt. Die Umsetzung der Nährstoffzufuhr (siehe Nährstoffstufen in Tab. 5) erfolgte durch das Überfluten mit je 20 Liter pro Container, wobei D0 nur Leitungswasser erhielt. Dieses Prozedere wurde im Frühjahr wöchentlich umgesetzt – insgesamt fünf Mal. Die detaillierte Zusammensetzung der Nährlösungsgaben in den Versuchsjahren 2024 und 2025 ist Tabelle 5 dokumentiert. Im Unterschied zum Versuchsjahr 2023, in dem die D2 Variante die dreifache Menge an Stickstoff, Phosphor und Kalium im Vergleich zur D1-Variante enthielt, wurde 2024 und 2025 lediglich Stickstoff gesteigert und Phosphor und Kalium in D1 und D2 konstant gehalten.

Tabelle 5: Übersicht zur jährlichen N, P und K Nährstoffgabe in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025.

Nährstoffstufe	2023 (N,P,K kg/ha/Jahr)	2024 (N,P,K kg/ha/Jahr)	2025 (N,P,K kg/ha/Jahr)
D0	0,0,0 (N,P,K)	0,0,0 (N,P,K)	0,0,0 (N,P,K)
D1	78,30,60 (N,P,K)	82,18,36 (N,P,K)	58,18,36 (N,P,K)
D2	238,90,180 (N,P,K)	227,18,36(N,P,K)	227,18,36 (N,P,K)

M 2.1 Ergebnisse der Wachstumsentwicklung (Mesokosmen)

Es zeigten sich Unterschiede in der Ausbildung der Triebe und Blüten beider Rohrkolbenarten. Beide Arten wiesen jährlich eine deutliche Steigerung in der Triebentwicklung auf. Da diese Entwicklung auch auf die Kontrollen (D0) zutraf, ist dies wahrscheinlich auf die gleichbleibend hohe Wasserführung zurückzuführen und nicht auf die zugesetzten Nährstoffe. Während der schmalblättrige Rohrkolben allgemein prozentual weniger Blüten ausbildete, war beim breitblättrigen Rohrkolben eine Steigerung bei den nährstoffversorgten Varianten zu verzeichnen (Tab. 22, Anhang).

Beide Rohrkolbenarten wiesen Bohrgänge in den Stängeln auf (Abbildung 3), wobei ein deutlich stärkerer Befall an *T. latifolia* bonitiert wurde. Die Befallsstärke hat sich von 46% (2023) auf 76% (2024) verschärft, in 2025 fiel der Befall dagegen deutlich ab auf nur noch 16% der Triebe. Die Schadsymptome sind auf minierende Larven, vermutlich des Großen Rohrkolbenzünslers (*Calamotropha paludella*), zurückzuführen (pers. Mitteilung von Experten vom Thünen Institut für Biodiversität). Eine sichere Bestimmung ist jedoch nur im Entwicklungsstadium eines Falters möglich.



Abbildung 3: Bohrgänge als Schadbild an Typha-Stängeln durch minierende Larven (vermutlich vom Großen Rohrkolbenzünsler - *Calamotropha paludella*)

M 2.2 Ergebnisse der jährlichen Ertrags- und Qualitätsanalysen der Biomasse (Mesokosmen)

In allen drei Versuchsjahren führte die höchste stickstoffbasierte Nährstoffstufe (D2) zu einem Mehrertrag im Vergleich zur D0- und D1-Variante (Abbildung 4 B und Abb. 48, Anhang). So konnte im 2. und 3. Versuchsjahr bei *Phragmites*, *T. angustifolia* und *T. latifolia* eine Ertragsstabilisierung erreicht werden.

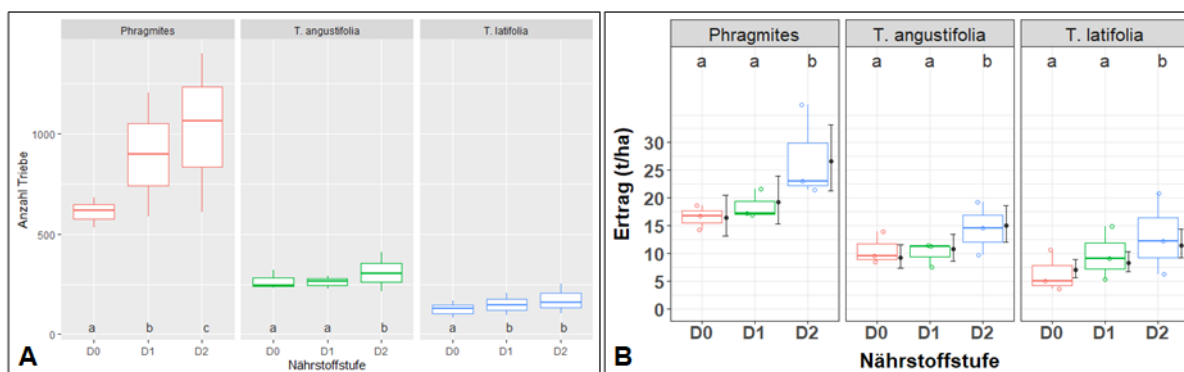


Abbildung 4: Anzahl der Triebe (A) und Trockenmasse-Erträge (B) (2024/25) in Abhängigkeit der Nährstoffversorgung (vgl. Tabelle 6); (Tukey-Test $p \leq 0.05$, unterschiedliche Buchstaben zeigen Signifikanz an)

Insgesamt wurde in den Rohrglanzgrasbeständen eine große Variation in der Bestandesentwicklung und Beiwuchsausprägung mit Flatterbinse (*Juncus effusus*) sowie teils anderen Fremdgräsern (Wolliges

Honiggras, Ruchgras, Knautgras) beobachtet. Da der Beiwuchs 2024 weiterhin durch Flatterbinse dominiert wurde, gab es keine explizite Trennung, sondern lediglich die Benennung als Binsen/Fremdgras-Anteil. Aus der Tabelle 23 (Anhang) wird ersichtlich, dass sich bei der höchsten Nährstoffgabe (D2) der *Phalaris*-Ertrag (Mittel 7,53 t TM/ha) signifikant zum Vorjahr erhöht hat und damit etwa den Höchsterträgen (ca. 8 t TM/ha) aus dem Etablierungsjahr 2021 entsprach. Jedoch wurde auch der Binse/Fremdgras-Ertrag (11,59 t/ha) zum Vorjahr signifikant gesteigert. Dagegen ist der *Phalaris*-Ertrag der D0-Variante noch weiter zurückgegangen und bei der D1-Variante im Mittel (2,25 t/ha) gleichbleibend gering sowie der Binse/Fremdgras-Ertrag im Mittel in beiden Varianten gleichbleibend hoch (11,70 bzw. 13,19 t/ha).

Die derzeitigen Daten zeigen, dass nur durch eine ausreichende jährliche Nährstoffnachlieferung stabile *Phalaris*-Erträge erreicht werden können. Doch nur durch weitere zusätzliche Pflegemaßnahmen ist voraussichtlich eine Unterdrückung der Flatterbinse (beispielsweise durch Unterschneidung) und damit die Förderung eines Dominanzbestandes an Rohrglanzgras zu erreichen. Zieht man die Ergebnisse der Wasserbeprobungen (M2.4) hinzu, deutet sich an, dass bei der 1-Schnittnutzung im Herbst/Winter die Nährstoffzufuhr im Frühjahr durch das Rohrglanzgras nur bis zur Blüte effektiv genutzt wird. Zu diesem Schluss führen die Anstiege von Phosphat und N_{min} im Bodenwasser nach der 4. Nährstoffgabe, während in den anderen Kulturen niedrigere Werte vorliegen.

In 2025 dominierte der Binsenaufwuchs die *Phalaris*-Container. Es waren nur noch vereinzelt *Phalaris*-Pflanzen erkennbar, nur stark destruktive Maßnahmen hätten die Pflanzen retten, die Vergleichbarkeit jedoch zerstören können. Deshalb wurde auf die Ernte der Rohrglanzgras-Container verzichtet. Die Wasserbeprobung und Düngung wurden jedoch weiterhin durchgeführt.

M 2.4 Ergebnisse Nährstoffe (Mesokosmen)

Wasserbeprobung Mesokosmen

Versuchsjahr 2024: Die Ergebnisse der Wasseranalytik 2024 zeigen überwiegend sehr große Schwankungen, was eine statistische Absicherung maßgeblich erschwert. Bei der Bewertung der Daten muss zudem der Fakt mitberücksichtigt werden, dass zwischen dem 21.04.24 und dem 23.04.24 (also zwischen der 1. Gabe am 15.04.24 und der 2. Gabe am 29.04.24) Frostnächte auftraten. Obwohl die 2. Gabe aufgrund der Frostnächte nach hinten verschoben wurde, war das Pflanzenwachstum stagniert und somit wurden vermutlich nur geringe Nährstoffmengen von den Pflanzen aufgenommen. Nur zu diesem Zeitpunkt lagen die Nitratstickstoff-Gehalte im Bodenwasser in den Rohrkolben- und Schilfcontainern über den Grenzwerten von Trinkwasser (11,3 mg/l NO_3-N). Die Ammoniumwerte sind bei den Messungen 1 Tag nach der 2. Gabe sowie 3 Tage nach der 4. Gabe deutlich über den Grenzwerten von Trinkwasser (0,5mg/l NH_4^+-N) beim Schilf und Rohrkolben, wobei die Werte der D2-Varianten etwa 2,5-fach höher lagen als bei den D1-Varianten. Bei Betrachtung der Phosphatwerte waren nur leichte Anstiege über den Schwellenwert von Grundwasser (0,5 mg/l ortho-Phosphat) zu verzeichnen. Wenn man diese in Relation zu den Kontrollwerten betrachtet, sind diese vermutlich auch auf natürliche Prozesse zurückzuführen. Auffällig war hier auch der von vornherein hohe Phosphatwert in der Kontrolle von *Phragmites*. Bis zur Vollblüte (Mitte Mai) von *Phalaris* waren die Nährstoffwerte im Bodenwasser niedrig und stiegen danach (3 Tage nach 4. Gabe) aber an.

Versuchsjahr 2025: Im Jahr 2025 wurde die Intensität der Wasserbeprobung noch erhöht. Dabei wurde in der Zeit vom 05.05.2025 – 02.06.2025 wöchentlich gedüngt (5 Düngegaben). Direkt vor der Düngung und 24h nach der Düngung wurden, wie im Vorjahr, die Wasserproben gezogen, somit gibt es 10 Messpunkte pro Container für die Wasserprobenanalytik. Die Ergebnisgrafiken dazu befinden sich im Anhang (Abb. 49-52). Die Analysemethode ist sehr arbeits- und zeitintensiv und konnte aufgrund von Zeitmangel und fehlender Laborkapazität zum Zeitpunkt der Erstellung des Abschlussberichtes noch nicht beendet werden.

Nährstoffentzüge über die Biomasse

1. Versuchsjahr wurden die Nährstoffentzüge der Rohrkolbenarten in den Mesokosmen untersucht. Bei der Bewertung der Werte sind die großen Schwankungen zu berücksichtigen (Abb. 53, Anhang). Dies wird ein Grund sein, warum keine signifikanten Unterschiede in den Stickstoff – und Phosphorentzügen festgestellt werden konnten, obwohl die Erträge im ersten Versuchsjahr von *T. angustifolia* über alle Nährstoffvarianten etwa doppelt so hoch lagen wie die von *T. latifolia*. *T. angustifolia* zeigte signifikant höhere Kaliumentzüge.

Ein Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Höhe der Nährstoffentzüge konnte aufgrund der hohen Variabilität der Daten nicht statistisch belegt werden.

Arbeitspaket 2.2: Auswirkungen der Umweltbedingungen und Nährstoffversorgung auf die Biomasseentwicklung

Grundlagen und Methodik:

Alle Versuchsflächen wurden entsprechend des abgestimmten Untersuchungsdesigns eingerichtet (Abbildung 5). Für jede Kultur wurden Dauerquadrate zur Erfassung der Vegetationsentwicklung angelegt. Eine Ausnahme stellten die THG-Messvarianten in Hohenböken da, bei denen aus Platzgründen nur eine Variante mit je drei Wiederholungen angelegt werden konnte. Hier entsprechen die Vegetationsplots den THG-Messplots. Eine Unterteilung in verschiedene Erntetermine erfolgte an den Standorten Bad Bederkesa (*Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*), Hohenböken Moor (*Typha latifolia*) sowie Langenmosen (*Typha angustifolia*). In Langenmosen wurden zusätzlich die Kulturen *Carex* und *Phalaris* als Ein- und Zweischnittvarianten untersucht. Für jede Variante wurden Moorwasserstandsmessstellen mit Pegeldataloggern installiert und die Bodentemperatur in drei Tiefen kontinuierlich aufgezeichnet. An allen Standorten wurden zudem meteorologische Parameter über jeweils eine Wetterstation erfasst. Aufgrund der schlechten Etablierung wurde die Variante *Phragmites australis* in Hohenböken jedoch im zweiten Projektjahr aufgeben. Bei einem hohen Anteil an Begleitvegetation wurde die Biomasse vor der weiteren Analyse in Zielpflanze und Restvegetation getrennt. Auf der Pilotfläche Hohenböken wurde aufgrund des starken Binsenaufwuchses zusätzlich die Biomasse der Flatterbinse (*Juncus effusus*) separat erfasst. Alle Proben wurden bis zur Gewichtskonstanz bei 60 °C getrocknet, anschließend gemahlen und auf ihre C- und N-Gehalte analysiert. Die Probenaufbereitung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit dem Julius-Kühn-Institut.

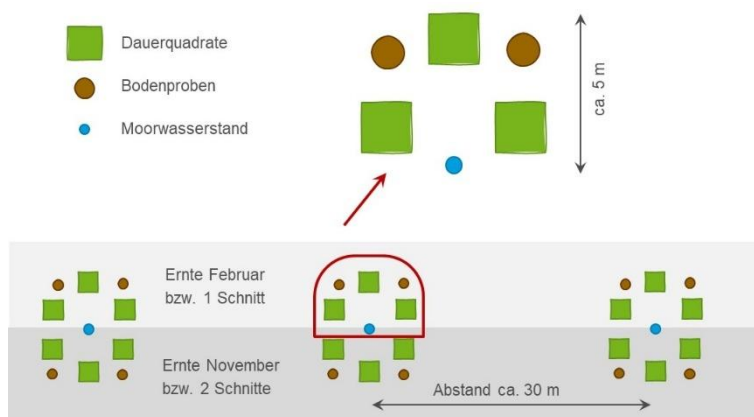


Abbildung 5: Versuchsdesign für die Erfassung der Biomasse, der Bodeneigenschaften und der Moorwasserstände

Zur Untersuchung der Nährstoffdynamik wurden an sechs Terminen pro Jahr (Februar, April, Mai, Juli, August und November) volumengerechte Bodenproben mit einem Stechbohrer (Eijkelkamp) entnommen. Die Proben wurden nach den Tiefenstufen 0 bis 10 cm und 10 bis 30 cm getrennt und anschließend analysiert (Frank *et al.*, 2022). Neben dem pH-Wert wurden die pflanzenverfügbaren Nährstoffe Phosphor (P_{CAL}), Kalium (K_{CAL}) und mineralischer Stickstoff (N_{MIN}) bestimmt. Zusätzlich wurde Phosphor mittels Dithionit-Extraktion bestimmt (P_{DT}), die den v.a. an Eisenoxide gebundenen, redoxsensitiven Phosphor erfasst (Zak *et al.*, 2008). Diese Analyse ermöglicht eine Abschätzung des potenziell mobilisierbaren Phosphorpools unter veränderten Redoxbedingungen und ist insbesondere für wiedervernässte Moorstandorte von Bedeutung.

Zur Charakterisierung der Nährstoffversorgung über das Zulaufwasser wurden an allen Pilotflächen Wasserproben im Zulauf entnommen. Die elektrische Leitfähigkeit und der pH-Wert wurden mit einer entsprechenden Sonde (WTW) bestimmt. Anschließend wurden die Proben über 0,45 µm filtriert und für die jeweiligen Analysen aufgeteilt. Die Messung von Nitrat, Phosphat, Ammonium und Kalium erfolgte ionenchromatographisch. Gesamt-Phosphor wurde mittels ICP-OES gemessen, Gesamt-Stickstoff mit der Chemilumineszenz-Methoden (TN-100, Mitsubishi).

Zur Erfassung der Pflanzenentwicklung wurden regelmäßig Messungen des Blattflächenindex (LAI) sowie des Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) durchgeführt. Die Erträge wurden über die Dauerquadrate (1 m²) ermittelt und auf Trockenmasseerträge pro Hektar (t TM ha⁻¹) hochgerechnet.

Standortbedingen:

Die Standortbedingungen der Pilotflächen unterschieden sich deutlich. Abbildung 6 zeigt die mittleren **Moorwasserstände** in der Vegetationsperiode in Abhängigkeit vom Jahr nach der Etablierung, wobei sich der Untersuchungszeitraum von NAPALU jeweils über die letzten zwei Jahre erstreckt. Der Standort Dümmer wurde außerhalb des Projektzeitraums (auch des Vorläuferprojekts „Produktketten aus Niedermoorbiomasse“) etabliert, so dass hier die Wasserstände ans Ende des Zeitstrahls gelegt wurden. Der Standort Bad Bederkesa war von Anfang an und über den gesamten Untersuchungszeitraum am nassesten und über weite Perioden überstaut. Am Standort Hohenböken gab es im ersten Jahr Probleme mit dem Wassermanagement. Die recht hohen mittleren Wasserstände täuschen dabei darüber hinweg, dass eine starke zeitliche Dynamik auftrat, während die Varianten mit Oberbodenabtrag nasser waren. Details dazu wurden in Arbeitspaket 5 diskutiert. Der Standort Langenmosen war im Sommer vergleichsweise trocken.

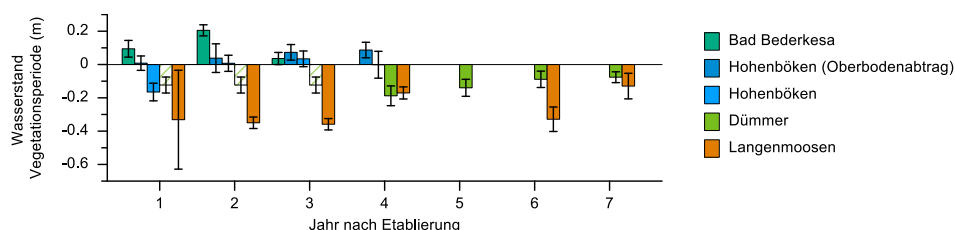


Abbildung 6: Mittlere Moorwasserstände in der Vegetationsperiode der untersuchten Paludikulturen. Fehlerbalken: Standardabweichung aller Moorpegel.

Die **Wasserqualität im Zulaufwasser** unterschied sich ebenfalls deutlich (Abbildung 7). Die Ergebnisse widersprechen den Annahmen im Antrag, da wir zu dem Zeitpunkt von einer sehr hohen Nährstoffversorgung des Standorts Langenmosen ausgegangen sind. Die Nitrat- und Ammoniumkonzentrationen waren an den Standorten Bad Bederkesa am höchsten, während die Phosphor- und Kaliumkonzentrationen am Dümmer die höchsten Werte zeigten. Der Graben am Standort Bad Bederkesa wies die höchsten Konzentrationen an gelöstem organischen Stickstoff und Ammonium auf, was vermutlich auf das durch tiefgründige Moorböden geprägte Einzugsgebiet und entsprechend hohe Konzentrationen an gelöster organischer Substanz zurück zu führen ist. Erstaunlicherweise konnte am Standort Langenmosen kein Phosphat im Zulauf nachgewiesen werden. Analytische Artefakte sind ausgeschlossen, da alle Proben jeweils an den gleichen Geräten im gleichen Labor analysiert wurden. Da die Varianten mit und ohne Oberbodenabtrag in Hohenböken das gleiche Bewässerungswasser erhielten, unterscheiden sich die Werte hier nicht. Bei der Betrachtung der Nährstoffkonzentrationen ist wichtig zu berücksichtigen, dass die Konzentrationen nur ein Indikator für die *potentielle* Nährstoffversorgung der Pflanzen sein können. Mindestens ebenso wichtig wie die Konzentrationen ist die Menge des zuströmenden bzw. zugepumpten Wassers. Dieses konnte jedoch nicht quantifiziert werden.

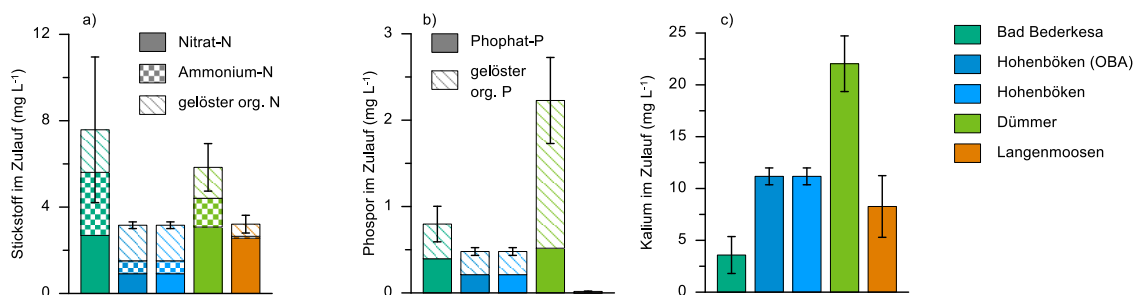


Abbildung 7: Wasserqualität im Zulaufwasser. N: Stickstoff, P: Phosphor. Bad Bederkesa: Grabenwasser, Hohenböken Grabenwasser, zeitweise in Kombination mit Grundwasser, Dümmer: Grabenwasser mit Ablauf einer kommunalen Kläranlage, Langenmosen: Überrieselung mit Wasser

Die verfügbaren **Pflanzennährstoffe im Boden** unterschieden sich ebenfalls deutlich zwischen den Standorten. Abbildung 8 zeigt die mittleren Gehalte über den gesamten Untersuchungszeitraum und über alle Varianten gemittelt, wobei die Standorte nach ihrem hydrologischen Zustand von sehr nass (Bad Bederkesa) bis phasenweise sommertrocken (Langenmosen) gereiht sind. Beim Phosphor spiegeln sich sowohl die intrinsischen Bodeneigenschaften als auch die Vornutzung und die jetzigen hydrologischen Bedingungen wider. Die P-Gehalte decken die gesamte Spannweite der im deutschlandweiten Moorbodenmonitoring (Frank *et al.*, 2025) erfassten Werte ab, was die Aussagekraft der Projektergebnisse unterstreicht. Wie erwartet zeigten die Standorte mit den nährstoffärmeren Ausgangssubstraten insbesondere nach Oberbodenabtrag geringe P-Gehalte. Die sehr hohen P_{DT} -Gehalte der trockeneren Standorte Dümmer und Langenmosen deuten an, dass bei einer stärkeren Vernässung noch P rückgelöst werden kann und für das Pflanzenwachstum zur Verfügung steht. Insbesondere in Langenmosen ist davon auszugehen, dass die P-Versorgung nicht über das Zulaufwasser, sondern über die Mobilisierung von P im Boden realisiert wird. Die N_{min} -Vorräte sind generell recht gering. Erwartungsgemäß hat der Oberbodenabtrag in Hohenböken zu einer deutlichen Verringerung auch der N_{min} -Vorräte geführt. Die K_{CAL} -Gehalte zeigen eine Reihung mit dem Wasserstand. Dies ist jedoch vermutlich eher zufällig und dadurch bedingt, dass der nasseste Standort (Bad Bederkesa) Hochmoortorfe aufweist. Im Gegensatz zu den P-Vorräte wird hier nicht die gesamte Spannweite der im Moorbodenmonitoring erfassten Werte abgedeckt. Daher ist zukünftig auch die K-Versorgung der Pflanzen zu berücksichtigen.

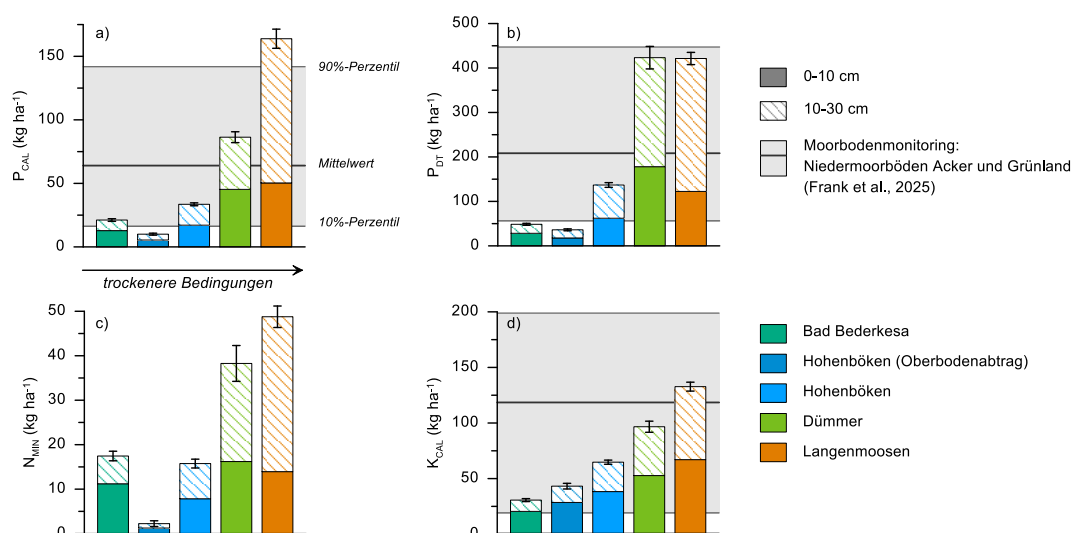


Abbildung 8: Pflanzenvorfügbare Nährstoffe im Boden. a): PCAL: Calcium-Acetat-Lactat-löslicher Phosphor, b) PDT: Dithionit-löslicher Phosphor, c) N_{min} : Nitrat und Ammonium (Calciumchlorid-Extraktion), d) K_{CAL} : Calcium-Acetat-Lactat-lösliches Kalium. Mittelwert und Standardfehler aller Proben und aller Varianten am jeweiligen Standort

Pflanzenwachstum:

Die Darstellung der Erträge von *Typha* und *Phragmites* erfolgt in Abhängigkeit vom Jahr nach Etablierung, wobei beide *Typha*-Arten (*T. latifolia* und *T. angustifolia*) zusammengefasst werden (Abbildung 9). Die Etablierung in Hohenböken war wenig erfolgreich, da sich aufgrund der oben aufgeführten Probleme im Wassermanagement und der Nährstoffknappheit *Juncus effusus* durchgesetzt hat und dabei sehr ertragsstark war. Auch ein verbessertes Wassermanagement ab dem zweiten Jahr konnte *J. effusus* nicht mehr zurückdrängen, wobei die Situation bei *Phragmites* besonders dramatisch war. In Bad Bederkesa dagegen konnten sowohl *T. latifolia* und *T. angustifolia* als auch *Phragmites* erfolgreich etabliert werden, die Erträge blieben jedoch recht niedrig. Durch die hohen Wasserstände war *J. effusus* kein Problem. Vor allem bei *Phragmites* zeigten sich im zweiten Jahr höhere Erträge, so dass eine Stabilisierung des Systems möglich erscheint. Die Bestandsentwicklung war räumlich heterogen, wobei die höchsten Bestandsdichten und Vegetationshöhen im Umfeld der Wassereinlässe zu beobachten waren. Dies ist ein deutliches Indiz, dass die pflanzenverfügbaren Nährstoffe im Boden nicht ausreichen und die Kulturen auf externe Nährstoffzufuhr angewiesen sind. Ein anderes Bild zeigte sich in Langenmosen, wo im mittlerweile siebten Standjahr recht stabile Erträge – hier wegen der sehr hohen Nährstoffverfügbarkeit aus dem Boden, nicht aus dem zugeleiteten Wasser – zu verzeichnen sind. Der Pflanzenbestand ist jedoch auch an diesem Standort heterogen und zeigt teilweise einen relevanten Anteil an Begleitvegetation.

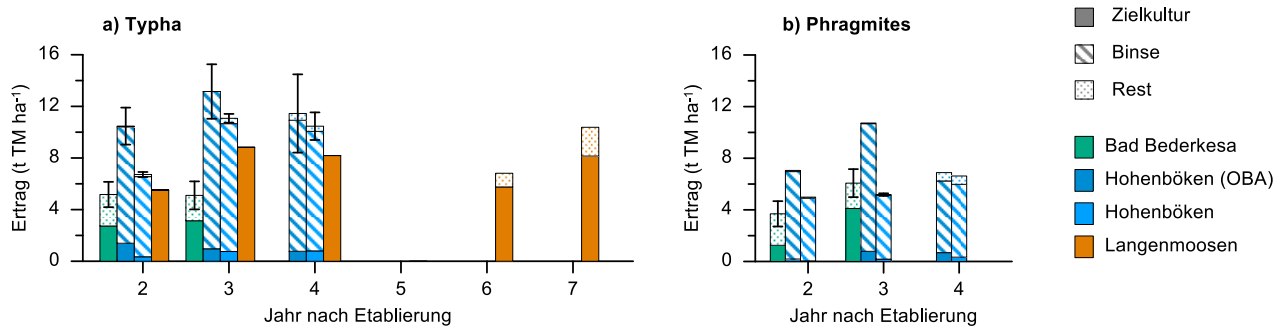


Abbildung 9: Erträge aller Varianten mit *Typha* und *Phragmites*, Unterteilung nach Zielkultur, Binse (*Juncus effusus*) und weiter Begleitvegetation (Rest). OBA: Oberbodenabtrag.

Abbildung 10 zeigt den Vergleich der beiden Erntetermine „Herbst“ (November) und „Winter“ (Ende Januar bis Anfang März). Sowohl bei den Erträgen als auch bei den C:N-Verhältnissen sind nur die Werte der jeweiligen Zielkultur dargestellt, während *Juncus effusus* separat betrachtet wird. Bezüglich der Erträge gibt es keine Auswirkungen durch die Wahl des Erntetermins. Einzig im Falle von *Phragmites* im zweiten Standjahr in Bad Bederkesa waren die Erträge im Herbst höher. Die C:N-Verhältnisse in der Biomasse von *Typha* spiegeln tendenziell die Nährstoffgehalte im Boden wider, wobei die Daten aus Hohenböken unter Vorbehalt betrachtet werden müssen, da die Gesamtmenge an *Typha* sehr gering war. Im Gegensatz zu *Typha* und *Juncus effusus* scheint es bei *Phragmites* eine Tendenz zu höheren C:N-Verhältnissen bei einer Winterernte zu geben.

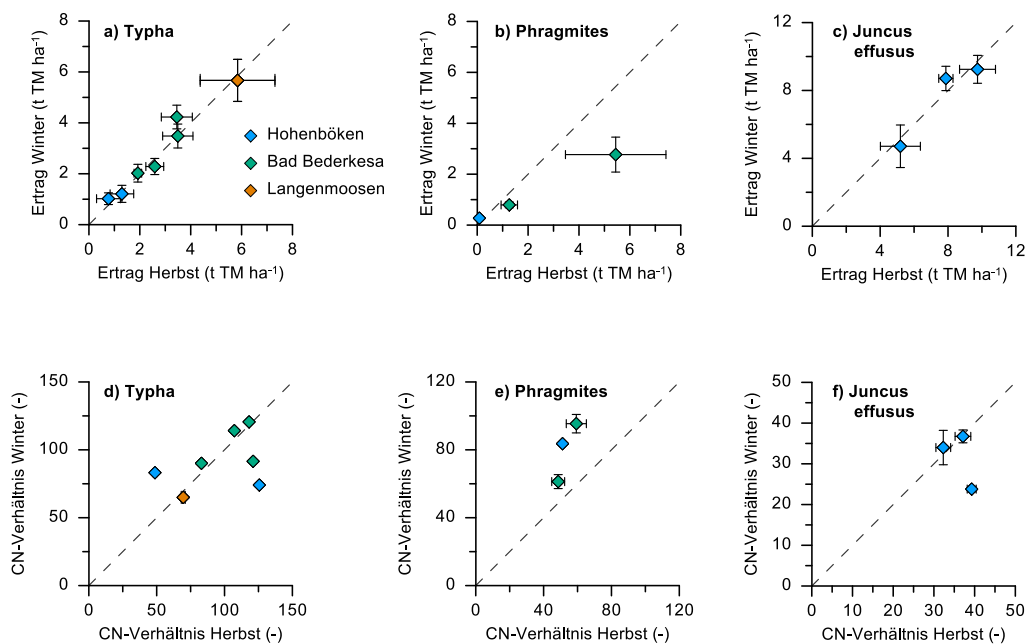


Abbildung 10: Vergleich von Trockenmasseerträge (TM) und C:N-Verhältnissen von Winter- und Herbsterten.

Aufgrund der schwierigen Versuchsbedingungen und der Interaktion zwischen Wasserständen und Nährstoffverfügbarkeit ist eine umfassende statistische Auswertung der Daten zu *Typha* und *Phragmites* noch nicht möglich. Für *Phalaris* zeigt sich jedoch ein Trend zu höheren Erträgen unter feuchteren bis nassen Bedingungen, wenn auch Daten aus dem Projekt MoorUse hinzugezogen werden (Abbildung 11). Dies ist insbesondere der Fall für die Varianten aus dem Projekt MoorUse mit Ausgleichsdüngung; es können jedoch auch an langjährig extensiv genutzten Standorten wie dem Dümmer recht hohe Erträge erzielt werden.

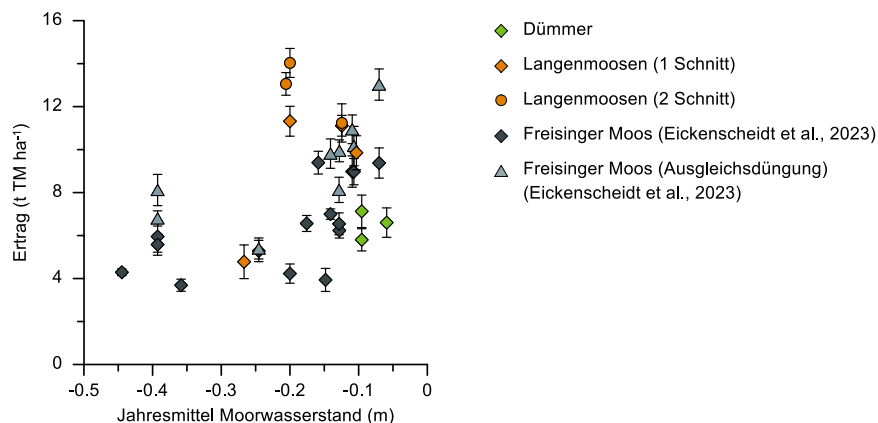


Abbildung 11: Trockenmasseerträge (TM) von *Phalaris arundinacea* in Abhängigkeit von Moorwassertand, Standort und Management

Die Auswertung der Daten aus Langemoosen zeigt, dass die 1-Schnittvarianten von *Carex* und *Phalaris* höhere maximale LAI-Werte und damit dichtere Bestände aufweisen als die 2-Schnittvarianten (Abbildung 46). *Typha* zeigt aufgrund seines aufrechten Wuchses die niedrigsten LAI-Werte. Die maximalen NDVI-Werte unterscheiden sich kaum, jedoch zeigen sich artspezifische Unterschiede im saisonalen Verlauf der Vegetationsentwicklung und der Seneszenz. Abbildung 11 zeigt die Entwicklung der Trockenmasseerträge in Langemoosen seit der Etablierung der Bestände (*Typha* 2018; *Carex*, *Phalaris* 2019). Die Erträge wurden im Rahmen des NAPALU-Projekts von 2023 bis 2025 erfasst. Anders als im Freisinger Moos wurden bisher keine langfristigen Ertragsrückgänge beobachtet, sondern eine deutliche jährliche Schwankung, die mit steigender Bewirtschaftungsintensität tendenziell abnimmt. In der 1-Schnittvariante betragen die durchschnittlichen Trockenmasseerträge (ohne die ersten zwei Etablierungsjahre) $9,48 \pm 1,77 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Carex*, $9,82 \pm 1,99 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Phalaris* und $8,65 \pm 2,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Typha*. *Typha* zeigt dabei die größte Variabilität innerhalb der Fläche, was auf eine geringere Toleranz gegenüber schwankenden Wasserständen hinweist. Eine 2-Schnittnutzung (Juli und Winter) erhöht die Erträge auf $11,28 \pm 2,09 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Carex* und $12,91 \pm 1,19 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Phalaris*.

Fazit:

Die Pilot-Sites zeigen deutlich die Herausforderungen des Wassermanagement und decken die Spannbreite an pflanzenverfügbaren Nährstoffen an Moorstandorten in Deutschland gut ab. Erstmals wurde die Nährstoffsituation an Niedermoorpaludikulturen detailliert, mit räumlichen Wiederholungen und zeitlich hoch aufgelöst erfasst. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass für eine erfolgreiche Etablierung nährstoffliebender Arten stabil hohe Wasserstände in der Etablierungsphase insbesondere an vergleichsweise nährstoffarmen Standorten entscheidend sind (Hohenböken vs. Bad Bederkesa). Bei zu trockenen Verhältnissen bzw. stark schwankenden Wasserständen besteht das Risiko, dass die Flatterbinse den Bestand dominiert, was durch sehr Wasserstände unterbunden werden kann. Dennoch bleiben die Erträge an einem solchen Standort (Bad Bederkesa) hinter dem Potential für *Typha* und *Phragmites* zurück. An nährstoffreichen Standorten kann eine Etablierung jedoch auch dann gelingen, wenn die Moorwasserstände im Sommer phasenweise unter ein optimales Niveau fallen (Langemoosen). Bezüglich der Erntetermine zeigte sich kein eindeutiges Muster außer einer Tendenz zu höheren C:N-Verhältnissen und geringeren Erträgen bei einer Winterernte von *Phragmites*. Dies im Hinblick auf flexiblere Ernteplanung als positiv zu werten, ist aufgrund der wenig erfolgreichen Etablierung in Hohenböken als vorläufiges Ergebnis zu betrachten. *Phalaris* und *Carex* sind bei mittlerer und hoher Nährstoffversorgung auch bei einer 1-Schnitt-Nutzung ertragreich, profitieren dabei von hohen Wasserständen und sind wahrscheinlich unempfindlich gegenüber steigenden Temperaturen. Eine Zwei-Schnittnutzung von *Carex* und *Phalaris* kann die Erträge erhöhen. Aufgrund hoher Erntekosten und eines reduzierten Treibhausgas-Minderungspotenzials gilt diese Intensivierung jedoch als ökonomisch und ökologisch nachteilig. Daher wird derzeit eine einmalige Winterernte empfohlen.

Weiterführende Untersuchungen zur Biomassequalität

Alle Biomasseproben der Jahre 2023 und 2024 von den Pilotsites wurden laboranalytisch untersucht und die Daten den Partnern zur Verfügung gestellt. Es folgen hier Darstellungen der Analyseteilergebnisse von den

Pilotflächen in Bayern zur Biomasseentwicklung hinsichtlich der Faserzusammensetzung. In der Tendenz sieht man Unterschiede in den Cellulosegehalten zwischen den unterschiedlichen organischen Düngformen (Biogasgärrest flüssig, Biogasgärrest separiert) und den Jahren im Freisinger Moos (Abbildung 12, links). Die Biomasseproben aus Langenmosen hatten tendenziell höhere Cellulosegehalte als die vom Freisinger Moos (Abbildung 12, rechts). Im Anhang (Abbildung 61) findet sich zusätzlich eine Grafik zu den unterschiedlichen Nährstoffgehalten des Erntematerials (N, P, K und Fe) für die Pilotflächen. Hier wird deutlich, dass die Standorte, resultierend aus der unterschiedlichen Fragestellung, starke Variationen in den Nährstoffgehalten aufweisen. So zeigten die Analysen des Erntematerials vom Dümmer bei allen gezeigten Nährstoffen die höchsten Werte auf, im Gegensatz dazu zeigte das Material vom Hohenböckener Moor immer die niedrigsten Gehalte im Material (Abb. 54, Anhang).

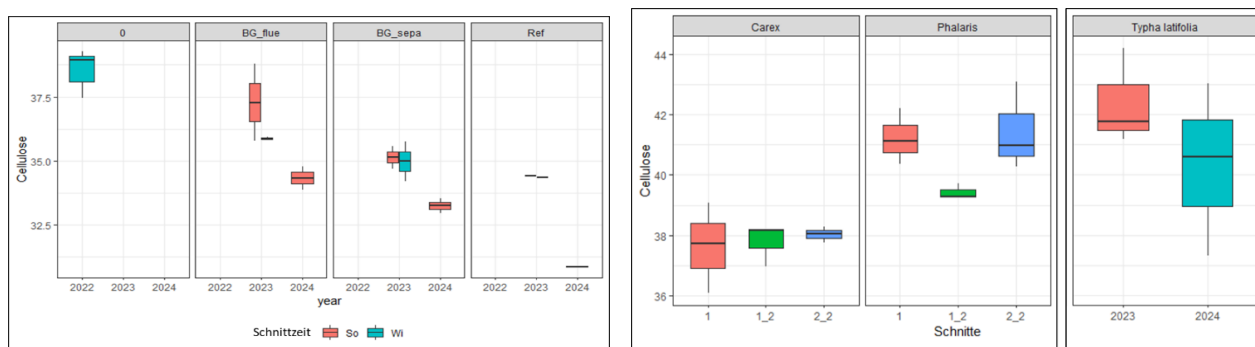


Abbildung 12: Links: Freisinger Moos: Cellulosegehalte in *Phalaris* über alle Wasserstände in Abhängigkeit der organischen Dünger (Biogasgärrest flüssig: BG_flue, Biogasgärrest separiert: BG_sepa). | Rechts: Langenmosen: Cellulosegehalte in *Carex*, *Phalaris*, *T. latifolia* in Abhängigkeit vom Schnittregime.

Arbeitspaket 2.3: Auswirkung der Nährstoffversorgung auf Verwertungsoptionen

Es wurde untersucht, ob die Nährstoffversorgung auf die inhaltsstoffliche Zusammensetzung Einfluss nehmen kann. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Faseranalytik aus dem ersten Erntejahr 2023/24 aus der Mesokosmenanlage aufgezeigt.

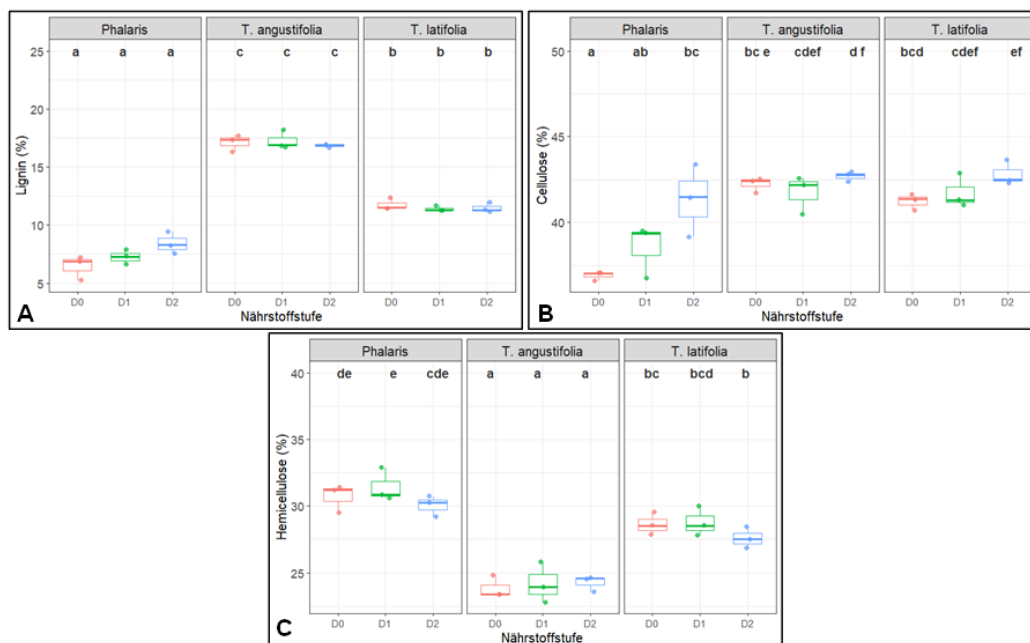


Abbildung 13: Faserzusammensetzung (A: Lignin, B: Cellulose, C: Hemicellulose) bei *Phalaris*, *T. angustifolia* und *T. latifolia* in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK: 238/90/180 kg/ha; Gamma-verteiltes GLM mit logarithmischer Link-Funktion; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; $n = 3$ je Nährstoffstufe)

Es wird deutlich, dass die Lignin- und Hemicellulose-Anteile pflanzenartabhängig sind und nicht von der Nährstoffgabe beeinflusst wurden (Abbildung 13 A, C). Die Cellulosegehalte bei *Phalaris* und *T. latifolia* wurden durch die höchste Nährstoffstufe (D2) signifikant erhöht (Abbildung 13 B).

Die Nährstoffversorgung kann die Verwendung von Schilf (*Phragmites*) als Dachreet beeinflussen. Die hier aufgeführten Ergebnisse stammen aus dem ersten Erntejahr 2023/24. Alle Reethalme wurden in Längensklassen (K=kurz, M=mittel, L=lang) unterteilt und den Nährstoffstufen zugeordnet. Insgesamt zeigt die Abbildung 14 einen deutlich höheren Anteil geernteter Reethalme der D2-Variante am Gesamtertrag aller Mesokosmen. Im Detail bildete die D2-Variante etwa doppelt so viele längere Triebe (Klasse M + L) aus als die D0- bzw. D1-Variante. Des Weiteren wurden von unten gemessene Halmsektionen (0 - 6, 6 - 12, 45 - 55 cm) geschnitten, vermahlen und mittels Nahinfrarotspektroskopie (NIR) die Fasergehalte und -zusammensetzung untersucht. Durch die höchste Nährstoffstufe D2 wurde der Cellulosegehalt erhöht und der Hemicellulosegehalt verringert (Abbildung 15).

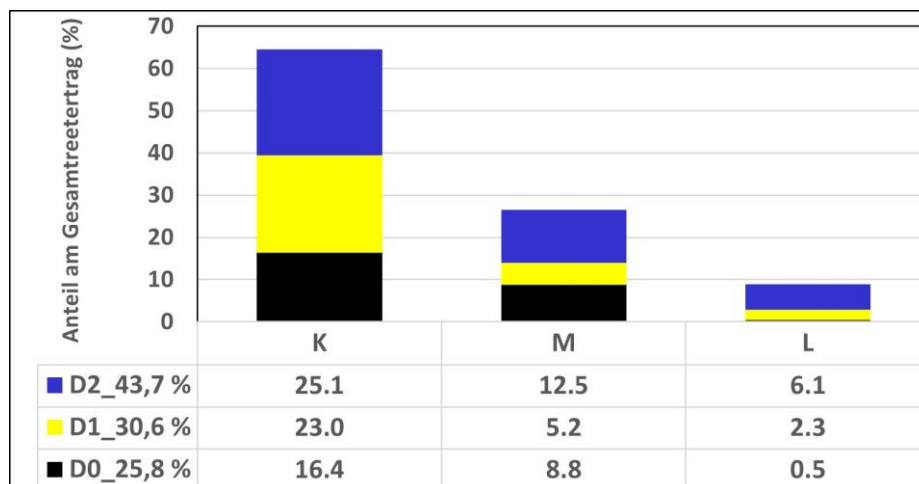


Abbildung 14: Zusammensetzung der Reethalme nach Größenklassen: K (kurz 80-150 cm), M (mittel 151 – 180 cm), L (lang 181 – 240 cm) in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha)

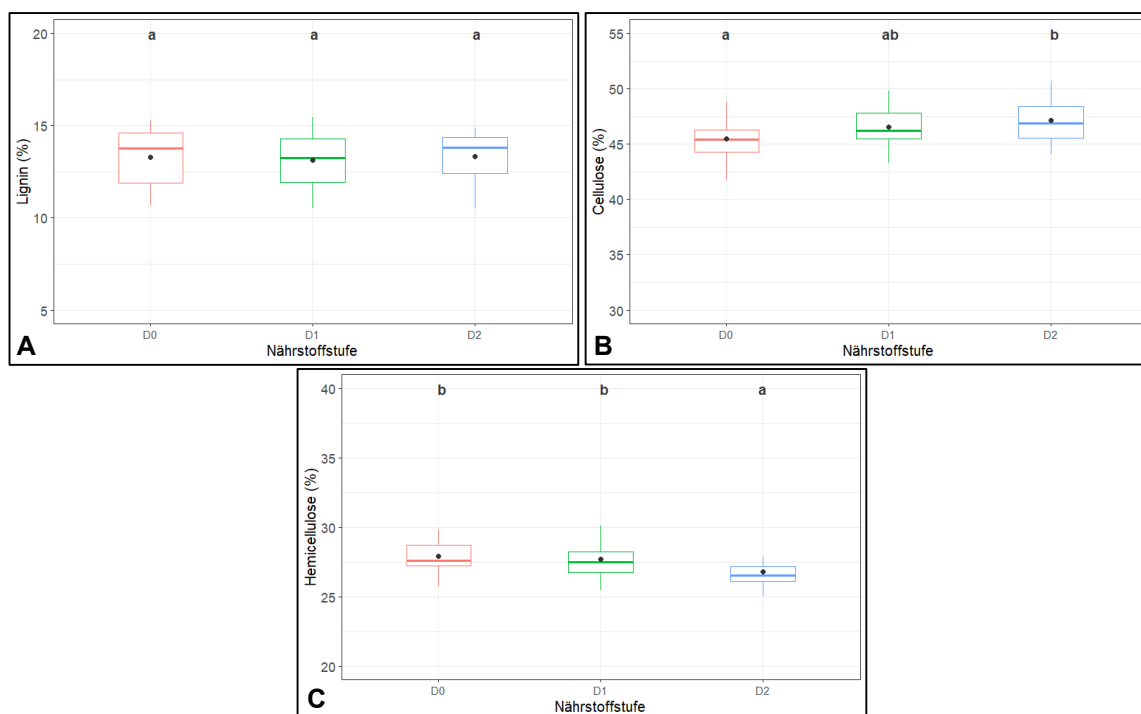


Abbildung 15: Faserzusammensetzung (A: Lignin, B: Cellulose, C: Hemicellulose) aller Halmabschnitte (0-6, 6-12, 45-55 cm) von *Phragmites* in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24. D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha; Lineares Modell; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; $n = 24$ (D1/D2), $n = 18$ (D0)

Für den sogenannten Tauch-Saugtest nach Riet & Greef (2016) wurden die sortierten Halme in den Klassen (kurz, mittel, lang) genutzt (Ausnahme: in der D0-Variante waren keine langen Halme ausgebildet). Die Tabelle 6 zeigt, dass die unteren 20 cm der Halme der D2-Variante innerhalb von 24 h weniger Wasser aufnahmen als die der D0-Variante. Zudem gaben diese Halme der D2-Variante innerhalb von weiteren 24 h auch prozentual mehr vom aufgenommenen Wasser wieder ab; sie trockneten also schneller ab. Beides sind positive Merkmale der D2-Variante für voll ausgereiftes, qualitativ hochwertiges Reet.

Tabelle 6: Qualitätsmerkmale von Reethalmen beim Tauch-Saugtest in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha; Gamma-verteiltes GLM mit logarithmischer Link-Funktion; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; N = 12/18 je Nährstoffstufe)

Nährstoffstufe	Halmsektion (cm)	Wasseraufnahme (Vol % in 24 h)	Wasseraufnahmekoeffizient ($\text{l m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$)	Wasserabgabe (% nach 24 h)	Spezifisches Gewicht (g cm^{-3})
D0	0 – 20	4.29 b	1.27 a	22.8 b	0.233 d
D1		3.79 ab	1.28 a	25.7 bc	0.209 c
D2		3.42 a	1.11 a	29.0 c	0.205 bc
D0	50 - 70	6.36 c	2.46 b	17.3 a	0.182 b
D1		6.34 c	2.47 b	17.9 a	0.163 a
D2		6.52 c	2.52 b	18.8 a	0.161 a

Im April 2024 wurden Kompostierungsversuche mit dem Pflanzenmaterial aus den Mesokosmenversuchen, sowie *Carex*-Material aus Langenmosen angesetzt. Den Ansätzen wurden jeweils 3g N als Hornmehl pro Liter feuchter Biomasse zugesetzt und das Material in Rollkomposter gefüllt. Die Komposter wurden einmal pro Woche gedreht, um genug Sauerstoff zuzufügen. Die Ansätze mit *Typha* und *Phalaris* waren für eine statistische Analyse zu gering, die geernteten *Phalaris*-Bestände aus den Mesokosmen entsprachen keinem Reinbestand, sondern enthielten zu 85 % (D0), 78 % (D1) und 61 % (D2) Flatterbinse.

Zusätzlich zu den vorgesehenen Analysen in der Verwertungsrichtung Kompost und Dachreet wurden weitere 10 Proben von der Ausgangsbiomasse für die Compoundierungsversuche der Hochschule Bremen auf ihre Fasergehalte hin analysiert. Diese Ergebnisse wurden dem Partner übermittelt und sind in der Tabelle 26 im Anhang dokumentiert. Sie sollen aufzeigen, ob anhand der Fasergehalte Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Compounds gewonnen werden können.

M 2.3 Ergebnisse der Qualitätsanalyse kompostierten Paludimaterials

Nach 9 Wochen Kompostierung (Juli 2024) erfolgte eine Zwischenentnahme zur Bestimmung verschiedener Qualitätsmerkmale des Komposts (Tab. 24, Anhang). Anhand der mineralischen Stickstoffwerte ($N_{\min}$) würden drei der *Phalaris*/Flatterbinsen-Komposte sowie der *Carex*-Kompost als Substratkompost durchfallen. Die Zuordnung zum Typ 1-Substratkompost erreichte nur *T. angustifolia* der D0- und D1-Variante und die restlichen Komposte die Zuordnung zu Typ 2-Substratkompost.

Ein Einfluss der Nährstoffversorgung während des Wachstums von Rohrkolben und *Phalaris* auf die Verwertungsoption als Substratkompost kann aufgrund des geringen Ansatzes und der teils gegensätzlichen Gehaltsentwicklungen in den Nährstoffen in einer Variante (siehe $N_{\min}$ -Gehalte *Phalaris*/Flatterbinsen-Kompost der D1-Varianten) nicht vollends geklärt werden. Der Einfluss der Pflanzenart wird allerdings deutlich. So führen unterschiedlich starke Sackungen auch indirekt zu Anstiegen in den Nährstoff- und Salzgehalten durch die Aufkonzentration. Insgesamt wurden die besten Ergebnisse beim Kompost aus *T. angustifolia* erzielt, in der Reihenfolge D1-Variante (Typ 1- Substratkompost), D2-Variante und D0-Variante (beide Typ 2-Substrat-Kompost) (Luyten-Naujoks, 2023). Um dennoch zu prüfen, ob alle Kompost-Ansätze in eine bessere Qualität, also in den Typ1-Substratkompost überführt werden können, wurde ein Auswaschungs-Experiment umgesetzt. Dazu wurde ein definiertes Volumen von 1,6 Liter Kompostsubstrat in verschlossenen Säcken in Eimern mit je 3 Liter destilliertem Wasser für 30 min gewässert und danach wieder bis zur Topffeuchte luftgetrocknet und erneut im Labor analysiert. Wie der Tabelle 25 (Anhang) zu

entnehmen, konnten nun alle Komposte der Kategorie Typ 1-Substratkompost zugeordnet werden, da der N_{min} -Gehalt durch die Waschung reduziert werden konnte. Es ist denkbar, dass man das sehr nährstoffreiche Wasser anschließend beispielsweise in Kultivierungsprozessen als Düngelösung zurückführen könnte.

Mittels Kresstest wurde die Reife und Qualität des hergestellten Komposts geprüft (FIBL, 2018). Die Verbesserung der Kompostqualität durch Waschung wurde im Kresstest bestätigt. Die Pflanzen zeigten ein besseres Wachstum der oberirdischen Biomasse sowie eine bessere Wurzelentwicklung (in Abbildung 16 exemplarisch am *Carex*-Kompost gezeigt).

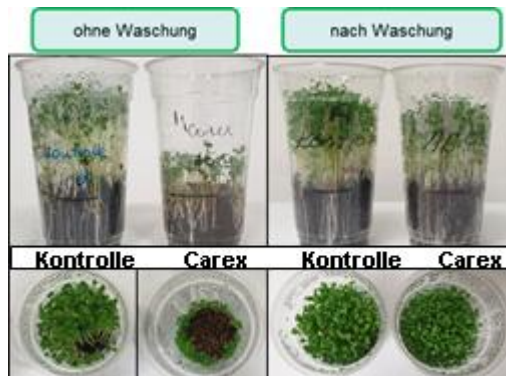


Abbildung 16: Geschlossener Kresstest mit ungewaschenem und mit gewaschenem 6 Monate gereiftem *Carex*-Kompost.

:

Arbeitspaket 3: Stoffhaushalt

Teilaufgaben AP3.1: Treibhausgasaustausch

Auswirkung des Oberbodenabtrags:

Grundlagen und Methodik:

Der gezielte Oberbodenabtrag ist eine häufig diskutierte Maßnahme um u.a. erhöhte Methanemissionen in Folge einer Wiedervernässung zu mindern (Harpenslager *et al.* 2015). Während bei einer Hochmoorrehabilitierung der Abtrag des nährstoffreichen Oberbodens und die damit einhergehende Nährstoffreduktion gewünscht ist im Kontext der Niedermoorpaludikultur jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere *Typha*-Arten einen sehr hohen Nährstoffbedarf aufweisen. Ein Oberbodenabtrag könnte daher potenziell zu geringeren Biomasseerträgen führen.

Im Versuchspolder Hohenböckener Moor wurde im Rahmen des Projekts *Produktketten aus Niedermoorbiomasse* ein Polder mit einer Nettofläche von etwa 0,3 ha angelegt. Im November 2020 wurden die Arten *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* sowie *Phragmites australis* gepflanzt. Für jede Art wurde zusätzlich eine Versuchsfläche von 10 × 10 m angelegt, auf der ein Oberbodenabtrag von 10 cm durchgeführt wurde (vgl.

Abbildung 17). Der entnommene Boden wurde zur Errichtung der Polderverwallung genutzt. Ziel des Versuchs war es, den Einfluss des Oberbodenabtrags auf den Austausch von Treibhausgasen sowie auf die Biomasseproduktion der Kulturen zu untersuchen. Das Wassermanagement erfolgte artspezifisch. Für *Typha latifolia* und *Phragmites australis* wurde der Wasserstand nahe der Geländeoberkante gehalten, während für *Typha angustifolia* ein Überstau von etwa 15 cm angestrebt wurde. Die Bewässerung erfolgte überwiegend über Wasser aus dem umliegenden Fanggraben, bei Bedarf zusätzlich über Grundwasser aus einem Brunnen. Zusätzlich wurden Treibhausgasmessungen auf der Polderverwallung (Damm) sowie auf einer weiterhin extensiv bewirtschafteten Grünlandfläche durchgeführt.

