

Biogassubstrat

Substratgewinnung von wiedervernässten Moorflächen



www.biogas-forum-bayern.de/bif52

Biogas Forum Bayern, Verfasser:

Dr. Christina Hartung
Prof. Dr. Hauke Heuwinkel

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf



Dr. Thomas Venus, Annika Stehr, Barbara Misthilger, Dominik Bodenmüller, Teresa Koller, Rainer Kissel, Dr. Michael Diepolder, Dr. Stephan Hartmann, Dr. Juliana Mačuhová, Stefan Thurner
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Foren der ALB Bayern e.V.

Die ALB Bayern e.V. ist ein offiziell anerkannter, gemeinnützig tätiger, eingetragener Verein mit Mitgliedern aus Landwirtschaft, Wissenschaft, Beratung und den landwirtschaftlichen Organisationen. Weiterhin sind die staatliche Verwaltung, Firmen sowie Dienstleistungsunternehmen aus Industrie, Handel, Gewerbe sowie dem Umweltbereich vertreten.

Die ALB unterstützt die Landwirtschaft mit Wissensvermittlung in den Themenbereichen Bauen in der Landwirtschaft, Bewässerung, Biogas und Landtechnik. Hierzu handelt sie als neutraler Mittler und Bindeglied zwischen landwirtschaftlicher Praxis, Forschung, Umwelt, staatlicher Verwaltung, Gewerbe und Industrie.

Für umfassende Informationen zur umweltschonenden und effizienten Anwendung in der Praxis

werden zu den einzelnen Tätigkeitsbereichen Foren mit folgenden Aufgaben organisiert:

- ▶ Zusammenführen des aktuellen Wissensstandes,
- ▶ Reflektieren mit allen an der Thematik Beteiligten,
- ▶ Erarbeiten/Bekanntmachen konsensfähiger Lösungen

Foren der ALB Bayern e.V.:

- ▶ Bau Forum Bayern (BaF),
Leitung: Jochen Simon, LfL-ILT
- ▶ Bewässerungsforum Bayern (BeF),
Leitung Dr. Martin Müller
- ▶ Biogas Forum Bayern (BiF),
Leitung: Dr. Martin Müller, ALB
- ▶ Landtechnik Forum Bayern (LaF),
Leitung: Dr. Markus Demmel, LfL-ILT

Förderer



Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus



Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft



Ämter für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Impressum

Herausgeber Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in
Bayern e.V. (ALB), Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon 08161 / 887-0078
Telefax 08161 / 887-3957
E-Mail info@alb-bayern.de
Internet www.alb-bayern.de

1. Auflage 2025
© ALB Alle Rechte vorbehalten
Titelfoto Annika Stehr (LfL)

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Einleitung.....	4
2. Nasse Moorbewirtschaftung	5
2.1 Paludikulturen (Rohrkolben, Seggen, Schilf und Rohrglanzgras)	5
2.2 Nassgrünland.....	7
2.3 Förderprogramme	9
3. Erntetechnik und Besonderheiten bei der Nutzung	10
4. Konservierung	14
4.1 Silieren.....	14
4.2 Trocknen	15
5. Vergärung in der Biogasanlagen	15
5.1 Besonderheiten beim Anlagenbetrieb	15
5.2 Biogas- und Methanertragspotentiale.....	16
6. Kosten und Wirtschaftlichkeit	17
7. Quellen	21

1. Einleitung

Moore in Bayern sind bedeutende Kohlenstoffspeicher, stellen aber auch eine wichtige Grundlage für die landwirtschaftliche Nutzung dar. Bayern verfügt laut GLÖZ 2 Moorbodenkulisse über rund 228.000 Hektar Moorflächen, von denen ca. 134.000 Hektar landwirtschaftlich genutzt werden. Die Moorflächen entsprechen somit etwa 4 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Die Nutzung dieser landwirtschaftlichen Flächen erfolgt zu etwa zwei Dritteln als Grünland und zu einem Drittel als Ackerland.

Etwa 95 % der Moorflächen in Bayern wurden vor allem für die land- und forstwirtschaftliche Nutzung entwässert, was zu einer Zersetzung des Torfkörpers und somit zu hohen Treibhausgasemissionen führt [1]. Diese Freisetzung entspricht etwa 8 % der gesamten Treibhausgasemissionen Bayerns, bzw. 24 % der landwirtschaftlichen Emissionen. Gleichzeitig nimmt die landwirtschaftliche Nutzbarkeit dieser Flächen aufgrund von Torfschwund und sinkender Befahrbarkeit ab, da entweder der Grundwasserstand kritische Grenzen unterschreitet oder der mineralische Unterboden, der in der Regel unverwitterter Rohboden ist und daher sehr ungünstige Eigenschaften als Ackerboden aufweist, erreicht wird. Prognosen zeigen, dass ein beachtlicher Teil der landwirtschaftlich genutzten Moorböden in den kommenden 30 Jahren nicht mehr wie bisher bewirtschaftet werden können [2].

Durch eine Wiedervernässung entwässerter Moorflächen, kann die Zersetzung des Torfkörpers und somit der damit verbundene Ausstoß von Treibhausgasemissionen verhindert werden. Eine Wiedervernässung schränkt jedoch auch die Nutzung dieser Flächen ein. Besonders für Betriebe, die auf die Futterproduktion aus Moorflächen angewiesen sind, stellt die Wiedervernässung eine Herausforderung dar [3].

Gleichzeitig bietet die Wiedervernässung durch den Anbau von Paludikulturen wie Rohrglanzgras und Schilf neue Chancen, um Biomasse für

biobasierte Produkte (z. B. Dämmstoffe) oder die Biogasproduktion zu gewinnen. Diese Kulturen sind an hohe Wasserstände angepasst, tragen zur Erhaltung des Torfkörpers bei und können eine wirtschaftliche Nutzung der Flächen ermöglichen. Für biobasierte Produkte gibt es noch keine etablierte Wertschöpfungskette, während eine Biogasnutzung bereits möglich ist.

Förderprogramme wie das bayerische Moorbauernprogramm bieten finanzielle Unterstützung für Landwirte bei der Umstellung auf eine nachhaltige Moorbewirtschaftung. Dies umfasst z. B. Förderungen für die Bewirtschaftung von Nassgrünland und den Anbau von Paludikulturen. Dennoch bleibt die Umstellung herausfordernd: Landwirte benötigen spezifisches Wissen über nasse bzw. wiedervernässte Moorböden, angepasste Technologien und Unterstützung beim Aufbau neuer Wertschöpfungsketten. Rohrglanzgras kann mittlerweile mit dem Nutzungscode 854 als Dauerkultur im Flächen- und Nutzungsnachweis unter der Rubrik Energiepflanzen kodiert werden und der Landwirt erhält damit die Flächenprämie. Weitere Paludikulturen sind bislang noch nicht codierbar, sollen aber künftig aufgenommen werden.

Ziel dieser Fachinformation ist es, Landwirten und Beratern wissenschaftlich fundierte, praxisorientierte Informationen zur Substratgewinnung von wiedervernässten Moorflächen für die Biogasproduktion bereitzustellen.

2. Nasse Moorbewirtschaftung

2.1 Paludikulturen (Rohrkolben, Seggen, Schilf und Rohrglanzgras)

Paludikultur (lat. „palus“ = Sumpf) ist die produktive Nutzung von nassen Mooren und kombiniert die Wiedervernässung mit der Biomasseproduktion [4], [5]. Der Torfkörper wird dabei aufgrund des dauerhaft hohen Wasserstandes konserviert, wodurch die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum entwässerten Zustand beträchtlich reduziert werden können [6]. Aus ökonomischer Sicht ist es nicht nur wichtig, dass Pflanzenarten, die auf wiedervernässten Mooren kultiviert

werden, mit den hohen Wasserständen zurechtkommen, sondern auch hohe Biomasseerträge in hinreichender Qualität erzielen [5]. Typische ertragsreiche Pflanzenarten für Niedermoor-Paludikulturen sind Rohrkolben (*Typha* spp.), Schilf (*Phragmites australis*), Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und Seggen (*Carex* spp.) (siehe Bild 1 a-d). Zu weiteren potentiell geeigneten Pflanzenarten wird derzeit geforscht, die bisherigen Ergebnisse sind jedoch noch nicht praxisrelevant.

