

PALUDI
KULTUR



GREIFSWALD

Paludi-Pellets-Broschüre

Halmgutartige Festbrennstoffe

aus nassen Mooren



GREIFSWALD
MOOR
CENTRUM

ERNST MORITZ ARNDT
UNIVERSITÄT GREIFSWALD



Wissen
lockt.
Seit 1456

Paludi-Pellets-Broschüre

Halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren

Impressum

Herausgeber: Universität Greifswald
Institut für Botanik und Landschaftsökologie
Soldmannstr. 15, 17487 Greifswald
Partner im *Greifswald Moor Centrum*

Autoren: Tobias Dahms, Claudia Oehmke, Astrid Kowatsch,
Susanne Abel, Sabine Wichmann, Wendelin Wichtmann
& Christian Schröder

Kontakt: info@paludikultur.de

Diese Broschüre wurde durch das Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Mecklenburg-Vorpommern im Rahmen des Forschungsfonds Mecklenburg-Vorpommern aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds gefördert. Sie ist im Projekt „Produktion und Nutzung von pelletierter Biomasse aus Paludikultur“ (Paludi-Pellets-Projekt) entstanden.



Aktennummer: UG 11 044A; ESF/IV-BM-B35-0006/13

Auflage: 2., aktualisierte Auflage, 1.250 Exemplare
© Universität Greifswald 2015, 2017

Druck: Druckhaus Panzig, Greifswald

Gestaltung: Progress4

Bilder: lensescape.org, T. Dahms, S. Wichmann, W. Wichtmann

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier
(ENVIROTOP, ausgezeichnet u.a. mit dem Blauen Engel)

Die durch den Druck dieser Broschüre verursachten Treibhausgasemissionen wurden durch den Kauf von MoorFutures-Kohlenstoffzertifikaten kompensiert.
Zertifikat Nummer 11.630-11.632.



Alle Angaben ohne Gewähr.

Für Schäden, die durch die Nutzung dieser Broschüre entstehen, sowie für Entscheidungen, die auf Basis der bereitgestellten Informationen und Daten getroffen werden und deren Folgen daraus, schließen die Veröffentlichenden jegliche Haftung aus.

Vorwort

Die energetische Nutzung halmgutartiger Biomasse von wiedervernässten Mooren ermöglicht hohe Energieerträge. Je nach Produktivität kann Biomasse mit einem Heizöläquivalent von 850 bis 5.000 l pro ha geerntet werden. Mecklenburg-Vorpommern hat einen hohen Anteil an Moorstandorten (13% der Landesfläche). Die standortgerechte Biomasseproduktion auf wiedervernässten Mooren bietet somit ein großes Potential zur Substitution von fossilen Energieträgern.

Paludikultur, die land- und forstwirtschaftliche Nutzung nasser Moore, entspricht in besonderer Weise den Anforderungen, die die Landespolitik in Mecklenburg-Vorpommern in ihrer Gesamtstrategie „EnergieLand 2020“ an die zukünftige Energieversorgung im Land stellt. Klimaschutz und Energiepolitik sollen zusammengeführt, Treibhausgasemissionen schnell reduziert, Beschäftigung und Wertschöpfung im ländlichen Raum gesichert sowie die Versorgungssicherheit und höhere Eigenversorgung gewährleistet werden.

Die Produktion von Festbrennstoffen in wiedervernässten Mooren kann hierbei einen Beitrag leisten. Um die Voraussetzungen für die Nutzung von Biomasse aus Paludikultur zu verbessern, wurde im Rahmen des durch den Forschungsfonds Mecklenburg-Vorpommern geförderten Paludi-Pellets-Projektes die Nutzung von kompaktierter halmgutartiger Biomasse von wiedervernässten Mooren erprobt und untersucht.

Ziel dieser Broschüre ist es, die Ergebnisse aus der Forschungsarbeit für die Praxis verfügbar zu machen und Informationen zu den zentralen Fragen bei der Umsetzung bereitzustellen. Dabei geht es um Aspekte wie Flächeneignung, Pflanzenarten, Erträge, Inhaltsstoffe und Verbrennungseigenschaften, Technik, Ernteverfahren, rechtliche Rahmenbedingungen, Kosten sowie Treibhausgas- und Energiebilanzen.

Die Autoren danken dem Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur des Landes Mecklenburg-Vorpommern für die Förderung durch den Forschungsfonds Mecklenburg-Vorpommern aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds und dem Projektträger Jülich für die Projektbetreuung.

Besonderer Dank gilt den Ansprechpartnern und Unternehmen aus der Praxis, die die Erhebung der hier verwendeten Daten möglich gemacht haben.

Inhalt

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1. | Einleitung | 5 |
| 2. | Bewirtschaftung nasser Moorflächen | 6 |
| 2.1 | Pflanzenarten und Bestandesmanagement | 6 |
| 2.2 | Ernte | 12 |
| 2.3 | Transport und Lagerung | 16 |
| 3. | Aufbereitung: Häckselgut, Ballen, Briketts und Pellets | 18 |
| 3.1 | Mobile Pelletierung | 21 |
| 3.2 | Pelletierung im Technikum | 24 |
| 4. | Brennstoffeigenschaften von Paludi-Biomasse | 25 |
| 4.1 | Pellets-Qualität nach DIN EN ISO 17225-6 | 28 |
| 5. | Feuerungstechnik und Verbrennungsversuche | 30 |
| 5.1 | Verbrennungsversuche | 30 |
| 5.2 | Ascheanalysen | 34 |
| 6. | Betriebswirtschaft | 35 |
| 6.1 | Kosten für Technik und Ernte | 35 |
| 6.2 | Kosten für Transport und Lagerung | 40 |
| 6.3 | Kosten der Kompaktierung | 42 |
| 6.4 | Brennstoffkosten | 44 |
| 6.5 | Kosten der Wärmeerzeugung | 45 |
| 7. | Treibhausgas- und Energiebilanzen | 46 |
| 8. | Rahmenbedingungen: Förderung, Normen und Gesetze | 50 |
| 8.1 | Moornutzung | 50 |
| 8.2 | Brennstoffnormen | 51 |
| 8.3 | Immissionsschutz | 52 |
| 8.4 | Möglichkeiten und Richtlinien der Ascheverwertung | 53 |
| 9. | Praxisbeispiel Heizwerk Malchin | 54 |
| 10. | Fazit | 57 |
| | Abkürzungen | 59 |
| | Literatur | 60 |

1. Einleitung

Seit Jahrhunderten dienen Moore in vielfältiger Art und Weise als Rohstofflieferant für den Menschen. Einstreu, Futter, Kultursubstrate und Brennstoffe werden aus ihnen gewonnen. Im Zuge der Intensivierung der Landwirtschaft wurden Moore immer tiefer entwässert. Nach kurzzeitigen Ertragssteigerungen sind viele Moorstandorte jedoch zu Problemstandorten geworden. Die Entwässerung führt zu einer Vielzahl von Problemen wie Moorschwind, Bodendegradation, Nährstoffaustrag, Biodiversitätsverlust und hohen Treibhausgasemissionen. Diese verursachen hohe gesellschaftliche Kosten [1]. Durch Wiedervernässung kann diesen Problemen begegnet werden, jedoch bedarf es einer Neuausrichtung der landwirtschaftlichen Nutzung.

An der Universität Greifswald wird daher an einer alternativen, nassen Land- und Forstwirtschaft, der sogenannten „Paludikultur“ (v. lat. *palus* „Morast, Sumpf“ und cultura „Bewirtschaftung“) geforscht, bei der durch angepasste Pflanzenarten und angepasste Technik Biomasseproduktion und Moorschutz verbunden werden [2]. Paludikultur beinhaltet sowohl traditionelle Bewirtschaftungsverfahren wie die Produktion von Dachschilf oder die Streunutzung, als auch neue Verfahren zur Produktion von nachwachsenden Rohstoffen zur stofflichen und energetischen Nutzung.

Zusätzlich kann Paludikultur den Erhalt bzw. die Wiederherstellung wichtiger Ökosystemdienstleistungen wie Wasser- und Nährstoffrückhalt, Lebensraum für standorttypische Tier- und Pflanzenarten und Kohlenstoffspeicherung ermöglichen [2]. Zudem können fossile Rohstoffe ersetzt werden, was zu einer weiteren Vermeidung von Treibhausgasemissionen führt.

Die energetische Nutzung von Biomasse aus Paludikultur (Paludi-Biomasse) bietet verschiedene Vorteile, sie ermöglicht die Nutzung heterogener Bestände und stellt meist geringere Qualitätsanforderungen als die

stoffliche Verwertung. Für eine thermische Nutzung spricht ein hoher Heizwert der Biomasse verbunden mit der hohen Effizienz bei der Verbrennung sowie das Vorliegen erprobter (Stroh-)Feuerungstechnik. Für die Produkte Wärme (und Strom) besteht eine Nachfrage und ein Markt.

Nichtsdestotrotz handelt es sich um eine Übergangstechnologie, die in den nächsten Jahrzehnten durch stoffliche Verwertung bzw. Kaskadennutzung ersetzt werden muss. Für Paludi-Biomasse existieren vielversprechende stoffliche Nutzungsoptionen. Neben der traditionellen Nutzung als Bau- und Dämmstoff eignen sich Schilfblätter z.B. zur Herstellung von Siliziumanoden für hochmoderne Lithium-Ionen-Akkumulatoren.

Die vorliegende Broschüre widmet sich der energetischen Nutzung von halmgutartiger Biomasse aus Paludikultur und konzentriert sich dabei auf die Möglichkeiten der thermischen Nutzung als Festbrennstoff. Die Broschüre beginnt mit der Vorstellung geeigneter Pflanzenarten und Erläuterungen zu deren Kulturbegründung sowie zum erforderlichen Flächenmanagement für Paludikultur. Die Logistik der Ernte, des Transportes, der Lagerung und der Kompaktierung werden anschließend beschrieben. Neben einer Darstellung der Brennstoffeigenschaften der Paludi-Biomasse gibt die Broschüre auch Hinweise zur erforderlichen Feuerungstechnik und liefert Ergebnisse aus Verbrennungsversuchen. Die wesentlichen betriebswirtschaftlichen Eckpunkte werden anhand konkreter Beispiele für mögliche Verfahrens- und Verwertungsketten präsentiert. Eine Treibhausgas- und Energiebilanz sowie relevante gesetzliche Rahmenbedingungen zur Moornutzung und zur thermischen Verwertung ergänzen die Ausführungen, die abschließend durch ein Praxisbeispiel veranschaulicht werden.

2 Bewirtschaftung nasser Moorflächen

2.1 Pflanzenarten und Bestandesmanagement

In wiedervernässten Niedermooren werden nutzbare Dominanzbestände vor allem durch Schilf, Seggen und Rohrglanzgras gebildet (Tab. 2.1). Diese können durch Anpflanzung oder Aussaat etabliert werden oder entwickeln sich nach Anhebung der Wasserstände im Zuge natürlicher Wiederbesiedlung. Die Etablierung nutzbarer Bestände kann durch gezielte Managementmaßnahmen (Mahd zu bestimmten Zeitpunkten, Einstellung von bestimmten Wasserständen) gefördert werden.

Neben den hier vorgestellten Pflanzenarten gibt es eine Vielzahl weiterer Arten, die an nasse Standorte angepasst sind. In der Datenbank für potentielle Paludikultur-Pflanzen (DPPP) sind über 1.000 poten-

tielle Pflanzenarten für Hoch- und Niedermoore beschrieben [65]. Weitere Informationen finden sich im Online-Teil der Broschüre.