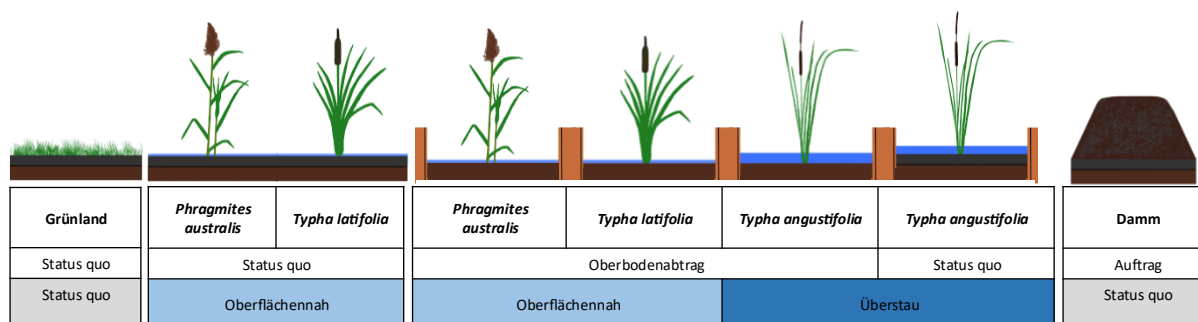


Abbildung 17: Überblick der Messvarianten am Standort Hohenböckener Moor. Status quo: Kein Oberbodenabtrag bzw. kein Eingriff in Wasser- und Flächenmanagement.

Der Austausch von Treibhausgasen wurde von Februar 2021 bis März 2025 mittels manueller Haubenmessungen erfasst. Dabei wurden Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄) während mehrtägiger Geländekampagnen gemessen. Zusätzlich wurden während der Etablierungsphase Lachgasemissionen (N₂O) bestimmt. Relevante Steuergrößen wie Boden- und Lufttemperatur sowie photosynthetisch aktive Strahlung wurden kontinuierlich erfasst. Die Ernte der Paludikulturen erfolgte jährlich ab Februar 2023 und wurde in die Berechnung der Treibhausgasbilanzen einbezogen. Zur Untersuchung der Nährstoffdynamik wurden in allen Varianten regelmäßig Bodenproben entnommen und die Makronährstoffe Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) analysiert. Zur besseren Einordnung, werden hier alle Messjahre seit der Etablierung dargestellt.

Ergebnisse

Eine erfolgreiche Etablierung der geplanten Paludikulturen am Standort Hohenböckener Moor erwies sich als problematisch. Zum einen konnte im ersten Jahr nach der Pflanzung keine ausreichende Wasserversorgung gewährleistet werden, sodass phasenweise vor allem die Varianten ohne Oberbodenabtrag zeitweise trocken fielen. Zum anderen erwies sich die Flatterbinse (*Juncus effusus*) unter den vorherrschenden Standortbedingungen als sehr konkurrenzstark, sodass sie die Erntezusammensetzung dominierte. Aufgrund dessen ist ein direkter Vergleich zwischen den angebauten Paludikulturarten nur eingeschränkt möglich. Wie erwartet führte der Abtrag des nährstoffreichen Oberbodens zu einer deutlichen Reduktion des Nährstoffdargebots (Abbildung 18 c und d). Über den gesamten Untersuchungszeitraum wurden für die Varianten ohne Oberbodenabtrag mittlere N_{min} -Gehalte von $15,5 \pm 10,6 \text{ kg ha}^{-1}$ gemessen, während der N_{min} -Gehalt in der Bodentiefe von 0–30 cm in den Varianten mit Oberbodenabtrag im Mittel nur $2,24 \pm 4,5 \text{ kg ha}^{-1}$ betrug. Auch die Phosphorgehalte waren deutlich reduziert. Für die Varianten ohne Oberbodenabtrag ergab sich bei der P_{CAL} -Extraktion ein mittlerer Gehalt von $33,4 \pm 14,7 \text{ kg ha}^{-1}$, während die Varianten mit Oberbodenabtrag nur $10,0 \pm 6,0 \text{ kg ha}^{-1}$ aufwiesen. Auffällig ist zudem der bereits im Jahr der Etablierung beobachtete deutliche Rückgang der Nährstoffgehalte.

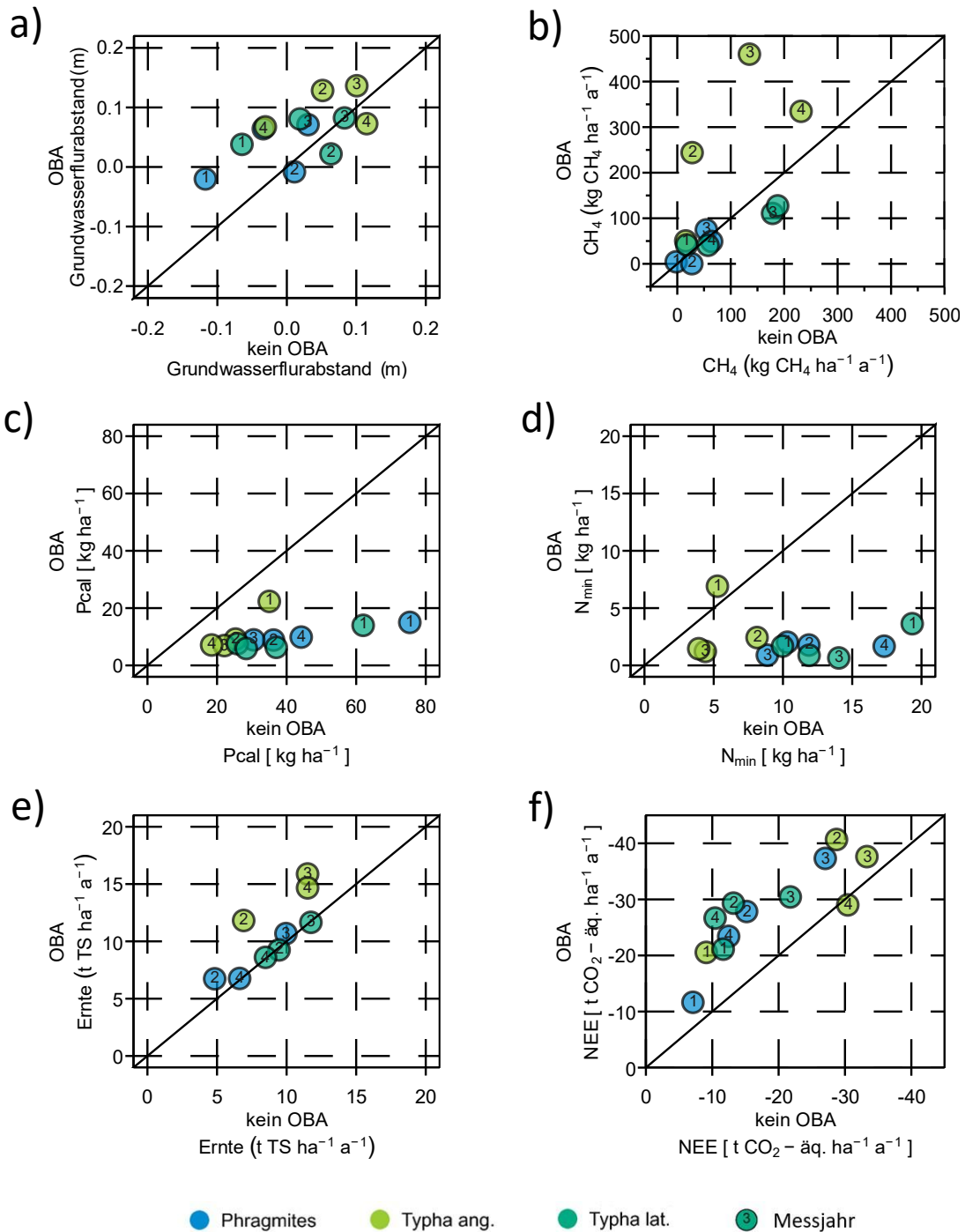


Abbildung 18: Vergleich zwischen Varianten mit Oberbodenabtrag (OBA) und ohne Oberbodenabtrag. Dargestellt sind Grundwasserstand, Methanemissionen (CH₄), Boden-Nährstoffgehalte (PCAL und Nmin), Biomasseerträge sowie der Netto-Ökosystemaustausch (NEE). Die Diagonale kennzeichnet die 1:1-Linie.

Betrachtet man die Entwicklung der Biomasseerträge über die Bilanzjahre 2022 bis 2024, so zeigen die Varianten mit Oberbodenabtrag in der ersten Ernte höhere Erträge als die Varianten ohne Oberbodenabtrag (Abbildung 18). Dies betrifft sowohl die Gesamtbiomasse als auch die Biomasse der Zielpflanzen. In den Ernten der Bilanzjahre 2023 und 2024 relativiert sich dieser Unterschied jedoch, sodass sich die Biomasseerträge zwischen den Varianten weitgehend angleichen. Über alle Ernten hinweg wurden für die Varianten ohne Oberbodenabtrag im Mittel $9,1 \pm 2,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ Biomasse exportiert, wobei der Anteil der Zielkulturen lediglich $0,4 \pm 0,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ betrug. Für die Varianten mit Oberbodenabtrag lag der gesamte Biomasseexport im Mittel bei $10,7 \pm 3,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, mit einem Anteil der Zielpflanzen von $0,9 \pm 0,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die höchsten Erträge wurden in allen Jahren in der Variante *Typha angustifolia* mit Oberbodenabtrag erzielt. Das Maximum wurde im Bilanzjahr 2023 mit $15,9 \pm 1,1 \text{ t ha}^{-1}$ erreicht.

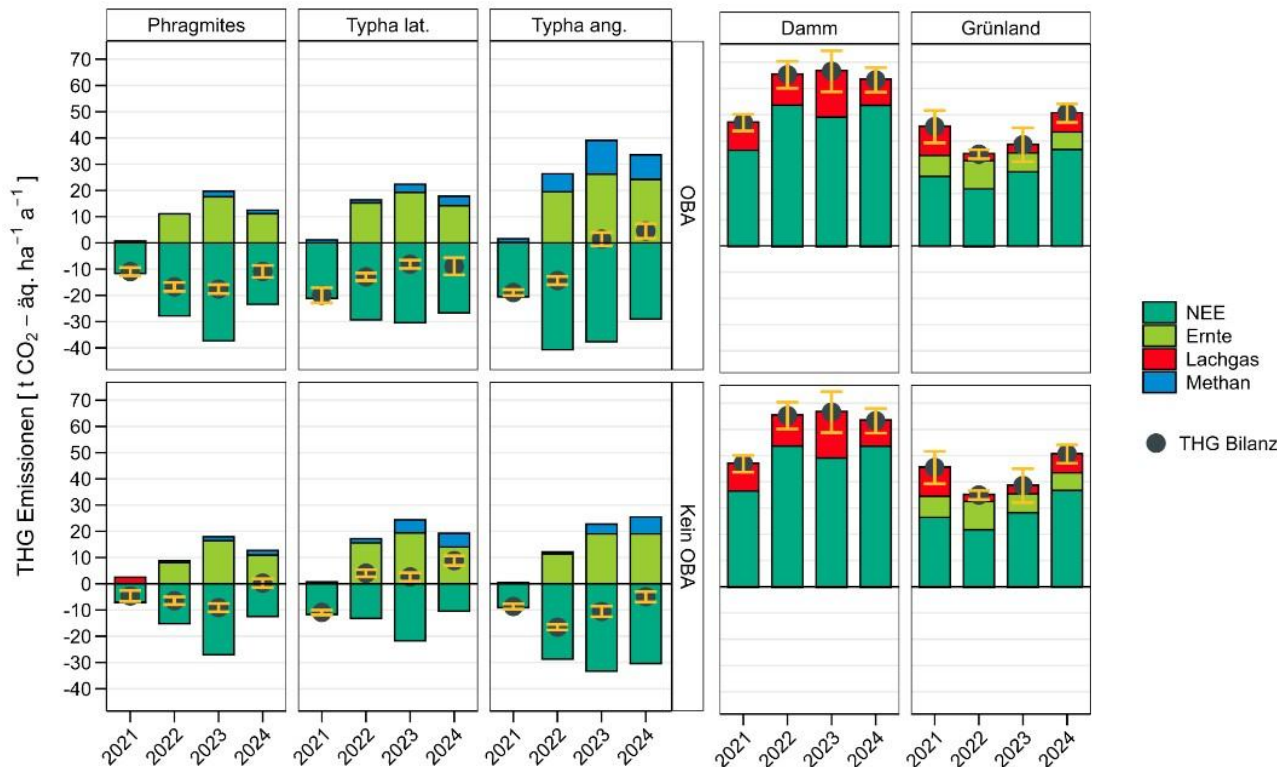


Abbildung 19: Überblick der Treibhausgasbilanzen (NEE = Nettoökosystemaustausch) für die Paludikulturvarianten mit und ohne Oberbodenabtrag (OBA) sowie Damm und Grünland.

Trotz der insgesamt unzureichenden Etablierung der Zielarten und der Dominanz von *Juncus effusus* wurden mit wenigen Ausnahmen Netto- CO_2 -Senken gemessen. Unerwartet zeigte sich dabei eine höhere Senkenleistung in den Varianten mit Oberbodenabtrag (Abbildung 18 f). Über alle Messjahre hinweg traten deutlich geringere Methanemissionen auf als ursprünglich erwartet, eine Reduzierung der Methanemissionen durch den Oberbodenabtrag konnte nicht nachgewiesen werden. Die Treibhausgasbilanz über alle Messjahre lag im Mittel bei $-4,7 \pm 7,6 \text{ t CO}_2\text{-Äquivalenten ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für die Varianten ohne Oberbodenabtrag, während die Varianten mit Oberbodenabtrag im Mittel mit $-11,1 \pm 7,6 \text{ t CO}_2\text{-Äquivalenten ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ eine höhere Treibhausgas-Senke darstellten. Betrachtet man zusätzlich das Einsparpotenzial im Vergleich zur Grünland-Referenzfläche, zeigt sich eine deutliche Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Umstellung auf Paludikultur. Unter Berücksichtigung der Emissionen aus dem Polderdamm (Flächenanteil 7 %) ergibt sich beim Vergleich des mittleren Treibhausgasaustauschs der Paludikulturen mit der Grünlandnutzung eine Reduktion von mehr als $40 \text{ t CO}_2\text{-Äquivalenten ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Diskussion:

Für die mangelnde Etablierung der Zielkulturen am Standort Hohenböckener Moor kommen mehrere Ursachen in Betracht. Zum einen führte das fehlende Wassermanagement während der Etablierungsphase zu einem verstärkten Auftreten von Begleitvegetation, insbesondere von *Juncus effusus*. Aufgrund der vorherigen Nutzung der Fläche als extensives Grünland ist davon auszugehen, dass bereits ein erheblicher Samenvorrat im Boden vorhanden war.

Zum anderen zeigen die Analysen der Bodennährstoffe, dass die Nährstoffverfügbarkeit am Untersuchungsstandort insgesamt relativ gering ist und bereits nach kurzer Zeit deutliche Aushagerungseffekte auftraten. Die Wasserversorgung der Versuchsfläche war primär darauf ausgelegt, Verluste durch Evapotranspiration und Versickerung auszugleichen. Ein kontinuierlicher Durchfluss zur zusätzlichen Einbringung von Nährstoffen über das Bewässerungswasser fand hingegen nicht statt. Somit reichte der Nährstoffeintrag über das Bewässerungswasser nicht aus, um den Nährstoffbedarf der Zielpflanzen zu decken, insbesondere in den Varianten mit Oberbodenabtrag.

Trotz der unzureichenden Etablierung der Zielkulturen wurden insgesamt relativ hohe Biomasseerträge erzielt. Diese sind jedoch vor allem auf die Dominanz von *Juncus effusus* zurückzuführen. Die hohen Gesamterträge lassen vermuten, dass Paludikulturen mit geringerem Nährstoffbedarf an diesem Standort

durchaus produktiv sein können. Da bereits Ansätze zur Verwertung von Binsenbiomasse bestehen, könnte diese Biomasse zukünftig auch wirtschaftlich genutzt werden. Insbesondere Standorte, bei denen aufgrund der Nutzungshistorie bereits mit einem starken Binsenaufwuchs zu rechnen ist, könnten hierfür geeignet sein.

Hinsichtlich der Treibhausgasbilanz zeigt sich, dass trotz der Etablierungsprobleme eine deutliche Minderung der Emissionen von mehr als 40 t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹ im Vergleich zur Grünlandnutzung erreicht werden konnte. Neben hohen CO₂-Aufnahmen ist dies auch auf vergleichsweise geringe CH₄-Emissionen zurückzuführen. Die Varianten mit Oberbodenabtrag wiesen insgesamt eine etwas bessere Treibhausgasbilanz auf. Anders als ursprünglich erwartet beruhte dieser Effekt jedoch nicht auf geringeren Methanemissionen, sondern auf einer höheren CO₂-Aufnahme, möglicherweise infolge eines verstärkten Wurzelwachstums bei geringerer Nährstoffverfügbarkeit.

Grundsätzlich ist ein Oberbodenabtrag aus Sicht der Treibhausgasbilanz jedoch nur dann sinnvoll, wenn das Material auf der Fläche verbleibt und beispielsweise zur Schließung von Gräben oder zur Errichtung von Polderverwallungen genutzt wird. Hinsichtlich der Eignung von Rohrkolben als Paludikultur ist zudem davon auszugehen, dass langfristig hohe Biomasseerträge vor allem an nährstoffreichen Standorten erreichbar sind. Auch dort muss der mit der Biomasseernte verbundene Nährstoffentzug langfristig ausgeglichen werden. Ohne Düngung kann ein solcher Ausgleich lediglich über nährstoffreiches Oberflächenwasser erfolgen

Auswirkung einer Nährstoffrückführung:

Grundlage und Methodik:

Die Untersuchungen zu den Umwelteffekten einer gezielten Nährstoffrückführung in Paludikulturen wurden am Intensivmessstandort Freisinger Moos auf einer im Jahr 2017 im Rahmen des Projekts MOORuse eingerichteten eingespundeten Paludikultur-Versuchsfläche durchgeführt. Ziel war die Analyse der Effekte unterschiedlicher Düngestrategien und zweier Grundwasserstandsszenarien auf Biomasseertrag, Treibhausgasaustausch und bodenchemische Prozesse (siehe Teilaufgaben AP3.2) unter praxisnahen Bewirtschaftungsbedingungen. Untersucht wurden die drei Paludikulturarten *Carex acutiformis* (Sumpfschilf), *Phalaris arundinacea* (Rohrgras) und *Typha latifolia* (Breitblättriger Rohrkolben). Die Flächen wurden während der Projektlaufzeit gleichbleibend bewirtschaftet. *Carex* und *Typha* erhielten eine mineralische Düngung bei einmaliger Winterernte, während *Phalaris* mit organischen Düngern im Zwei-Schnitt-System bewirtschaftet wurde. Die Nährstoffrückführung erfolgte durch gezielte Entzugsdüngung auf Basis der mit der vorhergehenden Ernte entzogenen Nährstoffmengen (Ausgangswerten für 2023 aus der Winterernte in 2022), um den kontinuierlichen Nährstoffentzug durch die Ernte der Biomasse auszugleichen und gleichzeitig potenzielle negative Umwelteffekte wie erhöhte Treibhausgasemissionen (insbesondere Lachgas, N₂O) oder Nährstoffausträge in Oberflächen- und Grundwasser zu vermeiden. Die Düngung erfolgte zweimal jährlich entsprechend der potenziellen stofflichen und energetischen Verwertung der drei Pflanzenarten. Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) wurden entweder in Form von mineralischem Volldünger (ALZON® neo-N 46, P, K) oder in Form organischer Dünger (separierter und flüssiger Biogasgärrest) auf die Düngevarianten appliziert (siehe Tabelle 21). Die für AP 3.2 („Nährstoffdynamik im Torf und Wasserqualität“) relevanten *Phalaris*-Versuchsvarianten wurden entsprechend der Nährstoffentzüge der umliegenden *Phalaris*-Flächen gedüngt. Vor dem Hintergrund der Vorgaben der aktuellen Düngeverordnung (DüV § 5 Abs. 1), die das Ausbringen stickstoff- und phosphathaltiger Düngemittel auf wassergesättigten Böden untersagen, als auch um die aus Klimaschuttsicht relevanten besonderen hydrologischen Anforderungen von Paludikulturen abzubilden, wurden zwei Grundwasserstandsszenarien untersucht. Ein Szenario sah einen während Düngung und Sommerernte temporär abgesenkten Wasserstand vor („GWL variabel“, ca. -0,25 bis -0,30 m; Jahresmittel -0,11 m), das zweite einen konstant hohen, oberflächennahen Wasserstand („GWL konstant“, Jahresmittel -0,07 m), entsprechend aktuellen Erkenntnissen von Bockermann und Eickenscheidt *et al.* (2025) zur Minderung von Treibhausgasemissionen in Paludikulturen (Wasserstandsganglinien siehe Abbildung 46). Für alle Arten wurde zusätzlich eine ungedüngte Referenz unter konstantem Wasserstand etabliert. Die hochfrequente Erfassung der Treibhausgasflüsse (Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und N₂O) erfolgte vom 02. Februar 2024 bis 10. Februar 2025 (im 8. Standjahr nach der Etablierung durch Pflanzung in 2017) mittels einer

automatisierter THG-Messvorrichtung an insgesamt elf Varianten mit jeweils drei oder vier Wiederholungen (Feldaufbau siehe

Abbildung 48). Der CO₂-Austausch (Ökosystematmung und Netto-Ökosystemaustausch) wurden im täglichen Wechsel mit CH₄- und N₂O-Messungen erfasst, wobei die Messfrequenzen in Abhängigkeit von Witterung und Flächenmanagement angepasst wurden. Insgesamt konnten für das Bilanzierungsjahr 2024 ca. 73.000 einzelne CO₂- sowie ca. 13.500 einzelne CH₄- und N₂O-Messungen realisiert werden. Zur besseren Abschätzung der Gesamtstickstoffverluste sowie zur Beurteilung der potentiellen negativen Umwelteffekte wurden die organisch gedüngten *Phalaris*-Varianten zusätzlich durch manuelle Ammoniak-(NH₃)-Messungen ergänzt. Parallel wurden für die Gasaustauschprozesse relevante meteorologische Steuerparameter (Boden- und Lufttemperaturen, Strahlung) sowie Biomasseentwicklung und Erträge erfasst. Auf dieser Grundlage wurden integrierte Gesamtreibhausgasbilanzen für die untersuchten Varianten berechnet.

Ergebnisse:

Die jährlichen kumulativen Biomasseerträge zeigten deutliche interspezifische Unterschiede in der Biomasseentwicklung der Pflanzen, die sowohl in Abhängigkeit vom Wasserstand als auch von der Nährstoffversorgung zu interpretieren sind (Abbildung 47). Die *Carex*-Bestände erreichten bei einer Winterernte im Jahr 2024 auch ohne Nährstoffrückführung Trockenmasseerträge von $8,6 \pm 2,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Weder unter konstant nassen noch unter temporär abgesenkten Wasserständen konnten durch Düngung signifikante Ertragsunterschiede festgestellt werden, trotz einer N-Zufuhr von $142 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 2023 bzw. $162 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 2024. In den *Typha*-Beständen führte eine langfristige Nutzung mit Winterernte zu einem signifikanten Ertragsrückgang, der durch eine Nährstoffrückführung in Höhe der Entzüge auf etwa $8,3 \pm 0,7 \text{ t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Dies war jedoch ausschließlich unter konstant nassen Bedingungen möglich, während temporär abgesenkte Wasserstände die Erträge signifikant reduzierten ($4,5 \pm 0,1 \text{ t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). *Phalaris* zeigte im Zwei-Schnitt-System einen signifikanten Ertragsrückgang, der durch Düngung mit flüssigem Biogasgärrest auf ca. $10,0 \pm 2,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Der Einsatz von separiertem Gärrest bewirkte hingegen keine Ertragsstabilisierung. Anzumerken ist, dass die Erträge der *Carex*- und *Phalaris*-Bestände im Jahr 2023 deutlich über den langjährigen Mittelwerten der jeweiligen Pflanzenarten lagen (vgl. MOORuse-Abschlussbericht, Eickenscheidt *et al.* 2023). Dies war jedoch unabhängig davon ob die Varianten gedüngt oder ungedüngt waren und muss auf interannuelle Schwankungen in den Erträgen zurückgeführt werden.

Die erfassten Treibhausgasflüsse weisen deutliche pflanzen- und managementspezifische Unterschiede auf. Generell stieg die CO₂-Ökosystematmung (Reco) wie zu erwarten unter Düngung und bei variablem Wasserstand signifikant an (Abbildung 51 a). Bei variablem Wasserstand ist das höhere Reco vor allem auf eine verstärkte Bodenatmung infolge der temporär erhöhten Durchlüftung des Oberbodens zurückzuführen und nicht auf einen Biomassezuwachs. Die beobachtete Zunahme der Bodenatmung war in den *Typha*-Beständen am stärksten ausgeprägt, mit einer Erhöhung des Reco um 21 %, was sich auch in den einzigen positiven Nettoökosystembilanzen (d.h. Netto Quelle) dieser Messvariante im Gesamtdatensatz widerspiegelt ($3,2 \pm 15,5 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Im Vergleich des CO₂-Nettoökosystemaustausch der untersuchten Arten zeigt sich ein klarer Trend, wonach die *Carex*-Bestände, insbesondere die ungedüngten Varianten, die höchsten CO₂-Senkenleistungen mit $-37,7 \pm 5,4 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ aufweisen (Abbildung 51 c).

Die Methanemissionen zeigen, dass Wasserstand und Pflanzenart als steuernde Faktoren die Emissionsdynamik dominieren, während Düngeeffekte gering blieben. Wie erwartet waren die CH₄-Emissionen bei variablem Wasserstand geringer und bei konstant hohem Wasserstand durch anhaltend anoxischer Bodenbedingungen signifikant erhöht (

Abbildung 52 a). Die *Carex*-Bestände wiesen sowohl bei konstant hohem als auch bei variablem Wasserstand generell die niedrigsten CH₄-Emissionen auf ($69,2 \pm 1,0 \text{ GWL konstant}$; $297,4 \pm 2,6 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1} \text{ GWL variabel}$). Die Methanemissionen in *Typha*- und *Phalaris*-Beständen lagen in beiden Wasserstandsklassen signifikant höher, mit Maximalwerten von $684,8 \pm 10,8$ bzw. $902,4 \pm 47,4 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei konstant hohem Wasserstand. Die Düngung führte zu signifikant höheren, in ihrer absoluten Höhe jedoch geringen N₂O-Emissionen von $0,6 \pm 1,0 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Maximum in der gedüngten *Typha*-Variante bei variablem Wasserstand (

Abbildung 52 b). Das Wasserstandsmanagement hatte hingegen generell keinen signifikanten Einfluss auf die N₂O Emissionen. In ungedüngten Varianten wurden leicht negative N₂O-Flüsse zwischen $-0,3 \pm 0,7$ bis $-0,4 \pm 1,0$ kg N₂O ha⁻¹ a⁻¹ gemessen. In den gedüngten *Phalaris*-Varianten überstieg die N-Verflüchtigung als Ammoniak (NH₃) die N₂O-N Verluste: eine Düngung mit separiertem Gärrest (34,9 kg NH₄-N ha⁻¹ a⁻¹) führte zu Emissionen von $1,1 \pm 0,2$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei variablem GWL und $1,4 \pm 0,1$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei konstantem GWL. Im Vergleich führte eine Düngung mit flüssigem Gärrest (69,2 kg NH₄-N ha⁻¹ a⁻¹) zu leicht höheren Emissionen von $1,8 \pm 0,3$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei variablem GWL und $2,0 \pm 0,3$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei konstantem GWL (Abbildung 54). Insgesamt zeigten sich keine einheitlichen Düngeeffekte auf die THG-Gesamtemissionen. Vielmehr traten deutliche Unterschiede zwischen den Pflanzenarten auf (Abbildung 53). Die *Carex*-Bestände wiesen deutlich höhere Aufnahme- und Minderungspotenziale im Vergleich zu *Typha* und *Phalaris* auf. Ein negativer Düngeeffekt war lediglich in den *Typha*-Beständen erkennbar, verursacht durch erhöhte Reco- oder CH₄-Emissionen. *Phalaris* zeigte unerwartet hohe Emissionen, jedoch konnte die temporäre Absenkung des Wasserstands während der Düngung die Gesamtemissionen durch verringerte CH₄-Emissionen reduzieren. Ein Vergleich mit Ein-Schnitt-Systemen der gleichen Versuchsfläche aus dem Jahr 2020 zeigt eine deutliche Emissionszunahme im hier untersuchten Zwei-Schnitt-System. Die höchsten THG-Gesamtemissionen traten in den *Phalaris*-Varianten auf, mit THG-Quellen von $7,8 \pm 2,3$ t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹ (gedüngt, GWL variable) bis zu $24,0 \pm 11,7$ t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹ (ungedüngt). Auch die *Typha*-Bestände waren ausschließlich THG-Quellen mit $4,1 \pm 7,5$ (ungedüngt) bis zu $18,4 \pm 15,2$ (gedüngt, GWL variable) t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹. Demgegenüber wiesen die *Carex*-Bestände hohe Senkenleistungen von $-9,9 \pm 11,2$ (gedüngt, GWL konstant) bis $-14,6 \pm 11,7$ (ungedüngt) t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹ auf.

Diskussion:

Die Biomasseerträge zeigten überwiegend positive Reaktionen auf Düngung, wobei deutlich wurde, dass die untersuchten Arten sehr unterschiedliche Nährstoffanforderungen aufweisen, um langfristig stabile Erträge zu erzielen. *Carex acutiformis* reagierte weder signifikant auf Düngung noch auf eine Absenkung des Wasserstands. Dies deutet auf eine vergleichsweise hohe Nährstoffeffizienz und geringe Abhängigkeit von externer Nährstoffzufuhr hin. In der langfristigen Nutzung, d. h. mit zunehmendem Besandesalter, konnte anhand der vorliegenden Messungen gezeigt werden, dass die Erträge in *Typha latifolia* und *Phalaris arundinacea* selbst unter hohen Wasserständen (d. h. unter aus hydrologischer Sicht idealen Bedingungen) zurückgehen, wenn keine Nährstoffrückführung erfolgt. *Typha latifolia* reagierte im Versuch unter konstantem Wasserstand mit signifikanten Ertragssteigerungen auf Düngung, während periodisch abgesenkte Wasserstände zu deutlichen Ertragsminderungen führten. Dies unterstreicht die hohe Sensitivität dieser Art gegenüber Wasserstress sowie die Bedeutung einer dauerhaft hohen Wasserführung für die Ertragssicherung. *Phalaris arundinacea* erzielte in beiden Wasserstandsszenarien signifikant höhere Erträge bei Anwendung von flüssigem Gärrest, während separierter Gärrest keine signifikanten Effekte zeigte. Die Erhebungen der Treibhausgasflüsse zeigten deutliche pflanzenspezifische Unterschiede hinsichtlich der potenziellen Klimarelevanz einer großflächigen Paludikulturanlage. Ähnliche pflanzenspezifische Trends wurden bereits von Bockermann *et al.* (2024) und Bockermann und Eickenscheidt *et al.* (2025) beschrieben. Die Effekte von Düngung und Wasserstand auf Biomasseerträge und Treibhausgasemissionen entsprechen zudem weitgehend vergleichbaren Befunden an mitteleuropäischen Niedermooren (vgl. z. B. Kandel *et al.* 2020 für *Phalaris*). Generell sollte bei der Neuanlage von Paludikulturen auf wiedervernässten Standorten vorrangig *Carex acutiformis* eingesetzt werden, da sowohl langfristig hohe Ertragspotenziale aufgrund einer hohen Nährstoffeffizienz als auch das höchste THG-Minderungspotenzial erzielt werden können, verbunden mit einer potenziellen Neubildung von Torf und damit einer zusätzlichen Senkenfunktion. Da keine Ertragsvorteile durch Düngung beobachtet wurden, ist eine Nährstoffrückführung und die damit potenziell verbundene Umweltrisiken in diesem Fall nicht erforderlich. Diese Erkenntnisse lassen sich gut in bestehende Ergebnisse von Bockermann und Eickenscheidt *et al.* (2025) einordnen, die neben einer *Phragmites australis* Paludikultur ebenfalls *Carex acutiformis* als besonders geeignete Option zur THG-Minderung identifizieren. Im Gegensatz dazu ist bei *Typha latifolia*, die für ausreichende Biomasseerträge eine hohe Nährstoffversorgung benötigt, eine Nährstoffrückführung vermutlich auf den meisten Standorten notwendig. Unter den aktuellen Vorgaben der Düngeverordnung muss hierfür der Wasserstand temporär abgesenkt werden, was wiederum zu höheren Emissionen führt und das Ertragsniveau auch nicht stabilisieren kann. Unter konstant hohen Wasserständen besteht hingegen das Risiko von Nährstoffverlusten durch Auswaschung, was in der vorliegenden Studie

nicht untersucht wurde. Da die Düngung das THG-Minderungspotenzial aufhebt, sollte der Anbau von *Typha latifolia* auf natürlich nährstoffreiche Standorte mit dauerhaft hohen Wasserständen beschränkt werden, um eine zusätzliche Düngung zu vermeiden. Ähnliche Zusammenhänge zeigten sich bei den *Phalaris arundinacea*-Beständen. Abhängig von der Nährstoffgrundausstattung eines Standorts erscheint eine Düngung von *Phalaris arundinacea* im Zwei-Schnitt-System zumindest auf mäßig bis schwach nährstoffversorgten Standorten notwendig, um Erträge zu stabilisieren. Unter konstant hohen Wasserständen erwiesen sich die *Phalaris*-Bestände im Zwei-Schnitt-System jedoch als starke THG-Quelle, sodass eine Absenkung des Wasserstands erforderlich ist, um die Gesamtemissionen zu reduzieren. Die in dieser Studie angewandte Nährstoffrückführung führte jedoch aufgrund des Ausbleibens von Stickstoffüberschüssen zu geringen Umweltfolgen (siehe AP3.2) und schließt eine Eutrophierung durch signifikante Nährstoffeinträge weitgehend aus. Dies ist auf eine an den Wasserstand angepasste und bedarfsgerechte Düngung zurückzuführen. Hinsichtlich der Klimaeffekte ist jedoch einer Ein-Schnitt-Nutzung von *Phalaris* der Vorrang zu geben, da diese keine Düngung erfordert und gleichzeitig die THG-Minderungspotenziale maximiert (vgl. Bockermann und Eickenscheidt *et al.* 2025). Insgesamt zeigt das Ausbleiben von Stickstoffüberschüssen in allen Versuchsvarianten die positiven Effekte der angepassten Düngestrategie (N-stabilisiert). In den vorliegenden Untersuchungen ist daher keine zusätzliche Belastung der Gewässer durch Nitrat zu erwarten, und eine Eutrophierung durch signifikante Nährstoffeinträge erscheint unwahrscheinlich. Artspezifische Unterschiede, etwa bei Methanemissionen von *Typha* und *Phalaris*, unterstreichen jedoch die hohe Bedeutung einer standortangepassten Pflanzenwahl. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist *Carex acutiformis* somit die zu bevorzugende Kultur für die Neuanlage von Paludikulturen, sowohl im Hinblick auf stabile Erträge als auch auf ein maximales THG-Minderungspotenzial.

Teilaufgaben AP3.2: Nährstoffdynamik im Torf und Wasserqualität

Grundlage und Methodik:

Am Intensivmessstandort im Freisinger Moos (Abbildung 20) wurden die Versuchsvarianten zur Düngung von *Phalaris arundinacea* bei konstantem und variiertem Grundwasserstand untersucht. Diese umfassen die zwei Düngevarianten 'Biogasgärrest flüssig' und 'Biogasgärrest separiert'. Dazu kam fünftens die ungedüngte Kontrolle, die in dem Versuchsdesign nur bei konstantem Grundwasserspiegel implementiert war. Jede Variante wurde in drei separaten Plots angelegt. Obwohl diese aus technischen Gründen nicht auf der Fläche randomisiert angeordnet werden konnten, sind sie dennoch als echte Wiederholungen zu betrachten.

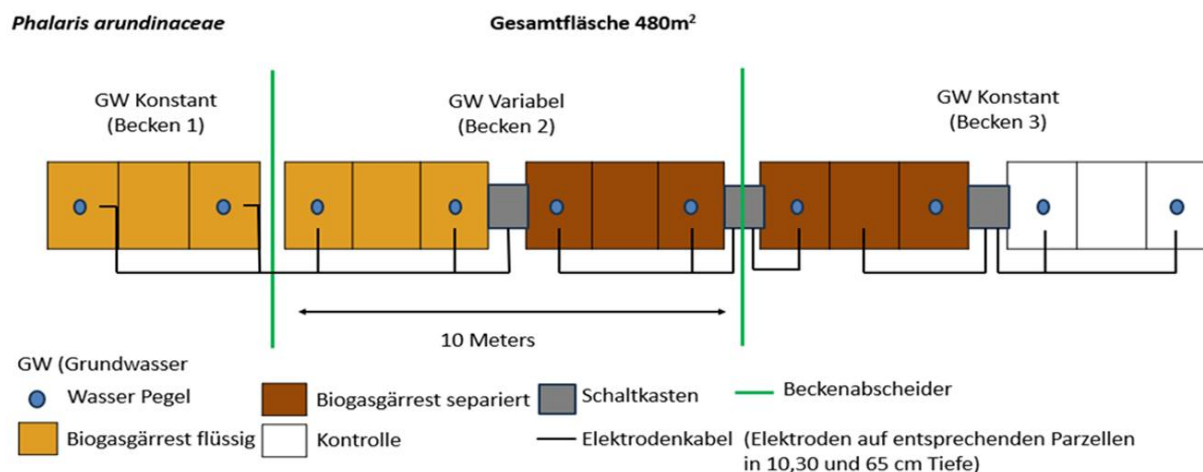


Abbildung 20: Allgemeiner Aufbau des Versuchsfeldes mit Parzellen für die Entnahme von Boden- und Wasserproben.

Den genannten zeitlich aufgelösten Probenahmen ging eine einmalige vollständige Beprobung des gesamten Torfkörpers (bis 300 cm) in allen Parzellen voraus (s. AP 4). Die Bodenproben wurden in ausgewählten Zeit- und Tiefenintervallen unmittelbar vor der Düngung (-1d) sowie 2d, 6d, 14d, 1 Monat und 1,5 Monate nach der Düngung sowie nach 3,5 Monaten im Sommer 2023 und 2024 genommen. Die Wasserproben wurden aus den Pegelrohren (Abbildung 62) und zu den gleichen Terminen wie die Bodenproben sowie nach 2 und 8 Stunden nach der Düngung entnommen.

- Winter 2023: Erste Tiefenbeprobung (Beprobungstiefe 0-300 cm in 20 cm Schichten) zur Grundcharakterisierung des Torfkörpers in allen Versuchspartzen
- Frühjahr und Sommer 2023 und 2024: Sechs Beprobungen zu den Düngungsmaßnahmen (Tiefe 0-60 cm, Teilung in 20 cm Schichten)
- Wasserprobenahme rund um die Düngung: vor (-1 d) und nach organischen Düngergaben

Ergebnisse und Diskussion:

Bodenchemische Analysen

Grundcharakterisierung der Torfprofile in den Versuchspartzen

Die bodenchemischen Eigenschaften der Torfe in den drei Becken stimmten gut überein. Einige Bodenparameter unterschieden sich jedoch signifikant zwischen den Becken (Tabelle 7). So wurden für Becken2 die höchsten Kationenaustauschkapazitäten bestimmt, Becken3 war durch signifikant erhöhte Kohlenstoff-, Stickstoff- und Eisengehalte sowie einen niedrigeren pH-Wert gekennzeichnet.

Tabelle 7: Deskriptive Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ausgewählter chemischer Eigenschaften am Versuchsstandort.

Parameter	Behandlung		
	Becken1	Becken2	Becken3
pH	7.33 $\pm$ 0.51	6.76 $\pm$ 0.45	6.75 $\pm$ 0.52
KAK (mmol/kg)	644.98 $\pm$ 240.91	758.05 $\pm$ 295.6	694.6 $\pm$ 233.56
Gesamt Stickstoff (N) (g/kg)	17.78 $\pm$ 7.55	21.33 $\pm$ 6.40	21.76 $\pm$ 7.53
Gesamt Kohlenstoff (C) (g/kg)	359.5 $\pm$ 103.79	403.61 $\pm$ 109.84	421.52 $\pm$ 137.58
Gesamt Phosphor (P) (g/kg)	0.4 $\pm$ 0.61	0.31 $\pm$ 0.38	0.25 $\pm$ 0.35
Gesamt organik Kohlenstoff (TOC) (mg/kg)	238.96 $\pm$ 67.60	243.09 $\pm$ 108.06	224.21 $\pm$ 272.19
C:N Verhältnis	22.97 $\pm$ 8.41	20.43 $\pm$ 6.82	22.67 $\pm$ 12.35
Ca (g/kg)	98.11 $\pm$ 55.04	50.98 $\pm$ 41.51	53.12 $\pm$ 70.61
Fe (g/kg)	5.62 $\pm$ 5.07	5.22 $\pm$ 4.68	6.73 $\pm$ 6.10

Über das gesamte Bodenprofil ergaben sich Tiefen aber auch Becken abhängig Unterschiede (

Abbildung 63). Die insgesamt schwach sauren bis schwach alkalischen pH-Werte nahmen mit der Tiefe zu, was vermutlich auf die höheren Calciumgehalte in den tieferen Bodenschichten zurückzuführen ist (McCauley *et al.*, 2009). Das C:N-Verhältnis der Torfe nahm in allen Becken mit zunehmender Tiefe zu, was auf unterschiedliche Zersetzungsbedingungen im Profil des Niedermoorbodens hinweist (Drollinger *et al.*, 2019). Im Durchschnitt betrug das C:N-Verhältnis ca. 12 im Oberboden (0–40 cm), 18 im Unterboden (40–100 cm) und 24 im Torfuntergrund (100–300 cm), was typisch für Niedermoore ist (Butlers *et al.*, 2025). Die Phosphorkonzentrationen nahmen in allen Becken generell mit zunehmender Tiefe ab. Höhere P-Gehalte traten überwiegend im Oberboden auf. Dies zeigt die starke Immobilisierung von Phosphor an der organischen Substanz und Bodenminerale wie Fe-Oxiden in den oberen Torfschichten an (Amenkhienan *et al.*, 2024).

Organische Düngung (Boden)

In Abhängigkeit von den Versuchsvarianten wurden Unterschiede in den untersuchten Parametern festgestellt, die jedoch vielfach nicht signifikant von den Werten der ungedüngten Kontrollplots abwichen (Abbildung 21). Der pH-Wert im Oberboden wurde durch die feste Fraktion der Biogasgärreste (Gärrest fest) eher erhöht, durch die flüssige Fraktion (Gärrest flüssig) verringert. Entgegen der Hypothese wurden für NH₄-N wurden keine bzw. nur minimale Unterschiede zwischen den Behandlungen festgestellt, unabhängig von Jahr oder Jahreszeit. Im Sommer wurden höhere NO₃-N-Werte unter variabler Grundwasserbehandlung beobachtet, was auf eine verstärkte Nitrifikation durch besseren Sauerstoffeintrag in den Boden zurückzuführen ist; in derselben Variante war CAL-P im Jahr 2024 leicht erhöht, da wechselnde feucht-trockene Bedingungen die Löslichkeit von Phosphat begünstigen. In beiden Jahren wies CAL-K in den gedüngten Behandlungen höhere Konzentrationen auf als in den ungedüngten Kontrollen, zeigte jedoch keinen eindeutigen Trend. Die festgestellten Konzentrationsveränderungen konnten nicht allein durch die Düngevarianten erklärt werden, sondern weisen darauf hin, dass es in Torfen eine starke natürliche Nährstoffdynamik durch mikrobielle Umsetzungsprozesse gibt (Song *et al.*, 2019; Saurich *et al.*, 2019).

Effekte der Varianten in den Versuchspartzen

C_Liq= Konstantes Grundwasser, Biogasgärreste Flüssig

V_Liq= Variables Grundwasser, Biogasgärreste Flüssig

V_Sld= Variables Grundwasser, Biogasgärreste abgetrennte Feststoffe

C_Sld= Konstantes Grundwasser, Biogasgärreste abgetrennte Feststoffe

Control= Konstantes Grundwasser, keine Düngung

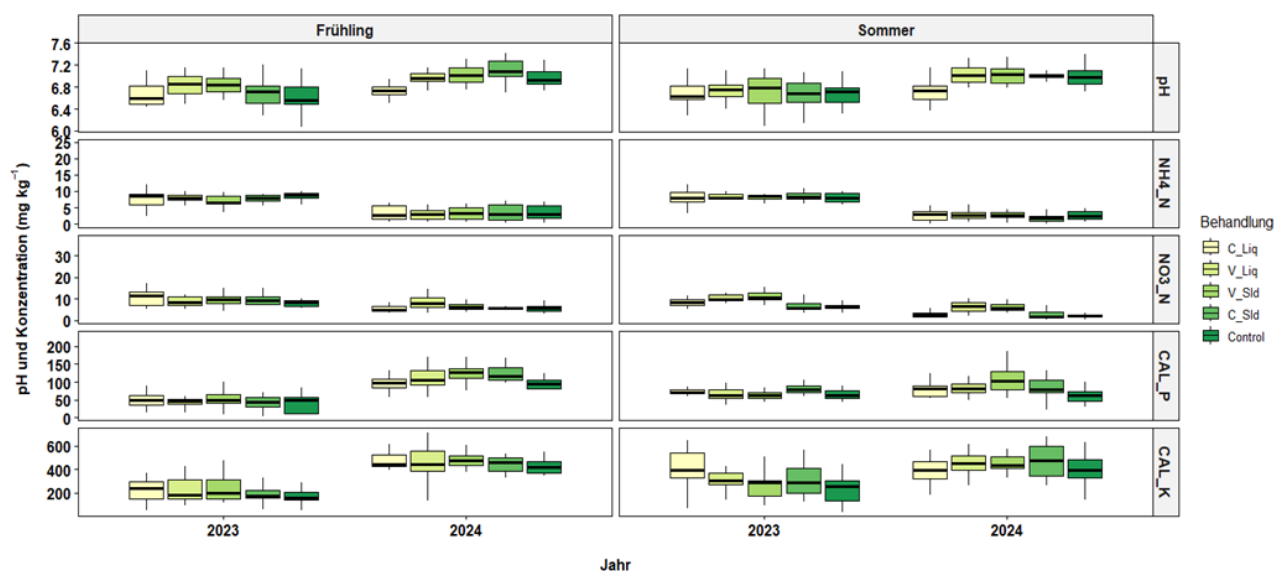


Abbildung 21: Veränderungen der Bodeneigenschaften unter verschiedenen Behandlungsbedingungen und zu verschiedenen Jahreszeiten in einer Tiefe von 0 bis 20 cm nach Düngung unter unterschiedlichen Grundwasserspiegeln. Frühjahr und Sommer 2023 und 2024. (Boxplots der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).

Die untersuchten bodenchemischen Parameter zeigten nach der Düngergabe unterschiedliche zeitliche Veränderungen (Abbildung 64). In vielen Fällen erreichten die Messwerte zwischenzeitliche Maxima oder Minima und näherten sich dann den Ausgangswerten wieder an. Der Verlauf und das Ausmaß der zeitlichen Dynamik variierte zwischen den Nährstoffen (Abbildung 64) und anderen gemessenen Parametern sowie Düngungskampagnen. $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ zeigten eher gegenläufige Veränderungen, wobei $\text{NO}_3\text{-N}$ oft keine konsistentes Muster erkennen ließ, sondern zwischen den Messzeitpunkten stark variierte, was auf die komplexen Prozesse der Nitrifikation, Auswaschung und Pflanzenaufnahme zurückzuführen ist. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Veränderungen der verfügbaren bzw. gelösten Nährstoffgehalte stark von saisonalen und standortspezifischen Bedingungen beeinflusst werden (Aponte *et al.*, 2020; Eickenscheidt *et al.*, 2015).

Ertrag von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*)

Ein 2-Schnittsystem, ein erster Schnitt in den Sommermonaten (Juli) und ein anschließender in den Wintermonaten (Dezember), wurde für das Management von Rohrglanzgras in den Jahren 2023 und 2024 angewendet. Der durchschnittliche jährliche Trockenmasseertrag zeigte dabei einen leichten Rückgang von 2023 ($9,23 \pm 6,53 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) auf 2024 ($7,42 \pm 4,40 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die 2-Schnittnutzung verdeutlichte, dass der Sommerschnitt im Jahr 2023 etwa 5,5-mal höhere Erträge erzielte als der Winterschnitt und im Jahr 2024 etwa 3,5-mal höhere Erträge (Abbildung 22, Tabelle 27).

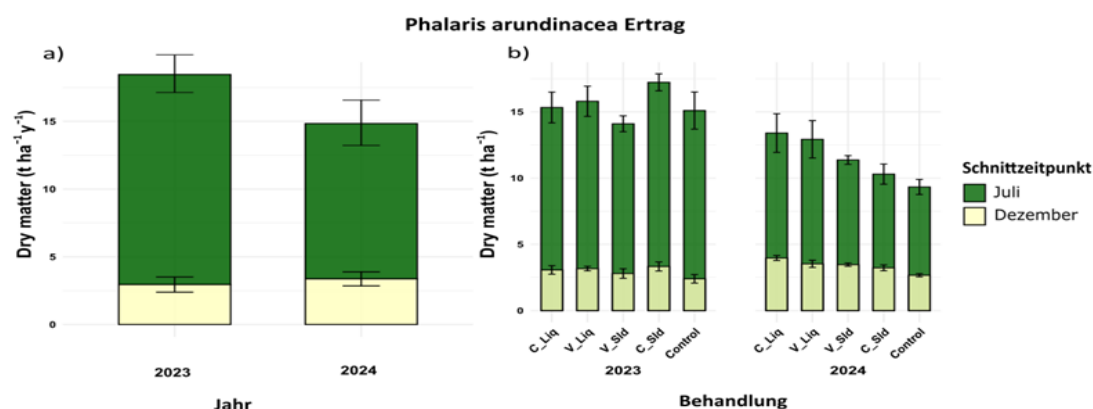


Abbildung 22: Ertrag von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) im Zweischnittsystem (Winter- und Sommerschnitt) in den Jahren 2023 und 2024 unter verschiedenen Düngungsregimen und Grundwasserspiegeln.

Bezüglich der Behandlungen wurden in den meisten Fällen und in beiden Jahren leicht niedrigere Erträge in den Kontrollparzellen im Vergleich zu den gedüngten Parzellen beobachtet, wobei sich im Sommerschnitt 2024 ein deutlicherer Trend zeigte, der auf einen positiven Düngungseffekt hinweist (Giannini *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021). Insgesamt sind diese Ertragsunterschiede auf Veränderungen der Nährstoffverfügbarkeit, jahreszeitliche Einflüsse sowie standortbezogene Bedingungen zurückzuführen.

Bodenbiologische Analysen, Freisinger Moos

Die Enzymaktivitäten der Bodenmikroorganismen zeigten zeitliche Zu- und Abnahmen, die sich zwischen den untersuchten Enzymen, weniger jedoch zwischen den untersuchten Varianten (Düngung, Grundwasserstand) unterschieden (Abbildung 65). Auch diese Ergebnisse belegen, dass den Düngungsvarianten gegenüber den unbehandelten Kontrollen keine signifikant veränderten Stoff- und Enzymdynamiken zugeordnet werden können. Vielmehr deutet sich an, dass Grundwasserschwankungen für diese Ergebnisse maßgeblich sind. Multivariate statistische Auswertungen zeigen die Signifikanz und Einflussstärke der einzelnen Faktoren und von Faktorkombinationen bzw. -interaktionen. Die Korrelationsanalyse (Abbildung 66) zeigt ein eng verknüpft biologisches Teilsystem im Boden, in dem die mikrobielle Biomasse (Cmik, Nmik), die oxidative Aktivität (DHA) sowie die Enzymaktivitäten (GS, LAP, PHO) ein kohärentes Cluster bilden ($r = 0.30\text{--}0.90$). Diese biologischen Indikatoren korrelieren zudem deutlich positiv mit pflanzenverfügbaren Nährstoffpools, insbesondere mit CAL-P ($r = 0.63\text{--}0.79$) und CAL-K ($r = 0.44\text{--}0.57$), was auf eine enge Kopplung zwischen mikrobieller Aktivität und Nährstoffverfügbarkeit hinweist (Song *et al.*, 2019).

Wasseranalysen, Freisinger Moos

Bodenwasser 2024

Oberflächennahes Grundwasser bzw. Bodenwasser wurde je nach Behandlung aus Pegelrohren in den jeweiligen Torfgrundwassertiefen entnommen. In den Wasserproben wurden nach der Düngung im Frühjahr und Sommer 2024 sowohl Zu- als auch Abnahmen der Nährstoffgehalte innerhalb der Behandlungspartellen festgestellt, wobei ein stärkerer Anstieg zwischen 2 und 8 Stunden nach der Düngung auftrat (Abbildung 23: Konzentration ausgewählter Nährstoffe im oberflächennahen Grundwasser vor und nach einer Düngung mit konstantem oder variablem Grundwasserstand und flüssigem oder festem Dünger 2024).

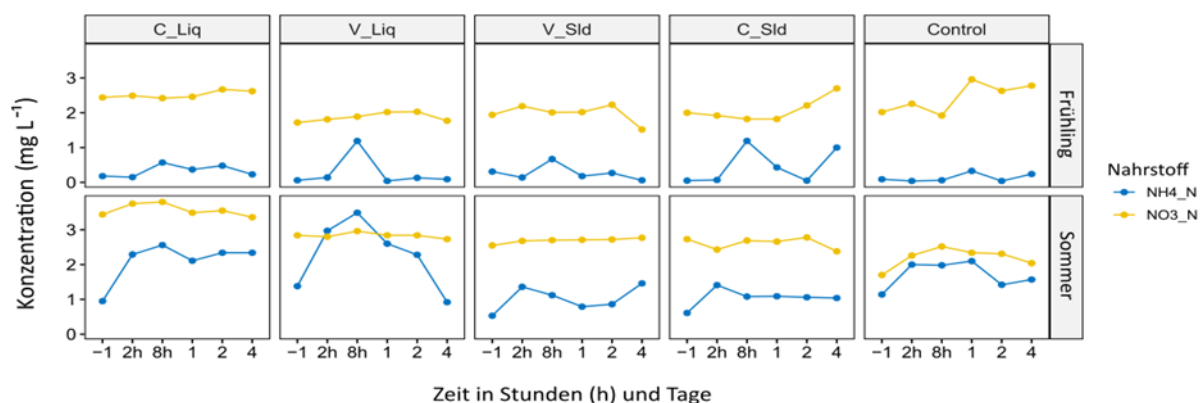


Abbildung 23: Konzentration ausgewählter Nährstoffe im oberflächennahen Grundwasser vor und nach einer Düngung mit konstantem oder variablem Grundwasserstand und flüssigem oder festem Dünger 2024.

Im Allgemeinen waren die $\text{NH}_4\text{-N}$ Konzentrationen im Bodenwasser sowohl im Frühjahr als auch im Sommer niedriger als die $\text{NO}_3\text{-N}$ Konzentrationen (Abbildung 23: Konzentration ausgewählter Nährstoffe im oberflächennahen Grundwasser vor und nach einer Düngung mit konstantem oder variablem Grundwasserstand und flüssigem oder festem Dünger 2024.). Dies ist plausibel, da $\text{NH}_4\text{-N}$ im Boden stärker gebunden wird, während $\text{NO}_3\text{-N}$ mobiler ist (Currey *et al.*, 2010). Betrachtet man die Gesamtveränderungen der Nährstoffe in allen Parzellen, so wurden vor allem im Sommer signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen sowohl für $\text{NH}_4\text{-N}$ als auch für $\text{NO}_3\text{-N}$ festgestellt, (Abbildung 23). Für $\text{NH}_4\text{-N}$ ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen den Düngervarianten (fest vs. flüssig), für $\text{NO}_3\text{-N}$ zwischen allen Varianten, mit den niedrigsten Gehalten in den ungedüngten Kontrollplots. Die beobachteten Veränderungen könnten mit Unterschieden in der Mobilität von $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$, mikrobiellen Nitrifikationsprozessen sowie

unterschiedlichen Freisetzungsraten von Fest- und Flüssigdüngern assoziiert sein (Currey *et al.*, 2010; Norton, J *et al.*, 2019).

Fazit:

Eine entzugsabhängige Düngung mit Biogas-Gärresten beeinflusst die Nährstoffverfügbarkeit im Boden deutlich. Dabei zeigt sich, dass die Flüssigphase der Biogas-Gärreste als Düngemittel im Vergleich zur separierten Festphase die deutlichste Wirkung entfaltet. Insgesamt führen gedüngte Parzellen zu höheren Erträgen als ungedüngte Flächen, was den positiven Einfluss der Düngung auf den Ertrag bestätigt. Die Verfügbarkeit der Nährstoffe wird jedoch in hohem Maße durch bodenmikrobielle Prozesse gesteuert. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass **die getesteten Düngemittel nur geringe bis keine erkennbaren Auswirkungen auf die Boden- und Grundwasserqualität haben**. Es wurden insbesondere im Vergleich zu den ungedüngten Kontrollen keine eindeutig anderen Trends oder Muster bei den Gehalten der analysierten Nährstoffe und deren Tiefenverteilung und zeitlicher Dynamik beobachtet. Darüber hinaus hängen die Unterschiede in der Wirksamkeit der Düngemittel und der daran gekoppelten Nährstoffdynamik je nach Nährstoff unterschiedlich stark vom Grundwasserspiegel und der Jahreszeit bzw. Vegetationssaison ab; sie werden jahresweise und damit witterungsbedingt moduliert. Den vorliegenden Ergebnissen zufolge ist der Ertrag im Sommer in einem 2-Schnittsystem mehr als 3,5-mal höher als im Winter. Für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit dieses Systems ist es jedoch wichtig, auch ökonomische Aspekte zu berücksichtigen, insbesondere die anfallenden Erntekosten (siehe Teilbericht der Universität Kiel). Darüber hinaus sollte auch die Rolle einer möglichen Intensivierung der Bewirtschaftung im Hinblick auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen berücksichtigt werden (siehe AP03 Stoffhaushalt).