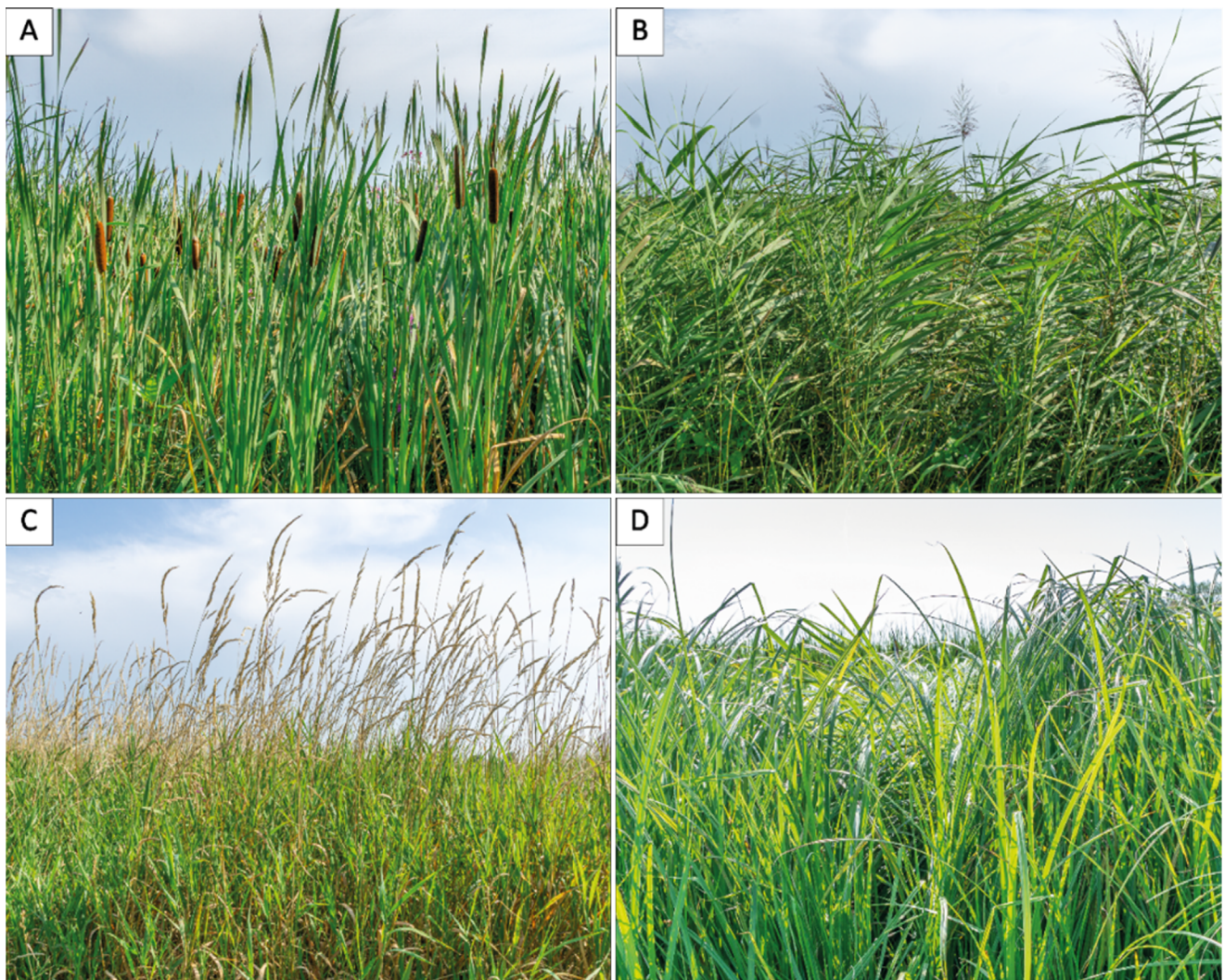


Bild 1 a-d: Niedermoor-Pflanzenarten, die typischerweise in Paludikulturen kultiviert werden:
a) Breitblättriger Rohrkolben (*Typha latifolia*), b) Schilf (*Phragmites australis*),
c) Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) und d) Sumpf-Segge (*Carex acutiformis*)

Die in Bild 1 a-d aufgeführten Niedermoor-Pflanzenarten sind mehrjährig. Somit ist eine Bodenbearbeitung nur zur Etablierung des Pflanzenbestands notwendig. Bei Rohrglanzgras ist eine Etablierung durch Einsaat ohne Einschränkungen möglich (Tab. 1). Die Einsaat von Schilf und Rohrkolben ist nur empfehlenswert, wenn der Grundwasserstand unmittelbar nach der Aussaat bis zur Geländeoberfläche angehoben werden kann [7]. Die Etablierung durch Pflanzung kann für alle Niedermoor-Paludikulturen ohne Einschränkung empfohlen werden. Bei Seggen ist diese Etablierungsform deutlich zuverlässiger als die Etablierung durch Einsaat [7], [8]. Eine Etablierung durch Pflanzung ist allerdings immer sehr kostenintensiv und mit einem höheren Aufwand verbunden. Ausführliche Informationen zur Etablierung von Niedermoor-Paludikulturen finden sich im Leitfaden von Eickenscheidt et al. (2023b) [7].

Bislang wurden Zuchtprogramme nur mit Rohrglanzgras durchgeführt. Hauptziel dieser Programme war es Sorten zu entwickeln, die für die Verwertung als Futtermittel besser geeignet sind [9]. Die Züchtung fokussierte sich dabei auf Merkmale, die auch für die Verwendung von Rohrglanzgras als Biogassubstrat interessant sind. Dazu zählen u. a. höhere Biomasseerträge, Reduzierung der Lignifizierung, eine spätere Reife der Pflanzen und eine erhöhte Krankheitsresistenz [10], [11], [9], [12]. Neben Rohrglanzgras weist auch Schilf eine hohe genetische Variabilität auf und kann somit potenziell auch auf vorteilhafte Eigenschaften selektiert werden [13].

Paludikulturpflanzen haben eine hohe Konkurrenzkraft gegenüber Beikräutern und bilden unter optimalen Bedingungen oft monodominante Bestände (Tab. 1). Beikräuter entwickeln sich v. a. dann, wenn der Wasserstand mehr als 10 cm unter Flur abfällt oder über den Jahresverlauf starken Schwankungen unterliegt. Überstauphasen im Frühjahr und Frühsommer können die Konkurrenzkraft von Rohrkolben, Schilf und Seggen fördern. Für Rohrglanzgras ist dies nicht geeignet, da der Biomasseertrag bei zu langen frühjährlichen Überstauphasen zurückgeht [7]. Da auf de-

gradierten Torfkörpern die exakte Wasserstandsregelung auf der gesamten Fläche schwierig zu realisieren ist, wird es in der Praxis (ähnlich wie heute bei Streuflächen) über die Jahre zur Entwicklung von Bereichen mit unterschiedlichen nässeangepassten Pflanzen entsprechend des realisierten Wasserstands kommen. Daher wird auf lange Sicht entweder die Nutzung als Mischbestand anzustreben sein, was beim Einsatz in einer Biogasanlage unproblematischer ist, oder die Fläche muss differenziert in Teilbereichen geerntet werden, um einheitliches Erntematerial zu erhalten (wird bei bestimmten Formen der stofflichen Nutzung angestrebt).

Paludikulturpflanzen reagieren unterschiedlich empfindlich auf Schwankungen im Wasserstand (Tab. 1). Sowohl Seggen als auch Rohrglanzgras sind vergleichsweise unempfindlich gegenüber längeren Trockenphasen mit Wasserständen bis zu 30 cm unter Flur. Dahingegen benötigen Rohrkolben und Schilf dauerhaft hohe Wasserstände [7].

Tab. 1: Vor- und Nachteile der einzelnen Paludikultur-Pflanzenarten

Pflanzenart	empfohlene Etablierungsform	Konkurrenzkraft	Toleranz gegenüber Schwankungen im Wasserstand	erzielbare Biomasseerträge (t TM*/ ha u. Jahr)
Rohrkolben	(Einsaat)/Pflanzung	++	+	5 - 20
Schilf	(Einsaat)/Pflanzung	++	+	5 - 20
Rohrglanzgras	Einsaat/Pflanzung	+++	+++	5 - 15
Seggen	Pflanzung	+++	+++	5 - 15

Bei der Ernte werden nur die oberirdischen Pflanzenteile geschnitten, damit der Torfkörper nicht gestört wird. Die erzielbaren Jahresbiomasseerträge liegen bei Rohrglanzgras und Seggen zwischen 5 und 15 t Trockenmasse pro Hektar und bei Rohrkolben und Schilf zwischen 5 und 20 t Trockenmasse pro Hektar. Die geerntete Biomasse kann als Biogassubstrat eingesetzt werden. Weitere mögliche Verwertungsoptionen sind u. a. die Nutzung als Dämm- und Baumaterial, die Herstellung von Papier, Karton und Verpackungen, die thermische Verwertung, die Verwendung als Futtermittel und der Einsatz als Torfer-

satzstoff im Gartenbau [14], [15], [16], [17], [18]. Wenn grünes Pflanzenmaterial im Sommer geerntet wird, ist eine Rückführung der Nährstoffe essenziell, da es sonst mittelfristig zu Ertragseinbußen kommen kann. Die Nährstoffrückführung kann momentan in Deutschland nicht durch eine Gärrestausbringung erfolgen, da laut aktueller Düngeverordnung keine stickstoff- und phosphathaltigen Düngemittel in nasse Flächen ausgebracht werden dürfen [19]. Eine Nährstoffrückführung ist somit nur möglich, wenn das eingeleitete Bewässerungswasser nährstoffreich ist.

2.2 Nassgrünland

Unter Nassgrünland wird die Grünlandnutzung von mäßig feuchten bis mäßig nassen Niedermoorstandorten verstanden. Als Anhaltspunkt gelten die Wasserstufen 6 bis 8 im Leitfaden der Niedermoorrenaturierung in Bayern [20] mit Jahresmittelwerten für den Grundwasserstand von 30 bis 12 cm unter Flur.