Abb. 2.1 Ernte von Seggen mit Raupentechnik in der Biebrza, Polen

Tab. 2.1 Produktivität und Energieertrag von Schilf, Seggen und Rohrglanzgras in wiedervernässten Niedermooren

| | | Ertragsniveau | | |
|----------------------------------|-----------|---------------|--------|-------|
| | | niedrig | mittel | hoch |
| Schilf¹ | | | | |
| Produktivität (Winter) | t TM/ha*a | 2 | 6 | 12 |
| Energieertrag (15% w) | MWh/ha*a | 8,5 | 25,4 | 50,9 |
| Heizöläquivalent ⁴ | l/ha*a | 850 | 2.540 | 5.090 |
| Seggen² | | | | |
| Produktivität (Sommer) | t TM/ha*a | 3 | 4,5 | 6,5 |
| Energieertrag (15% w) | MWh/ha*a | 12,8 | 19,2 | 27,7 |
| Heizöläquivalent ⁴ | l/ha*a | 1.280 | 1.920 | 2.770 |
| Rohrglanzgras³ | | | | |
| Produktivität (Herbst) | t TM/ha*a | 2 | 6 | 10 |
| Energieertrag (15% w) | MWh/ha*a | 8,8 | 26,3 | 43,9 |
| Heizöläquivalent ⁴ | l/ha*a | 880 | 2.630 | 4.390 |

¹ Heizwert (Hu) 4,94 kWh/kg TM, ² Hu 4,97 kWh/kg TM, ³ Hu 5,11 kWh/kg TM, ⁴ Heizöl Hu 11,8 MWh/t, Rohdichte 0,84 t/m³, Hu 10 MWh/m³. Eigene Daten (Mecklenburg-Vorpommern), Ertrag inkl. 10 % Verluste, gerundete Werte, konservativer Ansatz

Gemeines Schilf

Gemeines Schilf ist ein hochwachsendes, überflutungstolerantes Süßgras, welches gut für den Anbau in wiedervernässten Niedermooren geeignet ist. Auf nährstoffreichen, überstauten Flächen können die Schilfhalm eine Höhe von mehr als drei Metern erreichen. Diese bleiben auch nach der Vegetationsperiode aufrecht stehen, so dass eine Ernte im Winter möglich ist. Das unterirdische Sprossachsensystem (Rhizom) dient als Nährstoffspeicher. Schilf breitet sich vorwiegend vegetativ über Ausläufer aus und bildet großflächige, konkurrenzstarke Röhrichtbestände. Schilf kann sich durch horizontale oberirdische „Leghalme“ in einem Jahr über mehrere Meter hinaus ausbreiten. Insbesondere abgestorbene Rhizome können zur Torfbildung beitragen. Bestände mit höheren mittleren Wasserständen weisen meist höhere Erträge auf (Abb. 2.2).

| | |
|------------------------------|--|
| Deutscher Name | Schilf, Rohr, Reet, Riet |
| Botanischer Name | <i>Phragmites australis</i> |
| Ernte | jährlich im Winter, Ertragsrückgang bei Ernte im Frühsommer ¹ |
| Produktivität | Winter 3,6 bis 9,0 t TM/ha*a, (Ø 6,0) ² |
| Torfbildung | möglich |
| Boden | nährstoffreich, subneutral-basisch, salz-tolerant |
| Wasserstand | 10 cm unter bis 30 cm über Flur (Jahresmittel) |
| Etablierung | Pflanzung von Setzlingen, Rhizom-Stecklingen, Aussaat oder gelenkte Sukzession |
| Brennstoffeinsatz/-erprobung | Deutschland, Österreich, Großbritannien, Estland, Finnland, Belarus |

¹ [3, 4], ² eigene Daten (Mecklenburg-Vorpommern): n=76 aus fünf naturbelassenen Beständen mit Altschilf und zwei Rohrwerberbeständen (Wintermahd) ohne Altschilf

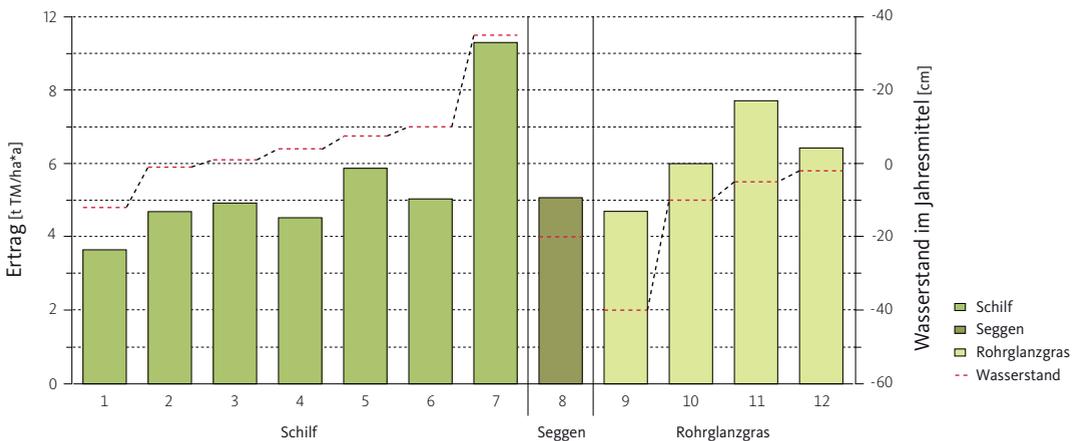


Abb. 2.2 Ertrag von Schilf (Wintermahd), Seggen (Sommermahd) und Rohrglanzgras (Herbstmahd) auf unterschiedlich nassen Standorten. Bei 1, 3, 8 und 9 handelt es sich um einmal jährlich gemähte Bestände, bei den anderen um ungenutzte, sukzessiv aufgewachsene Bestände wiedervernässter Niedermoore. (eigene Daten aus Mecklenburg-Vorpommern)

Bestandesbegründung und Management

Natürlich etablierte Schilfbestände werden bis heute in vielen Ländern traditionell für die Ernte von Dachschilf genutzt, z.B. in Deutschland, Polen, Rumänien, den Niederlanden und in China [5]. Auf wiedervernässten Moorflächen können sich Schilfbestände durch natürliche Ausbreitung entwickeln. Ausgangspunkt für die vegetative Ausbreitung sind bereits vorhandene Vorkommen im Bereich ehemaliger Gräben.

Eine Anpflanzung von Schilf wird vielfach in Pflanzenkläranlagen betrieben, aber auch im Rahmen von Moor-Restaurationen oder bei Ufersanierungen praktiziert. Die erfolgreiche Etablierung von Schilf ist vom Wasserstand, der Konkurrenz durch andere Pflanzenarten sowie der Art der Vermehrung abhängig. Zur Bestandesbegründung eignen sich aus Samen oder Rhizomen gezogene Setzlinge. Schilf kann auch direkt

vegetativ durch das Ausbringen von Rhizomstecklingen angesiedelt werden. Hierfür werden Rhizome in natürlichen Schilfbeständen ausgestochen (vergl. Kap. 8). Große Rhizomstecklinge werden im Frühjahr direkt ins Freiland gepflanzt. Kleinere Rhizomstecklinge können vorgezogen und im späten Frühling bis Sommer ausgepflanzt werden. Eine Direktaussaat von Schilfsamen ist im späten Frühjahr auf vegetationsfreiem Boden bei Wasserständen in Flurhöhe möglich. Jungpflanzen sind empfindlich gegenüber Überstauung, Frost und Konkurrenz durch andere schnellwüchsige Arten [6, 7].

Das Saatgut sollte von qualitativ hochwertigen Schilfbeständen vergleichbarer Standorte in der näheren Umgebung stammen. Frosteinwirkung auf das Saatgut erhöht die Keimungsrate. Eine Pflanzdichte von 0,25 Pflanzen pro m² kann bereits ausreichen, um nach zwei bis drei Jahren einen geschlossenen Schilfbestand zu erzielen. Eine vorherige Bodenbearbeitung vermindert die Ausbreitung von Konkurrenzarten. In den ersten zwei Jahren ist ein Wasserstand knapp unter Flur optimal [8]. Nach etwa drei Jahren kann erstmals ein Vollertrag erreicht werden.

Die Ernte der trockenen Halme im Winter ist für die Nutzung als Brenn- oder Baustoff ideal (s. Kap. 4). Wird Schilf über Jahre hinweg im Frühsommer gemäht, verringert sich dessen Produktivität und es wird zugunsten anderer Pflanzenarten (z.B. Seggen) zurückgedrängt. Durch Überflutung nährstoffreiche Bestände sind in geringem Maße betroffen [3, 4]. Für eine langfristige Nutzung ist deshalb nur die jährliche Ernte ab Spätsommer zu empfehlen. Eine periodische Sommermahd kann zur Verbesserung der Qualität (z.B. Verbesserung der biometrischen Parameter von Dachreet) in den Folgejahren führen. Im Rahmen der Naturschutzpflege werden Schilfstandorte im Sommer mit dem Ziel der Auflichtung der Bestände zur Förderung bestimmter Tier- und Pflanzenarten gemäht.



Abb. 2.3 – 2.4 Schilf-Dominanzbestände im Sommer (oben) und im Winter (unten)

Seggen

Die Gattung der Seggen gehört zur Familie der Sauergräser (*Cyperaceae*) und bildet mit über hundert Arten eine der artenreichsten Gruppen in Deutschland. Sie besiedeln trockene bis überstaute Standorte. Einige Seggenarten der Moore sind wichtige Torfbildner. Seggen sind meist am Grund dreikantig und haben dreizeilig stehende Blätter.

| | |
|------------------------------|--|
| Deutscher Name | Seggen |
| Botanischer Name | <i>Carex</i> spp. |
| Ernte | Ein- bis zweimal von Sommer bis Spätherbst |
| Produktivität | Beispiele für einige ausgewählte Arten bei einmaliger Ernte im Sommer Ufersegge (<i>Carex riparia</i>): 5,3 bis 11,1 t TM/ha*a ¹ Sumpfsegge (<i>Carex acutiformis</i>): 4,2 bis 6,2 t TM/ha*a ² Schlanksegge (<i>Carex acuta</i>): 3,8 und 5 t TM/ha*a ³ |
| Torfbildung | möglich |
| Boden | Ufersegge: mäßig nährstoffreich, subneutral-leicht basisch Sumpfsegge: nährstoffreich, subneutral-leicht basisch Schlanksegge: nährstoffreich, subneutral, leicht sauer-leicht basisch |
| Wasserstand | 20 cm unter bis 30 cm über Flur (Jahresmittel) |
| Etablierung | Aussaats, Pflanzung, natürliche Ausbreitung nach Wiedervernässung |
| Brennstoffeinsatz/-erprobung | Deutschland, Polen |

¹ Mecklenburg-Vorpommern [9], ² Schleswig-Holstein [10], Polen [11], ³ Polen [11] und eigene Daten (Mecklenburg-Vorpommern): n=30 aus einem Bestand (jährliche Sommermahd)

Bestandesbegründung und Management

In wiedervernässten Moorflächen bilden sich Seggenbestände vielfach durch eine spontane Besiedlung, so dass eine Anpflanzung nicht notwendig ist. Eine künstliche Bestandesbegründung kann durch Pflanzung von Setzlingen erfolgen.