Zusammenfassung und Empfehlungen zum Stoffhaushalt von Paludikulturen

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die untersuchten Paludikulturarten sehr unterschiedliche Standort- und Nährstoffansprüche aufweisen. Während *Carex*, ähnlich wie Binsen, auch unter nährstoffarmen und teilweise suboptimalen Wiedervernässungsbedingungen stabile Erträge ohne Nährstoffrückführung erzielen kann, benötigen *Typha*, *Phragmites* und *Phalaris* für eine langfristige Ertragsstabilität höhere Nährstoffverfügbarkeiten (bei *Phragmites* zumindest während der initialen Etablierungsphase) sowie dauerhaft hohe Wasserstände. Ein unzureichendes Wassermanagement, starke Konkurrenz durch Begleitvegetation aus vorhandenen Samenbanken sowie eine insgesamt geringe Nährstoffverfügbarkeit können den Etablierungserfolg der Zielarten erheblich beeinträchtigen.

Obwohl die Versuche zur organischen Nährstoffrückführung, unabhängig vom Wassermanagement, kein nachweisbares Risiko für eine Kontamination des Oberflächenwassers mit Nitrat oder Phosphor zeigten, ergibt sich in der Gesamtbewertung der Umwelteffekte ein deutlich reduziertes THG-Minderungspotenzial mit zunehmender Nutzungsintensität, etwa durch Düngung oder eine höhere Schnittfrequenz. Vor diesem Hintergrund sollte auf eine gezielte Nährstoffrückführung durch Düngung möglichst verzichtet werden. Stattdessen sollte der Nährstoffbedarf der Bestände vorzugsweise über das zur Wiedervernässung eingesetzte Oberflächenwasser gedeckt werden. Für langfristig stabile Erträge sind daher eine standortangepasste Auswahl geeigneter Kulturen sowie ein frühzeitig etabliertes und angepasstes Wassermanagement von zentraler Bedeutung.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse, dass eine landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden in Form der Paludikultur dauerhaft und nachhaltig möglich ist. Bei standortangepasster Bewirtschaftung und gezielter Artenwahl kann sie signifikant zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aus organischen Böden beitragen und damit einen wichtigen Beitrag zur Erreichung nationaler Klimaschutzziele leisten. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass eine Intensivierung der Nutzung das Treibhausgasminderungspotenzial deutlich reduziert und die Klimavorteile der Paludikultur gegenüber einer konventionellen, entwässerungsbasierten Grünlandnutzung weitgehend aufheben kann.

Auf Basis des bestehenden Datensatzes lassen sich folgende Empfehlungen für eine langfristige und nachhaltige Nutzung von Paludikulturen ableiten:

1. Standortangepasste Artenwahl: Auf nährstoffarmen Moorstandorten sollten Arten mit geringem Nährstoffbedarf (z. B. *Carex* oder ggf. Binsen) bevorzugt werden. Der Anbau von *Typha* sollte auf Standorte mit hoher natürlicher Nährstoffverfügbarkeit beschränkt und möglichst mit einer Wiedervernässung unter Nutzung nährstoffreichen Oberflächenwassers kombiniert werden. Aufgrund der ausgeprägten Filter- und Retentionsleistung von *Typha*-Beständen können überschüssige Nährstoffe aus dem Bewässerungswasser aufgenommen werden, wodurch gleichzeitig potenzielle Umweltrisiken reduziert werden.

2. Frühes Wassermanagement: Bereits während der Etablierungsphase ist ein angepasstes Wasserstandsmanagement entscheidend, um Konkurrenz durch Beikräuter zu begrenzen und eine erfolgreiche Etablierung der Zielarten zu fördern.

3. Oberbodenabtrag nur reduziert einsetzen: Ein Oberbodenabtrag sollte nur sehr zurückhaltend angewendet werden, da er mit erheblichen Nährstoffverlusten verbunden ist, die insbesondere während der Etablierungsphase für das Wachstum der Zielpflanzen benötigt werden. Falls ein Oberbodenabtrag durchgeführt wird, sollte das Material auf der Fläche verbleiben und beispielsweise für wasserbauliche Maßnahmen wie Grabenverfüllungen oder Polderverwallungen genutzt werden.

4. Nutzung nicht übermäßig intensivieren: Die Nutzung von z.B. *Phalaris* sollte auf eine einmalige Wintermahd ohne Nährstoffrückführung beschränkt werden, da eine Intensivierung das Treibhausgasminderungspotenzial deutlich reduziert und damit die Klimavorteile gegenüber einer konventionellen, entwässerungsbasierten Grünlandbewirtschaftung verringert werden. Dies gilt im gleichen Maße für alle anderen Paludikulturarten.

5. Carex als robuste Paludikulturart: *Carex* erweist sich insgesamt als besonders geeignete Art für die Etablierung neuer Paludikulturstandorte, da sie auch ohne Düngung stabile Erträge ermöglicht und zugleich ein hohes Treibhausgasminderungspotenzial aufweist. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass ähnliche Effekte möglicherweise auch durch die Etablierung von Binsenbeständen erreicht werden können. Inwieweit dies auch für *Phragmites australis* gilt, wird derzeit noch untersucht.

Arbeitspaket 4: Biodiversität

Im Rahmen Arbeitspakets wurden in den Jahren 2023 und 2024 floristische und faunistische Kartierungen in Niedermoor-Paludikulturen und Referenzflächen in Niedersachsen und Bayern durchgeführt. Die daraus gewonnenen Daten bilden die Grundlage für die nachfolgende Auswertung. Diese beinhaltet die grafische Darstellung und statistische Analyse der Kartierungsergebnisse für die erfassten Artengruppen (Vegetation, Heuschrecken, Libellen und Vögel) sowie eine naturschutzfachliche Bewertung der Ergebnisse.

Die Kartierungen wurden in drei Paludikulturen in Niedersachsen (Bad Bederkesa, Dümmer und Hohenböckener Moor) und einer Paludikultur in Bayern (Langenmosen), sowie in jeweils zugehörigen Referenzflächen mit herkömmlicher landwirtschaftlicher Nutzung durchgeführt. Der Untersuchungszeitraum mit mehreren Begängen deckte zwei Vegetationsperioden (2023 und 2024) ab. An den drei Standorten in Niedersachsen wurden folgende Paludikultur-Varianten untersucht:

- *Typha* (*T. latifolia* und *T. angustifolia*) im Hohenböckener Moor (ca. 0,15 ha)
- *Phragmites australis* im Hohenböckener Moor (ca. 0,11 ha)
- *Phalaris arundinacea* am Dümmer (ca. 15 ha)
- *Typha* (*T. latifolia* und *T. angustifolia*) bei Bad Bederkesa (ca. 0,34 ha)
- *Phragmites australis* bei Bad Bederkesa (ca. 0,16 ha)
- Referenzflächen bei Bad Bederkesa (ca. 2,5 ha), im Hohenböckener Moor (ca. 2 ha) sowie am Dümmer (ca. 22 ha)

Auf der Fläche in Langenmosen, Bayern (ca. 5 ha) wurden folgende Varianten untersucht:

- *Carex acutiformis*, 1-Schnitt-Variante und 2-Schnitt-Variante
- *Phalaris arundinacea*, 1-Schnitt-Variante und 2-Schnitt-Variante
- *Typha*, 1-Schnitt-Variante

Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Vorangegangene Studien, die die Biodiversität in Paludikulturen mit umliegenden agrarisch genutzten Acker- und Grünlandflächen verglichen (Gaudig *et al.* 2014; Wichmann & Wichmann 2011), zeigten, dass diese Bewirtschaftungsform wiedervernässter landwirtschaftlicher Flächen durchaus Potenziale für die biologische Vielfalt bietet. Zusammengenommen konnten in allen Paludikulturen insgesamt 201 Arten der vier untersuchten Artengruppen nachgewiesen werden (Tabelle 7). Verglichen mit dem Gesamtartenspektrum (inklusive der Referenzflächen) kommen etwa dreiviertel aller Pflanzen- und Vogelarten, 85% der erfassten Heuschreckenarten und 97% der Libellenarten auch in Paludikulturen vor.

Tabelle 8: Übersicht über die Gesamtartenzahlen sowie die Anzahl der Rote-Liste-Arten in Paludikultur- und Referenzflächen in den verschiedenen Gruppen.

Artenzahl	Pflanzen	Heuschrecken	Libellen	Vögel gesamt	Vögel mit Brutnachweis
Gesamt	106	20	34	95	30
Paludikulturen	78	17	33	72	29
Carex	13	5	12	7	7
Phalaris	33	14	16	48	25
Phragmites	38	11	19	-	-
Typha	49	13	33	8	8
Referenz	50	19	22	56	9
RL-Arten gesamt	7	2	8	46	17
RL-Arten Paludikulturen	6	2	8	43	17
RL-Arten Referenz	1	2	4	26	5

Die Flächen in Langenmosen waren über die meisten Artengruppen hinweg artenärmer als die Untersuchungsflächen in Bederkesa, Dümmer und Hohenböken. Lediglich bei den Heuschrecken gab es kaum Unterschiede, diese Artengruppe wies jedoch insgesamt nur eine geringe Artenvielfalt auf. Dies mag unter anderem an der geringeren Gesamtdeckung und damit lichterem Paludikulturbeständen insbesondere in Bad Bederkesa und Dümmer liegen, wo die Artenvielfalt vermutlich von mehr Fehlstellen und offenen Flachwasserbereichen profitierte. Dies wurde unter anderem beim Vergleich der Vogelvielfalt besonders deutlich, die am Standort Dümmer signifikant höher ausfiel als in Langenmosen. Zusätzlich zur Bestandsdichte spielte vermutlich auch die größere Flächenausdehnung der Paludikultur am Standort Dümmer eine Rolle, die neben der höheren Habitatverfügbarkeit auch und ein höheres Maß an Ungestörtheit mit sich bringt.

Als Rückzugsort für seltene und gefährdete Arten waren die bewirtschafteten Paludikulturen nicht für alle Artengruppen gleichermaßen geeignet. Hoch viel der Anteil der Rote-Liste-Arten bei den Vögeln aus. Sowohl vom Gesamtartenspektrum als auch von der Anzahl der Brutvögel hatte etwa die Hälfte der Arten

einen Rote-Liste-Status. Bei den Libellen lag dieser Anteil bei etwa einem Viertel. Rote Liste Arten der Pflanzen und Heuschrecken waren insgesamt unterrepräsentiert. Alle in den Paludikulturen nachgewiesenen Rote-Liste-Arten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Vor allem in den *Phalaris*- und *Typha*-Beständen wurden viele Rote-Liste-Arten nachgewiesen, wobei sämtliche Libellenarten mit Rote-Liste-Status in *Typha*-Kulturen und gefährdete Brutvögel vor allem in *Phragmites*-Beständen vorkamen.



Abbildung 24: Die vom Aussterben bedrohte Vogel-Azurjungfer (*Coenagrion ornatum*) konnte in den Paludikulturen in Langenmosen nachgewiesen werden. Foto: Christoph Moning.

Vegetation

Obwohl die mittlere Artenzahl der Pflanzen in den Referenzflächen am höchsten war, war das in den *Typha*-Beständen erfasste Gesamtartenspektrum ähnlich groß wie in den Referenzflächen. Dies ist vermutlich auf die hohe Heterogenität im Deckungsgrad und teilweise lückigere Bestände in diesen Kulturen zurückzuführen, die auch lichtbedürftigen, konkurrenzschwächeren Arten Lebensraum bieten.

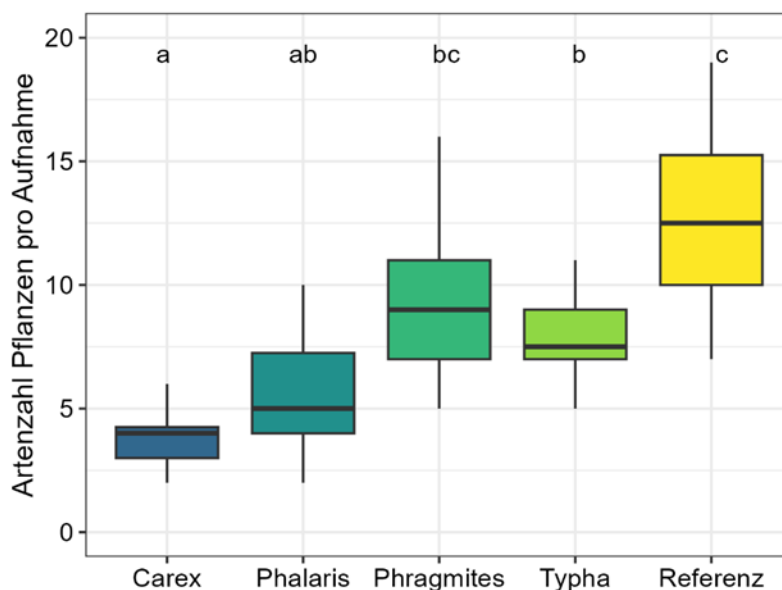


Abbildung 25: Verteilung der Artenzahl pro Vegetationsaufnahme in Paludikulturen und Referenzflächen. Unterschiedliche Buchstaben stehen für statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.

Die *Phalaris*- und *Carex*- Bestände waren hingegen artenärmer. Diese beiden Arten bilden dichte Bestände aus und sind relativ konkurrenzstark gegenüber Beikräutern. Die Anzahl der Rote-Liste-Arten fiel allgemein gering aus, wobei hauptsächlich in den Paludikulturen gefährdete Arten erfasst wurden und nur eine Rote-Liste-Art in den Referenzflächen. Insgesamt waren die Pflanzengemeinschaften in den Paludikulturen deutlich abgegrenzt zur Vegetation in typischem Wirtschaftsgrünland. In den Paludikulturen fanden sich vor allem Zeigerarten für feuchtigkeitsgeprägte Lebensräume (Ellenberg *et al.* 1991).

Ob das Artenspektrum Ähnlichkeiten zu vergleichbaren naturnahen Biotopen aufweist und Paludikulturen somit als Ersatzlebensräume für niedermoortypische Arten dienen können, wurde anhand von Zeigerarten für gesetzlich geschützte Biotope bewertet. Die Anzahl an Biotopzeigerpflanzen korreliert mit der Insektenvielfalt in Ökosystemen und dient daher auch als Biodiversitätsindikator, insbesondere für Insektenvielfalt (Tobisch *et al.* 2023). Anhand des Bayerischen Bestimmungsschlüssels für §30 Biotope (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022) wurde abgeglichen, welche der erfassten Pflanzenarten als Zeigerarten für geschützte Feuchtbiotope gelistet sind.

Tabelle 9: In den Paludikulturen nachgewiesene Zeigerpflanzen für §30-Biotope.

Pflanzenart	Quellbereiche, Röhrichte	Moore, Sümpfe	Unterwasser- und Schwimmblattveg.	Großröhrichte über 70cm Wuchshöhe	Kleintröhrichte, Stauden <70cm	Groß- und Kleinseggenriede	Feuchte und nasse Hochstaudenfluren	Grünland frischer bis nasser Standorte	Sümpfe, seggen- und binsenreich Nasswiese
<i>Alisma plantago-aquatica</i>					X				
<i>Calamagrostis canescens</i>								X	
<i>Callitriche palustris</i> agg.	X		X						
<i>Carex acuta</i>		X				X		X	X
<i>Carex acutiformis</i>		X				X		X	X
<i>Eleocharis palustris</i>					X			X	X
<i>Epilobium hirsutum</i>							X	X	
<i>Epilobium parviflorum</i>							X	X	
<i>Equisetum palustre</i>								X	X
<i>Galium palustre</i> ssp.								X	X
<i>Glyceria fluitans</i>	X				X			X	
<i>Glyceria maxima</i>				X					
<i>Holcus lanatus</i>								X	
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>			X						
<i>Hypericum tetrapterum</i>							X	X	X
<i>Juncus articulatus</i>						X		X	X
<i>Juncus effusus</i>		X				X		X	X
<i>Lysimachia vulgaris</i>							X	X	
<i>Lythrum salicaria</i>							X	X	X
<i>Mentha aquatica</i>					X				X
<i>Myosotis scorpioides</i>					X			X	X
<i>Persicaria amphibia</i> var. <i>aquatica</i>			X						
<i>Peucedanum palustre</i>						X			
<i>Phalaris arundinacea</i>				X				X	
<i>Phragmites australis</i>				X				X	
<i>Ranunculus flammula</i>								X	X
<i>Ranunculus lingua</i>				X					
<i>Rorippa amphibia</i>					X				
<i>Rumex hydrolapathum</i>				X					
<i>Scutellaria galericulata</i>						X	X		X
<i>Sparganium erectum</i>				X					
<i>Typha angustifolia</i>				X					
<i>Typha latifolia</i>				X					
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>					X				
<i>Veronica catenata</i>					X				

Es zeigt sich, dass die Vegetation der Paludikulturen besonders viele Zeigerarten für Grünland frischer bis nasser Standorte sowie Sümpfe und seggen- und binsenreichen Nasswiesen aufweist. Daneben sind einige Pflanzenarten typisch für Groß- und Kleinröhrichte und für Hochstaudenfluren (Tabelle 9). Allerdings befand sich unter dem Artenspektrum keine Zeigerart, die charakteristisch für Niedermoore oder Pfeifengraswiesen wäre (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2022). Dies deutet darauf hin, dass bewirtschaftete Paludikulturen keine geeigneten Ersatzhabitate für niedermoortypische Pflanzenarten darstellen, jedoch Potenziale als Lebensräume für typische Arten der Nasswiesen, Röhrichte und anderer hochwertiger Feuchtlebensräume bieten können.

Heuschrecken

Das Artenspektrum der Heuschrecken setzte sich größtenteils aus Generalisten zusammen, mit lediglich zwei Rote-Liste-Arten nach der jeweiligen Landesliste. Insgesamt wurden in den Paludikulturen weniger Arten nachgewiesen als in den Referenzflächen. Die Anzahl erfasster Arten pro Begang war im Mittel jedoch sehr ähnlich und unterschied sich nicht signifikant zwischen Paludikultur- und Referenzflächen. Insbesondere in den Phalaris-Beständen war die mittlere Artenvielfalt relativ hoch. Die Artengemeinschaft in den Paludikulturen bestand vor allem aus Arten der Feuchtlebensräume und grenzte sich zu den heterogeneren Gemeinschaften in den Referenzflächen mit überwiegend mesophilen Arten deutlich ab. Höhere Individuenzahlen von über 20 Individuen pro Begang konnten nur von den drei Arten *Chorthippus parallelus*, *Chrysochraon dispar* und *Conocephalus fuscus* in den Referenzflächen erfasst werden. Dies könnte allerdings auch methodisch begründet sein, da die höheren Vegetationsbestände und feuchten Bodenverhältnisse in den Paludikulturen das Auffinden der Heuschrecken erschwert haben könnten.

Libellen

Libellen sind durch ihren Lebenszyklus in besonderem Maße an Feuchtstandorte gebunden. Dadurch ist auch begründet, weshalb 97% des festgestellten Artvorkommens auch auf den Untersuchungsflächen vorgefunden wurde. So fiel das Gesamtartenspektrum in den Paludikulturen – insbesondere in den Typha-Beständen – mit 33 Arten deutlich größer aus als in den Referenzflächen, während auch die mittleren Artenzahlen in den Typha-, Phalaris- und Phragmites-Beständen signifikant höher waren. Die wenigsten Arten wurden auch in dieser Gruppe in den Carex-Kulturen erfasst. In den Typha-Kulturen fand sich mit der Vogel-Azurjungfer (*Coenagrion ornatum*) auch eine stark gefährdete Libellenart (Abbildung 24). Insgesamt waren 22% der nachgewiesenen Libellenarten in Paludikulturen nach der jeweiligen Landesliste gefährdet (Baumann *et al.* 2020; Winterholler *et al.* 2017). Das Artenspektrum umfasste mehrheitlich Libellenarten, die typischerweise auch im adulten Stadium Feuchtbiootope, Gewässer und Gräben als Habitat nutzen (Klaiber *et al.* 2017), jedoch durch ihre Mobilität auch immer wieder in Acker- und Grünflächen gefunden werden können, was die Ähnlichkeit der Artenzusammensetzung zwischen den Untersuchungsstandorten und Referenzflächen erklärt.

Vögel

Von den insgesamt 95 nachgewiesenen Vogelarten wurden 72 Arten auch in den Paludikulturen erfasst. Der Anteil gefährdeter Vogelarten war mit 48% deutlich höher als bei den anderen drei Artengruppen. Fast alle Rote-Liste-Arten wurden auch in den Paludikulturflächen erfasst (Tabelle 10). Dabei gab es große Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten. Während in den Carex-, und Typha-Beständen weniger als zehn Vogelarten nachgewiesen wurden, war die Artenvielfalt der Phalaris-Kulturen mit 48 Arten ähnlich hoch wie in den Referenzflächen. So nutzten viele schilfbewohnende Arten wie z.B. Blaukehlchen, Rohrammern und Sumpfrohrsänger die Phalaris-Bestände als Bruthabitat. Auch für Wiesenbrüter können die im Frühjahr noch niedrigen Paludikulturbestände teilweise geeignete Bruthabitate bieten, jedoch konnte insbesondere bei Kiebitzen häufig kein Bruterfolg festgestellt werden. Während der Zugzeit zeigte sich, dass die abgeernteten und somit niedrige Paludikulturbestände geeignete Rasthabitate für seltene Arten wie Bekassinen und Zwergschnepfen darstellen können.

Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität

Aus den Ergebnissen lassen sich einige Maßnahmen ableiten, die sich bei der Bewirtschaftung von Moorstandorten durch Paludikulturen positiv auf die biologische Vielfalt auswirken können. Die Ergebnisse der Ellenberg Zeigerwerte zeigten für die Begleitvegetation etwas niedrigere Temperaturzahlen in den hohen und dichten Phalaris- und Phragmites-Beständen. Mitunter kann durch die Wahl der Paludikultur auch ein Kühleffekt erzielt werden und das Mikroklima über die Vegetationsstruktur so gesteuert werden, dass Rückzugshabitate für klimasensible Arten entstehen können. Paludikulturen unterliegen jedoch andererseits einem gewissen Nutzungsdruck durch die Bewirtschaftung, unter anderem durch die Förderung dichter Bestände für mehr Biomasse und die ggf. erhöhte Schnitthäufigkeit. Für die Etablierung einer artenreicheren Begleitvegetation, die auch konkurrenzschwache, lichtbedürftige Pflanzenarten einschließt, müssten extensiver genutzte Kulturformen gewählt werden und z.B. wiedervernässte Parzellen in unterschiedlich intensiv bewirtschaftete Paludikulturen mit stellenweise lichtereren Beständen unterteilt werden. Für die betrachteten faunistischen Artengruppen sollten strukturanreichernde Maßnahmen in den Paludikulturen durchgeführt werden, die zum Ziel haben, neben den bewirtschafteten Kulturen auch nicht oder nur extensiv

genutzte Habitate bereitzustellen, die als Rückzugsräume dienen und in denen besonders die Fortpflanzung der einzelnen Arten ungestört ablaufen kann. Zu diesen zählen:

- Etablierung von Hochstaudenfluren zur Förderung von Biotopverbundstrukturen entlang von Gräben
- Grabenaufweitungen
- Etablierung von Brachen, Fehlstellen, flachen Senken und Flachwasserzonen
- Anlegen von Pufferstreifen zu angrenzenden intensiv bewirtschafteten Flächen

Von Hochstaudenfluren könnten besonders Heuschrecken profitieren, für die bislang kein hochwertiges naturschutzfachliches Potenzial durch die Paludikulturen festgestellt werden konnte. Werden diese entlang von Gräben in den Flächen integriert, könnten durch solche Ausbreitungskorridore noch weitere (gefährdete) Heuschreckenarten angesiedelt werden. Von Grabenaufweitungen, flachen Senken, Fehlstellen und freien Flachwasserzonen würden besonders auch die Libellenarten profitieren. Können diese Strukturen mit besonnten Flachwasserbereichen ohne fließendes Wasser und reicher Unterwasservegetation und -struktur in die Bewirtschaftungsweise der Paludikulturen integriert werden, stehen dadurch Ersatzhabitate für die Fortpflanzung der Libellen zur Verfügung. Für die Vogelvielfalt – insbesondere Brutvögel – spielt besonders die Flächengröße der Paludikulturen als mögliche Fortpflanzungshabitate sowie die Ungestörtheit zur Brutzeit eine Rolle. Gerade für viele gefährdete Vogelarten wie insbesondere für Kiebitze ist ein hoher Wasserstand im Frühjahr Voraussetzung dafür, dass sich diese Art als Brutvogel ansiedelt. Im Herbst beeinflusst der Erntezeitpunkt und die Höhe der verbleibenden Streuauflage, wie attraktiv Paludikulturen als Rasthabitat für Zugvögel sein können. In Kombination mit stehendem Wasser (bspw. in flachen Senken oder Flachwasserzonen) sind Stoppeln von 15 cm Höhe geeignet für rastende Limikolen wie Bekassinen und Zwergschnepfen, sowie Pieper und Stelzen. Kiebitze und Wasserläufer präferieren hingegen tiefer abgeerntete Bodenstellen. Verbleibt höhere Vegetation (bspw. Hochstaudenfluren) kann diese im folgenden Jahr als Revier für Blaukehlchen und Rohrammern dienen (vgl. Eickenscheidt *et al.* 2023).

Arbeitspaket 5: Pflanzenwachstumsmodellierung

Das Ziel von Arbeitspaket 5 bestand darin, ein prozess-basiertes Pflanzenwachstumsmodell für Niedermoor-Paludikulturen an unterschiedliche Wasser- und Nährstoffbedingungen anzupassen, zu kalibrieren und zu validieren. Am Ende des Projekts steht ein Modell, das Blattfläche und Ertrag von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) für die drei definierten Wasserstandsklassen (flach entwässert, teilwiedervernässt, wiedervernässt) unter konstanter Nährstoffversorgung mit hoher Genauigkeit reproduziert.

Eine zentrale Herausforderung war die Abbildung hoher Grundwasserstände. In konventionellen Modellen führen zu hohe Grundwasserstände häufig zu einem Wachstums- und Ertragsrückgang – für Paludikulturen hingegen sind sie essentiell. Deshalb fiel die Wahl auf SWAP-WOFOST (Kroes et al. 2017). Das Modell verwendet Feddes-Schwellwerte (Feddes *et al.* 1978), die über bzw. unter bestimmten Druckhöhen die Wasser- bzw. Sauerstoffaufnahme reduzieren. Diese Schwellen können vom Nutzer sowohl für hohe als auch für niedrige Transpirationsraten eingestellt werden, sodass Wachstumseinschränkungen durch hohe Wasserstände ohne Änderungen an der Modellstruktur oder am Quellcode gesteuert werden können. Diese Flexibilität war der ausschlaggebende Grund für die Modellwahl. Die Kalibrierung wurde erfolgreich mit dem Shuffled-Complex-Evolution-University-of-Arizona-Algorithmus (SCE-UA) (Duan et al. 1993, 1994) in zwei Schritten:

(1) Wasserstand-unabhängige Parameter. Optimiert wurden u. a. die van Genuchten-Mualem-Parameter (α , n), der Residualwassergehalt des Torfes (θ_{res}), die maximale CO_2 -Assimilation samt temperaturabhängiger Reduktionsfaktoren, der Umwandlungsfaktor von Assimilat zu Blatt- und Stängelbiomasse sowie die Feddes-Parameter. Die Zielfunktion wurde als Summe der Normalized Root Mean Squared Errors (NRMSE) gleichzeitig für alle drei Wasserstandsklassen minimiert:

$$f(\theta) = \min_{\theta} \sum_{WSK=1}^3 \frac{RMSE(\theta | LAI)_{WSK}}{\overline{LAI}_{WSK}} + \frac{RMSE(\theta | Ertrag)_{WSK}}{\overline{Ertrag}_{WSK}} \quad (5.1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (5.2)$$

θ beschreibt einen Parametersatz, WSK einen Index für die drei Wasserstandsklassen, y_i einen Messwert und $\hat{y}_i$ einen modellierten Wert.

(2) Wasserstand-abhängige Parameter. Nach Fixierung der in Schritt (1) ermittelten Parameter wurden der Anteil der Trockenmasse, der in Wurzeln bzw. oberirdischer Biomasse investiert wird, sowie die spezifische Blattfläche für jedes Wasserstands-Treatment separat optimiert. Für jede Wasserstandsklasse wurde ein eigener Parametersatz ermittelt.

Die Hydrologie von SWAP-WOFOST wurde erfolgreich anhand der drei Wasserstandsklassen im Freisinger Moos kalibriert (vgl. Abbildung 26). Die Kalibrierung basierte auf Messungen des Leaf-Area-Index (LAI) und des Trockenbiomasse-Ertrags. Die Grundwasserflurabstände wurden dem Modell als Bottom Boundary Conditions vorgegeben. Eine Kalibrierung der Nährstoffverfügbarkeit war – wie zu erwarten und bereits kommuniziert – nicht möglich (siehe letzter Zwischenbericht).

Die Validierung zeigte, dass das aktuelle Modell die Nährstofflimitierung nicht abbildet. Dies zeigt sich darin, dass die simulierten Erträge für alle Wasserstandsklassen stimmen mit Messungen übereinstimmen, die zusätzliche Nährstoffe erhalten haben (siehe Tabelle 10 und Abbildung 26).

Tabelle 10: Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) für die drei Wasserstandsklassen mit und ohne Entzugsdüngung. LAI Daten lagen nur in den ersten beiden Jahren nach Etablierung (2017 und 2018) vor. In diesen Jahren wurde noch nicht gedünkt. Die NRMSE beziehen sich jeweils auf die arithmetischen Mittelwerte der Replikate.

	Flach entwässert	teilwiedervernässt	wiedervernässt
Kalibrierung			
Ertrag	0.06	0.06	0.06
LAI	0.64	0.43	0.33

Validierung			
Ertrag ohne Entzugsdüngung	1.38	0.48	0.41
Ertrag mit Entzugsdüngung	0.47	0.17	0.20

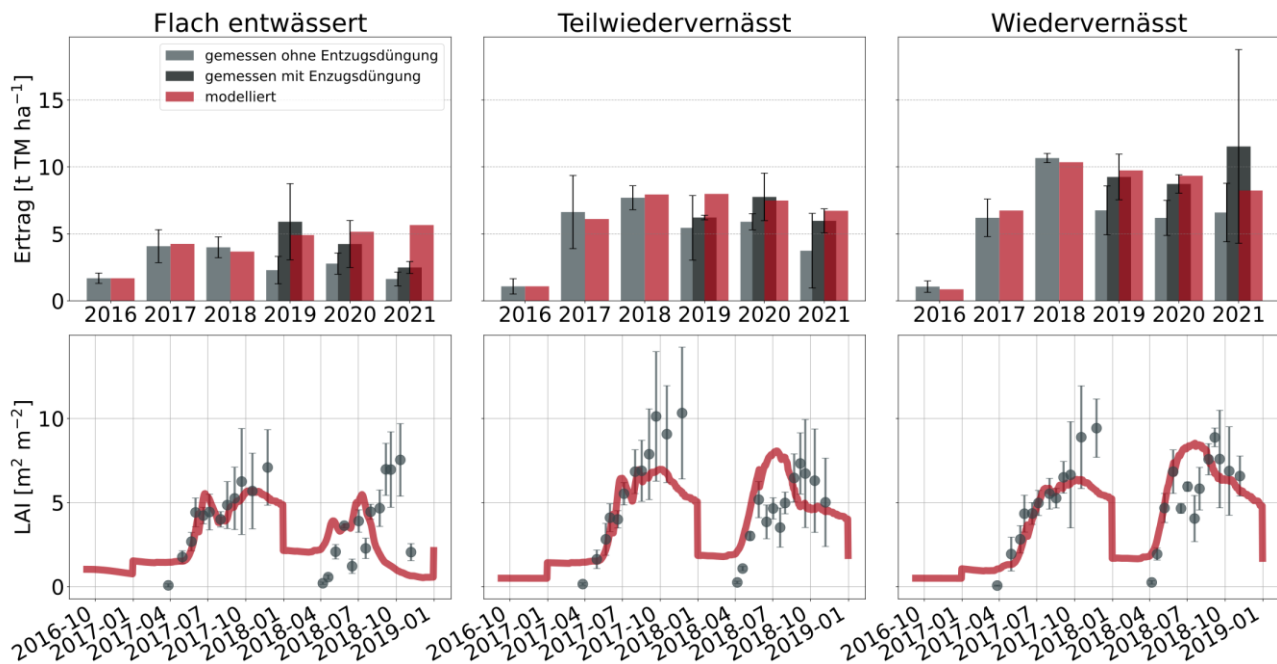


Abbildung 26: Ergebnisse der Kalibrierung (2016 – 2018) für Ertrag (oben) und LAI (unten), sowie der Validierung des Ertrags (2019 – 2021 oben). Die Balken und Punkte repräsentieren Mittelwerte und die Fehlerbalken Standardabweichungen von jeweils vier Replikaten.

Das für hohe Wasserstände kalibrierte Modell wurde verwendet, um Ernteerträge unter dem vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellten Klimaszenarien (RCP 4.5 Kernensemble v2018) für die Jahre 2022 bis 2050 zu projizieren. Da die Szenarien keine Wasserstände enthalten, wurden die gemessenen Wasserstände der Jahre 2018-2021 als Referenz herangezogen. Während der Etablierung von Paludikulturen treten in den ersten Jahren häufig Probleme im Wassermanagement auf, weshalb die ersten zwei Jahre hierbei nicht berücksichtigt wurden. Für jedes Simulationsjahr wurden zufällig Wasserstände aus den Messdaten gezogen (immer ganze Jahre, um die jährliche Dynamik beizubehalten). Dieses Vorgehen wurde 10.000 mal wiederholt und die Zeitreihe anschließend aus den Mittelwerten dieser Wiederholungen gebildet. Die Simulationsergebnisse (vgl. Abbildung 27) zeigen stabile Erträge von 8 – 11 t ha⁻¹ über den gesamten Prognosezeitraum; weder signifikante Rückgänge noch Steigerungen infolge der prognostizierten klimatischen Veränderungen werden erwartet. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Wasser- und Nährstoffversorgung von größerer Bedeutung für die Biomasse-Erträge sind, als die zu erwartenden Klimaänderungen.

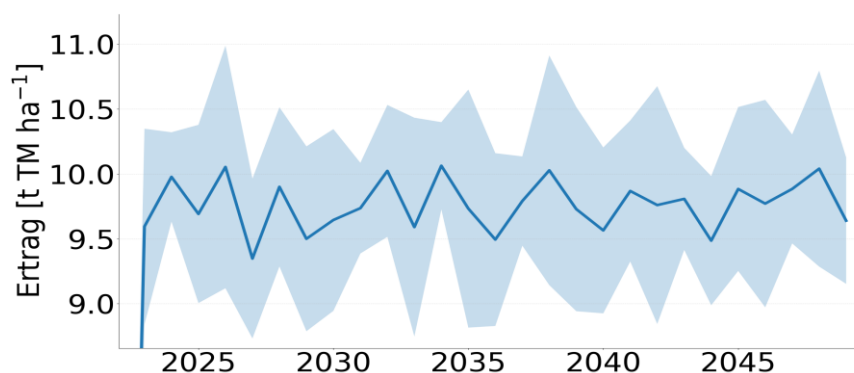


Abbildung 27: Prognostizierte jährliche Trockenbiomasse-Erträge für hohe Wasserstände anhand von Klimaszenarien des RCP 4.5 Kernensembles v2018 des DWD für die Jahre 2022 bis 2050. Die Linie entspricht den Mittelwerten und die schattierte Fläche der Standardabweichung der sechs Szenarien. 2022 ist als Jahr der Pflanzung (äquivalent zur Kalibrierung) zu verstehen und in der Grafik zur besseren Skalierung abgeschnitten.

Arbeitspaket 6: Regionale Nutzungsketten

Arbeitspaket 6.1: Bioraffination

Bioraffinationsversuch mit GeCo GbR (Januar 2025)

Am 29. Januar 2025 wurde in Kooperation mit der Firma GeCo GbR in Nordenham ein initialer Versuch zur Bioraffination von geernteter Nasswiesen-Biomasse durchgeführt. Zielsetzung war die Evaluierung der grundsätzlichen Eignung der Biomasse für den Raffinationsprozess sowie die separate Gewinnung und Charakterisierung der festen und flüssigen Fraktionen.

Die eingesetzte Biomasse stammte von Nasswiesen am Dümmer und bestand aus einem Mischbestand typischer Nasswiesengräser. Der Versuch musste jedoch unmittelbar nach Befüllung der Raffinationsanlage abgebrochen werden, da die vorliegende Biomasse eine zu grobe und voluminöse Struktur aufwies. Dies führte zu einer sofortigen Verstopfung der Anlage, sodass der eigentliche Raffinationsprozess nicht durchgeführt werden konnte.

Diese Erfahrung unterstreicht die zentrale Bedeutung der Biomasse-Vorbehandlung: Die gewählte Zerkleinerung der Biomasse erwies sich als unzureichend für die technische Umsetzbarkeit. Für zukünftige Versuche wurde daher die Notwendigkeit einer gezielten Aufbereitung durch Häckseln während des Ernteprozesses identifiziert, um eine gleichmäßige und für die Bioraffination geeignete Partikelgröße zu gewährleisten. In enger Absprache mit der Firma GeCo GbR wurde auf einen zweiten Versuch in technischer Skala verzichtet, um ein potenzielles Anlagenschadensrisiko durch Verstopfung zu vermeiden. Stattdessen erfolgte der Übergang zu einem Labormaßstab-Versuch beim DIL.

Saftpressung und Proteinbestimmung durch DIL (Dezember 2025 – Januar 2026)

Durch das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL) wurde eine detaillierte Analyse der Saftpressung und Proteingewinnung aus der Nasswiesenbiomasse im Labormaßstab durchgeführt. Die Untersuchungen erfolgten im Zeitraum vom 16. Dezember 2025 bis 28. Februar 2026.

Durchgeführte Arbeitsschritte

Die Aufarbeitung umfasste folgende Prozessschritte:

1. Ernte der Nasswiesenbiomasse
2. Gekühlte/ Gefrorene Lagerung
3. Transport
4. Aussortierung nicht geeigneter Pflanzenteile (braune Stiele, Wurzeln, vertrocknete Blätter)
5. Mechanische Saftpressung der grünen Blattfraktion im Labormaßstab
6. Gravimetrische Bestimmung der Saftausbeute
7. Gefriertrocknung von Rohmaterial und gewonnenem Saft
8. Bestimmung der Trockensubstanzgehalte
9. Proteinbestimmung in der Trockensubstanz nach Kjeldahl-Methode ($N \times 6,25$)
10. Rückrechnung der Proteinwerte auf das Feuchtgewicht

Ergebnisse der Saftpressung

Nach dem Aussortieren ungeeigneter Pflanzenteile betrug die effektive Einwaage an grünem Blattmaterial 518,6 g. Aus dieser Menge konnten 338,0 g Presssaft gewonnen werden, was einer Saftausbeute von 65,2 % bezogen auf die eingesetzte Blattmasse entspricht. Dieses Ergebnis liegt im erwarteten Bereich für grüne pflanzliche Rohstoffe und belegt die prinzipielle Eignung der Nasswiesen-Biomasse für mechanische Pressverfahren.



Abbildung 28: Geprüfte Nasswiesenbiomasse beim DIL

Die Analyse der Trockensubstanz ergab für das Rohmaterial einen Trockensubstanzgehalt von 17,2 % bei einem entsprechenden Wassergehalt von 82,8 %. Der gewonnene Presssaft wies einen Trockensubstanzgehalt von 7,1 % auf, was auf eine effektive Trennung der wasserlöslichen Inhaltsstoffe von der Faserfraktion hinweist.

Proteingehalte und Anreicherung

Die Proteinbestimmung nach Kjeldahl erbrachte folgende Ergebnisse:

Tabelle 11: Ergebnisse der Proteinbestimmung nach Kjeldahl

Matrix	Proteingehalt (g/100 g TS)	Proteingehalt (g/100 g FG)
Rohmaterial (TS)	23,3	4,0
Presssaft (TS)	34,2	2,4

Bezogen auf die Trockensubstanz zeigt sich im Presssaft eine deutliche Anreicherung der Proteine auf 34,2 g pro 100 g Trockensubstanz gegenüber 23,3 g pro 100 g im Ausgangsmaterial. Dies entspricht einer relativen Proteinsteigerung um ca. 47 % in der flüssigen Fraktion. Die Rückrechnung auf das Feuchtgewicht ergibt aufgrund des hohen Wassergehalts des Saftes einen absoluten Proteingehalt von 2,4 g pro 100 g Saft.

Diese Werte sind charakteristisch für grüne Blattbiomasse und liegen im plausiblen Bereich für pflanzliche Rohstoffe. Die deutliche Proteinsteigerung in der Trockensubstanz des Saftes belegt die erfolgreiche Fraktionierung und das Potenzial für die Gewinnung proteinangereicherter Produkte durch weitere Aufkonzentration (z.B. Ultrafiltration, Fällung, Gefriertrocknung).

Schlussfolgerung und Ausblick

Die Untersuchungen zur Bioraffination von Paludikultur-Biomasse bestätigen die grundsätzliche Machbarkeit der Saftpressung im Labormaßstab mit 65,2% Ausbeute, plausiblen Trockensubstanzwerten und 47% Proteinanreicherung im Saft (34,2 g/100 g TS), was die Eignung für die Bioraffination von Nasswiesenbiomasse unterstreicht. Kritische Faktoren sind Partikelgröße und Zerkleinerung durch Häckseln während der Ernte, da eine unzureichende Aufbereitung zu Verstopfungen führt; der erste Versuch scheiterte hieran, weshalb in Absprache mit GeCo GbR auf Labortests beim DIL umgestiegen wurde. Ein weiterer entscheidender Aspekt der Bioraffination ist der Faktor Zeit und Transport, da eine verzögerte Verarbeitung die Produktqualität beeinträchtigt: Ungekühlt setzt der Proteinabbau rasch ein und mindert Erträge sowie Fraktionsqualität. Daher muss entweder die Verarbeitung direkt nach Ernte stattfinden, oder die Biomasse direkt gefroren gelagert werden.

Die Ergebnisse ermöglichen kaskadierte Nutzung: Proteinprodukte aus Saft (Futtermittel/Lebensmittel via Filtration/Sprühtrocknung), Faserwerkstoffe aus Presskuchen (Verbundstoffe, vgl. AP 6.2), Biogas/Thermische Nutzung von Resten sowie Nährstoffrückführung. Skalierung erfordert verbesserte Aufbereitung, Transport und Lagerungen und optimierte Parameter; Die Wirtschaftlichkeit hängt maßgeblich von den vorher aufgeführten Punkten ab.

Die Bioraffination steigert die Wertschöpfung jenseits reiner Energienutzung, integriert Bioökonomie-Prinzipien und unterstützt Klimaschutz sowie Biodiversität auf vernässten Mooren. Die Erkenntnisse bilden eine solide Basis für Folgeprojekte; aufbauende Forschungsarbeiten können klären, inwieweit die Herausforderungen adressierbar sind und weitere Potenziale entstehen.

Arbeitspaket 6.2: Faserspritzguss

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Bewertung der grundsätzlichen Eignung von Nasswiesen- und anderer Paludi-Biomasse als Faserrohstoff für die Herstellung von Fasergussprodukten im Labor- und Industriemaßstab sowie die Identifikation verarbeitungstechnischer Herausforderungen und Optimierungspotenziale für die industrielle Anwendung.

Gegenstand des Arbeitspakets ist die Aufbereitung und Verarbeitung von Biomasse zu Fasergussformteilen unter Einsatz konventioneller Fasergusstechnik. Untersucht werden insbesondere der Einfluss der Faseraufbereitung, der Rezepturzusammensetzung sowie der pflanzlichen Inhaltsstoffe auf die Prozessstabilität und die Formgebung. Im Labormaßstab wurde zudem untersucht, inwiefern sich die reine Biomasse verschiedener Pflanzenarten in der Verarbeitung und den Eigenschaften für Faserspritzgussteile eignet. Beim Faserspritzgussverfahren sollen die Vorteile des herkömmlichen Kunststoffspritzgusses mit denen der Papierherstellung aus wässrigen Suspensionen (Pulpe) vereint werden.

Faserspritzguss im Labormaßstab:

Für die Umsetzung des Faserspritzgussverfahrens wird eine Pulpe hergestellt und in die Kavität eines Werkzeugs eingespritzt. Dort wird der Pulpe durch Druck, durch zusätzliches Anlegen eines Vakuums und die Beaufschlagung mit Temperatur der Wasseranteil entzogen und diese so zu Formteilen verarbeitet. Die Umsetzung im Labormaßstab ermöglichte dabei die Untersuchung der Eignung verschiedener reiner Biomassearten und Binderzugaben. Untersucht wurde die Biomasse von *Carex acutiformis*, *Phalaris arundinacea*, *Phragmites australis* und *Typha angustifolia*. Die Biomasse wurde vor der Weiterverarbeitung gemahlen (Ultrazentrifugalmühle, Retsch ZM 200, Ringsieb mit Maschenweite 1 mm, Retsch Technology GmbH, Haan, DE) und anschließend in einem Standmixer (Russel Hobbs Inc., Oldham, UK) mit (Biomasseanteil 5 %) zu einer homogenen Pulpe verarbeitet. Diese Pulpe wurde in die 3D-gedruckten Werkzeuge (Werkstoff: PETG, DAS FILAMENT, Emskirchen, DE; Drucker: MK3, Prusa Research a.s., Prag, CZ) eingespritzt und unter Vakuum gepresst. Die abschließende Aushärtung erfolgte bei 50 °C für 24 Stunden. Für die Ermittlung der Steifigkeit und Festigkeit der Faserspritzgussteile wurden Mini-Zugstäbe in Anlehnung an die DIN EN ISO 527-2 hergestellt und Zugversuche durchgeführt (Zwick/Roell GmbH & Co.KG, Ulm, DE). Als Binder wurden zur Pulpe 10 Masse-% Holzleim (Ponal Hartholzleim, Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, DE) und Kleister (Metylan Kleister MPP20, Henkel AG & Co. KGaA, Düsseldorf, DE) zugegeben.

Im Rahmen des Projekts konnten mit allen untersuchten Pflanzenarten erfolgreich Mini-Zugstäbe mithilfe des entwickelten Verfahrens hergestellt werden. Dies belegt grundsätzlich die Eignung des Verfahrens zur Verarbeitung verschiedener pflanzlicher Rohstoffe. Die mechanische Charakterisierung anhand von Zugversuchen zeigte jedoch deutliche biomasseabhängige Unterschiede, die sich in den Spannungs-Dehnungs-Kurven widerspiegeln (siehe Abbildung 29).

Durch die Zugabe von Kleister und Holzleim konnte bei den Pflanzenarten *Carex acutiformis*, *Phragmites australis* und *Typha angustifolia* eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erzielt werden. In den Spannungs-Dehnungs-Kurven äußerte sich dies in einer erhöhten maximalen Zugspannung sowie einen steileren Anstieg der Kurve im linear-elastischen Bereich (Elastizitätsmodul). Besonders ausgeprägt war dieser Effekt bei der Verwendung von Holzleim bei *Typha angustifolia* und *Phragmites australis*. Im Vergleich dazu weisen die Proben aus *Phalaris arundinacea* geringere Festigkeiten und einen reduzierten E-Modul [JM2] [AH3] auf, was auf eine begrenzte strukturelle Integrität schließen lässt. Die Ergebnisse legen nahe, dass für *Phalaris arundinacea* beim Einsatz des Fasergussverfahrens im Industriemaßstab eine Zumischung von Papierfasern erforderlich ist, um die mechanischen Kennwerte zu verbessern und reproduzierbare Spannungs-Dehnungs-Verläufe mit ausreichenden Eigenschaften und Verarbeitbarkeit zu erzielen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass durch eine gezielte Additivierung die mechanischen Eigenschaften pflanzenbasierter Fasergussmaterialien maßgeblich beeinflusst werden können. Die Analyse

der Spannungs-Dehnungs-Kurven erwies sich dabei als zentrales Instrument zur Bewertung der unterschiedlichen Pflanzenarten und zur Ableitung von Empfehlungen für eine industrielle Umsetzung.

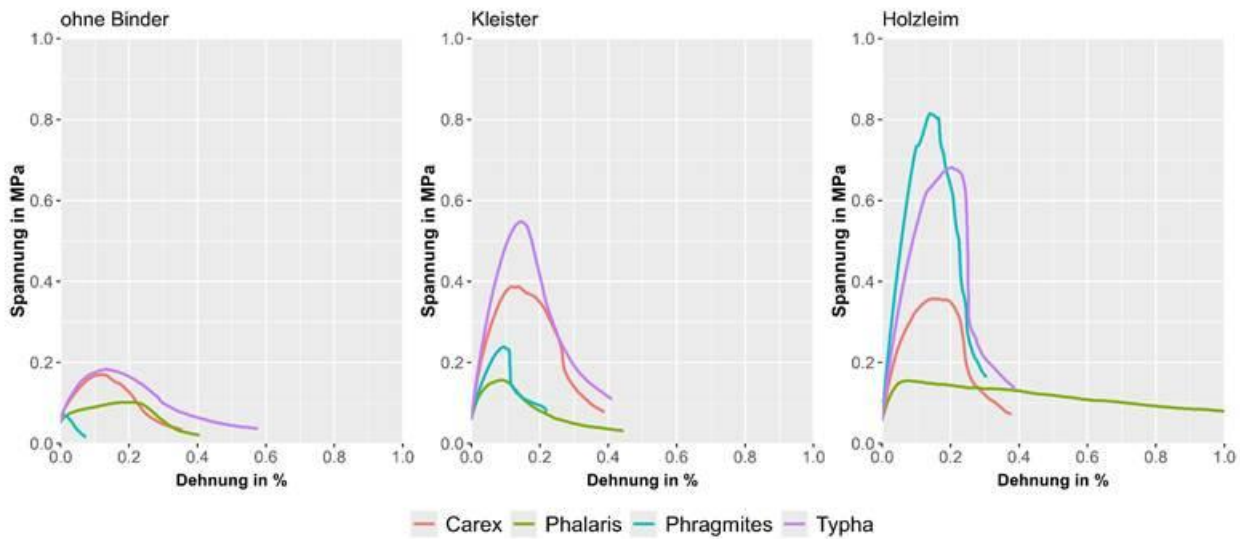


Abbildung 29: Spannung-Dehnung-Kurven der Zugversuche der Mini-Zugstäbe aus den im Faserspritzgussverfahren im Labormaßstab hergestellten Proben.

Faserguss im Industriemaßstab:

Die Untersuchung zur Verwendung der Fasern im Fasergussverfahren wurde an den Industriebetrieb Pulp-Tec Compound GmbH + Co. KG, ansässig in 01844 Neustadt in Sachsen, DE, vergeben. Das Unternehmen ist ein etablierter Hersteller von Fasergussverpackungen und verfügt über die erforderliche fachliche Expertise sowie die entsprechende Maschinenteknik zur Durchführung der Untersuchungen.

Für die Untersuchung wurde Nasswiesenbiomasse mit einem Hauptanteil an Rohrglanzgras sowie einer weiteren Mischfraktion aus anderen Nassgrünpflanzen des Standorts „Dümmer“ ausgewählt. Nasswiesenbiomasse in Form einer Mischfraktion eignet sich grundsätzlich als Rohstoff für diese Anwendung, da diese ohne besonderen Pflegeaufwand wirtschaftlich angebaut werden kann. Zudem erscheint eine Nutzung der Fasern im Fasergussverfahren auch nach einer vorgelagerten Bioraffination mit Auszug flüssiger Bestandteile im Sinne einer Kaskadennutzung möglich.

Für die Untersuchung wurde dem Unternehmen unbehandelte, gemähte, getrocknete und in Ballen gepresste Nasswiesenbiomasse aus der Spätsommerernte 2025 von der Fläche am Dümmer in Form eines 200-kg-Ballens zur Verfügung gestellt (siehe Abbildung 30).



Abbildung 30: Das Ausgangsmaterial der Nasswiesenbiomasse (geschnitten, getrocknet und in Ballen gepresst)

Nach einer Trockenzerkleinerung mittels einer Mühle [JM4] wurde die Ware gesichtet und ein hoher Staubanteil und grobe Splitter in der Gesamtfraktion erkannt. Mittels Siebung und Nachzerkleinerung der Splitter wäre die Gesamtfraktion homogener herstellbar.

Erster Versuch zur Verarbeitung:

Rezeptur:

- 60 % Stanzabfälle aus Wellpappe
- 40 % gehäckselte Nasswiesenbiomasse
- 3 % Leimungsmittel (alkylierte Ketendimere), bezogen auf die Gesamtmasse der Rezeptur

Zunächst wurde der Pulper mit Wasser befüllt und die Stanzabfälle aus Wellpappe zugegeben. Nach dem Anlauf des Pulpers wurde die Wellpappe vollständig aufgelöst. Anschließend erfolgte die Zugabe der gehäckselten Nasswiesenbiomasse. Nach deren vollständiger Untermischung wurde das Leimungsmittel in den Pulper zugegeben.

Unmittelbar nach der der Zugabe der Nasswiesenbiomasse trat eine starke Schaumbildung auf, die als dichter Schaumteppich die Oberfläche im Pulper bedeckte. Die anschließende Zugabe des Leimungsmittels intensivierte diese Schaumbildung noch deutlicher und führte zur Ausbildung eines sehr dichten und stabilen Schaums (Abbildung 31). Aufgrund dieser ausgeprägten Schaumbildung war ein Schöpfprozess für die weitere Verarbeitung ausgeschlossen, sodass der Versuch abgebrochen werden musste. Als mögliche Ursache für die ungewöhnlich starke Schaumbildung werden Inhaltsstoffe der Nasswiesenbiomasse, insbesondere Saponine und Proteine, angenommen. Der Versuch wurde aufgrund der nicht realisierbaren Verarbeitung abgebrochen und ein modifizierter Versuch angesetzt.



Abbildung 31: Schaumbildung durch die Zugabe der Nasswiesenbiomasse in den Pulper. Links: Schaumbildung vor Zugabe und rechts: sehr starke Schaumbildung mit Überlauf nach Zugabe des Leimungsmittels.

Zweiter Versuch zur Verarbeitung:

Rezeptur:

- 60 % Stanzabfälle aus Wellpappe
- 40 % gehäckselte Nasswiesenbiomasse
- 2 % Leimungsmittel (Alkylierte Ketendimere) - Aufschlag auf die Rezeptur

Im Unterschied zu Versuch 1 wurde die Nasswiesenbiomasse vorab für 2 Stunden in einem auf 30 °C temperierten Wasserbad gewässert. Anschließend erfolgte eine Filtration über ein Sieb und eine Spülung mit Klarwasser. Ziel dieser Vorbehandlung war es, wasserlösliche Inhaltsstoffe zu entfernen, die im ersten Versuch zu einer starken Schaumbildung geführt hatten.

Analog zu Versuch 1 wurden die Rezepturbestandteile anschließend nacheinander in den Pulper eingebracht. Dabei zeigte sich, dass die Wasserlagerung und Spülung nur noch zu einer geringen Schaumbildung führten. Nach der Überführung des Pulps in die Mischbütte und in den Maschinentank wurden mithilfe des Musterwerkzeugs Pflanztöpfe im Fasergussverfahren hergestellt. In mehreren Versuchen sowie Optimierungsschritten am Versuchswerkzeug traten Probleme durch das Verstopfen der Vakuumborungen auf. Ursache hierfür war, dass sich Grobanteile der Nasswiesenbiomasse in den Bohrungen verhakten und sich Feinanteile davor ablagerten. Das Problem konnte nicht gänzlich behoben, jedoch eindeutig als Ursache für die Störung im Formgebungsprozess ausgemacht werden. Darüber hinaus lagerten sich Grobanteile der Nasswiesenbiomasse zwischen den Dichtflächen des Formwerkzeuges ab (siehe Abbildung 32). Infolgedessen konnte kein ausreichendes Vakuum aufgebaut werden, wodurch die Formgebung entsprechend beeinträchtigt wurde. Teilweise wurde zudem ein starkes Anhaften der Formteile an der Transferform beobachtet (Abbildung 33). Dies kann auf ein noch nicht ausreichend erfolgreiches Auswaschen der Nasswiesenbiomasse vor der Verarbeitung hindeuten. Nach der Formgebung wurden die Formteile bei 125 °C in einem Trockenschrank getrocknet.



Abbildung 32: Störung der Werkzeugdichtigkeit durch grobe Pflanzenteile.



Abbildung 33: Anhaftendes Bauteil am Transferwerkzeug.

Fazit:

1. Eine reine Trockenzerkleinerung ist für die Aufbereitung der Nasswiesenbiomasse nicht ausreichend. Der entstehende Staubanteil sowie grobe Splitter beeinflussen die Verarbeitung negativ. Wird diese Aufbereitungsvariante gewählt, sollten Staubanteile und Grobteile beispielsweise durch Siebung entfernt werden.
2. Der Einsatz von Wellpappe als Rezepturbestandteil entspricht der gängigen industriellen Praxis. Ein höherer Anteil an Nasswiesenbiomasse bis hin zu 100 % erscheint nur möglich, wenn die Biomasse zuvor feinerfaserf wird.
3. Die schaubildenden Bestandteile der Nasswiesenbiomasse müssen vor der Verarbeitung aus dem Pflanzenmaterial zwingend entfernt werden. Eine 24-stündige Wasserlagerung und anschließendes Spülen haben sich hierbei als wirksame Maßnahme erwiesen.
4. Generelle Machbarkeit der Verarbeitung auf konventioneller Maschinenteknik mit etablierten Verfahren konnte grundsätzlich nachgewiesen werden. Für eine industrielle Umsetzung sind jedoch weitere Entwicklungsschritte sowie eine wirtschaftliche Bewertung erforderlich.

Ausblick:

Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Nasswiesenbiomasse grundsätzlich als Rohstoff für den Faserguss eignet. Für eine weitergehende Nutzung sind jedoch zusätzliche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich. Zukünftige Schwerpunkte sollten insbesondere folgende Aspekte umfassen:

1. Untersuchung unterschiedlicher Faseraufbereitungsverfahren, wie z. B. TMP-Verfahren, Trockenvermahlung und Aussiebung sowie gezielte Auswahl geeigneter Siebfraktionen.
2. Analyse verschiedener Erntezeitpunkte hinsichtlich mechanischer Bauteileigenschaften sowie insbesondere der Inhaltstoffe, die für die ausgeprägte Schaumbildung während der Verarbeitung verantwortlich sind. Beispielsweise könnte der natürliche biologische Abbau dazu führen, dass eine Ernte kurz vor dem Neuaustrieb im Frühjahr geringere schaubildende Inhaltstoffe aufweist.
3. Weitere Optimierung der Auswaschung schaubildender Bestandteile aus der Nasswiesenbiomasse.
4. Rezepturoptimierung mit dem Ziel einer Erhöhung des Nasswiesenbiomasseanteils.
5. Untersuchung auf Eignung für Faserguss für weitere Paludikulturen, wie beispielsweise Seggen und Binsen

Arbeitspaket 6.3: Spritzguss und 3D-Druck

Compoundierung:

Ziel dieses Arbeitspakets ist die Herstellung homogener kurzfaserverstärkter thermoplastischer Verbundwerkstoffe auf der Basis von Paludikultur-Biomasse, die für die Weiterverarbeitung im Spritzguss und im 3D-Druck geeignet sind. Gegenstand des Arbeitspakets ist die Untersuchung der Compoundierung von Biomasse aus dem Anbau in Paludikultur mit thermoplastischen Kunststoffen unter Einsatz eines CMS-Compounders (vergleiche Müssig 2013, Müssig *et al.*, 2020). Dabei liegt der Fokus auf der Verarbeitbarkeit und der Analyse der Biomasse unterschiedlicher Pflanzenarten und Zerkleinerungsgrade der Biomasse vor dem Compoundierprozess.