Die veränderten Bedingungen bei angehobenem Wasserstand erfordern eine angepasste Artenzusammensetzung. Während unter dem Einfluss von Grund- und Stauwasser gängige Arten wie das Deutsche Weidelgras und die Wiesenrispe nahezu vollständig ausfallen, zeigen sich Rohrglanzgras (*Phalaris arundinacea*) oder der Rohrschwingel (*Festuca arundinacea*) auch unter hohen Grundwasserständen als beständig [21]. Empfehlenswert ist daher eine angepasste Grasnarbe mit einer dieser Arten als Leitgras. Bei Rohrglanzgras ist die hohe Konkurrenzfähigkeit zu

beachten. Aufgrund seiner hohen Nässetoleranz ist es besonders gut für Flächen mit dauerhaft hohem Grundwasserstand geeignet. Um Rohrschwingel in den Beständen zu fördern, sollte dagegen auf Rohrglanzgras verzichtet werden. Als Teil der Bayerischen Qualitätssaatgutmischungen ist seit 2024 die Mischung BQSM®-W 1M als Spezialmischung für Niedermoorstandorte mit einem angehobenen Grundwasserstand bei mittelintensiver Nutzung erhältlich. Hier wurde der Rohrschwingel als Leitgras gewählt. Im Gegensatz zum Rohrglanzgras ist der Rohrschwingel im Fokus aktueller Zuchtprogramme. Zuchtziele sind neben dem klassischen Trockenmasse-Ertrag, Futterqualität, Krankheitsresistenz, Samen-ertrag auch die Erhöhung der physiologischen Potenz dieser Art durch Verbesserung sowohl der Trockenheitstoleranz wie auch der Nässeverträglichkeit. Saatgut von empfohlenen Sorten ist in ausreichenden Mengen im Handel erhältlich.

Darüber hinaus sind Bestände mit Rohrschwingel auch für intensivere Nutzungen, beispielsweise auf Flächen mit schwankendem Grundwasserstand, geeignet. Im Gegensatz zum Rohrglanzgras verträgt Rohrschwingel zudem Beweidung. Nassgrünland ist weiterhin mit einem Nutzungscode aus der Kategorie Dauergrünland im Flächen- und Nutzungsnachweis zu codieren, wobei für die geförderten Maßnahmen die Nutzung als Wiese, Weide oder Mähweide verpflichtend ist.

Wenn die Aufwüchse nicht als Strukturergänzung in der Milchkuhfütterung, für Jungvieh und Trockensteher sowie für Pferde oder Schafe genutzt werden, können sie auch als Substrat in einer Biogasanlage eingesetzt werden. Der Ertrag von mäßig feuchtem bis mäßig nassem Grünland ist rund 15 % niedriger als der von frischem bis mäßig trockenem Grünland [21]. Es wird empfohlen für die Nutzung als Substrat die Flächen mindestens zweischnittig zu bewirtschaften.

Tab. 2: Zusammensetzung der Bayerischen Qualitätssaatgutmischung BQSM®-W 1M als Spezialmischung für die Neuansaat von Wiesen und Weiden auf Moorflächen mit angehobenen Wasserständen.

Pflanzenart	kg / ha	%
Rohrschwingel	13,5	45
Wiesenlieschgras	7,5	25
Wiesenrispe	4,5	15
Wiesenfuchsschwanz	3,0	10
Wiesenschwingel	1,5	5

Um dauerhaft stabile Bestände zu erreichen, ist bei der Umstellung auf Nassgrünland die Ansaat bzw. Nachsaat mit nässeverträglichen Arten besonders wichtig. Wird der Wasserstand angehoben, kann es unter den veränderten Bedingungen zum Ausfall der bestehenden Grasnarbe kommen. Der Artenbestand wird geschwächt und unerwünschte Arten, wie die Flatterbinse, können die offenen Bodenstellen besiedeln. Eine Veränderung der Bestandszusammensetzung ist dann nur noch mit wesentlich größerem Aufwand, z. B. mit umbrechenden Verfahren, zu erreichen, die jedoch im vernässten Zustand schwierig umzusetzen sind und vor allem einer Genehmigung durch die Behörden bedürfen.

Bei der Nachsaat sollten folgende Punkte beachtet werden [21]:

- ▶ Die Nachsaat sollte gleichzeitig mit der Wasserstandsanhhebung erfolgen. Die Altnarbe wird so geschwächt und die neuen Arten können sich unter veränderten Standortbedingungen entwickeln und die entstandenen Lücken schließen.

- ▶ Die Nachsaat sollte immer in der zweiten Hälfte der Vegetationsperiode erfolgen, um die in vielen Fällen hohe Wuchskraft auf Moorböden im Frühsommer auszunutzen.
- ▶ Um Frostschäden aufgrund seiner langsamen Jugendentwicklung zu vermeiden, sollte der Rohrschwingel bis Ende August nachgesät werden.
- ▶ Eine erste Nutzung als Schröfsschnitt oder durch Beweidung ist 25 bis 30 Tage nach der Nachsaat erforderlich. Die Bestockung der neu eingebrachten Gräser wird so gefördert und unerwünschte Ruderalarten geschwächt.
- ▶ Die Nutzung sollte ab dann auf das neue Leitgras abgestimmt sein. Beim Rohrschwingel bedeutet das eine drei bis viermalige Nutzung im Jahr.

Eine Neuansaat, etwa bei Ackerumwandlung, sollte bereits im Jahr vor Anhebung der Wasserstände erfolgen. Nassgrünland darf, wie andere Flächen auch, nur gedüngt werden, wenn der Boden nicht wassergesättigt oder gefroren ist.



Bild 2: Fallen nicht nassetolerante Arten aus, erobern schnell minderwertige Pflanzen die offenen Stellen, wie im Bild die Flatterbinse (*Juncus effusus* dunkelgrün)



Bild 3: Rechtzeitig angesäte Mischungen mit nassetoleranten Arten geben minderwertigen Arten wenig Chancen

2.3 Förderprogramme

Die Umstellung auf eine moorbodenschonende Bewirtschaftung erfordert von landwirtschaftlichen Betrieben erhebliche Anpassungen. Das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF) fördert im Rahmen des Moorbauernprogramms im Kulturlandschaftsprogramm (KULAP) die moorbodenschonende landwirtschaftliche Nutzung. Dazu gehört die Umwandlung von Ackerflächen in Dauergrünland (M10), die nur in der Moorbodenkulisse förderfähig ist und dauerhaft als Grünland erhalten bleiben muss. Die Bewirtschaftung von nassem Grünland (M12) setzt auf eine angepasste Nutzung mit reduzierter Düngung, um die Wasserverhältnisse in den Moorböden zu berücksichtigen. Weitere Auflagen sind eine späte Nutzung nach dem 15.06. sowie der jährliche Nachweis von mindestens zwei Zeigerarten aus einer vorgegebenen Liste. Weiterhin gibt es die Maßnahme M14, die eine mittelintensive Nutzung von wiedervernässtem Grünland mit definiertem Stauziel unterstützt. Für diese Maßnahmen kommen vornehmlich bisher entwässerte Standorte in Frage, die mit einem definierten Stauziel von 20 cm unter der Geländeoberkante wiedervernässt werden. Dabei ist ein einmaliges Gutachten für das Erreichen des Stauziels erforderlich. Bei der Bewirtschaftung gibt es keine

weiteren Auflagen, außer, dass es weiterhin als Wiese, Weide oder Mähweide genutzt werden muss. Schließlich fördert das Programm mit M16 den Anbau von Paludikulturen, wie Rohrkolben oder Schilf, auf wiedervernässten Flächen, um eine wirtschaftliche Nutzung mit gleichzeitigem Moorschutz zu ermöglichen. Diese Maßnahmen sollen zur Minderung von Treibhausgasemissionen aus Moorböden beitragen und langfristig nachhaltige Alternativen für die landwirtschaftliche Nutzung bieten.

Die Maßnahmen im Moorbauernprogramm sowie deren Fördersätze zum Stand 2025 sind in Tab. 3 aufgelistet, und sind auf der Homepage des StMELF unter https://www.stmelf.bayern.de/mam/cms01/agrarpolitik/dateien/m_aukm_2028.pdf zu finden.

Tab. 3: Maßnahmenübersicht im bayerischen Moorbauernprogramm des KULAP

Kürzel	Maßnahme	Fördersatz
M10	Umwandlung von Acker in Dauergrünland (Förderung für 5 Jahre)	3.300 €/ha
M12	Bewirtschaftung von nassem Grünland (Verpflichtungszeitraum normales KULAP, 5 Jahre)	600 €/ha
M14	Bewirtschaftung von wiedervernässtem Grünland mit Stauziel (Verpflichtungszeitraum 12 Jahre)	900 €/ha
M16	Anbau von Paludikulturen mit Stauziel (Verpflichtungszeitraum 12 Jahre)	2.200 €/ha

3. Erntetechnik und Besonderheiten bei der Nutzung

Ziel bei der Ernte ist es, möglichst sauberes und qualitativ den Anforderungen entsprechendes Paludimaterial oder Substrat vom Nassgrünland zu ernten. Dafür ist eine im Vergleich zur Standardtechnik angepasste Technik erforderlich. Für die Ernte von Paludikulturen gibt es derzeit wenige Spezialmaschinen. Dazu gehören umgebaute Pistenraupen und kleinere Raupenfahrzeuge. Dabei wird bei sehr nassen Verhältnissen häufig ein einphasiges Ernteverfahren praktiziert, bei dem gleichzeitig das Material abgemäht, zerkleinert und aufgenommen wird. Bei Rohrglanzgras aber auch bei Schilf und Seggen ist unter etwas trockeneren Bedingungen auch eine mehrphasige Ernte mit getrennten Prozessschritten über Mähen, ggf. Wenden, Schwaden und Bergen möglich. Dazu wird teils auch angepasste Standardtechnik verwendet (wie Kreiselschwader oder Rundballenpressen). Allerdings ist mit stark erhöhten Störzeiten zu rechnen, da sich häufig Material an rotierenden Elementen der Maschinen fängt und wickelt.