Vor der Auspflanzung sollte der Boden vorbereitet werden, um die Konkurrenz von Begleitarten zu minimieren. Wasserüberstau in der ersten Wachstumsperiode wirkt sich ungünstig auf die Etablierung aus. Im Gegensatz zu Schilf haben Seggen eine geringere vegetative Ausbreitungsgeschwindigkeit, weshalb für die Etablierung von Reinbeständen höhere Pflanzdichten zu empfehlen sind. Die meisten Seggenarten können ein- bis zweimal zwischen Sommer und Spätherbst geerntet werden.



Abb. 2.5 – 2.6 Jährlich gemähte Seggen-Dominanzbestände im Sommer (oben) und im Herbst (unten)

Rohrglanzgras

Rohrglanzgras ist ein ausdauerndes, robustes und winterhartes Süßgras, das natürlicherweise Dominanzbestände in Auen und an Flussufern bildet und längeren Überstau verträgt [12]. Es sieht dem Gemeinen Schilf sehr ähnlich, ist aber mit 0,5 bis 2,50 m Höhe kleiner. Hauptunterscheidungsmerkmal ist eine häutige Ligula (Häutchen) am Blattgrund, während Schilf hingegen einen feinen, hellen Haarkranz besitzt. Es wächst bevorzugt auf wechselfeuchten, nährstoffreichen Böden mit ausgeprägten Überflutungsphasen und einem mittleren Wasserstand von 0 bis 20 cm unter Flur. Auf diesen Standorten ist es sehr konkurrenzstark.

In Skandinavien wird Rohrglanzgras auf abgetorften Hochmooren auf über 20.000 ha als Energiepflanze angebaut. Rohrglanzgras kann insbesondere auf nährstoffreichen Standorten mehrmals im Jahr geschnitten werden.



Bestandesbegründung und Management

Zur Aussaat werden im Frühjahr bis Spätsommer 15-25 kg Samen pro Hektar etwa 1-2 cm tief mit einem Reihenabstand von 12,5 cm eingebracht [13, 14]. Auf vielen entwässerten Moorflächen kommt Rohrglanzgras als Begleitpflanze vor und kann sich nach Wiedervernässung in Niedermooren spontan ausbreiten. So haben sich z.B. im Trebeltal (Mecklenburg-Vorpommern) Dominanzbestände von Rohrglanzgras auf mehreren hundert Hektar gebildet. Bei zunehmender Überstauung bzw. ausbleibender Nutzung können Rohrglanzgrasröhrichte nach einigen Jahren von Seggen oder Schilf abgelöst werden [15].

| | |
|------------------------------|--|
| Deutscher Name | Rohrglanzgras, Rohr-Glanzgras |
| Botanischer Name | <i>Phalaris arundinacea</i> |
| Ernte | Ein- bis zweimal von Sommer bis Herbst |
| Produktivität | Herbst/Winter 4,4 bis 7,7 t TM/ha*a ¹ (einmalige Mahd) Sommer 4,7 bis 9,3 t TM/ha*a ² |
| Torfbildung | nein |
| Wasserregime | periodische Überflutung, meidet konstanten Überstau |
| Boden | nährstoffreich, subneutral-basisch |
| Wasserstand | 0 bis 20 cm unter Flur (Jahresmittel) |
| Etablierung | Aussaat |
| Brennstoffeinsatz/-erprobung | Nordeuropa, Deutschland, USA |

¹ Mecklenburg-Vorpommern, eigene Daten (n=41 aus 4 naturbelassenen Beständen), ² Mecklenburg-Vorpommern [9]

Abb. 2.7 – 2.8

Rohrglanzgras-Dominanzbestände im Sommer (oben) und im Winter (unten)

Rohrkolben

Rohrkolben ist eine ausdauernde Wasser- und Sumpfpflanze, die nährstoffreiche Gewässer, Feuchtgebiete und Gräben besiedelt. In Mitteleuropa sind die Arten *Typha angustifolia* L., *Typha latifolia* L. und der Hybrid *Typha x glauca* Godr. heimisch.

Charakteristisch für die bis zu 3 m hohen Pflanzen sind der weibliche Teilblütenstand (Kolben) und ein leichtes, kammerförmiges Durchlüftungsgewebe (Aerenchym). Dieses ermöglicht den Gastransport in der Pflanze. Es liegt eingebettet in ein steifes Festigungsgewebe (Sklerenchym). Rohrkolben kann stofflich (Baustoffe, Fasern) und energetisch verwertet werden und eignet sich zur Reduzierung der Nährstoffbelastung in Gewässern.

| | |
|------------------------------|---|
| Deutscher Name | Rohrkolben |
| Botanischer Name | <i>Typha</i> spp. |
| Ernte | Ein- bis zweimal von Sommer bis Winter |
| Produktivität | Breitblättriger Rohrkolben (<i>T. latifolia</i>): Winter 7,7 bis 11 t TM/ha*a ¹ , Sommer 11,1 bis 20,4 t TM/ha*a ² Schmalblättriger Rohrkolben (<i>T. angustifolia</i>): Sommer 15 t/ha ³ |
| Torfbildung | nein |
| Wasserregime | konstanter Überstau |
| Boden | nährstoffreich, subneutral-basisch |
| Wasserstand | 0 bis 30 cm über Flur (Jahresmittel) |
| Etablierung | Aussaart, Pflanzung, natürl. Ausbreitung nach Wiedervernässung |
| Brennstoffeinsatz/-erprobung | Kanada (Brennstoff, Baustoff), Deutschland (Baustoff), Schweiz |

1,2 Mecklenburg-Vorpommern, eigene Daten aus 5 naturbelassenen Beständen (1 n=29, 2 n=38), 3 Bayern, Anbaukultur [66]

Abb. 2.9 – 2.10

Rohrkolben-Dominanzbestände im Sommer (oben) und im Winter (unten)

Bestandesbegründung und Management

Rohrkolben vermehren sich sowohl über windverbreitete Samen, als auch vegetativ über Rhizome. Die Etablierung kann durch Aussaat, Anpflanzung von Setzlingen oder durch natürliche Sukzession erfolgen. Die Anpflanzung von Setzlingen ist die sicherste, aber auch aufwändigste Methode. Der Erfolg einer Aussaat ist von Temperatur und Wasserstand abhängig [66].

Für eine erfolgreiche Keimung sind Wasserstände in Flur optimal. Nach der Etablierung ermöglichen gleichbleibend hohe Wasserstände und eine hohe Nährstoffverfügbarkeit hohe Erträge und eine reduzierte Ausbreitung von Unkräutern.

Bei jährlicher Winterernte liefern Rohrkolben gleichbleibende Erträge. Überstau nach Mahd wirkt sich im Sommer negativ auf das Pflanzenwachstum aus [66]. Bei Schnitthöhen von 10-20 cm bleiben junge Sprosse erhalten und können frühzeitig im Frühjahr wieder austreiben [67].



2.2 Ernte

Ernteverfahren

Halmgutartige Biomasse aus Paludikultur (Paludi-Biomasse) kann als Hauptprodukt bei der gezielten Ernte von nassen Flächen oder als Koppelprodukt bei der Landschaftspflege bzw. als Ausputz aus der Dachschilfernte gewonnen werden.

Eine Brennstoffnutzung erfordert die Ernte von trockener und fremdstofffreier Biomasse zu einem möglichst späten Zeitpunkt. Bei einer späten Ernte sind die verbrennungskritischen Inhaltstoffe durch Auswaschung sowie durch Rückverlagerung in den Wurzelraum reduziert. Dies begünstigt die Brennstoffeigenschaften [16] (s. Kap. 4).



Erntetechnik

Nasse Standorte verfügen über eine verringerte Tragfähigkeit, was eine Anpassung der Erntetechnik voraussetzt. Die notwendige Reduzierung des Bodendrucks kann durch verringertes Gewicht der Erntemaschinen und/oder durch eine vergrößerte Aufstandsfläche erreicht werden. Hierbei kommen Breit- oder Doppelbereifung, Ballonreifen oder Raupenketten zum Einsatz. Grundsätzlich lässt sich die eingesetzte Technik in vier Gruppen einteilen [17]:

- Kleintechnik (Abb. 2.11)
- Konventionelle, angepasste Grünlandtechnik (Abb. 2.12)
- Ballonreifenbasierte Technik (Abb. 2.13)
- Raupenbasierte Technik (Abb. 2.14-16)

Kleintechnik ist aufgrund ihrer geringen Flächenleistung nur für den kleinflächigen Einsatz, z.B. zur Offenhaltung von Naturschutzgebieten, geeignet, zumal der Abtransport der Biomasse mit hohem Aufwand verbunden ist.

Deutlich schlagkräftigere **angepasste Grünlandtechnik** (z.B. leichter Traktor mit Breitreifen, leichte Ballenpresse mit Tandemachse und Breitreifen) kann zum Einsatz kommen, wenn auf den Flächen der Wasserstand im Sommer unter Flur fällt bzw. im Winter bei gefrorenem Boden. Trotz angepasster Reifen kann bei dieser Technik ein Bodendruck von unter 200 g pro cm² nicht erreicht werden [17].

Abb. 2.11 – 2.12

Kleintraktor mit Doppelreifen und Balkenmäher, Traktor mit Breitreifen und Scheibenmäherwerk bzw. Ballenpresse mit Tandemachse (von oben nach unten)

Radbasierte Spezialtechnik mit Niederdruck-Ballonreifen ist seit Jahrzehnten in der Rohrmahd in Europa etabliert. Diese relativ leichten, drei- bis sechsrädigen Fahrzeuge der nicht mehr produzierenden dänischen Firma Seiga besitzen eine Vorrichtung zum Schneiden und Binden von Dachschilf. Bei hohen Wasserständen können diese allerdings aufschwimmen. Sie sind dann schwer zu manövrieren bzw. können durch Schlupf Schäden an der Grasnarbe verursachen [17].



Bei **raupenbasierter Technik** handelt es sich in der Regel um Einzellösungen ausgehend von umgebauten Pistenraupen aus Skigebieten. Die breiten Ketten führen trotz relativ schwerer Maschinen zu geringem Bodendruck (50-100 g/cm²), können allerdings bei Fehlbedienung oder zu häufigem Überfahren desselben Standortes ebenfalls zu Bodenschädigungen führen [18, 19].



Abb. 2.13 – 2.16

Seiga mit Ballonreifen zur Ernte von Schilfrohr für Dachdeckung, umgebaute Pistenraupe mit breiten Ketten und Schlegelmulcher, umgebaute Pistenraupe mit Anbauhäcksler, Spezialraupe mit Anbauhäcksler und Ladewagen (von oben nach unten)

Erntelogistik

Die Wahl des Ernteverfahrens, das die eingesetzte Technik und die Form der geernteten Biomasse bedingt, hängt von mehreren Faktoren ab. Entscheidend sind dabei [17]:

- **Erntezeitpunkt**
Sommer/Herbst: frisches Mähgut bzw. Heu,
Winter: trockenes Mähgut
- **Wasserstand**
Überstau, Abtrocknung im Sommer, Eis im Winter
- **Entfernung zu Umschlagpunkten**
Transport durch Erntefahrzeug, separates
Transportfahrzeug
- **Zugänglichkeit der Erntefläche**
Anzahl der Zugänge, Anbindung an Infrastruktur
- **Geplante Verwertungsart (stofflich/energetisch)
und Entfernung zum Ort der Verwertung.**

Abhängig von den Gegebenheiten kommt ein ein- oder mehrstufiges Ernteverfahren zum Einsatz, bei dem die Biomasse als Schnitt- oder Häckselgut, als Ballen oder in Bündeln von der Fläche zum Umschlagplatz transportiert wird. Hohe Wasserstände über Flur verhindern ein Ablegen der Biomasse auf der Fläche und erfordern in der Regel einstufige Ernteverfahren. Beispiele für unterschiedliche Verfahren finden sich in Tabelle 2.2.