Um naturfaserverstärkte Verbundwerkstoffe (NFK) mittels Spritzgusses oder 3D-Drucks zu komplexen Geometrien verarbeiten zu können, ist der vorgelagerte Prozess der Compoundierung erforderlich. Im Rahmen der Compoundierung werden die einzelnen Rezepturbestandteile in die geschmolzene Kunststoffmatrix eingebracht, intensiv vermischt, durch die Scherkräfte zerkleinert und homogenisiert.

In der Kunststofftechnik kommen hierfür unterschiedliche Technologien und Verfahren zum Einsatz. In diesem Projekt wurde ein CMS-Compounder verwendet. Die Vorteile dieser Methoden sind in Müssig (2013) genauer beschrieben und im Folgenden kurz zusammengefasst:

- **Einstellbare, vergleichsweise geringe und gleichbleibende Schergeschwindigkeit**
Jedes Volumenelement der Rohstoffe durchläuft den Prozess hoch definiert, wodurch die mechanische Belastung für alle Bestandteile identisch ist. Es treten keine lokalen Scherspitzen auf, wodurch Temperaturspitzen vermieden und die thermischen Schädigungen der Komponenten minimiert werden.
- **Zwangseinzug nahezu aller aufzugebenden Komponenten**
Auch nicht rieselfähige oder schlecht schüttfähige Rohstoffe, wie grob zerkleinerte Pflanzenteile, können verarbeitet werden. Diese werden während des Prozesses durch die auftretenden Scherkräfte in der Kunststoffschmelze zerkleinert, fein dispergiert und mit der Kunststoffmatrix homogenisiert.
- **Entgasung**
Das System ist so gestaltet, dass eine sehr effiziente Entgasung flüchtiger Bestandteile, insbesondere von Feuchtigkeit, bei Umgebungsdruck möglich ist.

Eingesetzte Rohstoffe

Für die Herstellung der Compounds wurden unterschiedliche Kunststoffe (siehe Tabelle 12) die Biomasse verschiedener Paludi-Pflanzenarten sowie unterschiedliche Vorbehandlungs- und Aufbereitungsarten der Biomasse (siehe Abbildung 34) eingesetzt und die Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften nach der Weiterverarbeitung untersucht. Ergänzend kamen bei ausgewählten Rezepturen Additive zur gezielten Eigenschaftsoptimierung zum Einsatz.

Bei der Auswahl der Polymere wurde zudem zwischen Werkstoffen für die nachfolgende Verarbeitung im Spritzguss bzw. im 3D-Druck unterschieden. Im Folgenden werden die eingesetzten Rohstoffe sowie deren jeweilige Aufbereitungsformen beschrieben.

Tabelle 12: Auflistung der eingesetzten kommerziellen Kunststoffe und der gemessenen mechanischen Eigenschaften.

	NatureWorks Ingeo 3251D	Biomer P263E	NatureWorks Ingeo 4043D
Verarbeitungsform	Spritzguss & 3D-Druck	Spritzguss	3D-Druck
Polymerfamilie	PLA	PHA	PLA
Zug-E-Modul	3591 MPa	2435 MPa	3612 MPa
Bruchdehnung	3,86 %	4,9 %	6 %
Zugfestigkeit	56,4 MPa	36,5 MPa	60 MPa
Charpy-Schlagzähigkeit	18,8 J/m	39,0 J/m	16 J/m

Für die Herstellung der Compoundwerkstoffe wurde die Biomasse der Paludikultur-Pflanzenarten Rohrkolben (*Typha angustifolia* und *Typha latifolia*), Schilf (*Phragmites australis*), Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und Seggen (*Carex acutiformis*) ausgewählt. Dabei wurden drei unterschiedliche Aufbereitungsarten für die geerntete Biomasse untersucht (siehe Abbildung 34):

1. grobes Häckseln (teilweise direkt in der Erntemaschine während der Ernte),
2. Zerkleinerung mittels Ultrazentrifugalmühle (Retsch ZM 200, Ringsieb 1mm, Retsch Technology GmbH, Haan, DE) sowie
3. Industrielles Mahlen im Technikum der Holzmühle Westerkamp GmbH, Visbek, DE.

Die unterschiedlichen Paludikulturen und Aufbereitungsarten wurden im Rahmen der Untersuchungen miteinander verglichen, um deren Einfluss auf die Werkstoffeigenschaften der hergestellten Compounds zu bewerten.



Abbildung 34: Darstellung der drei unterschiedlichen Biomasseaufbereitungsarten, exemplarisch am Beispiel von *Phragmites australis*; oben: grob gehäckselte, unten links: Zerkleinerung mit Ultrazentrifugalmühle, rechts unten: Feinvermahlen im industriellen Maßstab.

Für ausgewählte Rezepturen wurden zusätzlich Additive zur Verbesserung der Schlagzähigkeitseigenschaften eingesetzt. Hierzu gehörten:

- Vinylacetat-Ethylen-Copolymeren (**Vinnex 2504**, Wacker Chemie AG, München, DE)
- Schlagzähigkeitsmodifizierer für Biopolymere **Bio-500** (Addisperse, Bensalem, USA)
- fein vermahlene **Birkenrinde**, bereitgestellt von der Firma Holzmühle Westerkamp GmbH, Visbek, DE

Für alle Versuche wurden die Kunststoffkomponenten gravimetrisch dosiert und mittels Rütteldosierers in den CMS-Compounder gegeben. Die Biomasse wurde in Abhängigkeit von ihrer Dosierfähigkeit entweder volumetrisch über einen Schneckendosierer oder manuell zugeführt. Verfahrensbedingt wurden die Einstellungen wie die Verarbeitungstemperaturen, die Drehzahlen, die Durchsatzmengen sowie die Abstände jeweils an die jeweilige Rezeptur angepasst. Nach Abschluss des Compoundierprozesses wurde das fertige Compound in Form von Pellets ausgetragen. Die Pellets wurden aufgefangen, verwogen, verpackt und eindeutig etikettiert. Anschließend wurden die hergestellten Compounds an die NHL Stenden zur Herstellung von Prüfkörpern im Spritzgussverfahren versendet oder zur Produktion von thermoplastischen 3D-Druckdrähten sowie zur Fertigung von 3D-Druck-Bauteilen verwendet.

Fazit:

Alle geplanten Rezepturen, einschließlich sämtlicher untersuchter Paludikultur-Biomasse und Faseraufbereitungsarten, konnten nach Anpassung der jeweiligen Verarbeitungsparameter erfolgreich im

gewählten Verfahren compoundiert werden. Insgesamt wurden 59 Compoundreihen für die Weiterverarbeitung im Spritzguss (49) und 3D-Druck hergestellt (10).

Weiterverarbeitung im Spritzgussverfahren:

Alle für den Spritzguss vorgesehenen thermoplastischen Compounds konnten erfolgreich zu Prüfkörpern zur mechanischen Charakterisierung verarbeitet werden. Abbildung 35 zeigt vergleichend die Ergebnisse der Zug- und Schlagzähigkeitsversuche von Compounds mit derselben Kunststoffmatrix (PLA Ingeo 3251D) und der Biomasse verschiedener Pflanzenarten und Biomasseanteile. Aus den Zugversuchen lässt sich ableiten, dass *Phragmites australis* und *Typha angustifolia* die beste Eignung für die Verwendung im Spritzguss aufweisen und dass ein Biomasseanteil von bis zu 30 Masse-% möglich ist. Das Zähigkeitsprofil der Werkstoffe erwies sich als unzureichend, weshalb verschiedene Additive zur gezielten Zähigkeitsverbesserung eingesetzt wurden (siehe Abbildung 36). Die besten Ergebnisse konnten dabei mit 10 % Vinnex 2504 erzielt werden, wodurch jedoch die Zugfestigkeit und Zugmodul reduziert wurden.

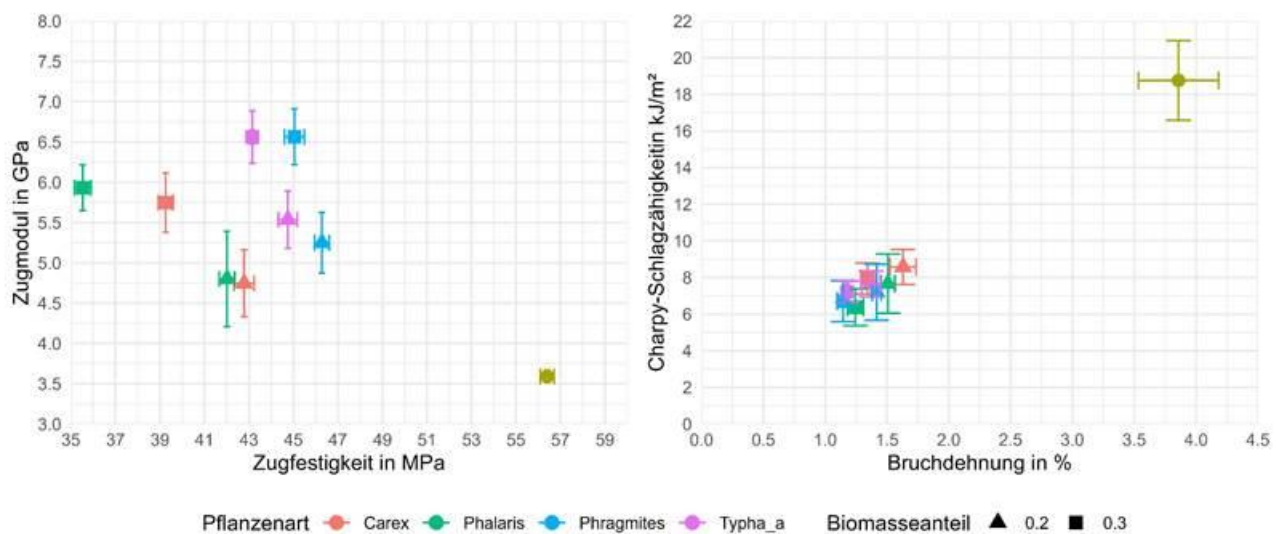


Abbildung 35: Darstellung der Zugeigenschaften ausgewählter Compounds mit PLA Ingeo 3251 D-Matrix und grob gehäckselter Biomasse.

Als besonders relevant erwies sich der Einfluss der Aufbereitung der eingesetzten Biomasse auf die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Compounds (siehe Abbildung 37). Die Untersuchungen zeigten eindeutig, dass der Einsatz von Biomasse mit reduzierter Partikelgröße vor der Compoundierung zu einer signifikanten Erhöhung der Zugfestigkeit führt. Diesem Effekt zugrunde liegend könnten die verbesserte Dispergierung der Biomasse im Polymermatrixsystem sowie die durch die Vermahlung vergrößerte spezifische Oberfläche sein, wodurch die Grenzflächenhaftung zwischen Biomasse-Partikeln und Matrix verbessert wird.

Besonders ausgeprägt war der Einfluss verschiedener Aufbereitungsmethoden bei den Biomassearten *Typha angustifolia* und *Phragmites australis*. Für diese Rohstoffe konnte eine überproportionale Steigerung der Zugfestigkeit bei der Nutzung der industriell vermahlene Biomasse beobachtet werden, was auf artspezifische Unterschiede in Morphologie und Faserstruktur hindeutet. Die Ergebnisse unterstreichen die zentrale Bedeutung der Biomasseaufbereitung als gezielten Stellhebel zur Optimierung der mechanischen Eigenschaften biobasierter Compounds aus Paludikultur-Biomasse.

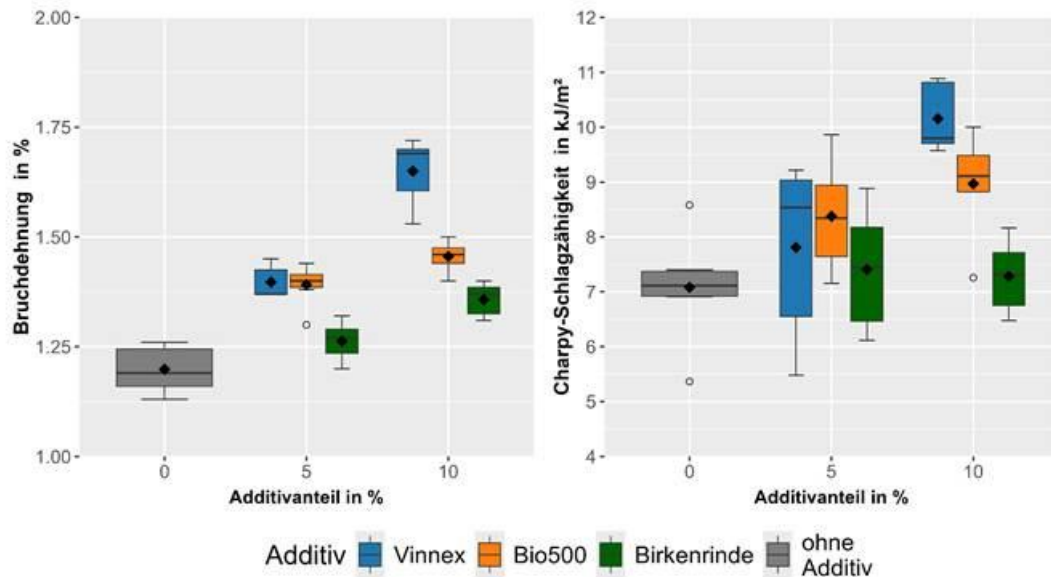


Abbildung 36: Auswirkungen unterschiedlicher Additivzugaben auf die Bruchdehnung und Schlagzähigkeit (Compounds mit PLA Ingeo 3251 D, mittels Ultrazentrifugalmühle gemahlener Schilf-Biomasse; Biomasse- und Additivanteil aufsummiert zu 30 %).

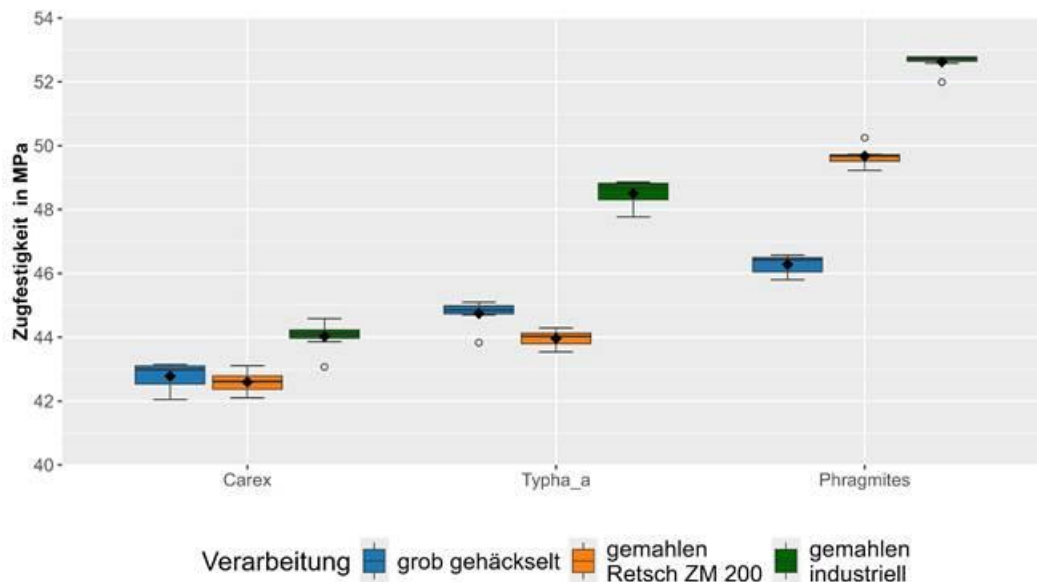


Abbildung 37: Einfluss der Biomassevorbereitung auf die Zugfestigkeit der Compounds mit PLA Ingeo 3251 D und mittels unterschiedlicher Methoden verarbeiteter Schilf-Biomasse vom gleichen Standort und mit gleichem Erntezeitpunkt.

Weiterverarbeitung im 3D-Druck-Verfahren

Die Verarbeitung der Compounds im 3D-Druckverfahren erwies sich als herausfordernder als im Spritzgussverfahren. Dies ist insbesondere auf den zusätzlichen Prozessschritt der thermoplastischen 3D-Druck-Drahtherstellung zurückzuführen, bei dem eine inhomogene Partikelmorphologie der Biomasse zu einer ungleichmäßigen Qualität führt. Zudem herrschen geringere Prozessdrücke und Scherkräfte, sodass Agglomerationen während des Prozesses weniger dispergiert werden. Dabei können bereits geringe Agglomerationen oder einzelne übergroße Biomassepartikel zu einer Verstopfung der Düse führen. Die Toleranz des Verfahrens gegenüber von der Biomasse verursachten Unterschieden in der Schmelzeviskosität ist geringer. Aus diesen Gründen konnten nur Compounds mit der industriell aufbereiteten Biomasse verarbeitet werden. Zwar weisen die Partikel eine im Median ähnliche Länge auf, allerdings enthält die industriell gemahlene Biomasse insgesamt einen kleineren Anteil an groben Partikeln (siehe Abbildung 38).

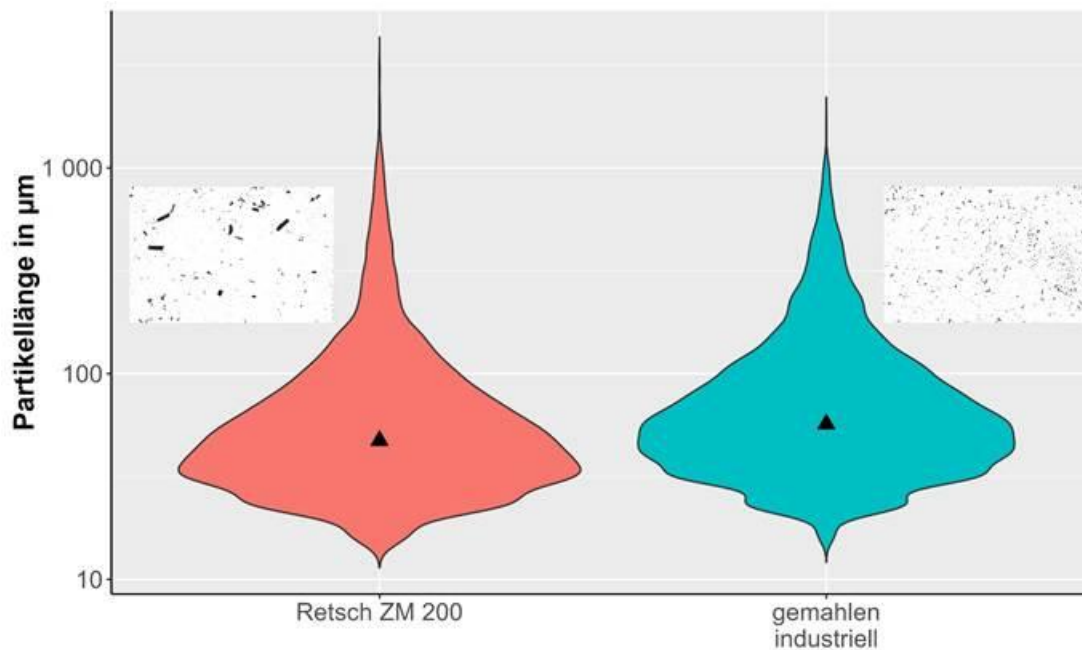


Abbildung 38: Darstellung der Partikellängen der gemahlene Biomasse für zwei Proben. Der Violinplot visualisiert die gesamte Größenverteilung und macht sichtbar, dass die mit der Ultrazentrifugalmühle Retsch200 gemahlene Biomasse einen höheren Anteil sehr großer Partikel enthält, obwohl die Medianwerte vergleichbar sind. Neben den Plots sind die der Auswertemethodik zu Grunde liegenden Flachbettscans der Partikel abgebildet.

Aufgrund dieser Problematik wurde zusätzlich zum herkömmlichen FDM-3D-Druck ein Granulat-3D-Druckverfahren eingesetzt, bei dem die Werkstoffzuführung direkt in Granulatform erfolgt und der Schmelzprozess über einen Mini-Einzelschneckenextruder durchgeführt wird. In Kombination mit einer Düse mit einem Durchmesser von 1 mm konnte dadurch eine erweiterte Compoundpalette mit Biomasse von *Carex acutiformis* und *Typha angustifolia* sowie Füllgraden von bis zu 20 Masse-% bei mit Proben aus dem Draht-3D-Druck vergleichbaren mechanischen Eigenschaften (siehe Abbildung 39) verarbeitet werden (siehe Tabelle 13). Generell führt die Zugabe von Biomasse zu einem Absinken der mechanischen Eigenschaften, wobei diese für viele Anwendungen des 3D-Drucks ausreichend sind.

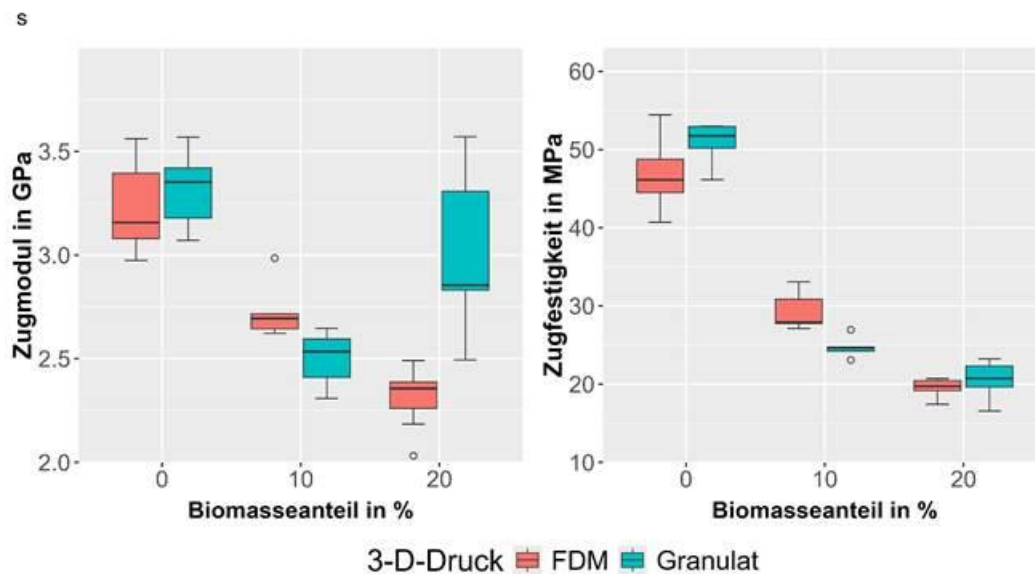


Abbildung 39: Mechanische Eigenschaften von im FDM- und Granulat-3D-Druck hergestellten Prüfkörpern.

Tabelle 13: Parameter der im 3D-Druck-Verfahren verarbeitbaren Compounds

Polymer	Biomasse & Verarbeitung	Biomasse-anteil	Drahtherstellung möglich	Druckbar im Draht-3D-Druck	Druckbar im Granulat-3D-Druck
PLA 4043D	-	-	Ja	Ja	Ja
PLA 4043D	<i>Carex a.</i> , Retsch ZM 200	10 %	Ja	Ja	Nein
PLA 4043D	<i>Carex a.</i> , gemahlen industriell	10 %	Ja	Ja	Ja
PLA 4043D	<i>Carex a.</i> , gemahlen industriell	20 %	Nein	Nein	Ja
PLA 4043D	<i>Typha a.</i> , gemahlen industriell	10 %	Nein	Nein	Ja



Abbildung 40: 3D-Gedrucktes Benchy (Boot) aus 10% Carex 90% PLA4043D Compound

Arbeitspaket 7: Ökonomische Bewertung

Die in Arbeitspaket 7 durchgeführte ökonomische Bewertung der Bewirtschaftung wiedervernässter Niedermoore mit Paludikulturen baut auf den Ergebnissen der vorherigen Arbeitspakete des NAPALU Projektes auf. Die ökonomische Untersuchung umfasst zunächst die Analyse von Kosten- und Erlösstrukturen, um betriebliche Defizite und Umstellungshemmnisse zu identifizieren. Diese werden den monetarisierten Gemeinwohlleistungen sowie den gesellschaftlichen Transformationskosten gegenübergestellt. Vor dem Hintergrund der zentralen Rolle von Förderinstrumenten erfolgt zudem eine Bewertung der bestehenden Governance-Strukturen. Die anschließende Akzeptanzanalyse untersucht, wie Landwirte auf unterschiedliche Anreiz- und Vertragsgestaltungen reagieren und identifiziert somit kritische Eigenschaften zukünftiger Anreizsysteme.

Governance-Analyse

Die Wiedervernässung von Mooren und deren angepasste Bewirtschaftung erbringen zentrale Gemeinwohlleistungen. Da es sich hierbei um nicht-marktfähige Güter handelt, besteht ohne geeignete institutionelle Rahmenbedingungen die Gefahr einer Unterbereitstellung. Entsprechend bedarf es förderpolitischer Ansätze und geeigneter Governance-Mechanismen, um die ökologischen Leistungen von Paludikulturen ökonomisch zu honorieren.

Die Governance-Analyse untersucht auf Basis einer systematischen Literaturrecherche die Existenz, Ausgestaltung und Zielerreichung unterschiedlicher Instrumente. Deren Bewertung erfolgt anhand von zehn Kriterien der wissenschaftlichen Politikevaluation in Anlehnung an Sprenger (1984). Von insgesamt 202 identifizierten Quellen wurden nach Relevanzprüfung 51 Beiträge vertieft analysiert. Die steigende Zahl an Publikationen weist auf die wachsende wissenschaftliche und politische Bedeutung des Themas hin.

Die identifizierten Instrumente lassen sich nach ihrem Inwertsetzungsmechanismus in drei Gruppen einteilen: (1) privatwirtschaftliche, marktbasierte Ansätze, (2) staatliche Instrumente wie Umweltsteuern oder Subventionen zur Internalisierung externer Effekte sowie (3) staatlich initiierte, marktlich ausgestaltete Instrumente, die durch geeignete Rahmenbedingungen eine marktbasierte Umsetzung ermöglichen. Tabelle 13 systematisiert diese Instrumente, beschreibt ihre Wirkmechanismen und nennt Beispiele ihrer praktischen Ausgestaltung.

Tabelle 14: Identifizierte Inwertsetzungsmechanismen

Inwertsetzungsmechanismus		Definition	Umsetzung
Privatwirtschaftlich	VCM	Markt zur freiwilligen Kompensation von THG-Emissionen durch Handel von Verschmutzungsrechten. Die Qualitätssicherung des Angebotes (THG-Reduktion) erfolgt durch die Beachtung von selbst gesetzten Standards über einen langfristigen Zeitraum	Moorfutures Moorland Klimapunkte SH Nature Credits
staatlich	AUKM (GAP)	Die Maßnahmen sind in der zweiten Säule der GAP angesiedelt und kompensieren die Mindererträge durch die klimaschonende Moorbewirtschaftung in einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren.	Moorschonender Stauhaltung - BB Moorschonender Stauhaltung - MV Moorbauernprogramm - BY Besondere Maßnahmen zum Klimaschutz - NDS Grünlandwirtschaft Moor - SH Weidewirtschaft Moor – SH
Staatlich initiiert – privatwirtschaftlich finanziert	Kompensation naturräumlicher Eingriffe	Das BNatSchG verpflichtet zur Kompensation naturräumlicher Eingriffe durch Ausgleich- und Ersatzmaßnahmen. Entwässerte Moore bieten Potenzial zur Aufwertung von Biotopen und können deshalb für die Kompensation genutzt werden.	Ökopunkte und Ökokonten

Quelle: Eigene Darstellung

Nach der Identifikation der Instrumente erfolgt deren Bewertung hinsichtlich Konformität und Effizienz sowie bezüglich der Berücksichtigung der Multidimensionalität der Gemeinwohlleistungen und dem Erfordernis räumlicher Koordination.

Die Analyse zeigt, dass spezifisch auf Paludikultur zugeschnittene Instrumente bislang kaum existieren. Zwar bietet die aktive Bewirtschaftung wiedervernässter Moore zusätzliche ökologische und ökonomische Potenziale gegenüber einer reinen Nutzungsaufgabe, sie ist jedoch mit erhöhten Etablierungs- und Managementkosten verbunden, die nur von wenigen staatlichen Programmen adressiert werden. Zudem ist die Flächenwirksamkeit des bestehenden Politikmixes gering. Instrumente wie MoorFutures bleiben bislang auf wenige hundert Hektar beschränkt. Auch die Komplementarität der Instrumente ist begrenzt, während Multidimensionalität und räumliche Koordination häufig unzureichend berücksichtigt werden. Zusätzliche Transaktionskosten überbetrieblicher Kooperationen werden nur vereinzelt aufgegriffen.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse den Reformbedarf des bestehenden Politikrahmens. Die fortgesetzte Förderung entwässerungsbasierter Landwirtschaft über die GAP setzt widersprüchliche Anreize und erhöht die Opportunitätskosten einer Umstellung. Erforderlich sind konsistente Förderlogiken, eine gezielte Erweiterung der Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen um Paludikulturprogramme sowie stärkere Koordinationsmechanismen. Eine Weiterentwicklung des bestehenden Politikmixes könnte durch die Implementierung marktbasierter Ansätze, beispielsweise durch die Einbindung organischer Böden in ein Emissionshandelssystem (Isermeyer *et al.* 2019) oder durch die Einführung handelbarer „Klimapunkte“, die Klimaschutzmaßnahmen mit neuen Wertschöpfungsperspektiven für landwirtschaftliche Betriebe verknüpfen können, erfolgen.

Betriebs- und volkswirtschaftliche Analyse

Die betriebswirtschaftliche Analyse untersucht die Rentabilität alternativer Moorbewirtschaftungsformen und quantifiziert potenzielle Einkommensverluste infolge einer Umstellung. Zudem identifiziert sie ökonomische Umstellungshemmnisse und liefert so die Grundlage für die Kalibrierung der Zahlungshöhen für das spätere diskreten Entscheidungsexperiment. In der anschließenden volkswirtschaftlichen Betrachtung werden den einzelbetrieblichen Kosten der monetarisierte gesellschaftliche Nutzen gegenübergestellt, um das gesamtwirtschaftliche Wertschöpfungspotenzial von Paludikulturen in Deutschland abzuschätzen.

Die Rentabilitätsberechnung erfolgt mittels Kapitalwertmethode über einen Zeitraum von 20 Jahren bei einem Kalkulationszins von 4 %. Zur besseren Vergleichbarkeit wird der Kapitalwert in einen jährlichen Einkommensbeitrag überführt. Szenario- und Sensitivitätsanalysen berücksichtigen Produktions- und Marktrisiken sowie die Unsicherheit hinsichtlich Biomasseerlösen und der Monetarisierung von Treibhausgasminderungen. Ergänzend werden Vermeidungskosten berechnet.

Die Datengrundlage basiert auf Abrechnungen beauftragter Dienstleistungsunternehmen, die die tatsächlichen Aufwendungen der einzelnen Arbeitsschritte dokumentieren. Ergänzend wurden Erntekosten im Rahmen von Experteninterviews erhoben. Kosten für Handling, Transport und Trocknung der Biomasse wurden anhand von Literaturwerten und eigenen Kalkulationen abgeschätzt. Erträge und die THG-Bilanzen werden im Projekt NAPALU durch mehrjährige Feldversuche verschiedener Projektpartner erfasst. Die Biomassepreise unterscheiden sich je nach Verwendungsrichtung und wurden ebenfalls aus der Literatur abgeleitet. Die Literaturangaben wurden durch Expertengespräche validiert und bei Bedarf ergänzt.

Als Referenz dient der Status quo einer entwässerungsbasierten Nutzung in Form intensiver Milchviehhaltung. Für den Fall der Wiedervernässung wird angenommen, dass die erzeugte Biomasse nicht mehr zur Fütterung von Milchkühen und deren Nachzucht eingesetzt werden kann. Die Opportunitätskosten werden auf Basis des dreijährigen Durchschnitts des Deckungsbeitrags dieses Betriebszweigs ermittelt. Der entfallende Deckungsbeitrag beträgt 1.444 €/ha*a). Zusätzlich werden vermiedene Treibhausgasemissionen aus der Reduktion der Milchviehhaltung in Höhe von 15,77 t CO₂-Äq./(ha*a) berücksichtigt.

Zur Abbildung unterschiedlicher Wertschöpfungspotenziale werden Biomasse- und THG-Szenarien entwickelt. Die Biomasseszenarien unterscheiden sich in Best-, Realistic- und Worst-Case hinsichtlich des Preisniveaus, Kosten und Erträgen. Analog variieren die THG-Szenarien: Im Best-Case werden hohe Emissionen der bisherigen Nutzung (Acker, 40,4 t CO₂-Äq./(ha*a)) und eine sofortige Monetarisierung der Emissionsminderungen (100 €/t CO₂-Äq., später 150 €/t CO₂-Äq.) angenommen. Im Worst-Case liegen geringere Emissionen der Ausgangsnutzung (extensives Grünland, 22,5 t CO₂-Äq./(ha*a)) vor und eine Inwertsetzung erfolgt nicht. Der Realistic-Case basiert auf moderaten Emissionen (intensives Grünland, 31,7 t CO₂-Äq./(ha*a)) mit Monetarisierung ab dem elften Jahr zu 150 €/t CO₂-Äq.

Für jede der untersuchten Paludikulturen wird die Wirtschaftlichkeit demnach in insgesamt neun Szenarien (3×3) berechnet, die sich aus der Kombination unterschiedlicher Biomasse- und Treibhausgasszenarien ergeben. Abbildung 31 stellt zunächst die jährlichen Einkommensbeiträge der verschiedenen Paludikulturen ohne Berücksichtigung monetarisierter Klimaschutzleistungen dar. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die betrachteten Paludikulturen ohne zusätzliche Zahlungen für den Klimaschutzeffekt in der Regel nicht rentabel sind. Eine Ausnahme bildet *Typha angustifolia* im Best-Case-Szenario der Biomassenutzung. Hier wird eine Weiterverarbeitung zu nachhaltigem Dämmmaterial unterstellt, wodurch in der entsprechenden Wertschöpfungskette ein Biomassepreis von 300 €/t TM erzielt werden kann (Eickenscheidt *et al.* 2023). Für Schilf zeigt sich eine stark linksschiefe Verteilung der jährlichen Einkommensbeiträge. Diese ergibt sich daraus, dass in zwei von drei Szenarien hochpreisige stoffliche Nutzungen (Dachreet und Weiterverarbeitung in Compoundierung) angenommen werden, während in anderen Szenarien deutlich geringere Erlöse erzielt werden. Über alle Kulturen und Szenarien hinweg beträgt das durchschnittliche betriebswirtschaftliche Defizit 2.645 €/ha*a).

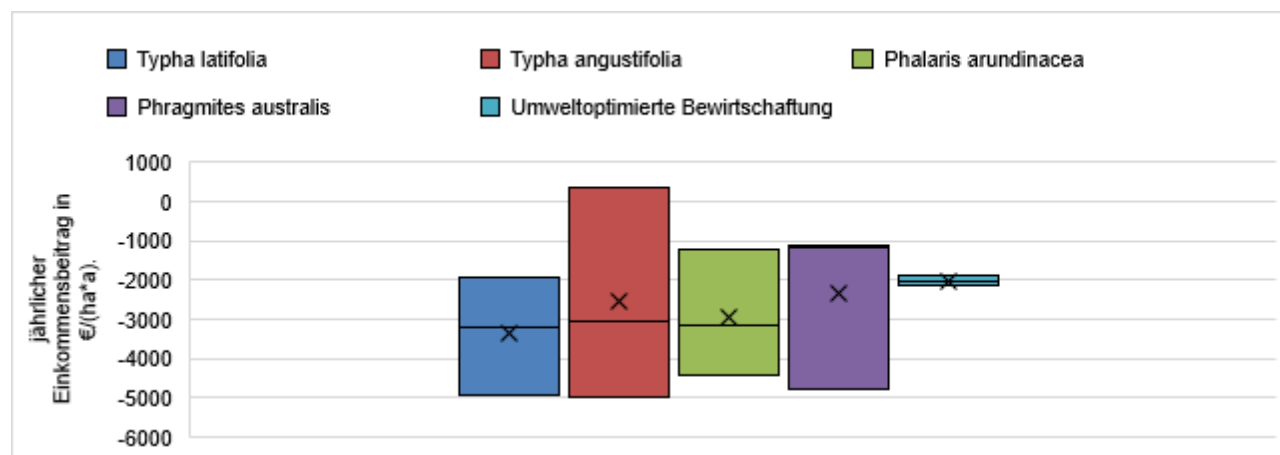


Abbildung 41: Einkommensbeitrag untersuchter Paludikulturen **ohne** Inwertsetzung der Klimaschutzleistung

Quelle: eigene Darstellungen

Abbildung 41 zeigt die jährlichen Einkommensbeiträge in denjenigen Szenarien, in denen die Klimaschutzleistungen monetarisiert werden. Im Vergleich zur Situation ohne Monetarisierung der Klimaschutzleistung steigen die jährlichen Einkommensbeiträge erheblich an. In der Mehrzahl der Szenarien wird eine positive Rentabilität erreicht, selbst nach Abzug der Opportunitätskosten. Besonders deutlich wird dies am Beispiel von Schilf (*Phragmites australis*), dessen Boxplot im Vergleich zur vorherigen Darstellung deutlich nach oben verschoben ist. Ursache hierfür ist die hohe Sequestrierungsleistung dieser Paludikultur in Höhe von 24,8 t CO₂-Äq/(ha*a) die bei entsprechender CO₂-Bepreisung zu substantiellen zusätzlichen Einnahmen führt (Eickenscheidt *et al.* 2023).

Für *Typha latifolia* ergeben sich durchschnittlich 2.292 €/ha*a, für *Typha angustifolia* 3.087 €/ha*a, für *Phalaris arundinacea* 2.420 €/ha*a und für *Phragmites australis* 4.997 €/ha*a). Eine umweltoptimierte Bewirtschaftung ohne gezielte Biomasseverwertung erzielt im Mittel 2.505 €/ha*a).

Gleichzeitig bleibt die hohe Variabilität der Wirtschaftlichkeit zwischen den Szenarien bestehen. Dies verdeutlicht die erheblichen ökonomischen Unsicherheiten, die mit einer Umstellung auf alternative Bewirtschaftungsformen verbunden sind. Vor diesem Hintergrund kann die Übergabe von Flächen in den Naturschutz mit klar definierten Pflegeauflagen eine kalkulierbare Handlungsalternative darstellen.

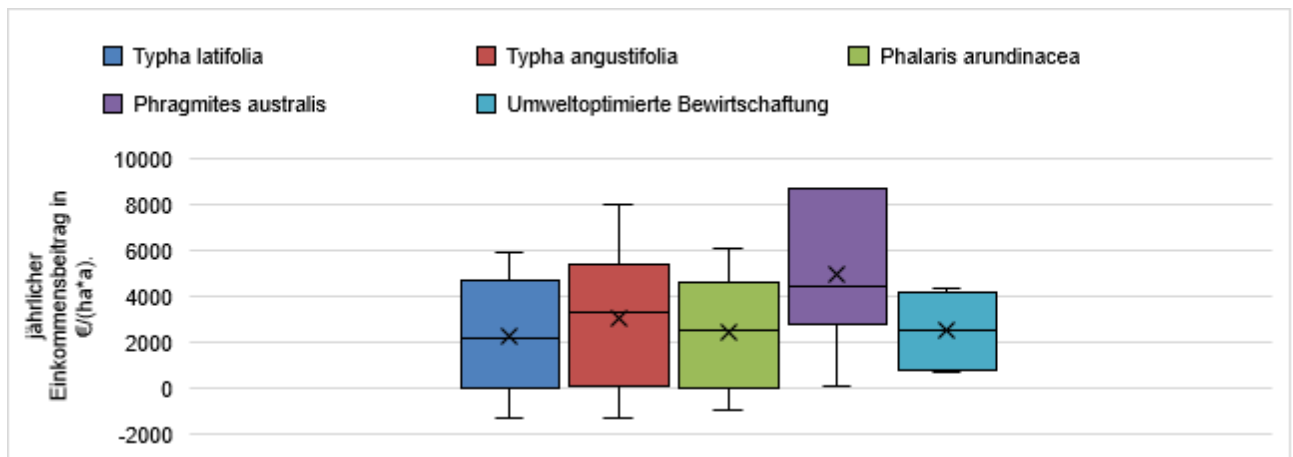


Abbildung 42: Einkommensbeitrag untersuchter Paludikulturen **mit** Inwertsetzung der Klimaschutzleistung

Quelle: eigene Darstellungen

Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Wirkung zentraler Einflussgrößen auf die Wirtschaftlichkeit von Paludikulturen, insbesondere Biomasseerlöse, THG-Inwertsetzung und Opportunitätskosten. Dabei zeigt sich, dass der jährliche Einkommensbeitrag nur gering auf Veränderungen der produktionsbezogenen Einnahmen und Ausgaben reagiert. Im Durchschnitt könnte sich die Wertschöpfung aus der Biomasse um den Faktor 6 verringern, ohne die Rentabilität zu gefährden.

Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit ist hingegen die Monetarisierung der THG-Minderung. Bereits eine Reduktion des Bewertungsansatzes auf den Faktor 0,76 führt im Mittel zum Unterschreiten der Rentabilitätsschwelle. Bei vergüteter THG-Minderung können die Opportunitätskosten hingegen bis zu 4.341,88 €/ha*a betragen, ohne dass die Paludikultur unrentabel wird. Dieser Wert entspricht etwa dem Deckungsbeitrag der Kartoffelproduktion auf Moorstandorten, die in einigen Regionen zu den einkommensstärksten Ackernutzungen zählen (Eickenscheidt *et al.* 2023).

Die Maßnahme verursacht unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten durchschnittliche Vermeidungskosten von 91 €/t CO₂-Äq. (Min: 24,30; Max: 144,46; Median: 101,62; SD: 39). Im intersektoralen Vergleich liegt die Maßnahme damit im Mittelfeld der Vermeidungskosten anderer Klimaschutzmaßnahmen (vgl. Dreisbach *et al.* 2025; Zapf *et al.* 2019). Sie ist folglich als kosteneffiziente Maßnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen einzuordnen. Zugleich stellt ihre Umsetzung eine notwendige Bedingung für das Erreichen der Klimaschutzziele im LULUCF-Sektor dar (Barthelemes 2018).

Das volkswirtschaftliche Wertschöpfungspotenzial berücksichtigt neben einzelbetrieblichen Effekten (Einkommensbeitrag der Biomasseerzeugung gemäß Abbildung 42) auch gesamtgesellschaftliche Kosten für wasserbauliche Maßnahmen und Treibhausgas-Monitoring sowie den Nutzen der Treibhausgaseinsparung. Den Kosten für wasserbauliche Maßnahmen (ca. 4.000 €/ha*a) und THG-Monitoring (47 €/ha*a) stehen entlang des Transformationspfades nach Schäfer (2022) erhebliche Klimanutzen gegenüber. Unter Einbeziehung der monetarisierten Treibhausgasminderungen ergibt sich ein jährlicher Nettonutzen von rund 1,75 Mrd. €, der maßgeblich auf den Klimaschutzeffekt zurückzuführen ist. Dies verdeutlicht die ökonomische Rechtfertigung einer gezielten Förderung von Paludikulturen.

Motivations- und Akzeptanzanalyse

Neue Anreizsysteme zur Förderung von Paludikulturen auf wiedervernässten Mooren sollten eine hohe Akzeptanz bei Landwirten erreichen. Daher werden ihre Präferenzen hinsichtlich der Ausgestaltung entsprechender Förderinstrumente analysiert, einschließlich produktiver Nutzung sowie Kooperations- und Koordinationsmechanismen über Betriebsgrenzen hinweg.

Hierzu wird ein diskretes Entscheidungsexperiment (DCE) durchgeführt, in die Landwirte zwischen hypothetischen Szenarien mit unterschiedlichen Eigenschaften (Attributen) wählen. Mittels ökonometrischer Auswertung lässt sich der Einfluss einzelner Eigenschaften auf die Umstellungsbereitschaft via marginaler Kompensationszahlungen für spezifische Fördermerkmale bestimmen. Tabelle 15 gibt einen Überblick über die berücksichtigten Attribute und Ausprägungen.

Tabelle 15: Attribute und Ausprägungen der Wahlsituationen

Attribute	Wert (Ausprägungen)
-----------	---------------------

Klimaschutzzahlung	2200 €/ha*a; 1700 €/ha*a; 1200 €/ha*a)
Finanzierung der Klimaschutzzahlung	Emissionshandel; GAP-Mittel; Sondervermögen
Umsetzungsmodelle	Keine Hilfestellung Agglomerationsbonus (Gebietsbonus, 300 €/ha*a)); Flurbereinigung; Genossenschaftlicher Ansatz
Beratung	Keine Beratung; Beratung bei Antragstellung; Beratung bei Antragstellung und praktischer Umsetzung; Beratung bei Antragstellung, praktischer Umsetzung und persönliche Weiterbildungen
Art der nassen Flächennutzung	Anbaupaludikulturen; Nasswiese; Übergabe in den Naturschutz mit Pflegeverpflichtung

Quelle: eigene Darstellung

Das DCE wurde mittels eines strukturierten Fragebogens durchgeführt. Die Teilnehmenden trafen in acht Wahlsituationen jeweils eine Entscheidung zwischen drei Alternativen, wobei eine Option den Status quo (entwässerungsbasierte Bewirtschaftung) abbildete und somit die Freiwilligkeit der Teilnahme gewährleistete. Für die gewählte Alternative war zudem der vorgesehene Teilnahmeumfang in Hektar anzugeben. Ergänzend wurden personen- und betriebsbezogene Merkmale erhoben.

Teilnahmeberechtigt waren ausschließlich aktiv wirtschaftende Landwirte mit Moorflächen im Acker- oder Grünland. Reine Verpächter wurden ausgeschlossen. Die Befragung erfolgte zwischen Juni und Oktober 2025 in Moorregionen Niedersachsens, Schleswig-Holsteins, Mecklenburg-Vorpommerns, Brandenburgs und Bayerns.

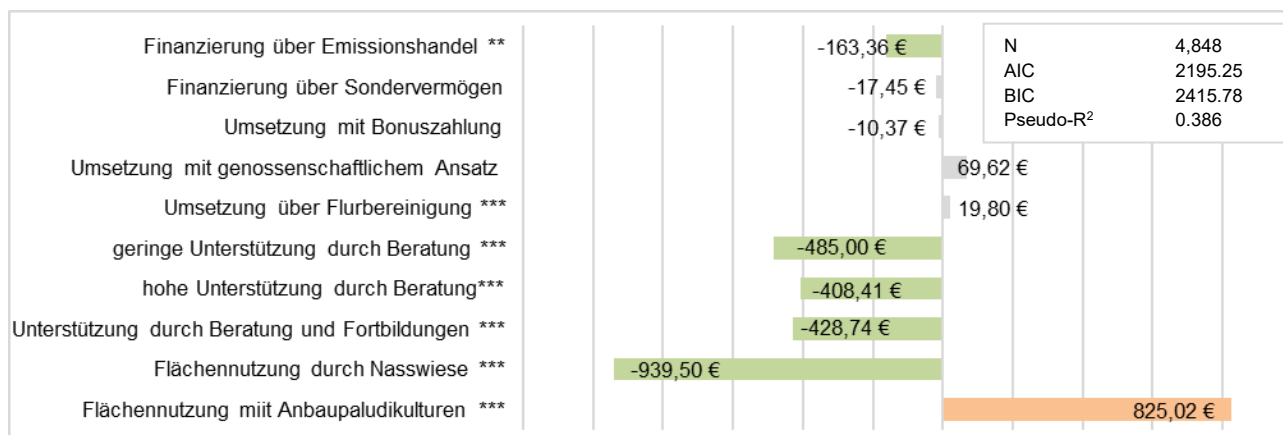


Abbildung 43: Marginale Kompensationszahlungen der Fördereigenschaften in €/ha*a)

Anmerkungen: *** p < 0,01; ** p < 0,05; * p < 0,10.

Quelle: eigene Darstellungen

An der Befragung nahmen 202 Landwirte teil, die jeweils acht Wahlsituationen mit drei Alternativen bewerteten (4.848 Beobachtungen). Der Status quo wurde mit 42,89 % am häufigsten gewählt, was auf eine ausgeprägte Präferenz für die bestehende Bewirtschaftung ist. Die Auswertung erfolgte mittels Mixed-Logit-Modell in Stata. Abbildungen 43 und 44 zeigen die marginalen Kompensationszahlungen.

Eine Integration der Moor-Emissionen in ein Emissionshandelssystem wird gegenüber einer GAP-Finanzierung signifikant bevorzugt. Dadurch kann die erforderliche Zahlung ceteris paribus um 163 €/ha*a) sinken. Hinsichtlich der Umsetzungsmodelle zeigen sich keine signifikanten Präferenzen. Deutlich positiv wirkt hingegen das Angebot von Beratung und Weiterbildung. Insbesondere bei innovativen Verfahren wie der nassen Moorbewirtschaftung scheint Unterstützung bei administrativen Anforderungen und Wissensaufbau entscheidend zu sein. Auch eine Ausweitung der Beratung auf produktionstechnische Aspekte erhöht signifikant die Akzeptanz, wenngleich etwas schwächer ausgeprägt. Gegenüber einer Überführung in den Naturschutz wird eine produktive Nutzung in Form von Nasswiesen signifikant bevorzugt. Diese Präferenz geht mit einer Reduktion der erforderlichen Zahlung um durchschnittlich 939 € je Hektar und Jahr einher. Demgegenüber stößt die Bewirtschaftung mit Anbaupaludikulturen auf Ablehnung, was auf wahrgenommene Risiken sowie noch nicht ausreichend etablierte Wertschöpfungsketten hindeutet.

Ergänzend wird auch der Einfluss individuenspezifischer Eigenschaften der Befragten in die Schätzung einbezogen. Dadurch können nicht nur durchschnittliche Präferenzen erfasst, sondern auch systematische Zusammenhänge zwischen bestimmten sozioökonomischen Merkmalen und der Wahlwahrscheinlichkeit identifiziert werden. Die entsprechenden Schätzergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt. Sie lassen sich analog zu den Ergebnissen aus Abbildung 43 interpretieren.

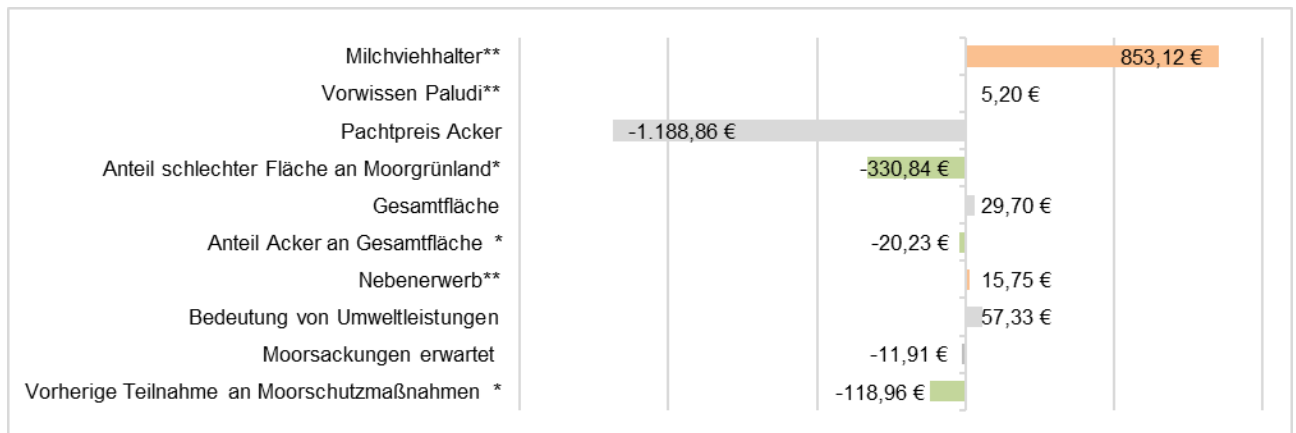


Abbildung 44: Marginale Kompensationszahlungen der individuenspezifischen Eigenschaften in €/ (ha*a)

Anmerkungen: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,10$.

Quelle: eigene Darstellungen

Tabelle 16: Determinanten der eingebrachten Fläche (ha)

Variable	Koeffizient	Std-Fehler
Individuenspezifische Var.		
Vorherige Teilnahme an Moorschutzmaßnahmen	10.200	9.204
Moorsackungen erwartet	6.081**	2.545
Bedeutung von Umweltleistungen	5.795***	1.580
Nebenerwerb	-53.736***	7.298
Anteil Acker an Gesamtfläche	-0.837***	0.130
Gesamtfläche	0.071***	0.014
Anteil schlechter Fläche an Moorgrünland	0.135**	0.062
Pachtpreis Acker	-0.043**	0.016
Vorwissen Paludi	12.909***	2.208
Milchviehalter	-39.157***	6.277
Attribut Var.		
Klimaschutzzahlung	0.017**	0.007
wenig Beratung	4.777	8.333
viel Beratung	10.282	8.586
viel Beratung und Weiterbildung	-3.676	7.836
Agglomerationsbonus	-6.699	8.147
Flurbereinigung	3.369	8.788
genossenschaftlicher Ansatz	-1.519	9.494
Emissionshandel	-1.359	3.638
Sondervermögen	2.276	3.874
Anbaupaludikulturen	-8.192**	3.546
Nasswiesen	6.079	3.851
Cons_	-11.743	19.750
N	900	
R ²	0.5147	
Prob > F	0.0000	

Anmerkungen: *** $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; * $p < 0,10$.

Quelle: eigene Darstellungen

Im zweiten Analyseschritt wurden die Determinanten der angegebenen Umstellungsfläche untersucht. Berücksichtigt wurden dabei nur Entscheidungen zugunsten einer Alternative (N = 900). Im Durchschnitt nahmen die Betriebe mit 45 ha (Min: 1,5; Max: 1000; Median: 15) teil. Die Ergebnisse der entsprechenden Regressionsanalyse sind in Tabelle 16 dargestellt.

Die meisten Vertragsattribute zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Flächengröße. Es scheint, als würden umstellungsbereite Betriebe eher feste Teilflächen vorsehen und diese auch bei variierenden Vertragsbedingungen kaum anpassen. Signifikant wirken lediglich die Höhe der Klimaschutzprämie und die Option Anbaupaludikultur. Eine höhere Klimaschutzvergütung geht mit einer größeren angegebenen Umstellungsfläche einher. Landwirte scheinen nach dem Opportunitätskostenprinzip vorzugehen. Anbaupaludikulturen führen selbst unter grundsätzlich umstellungsbereiten zu geringeren Flächenangaben. Bei den betrieblichen Merkmalen zeigt sich ein differenziertes Bild. Besonders interessant sind die Koeffizienten der Gesamtfläche des Betriebs und das Vorwissen über Paludikulturen, da sich die Vorzeichen zur Analyse der Umstellungsbereitschaft drehen.

Größere Betriebe sind zwar seltener grundsätzlich teilnahmebereit, stellen im Falle einer Teilnahme jedoch absolut mehr Fläche bereit. Vorwissen über Paludikulturen geht tendenziell mit größerer Skepsis einher, umfasst jedoch eine Teilgruppe, die bei positiver Bewertung überdurchschnittlich große Flächen einbringt.

Arbeitspaket 8: Öffentlichkeitsarbeit

Im Arbeitspaket 8 verantwortete 3N die verbundweite Öffentlichkeitsarbeit. Dazu zählten die Konzeption und Pflege der Projektwebsite, die Organisation von Feldtagen und Workshops auf den niedersächsischen Pilotflächen, Presse- und Medientermine (u.a. Ministerinnen-Besuch und Pressetermin in Bederkesa), Exkursionen für Fachpublikum sowie die Vorbereitung und Durchführung der Abschlussveranstaltung.

Außerdem wurden ein Projektfilm realisiert, zahlreiche Fachvorträge und Posterbeiträge auf Tagungen eingebracht und externe Demonstrationsbeispiele zu Paludikultur-Baustoffen und -Nutzungskonzepten in die Kommunikation integriert, um die Übertragbarkeit der im Projekt entwickelten Verwertungspfade und Governance-Ansätze zu unterstreichen.