Für die Ernte von Nassgrünland sind mehrere Maschinensets, angepasst an die unterschiedlichen Wasserstände und je nach Witterungsbedingungen in den einzelnen Jahren notwendig. Bei Wasserständen unter -35 cm unter der Geländeoberkante wird in der Praxis häufig Standardtechnik eingesetzt. Dabei kommen Scheibenmäherwerke oder Doppelmessermäherwerke, Kreiselzettwender, Kreiselschwader und Ladewagen oder Ballenpressen zum Einsatz. Bei höheren Wasserständen eignet sich zunächst angepasste Standardtechnik und bei sehr nassen Verhältnis-

sen ist auch im Nassgrünland Spezialtechnik notwendig.

Bei sehr feuchten Bedingungen ist es erforderlich, das Material direkt nach dem Mähen aus der Fläche zu bergen und auf einem mineralischen Standort bzw. auf einer trockenen Fläche erneut auszubreiten, um den Anwelkvorgang bis zum gewünschten Trockenmasse- (TM-) Gehalt durchzuführen. Dazu werden derzeit häufig Ladewägen mit Dosierwalzen eingesetzt, wobei es trotzdem herausfordernd bleibt, das Material mittels Kreiselzettwender oder auch Schwadwender bis zur Lagerfähigkeit (85 % TM-Gehalt) auf der Fläche zu trocknen, da es dann oft größere Massen sind, die zu bewegen sind.

In den Tabellen 4, 5 und 6 sind die derzeit in der Praxis häufig eingesetzten Techniken dargestellt. Daneben gibt es weitere Spezialtechniken wie den Kammschwader oder auch Ladewagen mit Zwillingsreifen unterhalb der Ladefläche.

Tab. 4: In der Praxis häufig eingesetzte Technik beim Arbeitsschritt Mähen

Bild	Art	Eigenschaften
	Traktor mit Zwillings-/Breitbereifung und Scheiben-/Trommelmähwerk	▶ Relativ hohes Gewicht ▶ Doppelbereifung/ Breitbereifung (straßentauglich) ▶ Herkömmliche, robuste Mähwerke ▶ Nicht geeignet zum Einsatz bei Paludikulturen ▶ Kaum Rüst- und Wartungszeiten der Mähwerke
	Traktor mit Gitterrädern und Doppelmessermähwerk	▶ Kleine, leichte Traktoren ▶ Gitterräder erhöhen die Tragfähigkeit (nicht straßentauglich) ▶ Viel Rüst- und Wartungszeiten ▶ Doppelmesser zum besonders schonenden Mähen, hoher Wartungsaufwand
	Mähtrac mit Doppelmessermähwerk	▶ Sehr leicht ▶ Bereifung bereitet teilweise Probleme auf sehr nassen Flächen ▶ Doppelmesser zum besonders schonenden Mähen, hoher Wartungsaufwand ▶ Aufgrund der Förderung weit verbreitet
	Pistenraupe mit Doppelmessermähwerk	▶ Geringer Bodendruck ▶ Pistenraupe mit Doppelmessermähwerk im Frontanbau, Ladewagen mit Pickup integriert (nicht straßentauglich) ▶ Kaum Rüst- und Wartungszeiten ▶ Beim Wenden teilweise Zerstörung von Narbe, Boden und Aufwuchs
	Einachsmäher mit Doppelmessermähwerk	▶ Sehr leicht ▶ Zusätzlicher Anhänger für den Transport notwendig ▶ Einsatz vor allem bei sehr nassen und unübersichtlichen Stellen ▶ Manuelle Steuerung auf Moorflächen notwendig ▶ Doppelmesser zum besonders schonenden Mähen

Tab. 5: In der Praxis häufig eingesetzte Technik beim Arbeitsschritt Schwaden

Bild	Art	Eigenschaften
	Traktor mit Zwillings- /Breitbereifung und Kreisel-schwader	▶ Relativ leichtes Gewicht ▶ Doppelbereifung/ Breitbereifung (straßentauglich) ▶ Herkömmliche, robuste Schwader ▶ Kaum Rüst- und Wartungszeiten der Schwader
	Traktor mit Gitter-rädern und Kreisel-schwader	▶ Kleine, leichte Traktoren ▶ Gitterräder erhöhen die Tragfähigkeit (nicht straßentauglich) ▶ Viel Rüst- und Wartungszeiten
	Kleintraktor mit Bandrechen	▶ Kleine, leichte Traktoren ▶ Sehr leicht ▶ Kaum Rüst- und Wartungszeiten
	Mähtruc mit Band-rechen	▶ Sehr leicht ▶ Aufgrund der Förderung weit verbreitet ▶ Bereifung bereitet teilweise Probleme auf sehr nassen Flächen ▶ Bandrechen wartungsarm
	Einachsmäher mit Bandrechen	▶ Sehr leicht ▶ Zusätzlicher Anhänger für den Transport notwendig ▶ Einsatz vor allem bei sehr nassen und unübersichtlichen Stellen ▶ Manuelle Steuerung auf Moorflächen notwendig

Tab. 6: In der Praxis häufig eingesetzte Technik beim Arbeitsschritt Bergen

Bild	Art	Eigenschaften
	Traktor mit Zwillings-/Breitbereifung und Rundballenpresse mit Gitterrädern	▶ Relativ hohes Gewicht ▶ Doppelbereifung/ Breitbereifung (straßentauglich) ▶ Herkömmliche, robuste Pressen ▶ Nicht geeignet zum Einsatz bei Paludikulturen ▶ Teilweise Probleme mit der Pickup der Presse (je nach Material) ▶ Viel Rüst- und Wartungszeiten ▶ (An-/Abbau der Gitterräder am Feld)
	Standardtraktor mit Breitbereifung und Rundballen-/Quaderballenpresse mit Breitbereifung	▶ Relativ hohes Gewicht von Traktor und Presse ▶ Breitreifen erhöhen die Tragfähigkeit (straßentauglich) ▶ Teilweise Probleme mit der Pickup der Presse (je nach Material) ▶ Kaum Rüst- und Wartungsaufwand
	Kleintraktor mit leichtem Ladewagen	▶ Verhältnismäßig leicht ▶ Häufiger Einsatz ▶ Teilweise Probleme mit der Pickup vom Ladewagen je nach Material
	Traktor mit Zwillings-/Breitbereifung und Ladewagen mit Zwillings/Breitbereifung	▶ Relativ hohes Gewicht ▶ Doppelbereifung/ Breitbereifung (straßentauglich) ▶ Herkömmliche, robuste Technik ▶ Teilweise Probleme mit der Pickup des Ladewagens (je nach Material) ▶ Viel Rüst- und Wartungsaufwand
	Pistenraupe	▶ Geringer Bodendruck ▶ Pistenraupe mit Doppelmessermähwerk im Frontanbau, Ladewagen mit Pickup integriert (nicht straßentauglich) ▶ Beim Wenden teilweise Zerstörung von Narbe, Boden und Aufwuchs ▶ Kaum Rüst- und Wartungszeiten ▶ Teilweise Probleme mit der Pickup vom Ladewagen je nach Material

4. Konservierung

4.1 Silieren

Die Silagequalität hängt von mehreren Faktoren ab. Das Siliergut sollte in einem Trockenmassenbereich von 30 - 40 % liegen, damit die Milchsäurebildung also die Ansäuerung effizient ablaufen kann. Für die Säurebildung sind ausreichend wasserlösliche Kohlenhydrate (Zucker) und ein hoher Besatz an Milchsäurebakterien notwendig. Diese Faktoren sind entscheidend für die Siliereignung des Materials.

Das Anwelkgut von Paludikulturen oder vom Nassgrünland weist aufgrund der unterschiedlichen Erntebedingungen mittlere bis schlechte Siliereigenschaften auf. Da nicht immer zum optimalen Schnitzeitpunkt geerntet werden kann, schwanken die TM-Gehalte des Anwelkguts sowohl von Paludikulturen als auch von Nassgrünland häufig sehr stark, von zu nass (< 30 %) bis zu trocken (> 40 %).

Zudem sind die Bestände meist im Alterungsprozess weit vorgeschritten, was zu hohen Verholungsgraden (Lignin) führt. Mit steigenden Fasergehalten nimmt der Anteil an Zucker in den Pflanzen ab, was die Siliereignung wiederum verschlechtert. Zudem verändert sich mit zunehmendem Alter der Bestände die mikrobiologische Flora, was einen sehr hohen Einfluss auf den Silierverlauf hat.