Abb. 2.17 Überladen von Mähgut für den Straßentransport

Ernte von Biomasse für Festbrennstoffe

Der Zeitpunkt der Ernte wirkt sich maßgeblich auf die Möglichkeiten der weiteren Verwertung aus, da sich die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und der Wassergehalt im Verlauf der Vegetationsperiode ändern (s. Kap. 4). Bei einer Sommerernte mit angewelkter Biomasse (w 30-40 %) ist es ohne zusätzliche Trocknung der Biomasse nicht möglich, eine Pelletierung oder Brikettierung anzuschließen. Für die Gewinnung von lagerfähigen (Heu-)Ballen muss die Biomasse sehr gut abgetrocknet sein ($w < 15$ %). Eine Winterernte in schilfdominierten Beständen liefert bei günstigen Witterungsbedingungen Biomasse mit einem Wassergehalt von 15-20 %, die ebenfalls direkt weiter verarbeitet werden kann.

Tab. 2.2 Verfahren zur Ernte von Biomasse nasser Standorte (nach [17])

| Biomasseform | Verfahren | Biomassequalität |
|---|---|--|
| Einstufige Ernte (ein Arbeitsgang) | | |
| Häckselgut | Ernte mit Raupe und Wurf-Schlegel-Mulcher oder Häcksler, Transport in aufgesatteltem Bunker oder gezogenem Anhänger Mahd und direkte Aufnahme der Biomasse mit einem angehängten Ladewagen | Sommer (feucht) Winter (trocken) |
| Ballen | Vollernter mit aufgesattelter Ballenpresse Transport auf Ladefläche oder gezogenem Anhänger | Winter (trocken) |
| Rohbunde ¹ | Schnitt von ganzen Halmen und Binden zu Rohbunden Transport auf Erntemaschine (Seiga) oder Überladen | Winter (trocken) |
| Mehrstufige Ernte (zwei und mehr Arbeitsgänge) | | |
| Häckselgut | 1. Mahd und Ablage im Schwad 2. Häckseln und Transport im Bunker oder Anhänger | Sommer (angewelkt) Winter (trocken) |
| Halme | 1. Mahd und Ablage im Schwad 2. Aufnahme und Transport durch Ladewagen | Sommer (angewelkt) Winter (trocken) |
| Ballen | 1. Mahd und Ablage im Schwad 2. ggf. Wenden (ein- oder mehrmals) 3. ggf. Schwaden 4. Pressen von Rundballen mit angehängter Ballenpresse (angepasste Technik) 5. Abtransport der Ballen einzeln (Ballenspieß/Frontlader) oder Ballenanhänger mit Ladekran (Raupentechnik) | Sommer (trocken) Winter (trocken) |

¹ Bei der Dachschilfernte werden die Rohbunde später ausgeputzt, um Qualitätsschilf zu erhalten. Die Ausputzmasse (ca. 15-20 %, z.T. bis 50 % der Erntemenge) liefert den Rohstoff für die weitere energetische Verwertung

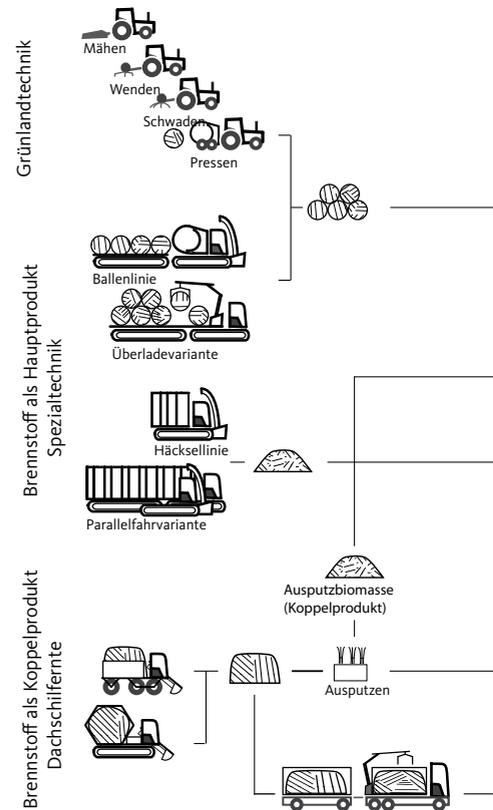
2.3 Transport und Lagerung

Der Transport der Biomasse vom Feldrand zum Betriebsgelände bzw. dem Ort der Weiterverarbeitung kann mit herkömmlicher landwirtschaftlicher Technik erfolgen, das heißt mit Gespannen aus Traktor und Anhängern bzw. Ballentransportwagen. Lose Biomasse lässt sich mit LKW, vornehmlich Sattelzügen (z.B. zweiachsige Sattelzugmaschine mit dreiaxsigem Heckkipper als Auflieger) transportieren, da diese Transporttechnik über eine größere Ladekapazität von bis zu 100 m³ bzw. 24 t verfügt. Diese Technik ist in der Regel allerdings nicht betriebsintern verfügbar, erfordert die Beauftragung von Lohnunternehmen und ist insbesondere bei langen Transportwegen interessant.

Die Lagerung der Biomasse kann im Freien oder im Gebäude erfolgen. Im Freien wird das Häckselgut zu einem Haufen aufgeschüttet bzw. Ballen werden in Mieten gestapelt. Vorteilhaft sind befestigte Untergründe, um den Eintrag von Fremdmaterial beim Auslagern zu minimieren. Zum Schutz vor Niederschlägen sollte das Material mit Folie oder Vlies abgedeckt werden. Die Lagerung im Freien ist nur für kurze Zeiträume geeignet und setzt voraus, dass das Material schnell verarbeitet bzw. verwertet wird. Da die Biomassernte nur kurzzeitig, die Verwertung aber über einen deutlich längeren Zeitraum stattfindet und Qualitätseinbußen der Biomasse vermieden werden sollten, ist eine Gebäude-lagerung vorzuziehen. Diese kann in extra errichteten überdachten Hallen oder, falls vorhanden, in Altgebäuden erfolgen.

Zu beachten ist, dass bei Halmgut generell die Gefahr der Selbstentzündung besteht und dass insbesondere bei Pellets eine Befeuchtung verhindert werden muss, da hier noch die Gefahr der Gasentwicklung hinzukommt.

Angaben zu den Raumgewichten verschiedener Aufbereitungsformen sind in Tabelle 3.1 dargestellt.



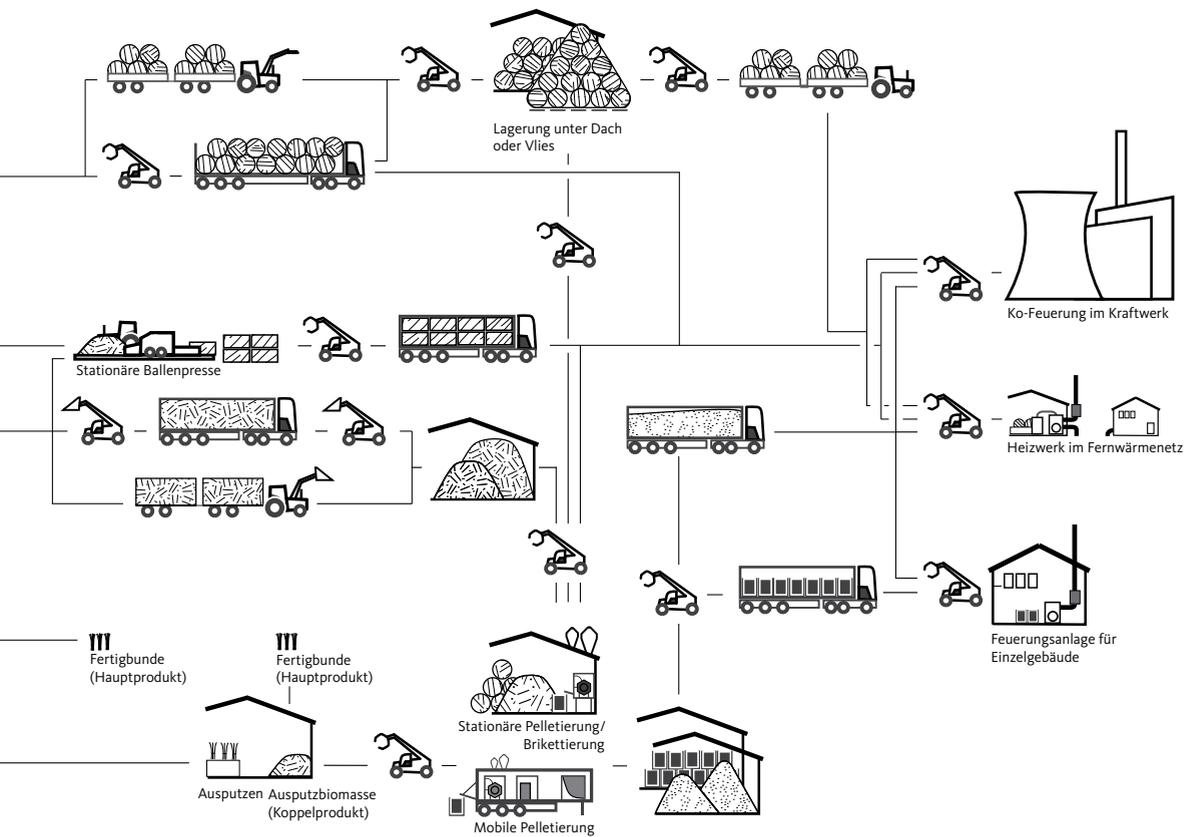


Abb. 2.18 Bereitstellungsketten für Festbrennstoffe aus halmgutartiger Biomasse aus Paludikultur (nach [20])

3 Aufbereitung: Häckselgut, Ballen, Briketts und Pellets

Grundsätzlich gilt, je homogener der Brennstoff, desto besser kann die Feuerungsanlage an den Brennstoff angepasst werden und desto höher sind der erreichbare Wirkungsgrad und die Zuverlässigkeit der technischen Abläufe.

Die Homogenität betrifft sämtliche Brennstoffeigenschaften, wie chemische Inhaltstoffe, Wassergehalt, Stückgröße. Die verschiedenen Aufbereitungsformen von halmgutartiger Biomasse (Abb. 3.1 - 3.12) unterscheiden sich im Hinblick auf Homogenität und Dichte (Tab. 3.1).

Bunde sind als Kompaktierungsform in der Dachschielfernte etabliert. Sie weisen aufgrund der Parallellage der Halme eine relativ hohe Dichte auf und erreichen durch Lufttrocknung (unter Dach) einen homogenen Wassergehalt unter 15 %.

Die Logistikkette von Rundballen ist bekannt und erprobt. Da Quaderballenpressen deutlich höhere Gewichte als Rundballenpressen aufweisen, kommen aufgrund der eingeschränkten Tragfähigkeit von nassen Moorböden nur Rundballenpressen zum Einsatz. Am Flächenrand ist auch eine Verpressung zu Quaderballen denkbar. Die Homogenität innerhalb und zwischen einzelnen Ballen kann stark variieren. Entsprechend sind sie als Brennstoff eher für mittlere und große Feuerungsanlagen (s. Kap. 5) geeignet.