Tabelle 17: Veranstaltungen & Workshops (inkl. Vorträge, Besuche, Dialoge)

Datum	Thema / Veranstaltung	Institution / Ort	Art / Rolle
07.12.2023	Workshop Paludikultur: Klima schützen und Rohstoffe erzeugen	3N	Workshop
14.09.2023	Deutscher Grünlandtag	Hatten	Vortrag / Messestand
03.11.2023	Moorgipfel	Osterholz	Vortrag, Podiumsdiskussion
09.11.2023	Exkursion Polder Bederkesa I	Bederkesa	Vortrag, Exkursion
27.07.2023	Pressetermin am Polder Hohenböken	Hohenböken	Pressetermin
05.09.2023	MRH-Veranstaltung	Metropolregion Hamburg	Teilnahme
08.09.2023	Großer Moor-Feldtag	Succow Stiftung	Teilnahme
19.–	Power to the Peatlands Conference	Antwerpen	Teilnahme
20.09.2023			
21.09.2023	Deutscher Torf- und Humustag	Bad Zwischenahn	Teilnahme
27.09.2023	Peat Talks	HSWT	Teilnahme
07.12.2023	Öffentlicher Workshop im Klimacenter Werlte (NAPALU, hybrid)	Klimacenter Werlte	Workshop / Presse
24.01.2024	Auftaktveranstaltung PaludiZentrale	FNR	Veranstaltung
22.02.2024	3N Mitgliederversammlung	Holzmühle Westerkamp	Mitgliederversammlung
01.02.2024	Workshop Circular Economy, Groningen	Hanzehogeschool	Workshop
07.03.2024	Spatenstich Rohrkolbenpolder	3N	Spatenstich / Termin
07.03.2024	Workshop „Wasser und Nährstoffe: Existenzfragen der Wiedervernässung und Paludikultur“	3N	Workshop
11.–	Agrarforschung zum Klimawandel	DAFA	Tagung / Vortrag
14.03.2024			
16.04.2024	Besuch Studiengruppe VHS Potshausen	3N	Vortrag / Exkursion
26.06.2024	61. Sitzung Beirat NawaRo und Bioökonomie	Nds. MELV	Vortrag
30.05.2024	3. Moordialog Landkreis Cuxhaven	Mooragentur LK Cux	Vortrag
04.06.2024	Torfmoosfarming und Naturschutz: ein Für und Wider	3N	Vortrag
05.06.2024	Dialog Niedersächsische Moorlandschaften	Nds. MU	Vortrag / Dialog
10.–	Auftaktveranstaltung PaludiNetz	PaludiZentrale/Braunschweig	Tagung / Workshop
12.06.2024			
30.07.2024	Besuch Firma Butterweck mit FNR und MdB Gitta Connemann (Vorstellung NAPALU und RoNNi)	FNR / Butterweck	Besuch / Vortrag
06.08.2024	Besuch Stefanie Koch EDR	3N	Vortrag / Besuch
28.–	Besuch MdB Christina-Johanne Schröder bei 3N	3N	Austausch, Vortrag,
29.08.2024	(Science Cube, Flächenbesichtigung, Projektvorstellung NAPALU)		Organisation
08.08.2024	Termin Fraunhofer IPA	3N	Fachgespräch
13.08.2024	Flurbereinigung Ahlenmoor	ARL	Veranstaltung
15.08.2024	Torfersatzforum (TEF)	Nds. MELV	Tagung / Vortrag
12.09.2024	Workshop „Mit Torfmoosfarming in die Fläche“	3N	Workshop
18.–	International Peatland Science Conference (iPSC)	Freising	Teilnahme / Beitrag
20.09.2024			
27.09.2024	Tag der offenen Tür Klimacenter Werlte	3N	Messestand /

Datum	Thema / Veranstaltung	Institution / Ort	Art / Rolle
07.11.2024	Besuch Biosintrum Hegewarren (NL), Besichtigung Rohrkolbenpolder, 3D-Druck mit Paludi-Biomasse	Biosintrum NL	Präsentation Besuch / Vortrag
17.10.2024	DSV-Bodentage	DSV	Vortrag
18.03.2025	MoWa Abschlussveranstaltung	LWK	Abschlussveranstaltung
19./20.03.2025	Statusseminar „Torfminderung im Gartenbau“	FNR	Seminar / Vortrag
16.04.2025	Workshop Erntetechnik	3N + AgrotechValley + GMC	Workshop
10.06.2025	Statusseminar „F+E Paludikultur“	BMLEH/FNR	Seminar / Vortrag
10.06.2025	Vorstellung bisheriger Ergebnisse von NAPALU beim FNR „Statusseminar FuE Paludikultur“	BMLEH	Vortrag
16.06.2025	Beiratssitzung Kompetenzstelle Paludikultur Nds	ML Hannover	Vortrag
25.08.2025	SchilfWorkshop PaludiFarming	online	Vortrag
15.09.2025	Nds. Beirat NaWaRo	Klimacenter Werlte	Vortrag
30.10.2025	Abschlussveranstaltung NAPALU	Cube Oldenburg	Abschlussveranstaltung
12.-13.11.2025	MoorNet Abschlussveranstaltung	Berlin	Diskussionsteilnahme
24.02.26	Ernte & Befahrbarkeitstests Paludifarming (Wittrock, 3N)	Bederkesa	Versuch & Ernte

Tabelle 18: Messen, Messestände & Infostände

Datum	Messe / Veranstaltung	Institution / Ort	Art / Rolle
12.–18.11.2023	Agritechnica, Hannover	–	Messestand
17.–22.01.2024	Grüne Woche	Berlin	Moorstand des Thünen-Instituts in der BMLEH-Halle
11.–13.06.2024	DLG-Feldtage	DLG / FNR	Messe / Projekt-Präsentation
12.–15.07.2024	Tarmstedter Ausstellung	Ausstellungs-GmbH Tarmstedt	Infostand
30.05.2024	3. Moordialog Landkreis Cuxhaven	Mooragentur LK Cux	Begleitende Ausstellung
04.–05.06.2024	Woche der Umwelt	DBU / Berlin	JKI-Stand „Torfersatz“
27.09.2024	Tag der offenen Tür Klimacenter Werlte	3N	Messestand
14.07.2025	Tarmstedter Ausstellung	Tarmstedt	Messestand mit 3N
22.–26.9.2025	RRR	Greifswald	Infostand mit Exponaten (mit 3N Kompetenzstelle)
09.–15.11.2025	Agritechnica	Nds. MELV	Messestand
16.–25.01.2025	Grüne Woche	Berlin	Moorstand des Thünen-Instituts in der BMLEH-Halle
12.–13.03.2026	Eco Congress 2026	3N, Ecoras	Messestand & Vorträge

Tabelle 19: Veröffentlichungen & Medienbeiträge

Datum	Titel	Medium / Journal
2023	Projektvorstellung NAPALU auf der Homepage von 3N und in den 3N-Nachrichten	3N-Website, 3N-Nachrichten
06.12.2023	„PALUDIKULTUR“ – Fachtagung im Klimacenter Werlte (Beitrag / Interview)	EmsVechteWelle „Durch den Tag“
05.04.2024	Rohrkolbenernte Polder Bad Bederkesa	Online-Meldung 3N / paludikultur-niedersachsen.de
20.05.2024	Gemeinsame Pressemitteilung mit FNR zu den DLG-Feldtagen	3N, FNR, paludikultur-niedersachsen.de
2024	„Wie gedruckt? In 3D mit Schilf!“	Paludikultur-Newsletter, Greifswald Moorwissen
2024	Interview HS Bremen	– (Online / Print der HS Bremen)
08.03.2024	„Paludi-Farming: Ein wichtiger Baustein für den niedersächsischen Klimaschutz“	Nordsee-Zeitung
30.05.2024	„3N und FNR präsentieren mit Paludikulturen innovativen Pflanzenbau“	BI GaLaBau
10.06.2024	„Baumaterialien statt Milchkühe?“	Cuxhavener Nachrichten
10.06.2024	„Spatenstich für Paludikultur-Polder“	Land & Forst
12.09.2024	MdB Christina-Johanne Schröder informiert sich über Moorschutz und Paludikultur	3N-Homepage, 3N-Nachrichten
Januar 2025	Aufbau der neuen Flächenbeschilderung	
2025	Film „Ernte von Paludikulturen“	Filmbeitrag
2025	Film „Verwertung von Paludikulturbiomasse in Kunststoffen“	Filmbeitrag
Februar 2026	Leitlinien zum Produktionsmanagement von Paludikulturen	Ausarbeitung
Februar 2026	Infolyer zu Paludikulturen	Flyer
Februar 2026	Broschüre „Factsheet Paludikultur“	Broschüre
März 2026	Abschlussbericht NAPALU	Abschlussbericht

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es wurden keine Schutzrechte angemeldet oder in Anspruch genommen.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Aus ökonomischer Sicht sind die Erfolgsaussichten von Paludikulturen nach dem NAPALU Projektende grundsätzlich positiv, hängen jedoch maßgeblich von der weiteren politischen Rahmensetzung und dem Aufbau tragfähiger Wertschöpfungsketten ab. Die im Projekt durchgeführten Kapitalwertberechnungen zeigen, dass die untersuchten Paludikulturen bei heutigen Marktbedingungen ohne Vergütung der Klimawirkung im Mittel ein betriebswirtschaftliches Defizit von rund 2.645 € je Hektar und Jahr gegenüber der entwässerungsbasierten Referenznutzung verursachen; nur in Einzelfällen (z.B. *Typha angustifolia* mit hochwertiger stofflicher Nutzung als Dämmstoff bei etwa 300 €/t TM) können bereits heute kostendeckende Einkommensbeiträge erzielt werden. Hierbei ist zu beachten, dass bei größeren Flächen die Erntekosten im Verhältnis zum Ertrag (bei kleineren Flächen) geringer werden. Werden jedoch die Treibhausgasminderungen der Kulturen monetarisiert (z.B. ab dem elften Jahr mit 150 €/t CO₂-Äquivalent), drehen sich die meisten Szenarien in einen positiven Bereich um, wobei insbesondere Phragmites-Systeme aufgrund hoher Sequestrierungsleistungen (ca. 24,8 t CO₂-Äquivalente/ha·a) und umweltoptimierte Nutzungen ohne gezielte Biomasseverwertung deutlich positive Einkommensbeiträge pro Hektar erreichen; volkswirtschaftlich ergibt sich dann – trotz zusätzlicher Investitions- und Monitoringkosten – ein jährlicher Nettonutzen von etwa 1,75 Mrd. €, was die gesamtwirtschaftliche Tragfähigkeit einer breiteren Einführung von Paludikulturen untermauert. Vor diesem Hintergrund ist mittelfristig mit einer wachsenden Nachfrage nach Paludikultur-Biomasse zu rechnen, sofern CO₂-Bepreisung, Emissionshandel oder spezifische Klimapunkte-Systeme tatsächlich implementiert und organische Böden systematisch einbezogen werden. Gleichzeitig zeigt die Akzeptanzanalyse, dass viele Betriebe die Umstellung nur bei verlässlichen Klimaschutzzahlungen, einfacher Administration und intensiver Beratung in Betracht ziehen, und produktiv genutzte Nasswiesen deutlich bevorzugen. Die im Projekt erprobten Verwertungspfade – Bioraffination, Faserguss, Faserspritzguss, thermoplastische Compounds und 3-D-Druck – konnten die technische Machbarkeit für alle untersuchten Paludikultur-Biomassen belegen und liefern damit eine wichtige Grundlage für den Aufbau regionaler Wertschöpfungsketten in den Bereichen Verpackung, Bau (Dämmstoffe, Dachreet), Substrate und Biokunststoffe; zugleich wurden prozessuale Engpässe (Schaumbildung, Partikelgrößenverteilung, Werkzeugverstopfung) identifiziert, die vor einem industriellen Roll-out noch adressiert werden müssen.

In Kombination mit den im Projekt nachgewiesenen stabilen Erträgen unter wiedervernässten Bedingungen und dem hohen Treibhausgas-Minderungspotenzial, insbesondere von Carex-Systemen, ist davon auszugehen, dass Paludikulturen langfristig zu einem eigenständigen Betriebszweig mit robusten Erlösströmen aus Biomasseverkauf und Klimaschutzdienstleistungen ausgebaut werden können, sofern die derzeit noch fragmentierten Governance-Instrumente weiterentwickelt, bestehende GAP-Anreize zugunsten nasser Nutzung umgestellt und Pilot-Wertschöpfungsketten (z.B. für Schilf-Dachreet, Paludi-Compounds, Paludi-Substrate) in Richtung Marktreife und Skalierung geführt werden.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Wissenschaftlich und technisch eröffnen die im Projekt erzielten Ergebnisse sehr gute Perspektiven für eine weiterführende Forschung und Entwicklung entlang der gesamten Paludikultur-Wertschöpfungskette:

Auf der Prozess- und Systemebene liegt mit den umfassenden Stoffhaushalts- und THG-Daten aus Freisinger Moos und Langenmosen eine hochwertige Datengrundlage vor, mit der standortspezifische Managementempfehlungen (u.a. Priorisierung von Carex-Systemen, Einschränkung von *Typha* auf nährstoffreiche Standorte, Ein-Schnitt-Nutzung von *Phalaris*) weiter verfeinert und in europäische Synthesen für Klimainventare und Leitlinien eingespeist werden können; zwei begutachtete Open-Access-Publikationen und eine EU-weite Synthesestudie sind bereits in Vorbereitung, sodass von einer hohen internationalen Sichtbarkeit und Anschlussfähigkeit der Ergebnisse auszugehen ist. Mit dem für Niedermoor-Paludikulturen angepassten SWAP-WOFOST-Modell steht erstmals ein prozessbasiertes Werkzeug zur Verfügung, das Erträge von *Phalaris* unter drei Wasserstandsklassen robust abbildet und auf Klimaszenarien bis 2050 übertragbar ist; auf dieser Basis lassen sich künftig Standort- und Politik-Szenarien (z.B. veränderte Wasserregime, Düngestrategien) quantitativ durchspielen und um Nährstoffmodule erweitern, da die fehlende Abbildung von N-Limitierung als zentraler wissenschaftlicher Weiterentwicklungsbedarf klar identifiziert wurde. Die umfangreichen Biodiversitätsdaten mit 201 nachgewiesenen Arten, hohen Anteilen gefährdeter Libellen- und Vogelarten und detaillierten Struktur- und Managementempfehlungen liefern eine belastbare Grundlage für weitere ökologische Forschung zu Artengemeinschaften in Paludikulturen und zur Ableitung naturschutzfachlicher Mindeststandards, etwa für Monitoringprogramme, Indikatorenentwicklung

oder die Integration von Paludikultur in Biotopverbund- und Schutzgebietskonzepte. Technisch konnten Bioraffination, Faserguss, Faserspritzguss, Compounds und 3-D-Druck mit Paludikultur-Biomasse als grundsätzlich machbar demonstriert werden; hier bestehen aussichtsreiche Entwicklungslinien zur Optimierung der Vorbehandlung (Zerkleinerung, Auswaschung schaubildender Inhaltsstoffe), der Prozessführung (Vermeidung von Schaumbildung, Verstopfungen, Vakuumstörungen) und der Werkstoffrezepturen (Partikelgrößensteuerung, Additive), um aus den bereits erzeugten 59 Compoundreihen und den erfolgreichen Industrieversuchen standardisierbare Produkte für Bau-, Verpackungs- und Substratmärkte zu entwickeln.

Insgesamt begründet NAPALU damit eine starke wissenschaftliche Ausgangsposition für Folgeprojekte zu Modellweiterentwicklung, Langzeit-Monitoring und Biodiversität in Paludikulturen sowie für technologische F&E-Vorhaben zur Skalierung von Bioraffination und Faser-/Compound-Anwendungen, wobei die bereits etablierte Mess- und Versuchsinfrastruktur (Messpolder, Dauerquadrate, Materialströme) und die vorhandenen Kooperationen mit Hochschulen, Behörden und Industriepartnern einen schnellen Übergang in weiterführende Forschung und Demonstration ermöglichen.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die wissenschaftliche Anschlussfähigkeit des NAPALU-Projekts ist hoch, da mit den umfangreichen THG-, Stoffhaushalts-, Wachstums- und Biodiversitätsdatensätzen aus Freisinger Moos, Langenmosen und den niedersächsischen Standorten eine belastbare, mehrjährige Referenzbasis für weitere experimentelle und modellgestützte Arbeiten zu Paludikulturen geschaffen wurde, die bereits in geplante Open-Access-Publikationen und eine europäische Synthesestudie zu Anbau-Paludikulturen einfließt und nach erfolgreicher Begutachtung über Repositorien der internationalen Fachcommunity zur Verfügung gestellt werden soll. Im Projekt NAPALU wurden erstmals räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Daten zur Nährstoffsituation von Paludikulturen erfasst. Die Ergebnisse unterstreichen, dass für eine nachhaltige Bewirtschaftung von Paludikulturen nicht nur das Wasser-, sondern auch das Nährstoffmanagement berücksichtigt werden muss. Mit der Anpassung und Kalibrierung von SWAP-WOFOST an hohe Grundwasserstände und Phalaris-Bestände unter verschiedenen Wasserständen existiert zudem ein etabliertes, prozessbasiertes Modell, das unmittelbar für weitere Kulturen (z.B. Phragmites, Carex), für N-/P-Module erweitert werden kann und damit eine klare Grundlage für Verbund- und Folgeprojekte in der Agrarklimaforschung bietet. Die im Projekt entwickelten technischen Nutzungspfade – Bioraffination mit nachgewiesener hoher Saftausbeute, industriell getesteter Faserguss aus Nasswiesen-Biomasse sowie die erfolgreiche Compoundierung und Spritzguss-/3-D-Druck-Verarbeitung mit bis zu 30 Masse-% Paludibiomasse (insbesondere Phragmites und Typha) – sind mit bestehenden Lebensmittel-, Faser-, Verpackungs- und Biokunststoffketten kompatibel und lassen sich in kooperative F&E-Vorhaben mit Maschinenbau-, Werkstoff- und Verarbeitungsindustrie überführen. Wirtschaftlich besteht eine deutliche Anschlussfähigkeit, weil NAPALU detaillierte Kosten- und Erlösstrukturen, Opportunitätskosten und Vermeidungskosten für zentrale Paludikulturen bereitstellt, die in Szenarien mit und ohne Monetarisierung der Klimaschutzleistung zeigen, dass Paludikulturen ohne CO₂-Bepreisung an den untersuchten Standorten im Mittel ein jährliches Defizit von rund 2.645 €/ha verursachen, bei vergüteter THG-Minderung aber in der Mehrzahl der Szenarien positive Einkommensbeiträge erzielen und volkswirtschaftlich einen jährlichen Nettonutzen von etwa 1,75 Mrd. € generieren können – ein starkes Argument für die Integration in Emissionshandel, Klimaprämien und neue Agrarumweltprogramme. Die Governance-Analyse identifiziert konkrete Reformbedarfe im bestehenden Politikmix (GAP-Logik, geringe Flächenwirkung, mangelnde Koordination) und beschreibt anschlussfähige Instrumentenpfade – von Emissionshandel für organische Böden über handelbare Klimapunkte bis hin zu gezielten Paludikultur-AUKM –, während die Akzeptanzstudie mit 202 Landwirtinnen und Landwirten zeigt, dass produktive Nasswiesen-Nutzung, eine Finanzierung über Emissionshandel sowie umfassende Beratung die erforderlichen Zahlungen pro Hektar deutlich senken und damit wichtige Anknüpfungspunkte für Praxisnetzwerke, Pilotprogramme und regionale Projektverbünde liefern. Schließlich schafft die technologische Arbeit zu Bioraffination, Faserguss, Compounds und 3-D-Druck eine enge Brücke zu nachgelagerten Wertschöpfungsstufen (Dämmstoffe, Verpackungen, Formteile, Substrate), sodass Unternehmen in den Bereichen Baustoffe, Verpackung, Gartenbau und Biopolymere auf unmittelbar prüfbar Prozess- und Materialergebnissen aufsetzen und in gemeinsamen Demonstrations- und Skalierungsprojekten mit der Landwirtschaft neue Geschäftsmodelle für Paludibiomasse entwickeln können.

3. Erkenntnisse von Dritten

Erkenntnisse von Dritten zeigen, dass Paludikultur-Biomasse bereits heute konkret als Rohstoff in Bau- und Dämmstoffen eingesetzt wird und damit technologische Reife, Marktinteresse und Transferpotenzial belegt: Das Projekt „Kleinod“ von Moor and more in Vorpommern demonstriert ein Tiny House, das systematisch mit Paludi-Baustoffen wie Schilf, Rohrkolben, Erle, Seggen und Rohrglanzgras errichtet wurde und als Ferienunterkunft, Büro auf Zeit und Künstlerresidenz in einem wiedervernässten Moor genutzt wird, wodurch die Kombination aus Klimaschutz, lokaler Wertschöpfung und nachhaltigem Bauen sichtbar wird (Moor and more n.d.). Gemeinsam mit dem Greifswald Moor Centrum wurde dieses Konzept im „Paludi-Tiny House“ weiter skaliert, das mit Schilf auf dem Dach, Rohrkolben in Wandaufbauten und Erlenholz im Innenausbau ausgestattet ist und 2021 auf einer Roadshow mit Stationen u.a. auf der Baumesse NordBau, Klimaaktionstagen und Fachveranstaltungen als mobiles Demonstrationsobjekt für klimafreundliches Bauen mit Moorpflanzen eingesetzt wurde (Moorwissen 2021; Greifswald Mire Centre 2021a).

Einen technologisch besonders weit fortgeschrittenen Ansatz stellt das von Werner Theuerkorn entwickelte „Typhaboard“ dar, ein magnesitgebundener Plattenwerkstoff aus Rohrkolbenblättern, der in Kooperation mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik zu einem tragenden, dämmenden Wandbaustoff mit hoher Druckfestigkeit, gutem Brand- und Schallschutz, Schimmelresistenz und vollständiger Kompostierbarkeit weiterentwickelt wurde und bereits in Praxisobjekten wie Fachwerk-Sanierungen, dem Typhahouse-Pavillon auf der EXPO in Mailand und einem Saunagebäude in Radolfzell eingesetzt wurde (Grimm n.d.; Krus *et al.* 2013; Krus *et al.* 2014; Fraunhofer IBP n.d.).

Parallel dazu hat die Universität Greifswald gemeinsam mit dem Fraunhofer-WKI eine aufgeschäumte Platte aus Schilf, Rohrkolben, Seggen und Rohrglanzgras entwickelt, die klassischen Holzsäumen in Zug- und Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Brandverhalten mindestens ebenbürtig ist und explizit als Paludikultur-Produkt für Dämm- und Leichtbauanwendungen positioniert wird (Greifswald Moor Centrum 2021b).

Diesen Vorhaben wurde für weitere Forschungsarbeiten Biomasse aus dem Projekt bereitgestellt. In den Produktauftritten der beteiligten Initiativen wird die Herkunft des Materials aus NAPALU kenntlich gemacht, sodass der Beitrag des Projekts zur Entwicklung innovativer und nachhaltiger Produkte sichtbar wird.

Überblicksarbeiten und Fachpräsentationen, etwa von Tanneberger, sowie Informationsportale wie www.paludikultur-niedersachsen.de oder die Borschüre PaludiKatalog des GMCs listen darüber hinaus eine wachsende Palette marktnaher Produkte – von Rohrkolben-Dämmplatten und Schilf-/Nassgras-Dämmmatten mit europäischer Marktzulassung bis hin zu Einblasdämmstoffen und Trockenbauplatten – und betonen, dass bereits mit einem rechnerischen Anteil von 5% Paludi-Biomasse am Dämmstoffmarkt ein zweistelliger Prozentsatz des nationalen Wiedervernässungspotenzials bedient werden könnte (Tanneberger 2024; Paludikultur Niedersachsen n.d.).

Insgesamt bestätigen diese extern entwickelten Produkte und Demonstrationsbauten, dass Paludikultur-Biomasse nicht nur ein theoretisch geeigneter, sondern bereits praktisch genutzter Rohstoff für innovative Naturbaustoffe ist und damit die im Projekt NAPALU verfolgten Nutzungspfade und Geschäftsmodell-Überlegungen maßgeblich stützt.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Arbeitspakete und deren Informationsfluss.....	1
Abbildung 2: Lage der Pilotsites von Nord nach Süd: Bederkesa, Hohenböken, Dümmer, Mesokosmen, Langenmosen und Freisinger Moos	2
Abbildung 3: Bohrgänge als Schadbild an Typha-Stängeln durch minierende Larven (vermutlich vom Großen Rohrkolbenzünsler - <i>Calamotropha paludella</i>)	12
Abbildung 4: Anzahl der Triebe (A) und Trockenmasse-Erträge (B) (2024/25) in Abhängigkeit der Nährstoffversorgung (vgl. Tabelle 6); (Tukey-Test $p \leq 0.05$, unterschiedliche Buchstaben zeigen Signifikanz an).....	12
Abbildung 5: Versuchsdesign für die Erfassung der Biomasse, der Bodeneigenschaften und der Moorwasserstände	14
Abbildung 6: Mittlere Moorwasserstände in der Vegetationsperiode der untersuchten Paludikulturen. Fehlerbalken: Standardabweichung aller Moorpegel.	15
Abbildung 7: Wasserqualität im Zulaufwasser. N: Stickstoff, P: Phosphor. Bad Bederkesa: Grabenwasser, Hohenböken Grabenwasser, zeitweise in Kombination mit Grundwasser, Dümmer: Grabenwasser mit Ablauf einer kommunalen Kläranlage, Langenmosen: Überrieselung mit Wasser	15
Abbildung 8: Pflanzenverfügbare Nährstoffe im Boden. a): PCAL: Calcium-Acetat-Lactat-löslicher Phosphor, b) PDT: Dithionit-löslicher Phosphor, c) Nmin: Nitrat und Ammonium (Calciumchlorid-Extraktion), d) KCAL: Calcium-Acetat-Lactat-lösliches Kalium. Mittelwert und Standardfehler aller Proben und aller Varianten am jeweiligen Standort	16
Abbildung 9: Erträge aller Varianten mit Typha und Phragmites, Unterteilung nach Zielkultur, Binse (<i>Juncus effusus</i>) und weiter Begleitvegetation (Rest). OBA: Oberbodenabtrag.....	17
Abbildung 10: Vergleich von Trockenmasseerträge (TM) und C:N-Verhältnissen von Winter- und Herbsterten.	17
Abbildung 11: Trockenmasseerträge (TM) von <i>Phalaris arundinacea</i> in Abhängigkeit von Moorwassertand, Standort und Management	18
Abbildung 12: Links: Freisinger Moos: Cellulosegehalte in <i>Phalaris</i> über alle Wasserstände in Abhängigkeit der organischen Dünger (Biogasgärrest flüssig: BG_flue, Biogasgärrest separiert: BG_sepa). Rechts: Langenmosen: Cellulosegehalte in <i>Carex</i> , <i>Phalaris</i> , <i>T. latifolia</i> in Abhängigkeit vom Schnittregime.	19
Abbildung 13: Faserzusammensetzung (A: Lignin, B: Cellulose, C: Hemicellulose) bei <i>Phalaris</i> , <i>T. angustifolia</i> und <i>T. latifolia</i> in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha; Gamma-verteiltes GLM mit logarithmischer Link-Funktion; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; $n = 3$ je Nährstoffstufe).....	19
Abbildung 14: Zusammensetzung der Reethalme nach Größenklassen: K (kurz 80-150 cm), M (mittel 151 – 180 cm), L (lang 181 – 240 cm) in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha).....	20
Abbildung 15: Faserzusammensetzung (A: Lignin, B: Cellulose, C: Hemicellulose) aller Halmabschnitte (0-6, 6-12, 45-55 cm) von <i>Phragmites</i> in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24. D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha; Lineares Modell; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; $n = 24$ (D1/D2), $n = 18$ (D0).....	20
Abbildung 16: Geschlossener Kresstest mit ungewaschenem und mit gewaschenem 6 Monate gereiftem <i>Carex</i> -Kompost.	22
Abbildung 17: Überblick der Messvarianten am Standort Hohenböken Moor. Status quo: Kein Oberbodenabtrag bzw. kein Eingriff in Wasser- und Flächenmanagement.....	23
Abbildung 18: Vergleich zwischen Varianten mit Oberbodenabtrag (OBA) und ohne Oberbodenabtrag. Dargestellt sind Grundwasserstand, Methanemissionen (CH_4), Boden-Nährstoffgehalte (PCAL und Nmin), Biomasseerträge sowie der Netto-Ökosystemaustausch (NEE). Die Diagonale kennzeichnet die 1:1-Linie.	25
Abbildung 19: Überblick der Treibhausgasbilanzen ($\text{NEE} = \text{Nettoökosystemaustausch}$) für die Paludikulturvarianten mit und ohne Oberbodenabtrag (OBA) sowie Damm und Grünland.	26
Abbildung 20: Allgemeiner Aufbau des Versuchsfeldes mit Parzellen für die Entnahme von Boden- und Wasserproben.....	30
Abbildung 21: Veränderungen der Bodeneigenschaften unter verschiedenen Behandlungsbedingungen und zu verschiedenen Jahreszeiten in einer Tiefe von 0 bis 20 cm nach Düngung unter unterschiedlichen	

Grundwasserspiegeln. Frühjahr und Sommer 2023 und 2024. (Boxplots der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).....	32
Abbildung 22: Ertrag von Rohrglanzgras (<i>Phalaris arundinacea</i>) im Zweischnittsystem (Winter- und Sommerschnitt) in den Jahren 2023 und 2024 unter verschiedenen Düngungsregimen und Grundwasserspiegeln.....	32
Abbildung 23: Konzentration ausgewählter Nährstoffe im oberflächennahen Grundwasser vor und nach einer Düngung mit konstantem oder variablem Grundwasserstand und flüssigem oder festem Dünger 2024.....	33
Abbildung 24: Die vom Aussterben bedrohte Vogel-Azurjungfer (<i>Coenagrion ornatum</i>) konnte in den Paludikulturen in Langenmosen nachgewiesen werden. Foto: Christoph Moning.	37
Abbildung 25: Verteilung der Artenzahl pro Vegetationsaufnahme in Paludikulturen und Referenzflächen. Unterschiedliche Buchstaben stehen für statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Varianten.	37
Abbildung 26: Ergebnisse der Kalibrierung (2016 – 2018) für Ertrag (oben) und LAI (unten), sowie der Validierung des Ertrags (2019 – 2021 oben). Die Balken und Punkte repräsentieren Mittelwerte und die Fehlerbalken Standardabweichungen von jeweils vier Replikaten.	42
Abbildung 27: Prognostizierte jährliche Trockenbiomasse-Erträge für hohe Wasserstände anhand von Klimaszenarien des RCP 4.5 Kernensembles v2018 des DWD für die Jahre 2022 bis 2050. Die Linie entspricht den Mittelwerten und die schattierte Fläche der Standardabweichung der sechs Szenarien. 2022 ist als Jahr der Pflanzung (äquivalent zur Kalibrierung) zu verstehen und in der Grafik zur besseren Skalierung abgeschnitten.	42
Abbildung 28: Geprüfte Nasswiesenbiomasse beim DIL	44
Abbildung 29: Spannung-Dehnung-Kurven der Zugversuche der Mini-Zugstäbe aus den im Faserspritzgussverfahren im Labormaßstab hergestellten Proben.	46
Abbildung 30: Das Ausgangsmaterial der Nasswiesenbiomasse (geschnitten, getrocknet und in Ballen gepresst).....	46
Abbildung 31: Schaumbildung durch die Zugabe der Nasswiesenbiomasse in den Pulper. Links: Schaumbildung vor Zugabe und rechts: sehr starke Schaumbildung mit Überlauf nach Zugabe des Leimungsmittels.....	47
Abbildung 32: Störung der Werkzeugdichtigkeit durch grobe Pflanzenteile.	48
Abbildung 33: Anhaftendes Bauteil am Transferwerkzeug.	48
Abbildung 34: Darstellung der drei unterschiedlichen Biomasseaufbereitungsarten, exemplarisch am Beispiel von <i>Phragmites australis</i> ; oben: grob gehäckselt, unten links: Zerkleinerung mit Ultrazentrifugalmühle, rechts unten: Feinvermahlen im industriellen Maßstab.....	51
Abbildung 35: Darstellung der Zugeigenschaften ausgewählter Compounds mit PLA Ingeo 3251 D-Matrix und grob gehäckselter Biomasse.	52
Abbildung 36: Auswirkungen unterschiedlicher Additivzugaben auf die Bruchdehnung und Schlagzähigkeit (Compounds mit PLA Ingeo 3251 D, mittels Ultrazentrifugalmühle gemahlener Schilf-Biomasse; Biomasse- und Additivanteil aufsummiert zu 30 %).	53
Abbildung 37: Einfluss der Biomassevorbereitung auf die Zugfestigkeit der Compounds mit PLA Ingeo 3251 D und mittels unterschiedlicher Methoden verarbeiteter Schilf-Biomasse vom gleichen Standort und mit gleichem Erntezeitpunkt.	53
Abbildung 38: Darstellung der Partikellängen der gemahlene Biomasse für zwei Proben. Der Violinplot visualisiert die gesamte Größenverteilung und macht sichtbar, dass die mit der Ultrazentrifugalmühle Retsch200 gemahlene Biomasse einen höheren Anteil sehr großer Partikel enthält, obwohl die Medianwerte vergleichbar sind. Neben den Plots sind die der Auswertemethodik zu Grunde liegenden Flachbettscans der Partikel abgebildet.	54
Abbildung 39: Mechanische Eigenschaften von im FDM- und Granulat-3D-Druck hergestellten Prüfkörpern.....	54
Abbildung 40: 3D-Gedrucktes Benchy (Boot) aus 10% Carex 90% PLA4043D Compound	55
Abbildung 41: Einkommensbeitrag untersuchter Paludikulturen ohne Inwertsetzung der Klimaschutzleistung.....	58
Abbildung 42: Einkommensbeitrag untersuchter Paludikulturen mit Inwertsetzung der Klimaschutzleistung	59
Abbildung 43: Marginale Kompensationszahlungen der Fördereigenschaften in €/ (ha*a)	60
Abbildung 44: Marginale Kompensationszahlungen der individuenspezifischen Eigenschaften in €/ (ha*a) ...	61
Abbildung 45: Wasserstandganglinien für die Jahre 2023 und 2024 am Standort Langenmosen für die drei unterschiedlichen Pflanzenarten.	82

Abbildung 46: Jahresverläufe der gemessenen LAI- und NDVI-Werte entsprechend den jeweiligen Pflanzenarten und Managementoptionen für die Jahre 2023 und 2024 für den Standort Langenmosen.	83
Abbildung 47: Entwicklung der Trockenmasseerträge am Standort Langenmosen seit der Etablierung im Jahr 2018 (<i>Typha angustifolia</i>) bzw. 2019 (<i>Carex acutiformis</i> und <i>Phalaris arundinacea</i>). Die Versuche zur 2-Schnittnutzung wurden erst im Jahr 2021 begonnen. Im Jahr 2022 wurden keine Erträge erfasst, das Management wurde aber entsprechend aufrechterhalten.....	84
Abbildung 48: Feldaufbau der Messfläche am Intensivmesssstandort Freisinger Moos für die Jahre 2023-2024 zur Erfassung des THG-Austausch und der Effekte von Nährstoffversorgung auf Produktivität und Umweltwirkung der drei Paludikulturarten <i>Carex acutiformis</i> (Sumpf-Segge), <i>Phalaris arundinacea</i> (Rohrglanzgras) und <i>Typha latifolia</i> (Breitblättrige Rohrkolben).	85
Abbildung 49: Jahresverläufe der Wasserstände in den Paludikulturen unter konstantem bzw. variablem Wasserstand und Indikation der Management Eingriffe Entzugsdüngung (rote Linien) und Ernten (grüne Linien: Sommerernte nur im Phalaris) in den Messflächen am Intensivmesssstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.	86
Abbildung 50: Ernteerträge ($t\ TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmesssstandort Freisinger Moos für die Jahre 2023 (a) und 2024 (b).	87
Abbildung 51: CO_2 -Austausch ($t\ CO_2\ ha^{-1}\ a^{-1}$), als a) Ökosystematmung (Reco), b) Bruttoprimärproduktion (GPP) und c) Nettoökosystemaustausch, (NEE) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmesssstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.	88
Abbildung 52: a) CH_4 -Austausch ($kg\ CH_4\ ha^{-1}\ a^{-1}$) und b) N_2O -Austausch ($kg\ N_2O\ ha^{-1}\ a^{-1}$) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmesssstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.	89
Abbildung 53: Gesamtemissionen ($t\ CO_2\text{-Äq.}\ ha^{-1}\ a^{-1}$) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmesssstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.	90
Abbildung 54: Stickstoffverluste durch Ammoniak-(NH_3)-Verflüchtigung infolge der Düngung mit flüssigen und separierten Biogas-Gärresten in den <i>Phalaris</i> -Varianten bei konstanten bzw. variablen Wasserständen im Freisinger Moos im April und Juli 2024: a) zeitliche Verläufe der gemessenen Ammoniak Konzentrationen über 30 Stunden nach der Düngerausbringung (in parts per million, ppm), b) zeitliche Verläufe der berechneten Ammoniakflüsse über 30 Stunden nach der Düngerausbringung (in kg N pro Hektar und Stunde), c) kumulative Stickstoffverluste durch Ammoniakverflüchtigung nach der Düngerausbringung (in kg N pro Hektar und 30-h Messzeitraum mit Standardfehler).	91
Abbildung 55: Erträge der Mesokosmen am Standort Braunschweig getrennt nach den verschiedenen Kulturen, den Nährstoffstufen (D0, D1, D2, vgl. Tab. 5) und den Versuchsjahren (2022, 2023, 2024, 2025)	98
Abbildung 56: Ammoniumwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.	99
Abbildung 57: Nitratwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.	100
Abbildung 58: Gesamtstickstoffwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.	100
Abbildung 59: Phosphatwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.	101
Abbildung 60: Nährstoffentzüge der Rohrkolbenarten über die Biomasse im 1. Erntejahr (2023/24)	101
Abbildung 61: Nährstoffgehalte (N, P, K und Fe) der verschiedenen Pilotflächen in den Jahren 2022-2025	102
Abbildung 62: Probenahmeschema für die Jahre 2023 und 2024 (Symbole) und Grundwasserstände bei konstantem und variierbarem Grundwasserstand (2023)	104
Abbildung 63: Tiefengradienten ausgewählter physikalisch-chemischer Eigenschaften von Torf in einer Tiefe von 0 bis 300 cm (Mittelwerte und Standardabweichung der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).....	105

Abbildung 64: Veränderungen des pH-Werts und ausgewählter, pflanzenverfügbarer Nährstoffe (NH ₄ -N, NO ₃ -N, CAL extrahierbarer Phosphor und Kalium) in einer Tiefe von 0 bis 20 cm unter unterschiedlichen Grundwasserspiegeln im Zeitverlauf nach der Düngung zum Frühjahr (links) oder Sommer (rechts). Daten jeweils für Frühjahr und Sommer 2023 und 2024. (Boxplots der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).	106
Abbildung 65: Aktivitäten der Enzyme Dehydrogenase (DHA), Glucosidase (GC), Leucin-Aminopeptidase (LAP) und Phosphatase (PHO) nach Düngung unter verschiedenen Grundwasserbedingungen und organischen Düngergaben (0-40 cm Tiefe).....	107
Abbildung 66: Pearson-Korrelationsmatrix mit bodenbiologischen, chemischen und Nährstoffvariablen im Frühjahr 2023. Die Heatmap zeigt paarweise Pearson-Korrelationskoeffizienten, wobei nur statistisch signifikante ($p < 0.05$) Korrelationen gezeigt werden.	107
Abbildung 67: Gesamtkonzentrationen von NH ₄ -N (oben) und NO ₃ -N (unten) im oberflächennahen Grundwasser vor und bis 4 Tage nach der Düngung im Frühjahr und Sommer 2024.	108
Abbildung 68: Schematische Darstellung des Faserspritzgussverfahrens	114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitspakete mit Bearbeitungszeitraum und Zielerreichung	3
Tabelle 2: Meilensteinplan inkl. Fälligkeit und Zielerreichung	3
Tabelle 3: Ernten auf der Fläche Hohenböken	7
Tabelle 4: Ernten auf der Fläche Bederkesa	8
Tabelle 5: Übersicht zur jährlichen N, P und K Nährstoffgabe in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025.	12
Tabelle 6: Qualitätsmerkmale von Reethalmen beim Tauch-Saugtest in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung im ersten Erntejahr 2023/24 (D0: Leitungswasser, D1: NPK: 78/30/60 kg/ha, D2: NPK:238/90/180 kg/ha; Gamma-verteiltes GLM mit logarithmischer Link-Funktion; Tukey-Test, $p \leq 0.05$; N = 12/18 je Nährstoffstufe)	21
Tabelle 7: Deskriptive Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung ausgewählter chemischer Eigenschaften am Versuchsstandort.	31
Tabelle 8: Übersicht über die Gesamtartenzahlen sowie die Anzahl der Rote-Liste-Arten in Paludikultur- und Referenzflächen in den verschiedenen Gruppen.	36
Tabelle 9: In den Paludikulturen nachgewiesene Zeigerpflanzen für §30-Biotope.	38
Tabelle 10: Normalized Root Mean Squared Error (NRMSE) für die drei Wasserstandsklassen mit und ohne Entzugsdüngung. LAI Daten lagen nur in den ersten beiden Jahren nach Etablierung (2017 und 2018) vor. In diesen Jahren wurde noch nicht gedünkt. Die NRMSE beziehen sich jeweils auf die arithmetischen Mittelwerte der Replikate.	41
Tabelle 11: Ergebnisse der Proteinbestimmung nach Kjeldahl	44
Tabelle 12: Auflistung der eingesetzten kommerziellen Kunststoffe und der gemessenen mechanischen Eigenschaften.	50
Tabelle 13: Parameter der im 3D-Druck-Verfahren verarbeitbaren Compounds	55
Tabelle 14: Identifizierte Inwertsetzungsmechanismen	56
Tabelle 15: Attribute und Ausprägungen der Wahlsituationen	59
Tabelle 16: Determinanten der eingebrachten Fläche (ha)	61
Tabelle 17: Veranstaltungen & Workshops (inkl. Vorträge, Besuche, Dialoge)	62
Tabelle 18: Messen, Messestände & Infostände	63
Tabelle 19: Veröffentlichungen & Medienbeiträge	64
Tabelle 20: Mittlere Wasserstände sowie Median, Minimum und Maximal Werte für die drei Anbau-Paludikulturen am Standort Langenmosen für die Untersuchungsjahre 2023 und 2024. Die Nummerierungen 1 bis 3 entsprechen den drei Wiederholungen je Pflanzenart.	82
Tabelle 21: Gesamtwerte der Nährstoffrückführung von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha ⁻¹ a ⁻¹ in den Düngevarianten der Paludikulturen <i>Carex acutiformis</i> (Sumpfsegge), <i>Typha latifolia</i> (breitblättriger Rohrkolben) und <i>Phalaris arundinacea</i> (Rohrglanzgras) im Freisinger Moos für 2023 und 2024.	86
Tabelle 22: Mittlere Anzahl bzw. prozentualer Anteil an Trieben, Blüten und Bohrungen (Schadsymptom) innerhalb der Rohrkolbenarten und Nährstoffstufen (je Stufe n = 3, vgl. Tab. 5) in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025.	98
Tabelle 23: Erträge an <i>Phalaris</i> und Binsen- bzw. Binsen/Fremdgras-Aufwuchs aus den Mesokosmen in den Versuchsjahren 2023 und 2024 (auf Feldmaßstab hochgerechnet; lineares Modell mit Wechselwirkung zwischen Faktor Jahr und Nährstoffstufe (vgl. Tab. 5); Tukey-Test, $\alpha < 0,05$)	99
Tabelle 24: Qualitätsparameter von 9 Wochen gereiftem Kompost aus verschiedenen Paludikultur-Ausgangsmaterialien. Gelb eingefärbte Felder zeigen eine Zuordnung zu Substratkompost Typ 1, violett eingefärbte zu Substratkompost Typ 2.	102
Tabelle 25: Qualitätsparameter von 6 Monate gereiftem Kompost aus verschiedenen Paludikultur-Ausgangsmaterialien und N _{min} -Werte nach Waschung. Gelb eingefärbte Felder zeigen eine Zuordnung zu Substratkompost Typ 1, violett eingefärbte zu Substratkompost Typ 2.	103
Tabelle 26: Faserzusammensetzung der Ausgangsbiomasse für die Compoundierungsversuche. TM: Trockenmasse, RA: Rohasche, oADF: organische Säure-Detergenzien-Faser, umfasst Cellulose und Lignin, oNDF: organische Neutral-Detergenzien-Faser, umfasst Cellulose, Hemicellulose, Lignin	103

Tabelle 27: Deskriptive Mittelwerte $\pm$ Standardabweichung des Ertrags von Rohrglanzgras am Versuchsstandort.....	106
---	-----

Literaturverzeichnis

Amenkhienan, Bright & Dijkstra, Feike & Warren, Charles & Singh, Balwant. (2024). Understanding extractable metal species relationships with phosphorus sorption and organic carbon in soils. *Soil Research*. 62. 10.1071/SR24118.

Aponte, C.; Marañón, T.; García, L.V. (2010). Microbial C, N and P in soils of Mediterranean oak forests: Influence of season, canopy cover and soil depth. *Biogeochemistry* 101, 77–92.

Barthelmes, A. (ed.) (2018). Reporting greenhouse gas emissions from organic soils in the European Union: challenges and opportunities. Policy brief. Proceedings of the Greifswald Mire Centre 02/2018.

Baumann, K., Kastner, F., Borkenstein, A., Burkart, W., Jödicke, R., Quante, U. (2020). Rote Liste der in Niedersachsen und Bremen gefährdeten Libellen mit Gesamtartenverzeichnis, 3. Fassung – Stand 2020, 3 – 37.

Bockermann, C., Eickenscheidt, T., Drösler, M. (2024). Adaptation of fen peatlands to climate change: Rewetting and management shift can reduce greenhouse gas emissions and offset climate warming effects. *Biogeochemistry* 167(4), 563–588. <https://doi.org/10.1007/s10533-023-01113-z>

Bockermann, C., Eickenscheidt, T., Drösler, M. (2025). Greenhouse gas mitigation potential of temperate fen paludicultures. *Global Change Biology* 33(8), e70385. <https://doi.org/10.1111/gcb.70385>

Butlers, Aldis & Laiho, Raija & Lazdiņš, Andis & Schindler, Thomas & Soosaar, Kaido & Jauhiainen, Jyrki & Bardule, A. & Kamil-Sardar, Muhammad & Licite, Ieva & Samariķs, Valters & Haberl, Andreas & Vahter, Hanna & Čiuldienē, Dovilē & Anttila, Jani & Armolaitis, Kestutis. (2025). Organic soils can be CO₂ sinks in both drained and undrained hemiboreal peatland forests. *Biogeosciences*. 22. 4627-4647. 10.5194/bg-22-4627-2025.

Currey, P.M., Johnson, D., Sheppard, L.J., Leith, I.D., Toberman, H., van der Wal, R., Dawson, L.A., Artz, R.R.E. (2010). Turnover of labile and recalcitrant soil carbon differ in response to nitrate and ammonium deposition in an ombrotrophic peatland. *Glob. Chang. Biol.* 16 (8), 2307–2321.

Dreisbach, N.; Häußermann, U.; Bach, M.; Breuer, L.; Döhler, H.; Müller, H.; Lohrberg, T.; Döhler, S. (2025). Entwicklung eines Modells zur Bewertung von THG-Minderungsmaßnahmen in der Landwirtschaft (E-MoLL) (Umweltbundesamt Texte 111/2025). Umweltbundesamt.

Drollinger, Simon & Kuzyakov, Yakov & Glatzel, Stephan. (2019). Effects of peat decomposition on $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ depth profiles of Alpine bogs. *Catena*. 178. 1-10. 10.1016/j.catena.2019.02.027.

Duan, Q. Y., Gupta, V. K., & Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of optimization theory and applications*, 76(3), 501-521.

Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3-4), 265-284.

Eickenscheidt, T., Bockermann, C., Bodenmüller, D., Großkinsky, T., Gutermuth, S., Hafner, M., Hartmann, H., Hartung, C., Heuwinkel, H., Kapfer, M., Krimmer, J., Krus, M., Kuchler, C., Kuptz, D., Lohrberg, D., Mack, R., Mäck, U., Mann, S., Meinken, E., Moning, C., Rist, E., Schön, C., Schröder, T., Schumann, A., Theuerkorn, W., Zollfrank, C., Drösler, M. (2023). MOORuse - Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern - Etablierung, Klimarelevanz & Umwelteffekte, Verwertungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit. Abschlussbericht/Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10778063>

Eickenscheidt, T., Heinichen, J., Drosler, M. (2015). The greenhouse gas balance of a drained fen peatland is mainly controlled by land-use rather than soil organic carbon content. *Biogeosciences* 12, 5161–5184.

Ellenberg, H., Weber, H.E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., Paulißen, D. (1991). Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica* 18, 1-248.

Feddes, R. A., Kowalik, P. J., & Zaradny, H. (1978). Simulation of field water use and crop yield [Simulation Monographs]. Pudoc.

FIBL (2018). Kompostqualität mittels Kresstests bestimmen. <https://orgprints.org/id/eprint/35343/>

Frank S, Dettmann U, Heidkamp A, Piayda A, Oehmke, W, Tiemeyer B (2022): Methodenhandbuch zu den Gelände- und Laborarbeiten für den Aufbau des deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den

Frank, S., Dettmann, U., Piayda, A., Seidel, R., Amiri, E., Bamberger, S., Heidkamp, A., Heller, S., Holzträger, S., Kuwert, M., Lakeberg, S., Laqua, S., Minke, M., Nagel, S., Oehmke, W., Schemschat, B., Simon, C., Wittnebel, M., Wywias, H., Tiemeyer, B. (2025): Bericht zum Aufbau eines deutschlandweiten Moorbodenmonitorings für den Klimaschutz: Band 1: Offenland. Thünen-Report 123, Bd. 1. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. <https://doi.org/10.3220/253-2025-181>

Fraunhofer IBP (n.d.). Typhaboard – innovativer und nachhaltiger Baustoff. Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. <https://www.bau.fraunhofer.de/de/forschungsbereiche/Baustoffe/typhaboard.html>

Gaudig, G., Oehmke, C., Abel, S., Schröder, C. (2014). Moornutzung neu gedacht: Paludikultur bringt zahlreiche Vorteile. ANLiegen Natur 36 (2), 67-74.

Giannini, V., Silvestri, N., Dragoni, F., Pistocchi, C., Sabbatini, T., Bonari, E. (2015). Growth and nutrient uptake of perennial crops in a paludicultural approach in a drained Mediterranean peatland. Ecological Engineering 103. 10.1016/j.ecoleng.2015.11.049.

Greifswald Mire Centre (2021a). Fantastic example! A tiny house built with paludiculture material shows triple win from rewetted peatlands – carbon storage, renewable resources, new jobs in a circular bioeconomy. Media information, 27 October. https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/Presse/20211027_GMC%20GP3%20-%20Mediainformation%20PaludiTinyHouse.pdf

Greifswald Moor Centrum (2021b). Biomasse geschäumt + getrocknet: Neue Paludikultur-Platte entwickelt, Aktuelles, 21 July. <https://greifswaldmoor.de/aktuelles/biomasse-gesch%C3%A4umt-getrocknet.html>

Grimm, R. (n.d.). Neuer Naturbaustoff: Platten aus Rohrkolben, BaustoffWissen. <https://www.baustoffwissen.de/neuer-naturbaustoff-platten-aus-rohrkolben-31102023>

Harpenlager, S.F., van den Elzen, E., Kox, M.A.R., Smolders, A.J.P., Ettwig, K.F., Lamers, L.P.M. (2015). Rewetting former agricultural peatlands: Topsoil removal as a prerequisite to avoid strong nutrient and greenhouse gas emissions. Ecological Engineering 84, 159-168. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.08.002>.

Hartung, C., Andrade, D., Dandikas, V., Eickenscheidt, T., Drösler, M., Zollfrank, C., Heuwinkel, H. (2020). Suitability of Paludiculture Biomass as Biogas Substrate – Biogas Yield and Long-Term Effects on Anaerobic Digestion. Renewable Energy 159, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.156>

Hartung, C., Dandikas, V., Eickenscheidt, T., Zollfrank, C., Heuwinkel, H. (2023). Optimal Harvest Time for High Biogas and Biomass Yield of *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* and *Phalaris arundinacea*. Biomass and Bioenergy 175, 106847. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106847>

Isermeyer, F; Heidecke, C; Osterburg, B (2019). Einbeziehung des Agrarsektors in die CO2-Bepreisung. Thünen Working Paper 136. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.

Klaiber, J., Altermatt, F., Birrer, S., Chittaro, Y., Dziok, F., Gonseth, Y., Hoess, R., Keller, D., Kuchler, H., Luka, H., Manzke, U., Müller, A., Pfeifer, M.A., Roesti, C., Schneider, K., Schlegel, J., Sonderegger, P., Walter, T., Holderegger, R., Bergamini, A. (2017). Fauna Indicativa. WSL Berichte 54, 192 S.

Kroes, J. G., Van Dam, J. C., Bartholomeus, R. P., Groenendijk, P., Heinen, M., Hendriks, R. F. A., ... & Van Walsum, P. E. V. (2017). SWAP version 4. Theory Description and User Manual, (2780).

Krus, M. *et al.* (2013). Ein neuer tragfähiger Dämmstoff – Typha-Rohrkolbenplatten. A new load-bearing insulation material – Typha panels. Bauphysik, 35(11), pp. 75–80.

Krus, M. *et al.* (2014). New sustainable and insulating building material made of cattail, in NSB 2014 – 10th Nordic Symposium on Building Physics, 15–19 June, Lund. Fraunhofer Institute for Building Physics IBP.

LfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2022). Bestimmungsschlüssel für geschützte Flächen nach § 30 BNatSchG / Art. 23 BayNatSchG (§30-Schlüssel). Augsburg, 76 S.

Luyten-Naujoks, K. (2023). Qualitätsanforderungen Substratkompost. Online verfügbar unter <https://www.kompost.de>, zuletzt aktualisiert am 09.05.2025, zuletzt geprüft am 06.03.2026.

- McCauley A, Jones C, Jacobsen J (2009) Soil pH and organic matter. Nutrient Management Module, 8, 1-12.
- Moor and more (n.d.). Klimaschutz in Vorpommern – von der Einöde zum kulturellen Kleinod. <https://moor-and-more.de/kleinod/>
- Moorwissen (2021). Paludikultur auf Roadshow für mehr Moor und Klimaschutz: Paludi-Tiny House tour mit Schilf auf dem Dach und Rohrkolben in der Wand. <https://moorwissen.de/paludi-tiny-house.html>
- Müssig, J. (2013). Natural Fibre Composites And Their Processing. In: Madsen, B. *et al.* (Eds.): Processing of fibre composites - challenges for maximum materials performance - 34th Riso International Symposium on Materials Science 2013, Denmark, p. 73 – 92.
- Müssig, J., Haag, K., Musio, S., Bjelkova, M., Albrecht, K., Uhrlaub, B., ... & Amaducci, S. (2020). Biobased 'Mid-performance'composites using losses from the hackling process of long hemp—A feasibility study as part of the development of a biorefinery concept. *Industrial Crops and Products*, 145, 111938.
- Norton, J., & Ouyang, Y. (2019). Controls and Adaptive Management of Nitrification in Agricultural Soils. *Frontiers in microbiology*, 10, 1931. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.01931>
- Paludikultur Niedersachsen (n.d.). Baustoffe. <https://paludikultur-niedersachsen.de/produkte/baustoffe.html>
- Riet ABC BV, Greef, J.M. (2016). Die Qualität von Reet. Entwicklung einer Methode zur Beschreibung der Qualität von Reet. Nijkerk: Riet ABC BV.
- Saurich, A., Tiemeyer, B., Dettmann, U., Don, A. (2019). How do sand addition, soil moisture and nutrient status influence greenhouse gas fluxes from drained organic soils? *Soil Biol. Biochem.* 135, 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019>
- Schäfer, A.; Nordt, A.; Peters, J.; Wichmann, S. (2022). Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050. *Climate Change* 44/2022. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Song, Y., Song, C., Shi, F., Wang, M., Ren, J., Wang, X., *et al.* (2019). Linking Plant Community Composition with the Soil C Pool, N Availability and Enzyme Activity in Boreal Peatlands of Northeast China. *Appl. Soil Ecol.* 140, 144–154. doi:10.1016/j.apsoil.2019.04.019
- Sprenger, R.U. (1984). Kriterien zur Beurteilung umweltpolitischer Instrumente aus Sicht der wissenschaftlichen Politikberatung. In: Schneider, G. und Sprenger, R.U. (Hg.): Mehr Umweltschutz für weniger Geld. Ifo Studien zur Umweltökonomie, Bd. 4. 4. Aufl. München, S. 41–73.
- Tanneberger, F. (2024). Potentiale von Paludikultur-Biomasse für die Bauindustrie. Presentation, Agora Agrar, 14 November 2024.
- 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-Sauheittl, K., Peichl-Brak, M., Drösler, M. (2020). A New Methodology for Organic Soils in National Greenhouse Gas Inventories: Data Synthesis, Derivation and Application. *Ecological Indicators* 109(5), 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>
- Tobisch, C., Rojas-Botero, S., Uhler, J., Kollmann, J., Müller, J., Moning, C., Redlich, S., Steffan-Dewenter, I., Benjamin, C., Englmeier, J., Fricke, U., Ganuza, C., Haensel, M., Riebl, R., Uphus, L., Ewald, J. (2023b). Conservation-relevant plant species indicate arthropod richness across trophic levels: Habitat quality is more important than habitat amount. *Ecological Indicators* 148. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110039>
- Wichmann, W., Wichmann, S. (2011). Paludikultur: Standortgerechte Bewirtschaftung wiedervernässter Moore. *TELMA Beiheft* 4, 215-234.
- Winterholler, M., Burbach, K., Krach, E., Sachteleben, J., Schlumprecht, H., Suttner, G., Voith, J., Weihrauch, F. (2017). Rote Liste und Gesamtartenliste der Libellen (Odonata) Bayerns. Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.), Augsburg, 15 S.
- Zak D, Gelbrecht J, Wagner C, Steinberg CEW (2008): Evaluation of phosphorus mobilization potential in rewetted fens by an improved sequential chemical extraction procedure. *European Journal of Soil Science* 59: 1191-1201, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2008.01081.x>

Zapf, M.; Pengg, H.; Bütler, T.; Bach, C.; Weindl, C. (2019). Kosteneffiziente und nachhaltige Automobile: Bewertung der realen Klimabelastung und der Gesamtkosten – Heute und in Zukunft. Springer Vieweg.

Zhang, J., Sayer, E.J., Zhou, J., Li, Y., Li, Y., Li, Z., Wang, F. (2021). Long-term fertilization modifies the mineralization of soil organic matter in response to added substrate. *Sci Total Environ.* 798:149341. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149341.

ANHANG

Teilvorhaben 1: Gesamtkoordination; Untersuchungen zu Anbau und Biodiversität auf niedersächsischen Pilotflächen sowie Aufbau von regionalen Nutzungsketten

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 1 war die wissenschaftliche und organisatorische Gesamtkoordination des Verbundvorhabens NAPALU sowie die Untersuchung von Anbau, Stoffhaushalt und Biodiversität auf den niedersächsischen Pilotflächen als Grundlage für belastbare Management- und Nutzungsempfehlungen für wiedervernässte Niedermoore. Hierzu gehörten insbesondere das Flächenmanagement und die Beerntung der Pilot-Sites in Niedersachsen, die Koordination der Biodiversitätserhebungen über alle Standorte sowie der Aufbau und die Erprobung regionaler Nutzungsketten für Paludikultur-Biomasse.

Darüber hinaus stellte das Teilvorhaben zentrale Biomasseströme aus Niedersachsen für stoffliche Verwertungswege (Bioraffination, biobasierte Werkstoffe, Substrate) bereit, unterstützte die ökonomische Bewertung mit Daten aus der Praxis und verantwortete die verbundweite Öffentlichkeitsarbeit einschließlich Website, Feldtagen, Projektfilm und Abschlussveranstaltung.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 0: Koordination und Kommunikation

Im Arbeitspaket 0 übernahm 3N die Verbundkoordination, organisierte das Kick-off, jährliche Projekttreffen sowie die laufende Abstimmung zwischen allen sieben Teilvorhaben und begleitete den Abschluss der Kooperationsvereinbarung. Die Einhaltung der Meilensteine, die Synchronisierung von Messkampagnen (THG, Stoffhaushalt, Biodiversität) und die Abstimmung zu Managementanpassungen (z.B. an den Abbruchmeilenstein für die Nährstoffversorgungsuntersuchungen) wurden zentral über dieses Arbeitspaket gesteuert.

Zudem koordinierte 3N die Berichtslegung gegenüber der FNR, bündelte die Beiträge der Verbundpartner für Zwischen- und Schlussbericht und sorgte durch regelmäßige Kommunikation für einen konsistenten fachlichen Auftritt des Verbundes nach außen.