Im Nassgrünland sind die besseren Ernte- / Silierbedingungen beim 1. Schnitt gegeben. Bei den Folgeschnitten sind durch niedrigere TM-Gehalte die Risiken für Fehlgärungen deutlich höher. Dementsprechend ist auf eine möglichst saubere Ernte (siehe Kapitel 3) und ein schnelles Anwelken zu achten. Problematisch sind sehr lange Feldliegezeiten, da vorhandener Zucker zunehmend veratmet wird.

Für eine hohe Verdichtung und schnellen Zuckertritt sollte das Siliergut bei der Bergung möglichst kurz geschnitten werden, unabhängig vom

Ernteverfahren. Gerade sehr verholztes Material verfügt über hohe Lufteinschlussmöglichkeiten, die in der Silage zu starker Schimmelbildung führen können. Daher muss gut verdichtet und für einen zügigen Luftabschluss gesorgt werden. Dies gilt insbesondere für sehr überständige Bestände.

Erste Ergebnisse zu den Silagequalitäten von Aufwüchsen aus Nassgrünland und Paludimaterial [8], die in Siloballen bzw. Laborsilos erzeugt wurden, wiesen sehr schwankende Gehalte an gebildeter Milch- / und Essigsäure auf. Die Folgen einer geringen Ansäuerung durch Milchsäure können Fehlgärungen in Form der Bildung von Buttersäure sein, diese wurde auch in den untersuchten Silagen gefunden.

Zur Förderung des Silierverlaufs wird der Einsatz eines Siliermittels empfohlen. Bei sehr nassem (TM-Gehalt < 30 %) und überständigem Material sollten Siliermittel der Wirkungsrichtung 1a auf Materialien chemischer Basis eingesetzt werden, bei guten Anwelkbedingungen (TM-Gehalt von 30 - 40 %) und nicht überständigem Material können Siliermittel der Wirkungsrichtung 1b verwendet werden. Erkenntnisse zur Silagequalität im Fahrsilo gibt es derzeit noch nicht.

Abgeleitet aus den bisherigen Versuchsergebnissen lautet die Empfehlung, dass zu trockenes Material nicht allein im Fahrsilo einsiliert werden sollte. Idealerweise wird es mit gut silierbarem Material wie Silomais oder Wiesengras gemischt, um die Siliervoraussetzungen zu verbessern. Bei sehr trockenem Siliergut eignet sich die Silierung im Ballen deutlich besser, da dort durch den schnellen Luftabschluss und CO₂-Bildung eine zügige Konservierung einsetzt, wodurch das Material haltbar wird.

4.2 Trocknen

Neben der Silierung des Ernteguts kann es auch getrocknet werden. Bei der stofflichen Verwertung ist dies häufig sogar die gewünschte Form der Konservierung. Die Trocknung kann wie bei der Bodenheubereitung erfolgen. Auf sehr nassen Flächen ist das nicht möglich. Dann muss es auf eine trockene Fläche umgelagert werden, was einen weiteren Arbeitsschritt erforderlich macht. Entscheidend ist bei der Bodentrocknung, dass durch eine hohe Stoppel das Erntegut möglichst weit vom Boden entfernt aufliegt und somit die Trocknung zügig voranschreitet. Ebenso muss darauf geachtet werden, dass beim Wenden das gesamte Material vom Kreiselzettwender aufgenommen wird, damit es durchtrocknen kann. Dadurch wird verhindert, dass z. B. beim späteren Schwaden dann noch nasses Material mit aufgenommen wird.

Alle weiteren Trocknungsverfahren sind für Nass-

grünland und Paludikulturen geeignet. Zum einen kann das Material in einer Heubelüftungsanlage ab einem TM-Gehalt von 60 – 65 % (oder trockener) fertiggetrocknet werden, zum anderen auch in feuchterem Zustand in einer Heißlufttrocknungsanlage. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Energiekosten mit zunehmendem Feuchtegrad des Ernteguts stark ansteigen. Durch eine entsprechende Wertschöpfung müssen die Kosten gedeckt werden. Zielführend kann es sein, das als Rundballen geworbene Bodenheu mithilfe einer Ballenbelüftung nachzubelüften um einzelne nasse Stellen trocken zu bekommen, und damit Schimmelbildung zu verhindern.

5. Vergärung in der Biogasanlagen

5.1 Besonderheiten beim Anlagenbetrieb

Die Vergärung größerer Anteile von faserreichen Substraten in den Biogasanlagen erfordert eine angepasste Anlagentechnik. Probleme die durch Gras- oder Kleeegrassilage, Landschaftspflegematerial oder Körnermaisstroh verursacht werden, treten auch beim Einsatz von Material vom Nassgrünland und bei Paludikulturen auf. Das Material neigt zur Schwimmdeckenbildung, es kann sich um Rührwerke wickeln und im Falle eines unzureichenden Abbaus kann sich der Trockensubstanz- (TS-) Gehalt im Fermenter anreichern, wodurch Rührwerke stärker belastet werden. Es empfiehlt sich daher das Substrat vor dem Eintrag zu zerkleinern und robuste Anlagenkomponenten einzusetzen. In einigen Fachinformationen des Biogas Forum Bayern werden Möglichkeiten beschrieben, wie durch den Einsatz faserreicher Substrate verursachte Probleme im Vorfeld vermieden werden können.

Detaillierte Erklärungen können in folgenden Fachinformationen eingesehen werden:

- ▶ [Körnermaisstroh](#)
- ▶ [Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial](#)
- ▶ [Substrataufbereitung](#)
- ▶ [Biogas im Ökolandbau – Prozessführung bei der Vergärung von Kleeegrassilage](#)

5.2 Biogas- und Methanertragspotentiale

Um als Biogassubstrat infrage zu kommen, müssen das Erntematerial vom Nassgrünland und die Paludikultur-Pflanzen eine gute anaerobe Vergärbarkeit aufweisen, welche sich im spezifischen Biogasertrag pro kg organische Trockensubstanz (oTS) ausdrückt. Dieser liegt bei im Frühsommer geerntetem Rohrkolben, Schilf und Rohrglanzgras bei ca. 600 L_N pro kg oTS [22], [23], [24] und ist somit vergleichbar zu dem spezifischen Biogasertrag von Grassilage [25]. Seggen erzielten in Versuchen nur einen spezifischen Biogasertrag von ca. 450 L_N pro kg oTS [22], [26]. Für die anaerobe Vergärbarkeit ist zudem das Pflanzenalter von besonders hoher Bedeutung. Mit zunehmendem Pflanzenalter nimmt der Biogasertrag ab (Abb. 4), da der Gehalt an anaerob gut verdaulichen Bestandteilen, wie z. B. Proteinen sinkt und der Gehalt an anaerob nicht verdaulichem Lignin zunimmt [23], [24]. Lignin fungiert zudem als eine Barriere gegenüber dem anaeroben Ab-

bau durch die Inkrustierung der Zellwände und reduziert somit die Verdaulichkeit der Hemicellulosen und Cellulosen.

Wenn schwerer vergärbare Pflanzenmaterial von der Spätsommer-/Herbst-Ernte in Substratmischungen eingesetzt wird, kann es im Fermenter zu einer Anreicherung von nicht abgebautem Material kommen [22]. Dadurch erhöht sich der TS-Gehalt und die Viskosität des Fermenterinhalt, was wiederum eine stärkere Beanspruchung der Rührwerke und somit erhöhte Stromkosten zur Folge hat. Dem kann durch eine Co-Vergärung mit wasserhaltigen Substraten, wie z. B. Rindergülle und Kartoffelpülpe entgegengewirkt werden [27]. Deshalb sollten nicht mehr als 20 - 30 % Paludikultur-Biomasse bezogen auf die Trockenmasse in Substratmischungen eingesetzt werden und zudem sind frühe Erntetermine zu bevorzugen [6], [27].

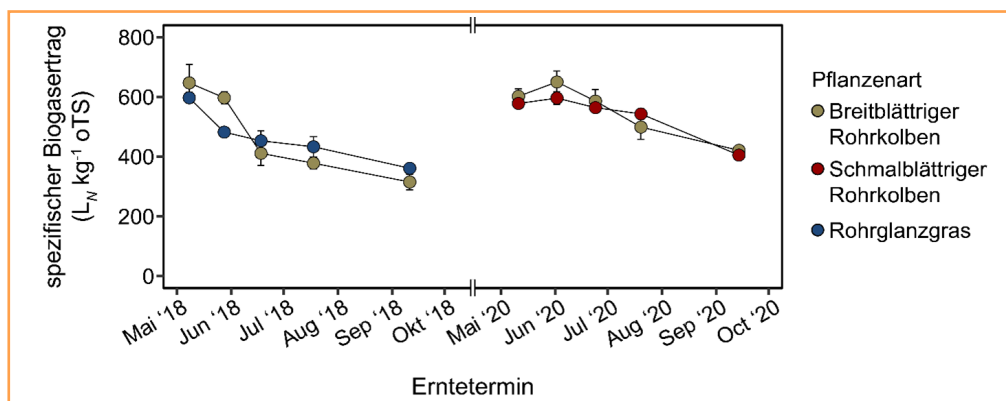


Abb. 4: Spezifischer Biogasertrag von Rohrglanzgras, Breit- und Schmalblättrigen Rohrkolben zu jeweils fünf Ernteterminen im Jahr 2018 bzw. 2020 [23].