Häckselgutketten sind bei Gras, Miscanthus und Mais etabliert und bei Niedermoorpflanzen wie Schilf und Seggen erprobt. Halmgut lässt sich durch Mähmulcher und Feldhäcksler auf der Fläche oder nach der Ernte durch Hammermühlen zu Häckseln verarbeiten. Je nach Länge der Häcksel können sehr geringe bis hohe Lagerungsdichten erreicht werden. Herausforderungen hierbei sind Staubemissionen, Biomasseverluste und trockene Lagerung. Häckselgut kann direkt verfeuert oder zu Briketts und Pellets weiterverarbeitet werden.

Briketts und Pellets sind Presslinge, die hinsichtlich ihres Durchmessers unterschieden werden. Bei einem Durchmesser unter 20 mm handelt es sich um Pellets, darüber um Briketts. Vorteile von Pellets und Briketts sind ihre höhere Dichte und Homogenität, die eine bessere Anpassung der Feuerungstechnik sowie eine Vereinfachung der Zuführung erlauben. Der Handel mit kompaktierten Festbrennstoffen ist einfacher, Qualitätsstandards sind festgelegt (s. Kap. 8.2) und Qualitätsschwankungen sind wesentlich geringer als bei Rundballen. Der Transport und das Handling sind mit deutlich geringerem Aufwand verbunden und ein hoher Automatisierungsgrad kann erreicht werden (vergl. Kap. 2.4). Pellets können nicht nur energetisch, sondern auch als Einstreu genutzt werden, dann ggf. in Kaskadennutzung, d.h. mit anschließender Verwertung in einer Biogasanlage.

Abb. 3.1 – 3.12

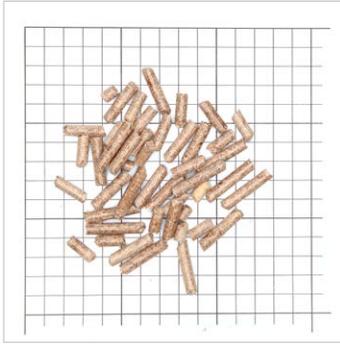
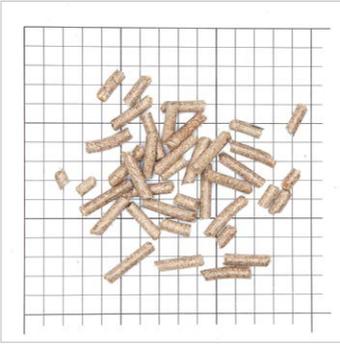
Erste Zeile: Dachschielf-Rohbund, Bündel von Fertigbunden, Rundballen aus Schilfausputz

Zweite Zeile: Schilfhäcksel Feldhäcksler "Fortschritt" (5 g), Schilfhäcksel Feldhäcksler "Claas" (5 g), Schilfhäcksel Strohmühle 10 mm (5 g)

Dritte Zeile: Schilfbrikett (d 70 mm, 190 g), Schilfbrikett (d 5 cm, 95 g), Schilfpellets (d 8 mm, 25 g)

Vierte Zeile: Schilfpellets (d 6 mm, 25 g), Schilfpellets 50 % Kiefernholzanteil (d 6 mm, 25 g), Schilfpellets 80 % Kiefernholzanteil (d 6 mm, 25 g)

(von links nach rechts)



Voraussetzung für die Kompaktierung ist ein Wassergehalt deutlich unter 20 %. Um dies zu erreichen, muss ggf. eine energieintensive Trocknung erfolgen.

Briketts werden durch Verdichtung mit hydraulischen oder mechanischen Pressen, meist mit einem Durchmesser zwischen 50 und 70 mm, im Stangenpressverfahren hergestellt. Pressen mit geringem Durchsatz (ca. 100 kg/h) sind im Anschaffungspreis günstig. Im Vergleich zur Pelletierung ist der Kompaktierungsprozess wenig anspruchsvoll.

Die Herstellung von Pellets ist mit hohem technischen, energetischen und finanziellen Aufwand verbunden (s. Kap. 3.1). Bei der Pelletierung von Halmgut ist zudem der Anlagenverschleiß höher und der Durchsatz gerin-

ger als bei Holz. Zum Einsatz kommen stationäre und mobile Pelletieranlagen, die eine Durchsatzleistung von bis zu 2.000 bzw. 1.000 kg pro h haben. Der Pelletdurchmesser beträgt meist 6 oder 8 mm.

Eine Neuheit im Entwicklungsstadium stellt der Pellet-Vollernter Premos 5000 von Krone zur Produktion von Halmgutpresslingen mit 16 mm Durchmesser und einem Durchsatz von bis zu 5.000 kg pro h dar. Dieser ist auch stationär, und damit potentiell zur Aufbereitung von Paludi-Biomasse einsetzbar.

Tab. 3.1 Übersicht über die Dichte verschiedener Aufbereitungsformen von Paludi-Biomasse (Schilf, Seggen) und Grüngut

| Aufbereitung | Einheit | Schilf (Winter) ¹ | Seggen (Sommer) ¹ | Grüngut ² (w 80%) |
|--------------------------|----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Lose | kg TM/m ³ | <20 - 40 (20) | - | 66 |
| Angewelkt | kg TM/m ³ | - | - | 53 - 73 |
| Häckselgut | kg TM/m ³ | <40 - 120 (45) | - | 80 |
| Bunde | kg TM/m ³ | 60 - 120 (80) | - | - |
| | kg TM/St. | 2,4 - 5 (3,2) | - | - |
| Rundballen (d 1,25 m) | kg TM/m ³ | 110 - 130 | 114 - 127 | - |
| | kg TM/St. | 175 - 225 (190) | 175 - 195 (185) | - |
| Briketts | kg TM/m ³ | 395 - 485 (450) ³ | - | - |
| Pellets | kg TM/m ³ | 600 - 700 (625) | 650 - 750 (675) | - |

¹ eigene Daten, ² [21-23] ³ [24], Berechnungsgrundlage für die Szenarien in Klammern

3.1 Mobile Pelletierung

Im Rahmen des Paludi-Pellets-Projektes wurden in einem Praxisversuch 20 t Pellets in der mobilen Anlage MBA 1000 des Herstellers PCM Green Energy durch die Firma RegioPell mobil GmbH produziert.

Die in einem ISO-Container verbaute Anlage verfügt über einen Futtermischer der per Teleskoplader sowohl Häckselgut als auch Rund- und Quaderballen aufnehmen kann. Nach der Auflösung im Futtermischer wird die Biomasse in zwei Stroh­müh­len auf etwa 5 mm gemahlen und anschließend im Zwischenspeicher/Konditionierer befeuchtet. Von dort gelangt das Material in die Presse und wird durch die Koller kontinuierlich durch die Ringmatrize gepresst. Dabei bewirkt die starke Erhitzung eine Verbindung des Materials. Nach der Pelletierung erfolgt eine Kühlung der Presslinge nach dem Gegenstromprinzip während der Austragung aus der Anlage in einen Speicher, Anhänger oder, wie im Praxisversuch, in einen BigBag (Abb. 3.14 - 3.22).

Im Versuch wurden Schilf-, Seggen- und Rohrglanzgras-Rundballen verarbeitet. Das Material wurde mit einer Matrize mit 85 mm Kanallänge und 8 mm Durchmesser pelletiert.

Dabei konnten die in Abbildung 3.13 dargestellten Durchsätze erreicht werden. Es ist davon auszugehen, dass durch weitere Erfahrung und Anpassung der Durchsatz dauerhaft über 1.000 kg TM pro h gehalten werden kann. Eine Durchsatzsteigerung durch eine kürzere Matrize (Kanallänge 65 mm) konnte im Nachversuch bestätigt werden.

Schilf-Biomasse bedarf einer langen und ausgiebigen Anfeuchtung nach dem Zermahlen, um Pellets hoher Qualität mit hohem Durchsatz produzieren zu können.

Kenndaten

| | |
|--------------------|------------------------------|
| Typ | PCM Green Energy MBA 1000 |
| Pelletierpresse | Münch RMP 520/80cv, 150kW |
| Matrize | 8 mm, 85/65 mm |
| Durchsatzleistung | 1.000 kg/h |
| Generatorleistung | 200 kW |
| Arbeitsenergie | Heizöl / Strom Ø 40 l/h |
| Arbeitskraftbedarf | 2 |
| Investitionskosten | 435.000 € |

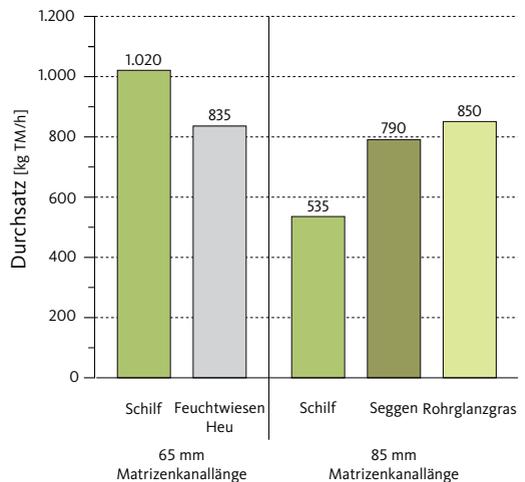


Abb. 3.13 Durchsatz der mobilen Pelletieranlage in kg TM/h. Vergleich verschiedener Biomasse und Matrizenkanallängen

Für einen problemlosen Betrieb ist trockene ($w < 15\%$), fremdstofffreie Biomasse mit konstanter, hoher Qualität erforderlich. Ein schwankender und zu hoher Wassergehalt führt zu Pellets mit geringer Festigkeit, da diese durch den austretenden Wasserdampf geschädigt werden.

Fremdstoffe führen zu Betriebsstörungen und erhöhtem Verschleiß, bei Biomasse aus Paludikultur treten vor allem Fremdstoffe wie Schnüre (bei Ausputzschild), eingeschwemmtes Holz und Müll auf. Im Versuch zeigte sich die Anlage robust gegenüber Fremdstoffen wie Holz, Metallteilen und Bindschnüren.





Abb. 3.14 – 3.22 Mobile Pelletierung von Biomasse aus Paludikultur

3.2 Pelletierung im Technikum

Im Technikum des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ) wurden Mono- und Mischpellets von Biomasse aus Paludikultur (Schilf, Seggen und Rohrglanzgras) mit einem Anteil von 100 % bzw. von 50 % und 20 % in Mischung mit Kiefernholz hergestellt.

Die Produktion von Pellets der untersuchten Biomasse ist grundsätzlich mit anderen Halmgütern, z.B. Miscanthus, vergleichbar. Gegenüber Holz, welches in der Regel als Span oder Hackschnitzel bereitgestellt wird, ist bei Halmgütern ein erhöhter verfahrenstechnischer

Aufwand nötig. So muss das Material in der Regel zweistufig zerkleinert werden, wenn es z.B. in Ballenform mit langfaserigen Bestandteilen bereitgestellt wird.

Die stationäre Pelletierung erfolgte mit Einstellungen, die auch bei Stroh und Miscanthus genutzt werden (Tab. 3.2). Die erforderliche Schüttdichte konnte in allen Pelletchargen erfüllt werden, die normativen Anforderungen an die Abriebfestigkeit wurden jedoch nicht erreicht (s. Tab. 4.2).