Arbeitspaket 1: Flächenmanagement und Ernte

Im Arbeitspaket 1 verantwortete das Teilvorhaben 1 das Flächenmanagement und die Ernte auf den niedersächsischen Pilot-Sites Hohenböken, Bederkesa und Dümmer. Die Flächen wurden in regelmäßigen Abständen kontrolliert (u.a. Wasserstände, Pumpenfunktion, PV-Anlage, Pflanzenentwicklung, Wildschäden), bei Bedarf wurden kleinere Pflege- und Instandhaltungsarbeiten an Verwallungen, Gräben, Zäunen und Zuwegungen durchgeführt und Pachtverträge bzw. Genehmigungen verlängert.

In Hohenböken und Bederkesa konnten durch engmaschige Betreuung, eine Generalüberholung der Polderinfrastruktur und den Austausch nicht geeigneter Pumpentechnik gegen selbstansaugende Aggregate stabile Wasserstände und wiederkehrende Ernten von Typha- und Phragmites-Beständen erreicht werden, deren Biomasse gezielt für Analytik, Bioraffination, Faserguss, Compoundierung und Substratversuche bereitgestellt wurde. Am Standort Dümmer wurden sowohl ein Schilfpolder als Demonstrationsfläche für Schilfnutzung als auch eine Nasswiese mit hohem Rohrglanzgrasanteil bewirtschaftet, die zugleich der Stoffrückhaltung (u.a. Arzneimittelnrückstände) und der Bereitstellung von Nasswiesenballen für industrielle Bioraffinations- und Materialversuche diente.

Arbeitspaket 2: Biomassequantität und -qualität (Beitrag TV 1)

Das Arbeitspaket 2 wurde federführend von anderen Verbundpartnern bearbeitet; Teilvorhaben 1 trug durch Bereitstellung und logistische Abwicklung der Biomasse aus den niedersächsischen Pilotflächen zu den Analysen von Biomassequantität, -qualität und Verwertungsoptionen bei. Alle Ernten auf den niedersächsischen Flächen wurden mengenmäßig erfasst, aufbereitet (Wiegen, Trocknung, Häckseln/Mahlen) und nach Probenplänen an die Partner übergeben, sodass Ertragsdaten,

Faserzusammensetzung, Nährstoffgehalte und Komposteigenschaften standortübergreifend ausgewertet werden konnten.

Die im Verbund erzielten Ergebnisse zeigen u.a., dass hohe stickstoffbasierte Nährstoffgaben für Typha und Phragmites langfristig stabile Erträge und verbesserte Faserqualitäten (u.a. höherer Cellulosegehalt, bessere Reetqualität) ermöglichen und dass insbesondere Typha-Biomasse nach Kompostierung und ggf. Auswaschung Substratkompost-Qualität (Typ 1) für gartenbauliche Substrate erreichen kann.

Arbeitspaket 4: Biodiversität

Im Arbeitspaket 4 koordinierte 3N die Biodiversitätserhebungen an den niedersächsischen Standorten und war an der standortübergreifenden Auswertung der Vegetations-, Heuschrecken-, Libellen- und Brutvogelarten beteiligt. Die Kartierungen an vier Standorten ergaben insgesamt 201 nachgewiesene Arten; etwa drei Viertel der Pflanzen- und Vogelarten sowie 85% der Heuschrecken- und 97% der Libellenarten des Gesamtgebiets wurden auch in bewirtschafteten Paludikultur-Beständen gefunden.

Insbesondere Typha- und Phalaris-Flächen wiesen hohe Brutvogel- und Libellendiversität mit relevanten Anteilen von Rote-Liste-Arten auf, während Carex-Bestände artenärmer, aber deutlich von konventionellem Wirtschaftsgrünland abgegrenzt sind und typische Feuchtwiesenarten fördern. Aus den Ergebnissen wurden naturschutzfachliche Empfehlungen für die Integration von Strukturelementen (z.B. Brachen, Flachwasserzonen, gestaffelte Mahd) in Paludikultur-Bewirtschaftung abgeleitet.

Arbeitspaket 6: Regionale Nutzungsketten

Arbeitspaket 6 wurde im Verbund vom Teilvorhaben 1 (3N) verantwortet; Kernaufgabe war der Aufbau und die Erprobung regionaler Nutzungsketten für Paludikultur-Biomasse mit Partnern aus der Verarbeitungs- und Baustoffindustrie. Auf Basis der aus Niedersachsen und Bayern bereitgestellten Biomasse wurden Verwertungspfade wie Bioraffination, Faserguss, Faserspritzguss, thermoplastische Compounds und 3D-Druck getestet und in Labormaßstab sowie ersten Industrieversuchen hinsichtlich technischer Machbarkeit und Produkteigenschaften bewertet.

Es konnte gezeigt werden, dass sich aus Biomassen von Carex, Phalaris, Phragmites und Typha mechanisch belastbare Formteile und Compounds herstellen lassen, wobei Phragmites und Typha besonders günstige mechanische Kennwerte aufweisen und bei PLA-basierten Compounds Faseranteile von bis zu 30 Masse-% im Spritzguss realisierbar sind. Gleichzeitig wurden prozessuale Engpässe (z.B. Schaumbildung, Partikelgrößenverteilung, Werkzeugverstopfungen) identifiziert, die für eine spätere Skalierung adressiert werden müssen, sowie Ansatzpunkte für regionale Wertschöpfungsketten in den Bereichen Dämmstoffe, Verpackungen und Substrate herausgearbeitet.

Arbeitspaket 7: Ökonomische Bewertung (Beitrag TV 1)

Im Arbeitspaket 7, das von der Universität Kiel geleitet wurde, lieferte das Teilvorhaben 1 Praxisdaten aus den niedersächsischen Pilotflächen zu Bewirtschaftungsabläufen, Ernte-, Logistik- und Infrastrukturkosten und wirkte bei der Interpretation der Ergebnisse aus betrieblicher Sicht mit. Auf dieser Grundlage wurden für zentrale Paludikulturen (u.a. Typha, Phragmites, Phalaris) Kapitalwertrechnungen, Szenarioanalysen und Vermeidungskostenabschätzungen durchgeführt, die zeigen, dass ohne Inwertsetzung der Klimaschutzleistung im Mittel jährliche Defizite von rund 2.645 €/ha entstehen, während bei Monetarisierung der THG-Minderung in der Mehrzahl der Szenarien positive Einkommensbeiträge und ein volkswirtschaftlicher Nettonutzen von jährlich etwa 1,75 Mrd. € erzielt werden können.

Parallel wurden Governance-Optionen und Anreizsysteme (u.a. Emissionshandel, Agrarumweltmaßnahmen, Kompensationsinstrumente) analysiert sowie eine Akzeptanzstudie mit 202 Landwirtinnen und Landwirten durchgeführt, die eine ausgeprägte Status-quo-Präferenz, aber auch eine deutliche Bevorzugung produktiver Nasswiesennutzung gegenüber Nutzungsaufgabe und konkrete Präferenzen für Beratungsangebote und bestimmte Finanzierungswege (z.B. Emissionshandel) erkennen lässt.

Arbeitspaket 8: Öffentlichkeitsarbeit

Im Arbeitspaket 8 verantwortete 3N die verbundweite Öffentlichkeitsarbeit. Dazu zählten die Konzeption und Pflege der Projektwebsite, die Organisation von Feldtagen und Workshops auf den niedersächsischen Pilotflächen, Presse- und Medientermine (u.a. Ministerinnen-Besuch und Pressetermin in Bederkesa), Exkursionen für Fachpublikum sowie die Vorbereitung und Durchführung der Abschlussveranstaltung.

Außerdem wurden ein Projektfilm realisiert, zahlreiche Fachvorträge und Posterbeiträge auf Tagungen eingebracht und externe Demonstrationsbeispiele zu Paludikultur-Baustoffen und -Nutzungskonzepten in die Kommunikation integriert, um die Übertragbarkeit der im Projekt entwickelten Verwertungspfade und Governance-Ansätze zu unterstreichen.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Das Teilvorhaben 1 hat maßgeblich dazu beigetragen zu zeigen, dass auf den niedersächsischen Pilotflächen unter angepasstem Wasserstands- und Infrastrukturmanagement stabile Paludikultur-Bestände mit wiederkehrender Biomassebereitstellung für stoffliche Nutzung und Substratanwendungen etabliert und gleichzeitig Beiträge zu THG-Minderung und Biodiversität geleistet werden können. Durch die Generalüberholung der Polderinfrastruktur und den Austausch der Pumpentechnik konnten betriebspraktische Probleme gelöst und belastbare Erfahrungen zur technischen Ausgestaltung von Wasserhaltungsmaßnahmen auf wiedervernässten Niedermoorstandorten gewonnen werden.

Die Biodiversitätsanalysen belegen, dass bewirtschaftete Paludikultur-Bestände in Niedersachsen und Bayern einen Großteil der regionalen Artenvielfalt aufnehmen können und insbesondere für Libellen und Brutvögel mit Anteilen gefährdeter Arten bedeutende Habitate darstellen, wenn geeignete Strukturelemente und angepasste Mahdregime integriert werden. Parallel dazu konnten im Rahmen der regionalen Nutzungsketten die technische Machbarkeit und das Anwendungspotenzial mehrerer stofflicher Verwertungswege (Bioraffination, Faserguss, Compounds, 3D-Druck, Substratkompost) für Paludikultur-Biomasse demonstriert und konkrete Prozessoptimierungsbedarfe identifiziert werden.

Schließlich trug das Teilvorhaben über die Koordination, die Bereitstellung von Praxisdaten und die Öffentlichkeitsarbeit dazu bei, ökonomische und governance-bezogene Erkenntnisse zur Kosteneffizienz von Paludikulturen, zu geeigneten Anreizsystemen sowie zur Akzeptanz bei Landwirtinnen und Landwirten zu gewinnen und diese in Fachöffentlichkeit, Politikberatung und Praxisnetzwerke zu kommunizieren.

Teilvorhaben 2: THG-Austausch einer bayerischen Pilotfläche und Erfassung der Effekte von Nährstoffversorgung auf Produktivität und Umweltwirkung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilprojekts war es, die Notwendigkeit einer Nährstoffrückführung in langfristig bewirtschafteten Paludikulturen im Hinblick auf die Stabilisierung des Ertragspotenzials sowie die damit verbundenen potenziellen negativen Umwelteffekte zu quantifizieren und daraus langfristige Anbau- und Managementempfehlungen abzuleiten. Die Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Düngestrategien und Grundwasserstandsszenarien auf Biomasseertrag, Treibhausgas austausch und Stoffdynamik im Boden wurden am Intensivmessstandort Freisinger Moos durchgeführt. Die dortige Paludikultur-Versuchsfläche wurde im Jahr 2017 im Rahmen des Projekts MOORuse (Eickenscheidt *et al.* 2023) eingerichtet. Untersucht wurden drei relevante Paludikulturarten: *Carex acutiformis* und *Typha latifolia*, jeweils mit mineralischer Düngung und Winterernte zur stofflichen Verwertung, sowie *Phalaris arundinacea* mit organischer Düngung in Form von flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest und einer Zwei-Schnitt-Nutzung zur Verwertung für die Biogasgewinnung. Für alle Arten wurde eine ungedüngte Referenzvariante eingerichtet. Als Mineraldünger kam ein stickstoffstabilisierter Volldünger zum Einsatz. Die Düngungsmaßnahmen wurden für alle Arten unter zwei hydrologischen Regimen untersucht: zum einen unter den für Paludikulturen erforderlichen konstant hohen Zielwasserständen (Jahresmittel $-0,07$ m unter GOK), zum anderen unter einer an die Vorgaben der Düngeverordnung angepassten Grundwasserführung mit temporärer Absenkung der Wasserstände auf $< -0,25$ m unter GOK im Zeitraum vor und nach der Düngerapplikation. Zentrale Zielgrößen der Untersuchung waren die Spurengase CO_2 , CH_4 und N_2O , die mithilfe eines automatisierten Haubenmesssystems hochfrequent erfasst wurden. Ergänzend wurden in den organisch gedüngten Varianten manuelle NH_3 -Messungen durchgeführt. Weitere Untersuchungen zur Nährstoffumsetzung und -verlagerung im Torfprofil sowie im Oberflächenwasser wurden im AP3.2 vorgenommen. Diese umfassende Betrachtungsweise ermöglicht eine integrierte Bewertung der wesentlichen, im Zusammenhang mit der Nährstoffrückführung zu erwartenden Umweltrisiken in Paludikulturen. Daneben war das Teilprojekt an den Arbeitspaketen Flächenmanagement und Ernte, Biomassequantität und -qualität, Biodiversität, Pflanzenwachstumsmodellierung, Ökonomische Bewertung sowie der Öffentlichkeitsarbeit beteiligt.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 01: Flächenmanagement und Ernte

Das Flächenmanagement und die Ernte beziehen sich auf die Untersuchungsfläche in Langenmosen, welche die zweitälteste Anbau-Paludikulturfläche in Deutschland und zugleich die größte in Bayern ist. Die Fläche wurde im Rahmen des MOORuse-Projekts im Sommer 2018 eingerichtet und wird seither kontinuierlich als Paludikultur mit mindestens einer Winterernte (Dezember bis Februar) bewirtschaftet. Auf der Fläche wurden *Typha angustifolia* und *Carex acutiformis* gepflanzt sowie *Phalaris arundinacea* eingesät. Ab dem Jahr 2021 wurden Teilflächen der Varianten *Carex* und *Phalaris* als 2-Schnittnutzungen (Juli sowie Dezember bis Februar) bewirtschaftet. Ziel ist es, Aussagen zur langfristigen Ertragsstabilität bei unterschiedlicher Nutzungsintensität sowie zu Veränderungen der Artenzusammensetzung im Vergleich zu einer einmaligen Winterernte zu treffen. Darüber hinaus dient die Fläche der Sammlung praktischer Erfahrungen zum Grundwassermanagement in Anbau-Paludikulturen. In den Jahren 2018 bis 2022 zeigte sich, dass eine zu späte Winterernte, insbesondere beim Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*), zu qualitativen Einbußen führen kann. Daher wurde die Ernte in den Jahren 2023 und 2024 bereits Anfang Dezember durchgeführt. Im Jahr 2023 lagen die Wasserstände in allen drei Pflanzenvarianten im Mittel deutlich unter dem angestrebten Niveau für eine Paludikulturbewirtschaftung (). Zur Optimierung der Wiedervernässung wurden Anfang März 2024 die im Jahr 2019 angelegten, jedoch im Laufe der Nutzungsdauer verlandeten Quer- und Längsgräben mithilfe eines Einscharpfluges erneuert, um eine gleichmäßigere Wasserverteilung auf der gesamten Versuchsfläche zu erreichen. Zusätzlich wurde die Wassereinleitung aus dem umlaufenden Graben durch den Einbau einer kleinen Staustufe verbessert. Diese Maßnahmen zeigten im Verlauf des Jahres 2024 eine deutlich positive Wirkung, was sich auch in den mittleren Wasserständen widerspiegelt (Tabelle 20). Insgesamt zeigt sich, dass bereits die Wiedervernässung kleiner Flächen (≈ 5 ha), abhängig von Standortbedingungen, Degradationsgrad,

Topografie und Wasserverfügbarkeit, eine komplexe und anspruchsvolle Aufgabe darstellt. **Es ist daher davon auszugehen, dass es in der praktischen Umsetzung nicht in allen Jahren gelingen wird, die für eine Paludikulturbewirtschaftung erforderlichen Minimal-Zielwasserstände (–10 cm unter GOK) vollständig zu erreichen. Zudem sollten ausreichende finanzielle und personelle Ressourcen für die regelmäßige Unterhaltung und Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der wasserbaulichen Infrastruktur eingeplant werden (z.B. in einem Turnus von fünf Jahren).** Die Organisation und Umsetzung könnte, analog zur bestehenden Unterhaltung der Drainageinfrastruktur zur Entwässerung, durch die etablierten Strukturen und zuständigen Verbände (z. B. Wasser- und Bodenverbände) erfolgen.

Tabelle 20: Mittlere Wasserstände sowie Median, Minimum und Maximal Werte für die drei Anbau-Paludikulturen am Standort Langenmosen für die Untersuchungsjahre 2023 und 2024. Die Nummerierungen 1 bis 3 entsprechen den drei Wiederholungen je Pflanzenart.

		Carex			Phalaris			Typha		
Jahr		1	2	3	1	2	3	1	2	3
2023	Mittelwert	–24.1	–23.0	–21.7	–26.9	NA	–18.9	–14.3	–24.9	–16.7
	Median	–11.5	–9.7	–12.0	–10.2	NA	–4.8	–6.1	–14.3	–9.0
	Min	–68.0	–78.7	–74.7	–81.5	NA	–62.4	–63.2	–77.3	–57.7
	Max	5.2	3.5	9.3	10.0	NA	7.7	8.0	4.0	7.6
2024	Mittelwert	–5.6	–3.1	–14.4	–13.8	–1.9	–12.2	–12.1	–13.8	–8.3
	Median	–3.0	–1.8	–11.4	–8.2	–1.2	–10.8	–11.9	–11.4	–5.7
	Min	–37.5	–36.1	–48.4	–58.3	–39.8	–39.5	–45.2	–45.1	–40.9
	Max	6.1	8.2	6.1	4.4	5.9	4.8	10.7	5.4	7.5

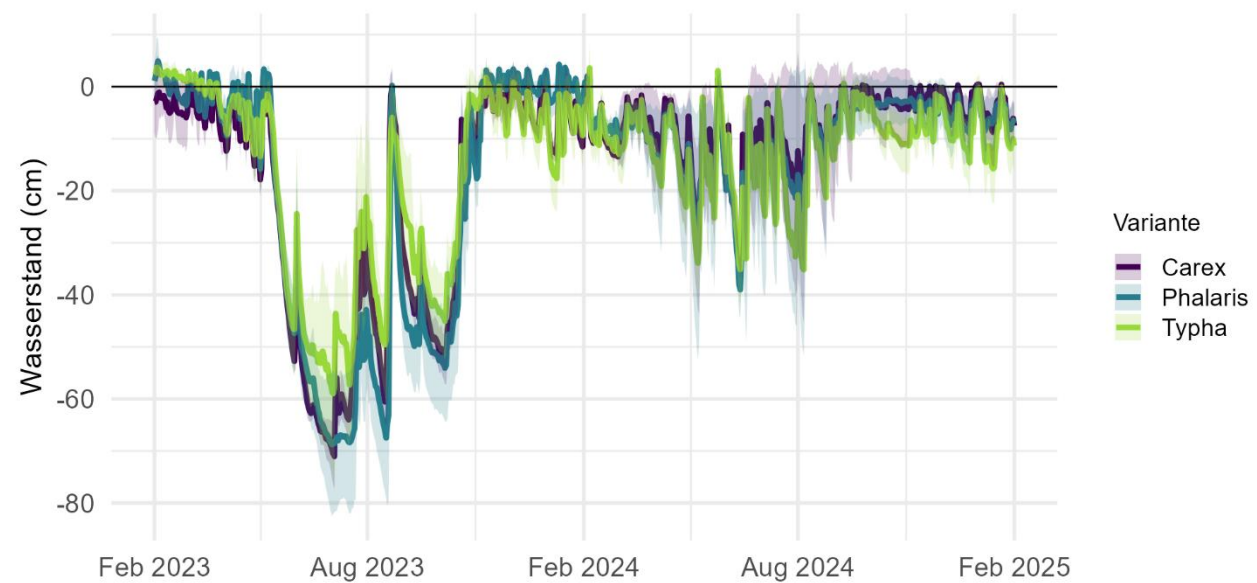


Abbildung 45: Wasserstandganglinien für die Jahre 2023 und 2024 am Standort Langenmosen für die drei unterschiedlichen Pflanzenarten.

Arbeitspaket 02: Biomassequantität und -qualität

Anfang Februar 2023 wurden in sämtlichen Kulturen und Managementvarianten gemäß dem zuvor festgelegten Versuchsdesign Dauerquadrate angelegt. Diese dienten der Erfassung der Vegetationsentwicklung und der Ertragsbestimmung. Parallel dazu wurden Flächen abgesteckt, die der Entnahme von Bodenproben dienten. Ergänzend wurden Moorwasserbeobachtungsrohre installiert und mit Grundwasserloggern (Rugged Troll 100, In-Situ Inc.) ausgestattet. Parallel dazu wurde am Standort LM eine zentrale Wetterstation (Atmos41, Meter Group AG) aufgebaut. Zur Erfassung der Bodentemperaturen wurde je Kulturpflanze und Managementvariante ein Datenlogger vom Typ CR300 (Campbell Scientific) installiert und mit insgesamt drei Bodentemperatursensoren des Typs 109 Thermistor (Campbell Scientific) bestückt. Die Vegetationserhebungen sowie die Entnahmen der Wasserproben vom Zulauf erfolgten in den Jahren

2023 und 2024 jeweils im Februar, April, Mai, Juni, Juli, August, September und November. Die Bodenproben wurden im Februar, April, Mai, Juli, August und November entnommen. Alle Messdaten (LAI, NDVI, Vegetationshöhe, Wetterdaten) sowie die Wasser- und Bodenproben wurden an das Thünen-Institut für die Pflanzenwachstumsmodellierung übermittelt. Die Ergebnisse dazu sind im Berichtsteil zu AP 02 des Thünen-Instituts dargestellt, die inhaltsstofflichen Untersuchungen der Biomasse im Berichtsteil des JKI. Abbildung 46 zeigt die erhobenen Jahresverläufe des LAI und des NDVI aller Varianten am Standort Langenmosen. Es wird deutlich, dass die 1-Schnittvarianten von *Carex* und *Phalaris* im Vergleich zu den 2-Schnittvarianten deutlich höhere maximale LAI-Werte erreichen, was auf eine dichtere Bestandesstruktur hinweist. *Typha* weist hingegen die geringsten LAI-Werte auf, was mit dem aufrechten Wuchs- bzw. Habitus der Pflanzen erklärt werden kann. Hinsichtlich der maximalen NDVI-Werte zeigen die Arten keine wesentlichen Unterschiede. Unterschiede werden jedoch im jahreszeitlichen Verlauf sichtbar, der die artspezifische Dynamik der Vegetationsentwicklung im Frühjahr sowie den unterschiedlich einsetzenden Beginn der Seneszenz im Spätsommer bzw. Herbst deutlich widerspiegelt.

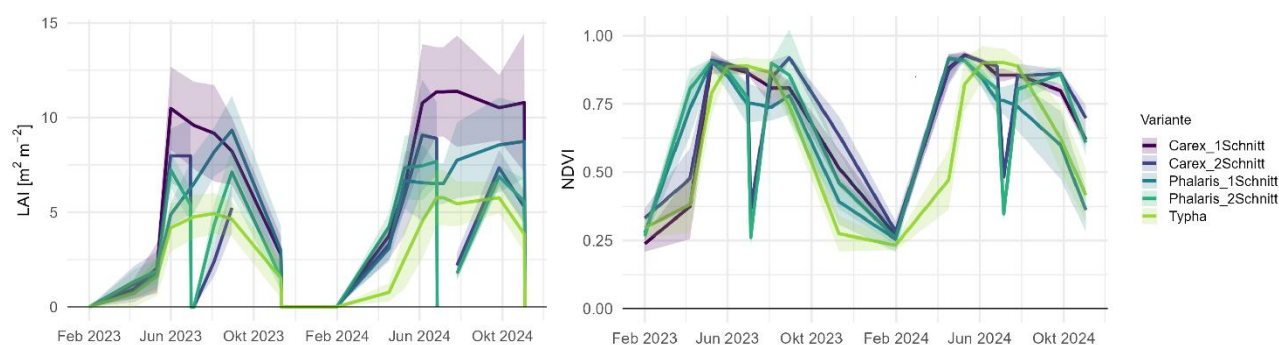


Abbildung 46: Jahresverläufe der gemessenen LAI- und NDVI-Werte entsprechend den jeweiligen Pflanzenarten und Managementoptionen für die Jahre 2023 und 2024 für den Standort Langenmosen.

Abbildung 47 zeigt die Entwicklung der Trockenmasseerträge am Standort Langenmosen seit der Etablierung der Bestände im Jahr 2018 (*Typha*) bzw. 2019 (*Carex*, *Phalaris*). Im Rahmen des NAPALU-Projekts wurden die Erträge in den Jahren 2023 bis 2025 erfasst. Im Gegensatz zu den Beobachtungen im Freisinger Moos konnten am Standort Langenmosen bislang keine langfristigen Ertragsrückgänge festgestellt werden. Stattdessen zeigen alle Arten eine ausgeprägte interannuelle Ertragsvariabilität, die mit zunehmender Bewirtschaftungsintensität tendenziell abnimmt. In der 1-Schnittvariante liegen die durchschnittlichen Trockenmasseerträge ohne Berücksichtigung der ersten zwei Jahre nach der Etablierung für *Carex* bei $9,48 \pm 1,77 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, für *Phalaris* bei $9,82 \pm 1,99 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und für *Typha* bei $8,65 \pm 2,43 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. *Typha* zeigt zudem innerhalb eines Jahres zwischen den Wiederholungen die größte Variabilität, was sich in entsprechend hohen Standardabweichungen widerspiegelt. Diese Streuung ist primär auf die variablen Wasserstände innerhalb der Versuchsfläche zurückzuführen und verdeutlicht im Vergleich zu *Carex* und *Phalaris* die geringere physiologische Toleranz von *Typha* gegenüber schwankenden Wasserständen. Durch eine Erhöhung der Bewirtschaftungsintensität mit einem Schnitt im Juli und einem weiteren während der Wintermonate lassen sich die durchschnittlichen Trockenmasseerträge auf $11,28 \pm 2,09 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Carex* und auf $12,91 \pm 1,19 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ für *Phalaris* steigern. Auch wenn am Standort Langenmosen bislang keine Aushagerungseffekte erkennbar sind, ist eine Intensivierung der Bewirtschaftung aufgrund der damit verbundenen hohen Erntekosten jedoch aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll (siehe Teilbericht der Universität Kiel). Zudem konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung der Bewirtschaftungsintensität das THG-Minderungspotenzial signifikant reduziert (siehe AP03 Stoffhaushalt). **Auf Grundlage des derzeitigen Kenntnisstands kann daher ausschließlich eine 1-Schnittnutzung im Winter empfohlen werden.**

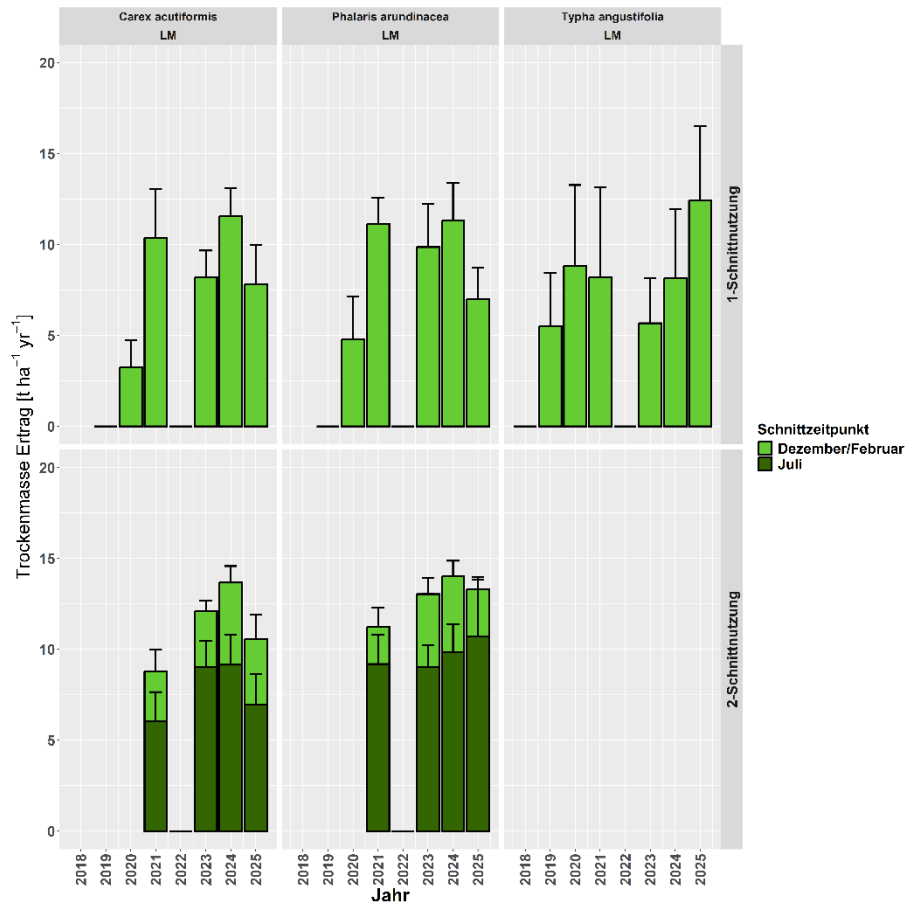


Abbildung 47: Entwicklung der Trockenmasseerträge am Standort Langenmosen seit der Etablierung im Jahr 2018 (*Typha angustifolia*) bzw. 2019 (*Carex acutiformis* und *Phalaris arundinacea*). Die Versuche zur 2-Schnittnutzung wurden erst im Jahr 2021 begonnen. Im Jahr 2022 wurden keine Erträge erfasst, das Management wurde aber entsprechend aufrechterhalten.

Arbeitspaket 03: Stoffhaushalt

Versuchsdesign und Paludikultur Management

Im Rahmen des Projekts NAPALU wurden in den Jahren 2023 und 2024 drei etablierte Paludikulturen am Intensivmessstandort Freisinger Moos untersucht: *Carex acutiformis* (Sumpf-Segge) und *Typha latifolia* (Breitblättriger Rohrkolben), jeweils mit einer Winterernte, sowie *Phalaris arundinacea* (Rohrglanzgras), das aufgrund seiner Eignung als Biogassubstrat (vgl. Hartung *et al.* 2020, 2023) in einem Zwei-Schnitt-System mit Sommer- und Winterernte bewirtschaftet wurde. Für alle Arten wurden verschiedene Düngungsvarianten (3- bzw. 4-fach repliziert) angelegt, darunter eine mineralische Düngung mit N-stabilisierten (ALZON® neo-N 46) NPK-Volldüngern bei *Carex* und *Typha*, eine organische Düngung mit flüssigem beziehungsweise separiertem Biogasgärrest bei *Phalaris* sowie eine ungedüngte Referenzvariante je Art (siehe Feldaufbau in Abbildung 48).

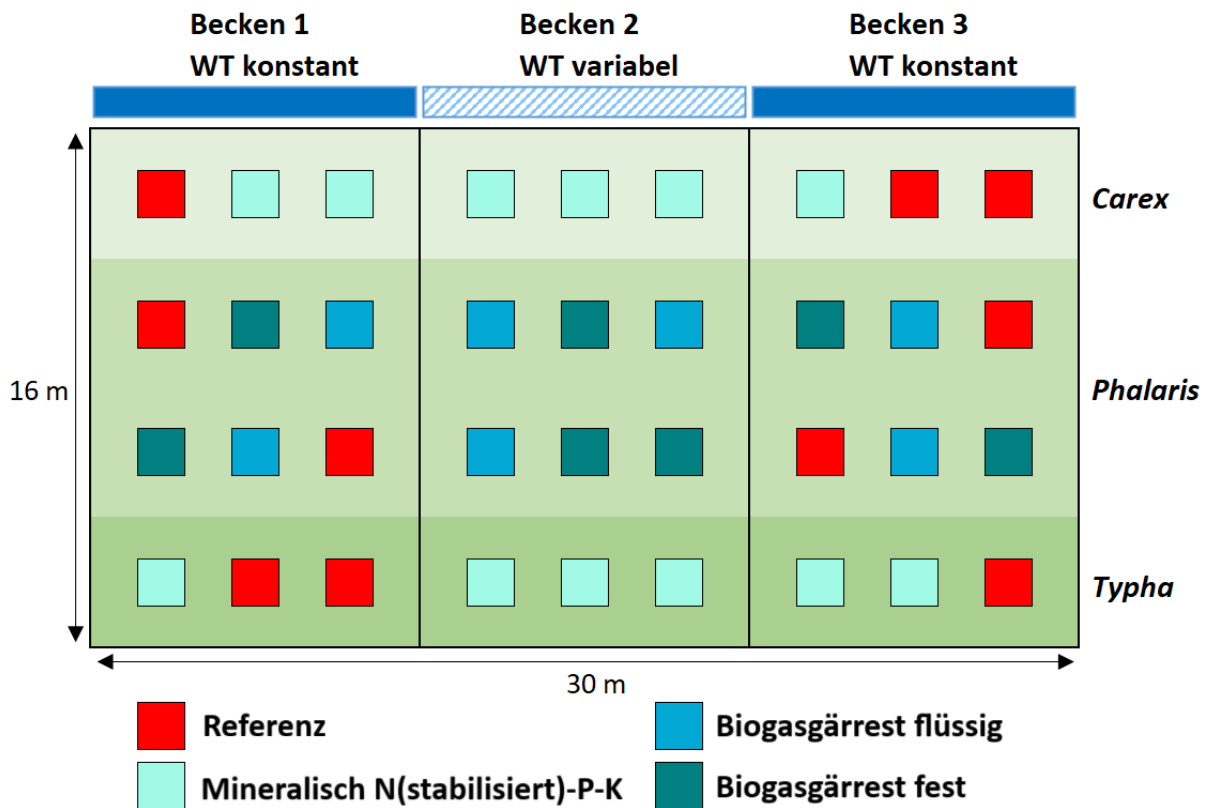


Abbildung 48: Feldaufbau der Messfläche am Intensivmessstandort Freisinger Moos für die Jahre 2023-2024 zur Erfassung des THG-Austausch und der Effekte von Nährstoffversorgung auf Produktivität und Umweltwirkung der drei Paludikulturarten *Carex acutiformis* (Sumpf-Segge), *Phalaris arundinacea* (Rohrglanzgras) und *Typha latifolia* (Breitblättrige Rohrkolben).

Pro Jahr erfolgten zwei Düngegaben entsprechend der potenziellen stofflichen und energetischen Verwertung der drei Pflanzenarten, jeweils im Frühjahr und Sommer. Die Mengen der Nährstoffrückführung orientierten sich an den jeweiligen Nährstoffentzügen der Pflanzen infolge der Ernte (siehe Jahresverlauf und Management Zeitplan 2024 in Abbildung 49). Bei den organisch gedüngten *Phalaris*-Varianten richtete sich die Düngemenge nach dem im Dünger enthaltenen Stickstoffgehalt. Im Rahmen der Untersuchungen zu *Phalaris* führte die Universität Trier ergänzende Boden- und Wasseranalysen durch, um die Auswirkungen einer erhöhten Nährstoffverfügbarkeit auf potenzielle Nährstoffausträge zu erfassen (siehe AP3.2).

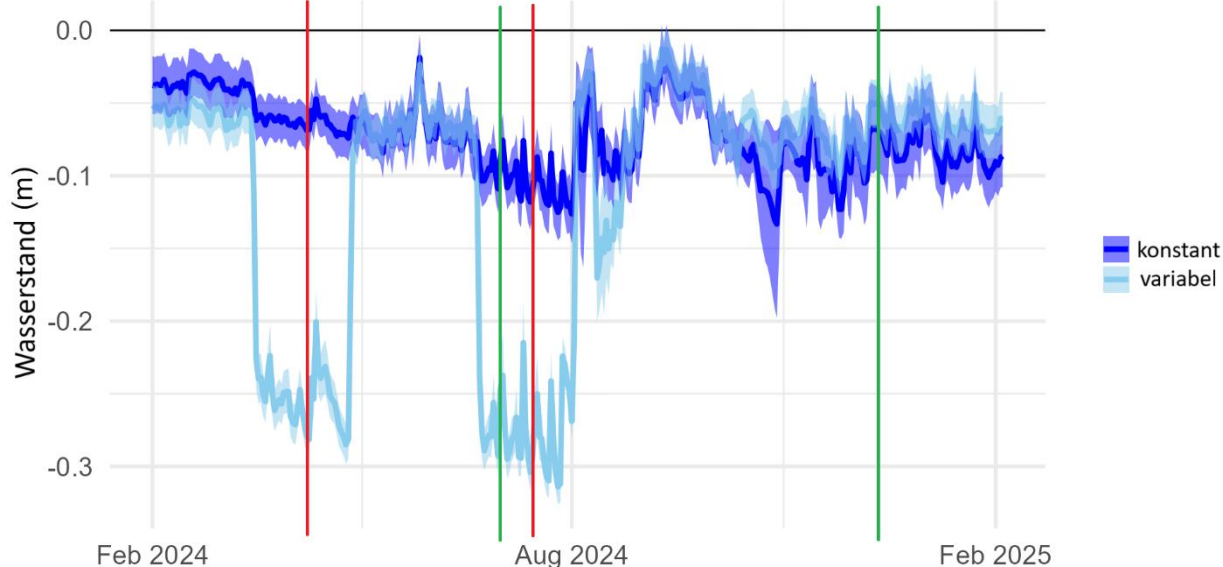


Abbildung 49: Jahresverläufe der Wasserstände in den Paludikulturen unter konstantem bzw. variablem Wasserstand und Indikation der Management Eingriffe Entzugsdüngung (rote Linien) und Ernten (grüne Linien: Sommerernte nur im Phalaris) in den Messflächen am Intensivmessstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.

Vor dem Hintergrund der Vorgaben der aktuellen Düngeverordnung (DüV § 5 Abs. 1), die das Ausbringen stickstoff- und phosphathaltiger Düngemittel auf wassergesättigten Böden untersagen, als auch um die aus Klimaschutzsicht relevanten besonderen hydrologischen Anforderungen von Paludikulturen abzubilden, wurden zwei Grundwasserstandsszenarien untersucht. Ein Szenario sah einen während Düngung und Sommerernte temporär abgesenkten Wasserstand vor („GWL variabel“, ca. -0,25 bis -0,30 m unter GOK; Jahresmittel -0,11 m), das zweite einen konstant hohen, oberflächennahen Wasserstand („GWL konstant“, Jahresmittel -0,07 m), entsprechend aktuellen Erkenntnissen von Bockermann und Eickenscheidt *et al.* (2025) zur Minderung von Treibhausgasemissionen in Paludikulturen. Die temporäre Absenkung der Wasserstände wurde jeweils für etwa eineinhalb Monate vorgenommen, um die Vorgaben der aktuellen Düngeverordnung einzuhalten. Außerhalb dieser Zeiträume wurde in allen Becken ein Wasserstand von etwa -0,07 m unter GOK angestrebt. Die Steuerung und Regulierung der Wasserstände erfolgte vollautomatisch und zentimetergenau in drei nebeneinanderliegenden Kunststoffspundwandbecken (siehe Feldaufbau in

Abbildung 48 und Zeitplan in Abbildung 49. Im Jahresverlauf oszillierten die Wasserstände in den Becken entsprechend den natürlichen Schwankungen der umliegenden Flächen: in der Variante „GWL konstant“ zwischen leichtem Überstau und -0,18 m, in der Variante „GWL variabel“ zwischen leichtem Überstau und -0,35 m (siehe Abbildung 49). Im Jahr 2023 erfolgte die Sommerernte des *Phalaris* am 29.06.2023, die Winterernten aller Arten am 14.11.2023. Die erste Düngung wurde am 03.05.2023 durchgeführt, die zweite zwei Wochen nach der Sommerernte der *Phalaris*-Bestände am 19.07.2023. Im Jahr 2024 erfolgte die Sommerernte des *Phalaris* am 02.07.2024, die Winterernten aller Arten am 12.12.2024. Die Düngapplikationen wurden am 10.04.2024 sowie zwei Wochen nach der Sommerernte am 17.07.2024 vorgenommen. Tabelle 21 zeigt die applizierten Nährstoffmengen für die Jahre 2023 und 2024.

Tabelle 21: Gesamtwerte der Nährstoffrückführung von Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) in kg ha⁻¹ a⁻¹ in den Düngevarianten der Paludikulturen *Carex acutiformis* (Sumpfschilf), *Typha latifolia* (breitblättriger Rohrkolben) und *Phalaris arundinacea* (Rohrglanzgras) im Freisinger Moos für 2023 und 2024.

Paludikultur Pflanzenart und Düngevariante	Nährstoffrückführung (kg ha ⁻¹ a ⁻¹)					
	2023			2024		
	N	P	K	N	P	K
<i>Carex</i> - mineralische Düngung	142,0	45,9	88,9	162,1	33,7	87,6
<i>Typha</i> - mineralische Düngung	135,1	43,0	77,2	73,3	10,4	16,6
<i>Phalaris</i> - organische Düngung mit separiertem Biogasgärrest	198,8 (davon 52,9 NH ₄ -N)	82,4	210,5	123,8 (davon 34,9 NH ₄ -N)	39,0	126,9
<i>Phalaris</i> - organische Düngung mit flüssigem Biogasgärrest	198,8 (davon 77,3 NH ₄ -N)	72,8	212,9	123,8 (davon 69,2 NH ₄ -N)	22,4	130,6

Ergebnisse

Die **Biomasseerträge** zeigten insgesamt eine leicht positive oder neutrale Reaktion auf Düngung, mit deutlichen interspezifischen Unterschieden (siehe Abbildung 50). Die *Carex*-Bestände erreichte bei einer Winterernte im Jahr 2024 auch ohne Nährstoffrückführung Trockenmasseerträge von $8,6 \pm 2,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Weder unter konstant nassen noch unter temporär abgesenkten Wasserständen konnten durch Düngung signifikante Ertragsunterschiede festgestellt werden, trotz einer N-Zufuhr von $142 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 2023 bzw. $162 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Jahr 2024. Im Jahr 2023 lagen die *Carex*-Erträge mit $12,3 \pm 5,0$ bis $14,1 \pm 4,7 \text{ t TM ha}^{-1}$ Trockenmasse pro Hektar im Jahr deutlich über den langjährigen Mittelwerten aus den Jahren 2017 bis 2022 (siehe Eickenscheidt *et al.*, 2023). Im Jahr 2024 hingegen lagen sie mit $8,2 \pm 2,0$ bis $9,6 \pm 2,5 \text{ t TM ha}^{-1}$ im Bereich der langjährigen Mittelwerte für diese Art. In den *Typha*-Beständen führte eine langfristige Nutzung mit Winterernte zu einem signifikanten Ertragsrückgang, der durch eine Nährstoffrückführung in Höhe der Entzüge auf etwa $8,3 \pm 0,7 \text{ t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Dies war jedoch ausschließlich unter konstant nassen Bedingungen möglich, während temporär abgesenkte Wasserstände die Erträge signifikant reduzierten ($4,5 \pm 0,1 \text{ t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die Erträge der *Typha*-Bestände blieben zwischen den Messjahren 2023 und 2024 insgesamt stabil, mit vergleichbaren Werten von $3,7 \pm 0,8$ bis $7,0 \pm 1,5 \text{ t TM ha}^{-1}$ im Jahr 2023 und zwischen $4,5 \pm 0,2$ und $8,3 \pm 0,7 \text{ t TM ha}^{-1}$ im Jahr 2024. *Phalaris* zeigte im Zwei-Schnitt-System einen signifikanten Ertragsrückgang, der durch Düngung mit flüssigem Biogasgärrest auf ca. $10,0 \pm 2,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Der Einsatz von separiertem Gärrest bewirkte hingegen keine Ertragsstabilisierung. In beiden Düngevarianten hatte das Wassermanagement keinen Einfluss auf die Ertragshöhe. Über alle *Phalaris*-Varianten hinweg lagen die Erträge im Jahr 2023 mit $14,6 \pm 2,7$ bis $16,3 \pm 1,5 \text{ t TM ha}^{-1}$ deutlich über den langjährigen Mittelwerten aus den Jahren 2017 bis 2022 (siehe Eickenscheidt *et al.*, 2023). Die im Jahr 2024 ermittelten Erträge lagen hingegen wieder im Bereich der langjährigen Mittelwerte für diese Art. Wodurch diese außergewöhnlich hohen Ertragswerte im Jahr 2023 bei *Carex* und *Phalaris* verursacht wurden, lässt sich jedoch nicht abschließend klären. Ein Effekt der Düngung kann ausgeschlossen werden da die ungedüngten Referenzflächen ebenfalls sehr hohe Erträge aufwiesen. Zugleich zeigt sich, dass die Auswirkungen einer Intensivierung der Bewirtschaftung, abhängig von den jeweiligen Standortbedingungen, unter Umständen erst nach mehreren Jahren der Nutzung sichtbar werden.

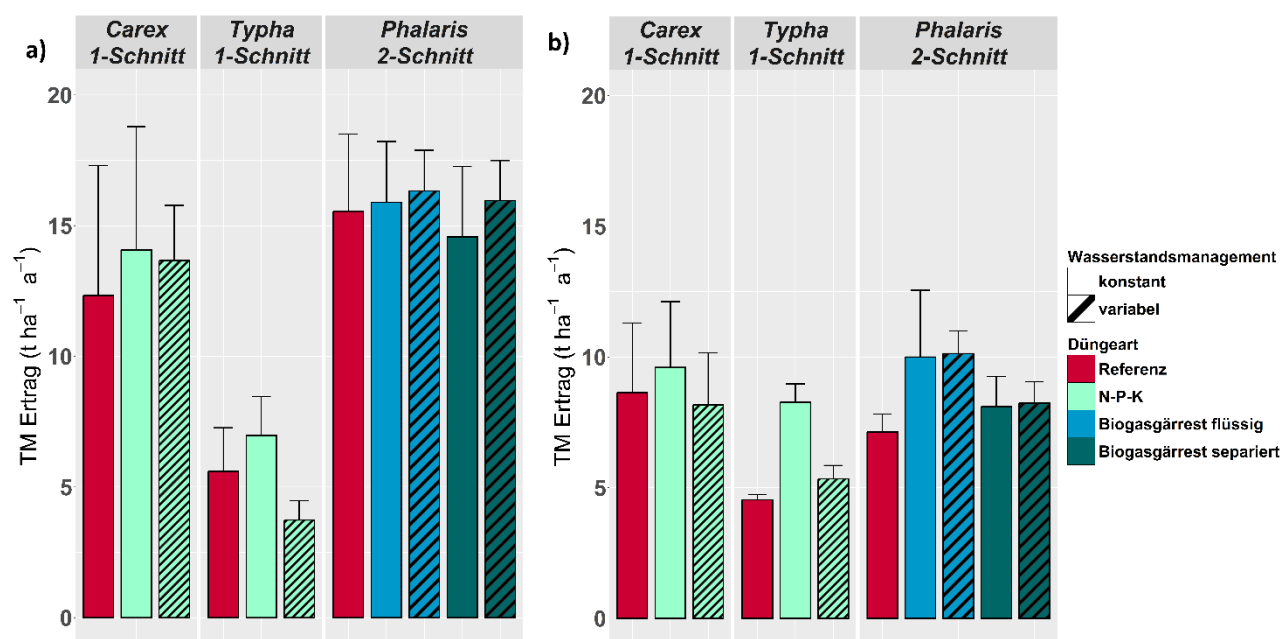


Abbildung 50: Ernteerträge ($\text{t TM ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmessstandort Freisinger Moos für die Jahre 2023 (a) und 2024 (b).

Die Erfassung der **Treibhausgasflüsse** erfolgte vom 02.02.2024 bis 10.02.2025 (somit im 8. Standjahr nach Pflanzenetablierung durch Pflanzung 2017) mittels einer vollautomatisierten Messvorrichtung. Die hochfrequenten Konzentrationsbestimmungen von Kohlendioxid (CO_2 , als Nettoökosystemaustausch, NEE, und Ökosystematmung, Reco) wurden im täglichen Wechsel mit Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) in den elf verschiedenen Varianten mit jeweils drei- bis vierfacher Wiederholung durchgeführt. Insgesamt konnten für das Bilanzierungsjahr 2024 ca. 73.000 einzelne CO_2 - sowie ca. 13.500 einzelne CH_4 - und N_2O -Messungen realisiert werden. Zur besseren Abschätzung der Gesamtstickstoffverluste wurden die organisch gedüngten *Phalaris*-Varianten zusätzlich durch manuelle Ammoniak- (NH_3)-Messungen ergänzt. Parallel wurden für die Gasaustauschprozesse relevante meteorologische Steuerparameter (Boden- und Lufttemperaturen,

Strahlung) kontinuierlich erfasst. Auf Basis dieser Daten konnte die Gesamtreibhausgasbilanz unter Einbeziehung von CO₂-, CH₄- und N₂O-Austausch sowie Kohlenstoffexporten und -importen für die untersuchten Varianten berechnet werden. Generell stieg die CO₂-Ökosystematmung (Reco) erwartungsgemäß unter Düngung und bei variablem Wasserstand signifikant an (Abbildung 51 a, vgl. Tiemeyer *et al.* 2020; Bockermann und Eickenscheidt *et al.* 2025). Bei variablem Wasserstand ist das höhere Reco vor allem auf eine verstärkte Bodenatmung infolge der temporär erhöhten Durchlüftung des Oberbodens zurückzuführen und nicht auf einen Biomassezuwachs. Die stärkste Zunahme der Bodenatmung wurde in den *Typha*-Beständen beobachtet, mit einer Erhöhung des Reco um 21 %, was sich auch in den einzigen positiven Nettoökosystembilanzen dieser Messvariante im Gesamtdatensatz widerspiegelt ($3,2 \pm 15,5$ t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹). Im Vergleich führten in allen anderen Varianten die hohen CO₂-Aufnahmen durch die Bruttoprimärproduktion (GPP, gross primary production) der Pflanzen von $-96,9 \pm 14,4$ bis $-129,4 \pm 5,0$ t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ (Abbildung 51 b) zu negativen NEE-Bilanzen (Abbildung 51 c). Generell zeigte sich im CO₂-Nettoökosystemaustausch der untersuchten Arten ein klarer Trend: Die *Carex*-Bestände - insbesondere die ungedüngten Varianten - wiesen die höchsten CO₂-Senkenleistungen mit $-37,7 \pm 5,4$ t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ auf.

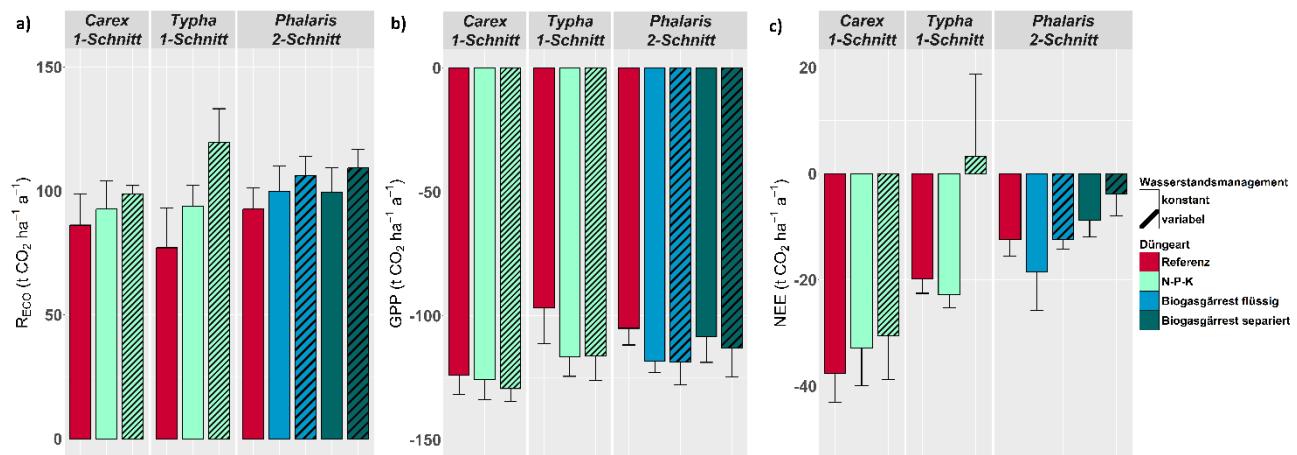


Abbildung 51: CO₂-Austausch (t CO₂ ha⁻¹ a⁻¹), als a) Ökosystematmung (Reco), b) Bruttoprimärproduktion (GPP) und c) Nettoökosystemaustausch, (NEE) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmessstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.

Die Methanemissionen zeigten, dass Wasserstand und Pflanzenart als Steuerfaktoren die Emissionsdynamik bestimmen, während Düngeeffekte nur gering ausfielen. Wie erwartet waren die CH₄-Emissionen bei variablem Wasserstand niedriger und bei konstant hohem Wasserstand aufgrund anhaltend anoxischer Bodenbedingungen signifikant erhöht (Abbildung 51). Die *Carex*-Bestände wiesen sowohl bei konstant hohem als auch bei variablem Wasserstand generell die niedrigsten CH₄-Emissionen auf ($69,2 \pm 1,0$ bei konstantem GWL; $297,4 \pm 2,6$ kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ bei variablem GWL). In den *Typha*- und *Phalaris*-Beständen lagen die Methanemissionen in beiden Wasserstandsklassen signifikant höher, mit Maximalwerten von $684,8 \pm 10,8$ bzw. $902,4 \pm 47,4$ kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹ bei konstant hohem Wasserstand. Eine Abhängigkeit der Methanemissionen vom Jahresmittel des Grundwasserstands konnte in allen Varianten beobachtet werden. Während die Düngung zu signifikant höheren Lachgasemissionen führte, blieb die absolute Höhe jedoch gering mit N₂O-Emissionen von $0,6 \pm 1,0$ kg N₂O ha⁻¹ a⁻¹ im Maximum in der gedüngten *Typha*-Variante bei variablem Wasserstand (Abbildung 51). Das Wasserstandsmanagement hatte hingegen generell keinen signifikanten Einfluss auf die N₂O Emissionen. In ungedüngten Varianten wurden leicht negative N₂O-Flüsse zwischen $-0,3 \pm 0,7$ bis $-0,4 \pm 1,0$ kg N₂O ha⁻¹ a⁻¹ gemessen.

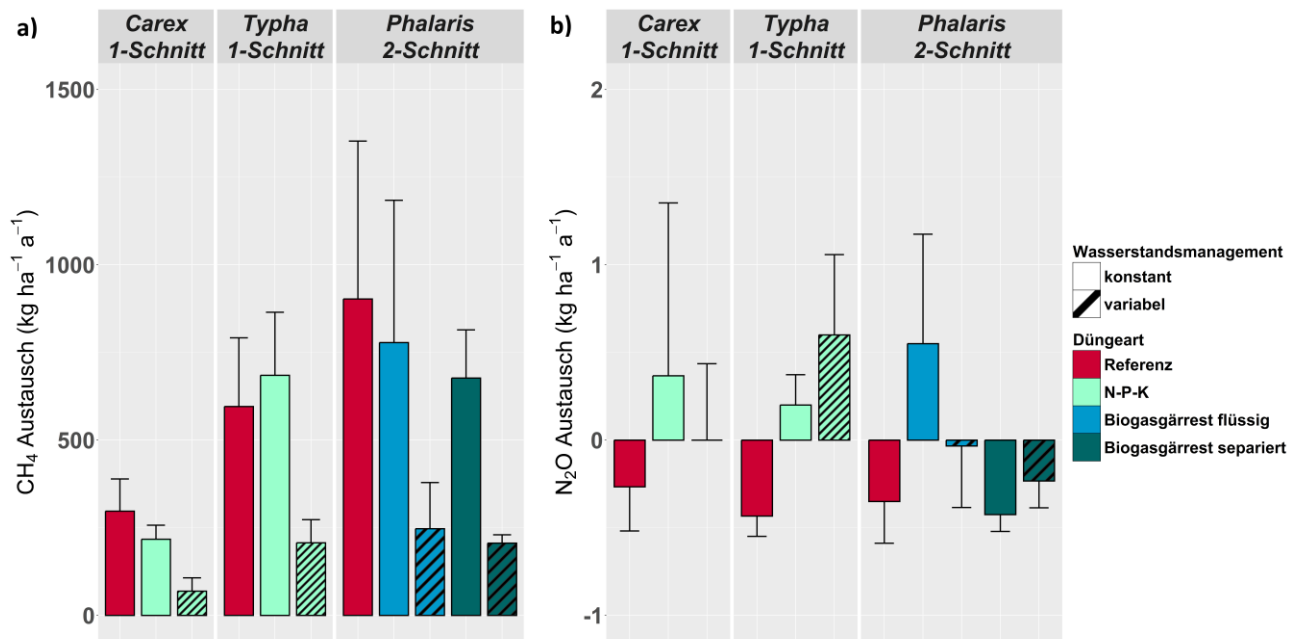


Abbildung 52: a) CH₄-Austausch (kg CH₄ ha⁻¹ a⁻¹) und b) N₂O-Austausch (kg N₂O ha⁻¹ a⁻¹) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmessstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.

In der Gesamtbetrachtung der Treibhausgasemissionen, ausgedrückt in CO₂-Äquivalenten, zeigten sich keine einheitlichen Düngeeffekte, jedoch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Arten (Abbildung 53). Die *Carex*-Bestände wiesen deutlich höhere Aufnahme- und Minderungspotenziale im Vergleich zu *Typha* und *Phalaris* auf und zeigten keine Ertragssteigerung durch Düngung. Ein negativer Düngeeffekt war lediglich in den *Typha*-Beständen erkennbar, verursacht durch erhöhte Reco- oder CH₄-Emissionen. Folglich waren die *Typha*-Bestände ausschließlich THG-Quellen mit $4,1 \pm 7,5$ (ungedüngt) bis zu $18,4 \pm 15,2$ (gedüngt, GWL variable) t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹. *Phalaris* zeigte unerwartet hohe Emissionen; die temporäre Absenkung des Wasserstands während der Düngung konnte die Gesamtemissionen jedoch durch reduzierte CH₄-Emissionen verringern. Ein Vergleich mit Ein-Schnitt-Systemen derselben Versuchsfläche aus dem Jahr 2020 zeigt eine deutliche Emissionszunahme im hier untersuchten Zwei-Schnitt-System. Diese Nutzung führte zu den höchsten THG-Gesamtemissionen in den *Phalaris*-Varianten, mit THG-Quellen von $7,8 \pm 2,3$ t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹ (gedüngt, GWL variable) bis zu $24,0 \pm 11,7$ t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹ (ungedüngt). Demgegenüber wiesen die *Carex*-Bestände hohe Senkenleistungen von $-9,9 \pm 11,2$ (gedüngt, GWL konstant) bis $-14,6 \pm 11,7$ (ungedüngt) t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹ auf, also insbesondere, wenn keine Nährstoffzufuhr stattfand.