Um den optimalen Erntetermin für eine Biogasnutzung zu finden, ist es nicht nur essenziell den spezifischen Biogasertrag pro kg oTS zu bestimmen, sondern auch den Biogasertrag pro Hektar zu berechnen. Letzterer ist das Produkt aus dem spezifischen Biogasertrag und dem Biomasseertrag pro Hektar. Während der spezifische Biogasertrag mit zunehmenden Pflanzenalter abnimmt, steigt der Biomasseertrag pro Hektar an (Abb. 5). Somit stellt der Biogasertrag pro Hektar einen Kompromiss zwischen diesen beiden Parametern

dar. Als optimaler Erntezeitpunkt mit hohem Biogasertrag pro Fläche bei guter anaerober Vergärbarkeit konnte für Rohrkolben und Rohrglanzgras Anfang / Mitte Juni ermittelt werden. In diesem Zeitraum zeigten die Kulturen die folgenden Entwicklungsstadien: Beim Rohrkolben war das der Beginn des Kolbenschiebens und das Rohrglanzgras befand sich in der Vollblüte bis zur späten Milchreife / frühen Teigreife. Der Flächenenertrag betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 4.000 bis 5.000 Nm^3 pro ha (Abb. 5) und ist vergleichbar mit dem

Jahresertrag von Dauergrünland [25].
Die mittleren Methangehalte im Biogas lagen zwischen 52,1 und 54,5 % [28]. Diese Werte sind auch zu erwarten, da die verwendeten Substrate

primär aus Kohlenhydraten bestehen, aus welchen laut Weiland [30] Biogas mit einem theoretischen Methananteil von 50 % produziert wird.

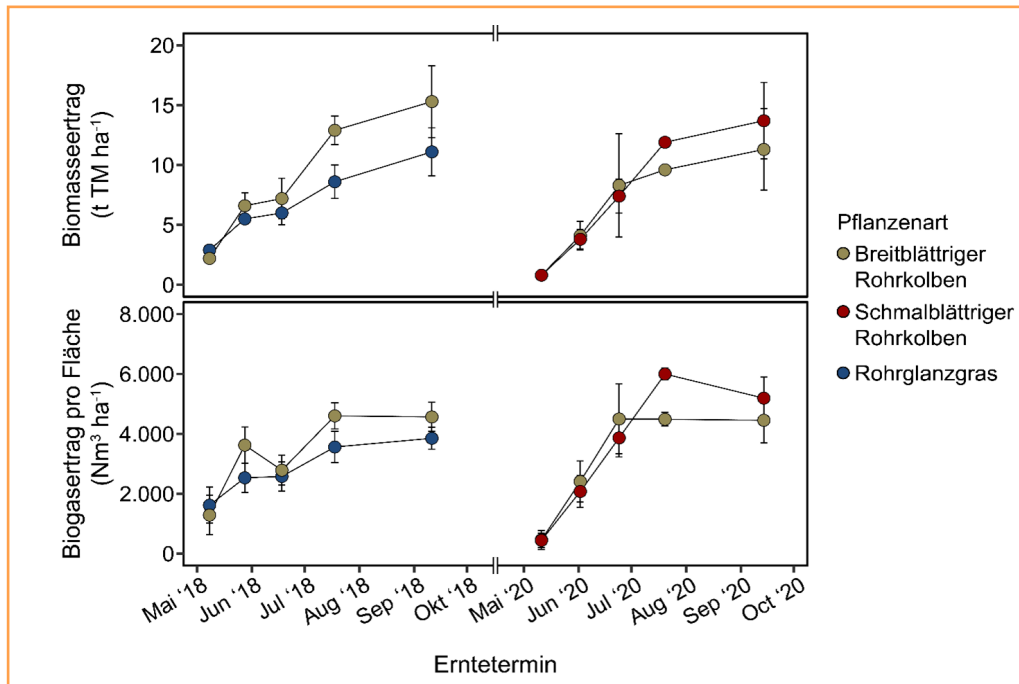


Abb. 5: Biomasseertrag und Biogasertrag pro Fläche von Rohrglanzgras, Breit- und Schmalblättrigen Rohrkolben zu jeweils fünf Ernteterminen im Jahr 2018 bzw. 2020 [23].

Bei Rohrglanzgras kann im Spätsommer / Herbst ein zweiter Schnitt durchgeführt werden. Allerdings wird dadurch der Biogasertrag pro Fläche und Jahr nur um etwa 25 – 30 % erhöht [6]. Im Falle von Rohrkolben ist ein zweiter Schnitt im Spätsommer / Herbst nicht empfehlenswert, da

dies zu einem Rückgang der Biomasseerträge in den Folgejahren führen kann.

Derzeit liegen noch keine Erfahrungen zum Langzeitbetrieb mit nennenswerter Menge an Paludikulturmaterial im Substratmix aus der Praxis vor.

6. Kosten und Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit eines Substrats für die Biogasproduktion hängt maßgeblich von den Substratkosten pro m³ Methan bzw. pro erzeugter kWh ab. Da für Paludikultur-Biomasse kein verlässlicher Marktpreis existiert, kann die Kostenbewertung nicht über Substitutionswerte (z. B. Maissilage) oder Opportunitätskosten erfolgen. Stattdessen wird in dieser Analyse mit erforderlichen Preisen gerechnet – also den Preisen, die notwendig wären, um die Produktionskosten zu decken und damit die wirtschaftliche Tragfähig-

keit der Substratnutzung sicherzustellen.

Die Produktionskosten auf wiedervernässten Flächen unterscheiden sich erheblich von denen konventioneller landwirtschaftlicher Flächen. Die Ernte von Biomasse auf vernässten bzw. nassen Flächen erfordert spezielle Maschinen und verursacht einen hohen Transport- und Arbeitsaufwand. Somit führen neben höheren Arbeitskosten aufgrund der schwierigen Bewirtschaftung auch erschwerte Erntebedingungen, ein zusätz-

licher Maschinenaufwand und Anpassungen in der Logistik zu signifikanten Mehrkosten. Zusätzlich sind Investitionen in die Wiedervernässung und das Management der Flächen erforderlich.

Da es bislang kaum belastbare Kostenschätzungen für die Produktion und Ernte von Paludikultur-Biomasse gibt, wurde in dieser Berechnung mit plausiblen Schätzungen aus Praxisversuchen und bestehenden Wirtschaftlichkeitsanalysen gearbeitet. Die Werte basieren insbesondere auf Berechnungen aus dem FNR-Bericht "Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore" [29] sowie Ergebnissen aus dem MoorUse-Projekt.

Um eine Einschätzung der erforderlichen Preise für Paludikultur-Substrate zu erhalten, wurden neben den variablen Kosten weitere wirtschaftliche Einflussfaktoren berücksichtigt. Eine umfassende Kalkulation zeigt, dass neben den direkten Produktionskosten auch Lohnkosten (hier: 25 €/h) für spezialisierte Erntearbeiten, Investitionskosten für Spezialmaschinen und zusätzliche Logistikkosten eine entscheidende Rolle spielen.

Diese umfassen:

- ▶ Erntekosten (inkl. Maschinen, Lohn und Betriebskosten): 1.500 € / ha
- ▶ Spezialmaschinen und Anpassungen: 500 – 1.500 € / ha
- ▶ Zusätzliche Logistikkosten für Substrate von nassen Flächen: Ø 300 € / ha (ohne Gärrestausbringung)
- ▶ Kapitaldienst für Flächenwiedervernässung: 200 – 500 € / ha (Investitionskosten umgerechnet auf 10 Jahre)

Daraus ergibt sich eine Gesamtkostenschätzung von 3.100 € / ha.

Um eine Kostendeckung zu erreichen, muss der Erlös (Preis x Ertrag) die Gesamtkosten decken. Aus diesem Grund wurden Gesamtkosten in Relation zu den möglichen Frischmasseerträgen gesetzt, um die erforderlichen Preise je Tonne Frischmasse (€/ t FM) zu bestimmen.

$$\text{Erforderlicher Preis [€/tFM]} = \frac{\text{Gesamtkosten [€/ha]}}{\text{Ertrag [tFM/ha]}}$$

Diese erforderlichen Preise wurden in einer Kosten-Nutzen-Analyse als Substratkosten je t FM / ha für Paludikulturen angesetzt (Tab. 7).

Tab. 7: Erforderlicher Preis zur Gesamtkostendeckung bezogen auf die Frischmasse (FM)

Ertrag (t FM / ha)	Gesamtkosten (€ / ha)	Erforderlicher Preis (€ / t FM)
25	3.100	124
50	3.100	62
75	3.100	41
100	3.100	31

Einjährige Daten aus dem Projekt Klimafarm in Schleswig-Holstein deuten für die dortigen betriebsspezifischen Bedingungen auf höhere Substratkosten als oben veranschlagt, hin.

Je nach Ernteverfahren und Lagerungsart wurden

Vollkosten in Höhe von 390 €/t TM (Rundballen) bis 520 € / t TM (Fahrsilo) für die Ernte im Jahr 2024 ermittelt [31]. Die folgende Kosten-Nutzen-Analyse basiert aber trotzdem auf den in Tabelle 7 veranschlagten Preisen.