Tab. 3.2 Rohstoff- und Prozessparameter der Pelletierungsversuche

| | Einheit | Mobil 150 kW | Technikum 15 kW |
|--|---------|--------------------------------|-------------------------------|
| Rohstoffaufbereitung | | | |
| Vorzerkleinerung | mm | Siebweite 10 mm Hammermühle | Siebweite 40 mm Strohmühle |
| Zerkleinerung | mm | Siebweite 5 mm Hammermühle | Siebweite 2 mm Hammermühle |
| Ausgangswassergehalt | w | 10 - 18 % | 16,5 % |
| Prozessparameter der Ringmatrizenpresse | | | |
| Matrizengeometrie (d^*L) | mm | 8 x 85 | 6 x 40 |
| Drehzahl der Matrize | U/min | 182,4 bei 50 Hz | 185 |
| Umfangsgeschwindigkeit Matrize | m/s | 4,96 bei 50 Hz | 2,4 |
| Abstand Koller/Matrize | mm | 0,25 | 0,25 |
| Durchsatzleistung | kg/h | ca. 1.000 | 30 - 80 |

4 Brennstoffeigenschaften von Paludi-Biomasse

Die Brennstoffqualität von Paludi-Biomasse wird durch chemische, brennstofftechnische und physikalisch-mechanische Eigenschaften (s. Tab. 4.1) bestimmt, welche je nach Pflanzenart, Erntezeitpunkt und Brennstoffaufbereitung variieren. Stickstoff, Schwefel und Chlor sind die wesentlichen kritischen Inhaltsstoffe, die an Korrosionsprozessen und umweltschädlichen Emissionen beteiligt sind. Hohe Gehalte an Stickstoff und Schwefel in der Biomasse führen vermehrt zu NO_x - bzw. SO_2 -Emissionen. Hohe Chlorkonzentrationen sind einerseits für Korrosionsschäden an den Feuerungsanlagen verantwortlich, können aber ebenso auch zur Bildung schädlicher Dioxine und Furane sowie HCl-Emissionen führen (Tab. 5.1). Laut Obernberger [25] sind daher geringe Ge-

halte, für Stickstoff $< 0,6\%$ TM, Schwefel $< 0,2\%$ TM und Chlor $< 0,1\%$ TM, in der Biomasse anzustreben.

Der Wassergehalt der Biomasse bestimmt deren Lagerungsfähigkeit. Um biologische Abbauprozesse und die Gefahr der Selbstentzündung zu reduzieren, ist bei einem Wassergehalt über 20 % eine Trocknung auf der Fläche oder in Trocknungsanlagen erforderlich [26]. Auch der Heizwert der Biomasse nimmt mit steigendem Wassergehalt (w) ab. Im Sommer liegt der Wassergehalt halmgutartiger Biomasse deutlich über 50 %, im Winter sinkt er bei Schilf bei günstiger Witterung unter 20 %.

Tab. 4.1 Qualitätsrelevante Eigenschaften von biogenen Festbrennstoffen und ihre Auswirkungen (geändert nach [13])

| Eigenschaften | Auswirkungen |
|---|--|
| Chemische Eigenschaften | |
| Elementarzusammensetzung (C, H, O, N, S, Cl, K, Mg, Ca,...) | Heiz- und Brennwert, unvollständige Verbrennung, Verbrennungsqualität, Emissionen, Staubentwicklung, Ascheerweichungsverhalten, Luftbedarf |
| Brennstofftechnische Eigenschaften | |
| Heizwert | Energiegehalt des Brennstoffs, Anlagenauslegung |
| Wassergehalt | Heizwert, Lagerfähigkeit, Verbrennungstemperatur |
| Aschegehalt | Staubemissionen, Rückstandsbildung und -verwertung |
| Ascheschmelzverhalten | Schlackebildung, Betriebssicherheit und -kontinuität, Wartungsbedarf |
| Physikalisch-mechanische Eigenschaften | |
| Schüttdichte | Transport- und Lageraufwendungen |
| Feinanteil | Lagerfähigkeit, Staubentwicklung |
| Abriebfestigkeit | Entmischung, Verluste, Staubentwicklung |

Die untersuchten Rohrglanzgrasbestände wiesen bei einer Ernte im Dezember Wassergehalte von 40 bis 50 % auf, d.h. eine anschließende Trocknung ist erforderlich. Die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und die Beschaffenheit der Biomasse verändern sich im Laufe des Jahres mit dem Wachstumszyklus der Pflanzen (Abb. 4.1 & 4.2). Einige für die Verbrennung kritische Inhaltsstoffe sind Pflanzennährstoffe, deren Gehalt in der lebenden Pflanze am höchsten ist. Für halmgutartige Biomasse ist deshalb eine späte Ernte im Herbst oder Winter vorzuziehen. Die Nährstoffgehalte in der oberirdischen Biomasse werden durch verschiedene Prozesse verringert. Niederschläge waschen aus der Biomasse leicht lösliche chemische Elemente aus. Blätter fallen im Zuge des Absterbens ab.



Bestimmte Pflanzenarten wie zum Beispiel Schilf verlieren am Ende der Vegetationsperiode Nährstoffe aus den oberirdischen in die unterirdischen Pflanzenorgane.

Bei Seggen verringert sich der Chlorgehalt zwischen August und Februar um 95 %, da Chlor aus abgestorbener Biomasse leicht ausgewaschen wird (Abb. 4.3). Die Gehalte an Schwefel und Stickstoff in der Biomasse sinken in diesem Zeitraum um 24 % bzw. 11 %. Bei Rohrglanzgras tritt diese Reduktion ebenfalls auf. Schilf erreicht noch geringere Anteile, so dass kritische Inhaltsstoffe im Winter unter die oben genannten Grenzwerte von Obernberger [25] sinken. Während die Brennstoffeigenschaften durch späte Ernte optimiert werden können, reduziert sich jedoch der Biomasseertrag. Bei dem im Rahmen des Paludi-Pellets-Projektes untersuchten Seggenbestand verringerte sich dieser von August bis Februar um ca. 33 % (Abb. 4.3). Bei den Schilf- und Rohrglanzgrasbeständen traten ebenfalls Verluste auf. Schilfbestände sind lange stabil und erbringen auch im Winter noch einen hohen Ertrag (s. Abb. 2.2). Die Biomasseverluste von Oktober bis Februar betragen zwischen 24 und 38 %. Bei Rohrglanzgras traten von Oktober bis Dezember bereits Biomasseverluste in Höhe von 23 % auf. Rohrglanzgras sollte bis Dezember geerntet werden, da die Bestände im weiteren Verlauf oft zusammenbrechen und dann schlechter zu ernten sind.

Auch bei Sommermahd können die Verbrennungseigenschaften durch Auswaschung und Trocknung optimiert werden.

Abb. 4.1 – 4.2

Vegetationsentwicklung: Seggenbestand im Sommer (oben) und im Winter (unten)

Während der mehrtägigen Bodentrocknung (zwischen Mähen und Pressen) reduzierten sich bei dem untersuchten Seggenbestand der Chlorgehalt um 50 % und der Wassergehalt um 30 % (Abb. 4.4). Der Stickstoff- und Schwefelgehalt verringerte sich nur minimal. Das Trocknen auf der Fläche ist möglich, wenn der Wasserstand im Sommer unter Flur sinkt.

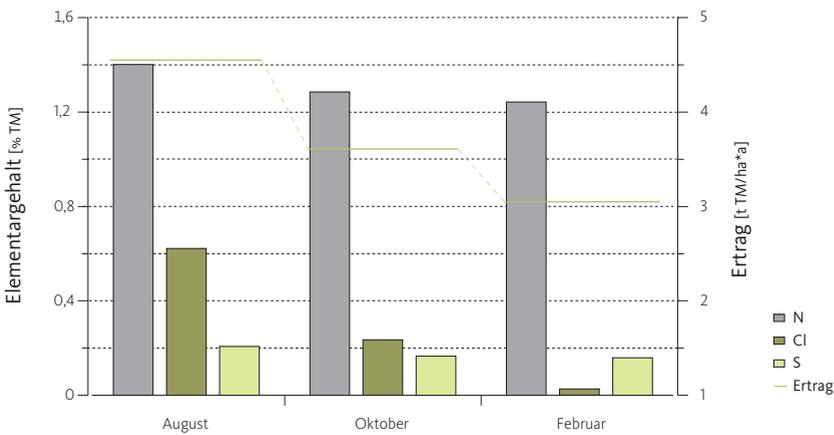


Abb. 4.3 Verbrennungskritische Inhaltsstoffe (Stickstoff, Chlor, Schwefel in % TM) und Erträge von Seggen bei später Ernte (t TM/ha*a)

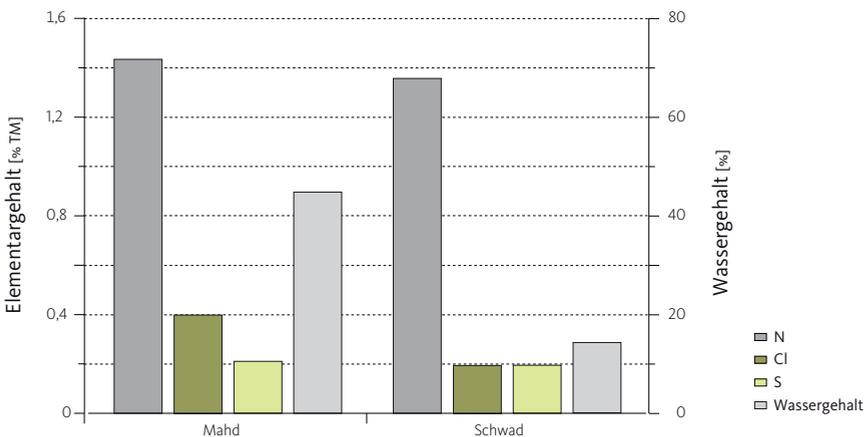


Abb. 4.4 Reduzierung des Wassergehaltes und verbrennungskritischer Inhaltstoffe von Seggen nach mehrtägiger Bodentrocknung

4.1 Pellets-Qualität nach DIN EN ISO 17225-6

Die im Paludi-Pellets-Projekt hergestellten Mono- und Mischpellets (s. Kap. 3) wurden nach den Anforderungen der Norm DIN EN ISO 17225-6 [27] untersucht, die für den Handel mit nicht-holzartigen Pellets entwickelt wurde (Kap. 8.2). Die Pellets erfüllten bis auf einzelne Parameter sämtliche Anforderungen der DIN-Norm (Tab. 4.2).

Die physikalisch-mechanischen Brennstoffeigenschaften (Schüttdichte, Abriebverhalten, Feinanteil) werden durch die Ernte- und Aufbereitungstechnik beeinflusst und bestimmen u.a. die Lager- und Transportfähigkeit des Brennstoffs. Die erforderliche Abriebfestigkeit wurde von den Pellets zum Teil nicht erreicht. Es ist jedoch zu erwarten, dass durch Anpassung der Prozessparameter an den Rohstoff oder durch Zuschlagstoffe die Vorgaben erreicht werden können.

Hinsichtlich der Elementarzusammensetzung lag bei den mit der mobilen Pelletieranlage produzierten Pellets aus der Sommerernte (Seggen und Biomasse eines kräuterreichen Rohrglanzgrasbestandes) der Chlorgehalt und bei den Rohrglanzgraspellets auch der Aschegehalt deutlich über den Vorgaben der Norm (Tab. 4.2). Die produzierten Pellets erreichten hinsichtlich der relevanten Parameter der DIN EN ISO 17225-6 [27] gute bis sehr gute Ergebnisse. In der Untersuchung zeichnete sich ab, dass Schilf (aus der Winterernte) weniger kritische Inhaltsstoffe enthält aber schwieriger zu pelletieren ist, und daher noch eine Optimierung des Pelletierprozesses (z.B. Matrizengeometrie, Befeuchtung) erforderlich ist.