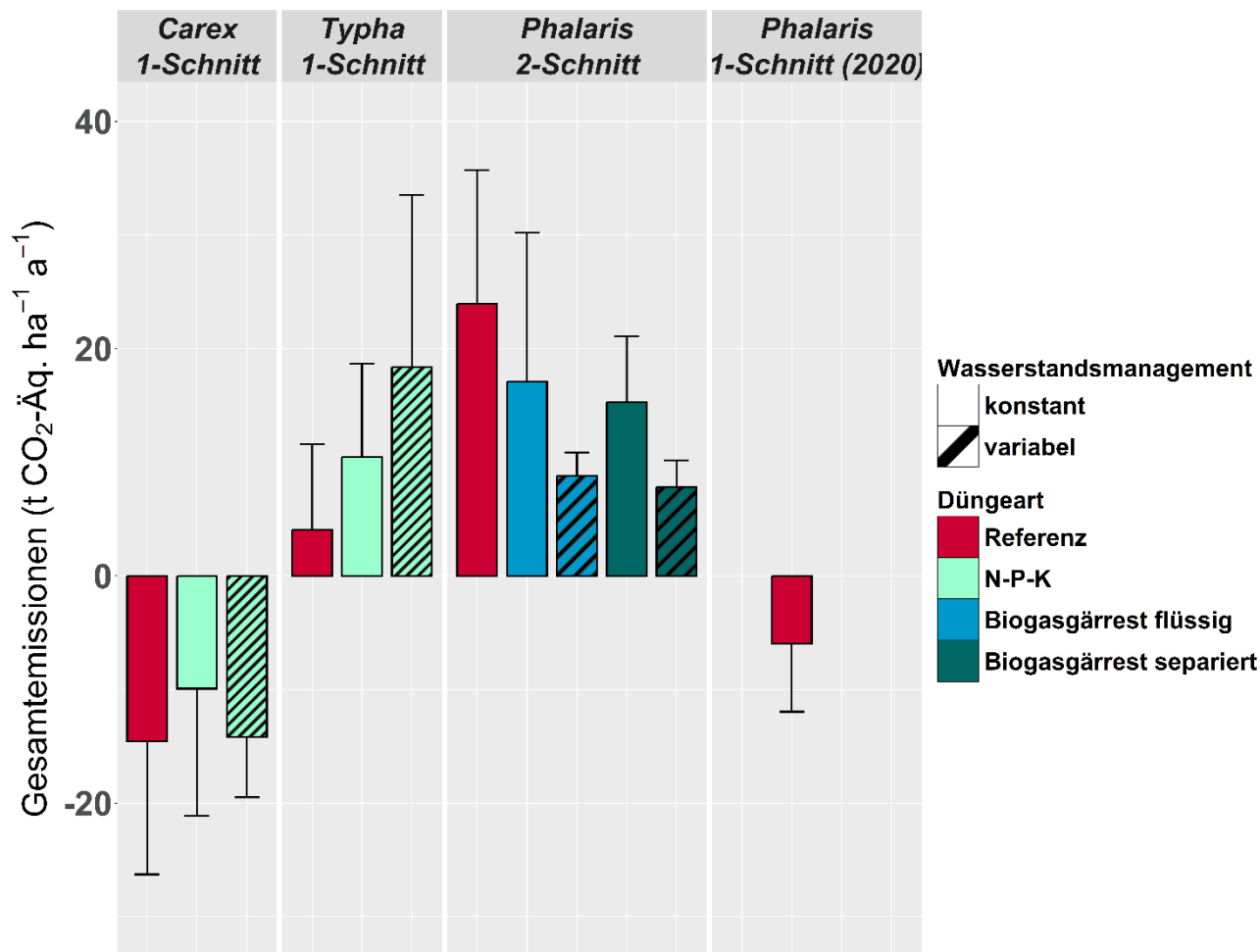


Abbildung 53: Gesamtemissionen (t CO₂-Äq. ha⁻¹ a⁻¹) der drei Paludikulturarten (elf Varianten) bei konstantem und variablem Wasserstand und unterschiedlicher Düngeart (mineralische Düngung N-P-K; organische Düngung mit flüssigem bzw. separiertem Biogasgärrest) in den Messflächen am Intensivmessstandort Freisinger Moos im Jahr 2024.

Erweiterung der Umwelteffekte um die Ammoniakverflüchtigung

Um die Gesamt-N-Verluste besser quantifizieren und diese in die Bewertung der Umwelteffekte miteinbeziehen zu können, wurde die organische Düngung der *Phalaris*-Varianten im Jahr 2024 zusätzlich zum geplanten Messprogramm durch Ammoniak-(NH₃)-Messungen begleitet. Hierfür erfolgten auf den Messflächen des AP3.2 ab dem Applikationszeitpunkt am 10. April sowie erneut ab dem 17. Juli 2024 jeweils für 30 Stunden manuelle NH₃-Messungen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Zeitpunkt der Düngung einen entscheidenden Einfluss auf die Ammoniakverflüchtigung hat. Im vorliegenden Versuch erwies sich der gewählte Düngezeitpunkt in Kombination mit der Düngeverordnung konformen, emissionsarmen Ausbringtechnik (bodennah und streifenförmig) als ideal, da Stickstoffverluste durch Ammoniak weitgehend vermieden wurden. Dies wird durch die Messwerte bestätigt: Während besonders im Juli 2024 ein grundsätzlich hohes Emissionspotenzial bestand (vgl. Abbildung 53 a), führten die günstigen meteorologischen Bedingungen während der Ausbringung, insbesondere sehr geringe Windgeschwindigkeiten, zu einer deutlichen Reduktion der NH₃-Verflüchtigung (vgl. Abbildung 53 b). Die Emissionen im April waren signifikant niedriger verglichen mit dem Juli. Dadurch war auch das Risiko einer Versauerung und Eutrophierung von Böden und Gewässern infolge atmosphärischer Ammoniakeinträge sehr gering. Die mit der Düngung verbundene kumulative NH₃-Verflüchtigung blieb somit insgesamt niedrig (vgl. Abbildung 53 c), überstieg jedoch im Vergleich die N-Verluste in Form von N₂O. Die Entzugsdüngung mit separiertem Gärrest führte zu Emissionen von $1,1 \pm 0,2$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei variablem GWL und $1,4 \pm 0,1$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei konstantem GWL. Im Vergleich führte eine Entzugsdüngung mit flüssigem Gärrest zu signifikant höheren Emissionen von $1,8 \pm 0,3$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei variablem GWL und $2,0 \pm 0,3$ kg NH₃-N ha⁻¹ a⁻¹ bei konstantem GWL. Der variable Wasserstand führt zu signifikant geringeren NH₃-Verlusten, vermutlich infolge einer reduzierten Wassersättigung des Porenvolumens im Oberboden und der damit verbundenen verbesserten Infiltration des Düngers.

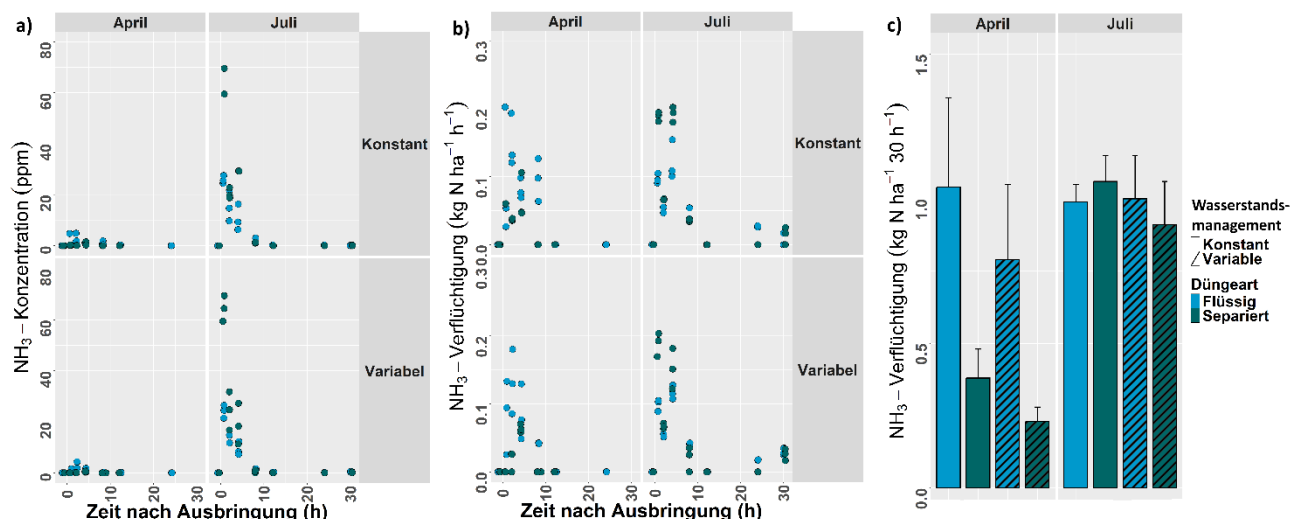


Abbildung 54: Stickstoffverluste durch Ammoniak-(NH₃)-Verflüchtigung infolge der Düngung mit flüssigen und separierten Biogas-Gärresten in den *Phalaris*-Varianten bei konstanten bzw. variablen Wasserständen im Freisinger Moos im April und Juli 2024: a) zeitliche Verläufe der gemessenen Ammoniak Konzentrationen über 30 Stunden nach der Düngerausbringung (in parts per million, ppm), b) zeitliche Verläufe der berechneten Ammoniakflüsse über 30 Stunden nach der Düngerausbringung (in kg N pro Hektar und Stunde), c) kumulative Stickstoffverluste durch Ammoniakverflüchtigung nach der Düngerausbringung (in kg N pro Hektar und 30-h Messzeitraum mit Standardfehler).

Arbeitspaket 04: Biodiversität

Aus Platzgründen wird hier auf das Arbeitspaket 04 in der ausführlichen Darstellung der Ergebnisse verwiesen.

Arbeitspaket 05: Pflanzenwachstumsmodellierung

Siehe Teilbericht Thünen-Institute für Agrarklimaschutz. Zur Unterstützung dieses Arbeitspakets wurden sämtliche im Projekt erhobenen Daten sowie die Vorläuferdaten aus dem MOORuse-Projekt für den Zeitraum 2016 bis 2021 an das Thünen-Institute für Agrarklimaschutz übermittelt.

Arbeitspaket 07: Ökonomische Bewertung:

Siehe Teilbericht der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Zur Unterstützung dieses Arbeitspakets wurden sämtliche im Projekt erhobenen Daten sowie die Vorläuferdaten aus dem MOORuse-Projekt an die Christian-Albrechts-Universität zu Kiel übermittelt.

Arbeitspaket 08: Teilnahme an Veranstaltungen, Beteiligung an der Erstellung von Materialien für die ÖA

Aktuell wird, in Kooperation mit der Universität Trier (AP3.2) an einer begutachteten Open-Access-Publikation zu den potenziellen Umweltfolgen einer Nährstoffrückführung in unterschiedlichen Paludikulturen gearbeitet. Die Publikation soll Mitte 2026 bei einem hochrangigen Journal z.B. Biogeosciences eingereicht werden (Stand Januar 2026). Darüber hinaus fließen die Daten in eine Europaweite Synthesestudie zu Anbau-Paludikulturen die ebenfalls Mitte 2026 hochrangig eingereicht werden soll. Der gemeinsame Abschlussbericht wird darüber hinaus auf den Webseiten der Projektpartner, unter anderem auch auf der Webseite der HSWT-PSC, öffentlich zum Download zur Verfügung gestellt.

Folgende Konferenzbeiträge wurden zudem während der Projektlaufzeit geleistet:

- Bockermann C, Demmer M, Eberl J, Drösler M, Eickenscheidt T 2025: THG-Austausch II: Auswirkungen einer Erhöhung des Nährstoffdargebots, Abschlussveranstaltung im Projekt NAPALU, 30. Oktober 2025, Oldenburg, Deutschland. (Vortrag)
- Eickenscheidt T, Bockermann C, Demmer M, Eberl J, Drösler M 2025: Effects of fertilization and water management on greenhouse gas dynamics and mitigation potentials in paludiculture systems. Konferenz: Renewable Resources from Wet and Rewetted Peatlands, 4th International Conference on the Utilisation of Wetland Plants 2025, 26. September 2025, Greifswald, Deutschland. (Vortrag)
- Bockermann C, Drösler M, Eickenscheidt T (2025) Effects of different fertilization strategies and groundwater management scenarios on greenhouse gas dynamics and mitigation potentials in various paludiculture systems. Konferenz: Jahrestagung der Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft DBG 2025, 04. September 2025, Tübingen, Deutschland. (Vortrag)
- Bockermann C, Eickenscheidt T, Drösler M (2024) Nachhaltigkeit von Paludikulturen unter besonderer Berücksichtigung des Stoffhaushaltes (NAPALU). Konferenz: Jahrestagung der Deutschen

Nach erfolgreicher Begutachtung der beiden Publikationen werden sämtliche im Projekt erhobenen Daten im Rahmen der Open-Access-Strategie in geeigneten Repositorien veröffentlicht und stehen damit der wissenschaftlichen Community zur Verfügung.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Es konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Arten sehr unterschiedliche Nährstoffanforderungen haben, um langfristig stabile Erträge zu erzielen. *Carex* erreichte bei einer Winterernte auch ohne Nährstoffrückführung Trockenmasseerträge von $8,6 \pm 2,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Weder unter konstant nassen noch unter temporär abgesenkten Wasserständen konnten durch Düngung signifikante Ertragsunterschiede festgestellt werden. Bei *Typha* führte eine langfristige Nutzung mit Winterernte zu einem signifikanten Ertragsrückgang, der durch Nährstoffrückführung in Höhe der Entzüge auf etwa $8,3 \pm 0,7 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Dies war jedoch nur unter konstant nassen Bedingungen möglich, da temporär abgesenkte Wasserstände die Erträge signifikant reduzierten. *Phalaris* zeigte im Zweischnittsystem einen signifikanten Ertragsrückgang, der durch flüssigen Biogasgärrest auf ca. $10,0 \pm 2,6 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ stabilisiert werden konnte. Separierter Gärrest bewirkte keine Ertragsstabilisierung. In beiden Düngevarianten hatte das Wassermanagement keinen Einfluss auf die Ertragshöhe. Mit Ausnahme der Ausbringung von separiertem Gärrest führte die Düngung generell zu leicht erhöhten N_2O -Emissionen gegenüber den Kontrollen. Entgegen den Erwartungen können die gemessenen N_2O -Emissionen unabhängig von der Grundwasserführung als vernachlässigbar angesehen werden. Aufgrund der günstigen Witterungsbedingungen während der Applikation der organischen Düngemittel waren die gemessenen NH_3 -Verluste unabhängig von Düngerart und Grundwasserführung insgesamt sehr gering. Ungeachtet dessen besteht, analog zur generellen Ausbringung flüssiger und fester organischer Düngemittel, grundsätzlich ein erhöhtes Umweltrisiko durch potenzielle Ammoniakemissionen. Das Treibhausgasminderungspotenzial (THG-MP) unterschied sich deutlich zwischen den Arten. Besonders *Phalaris* wies im Zweischnittsystem unerwartet hohe Emissionen auf, die durch Düngung in Kombination mit temporärer Grundwasserabsenkung von ca. 24 auf $9 \text{ t CO}_2\text{-Äq. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ reduziert werden konnten, vor allem infolge sinkender CH_4 -Emissionen. Bei *Typha* reduzierten sowohl Düngung als auch deren Kombination mit Grundwasserabsenkung das THG-MP signifikant. *Carex* zeigte in allen Varianten eine deutlich negative Treibhausgasbilanz von bis zu $-14,5 \text{ t CO}_2\text{-Äq. ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, unabhängig von Düngung oder Wassermanagement.

Die Ergebnisse belegen, dass eine landwirtschaftliche Nutzung von Moorböden in Form der Paludikultur dauerhaft und nachhaltig möglich ist und bei standortangepasster Bewirtschaftung sowie gezielter Pflanzenartenauswahl signifikant zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aus organischen Böden beitragen kann. Damit kann Paludikultur unter geeigneten Bedingungen einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der nationalen Klimaschutzziele leisten. Zugleich verdeutlichen die Ergebnisse, dass eine Intensivierung der Nutzung das THG-MP deutlich reduziert und die Klimavorteile der Paludikultur gegenüber einer konventionellen, entwässerungsbasierten Grünlandnutzung weitgehend aufheben kann. Die langfristig realisierbaren Trockenmasseerträge liegen Standortsunabhängig in einer Größenordnung, die das Potential bieten regionale Wertschöpfungsketten ökonomisch tragfähig aufzubauen. Aus naturschutzfachlicher Sicht stellen Paludikulturen insbesondere für die Artengruppen der Libellen und Vögel wertvolle Habitate und Rückzugsräume dar. Zwar war bei den Pflanzen und Heuschrecken der Anteil gefährdeter Arten (Rote Liste) vergleichsweise gering, bei den Vögeln hingegen deutlich erhöht. Sowohl bezogen auf das gesamte Artenspektrum als auch auf die Zahl der Brutvogelarten wies etwa die Hälfte der erfassten Arten einen Rote-Liste-Status auf. Bei den Libellen lag dieser Anteil bei rund einem Viertel der nachgewiesenen Arten. Das Projekt liefert somit eine wissenschaftlich fundierte Grundlage für die Entwicklung klima- und umweltgerechter Bewirtschaftungsstrategien auf Moorböden. Auf Basis des vergleichenden Ansatzes verschiedener Pflanzenarten und Bewirtschaftungsformen lassen sich folgende Empfehlungen für eine langfristige und nachhaltige Nutzung ableiten:

1. Die Nutzung von *Phalaris* sollte auf eine einmalige Wintermahd ohne Nährstoffrückführung beschränkt werden, um im Vergleich zur konventionellen, entwässerungsbasierten Grünlandbewirtschaftung eine signifikante Minderung der Treibhausgasemissionen zu erzielen.
2. Der Anbau von *Typha* sollte auf Standorte mit sehr hoher natürlicher Nährstoffverfügbarkeit begrenzt und vorzugsweise mit einer Wiedervernässung unter Einsatz nährstoffreichen Bewässerungswassers kombiniert werden. Die ausgeprägte Filter- und Retentionsleistung von *Typha*-Beständen kann dabei zur Aufnahme überschüssiger

Nährstoffe aus Oberflächenwasser beitragen und potenzielle Umweltrisiken zusätzlich mindern.

3. *Carex* erweist sich insgesamt als die am besten geeignete Art für die Etablierung neuer Paludikulturstandorte, da sie auch ohne Düngung stabile Erträge ermöglicht und zugleich das höchste THG-MP aufweist. Inwieweit dies ebenfalls durch die Art *Phragmites australis* erreicht werden kann, wird derzeit noch untersucht.
4. Durch die Umsetzung naturschutzfachlicher Mindeststandards (Erntezeitpunkte, Staffelmahd, belassen von ungenutzten Teilflächen als Überwinterungshabitaten, etc.) bei der Bewirtschaftung von Paludikulturen können gezielt wertvolle Brut- und Rückzugshabitate für gefährdete Vogelarten und weitere Artengruppen geschaffen und dauerhaft gesichert werden.

Teilvorhaben 3: THG-Austausch einer niedersächsischen Pilotfläche und Modellierung der Effekte der Standortverhältnisse auf das Pflanzenwachstum

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war es, den Einfluss der Standortbedingungen auf Vegetationsentwicklung und Biomasseproduktion an den Pilotstandorten zu untersuchen. Hierzu wurden entlang natürlicher sowie nutzungsbedingter Gradienten Vegetationsentwicklung, Biomasseerträge und Nährstoffgehalte erfasst sowie hydrologische und meteorologische Standortbedingungen kontinuierlich dokumentiert. Ergänzend wurden Wasser-, Boden- und Biomasseproben entnommen und analysiert, um die Nährstoffdynamik sowie den Stoffhaushalt der Systeme zu charakterisieren. Teile dieser Datengrundlage wurden zudem genutzt, um ein prozessbasiertes Pflanzenwachstumsmodell für Paludikulturen an unterschiedliche Wasser- und Nährstoffbedingungen anzupassen, zu kalibrieren und zu validieren. Am Intensivstandort Hohenbökener Moor wurden ergänzend kampagnenbasierte Treibhausgasmessungen mittels manueller Hauben durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Varianten untersucht, wobei durch einen Oberbodenabtrag gezielt eine Reduktion der Nährstoffverfügbarkeit innerhalb der Versuchsfläche erzeugt wurde. Die systematische Untersuchung mehrerer Pilotflächen mit unterschiedlichen Standort- und Managementbedingungen liefert wichtige Erkenntnisse für den praktischen Anbau von Paludikulturen, insbesondere hinsichtlich Etablierungserfolg, Biomasseproduktion, Stoffhaushalt und Treibhausgasdynamik.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2: Biomassequantität und -qualität

Auf den Pilotstandorten Hohenbökener Moor, Bad Bederkesa, Dümmer und Langenmosen wurde der Einfluss der Standortbedingungen auf Vegetationsentwicklung und Biomasseproduktion untersucht. Hierzu wurden regelmäßig Vegetationsaufnahmen durchgeführt sowie Wasser-, Boden- und Biomasseproben entnommen. Die Probenahme am Standort Langenmosen wurde von der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT) durchgeführt und zur weiteren Analyse an das Thünen-Institut übermittelt. Zur Erfassung der Pflanzenentwicklung wurden unter anderem der Blattflächenindex (LAI), der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sowie Pflanzenhöhen bestimmt und Biomasseerträge sowie deren Zusammensetzung analysiert. Ergänzend wurden Bodenparameter, Grundwasserstände und meteorologische Bedingungen kontinuierlich erfasst und ausgewertet.

Arbeitspaket 3: Stoffhaushalt

Das Thünen-Institut führte die Treibhausgasmessungen im Versuchspolder Hohenbökener Moor durch. Insgesamt wurden im Projektzeitraum im Abstand von drei bis vier Wochen 38 Treibhausgaskampagnen zur Quantifizierung der Treibhausgasflüsse durchgeführt. Ergänzende Lachgasmessungen im Winter stellten eine Erfassung der Lachgasemissionen in einem zwei- bis dreiwöchigen Rhythmus sicher. Im Rahmen der Messungen wurde zudem der Einfluss eines Oberbodenabtrags und der damit verbundenen Reduzierung der Nährstoffverfügbarkeit untersucht. Hierzu wurden an sechs Terminen pro Jahr Bodenproben zur Bestimmung der Bodennährstoffe entnommen. Zusätzlich wurden der Polderdamm sowie das angrenzende extensiv bewirtschaftete Grünland als Referenzflächen in die Messungen einbezogen.

Arbeitspaket 5: Pflanzenwachstumsmodellierung

Ziel des Arbeitspakets war die Anpassung, Kalibrierung und Validierung eines prozessbasierten Pflanzenwachstumsmodells für Paludikulturen auf Niedermoorstandorten unter unterschiedlichen Wasser- und Nährstoffbedingungen. Hierfür wurde das Modell SWAP-WOFOST eingesetzt, da es über Feddes-Parameter eine flexible Abbildung der Pflanzenreaktion auf hohe Grundwasserstände ermöglicht, die für Paludikulturen charakteristisch sind. Die Modellkalibrierung erfolgte mit dem Optimierungsalgorithmus SCE-UA unter Verwendung von Messdaten aus verschiedenen Wasserstandsklassen. Dabei wurden sowohl hydrologische Parameter als auch pflanzenphysiologische Parameter angepasst, um Blattflächenentwicklung und Biomasseproduktion von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) realitätsnah abzubilden. Auf Grundlage der kalibrierten Modellstruktur wurden anschließend Simulationen unter Verwendung von Klimaprojektionen des Deutschen Wetterdienstes (RCP 4.5, Kernensemble v2018) durchgeführt, um die Entwicklung der Biomasseproduktion unter zukünftigen klimatischen Bedingungen zu untersuchen.

Arbeitspaket 08: Teilnahme an Veranstaltungen, Beteiligung an der Erstellung von Materialien für die ÖA

Aktuell wird an einer begutachteten Open-Access-Publikation zu den Auswirkungen des Oberbodenabtrags auf den Treibhausgas Austausch von Paludikulturen gearbeitet. Die Publikation soll Mitte 2026 eingereicht werden

Folgende Konferenzbeiträge wurden zudem während der Projektlaufzeit geleistet:

Köwitsch P, Tiemeyer B, Antonazzo S, Peterson L, Voigt C, Dettmann U 2025: Effects of Topsoil Removal on Greenhouse Gas Exchange and Carbon Allocation of Fen Paludicultures. Konferenz: Renewable Resources from Wet and Rewetted Peatlands, 4th International Conference on the Utilisation of Wetland Plants 2025, 26. September 2025, Greifswald, Deutschland. (Vortrag)

•Köwitsch P, Tiemeyer B, Antonazzo S, Dettmann U 2024: Effects of Topsoil Removal on Greenhouse Gas Exchange of Fen Paludicultures. Konferenz: General Assembly 2024 of the European Geosciences Union (EGU) 2024, 14 - 19. April 2024, Wien, Österreich. (Vortrag)

Köwitsch P, Tiemeyer B, Antonazzo S, Dettmann U 2024: Einfluss von Oberbodenabtrag auf den Treibhausgas Austausch von Niedermoorpaludikulturen. Konferenz: Auftaktveranstaltung PaludiNetz 2024, 10 - 12. Juni 2024, Braunschweig, Deutschland. (Poster)

•Köwitsch P, Tiemeyer B, Antonazzo S, Dettmann U 2023: Greenhouse gas exchange of different fen paludicultures during establishment. Konferenz: General Assembly 2023 of the European Geosciences Union (EGU) 2024, 23 - 28. April 2023, Wien, Österreich. (Poster)

Köwitsch P, Tiemeyer B, Antonazzo S, Dettmann U 2023: Greenhouse gas exchange of different fen paludicultures until first harvest. Workshop: Nordic-Baltic Workshop on Greenhouse Gas Exchanges and Carbon Cycling in Managed Peatlands, 12 - 15. Juni 2023, Vindeln, Schweden. (Poster)

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die Pilot-Sites zeigen deutlich die Herausforderungen des Wassermanagement und decken die Spannweite an pflanzenverfügbaren Nährstoffen an Moorstandorten in Deutschland gut ab. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass für eine erfolgreiche Etablierung nährstoffliebender Arten stabil hohe Wasserstände in der Etablierungsphase insbesondere an vergleichsweise nährstoffarmen Standorten entscheidend sind (Hohenböken vs. Bad Bederkesa). Bei zu trockenen Verhältnissen bzw. stark schwankenden Wasserständen besteht das Risiko, dass die Flatterbinse den Bestand dominiert, was durch sehr hohe Wasserstände unterbunden werden kann. Dennoch bleiben die Erträge an einem solchen Standort (Bad Bederkesa) hinter dem Potential für *Typha* und *Phragmites* zurück. An nährstoffreichen Standorten kann eine Etablierung jedoch auch dann gelingen, wenn die Moorwasserstände im Sommer phasenweise unter ein optimales Niveau fallen (Langenmosen). Bezüglich der Erntetermine zeigte sich kein eindeutiges Muster außer einer Tendenz zu höheren C:N-Verhältnissen bei einer Winterernte von *Phragmites*. Dies ist im Hinblick auf flexibleren Ernteplanung als positiv zu werten. *Phalaris* und *Carex* sind bei mittlerer und hoher Nährstoffversorgung auch bei einer 1-Schnitt-Nutzung ertragreich, profitieren dabei von hohen Wasserständen und sind wahrscheinlich unempfindlich gegenüber steigenden Temperaturen. Eine Zwei-Schnittnutzung von *Carex* und *Phalaris* kann die Erträge erhöhen. Aufgrund hoher Erntekosten und eines reduzierten Treibhausgas-Minderungspotenzials gilt diese Intensivierung jedoch als ökonomisch und ökologisch nachteilig. Daher wird derzeit eine einmalige Winterernte empfohlen.

Betrachtet man den eher nährstoffarmen Standort Hohenböken hinsichtlich der Treibhausgasbilanz, so zeigten die Paludikulturvarianten unter der Dominanz der Flatterbinse über den gesamten Messzeitraum überwiegend Netto-CO₂-Senken. Die Methanemissionen fielen insgesamt deutlich geringer aus als ursprünglich erwartet, und eine Minderung der Methanemissionen durch den Oberbodenabtrag konnte nicht nachgewiesen werden.

Im Mittel lag die Treibhausgasbilanz bei $-4,7 \pm 7,6$ t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹ in den Varianten ohne Oberbodenabtrag und bei $-11,1 \pm 7,6$ t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹ in den Varianten mit Oberbodenabtrag. Die bessere Treibhausgasbilanz der Varianten mit Oberbodenabtrag konnte dabei wider Erwarten nicht auf verringerte Methanemissionen, sondern auf eine höhere CO₂-Aufnahme zurückgeführt werden. Eine mögliche Ursache hierfür könnte ein verstärkter Aufbau unterirdischer Biomasse infolge der geringeren Nährstoffverfügbarkeit sein. Betrachtet man zusätzlich das Einsparpotenzial im Vergleich zur Grünland-Referenzfläche, zeigt sich eine deutliche Minderung der Treibhausgasemissionen durch die Umstellung auf Paludikultur. Unter Berücksichtigung der Emissionen aus dem Polderdamm ergibt sich beim Vergleich des

mittleren Treibhausgasaustauschs der Paludikulturen mit der Grünlandnutzung eine Reduktion von mehr als 40 t CO₂-Äquivalenten ha⁻¹ a⁻¹.

Im Rahmen der Modellierung konnte ein Pflanzenwachstumsmodell für Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) erfolgreich kalibriert werden, das die Blattflächenentwicklung und Biomasseerträge für verschiedene Wasserstandsklassen realistisch abbildet. Die Simulationen zeigen für die betrachteten Szenarien stabile Erträge von etwa 8–11 t ha⁻¹ a⁻¹ bis zum Jahr 2050. Ein signifikanter Einfluss der projizierten klimatischen Veränderungen auf die Ertragsentwicklung konnte dabei nicht festgestellt werden.

Die Modellierung machte jedoch auch deutlich, dass die aktuelle Modellstruktur Nährstofflimitierungen nur unzureichend abbildet. Entsprechend stimmen die simulierten Erträge vor allem mit Messungen überein, bei denen keine starke Nährstofflimitierung vorlag.

Teilvorhaben 4: Biomassequantität und -qualität

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens war die Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Nährstoffstufen auf den Biomasseertrag von vier Paludikulturen (schmalblättriger Rohrkolben = *Typha angustifolia*, breitblättriger Rohrkolben = *Typha latifolia*, Schilf/Reet = *Phragmites australis* und Rohrglanzgras = *Phalaris arundinacea*). Außerdem wurden die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Nährstoffversorgungen auf die Biomassequalität untersucht. Dafür wurden kontrollierte Mesokosmen-Versuche am JKI-Standort Braunschweig Bundesallee durchgeführt. Für die Erfassung der Erträge und Qualitäten wurden verschiedene Bonituren, Düngungen und Probennahmen durchgeführt und die Mesokosmen jedes Jahr beerntet.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 2.1 Mesokosmenversuche (Düngeversuche): Untersuchung des Einflusses von definierten Nährstoffstufen auf das Wachstum, den Ertrag und die Nährstoffdynamik von ausgewählten Paludikulturen.

Anhand von Mesokosmenversuche wurden Düngeversuche in Freilandcontainern mit den Paludikulturpflanzen *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* sowie den beiden *Typha*-Arten *Typha angustifolia* und *Typha latifolia* umgesetzt. Die vier Paludikultur-Arten wurden in einer bestehenden Versuchsanlage am JKI in 36 mit Niedermoortorf gefüllten IBC-Containern (Größe ca. 1 m³) kultiviert. Die Anlage besteht seit dem Frühjahr 2020. Bevor des Starts des NAPALU-Projektes erfolgte keine Nährstoffzufuhr von außen. Mit dem nach der Etablierungsphase steigenden Entzug von Nährstoffen aus dem Substrat durch Ernteerträge erfolgte eine Variation in der Nährstoffzufuhr, um den Einfluss der Nährstoffversorgung auf Qualitätsparameter und Ertrag in Abhängigkeit der Kulturart zu ermitteln. Die Wasserstände wurden in Anlehnung an die Versuche im Freisinger Moos auf ca. 10 cm unter Bodenoberfläche gehalten. Drei unterschiedliche Nährstoffversorgungsstufen wurden in dreifacher Wiederholung je Kultur geprüft.

Arbeitspaket 2.2 Biomasseentwicklung auf Pilotflächen: Analyse der Ertrags- und Qualitätsentwicklung mit den standortspezifischen Umwelt- und Nährstoffbedingungen.

Auf der Ebene der Pilot-Sites wurden keine Düngeversuche durchgeführt, sondern durch natürliche und durch Vor- und Einzugsgebietsnutzung bedingte anthropogene Gradienten in Umweltbedingungen und Nährstoffverfügbarkeit genutzt. Die Aufgabe des JKI im AP 2.2 war die Entnahme von Biomasseproben zur Bestimmung von Erntemengen und Qualitäten und Inhaltsstoffen der geernteten Paludikulturen.

Arbeitspaket 2.3 Verwertungsoptionen: Untersuchung der Auswirkungen der Nährstoffversorgung auf die Qualität der Fasern, des Reets und der Kompostierungseignung der geernteten Biomassen.

Mit der in den Mesokosmen mit unterschiedlichen Düngevarianten produzierten *Phalaris*- und *Typha*-Biomasse (AP2.1) sowie mit dem *Carex*-Pflanzenmaterial von den Pilot-Sites wurden Kompostierungsversuche angesetzt. Die im Winter geerntete und gehäckselte Biomasse wurde hinsichtlich qualitativer Veränderungen durch eine Kompostierung untersucht. Es wurden für gartenbauliches Ausgangssubstrat relevante Parameter wie pH, Salzgehalt, Nmin oder das C:N-Verhältnis untersucht. Schilf (*Phragmites australis*) findet als Baustoff zum Dachdecken als Reet Verwendung. Das in den Mesokosmen unter verschiedenen Nährstoffgaben produzierte Schilf wurde anhand etablierter Qualitätsparameter nach Riet & Greef (2016) auf seine Eignung als Rohstoff zur Dacheindeckung getestet. Des Weiteren wurde die Ausgangsbio-masse für die Compoundierungsversuche der Hochschule Bremen auf ihre Fasergehalte hin analysiert. Diese Untersuchung sollte aufzeigen, ob anhand der Fasergehalte Rückschlüsse auf die Eigenschaften der Compounds gewonnen werden können.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Dieser Anhang dient der weiteren, ausführlichen Darstellung der Ergebnisse aus Abschnitt II. Die jeweiligen Querverweise führen hier her, deshalb wurde an dieser Stelle auf Text verzichtet um Doppelungen zu vermeiden.

Arbeitspaket 2.1: Mesokosmenversuche (Düngeversuche)

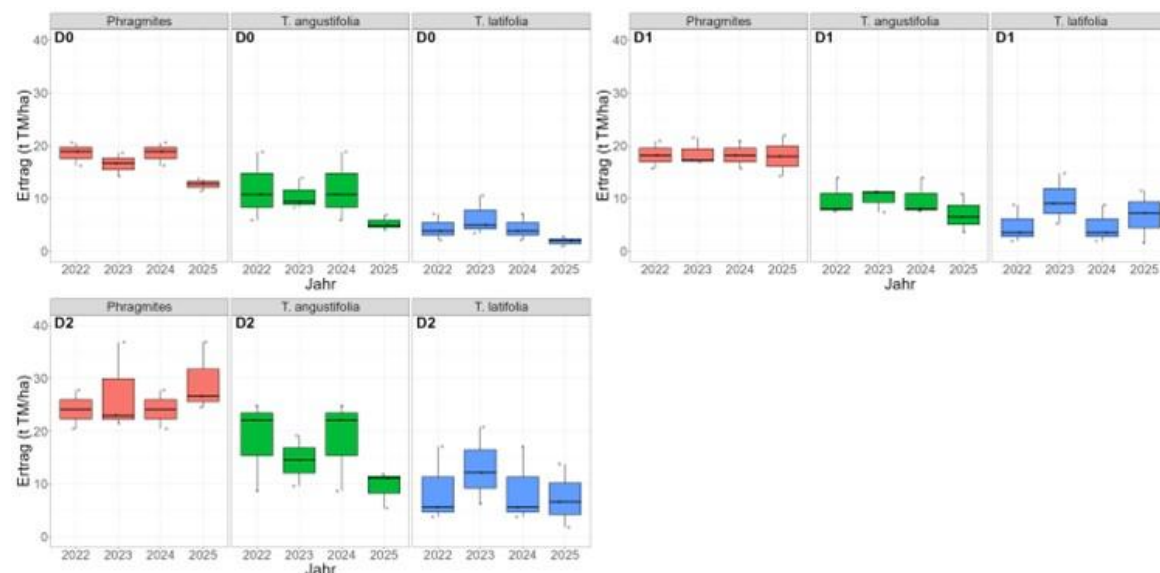


Abbildung 55: Erträge der Mesokosmen am Standort Braunschweig getrennt nach den verschiedenen Kulturen, den Nährstoffstufen (D0, D1, D2, vgl. Tab. 5) und den Versuchsjahren (2022, 2023, 2024, 2025)

Tabelle 22: Mittlere Anzahl bzw. prozentualer Anteil an Trieben, Blüten und Bohrungen (Schadsymptom) innerhalb der Rohrkolbenarten und Nährstoffstufen (je Stufe n = 3, vgl. Tab. 5) in den Versuchsjahren 2023, 2024 und 2025.

Art	Nährstoff- stufe	Anzahl Triebe	Anzahl Blüten (MW)	Prozentualer Anteil Blüten (MW)	Anzahl Triebe mit Bohrung (MW)	Prozentualer Anteil Triebe mit Bohrung (MW)
2023						
<i>T. angustifolia</i>	D0	162	46	28	6	4
	D1	149	52	35	7	4
	D2	170	65	39	4	2
<i>T. latifolia</i>	D0	59	1	2	28	48
	D1	70	2	3	38	54
	D2	93	4	4	37	40
2024						
<i>T. angustifolia</i>	D0	256	50	20	10	4
	D1	261	28	12	10	4
	D2	303	60	21	20	7
<i>T. latifolia</i>	D0	123	6	6	76	74
	D1	146	10	10	90	78
	D2	168	21	21	104	72
2025						
<i>T. angustifolia</i>	D0	225	15	7	0	0
	D1	210	15	7	3	1
	D2	263	14	5	1	0
<i>T. latifolia</i>	D0	79	3	4	19	24
	D1	115	11	10	14	12
	D2	133	8	6	14	11

Tabelle 23: Erträge an *Phalaris* und Binsen- bzw. Binsen/Fremdgras-Aufwuchs aus den Mesokosmen in den Versuchsjahren 2023 und 2024 (auf Feldmaßstab hochgerechnet; lineares Modell mit Wechselwirkung zwischen Faktor Jahr und Nährstoffstufe (vgl. Tab. 5); Tukey-Test, $\alpha < 0,05$)

	2023		2024	
Nährstoffstufe	<i>Phalaris</i> (t TM/ha)	Binse (t TM/ha)	<i>Phalaris</i> (t TM/ha)	Binse/Fremdgras (t TM/ha)
D0	3,51	7,55	0,15	10,20
D0	1,69	15,30	1,09	11,66
D0	4,64	9,76	0,59	13,23
MW	3,28^{ab}	10,87^b	0,61^a	11,70^b
STABW	1,49	3,99	0,47	1,52
D1	3,53	8,08	2,77	15,28
D1	0,54	9,69	1,78	10,42
D1	4,74	13,22	2,20	13,87
MW	2,94^{ab}	10,33^b	2,25^{ab}	13,19^b
STABW	2,16	2,63	0,50	2,5
D2	4,64	7,95	6,56	12,94
D2	4,66	5,56	8,93	9,27
D2	4,64	3,57	7,10	12,55
MW	4,65^{bc}	5,69^a	7,53^c	11,59^b
STABW	0,02	2,19	1,24	2,02

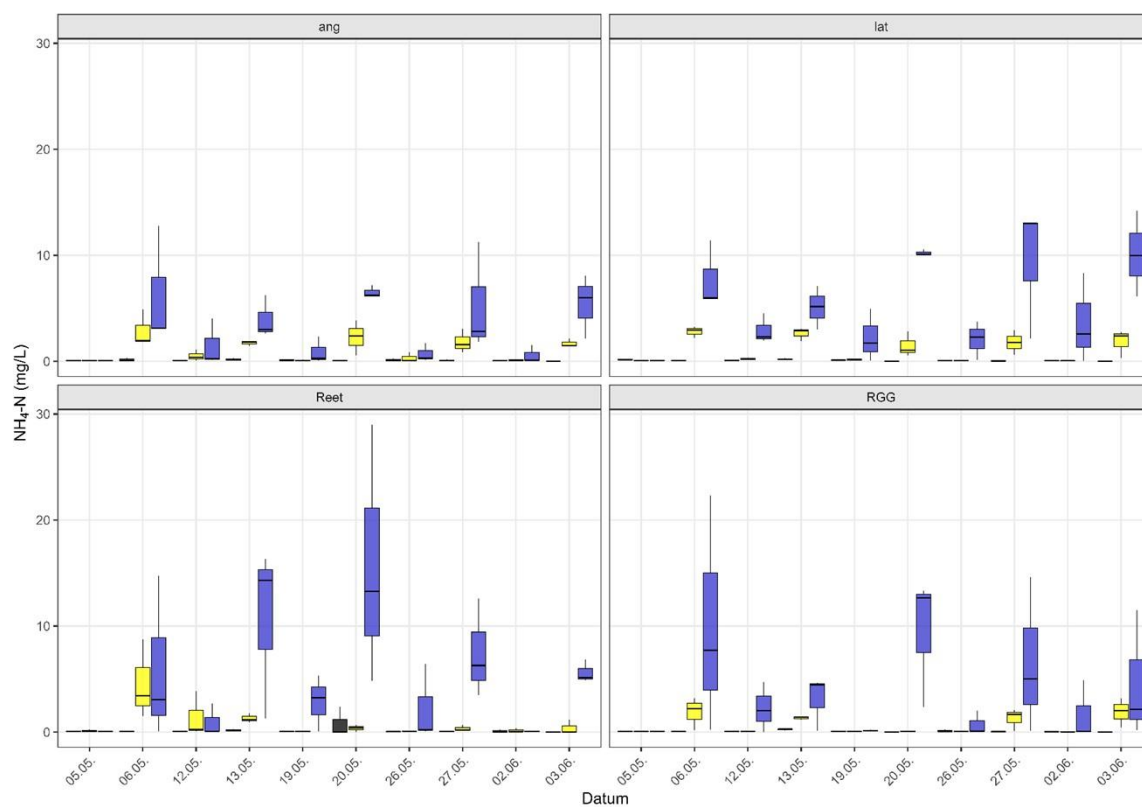


Abbildung 56: Ammoniumwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.

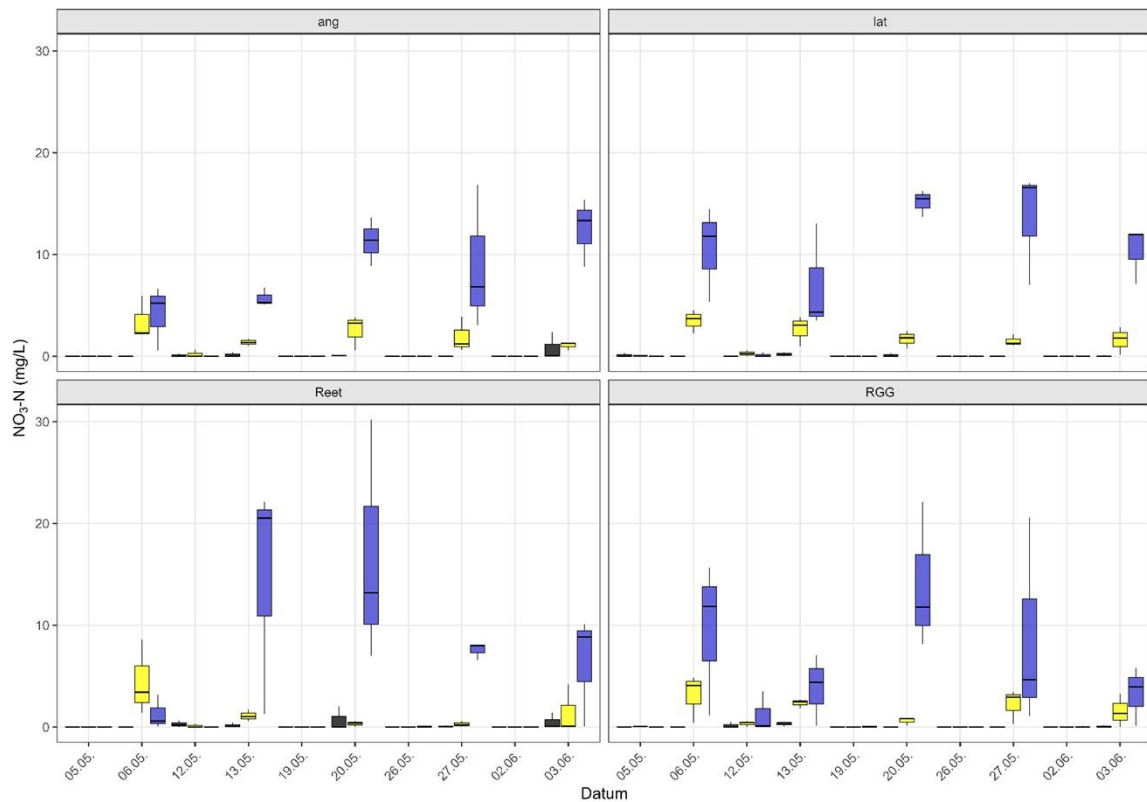


Abbildung 57: Nitratwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.

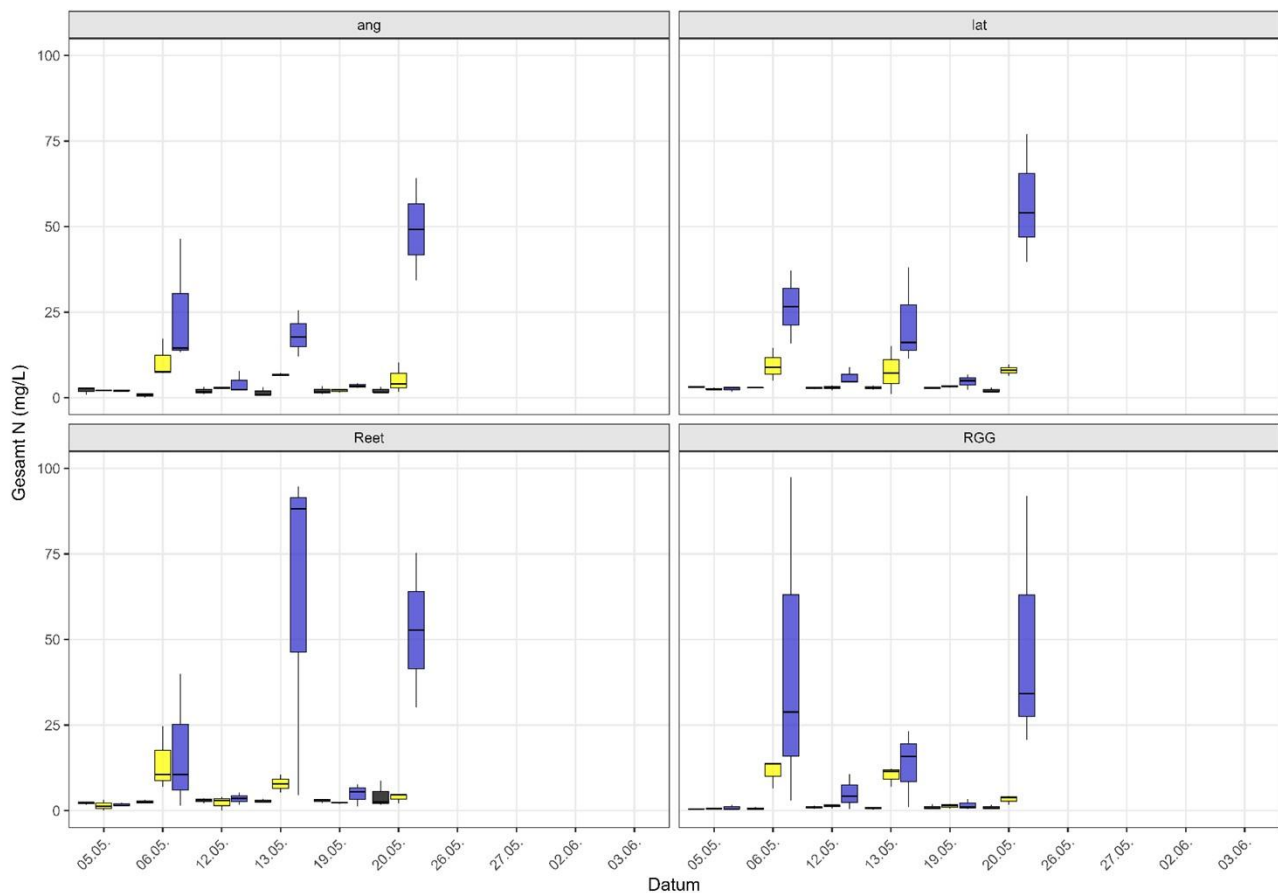


Abbildung 58: Gesamtstickstoffwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.

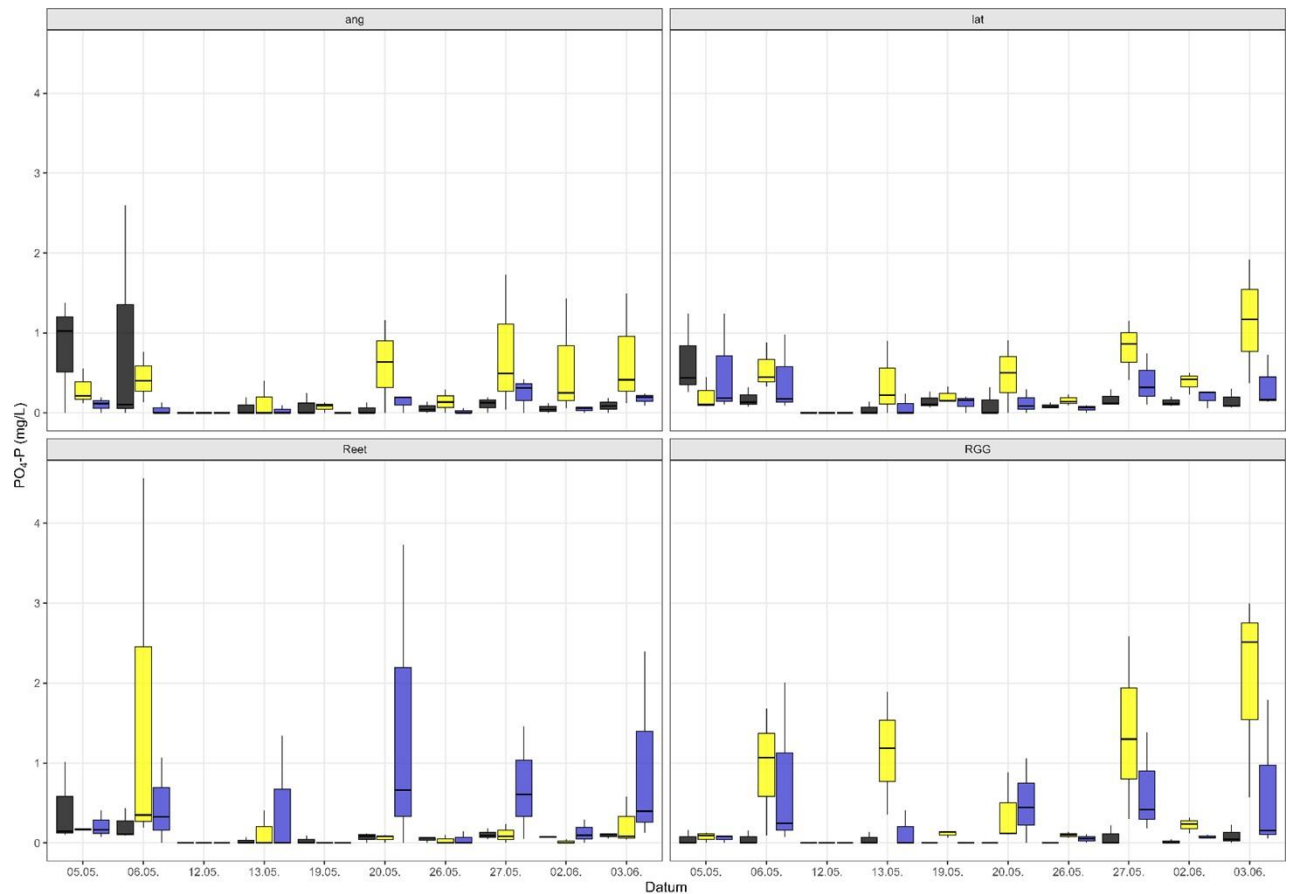


Abbildung 59: Phosphatwerte [mg/L] der Wasseranalytik im Jahr 2025. Die Proben wurden jeweils unmittelbar vor der Applikation und 24 Stunden nach Applikation entnommen.

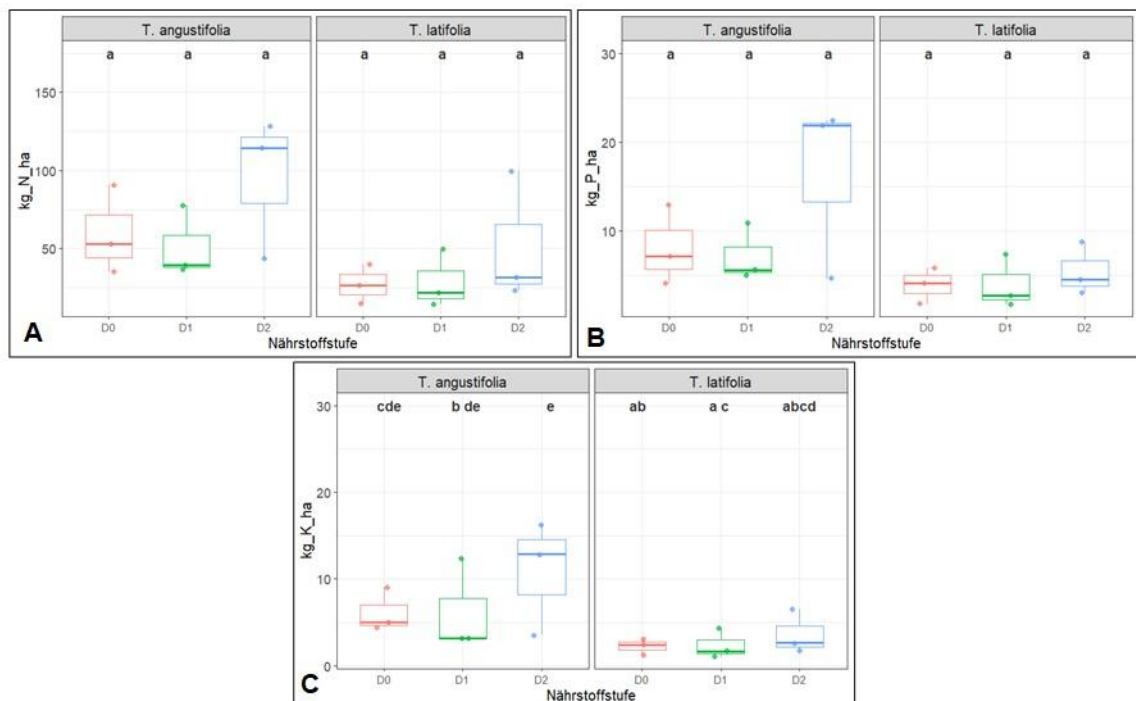


Abbildung 60: Nährstoffentzüge der Rohrkolbenarten über die Biomasse im 1. Erntejahr (2023/24)

Arbeitspaket 2.2: Auswirkungen der Umweltbedingungen und Nährstoffversorgung auf die Biomasseentwicklung

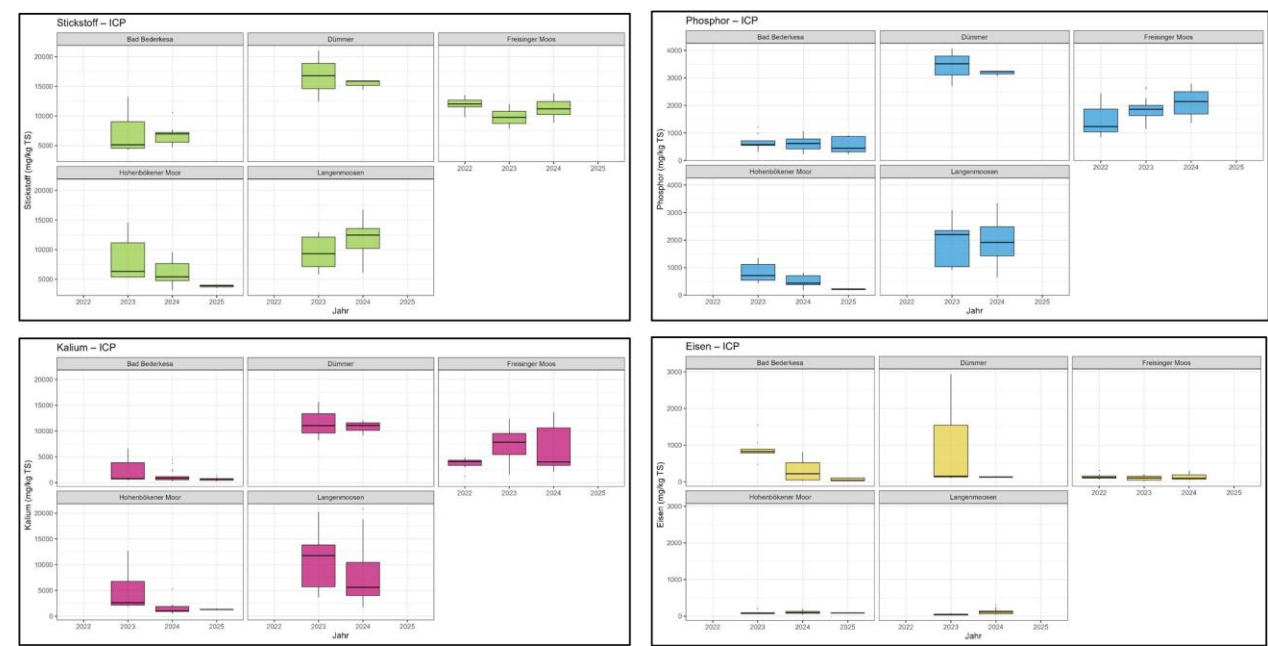


Abbildung 61: Nährstoffgehalte (N, P, K und Fe) der verschiedenen Pilotflächen in den Jahren 2022-2025

Arbeitspaket 2.3: Auswirkung der Nährstoffversorgung auf Verwertungsoptionen

Tabelle 24: Qualitätsparameter von 9 Wochen gereiftem Kompost aus verschiedenen Paludikultur-Ausgangsmaterialien. Gelb eingefärbte Felder zeigen eine Zuordnung zu Substratkompost Typ 1, violett eingefärbte zu Substratkompost Typ 2.