Tab. 8: Kosten-Nutzen-Analyse für verschiedene Substrate zur Berechnung der Substratkosten je kWh Strom

Substrat	FM-Ertrag / Hektar ¹⁾ (t/ha)	oTM-Ertrag / Hektar ²⁾ (t/ha)	Methan- ausbeute ³⁾ (m ³ CH ₄ /t oTM)	Methanertrag pro Hektar ⁴⁾ (m ³ CH ₄ /ha)	Substrat- kosten / Tonne FM ⁵⁾ (€/t FM)	Substrat- kosten / m ³ Methan ⁶⁾ (€/m ³ CH ₄)	Substrat- kosten / kWh Strom ⁷⁾ (€/kWh)
Maissilage	42 - 52	14 - 18	357	5.000 - 6.426	30 - 50	0,24 - 0,40	0,06 - 0,10
Gras, siliert	23 - 31	6 - 8	315	1.890 - 2.520	30 - 50	0,37 - 0,62	0,09 - 0,15
Nassgrünland	10 - 31	3 - 8	315	945 - 2.520	50 - 100	0,53 - 1,23	0,13 - 0,30
Rohrkolben	25 - 100	4 - 18	300	1.200 - 5.400	31 - 124	0,57 - 2,58	0,14 - 0,62
Schilf	25 - 100	4 - 18	300	1.200 - 5.400	31 - 124	0,57 - 2,58	0,14 - 0,62
Rohrglanzgras	25 - 75	4 - 14	300	1.200 - 4.200	41 - 124	0,98 - 2,58	0,23 - 0,62
Seggen	25 - 75	4 - 14	225	900 - 4.050	41 - 124	1,01 - 3,44	0,24 - 0,82

Hinweise:

- 1) FM-Erträge für Maissilage und Grassilage sind Durchschnittserträge aus Bayern, FM-Erträge für Nassgrünland wurden an extensive Wiesennutzung angepasst, FM-Erträge für Paludikulturen wurden basierend auf den TM-Erträgen aus Tabelle 1 mit einem geschätzten TM Gehalt von 20 % berechnet;
- 2) Berechnung der oTM-Erträge basiert auf substratspezifischen oTM-Anteilen an der FM;
- 3) Methanausbeute für Maissilage und Grassilage stammen von KTBL Heft 526, Werte für Paludikulturen stammen aus dem in Kapitel 5.2 dargestellten Ergebnissen bei einer Annahme eines Methangehalt in Biogas von 50 %;

4) Methanertrag = Methanausbeute * oTM-Ertrag;

5) Kosten für Maissilage und Grassilage basieren auf Marktpreisen der vergangenen Jahre; Substratkosten für Paludikulturen basieren auf der Annahme, dass für eine Kostendeckung ein Preis von 200 € / t FM für einen FM-Ertrag von 25 t / ha notwendig ist.

6) Kosten je m³ Methan: FM-Ertrag * Substratkosten / Methanertrag

7) Basierend auf den Substratkosten je m³ Methan bei einem angenommenen Energiegehalt von 9,97 kWh je m³ Methan und BHKW-Wirkungsgrad von 42 %; somit gilt: Kosten pro kWh Strom = Kosten pro m³ CH₄ / 9,97 / 0,42.

Ein Vergleich der Substratkosten je kWh Strom für verschiedene Substrate zeigt, dass Paludikulturen wirtschaftlich deutlich schlechter abschneiden als Maissilage. Die Substratkosten für Maissilage liegen zwischen 0,06 und 0,10 € / kWh Strom, während Grassilage mit 0,09 bis 0,15 € / kWh etwas teurer ist. Aufgrund der hohen Unsicherheiten einiger Eingangsparameter, ergibt sich für Nassgrünland mit 0,13 bis 0,30 € und für verschiedene Paludikulturen mit 0,14 bis 0,82 € / kWh ein hoher Schwankungsbereich, was sie aus wirtschaftlicher Sicht ohne finanzielle Förderung wenig attraktiv macht.

Wenn Förderungen für die moorbodenschonende Bewirtschaftung (z. B. Moorbauernprogramm) berücksichtigt werden, können die Substratkosten deutlich reduziert werden. Die Flächenförderung (€ / ha) wird dabei auf die erzeugte Biomasse (€ / t FM) verteilt.

Die Kostenreduktion je kWh ergibt sich im Fall von Paludikulturen aus der jeweiligen Flächenprämie (2.200 € / ha für Maßnahme M16), geteilt durch den Methanertrag pro Hektar, umgerechnet auf kWh:

Minimale Senkung:

$$\triangleright 2.200 \text{ € / ha} \div 5400 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{ha} \div 9,97 \text{ kWh / m}^3 \text{ CH}_4 \div 0,42 = 0,10 \text{ € / kWh}$$

Maximale Senkung:

$$\triangleright 2.200 \text{ € / ha} \div 1200 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 / \text{ha} \div 9,97 \text{ kWh / m}^3 \text{ CH}_4 \div 0,42 = 0,44 \text{ € / kWh}$$

Tab. 9: Substratkosten unter Berücksichtigung von Fördermaßnahmen

Substrat	Substrat- kosten in € / kWh ohne Förderung	Förderprogramm	Förderbetrag umge- rechnet in € kWh	Substrat- kosten in € / kWh mit Förderung
Nassgrünland ¹⁾	0,13 - 0,25	M12 (600 € / ha)	0,09 - 0,15	0,04 – 0,10
Nassgrünland ²⁾	0,25 - 0,30	M14 (900 € / ha)	0,14 - 0,23	0,07 – 0,11
Rohrkolben	0,14 - 0,62	M16 (2.200 € / ha)	0,10 - 0,44	0,04 - 0,18
Schilf	0,14 - 0,62	M16 (2.200 € / ha)	0,10 - 0,44	0,04 - 0,18
Rohrglanzgras	0,23 - 0,62	M16 (2.200 € / ha)	0,13 - 0,44	0,11 - 0,18
Seggen	0,24 - 0,82	M16 (2.200 € / ha)	0,13 - 0,58	0,11 - 0,24

Hinweise: 1) Annahme für Grassilage von wiedervernässtem Grünland ohne Stauziel;

2) Annahme für Grassilage von wiedervernässtem Grünland mit Stauziel.

Die Berechnungen zeigen, dass gezielte Förderprogramme die Substratkosten für die Biogasproduktion aus Nassgrünland und Paludikulturen erheblich senken können. Insbesondere Nassgrünland kann durch Fördermaßnahmen auf ein wirtschaftlich konkurrenzfähiges Niveau gebracht werden, sodass die Substratkosten in einem Bereich von 0,04 – 0,11 € / kWh liegen. Bei Paludikultur-Biomasse variieren die Substratkosten stärker, bleiben aber trotz Förderung in vielen Fällen über dem Niveau klassischer Energiepflanzen.

Vor allem bei hohen Erträgen und optimalen Bewirtschaftungsbedingungen können die Kosten bei Rohrkolben, Schilf oder Rohrglanzgras durch die M16-Förderung (2.200 € / ha) auf 0,04 – 0,18 € / kWh reduziert werden, was eine Annäherung an wettbewerbsfähige Kosten ermöglicht. Dennoch zeigt sich, dass zusätzliche Maßnahmen zur Optimierung der Ernteverfahren, zur Senkung der Logistikkosten oder alternative Vermarktungsstrategien erforderlich sind, um eine langfristig tragfähige Nutzung von Paludikulturen in der Biogasproduktion zu gewährleisten.

Um den NaWaRo-Bonus für entsprechende Anlagen zu erhalten ist es zudem entscheidend, dass das Substrat von einer landwirtschaftlichen Fläche kommt, dass also das Nassgrünland aber

auch die Paludikultur entsprechend im Flächen- und Nutzungsnachweis (FNN) gekennzeichnet wird und das Substrat im Rahmen der landwirtschaftlichen Nutzung der Flächen erzeugt wird.