Sommerbiomasse ließ sich besser pelletieren, konnte aber hinsichtlich kritischer Inhaltsstoffe nicht alle Anforderungen erfüllen. Neben der Zumischung von Holz könnte auch die Mischung von Sommer- und Winterbiomasse (Schilf-Seggenpellets) einen Lösungsansatz darstellen, um eine konstante und hohe Pelletqualität zu erzielen.

| Parameter | Einheit | ISO 17225-6 Klasse A |
|-----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Pelletierung | | |
| Erntezeitraum | | |
| Holzanteil | % | |
| Durchmesser | mm | 6 bis 25 |
| Wassergehalt | Ma.-% | ≤ 12 |
| Aschegehalt | Ma.-% _{T5} | ≤ 6 |
| Mech. Festigkeit | Ma.-% | ≥ 97,5 |
| Heizwert | MJ/kg _{T5} | ≥ 14,5 |
| Schüttdichte | kg/m ³ | ≥ 600 |
| Stickstoff | Ma.-% _{T5} | ≤ 1,5 |
| Schwefel | Ma.-% _{T5} | ≤ 0,2 |
| Chlor | Ma.-% _{T5} | ≤ 0,1 |
| Asche-Schmelzverhalten (DT) | °C | Angabe |

Tab. 4.2 Ausgewählte Pelleteigenschaften aus Paludi-Biomasse und Mischungen mit Holz im Vergleich zu den Anforderungen der DIN EN ISO 17225-6 Klasse A [27] (Ausgangsmaterial s. Kap. 3, Grenzwerte s. Kap. 8.2)

| Schilf ¹ | | | | Seggen | | | | Rohrglanzgras | | | | Kiefer | |
|---------------------|-------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|------------------|----------------|----------------|-------|--------|-------|
| M ² | | T | | M ² | | T | | M | T | | T | | |
| W | 0 | 50 | 80 | S | 0 | 50 | 80 | S | 0 ³ | 0 ³ | 50 | 80 | - |
| 0 | 0 | 50 | 80 | 0 | 0 | 50 | 80 | 0 ³ | 0 ³ | 50 | 80 | | 100 |
| 8 | | 6 | | 8 | | 6 | | 8 | | 6 | | | 6 |
| 8 | 10 | 10 | 9 | 8 | 13 | 13 | 11 | 8 | 12 | 12 | 12 | | 12 |
| 4,3 | 2,1 | 1,3 | 0,8 | 5,3 | 5,0 | 2,7 | 1,4 | 6,3 ³ | 2,8 | 1,7 | 1,0 | | 0,5 |
| 97,1 | 93,5 | 96,8 | 95,6 | 98,7 | 99,1 | 98,8 | 98,4 | 98,7 | 91,7 | 98,0 | 98,3 | | 97,5 |
| 17,7 | 632 | 672 | 704 | 17,6 | 17,9 | 18,3 | 18,9 | 17,4 | 18,8 | 18,9 | 19,0 | | 18,7 |
| 604 | 632 | 672 | 704 | 683 | 671 | 650 | 666 | 733 | 634 | 676 | 679 | | 634 |
| 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 1,0 | 1,0 | 0,8 | 0,5 | 0,9 | 1,0 | 0,8 | 0,4 | | 0,3 |
| 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,05 | | 0,01 |
| 0,08 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | 0,8 | 0,1 | 0,1 | 0,03 | | 0,001 |
| 1.410 | 1.240 | 1.180 | 1.150 | 1.140 | 1.130 | 1.130 | 1.120 | 1.220 | 1.150 | 1.170 | 1.150 | | 1.420 |

¹ Ausputzbiomasse, ² Pelletchargen für Verbrennungsversuche (s. Kap. 5.1), ³ Anforderungen für Rohrglanzgras s. Kap. 8.2

Pelletierung: M = Mobil, T = Technikum, Erntezeitraum: S = Sommer, H = Herbst, W=Winter

Asche-Schmelzverhalten: DT = deformation temperature

orange = Grenzwertüberschreitung

5 Feuerungstechnik und Verbrennungsversuche

Für die Verbrennung von Biomasse und Pellets aus Paludikultur werden Feuerungsanlagen benötigt, die an halmgutartige Brennstoffe angepasst sind. Das sind zum einen Feuerungsanlagen für nicht-holzartige Brennstoffe (z.B. Energiekörner, Miscanthus, Strohpellets und Mischpellets) und zum anderen Anlagen für Holzhackschnitzel, die sich auch für den Einsatz nicht-holzartiger Brennstoffe bewährt haben [28]. Anlagen für Holzpellets sind i.d.R. nicht geeignet.

Die Anpassungen an halmgutartige Brennstoffe umfassen bewegliche oder wassergekühlte Roste, korrosionsgeschützte Feuerungsräume und Wärmetauscher, eine angepasste Verbrennungsführung mit einer Luftstufung in Primär- und Sekundärluft, eine automatische Entaschung und Filteranlagen zur Schadstoffabscheidung aus dem Rauchgas.

Der wirtschaftliche Einsatzbereich dieser spezialisierten Feuerungstechnik ist auf Anwendungen mit hohem, über das Jahr verteiltem Wärmebedarf, z.B. bei der Ferkelaufzucht oder bei der Abdeckung der Grundlast in Fernwärmenetzen (s. Kap. 9) beschränkt (vergl. Kap. 6).

5.1 Verbrennungsversuche

Im Paludi-Pellets-Projekt wurden Schilf- und Seggenpellets aus der mobilen Pelletierung (s. Kap. 3.1) in zwei ausgewählten Kleinf Feuerungsanlagen ($<100 \text{ kW}_{\text{NWL}}$) und in zwei mittleren Feuerungsanlagen ($>100 \text{ kW}_{\text{NWL}}$) getestet. Die brennstoffspezifischen Eigenschaften der eingesetzten Pellets entsprechen den in Tabelle 4.2 aufgeführten Werten.

Während der Verbrennungstests wurden das Abbrandverhalten, die Anlagenführung und die Verschlackungsneigung der Feuerraumasche erfasst sowie die Emissionen im Rauchgas gemessen.



Abb. 5.1 Seggenpellets aus der mobilen Pelletierung für Verbrennungstests (Schilfpellets s. Abb. 3.9)

Tab. 5.1 Emissionsarten, Ursprung und Umweltauswirkung

| Emission | | Ursprung/Bedeutung | Umweltauswirkung |
|-----------------------|-----------------|---|-------------------------------------|
| Stickoxide | NO _x | Oxidation des Stickstoffs im Brennstoff und in der Verbrennungsluft | Atemgift, saurer Regen, Smogbildung |
| Kohlenmonoxid | CO | Unvollständige Verbrennung, Proxy für Verbrennungsqualität | Atemgift |
| Schwefeldioxid | SO ₂ | Oxidation des Schwefels im Brennstoff | Atemgift, saurer Regen, Korrosion |
| (Fein-)Staub/Aerosole | PM | Aschepartikel, durch Aerosolbildner K, S, Cl, Na, Zn, Si und P verursacht | Atemgift |
| Chlorwasserstoff | HCl | Chlor im Brennstoff, vermehrte Bildung bei Cl-reicher Biomasse | Atemgift, Korrosion |
| Dioxine, Furane | PCDD/F | Chlor im Brennstoff, Menge anlagenabhängig, an (Fein-)Staub gebunden | Atemgift |

Kleinf Feuerungsanlagen

Die Testverbrennungen erfolgten im Technikum des DBFZ in einer für Holzhackschnitzel und Holzpellets zugelassenen 49 kW_{NWL} Feuerungsanlage der Firma Ökotherm (Anlage A) und einer marktverfügbaren 30 kW_{NWL} Feuerungsanlage für Getreide- und Holzpellets (Anlage B, Hersteller anonymisiert). Beide wurden ohne einen Feinstaubabscheider betrieben. Anlage A verfügt über eine wassergekühlte Brennmulde, eine unabhängig regelbare Primär- und Sekundärluftzufuhr und einen automatischen Ascheschieber/-austag. Anlage B ist mit einem doppelmanteligen Edelstahl-Reaktionsrohr, einem aufgestellten Edelstahl-Rohrbündelwärmeüberträger mit automatischem Reinigungssystem, einem automatischen Vorschubrost und einer Luftstufung in Primär- und Sekundärluft an anspruchsvolle Brennstoffe angepasst.

Die Verbrennungsversuche in beiden Anlagen verliefen störungsfrei. Im Versuch konnten die Schilfpellets in beiden Anlagen die Anforderungen der 1. BImSchV [29] und der TA Luft [30] bezüglich CO und NO_x erfüllen (Abb. 5.2). Die SO₂-Emissionen waren aufgrund des höheren Schwefelgehaltes im Brennstoff höher als bei Holz, die Bestimmungen der TA Luft wurden jedoch eingehalten. Nur im Falle der HCl-Emissionen wurde der Grenzwert der TA Luft überschritten. Dies kann z.B. durch Zuschlagsstoffe optimiert werden. In Anlage A konnten auch die Grenzwerte für Staub ohne zusätzliche Filterung eingehalten werden. Die Emissionen lagen auf einem vergleichbaren Niveau wie bei Holzpellets. Der Gehalt an organischen Kohlenwasserstoffen lag unterhalb der Nachweisgrenze.

Im Vergleich zu Miscanthuspellets waren die CO-, HCl- und Staubemissionen bei Schilfpellets deutlich geringer. Die gute Verbrennungseignung von Schilf ist auf die Ernte im Winter und die dadurch weitaus geringere Konzentrationen an kritischen Inhaltsstoffen zurückzuführen (s. Kap. 4).

Bei den Seggenpellets lagen die Emissionen deutlich über denen von Schilfpellets. Dies ist auf die Sommerernte der Biomasse und die damit einhergehenden Brennstoffeigenschaften zurückzuführen. Hier konnten die CO-, nicht aber die NO_x-Grenzwerte eingehalten werden. Dies ist jedoch durch Optimierung der Verbrennungsführung erreichbar. Der Gehalt an organischen Kohlenwasserstoffen lag auch bei den Seggenpellets unterhalb der Nachweisgrenze.

Die SO₂-Emissionen lagen in beiden Feuerungsanlagen unterhalb des Grenzwertes der TA Luft. Der HCl-Grenzwert der TA Luft wurde bei den Seggenpellets deutlich überschritten. Auch die Staubgrenzwerte konnten nicht eingehalten werden. Die Emissionen können durch eine spätere Ernte (s. Kap. 4) und durch Zuschlagstoffe verringert werden.

Die Versuche haben gezeigt, dass in beiden Anlagen die für den Leistungsbereich relevanten Bestimmungen der 1. BImSchV mit Schilfpellets eingehalten werden können, in Anlage B und bei Seggenpellets sind hierfür eine Staubabscheidetechnik und eine weitere Brennstoffoptimierung (spätere Ernte, Zuschlagstoffe, Mischpellets) erforderlich. In Abbildung 5.2 und 5.3 sind die Mittelwerte der gemessenen Emissionen und die Grenzwerte der 1. BImSchV bzw. der TA Luft dargestellt.