2024			%			g KCl/l Kompost	mg/l Kompost (FM)				
Kompost-material	Nährstoff-stufe	Wdh.	RA	C/N	pH	Salzgehalt	Chlorid	N _{min}	P ₂ O ₅ (CAT)	K ₂ O (CAT)	Na
Phalaris / Flatterbinse	D0	1	9,43	10,37	5,71	1,1	475	759	103	135	140
	D0	2	10,38	10,06	5,09	1,0	338	750	85	103	112
	D1	1	10,10	11,11	5,82	1,0	454	631	139	186	158
	D1	2	9,56	11,33	5,82	0,9	495	593	123	169	143
	D2	1	7,96	11,79	7,10	1,0	567	547	79	270	151
	D2	2	7,57	12,15	7,23	1,0	489	578	91	264	154
T. angustifolia	D0		11,40	12,91	5,83	0,3	350	214	15	27	138
	D1		9,93	13,89	5,62	0,2	276	195	21	29	103
	D2		9,85	11,94	5,55	0,5	288	445	21	24	90
T. latifolia	D0		12,56	9,32	5,70	0,6	186	565	31	46	59
	D1		11,12	8,82	5,74	0,5	151	545	24	35	38
	D2		10,91	9,32	5,71	0,6	194	579	28	41	61
Carex acutiformis		1	13,18	10,03	5,59	0,5	193	686	62	174	11
		2	12,64	8,99	5,57	0,6	222	842	74	190	11
		3	13,86	10,02	5,71	0,5	180	753	76	178	11
		4	13,75	9,84	5,70	0,6	175	741	64	183	11
Typ 1 (bis 40 Vol.-% Anteil)						max. 2,5 g/l	< 500 mg/l	< 300 mg/l	< 1200 mg/l	< 2000 mg/l	< 250 mg/l
Typ 2 (bis 20 Vol.-% Anteil)						max. 5 g/l	<1000 mg/l	<600 mg/l	<2400 mg/l	<4000 mg/l	<500 mg/l
Methode			VDLUF A 2007	VDLUF A 2004	VDLUF A 2016a-A5.1.1	VDLUFA 1991 A10.1.1	VDLUF A 2012 A13.4.3	VDLUF A 2002	VDLUFA A13.1.1	1997b-	

Tabelle 25: Qualitätsparameter von 6 Monate gereiftem Kompost aus verschiedenen Paludikultur-Ausgangsmaterialien und N_{min}-Werte nach Waschung. Gelb eingefärbte Felder zeigen eine Zuordnung zu Substratkompost Typ 1, violett eingefärbte zu Substratkompost Typ 2.

Kompost-material	Nähr- stoff- stufe	Sackun- g Vol %	RA	C/N	pH	Salzge- halt	P ₂ O ₅ (CAT)	K ₂ O (CAT)	N _{min}	N _{min} (nach Waschung)
<i>Phalaris</i> / <i>Flatterbins</i> <i>e</i>	D0	56	11,17	9,92	3,95	1,58	149	152	769	66
	D0	59	12,23	9,58	3,95	1,49	119	127	702	59
	D1	61	11,98	10,98	3,82	1,52	179	209	595	48
	D1	60	11,54	10,73	4,02	1,52	198	233	1111	139
	D2	80	14,89	8,34	5,79	2,20	272	575	900	146
	D2	80	15,16	8,31	4,72	2,13	267	455	823	43
<i>T. angustifolia</i>	D0	49	13,11	10,85	4,07	1,14	75	64	466	34
	D1	35	12,50	12,14	4,20	0,79	51	40	288	65
	D2	32	11,42	12,40	4,12	0,94	53	35	414	34
<i>T. latifolia</i>	D0	52	12,23	8,29	4,16	1,73	135	107	355	55
	D1	56	14,91	7,60	4,08	1,21	52	36	987	92
	D2	58	13,63	7,60	4,13	1,47	522	40	713	80
<i>Carex acutiformis</i>		48	17,06	8,45	3,98	1,56	114	213	929	146
		37	15,80	9,16	4,02	1,16	119	210	800	119
		48	17,25	8,55	4,03	1,12	104	196	821	148
		44	18,60	8,86	3,99	1,21	113	207	807	143
Typ 1 (bis 40 Vol.-% Anteil)						max. 2,5 g/l	< 1200 mg/l	< 2000 mg/l	< 300 mg/l	
Typ 2 (bis 20 Vol.-% Anteil)						max. 5 g/l	<2400 mg/l	<4000 mg/l	<600 mg/l	
Methode				VDLUF A 2004	VDLUF A 2016a- A5.1.1	VDLUFA 1991 A10.1.1	VDLUFA 1997b-A13.1.1		VDLUFA 2002	

Tabelle 26: Faserzusammensetzung der Ausgangsbiomasse für die Compoundierungsversuche. TM: Trockenmasse, RA: Rohasche, oADF: organische Säure-Detergenzien-Faser, umfasst Cellulose und Lignin, oNDF: organische Neutral-Detergenzien-Faser, umfasst Cellulose, Hemicellulose, Lignin

Material, Versuchsfläche, Monat & Jahr der Ernte	%TM	%RA	%oADF	%Rohlignin	%Rohcellulose	%oNDF	%Hemicell.
<i>T. latifolia</i> , Hohenböken, 02.2023	91.70	3.65	51.70	13.24	38.39	78.09	27.88
<i>P. arundinacea</i> , Langenmosen, 07.2023	93.14	4.17	43.08	5.72	37.57	72.87	29.73
<i>Carex</i> , Langenmosen, 07.2023	92.82	5.79	41.00	5.77	36.11	74.50	32.91
<i>P. australis</i> , Bederkesa, 12.2023	93.13	6.89	51.84	12.00	44.38	81.14	27.18
<i>P. arundinacea</i> , Langenmosen, 02.2024, Einschnitt	92.55	3.79	50.21	7.78	44.03	83.74	32.66
<i>P. arundinacea</i> , Langenmosen, 02.2024, Zweischnitt	92.84	3.22	50.92	8.29	44.03	85.61	33.72
<i>Carex</i> , Langenmosen, 02.2024, Einschnitt	91.32	5.99	49.32	13.53	37.99	77.69	27.92
<i>Carex</i> , Langenmosen, 02.2024, Zweischnitt	92.17	4.60	47.84	10.96	38.35	77.89	29.43
<i>T. angustifolia</i> , Langenmosen, Einschnitt	92.29	4.29	58.58	15.68	42.52	82.11	24.98
<i>P. australis</i> , Dümmer, 02.2024	93.38	3.80	59.60	13.17	48.36	86.86	26.45

Teilvorhaben 5: Nährstoffdynamik im Torf und Wasserqualität

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilprojektes war es, die Stoff- und Nährstoffdynamik im Torfkörper eines Niedermoores und die Wasserqualität bei der Nutzung durch Paludikultur ohne und mit angepasster Entzugsdüngung zu untersuchen. Dazu wurden die zeitliche und räumliche Dynamik ausgewählter Bodeneigenschaften insbesondere Nährstoffgehalte und zugehörige bodenchemische und -biologische Parameter bestimmt, um die Auswirkungen von Nährstoffapplikationen auf Stoffumsätze und -abflüsse sowie die Rolle von Paludikulturen beim Nährstoffrückhalt zu ermitteln.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 3.2 Nährstoffdynamik im Torf und Wasserqualität

Im Rahmen der Projektplanung wurde der Versuchsstandort Freisinger Moos mit dem Intensivmessfeld zur Paludikultur in Niedermoores als für die Bearbeitung der Fragestellungen dieses Teilprojektes besonders geeignet identifiziert. An diesem Standort wurden zwei Düngervarianten, flüssiger und fester Biogas-Gärrest, zur Düngung von *Phalaris arundinacea* bei konstanten und variierenden Grundwasserständen und in ausgewählten Zeit- und Tiefenintervallen getestet. Um zu ermitteln, ob mit den Veränderungen des Grundwasserspiegels und der biologischen Aktivität in Abhängigkeit vom Nährstoffangebot auch das Redoxpotential als wesentliche Steuergröße der N-Dynamik im Boden variiert, wurde ein Monitoring-System zur Messung des Redoxpotenzials bei jeder Versuchsvariante in 10 cm, 30 cm und 60 cm Tiefe installiert.

Der Aufbau und Betrieb der Versuchsfläche innerhalb des Intensivmessfeldes erfolgte bzw. erfolgt durch die HSWT, die auch den Betrieb der Redox-Monitoringanlage sicherstellen. Die genannten Beprobungen von Boden und Wasser wurden in Kooperation beider Arbeitsgruppen durchgeführt. Die nachfolgenden Analysen wurden durch das Fach Bodenkunde der Universität Trier durchgeführt: Prof. Dr. S. Thiele-Bruhn (Projektleiter), W. Ongara (Projekt-Mitarbeiter), die Laborassistentin Frau P. Ziegler und E. Sieberger (Projekt-Mitarbeiterin).

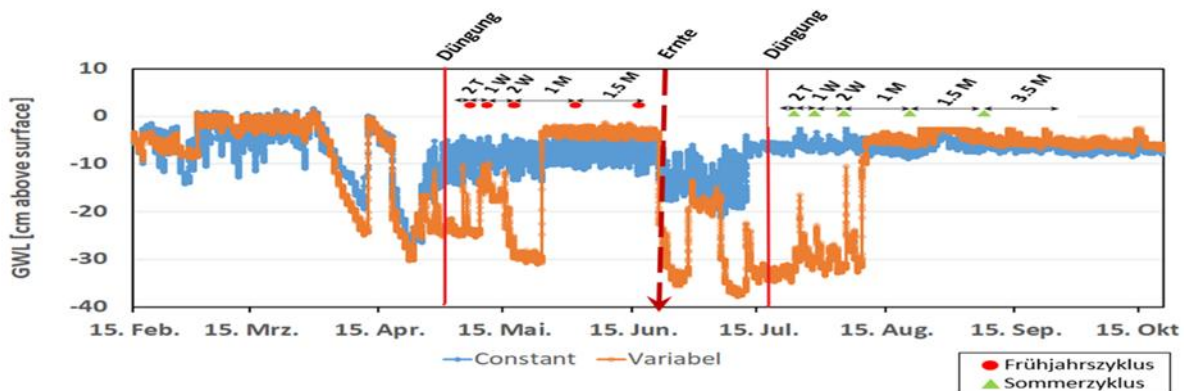


Abbildung 62: Probenahmeschema für die Jahre 2023 und 2024 (Symbole) und Grundwasserstände bei konstantem und variierbarem Grundwasserstand (2023)

Etablierung und Optimierung der Analysenverfahren

Die im Folgenden genannten Analysen wurden auf die besonderen Eigenschaften der Torfproben angepasst (Bodeneinwaage, Lösungsvolumina, Probenaufbereitung durch Zentrifugation, Filtration etc.). Dies erfolgte in Rücksprache mit den ebenfalls analytisch arbeitenden Projektpartnern am Institut für Agrarklimaschutz, Thünen-Institut, Braunschweig.

Liste der zu analysierenden chemischen und biologischen Parameter

- Gesamtgehalt C, N
- pH-Wert
- Gelöster organischer Kohlenstoff und Stickstoff (DOC, DON)
- Gelöster Phosphor ($\text{PO}_4\text{-P}$) und pflanzenverfügbarer Phosphor und Kalium (CAL-P, CAL-K)
- Ammonium-N ($\text{NH}_4\text{-N}$) and Nitrat-N ($\text{NO}_3\text{-N}$)
- Gesamtgehalte: Ca, Mg, Al, Na, K, Fe, Mn, P

- Kationenaustauschkapazität (KAK)
- Dithionit und Oxalat-lösliches Fe, Al, Mn, P
- Phospholipidfettsäuremethylester (PLFA) als Marker für die strukturelle Diversität der mikrobiellen Gemeinschaften im Torfkörper
- Bodenmikrobielle Enzymaktivitäten: Dehydrogenase (DHA), Glucosidase (GC), Leucin-Aminopeptidase (LAP) und Phosphatase (PHO).
- Mikrobielle Biomasse (Bestimmung mittels Chloroform Fumigations-Extraktion, CFE)
- Abundanz funktioneller Gene des N-Kreislaufs der Bodenmikroorganismen

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Dieser Anhang dient der weiteren, ausführlichen Darstellung der Ergebnisse aus Abschnitt II. Die jeweiligen Querverweise führen hier her, deshalb wurde größtenteils auf Text verzichtet um Doppelungen zu vermeiden.

Projektergebnisse und Diskussion

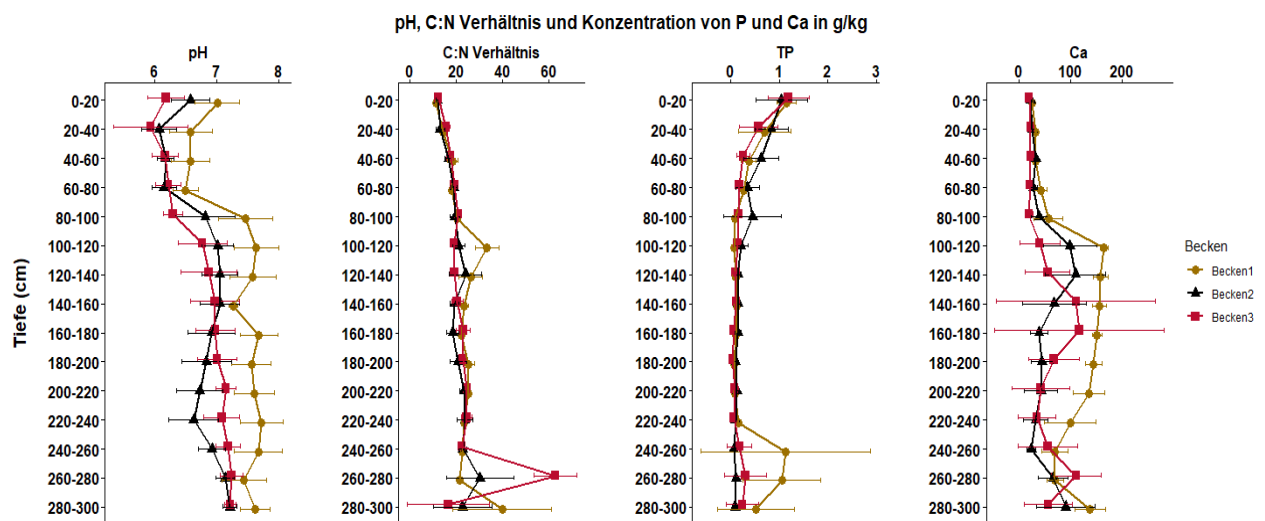


Abbildung 63: Tiefengradienten ausgewählter physikalisch-chemischer Eigenschaften von Torf in einer Tiefe von 0 bis 300 cm (Mittelwerte und Standardabweichung der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).

Bodenchemische Analysen - Nährstoffspezies, Freisinger Moos

Organische Düngung (Boden)

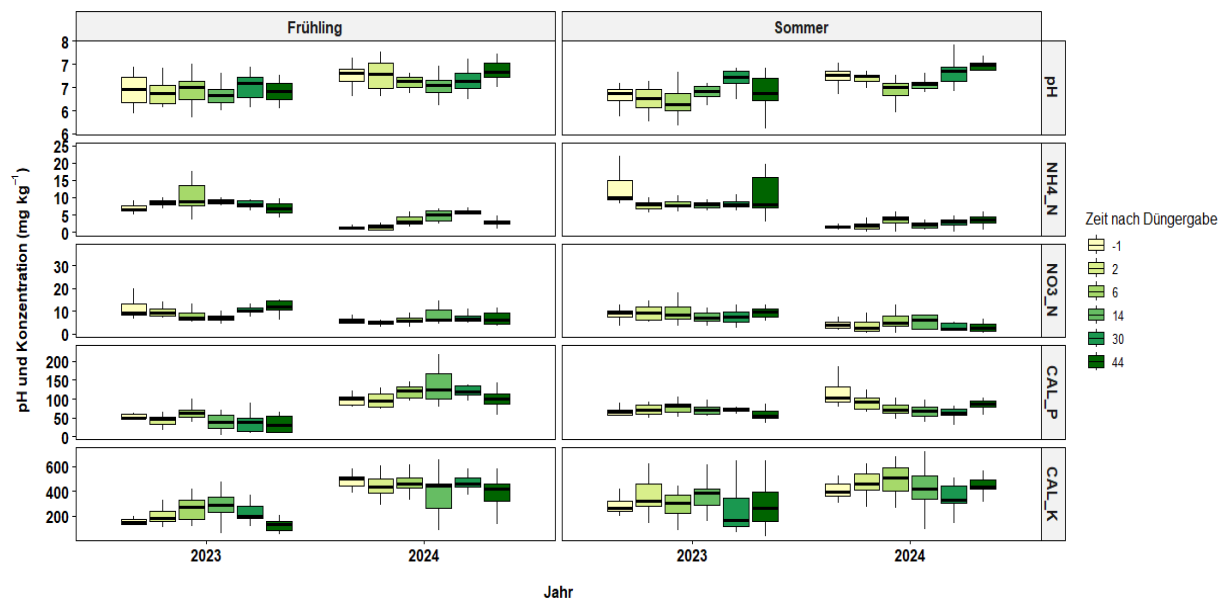
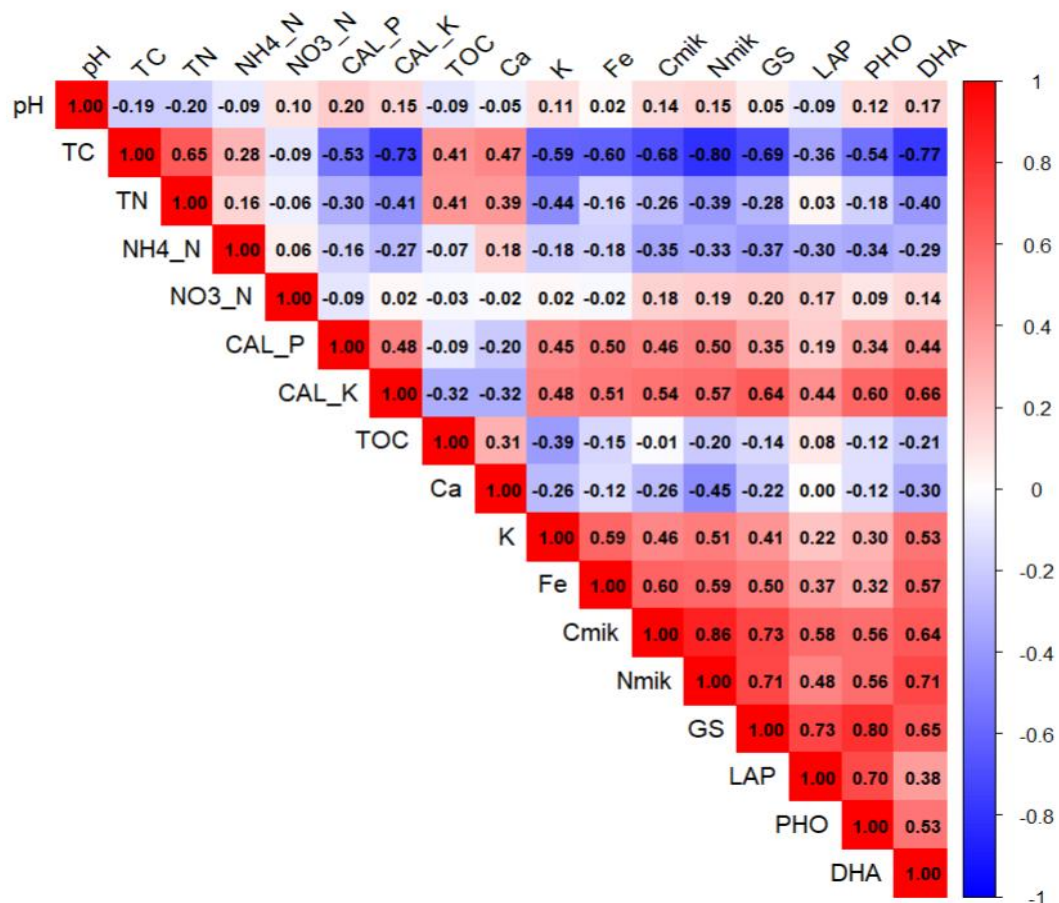


Abbildung 64: Veränderungen des pH-Werts und ausgewählter, pflanzenverfügbarer Nährstoffe (NH₄-N, NO₃-N, CAL extrahierbarer Phosphor und Kalium) in einer Tiefe von 0 bis 20 cm unter unterschiedlichen Grundwasserspiegeln im Zeitverlauf nach der Düngung zum Frühjahr (links) oder Sommer (rechts). Daten jeweils für Frühjahr und Sommer 2023 und 2024. (Boxplots der Daten der einzelnen Versuchsplots innerhalb der Becken).

Ertrag von Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*)

Tabelle 27: Deskriptive Mittelwerte ± Standardabweichung des Ertrags von Rohrglanzgras am Versuchsstandort.

Jahr	Saison	Behandlung	Mittelwert (t ha ⁻¹)	Std.-Abw	Saisonmittelwert (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Saison Std.-Abw
2023	Sommer	C_Liq	15,33	1,16	15,50	1,85
		V_Liq	15,80	1,14		
		V_Sld	14,10	0,60		
		C_Sld	17,23	0,64		
		Control	15,10	1,40		
	Winter	C_Liq	3,07	0,32	2,95	0,56
		V_Liq	3,17	0,17		
		V_Sld	2,80	0,36		
		C_Sld	3,33	0,34		
		Control	2,40	0,32		
2024	Sommer	C_Liq	13,40	1,46	11,50	2,17
		V_Liq	12,93	1,41		
		V_Sld	11,37	0,33		
		C_Sld	10,30	0,76		
		Control	9,33	0,57		
	Winter	C_Liq	3,97	0,19	3,37	0,52
		V_Liq	3,53	0,27		
		V_Sld	3,47	0,12		
		C_Sld	3,23	0,22		
		Control	2,67	0,12		



Bodenbiologische Analysen, Freisinger Moos

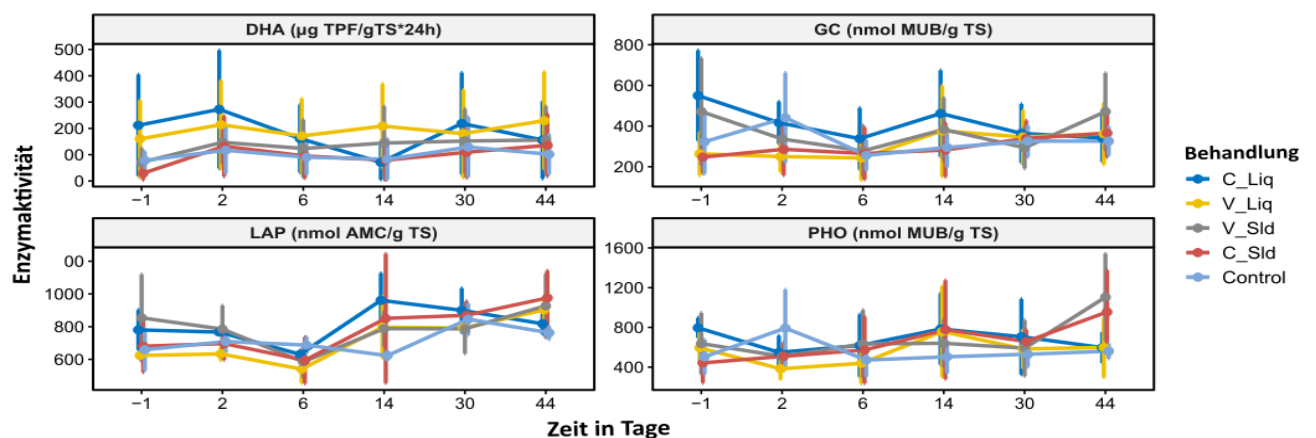


Abbildung 65: Aktivitäten der Enzyme Dehydrogenase (DHA), Glucosidase (GC), Leucin-Aminopeptidase (LAP) und Phosphatase (PHO) nach Düngung unter verschiedenen Grundwasserbedingungen und organischen Düngergaben (0-40 cm Tiefe).

Abbildung 66: Pearson-Korrelationsmatrix mit bodenbiologischen, chemischen und Nährstoffvariablen im Frühjahr 2023. Die Heatmap zeigt paarweise Pearson-Korrelationskoeffizienten, wobei nur statistisch signifikante ($p < 0.05$) Korrelationen gezeigt werden.

Wasseranalysen, Freisinger Moos

Oberflächennahes Grundwasser 2024

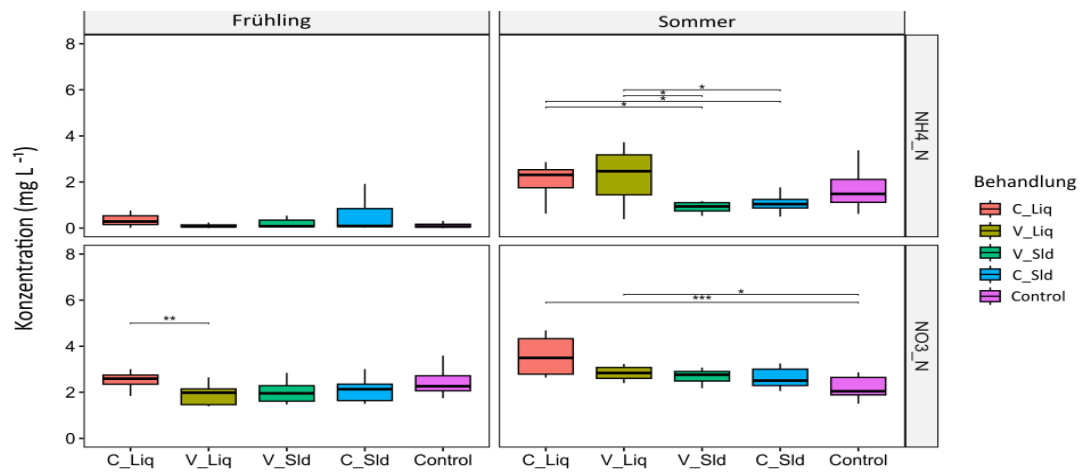


Abbildung 67: Gesamtkonzentrationen von NH₄-N (oben) und NO₃-N (unten) im oberflächennahen Grundwasser vor und bis 4 Tage nach der Düngung im Frühjahr und Sommer 2024.

Teilvorhaben 6: Ökonomische Bewertung

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens ist es, die betriebswirtschaftliche Rentabilität der gängigen Paludikulturen systematisch zu erfassen, indem sowohl die erzielbaren Verkaufserlöse als auch die anfallenden Produktionskosten in unterschiedlichen Verwertungsrichtungen quantifiziert und vergleichend analysiert werden. Darauf aufbauend sollen bestehende marktwirtschaftliche und umweltpolitische Instrumente zur Inwertsetzung der vielfältigen, durch Paludikulturen generierten Gemeinwohlleistungen evaluiert und weiterentwickelt beziehungsweise an spezifische Rahmenbedingungen angepasst werden.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Erfassung der volkswirtschaftlichen Wertschöpfung der gängigen Paludikulturen unter expliziter Berücksichtigung der von ihnen bereitgestellten Gemeinwohlleistungen, um deren gesamtgesellschaftliche Bedeutung umfassend abzubilden. Zudem soll die Akzeptanz von Landwirten gegenüber einem Übergang zu einer nassen Moornutzung durch Paludikulturen untersucht werden, wobei unterschiedliche Ausgestaltungen von Anreizmechanismen zur Inwertsetzung der Gemeinwohlleistungen berücksichtigt werden. Ein wesentlicher Fokus dabei liegt auf den Präferenzen für Kooperationslösungen, die eine räumliche Koordination der Anlage von Paludikulturen auf Landschaftsebene unterstützen, um ökologische und ökonomische Synergien zu erschließen sowie potenzielle Zielkonflikte zu minimieren.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Governance-Analyse

Im Rahmen der Governance-Analyse erfolgt eine Evaluierung bestehender sowie die Entwicklung angepasster marktwirtschaftlicher und umweltpolitischer Instrumente zur Inwertsetzung der vielfältigen Gemeinwohlleistungen, die durch Paludikulturen generiert werden.

Das methodische Vorgehen ist zweischrittig angelegt. In einem ersten Schritt wird eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der wissenschaftlichen Diskussion sowie bestehende Ansätze zu erfassen. Darauf aufbauend erfolgt eine strukturierte Bewertung der identifizierten Inwertsetzungsinstrumente anhand etablierter Kriterien der Politikevaluation.

Arbeitspaket 2: betriebswirtschaftliche Analyse

In diesem Arbeitspaket werden die Kosten und Leistungen verschiedener Paludikulturen im Zeitverlauf systematisch erfasst und in unterschiedlichen Szenarien variiert. Diese Szenarien werden mit der herkömmlichen, entwässerungsbasierten Intensivnutzung (Status-Quo) mithilfe der Kapitalwertmethode verglichen, um betriebswirtschaftliche Defizite und potenzielle Hemmnisse für eine Umstellung zu identifizieren.

Arbeitspaket 3: volkswirtschaftliche Analyse

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der **volkswirtschaftlichen Kosten-Nutzen-Abwägung**. Hierbei werden private Kosten und Erträge den gesamtgesellschaftlichen Wirkungen gegenübergestellt. Auf Basis dieser Bewertung wird das **volkswirtschaftliche Wertschöpfungspotenzial** quantifiziert, das sich aus einer breiteren Implementierung der untersuchten Bewirtschaftungsformen ergibt.

Arbeitspaket 4: Entscheidungsexperiment

Zur Analyse der Akzeptanz wird ein diskretes Entscheidungsexperiment durchgeführt. Im Rahmen dieses Ansatzes nehmen die Befragten wiederholt Abwägungen zwischen zwei hypothetischen Transformationsszenarien, die jeweils eine Umstellung der Moorbewirtschaftung vorsehen, sowie der Fortführung der Status-quo-Bewirtschaftung vor. Durch diese wiederholten Entscheidungsaufgaben können Präferenzen unter realitätsnahen Wahlbedingungen empirisch erfasst werden.

Die Transformationsszenarien unterscheiden sich systematisch in ausgewählten Eigenschaften. Das Experiment wird mit insgesamt 202 Landwirtinnen und Landwirten aus fünf Bundesländern durchgeführt und bildet damit eine belastbare empirische Grundlage zur Identifikation zentraler Einflussfaktoren auf die Umstellungsbereitschaft.

Arbeitspaket 5: Motivations- und Akzeptanzanalyse

Der in Arbeitspaket 4 generierte Datensatz wird mithilfe geeigneter ökonometrischer Modelle ausgewertet. Neben dem Einfluss der jeweiligen Szenarieneigenschaften auf die Umstellungsbereitschaft werden dabei auch individualspezifische Merkmale der Befragten in die Analyse einbezogen.

Auf Grundlage der geschätzten Modelle können marginale Kompensationszahlungen berechnet werden. Diese geben an, in welchem Umfang sich die erforderliche Zahlungshöhe reduziert beziehungsweise erhöht, wenn bestimmte Eigenschaften eines Transformationsszenarios hinzutreten oder entfallen, um die Teilnahmewahrscheinlichkeit konstant zu halten. In einem zweiten Analyseschritt werden darüber hinaus die Determinanten des vorgesehenen Umstellungsumfangs untersucht. Hierbei steht die Frage im Mittelpunkt, welche Faktoren die geplante Flächenumstellung beeinflussen und in welchem Ausmaß betriebliche sowie szenariobezogene Merkmale die Entscheidung über den Umfang der Transformation determinieren.

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die nasse Moornutzung ist ohne eine Inwertsetzung der erbrachten Klimaschutzleistung in der Regel nicht rentabel. Zwar können standortangepasste Nutzungssysteme Erträge generieren, jedoch reichen diese unter gegenwärtigen Marktbedingungen häufig nicht aus, um die Kosten vollständig zu kompensieren. Zugleich weist die deutliche Variabilität der jährlichen Einkommensbeiträge der Paludikulturen auf ein erhöhtes ökonomisches Risiko hin, das im Zuge der Transformation von entwässerter zu nasser Moorbewirtschaftung maßgeblich von den landwirtschaftlichen Betrieben getragen werden muss. Kann der Klimaschutzeffekt jedoch monetarisiert und in Wert gesetzt werden, lässt sich in vielen der untersuchten Szenarien eine wirtschaftliche Tragfähigkeit darstellen, auch unter Berücksichtigung von Opportunitätskosten. Die Wirtschaftlichkeit der Paludikultur ist damit in hohem Maße von der institutionellen Ausgestaltung und der langfristigen Verlässlichkeit entsprechender Vergütungssysteme abhängig.

Aus gesamtgesellschaftlicher Perspektive handelt es sich um eine ökonomisch effiziente Maßnahme zur Reduktion von Treibhausgasemissionen. Allerdings existieren bislang nur begrenzt flächenwirksame Mechanismen zur Inwertsetzung dieser Leistungen, sodass die vorhandenen Instrumente nicht ausreichen, um die Schutzziele im gesetzten Zeitraum zu erreichen. Eine Weiterentwicklung des bestehenden Politikmixes kann in der Integration der Emissionen aus entwässerten Mooren in ein Emissionshandelssystem bestehen. Flächeneigentümer könnten innerhalb eines definierten Zeitraums kostenlose CO₂-Zertifikate erhalten und auf Basis des aktuellen CO₂-Preises zwischen entwässerungsbasierter Nutzung und dem Verkauf der Zertifikate entscheiden. Ein staatlich garantierter Mindestpreis würde Planungssicherheit schaffen. Die nasse Moorbewirtschaftung mit Paludikulturen bliebe unter Berücksichtigung weiterer Schutzziele möglich, wobei bislang insbesondere Fragen eines rechtssicheren Monitorings und des Umgangs mit Sperrflächen ungeklärt sind. Ergänzend könnte eine produktionsintegrierte Reduktion die Treibhausgaserminderungsleistungen der Paludikultur inwertsetzen. Analog zum Ökopunkte-System wären handelbare „Klimapunkte“ denkbar, etwa zum Emissionsausgleich in der Bauwirtschaft, wodurch zugleich die Nachfrage nach klimaschonenden Baustoffen aus Holz und Paludikulturen gestärkt würde. Zudem ist eine stärkere räumliche Koordination und überbetriebliche Kooperation erforderlich, da Wiedervernässung und Paludikultur häufig hydrologisch abgestimmte Maßnahmen über Betriebsgrenzen hinweg voraussetzen.

Da Wiedervernässung und nasse Bewirtschaftung überwiegend auf freiwilliger Beteiligung beruhen, sind Akzeptanz unter den Bewirtschaftern zentraler Erfolgsfaktor. Vor diesem Hintergrund wird ein diskretes Entscheidungsexperiment mit 202 moorbewirtschaftenden Betrieben in fünf Bundesländern durchgeführt. Im Rahmen dieses Experiments wird die Umstellungsbereitschaft der Betriebe in Abhängigkeit von spezifischen Merkmalen angebotener Transformationsszenarien und individualspezifischer Eigenschaften erhoben. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Wunsch nach neuen Förderansätzen unter den befragten Landwirten. Die GAP wird von vielen Betrieben nicht als geeignet angesehen, um eine langfristige und verlässliche Inwertsetzung von Klimaschutzleistungen auf Moorstandorten sicherzustellen. Stattdessen besteht eine ausgeprägte Präferenz für marktbasierte Instrumente, wie ein Emissionshandelssystem. Hinsichtlich konkreter Umsetzungsmodelle zeigt sich hingegen keine eindeutige Präferenz. Qualifizierte Beratungsangebote scheinen hingegen essenziell für die Akzeptanz und erfolgreiche Umsetzung von Transformationsmaßnahmen zu sein. Zugleich zeigt sich eine ausgeprägte Skepsis gegenüber der

Bewirtschaftung mit Anbaupaludikulturen. Die Landwirte nehmen offenbar potenzielle produktionstechnische und marktbezogene Risiken wahr und bewerten eine Teilnahme entsprechend zurückhaltend. Demgegenüber werden Optionen der Nasswiesenbewirtschaftung, etwa die Nutzung des Aufwuchses für Einstreu oder eine extensive Beweidung, als näher am bestehenden Bewirtschaftungssystem eingeschätzt und erscheinen daher aus betrieblicher Perspektive eher umsetzbar.

Knapp die Hälfte aller Teilnehmenden lehnte eine Umstellung der Moorbewirtschaftung selbst unter Berücksichtigung einer finanziellen Inwertsetzung der Treibhausgasminderungsleistungen ab und sprach sich für die Fortführung der bisherigen Status-quo-Bewirtschaftung aus. Vor dem Hintergrund der Klimaschutzziele deutet sich damit an, dass die auf Freiwilligkeit basierende Transformation hin zu einer klimaschonenden Moorbewirtschaftung an strukturelle Grenzen stößt. Soll eine substanzielle Emissionsminderung erreicht werden, bedarf es daher einer kritischen Reflexion der bestehenden Instrumente sowie gegebenenfalls einer Weiterentwicklung des ordnungspolitischen Rahmens.

Teilvorhaben 7: Faserspritzguss, mechanische Eigenschaften und Papierformversuche

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhabens 7 war die Untersuchung der Verwertbarkeit von Biomasse aus dem Anbau in Paludikultur in verschiedenen Verwertungslinien. Dies umfasst die Bioraffination, den Faserspritzguss sowie, in Verbindung mit biobasierten Polymeren, den Spritzguss und den 3-D-Druck. Dabei wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Verwertbarkeit untersucht und passende Anwendungsszenarien identifiziert. Der Fokus lag dabei auf der vergleichenden Bewertung unterschiedlicher Pflanzenarten, welche sich für den Anbau in Paludikultur eignen, um die jeweils am besten geeigneten Verwertungsszenarien für die Arten zu identifizieren. Folgende Pflanzenarten wurden untersucht: *Typha latifolia*, *Typha angustifolia*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex acutiformis*.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 6.1: Bioraffination

Im Rahmen des Arbeitspakets 6.1 wurden die technischen Möglichkeiten der **Bioraffination** von Paludikultur-Biomasse aus Nasswiesen untersucht, um Saft- und Faserfraktionen für eine kaskadierte Nutzung zu gewinnen. Ausgangspunkt waren Nasswiesenbestände am Dümmer mit typischen Gras- und Krautarten der extensiv genutzten Feuchtwiesen.

Technischer Versuch bei GeCo GbR (Januar 2025)

Am 29. Januar 2025 wurde in Kooperation mit der Firma GeCo GbR (Nordenham) ein Bioraffinationsversuch im technischen Maßstab mit frisch geernteter Nasswiesen-Biomasse durchgeführt. Ziel war die Prüfung der grundsätzlichen Eignung der heterogenen Nasswiesen-Mischfraktion für den kontinuierlichen Raffinationsprozess sowie die Gewinnung einer flüssigen und einer faserigen Fraktion. Die eingesetzte Biomasse stammte von Nasswiesenflächen am Dümmer und lag als grob strukturiertes, voluminöses Mähgut ohne gezieltes Häckseln vor.

Bereits beim Befüllen der Bioraffinationsanlage kam es aufgrund der groben und faserigen Struktur zu einer sofortigen Verstopfung, sodass der Prozess abgebrochen werden musste und keine Fraktionierung stattfinden konnte. Damit erwies sich nicht die chemische Zusammensetzung, sondern die mangelnde Vorzerkleinerung als limitierender Faktor für die technische Umsetzbarkeit. Aus dem Versuch wurde abgeleitet, dass für künftige Anwendungen eine gezielte Zerkleinerung (Häckseln) während der Ernte zwingend erforderlich ist, um eine homogene, förderbare und für die Bioraffination geeignete Partikelgröße sicherzustellen und Anlagenschäden durch Blockaden zu vermeiden. In Abstimmung mit GeCo wurde daher auf weitere Versuche im technischen Maßstab verzichtet und die Untersuchungen in den Labormaßstab verlagert.

Labormaßstab beim DIL: Saftpressung und Proteinfractionierung (Dezember 2025 – Februar 2026)

Zur detaillierten Charakterisierung der Bioraffination von Nasswiesen-Biomasse führte das Deutsche Institut für Lebensmitteltechnik e.V. (DIL) im Zeitraum vom 16. Dezember 2025 bis 28. Februar 2026 Labortests zur Saftpressung und Proteingewinnung durch. Untersucht wurde frisches, grünes Blattmaterial (Probe 251-200) aus Nasswiesen am Dümmer.

Die Prozesskette umfasste: Ernte der Nasswiesenbiomasse, gekühlte bzw. gefrorene Zwischenlagerung, Transport, händische Aussortierung ungeeigneter Pflanzenteile (braune Stiele, Wurzeln, vertrocknete Blätter), mechanische Saftpressung der grünen Blattfraktion, gravimetrische Bestimmung der Saftausbeute, Gefriertrocknung von Rohmaterial und Presssaft, Bestimmung der Trockensubstanzgehalte sowie Proteinanalysen nach Kjeldahl mit Rückrechnung auf Feuchtgewicht. Aus einer Einwaage von 518,6 g grünem Blattmaterial wurden 338,0 g Presssaft gewonnen, entsprechend einer Saftausbeute von 65,2% bezogen auf die Blattmasse. Die Trockensubstanzgehalte lagen bei 17,2% im Rohmaterial (82,8% Wasser) und 7,1% im Presssaft (92,9% Wasser), was eine effektive Abtrennung wasserlöslicher Inhaltsstoffe von der Faserfraktion belegt.

Die Proteinbestimmung nach Kjeldahl ergab Proteingehalte von 23,3 g/100 g Trockensubstanz im Rohmaterial und 34,2 g/100 g Trockensubstanz im Presssaft. Rückgerechnet auf das Feuchtgewicht resultieren 4,0 g/100 g im Rohmaterial und 2,4 g/100 g im Saft. Damit wurde im Saft eine relative Proteinanreicherung um etwa 47% bezogen auf die Trockensubstanz erreicht, obwohl der absolute Proteingehalt im sehr wasserreichen Saft geringer erscheint. Die erzielten Werte liegen im typischen Bereich für grüne Blattbiomasse und bestätigen die grundsätzliche Eignung der Nasswiesen-Biomasse für mechanische Pressverfahren und eine proteinorientierte Bioraffination. Die Messungen erfolgten im Forschungskontext ohne Akkreditierung und sind daher als orientierende, nicht direkt auf den Industriemaßstab übertragbare Referenz zu verstehen.

Kritische Prozessparameter: Vorbehandlung, Zeitfenster und Logistik

Die Kombination aus technischem Versuch und Labortests zeigt, dass neben der chemischen Eignung vor allem drei **Schlüsselparameter** über die erfolgreiche Bioraffination von Nasswiesen-Biomasse entscheiden:

- Partikelgröße und Zerkleinerung: Eine zu grobe, voluminöse Struktur führt im technischen Maßstab zu Verstopfungen; erforderlich ist ein gezieltes Häckseln während der Ernte bzw. eine geeignete Vorzerkleinerung, um einen stabilen Anlagenbetrieb zu gewährleisten.
- Zeit und Temperaturführung: Zwischen Ernte und Verarbeitung muss das Zeitfenster minimiert werden; ungekühlte Lagerung führt rasch zu Proteinabbau, Qualitätsverlusten und geringeren Ausbeuten, sodass entweder eine unmittelbare Verarbeitung oder eine direkte gekühlte/gefrorene Lagerung notwendig ist.
- Logistik und Transport: Die Organisation kurzfristiger Transporte in Kombination mit Kühl- oder Gefrierketten beeinflusst Wirtschaftlichkeit und Proteinqualität wesentlich und muss bei einer Skalierung prozessintegriert geplant werden.

Kaskadierte Nutzungspfade und Einbindung in Nutzungsketten

Die im Labormaßstab erzielte Saftausbeute von 65,2% sowie die Proteinanreicherung auf 34,2 g/100 g Trockensubstanz im Saft unterstreichen das Potenzial der Bioraffination als Einstiegspunkt in kaskadierte Nutzungsketten von Paludikultur-Biomasse. Mögliche Nutzungspfade sind:

- Gewinnung proteinangereicherter Produkte aus der Saftphase, z. B. durch weitere Aufkonzentration (Ultrafiltration, Fällung, Gefrier- oder Sprühtrocknung) für Futtermittel- oder perspektivisch Lebensmittelanwendungen.
- Nutzung des Presskuchens als Faserrohstoff für Faserwerkstoffe (Faserguss, Faserspritzguss, Compounds) und damit Koppelung an die Arbeiten in AP 6.2.
- Energetische Nutzung verbleibender Reststoffe (z. B. Biogas, thermische Verwertung) sowie Rückführung von Nährstoffen in den Stoffkreislauf.

Aufgrund der geringen Materialmengen aus dem Labormaßstab konnte eine Weiterverarbeitung des Presskuchens zu Faserspritzguss- oder Compoundprodukten im Projektzeitraum jedoch nicht praktisch erprobt werden. Gleichwohl zeigt die Kombination aus Bioraffination und nachgelagerten Material- bzw. energetischen Pfaden das Potenzial einer mehrstufigen, wertschöpfungsorientierten Nutzung von Nasswiesen-Biomasse.

Arbeitspaket 6.2: Faserspritzguss

Im Projekt wurde das Faserspritzgussverfahren im Labormaßstab umgesetzt, um die Verwendbarkeit der Biomasse verschiedener Paludi-Pflanzenarten zu untersuchen. Im Anschluss wurde ein Fasergussversuch im Industriemaßstab mit Nasswiesenbiomasse testweise durchgeführt.

Für die Verarbeitung von Paludikultur-Biomasse im Faserspritzguss im Labormaßstab wurde eine Methodik entwickelt und umgesetzt. Dabei kommen hauptsächlich im 3-D-Druck-Verfahren hergestellte Bauteile zum Einsatz, da dieses Verfahren eine schnelle Fertigung konstruierter Bauteile ermöglicht. Das Faserspritzgussverfahren soll die Vorzüge des herkömmlichen Kunststoffspritzgusses mit denen der Papierherstellung aus wässrigen Suspensionen (Pulpe) verbinden. Im entwickelten Prozess wird die Biomasse-Suspension in die Kavität eines Werkzeugs eingespritzt und unter Druck und unter Vakuum zu Formteilen verarbeitet (siehe).

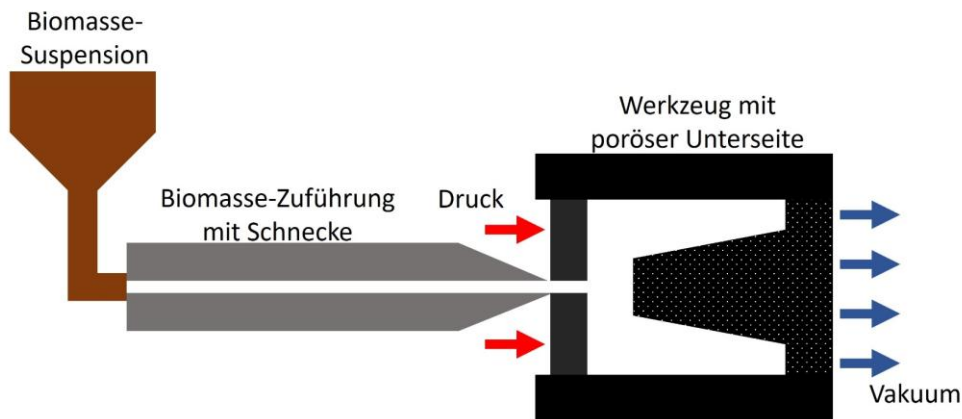


Abbildung 68: Schematische Darstellung des Faserspritzgussverfahrens

Im Verfahren wird die trockene, grob gehäckselte Biomasse zerkleinert und in einem Mixer zu einer gleichmäßigen wässrigen Suspension verarbeitet. Der Wasseranteil der Suspension ist dabei von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie etwa der Durchlässigkeit bzw. Porosität des verwendeten Werkzeugs. Letztere ist notwendig, um der Biomasse-Suspension das Wasser zu entziehen und das Bauteil in der Form trocknen zu lassen. Dies wird erreicht, indem ein Vakuum angelegt wird, durch das die Flüssigkeit der Suspension abgeführt wird. So kann das Bauteil unter Druck und Vakuum trocknen und verfestigen. Zusätzlich wird die geschlossene Form im Anschluss an das Abführen des Wasseranteils durch das Vakuum bei 60 °C getrocknet. Im Projekt wurde die Anwendbarkeit der verschiedenen Paludi-Pflanzenarten untersucht. Zusätzlich wurde ermittelt, welchen Einfluss die Zugabe von verschiedenen organischen Bindemitteln auf die mechanischen Eigenschaften hat.

Ziel des Industrieversuchs war die Bewertung der grundsätzlichen Eignung der Nasswiesenbiomasse als Rohstoff für die Herstellung von Fasergussprodukten im industriellen Maßstab. Darüber hinaus sollten verarbeitungstechnische Herausforderungen identifiziert sowie Optimierungspotenziale für eine industrielle Umsetzung auf konventioneller Fasergusstechnik aufgezeigt werden. Gegenstand war die Aufbereitung und Verarbeitung von Nasswiesenbiomasse zu Fasergussformteilen unter Einsatz etablierter industrieller Fasergussverfahren sowie deren Einfluss auf die Formgebung. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

1. Entwicklung einer Methodik, um Faserspritzgussversuche im Labormaßstab durchführen zu können
2. Herstellung von Proben für die mechanische Charakterisierung von Faserspritzgussproben aus Biomasse von verschiedenen Paludi-Pflanzenarten und Additivzugaben
3. Durchführung und Auswertung der mechanischen Tests
4. Bereitstellung und industrielle Aufbereitung von Nasswiesenbiomasse
5. Verarbeitung der Biomasse im Fasergussverfahren bei einem Industriebetrieb und Herstellung eines Demonstrator-Produkts
6. Identifikation notwendiger Vorbehandlungs- und Aufbereitungsschritte für eine stabile industrielle Verarbeitung

Arbeitspaket 6.3: Spritzguss und 3-D-Druck

Ziel des Arbeitspakets war die Herstellung homogener, kurzfaserverstärkter thermoplastischer Verbundwerkstoffe in Form von Compounds auf der Basis von Paludikultur-Biomasse, die Weiterverarbeitung im Spritzguss und im 3-D-Druck sowie die mechanische Charakterisierung der Werkstoffe. Dabei lag der Fokus auf der Analyse der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, um eine gezielte, iterative Optimierung der Compoundrezepturen zu ermöglichen.

Gegenstand war die Compoundierung von Biomasse aus dem Anbau in Paludikultur mit thermoplastischen Kunststoffen unter Einsatz eines CMS-Compounders, mit dem Fokus auf Verarbeitbarkeit und den Einfluss unterschiedlicher Pflanzenarten sowie auf den Aufbereitungsgrad der Biomasse. Folgende Arbeitsschritte wurden durchgeführt:

1. Auswahl und Charakterisierung geeigneter biobasierter Polymere für Spritzguss und 3-D-Druck
2. Compoundierung mit der Biomasse von *Typha angustifolia*, *Typha latifolia*, *Phragmites australis*, *Phalaris arundinacea* und *Carex acutiformis*
3. Vergleich unterschiedlicher Biomasseaufbereitungsarten (grobes Häckseln, Ultrazentrifugalmühle, industrielle Feinvermahlung)

4. Einsatz ausgewählter Additive zur gezielten Eigenschaftsoptimierung
5. Herstellung von Granulaten zur Weiterverarbeitung im Spritzguss, im Granulat-3-D-Druck und zur Drahtherstellung für den FDM-3-D-Druck
6. Durchführung von Verfahren zur mechanischen Charakterisierung der Compounds (wie Zugversuche, Charpy-Schlagversuche, Wärmeformbeständigkeitstests) und deren Auswertung
7. Durchführung von bildgebenden Verfahren zur Analyse der Partikelmorphologie nach der Verarbeitung der Compounds
8. Untersuchung der biologischen Abbaubarkeit ausgewählter Compoundrezepturen im „Soil Disintegration Test“, Wasserlagerungsversuch und UV-Alterungstest

Arbeitspaket 8: Öffentlichkeitsarbeit

Folgende Beiträge wurden im Rahmen des Teilvorhabens 7 für die öffentliche Darstellung des Projektes geleistet:

1. Vortrag auf dem Workshop „Paludikultur – Klima schützen und Rohstoffe erzeugen“ in Werlte, Dezember 2023
2. Poster-Präsentation auf der DAFA-Konferenz "Agrarforschung zum Klimaschutz" in Potsdam, März 2024
3. Poster-Präsentation auf der Auftaktveranstaltung PaludiNetz in Braunschweig, Juni 2024
4. Poster-Präsentation auf der „European Conference on Composite Materials“ in Nantes, Frankreich (ECCM 21, Finanzierung wurde allerdings von der FNR abgelehnt), Juli 2024
 - a. Finanzierung erfolgte nicht über die FNR, sondern durch eigene Mittel der AG Biologische Werkstoffe, HSB
5. Vortrag auf der "International Peatland Science Conference" in Freising, September 2024
6. Interview im PaludiNewsletter von Moorwissen.de, November 2024
7. Vortrag beim Workshop „Schilf: Anbau und Verwertung“, online, August 2025
8. Vortrag auf der Konferenz "RRR25 Renewable Resources from wet and rewetted Peatlands" in Greifswald, September 2025

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Arbeitspaket 6.1: Bioraffination

Die Bioraffination von Paludikultur-Biomasse steigert die Wertschöpfung über eine reine Energienutzung hinaus, indem zusätzliche Protein- und Faserprodukte generiert und Bioökonomie-Prinzipien entlang regionaler Nutzungsketten implementiert werden. Gleichzeitig unterstützt die Nutzung von Nasswiesen aus wiedervernässten Mooren Klimaschutz- und Biodiversitätsziele, da produktive Bewirtschaftung mit langfristiger Moorerhaltung verknüpft wird.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse liefern eine belastbare Basis für weiterführende Forschungsarbeiten, in denen insbesondere die Optimierung der Vorbehandlung (Häckseltechniken, Siebfractionen), die zeit- und temperaturkritische Prozessführung, die Skalierung auf größere Durchsätze sowie die wirtschaftliche Bewertung vertieft werden können. Aufbauende Projekte können prüfen, inwieweit technische und logistische Hürden adressierbar sind und welche zusätzlichen Wertschöpfungspotenziale – etwa durch höherwertige Proteinprodukte oder standardisierte Faserfraktionen – erschlossen werden können.

Arbeitspaket 6.2: Faserspritzguss

Die Untersuchung der Paludikultur-Biomasse für den Faserspritzguss im Labormaßstab zeigte, dass eine Zugabe von Bindemitteln unbedingt erforderlich ist. Unter der Zugabe von organischen Bindemitteln konnten insbesondere mit Schilf und Rohrkolben vielversprechende mechanische Eigenschaften ermittelt werden. Die Versuche zeigten, dass die industrielle Verarbeitung von Rohrglanzgras-Biomasse nicht ohne die Zugabe von rezyklierten Papierfasern möglich war.

Die industrielle Untersuchung zeigte, dass Nasswiesenbiomasse grundsätzlich als Rohstoff für den Faserguss geeignet ist und sich auf konventioneller Maschinenteknik verarbeiten lässt. Ohne geeignete Vorbehandlung führte die Zugabe der Biomasse jedoch zu ausgeprägter Schaumbildung im Pulper, wodurch eine Weiterverarbeitung nicht möglich war. Als Ursache wurden wasserlösliche pflanzliche Inhaltsstoffe identifiziert. Durch eine vorgelagerte Wasserlagerung und anschließende Spülung der Biomasse konnte die Schaumbildung deutlich reduziert und eine Verarbeitung im Fasergussverfahren ermöglicht werden. Dennoch traten prozessbedingte Herausforderungen auf, insbesondere durch grobe Faseranteile, die zu Verstopfungen von Vakuumböhrungen, Beeinträchtigungen der Werkzeugdichtigkeit sowie Anhaftungen der Formteile führten.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine reine Trockenzerkleinerung für die industrielle Nutzung nicht ausreichend und eine weitergehende Faseraufbereitung erforderlich ist. Ein hoher Anteil an Nasswiesenbiomasse bis hin zu 100 % erscheint nur bei deutlich verbesserter Faservereinzelung und Entfernung störender Inhaltsstoffe realisierbar. Insgesamt wurde die technische Machbarkeit bestätigt; für eine industrielle Umsetzung sind jedoch weitere Entwicklungsarbeiten sowie eine wirtschaftliche Bewertung notwendig.

Arbeitspaket 6.3: Spritzguss und 3-D-Druck

Alle geplanten Rezepturen konnten nach Anpassung der jeweiligen Prozessparameter erfolgreich im CMS-Compounder compoundiert werden. Insgesamt wurden 59 Compoundreihen hergestellt, davon 49 für den Spritzguss und 10 für den 3D-Druck. Der CMS-Compounder erwies sich als besonders geeignet für die Verarbeitung unterschiedlicher Paludi-Biomassen und Aufbereitungsgrade, da eine homogene Durchmischung bei vergleichsweise geringer und gleichmäßiger mechanischer Belastung erreicht werden konnte. Die Ergebnisse zeigen, dass Paludi-Biomasse grundsätzlich für die Herstellung naturfaserverstärkter Compounds geeignet ist. Eine direkte Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Compoundierverfahren im industriellen Maßstab muss im Detail nachgewiesen werden.

Während bezüglich der Verarbeitbarkeit keine wesentlichen Unterschiede zwischen Biomasse von verschiedener Paludi-Pflanzenarten festgestellt werden konnten, zeigte die mechanische Charakterisierung der Werkstoffe, dass die Pflanzenart einen signifikanten Einfluss auf die resultierenden Eigenschaften hat. Die Versuche zeigten, dass für Spritzgussanwendungen die Biomasse der Arten *Typha angustifolia* und insbesondere von *Phragmites australis* interessant ist. Während bei *Phalaris arundinaceae* und *Carex acutiformis* eine Erhöhung des Biomasse-Anteils von 20 Masse-% auf 30 Masse-% zu einer Verminderung der mechanischen Eigenschaften führte, konnten bei *Typha a.* und *Phragmites australis* durch den höheren Biomasseanteil eine höhere Festigkeit und ein höherer Zugmodul erreicht werden.

Obwohl die Verarbeitung der Compounds mit Paludikultur-Biomasse im 3-D-Druck-Verfahren im Vergleich zum Spritzguss komplexer war, konnten Werkstoffe mit einem Biomasseanteil von bis zu 20 Masse-% verarbeitet werden. Dafür ist jedoch eine starke Zerkleinerung der Biomasse zu Partikeln mit homogenen morphologischen Eigenschaften zwingend notwendig.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Biomasse aus dem Anbau in Paludikultur einen vielversprechenden *Nachwachsenden Rohstoff* für die Verwendung in kurzfaserverstärkten Kunststoffen darstellen kann. Basierend auf den im Projekt gewonnenen Erkenntnissen sollten Forschungsarbeiten bezüglich einer Skalierung auf Compoundier-, Spritzguss- und Extruderanlagen im industriellen Maßstab erfolgen. Eine vor allem wirtschaftlich interessante Option kann die „End-of-Life“-Verwertung von Produkten aus Paludikultur-Biomasse, bspw. Plattwerkstoffen oder Dämmstoffen, darstellen. Die Produkte könnten am Ende ihres Lebenszyklus zerkleinert und anschließend als Rohstoff zur Herstellung thermoplastischer Verbundwerkstoffe für Spritzgussanwendungen im Sinne einer Kaskadennutzung verwertet werden.