7. Quellen

- [1] Drösler, M. & Kraut, M. (2020). Klimaschutz durch Moorschutz – im Klimaprogramm Bayern (KLIP 2020/2050). – ANLiegen Natur 42(1): 31–38, Laufen. https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an42110droesler_et_al_2020_klimaschutz_durch_moor-schutz.pdf [abgerufen am 07.07.2025]
- [2] Gosch, L., Koller, T., Schmidt, E., Weiß, D., Zwack, B., Diepolder, M., Hartmann, S., Woortman, A., Thurner, S., Sticksel, E., Braumann, F., Dexl, M.-L., Lenz, D., Pannemann, F., Röder, P., Schlaipfer, M., Drösler, M., Schumann, A., Mäck, U., Burkhardtsmayer, R., Walter, A., Hafner, M. & Freibauer, A., (2024). Entwicklung moorverträglicher Bewirtschaftungsmaßnahmen für landwirtschaftlichen Moor- und Klimaschutz (MoorBewi), Projektbericht, Freising: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dezember 2024, 256 Seiten. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/abschlussbericht_moorbewi_web1.pdf [abgerufen am 07.07.2025]
- [3] Betroffenheitsanalyse landwirtschaftlicher Betriebsstrukturen für die Moore in Bayern und deren Endlichkeit. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf an der Fakultät Nachhaltige Agrar- und Energiesysteme im Studiengang Agrarmanagement, 76 Seiten
- [4] Wichtmann, W., Schröder, C., & Joosten, H. (2016). Paludiculture-productive use of wet peatlands: climate protection-biodiversity-regional economic benefits (pp. 272).
- [5] Wichtmann, W., & Joosten, H. (2007). Paludiculture: peat formation and renewable resources from rewetted peatlands. IMCG Newsletter, 3(2007), 24-28.
- [6] Eickenscheidt, T., Bockermann, C. Bodenmüller, D., Großkinsky, T., Gutermuth, S., Hafner, M., Hartmann, H., Hartung, C., Heuwinkel, H., Kapfer, M., Krimmer, J., Krus, M., Kucheler, C., Kuptz, D., Lohr, 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. (2023a). Schlussbericht MOORuse, Paludikulturen für Niedermoorböden in Bayern - Etablierung, Klimarelevanz & Umwelteffekte, Verwertungsmöglichkeiten und Wirtschaftlichkeit, 241 Seiten. https://www.hswt.de/fileadmin/Redaktion/Forschung/Forschungseinrichtungen/Peatland_Science_Centre/Downloads_Publikationen/Abschlussbericht_MOORuse.pdf [abgerufen am 07.07.2025]
- [7] Eickenscheidt, T., Krimmer, J., & Drösler, M. (2023b). Leitfaden zur Etablierung von Niedermoor-Paludikulturen. 18 Seiten. https://www.hswt.de/fileadmin/Redaktion/Forschung/Forschungseinrichtungen/Peatland_Science_Centre/Downloads_Publikationen/Publ_Paludikultur-Etablierungsleitfaden.pdf
- [8] LfL (2024). Forschungs- und Innovationsprojekt – Moorverträgliche Bewirtschaftungsmaßnahmen. <https://www.lfl.bayern.de/moorbewirtschaftung> [abgerufen am 20.12.2024]
- [9] Casler, M. D. (2010). Genetics, breeding, and ecology of reed canarygrass. International Journal of Plant Breeding, 4(1), 30-36.
- [10] Butkutė, B., Lemežienė, N., Kanapeckas, J., Navickas, K., Dabkevičius, Z., & Venslauskas, K. (2014). Cocksfoot, tall fescue and reed canary grass: Dry matter yield, chemical composition and biomass convertibility to methane. Biomass and Bioenergy, 66, 1-11.
- [11] Carlson, I. T., Oram, R. N., & Surprenant, J. (1996). Reed canarygrass and other Phalaris species. Cool-season forage grasses, 34, 569-604.
- [12] Gyulai, G., Mester, Z., Kiss, J., Szeman, L., Idnurm, A., & Heszky, L. (2003). Somaclonal breeding of reed canarygrass (Phalaris arundinacea L.). Grass and Forage Science, 58(2), 210-214.
- [13] Haldan, K., Kuprina, K., Haase, M. I., Kieckhäfer, F., Schade, L., Schmoldt, J., Schock, L. S., Stein, M., Wille, A., Schnittler, M., Bog, M. & Kreyling, J. (2023). Choose Wisely: Great Variation among Genotypes of Promising Paludiculture Crop Phragmites australis. Plants, 12(5), 1045.
- [14] Beyzi, S. B., Ülger, İ., & Konca, Y. (2022). Che-

- mical, Fermentative, Nutritive and Anti-nutritive Composition of Common Reed (*Phragmites australis*) Plant and Silage. Waste and Biomass Valorization, 1-10.
- [15] de Jong, M., van Hal, O., Pijlman, J., van Eekeren, N., & Junginger, M. (2021). Paludiculture as paludifuture on Dutch peatlands: An environmental and economic analysis of *Typha* cultivation and insulation production. *Science of the Total Environment*, 792, 148161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148161> [Abgerufen am 07.07.2025]
- [16] Hartung, C., & Meinken, E. (2021). Fen plant biomass as growing media constituent-cultivation of *Pelargonium zonale* and *Begonia × hiemalis* in peat reduced mixtures with composted fen plant biomass. In II International Symposium on Growing Media, Soil-less Cultivation, and Compost Utilization in Horticulture 1317 (pp. 17-22).
- [17] Kamali Moghaddam, M. (2021). *Typha* leaves fiber and its composites: A review. *Journal of Natural Fibers*, 1-15.
- [18] Kuptz, D., Kuchler, C., Rist, E., Eickenscheidt, T., Mack, R., Schön, C., Drösler, M., & Hartmann, H. (2022). Combustion behaviour and slagging tendencies of pure, blended and kaolin additivated biomass pellets from fen paludicultures in two small-scale boilers < 30 kW. *Biomass and Bioenergy*, 164, 106532. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953422001945?via%3Dihub> [abgerufen am 07.07.2025]
- [19] DÜV (2017). Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis. Düngeverordnung vom 26. Mai 2017 (BGBl. I S. 1305), die zuletzt durch Artikel 32 der Verordnung vom 11. Dezember 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 411) geändert worden ist
- [20] Wagner, A. & Wagner, I. (2005): Leitfaden der Niedermoorrenaturierung in Bayern. Hrsg: Landesamt für Umwelt. 141 Seiten. [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:34,AARTxNR:lfunat_00098,AARTxNODENR:283362,USERx-BODYURL:artdtl.htm,KATA-LOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&ACTIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:34,AARTxNR:lfunat_00098,AARTxNODENR:283362,USERx-BODYURL:artdtl.htm,KATA-LOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X) [aufgerufen am 07.07.2025]
- [21] Diepolder, M., Koller, T. & Hartmann, S. (2025). Moorbewirtschaftung – welche Gräser bzw. Mischungen sind futterbaulich geeignet? Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt 11/2025. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/blw_heft_11_2025_moorbewirtschaftung_mit_nassgrünland_final.pdf [abgerufen am 07.07.2025]
- [22] 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.
- [23] Hartung, C., Dandikas, V., Eickenscheidt, T., Zollfrank, C., & Heuwinkel, H. (2023a). Optimal harvest time for high biogas and biomass yield of *Typha latifolia*, *Typha angustifolia* and *Phalaris arundinacea*. *Biomass and Bioenergy*, 175, 106847.
- [24] Kandel, T. P., Sutaryo, S., Møller, H. B., Jørgensen, U., & Lærke, P. E. (2013). Chemical composition and methane yield of reed canary grass as influenced by harvesting time and harvest frequency. *Bioresource technology*, 130, 659-666.
- [25] Döhler, H., Eckel, H., Fröba, N., Grebe, S., Grube, J., Hartmann, S., Hauptmann, A., Horlacher, D., Horn, C., Hofmann, M., Häußermann, U., Möller, K., Klages, S., Sauer, N., Nakazi, S., Niebaum, A., Paterson, M., Roth, U., Schultheiß, U., Stadelmann, M., Vandré, R., Wirth, B., Witzel, E., & Wulf, S. (2013). *Faustzahlen Biogas. Kuratorium Für Technik Und Bauwesen In der Landwirtschaft*, 3. Ausgabe, Darmstadt.
- [26] Roj-Rojewski, S., Wysocka-Czubaszek, A., Czubaszek, R., Kamocki, A., & Banaszuk, P. (2019). Anaerobic digestion of wetland biomass from conservation management for biogas production. *Biomass and Bioenergy*, 122, 126-132.

- [27] Hartung, C., Heuwinkel, H., Kissel, R., Höcherl, S., & Drösler, M. (2023b). KaPaGas – Potential von Kartoffelpülpe mit Paludikulturmateri- al zur Biogasproduktion. Schlussbericht.
- [28] Hartung, C., Dandikas, V., Eickenscheidt, T., Zollfrank, C., & Heuwinkel, H. (2023). Opti- mal harvest time for high biogas and bio- mass yield of *Typha latifolia*, *Typha angusti- folia* and *Phalaris arundinacea*. *Biomass and Bioenergy*, 175, 106847.
- [29] Neubert, J., Köhn, N., Haldan, K., Kuprina, K., Wichmann, S. (2022): Paludikultur in die Praxis bringen: Integration – Management – Anbau. Schlussbericht zum Projekt Paludi- PRIMA. Förderkennzeichen: 22026017. Uni- versität Greifswald. 82 S. <https://www.fnr.de/fileadmin/projektdatenbank/22026017.pdf> [abgerufen am 19.03.2025]
- [30] Weiland, P. (2010). Biogas production: cur- rent state and perspectives. *Applied micro- biology and biotechnology*, 85, 849-860.
- [31] Tiedemann, T. (2025) Vortrag zu betriebs- wirtschaftlichen Daten bei der Paludikultur- ernte auf Klimafarm im Jahre 2024. Moor- pilotentreffen am 21.05.2025 in Ekel.

Zitiervorlage: Hartung, Ch., Heuwinkel, H., Venus, T., Woortman, A., Misthilger, B., Bodenmüller, D., Koller, T., Kissel, R., Diepolder, M., Hartmann, S., Mačuhová, J. und Thurner, S. (2025): Substratgewinnung von wiederver- nässten Moorflächen - Biogassubstrat In: *Biogas Forum Bayern*, 1. Auflage - 07/2025, Hrsg. ALB Bayern e.V., www.alb-bayern.de/bif52, Stand [Abrufdatum]



Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und
Landwirtschaftliches Bauwesen (ALB)
in Bayern e.V.
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising

Telefon	08161 / 887-0078
Telefax	08161 / 887-3957
E-Mail	info@alb-bayern.de
Internet	www.alb-bayern.de