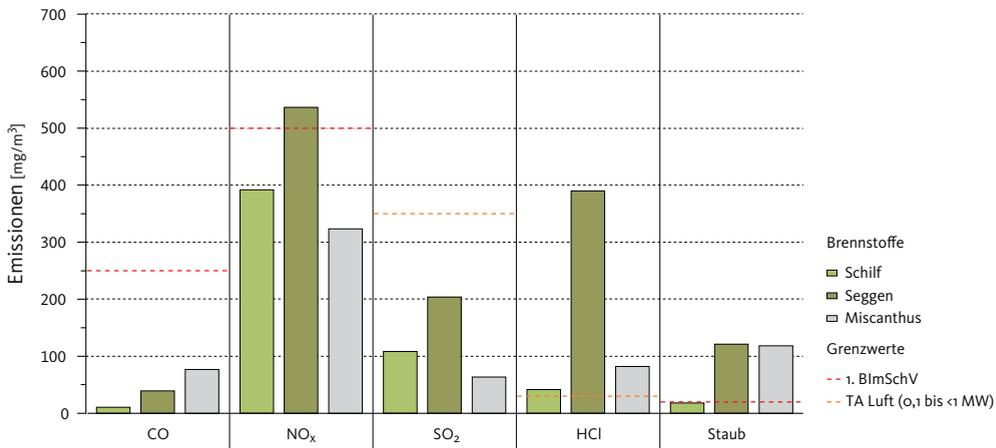


Abb. 5.2 Emissionswerte aus Verbrennungsversuchen mit Schilf- und Seggenpellets für Anlage A (Ökotherm) im Vergleich zu Miscanthuspellets [31], Grenzwerte nach 1. BImSchV und TA Luft [29, 30]

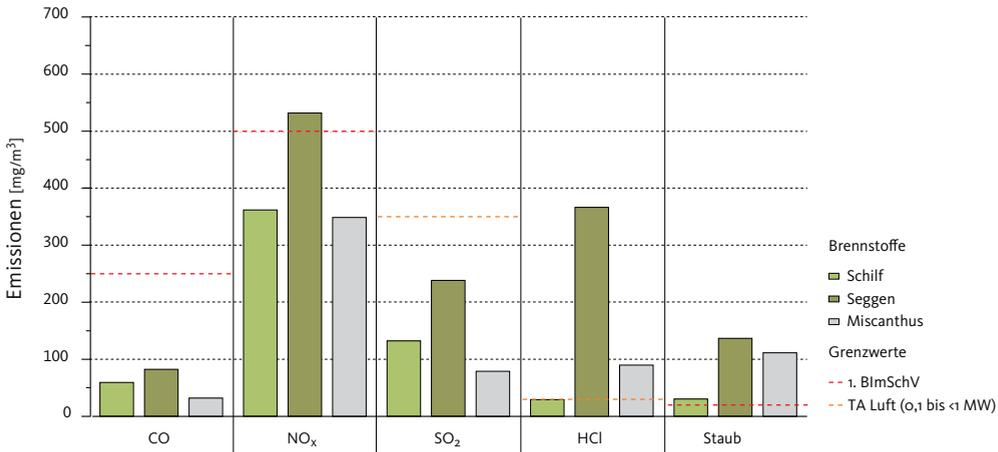


Abb. 5.3 Emissionswerte aus Verbrennungsversuchen mit Schilf- und Seggenpellets für Anlage B im Vergleich zu Miscanthuspellets [31], Grenzwerte nach 1. BImSchV und TA Luft [29, 30]

Mittlere Feuerungsanlagen

Die Testverbrennungen erfolgten in Feuerungsanlagen der Firmen Ökotherm (450 kW_{NWL}) und Binder (300 kW_{NWL}) in Zusammenarbeit mit der Hochschule Zittau/Görlitz [32].

Die beiden Anlagen besitzen eine Luftstufung in Primär- und Sekundärluft und eine vollautomatische Entaschungstechnik. Während die Ökotherm-Anlage über eine wassergekühlte Brennmulde verfügt, ist die Binder-Anlage mit hydraulisch bewegtem Schubrost und Rauchgasrezirkulation an halmgutartige Brennstoffe angepasst. Die Rauchgasreinigung erfolgte bei Ökotherm durch einen Zyklon und einen Gewebefilter, bei Binder durch einen Heißgaszyklon.

Während der Versuche traten bei beiden Feuerungsanlagen keine brennstoffbedingten Betriebsstörungen (z.B. Verschmutzung und Verschlackung) auf. Die

Ascheerweichungstemperatur (DT) der Schilfpellets ist vergleichbar mit derjenigen von Holz, sodass ein geringes Risiko für Verschlackung bestand. Die Erweichungstemperatur der Seggenpellets hingegen ist wesentlich geringer (s. Tab. 4.2). Allerdings ließ die konstruktive Ausführung der Anlagen entweder nur wenig Schlacke entstehen oder sie war durch technische Maßnahmen in der Lage, die anfallende Schlacke sicher aus der Anlage zu befördern.

In Abbildung 5.4 sind die Mittelwerte der gemessenen Emissionen und die Grenzwerte der 4. BImSchV [33] bzw. der TA Luft [30] dargestellt. Die relevanten Emissionsgrenzwerte der TA Luft konnten bei Schilfpellets in beiden Anlagen eingehalten und teilweise deutlich unterschritten werden (Abb. 5.4). In der Binder-Anlage wurden sogar die Staubgrenzwerte unterschritten, obwohl sie nicht mit einer aufwendigen Filtertechnik aus-

gestattet war. Im Falle der Seggenpellets kam es nur bei der Binder-Anlage bei den NO_x - und Staubemissionen zur Überschreitung der Grenzwerte. Voraussetzung für das Erreichen dieser Werte war, dass die Ausbranddauer in den Anlagen erhöht wurde.

Die Versuche zeigen, dass die Nutzung von Schilf- und Seggenpellets als Brennstoff möglich ist, wenn die Feuerungsanlagen auf die spezifischen Brennstoff-

eigenschaften eingestellt sind. Dies betrifft z.B. die Brennstoffdosiereinrichtung, die Primär- sowie Sekundärluftregelung, den Ascheaustrag und ggf. die nachgeschaltete Abgasentstaubung. Außerdem bedarf der Brennstoff eines längeren Ausbrandweges (eines verlängerten Rosts), d.h. die Anlagen sollten im Vergleich zu Anlagen, in denen Holz als Regelbrennstoff eingesetzt wird, größer dimensioniert werden.

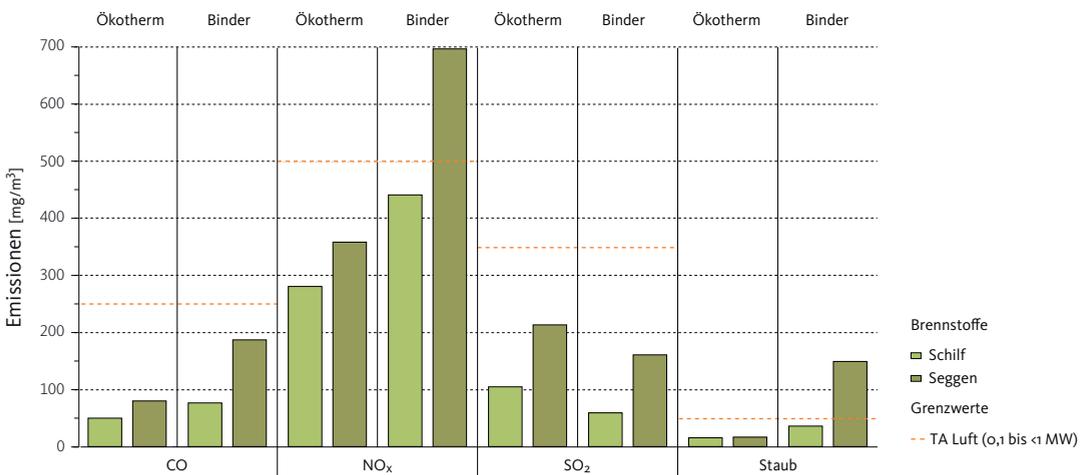


Abb. 5.4 Emissionen der Verbrennung von Schilf- und Seggenpellets in mittleren Feuerungsanlagen (Ökotherm 450 kW und Binder 300 kW) im Vergleich zu den Grenzwerten der 4.BImSchV/TA Luft [30, 33]

5.2. Ascheanalysen

Eine Stichprobe der Feuerraumasche von Seggen erfüllte die Anforderungen eines Kalkdüngers, mit 11 % CaO , 4 % K_2O , 4 % P_2O_5 FM. Sie kann aufgrund der Reaktivität von 100 % als leicht umsetzbarer Dünger eingestuft werden. Die Schadstoffgehalte liegen unterhalb der vorgegebenen Grenzwerte der DüMV [34] und müssen daher nicht deklariert werden. Da eine bestimmte

Körnung der Aschen gefordert ist, kann eventuell eine Aufmahlung erforderlich sein. Die Feuerraumaschen von Schilfpellets erfüllten nicht die geforderten Mindestgehalte an Nährstoffen für Düngemitteltypen gemäß DüMV (2,6 % CaO , 0,5 % K_2O , 1 % P_2O_5 FM). Die Asche der Versuchstests mit Schilf kann deshalb nicht als Düngemittel verwendet werden.

6. Betriebswirtschaft

Auf Betriebsebene ist die Wirtschaftlichkeit eine wesentliche Herausforderung bei der Nutzung von Paludi-Biomasse. Diese wird durch die jeweiligen Rahmenbedingungen bestimmt. Während Wichmann [38,42] unter Berücksichtigung von Spannbreiten die Variabilität verschiedener Verfahren zeigt, werden hier mit festgesetzten Rahmenbedingungen die folgenden drei Verfahrensketten betrachtet (Tab. 6.1):

1. Sommerernte (Heuballen)

mit angepasster Grünlandtechnik → Verfeuerung

2. Winterernte (Häckselgut)

mit Raupentechnik → Verfeuerung

3. Winterernte (Dachschilfbunde)

mit Spezialtechnik (Seiga und Raupentechnik) → mobile Pelletierung des Ausputzes → Verfeuerung

Das erste Beispiel ist bereits in der Praxis etabliert (s. Fallbeispiel Malchin), von den Beispielen 2 und 3 sind bisher nur einzelne Verfahrensstufen realisiert; sie stellen aber praxisreife Verfahrensketten dar.

Die Kostenanalyse der Verfahren erfolgt als erweiterte Teilkostenrechnung: Neben den variablen Kosten, die in Abhängigkeit des Verfahrensumfanges anfallen, werden auch verfahrensgebundene Fixkosten (z.B. Abschreibung der eingesetzten Technik) berücksichtigt. Anteilige Gemeinkosten, Flächenkosten etc., die betriebsspezifisch anfallen und im Rahmen einer Vollkostenrechnung zur langfristigen Betrachtung der Wirtschaftlichkeit einbezogen werden müssten, werden nicht berücksichtigt. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben die Agrarförderung sowie Kosten für eine Bestands Begründung. Letztere liegen für Schilf bei etwa 230 € pro ha und Jahr [35] und sind nur für die Etablierung von Beständen hoher Qualität für die stoffliche Verwertung wirtschaftlich sinnvoll. Die betrachteten Kosten setzen sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- **Arbeitskosten:**
Lohnkosten inkl. Sozialabgaben
- **Fixe Maschinenkosten:**
Abschreibung, Zinsen, Versicherung, Steuer
- **Variable Maschinenkosten:**
Reparaturen, Betriebsstoffe, Verbrauchsmaterial

6.1 Kosten für Technik und Ernte

Anhand der Verfahren werden die Bereitstellungskosten für Biomasse aus Paludikultur dargestellt. Da die Eingangsgrößen für die Kostenkalkulationen auf begrenzten Erfahrungen beruhen und starken jährlichen und räumlichen Schwankungen, z.B. hinsichtlich des Ertrages, der Erntebedingungen etc. unterliegen, sind die Ergebnisse als Näherungsgrößen zu verstehen. Als Lohnkosten werden nach KTBL 15 € pro h veranschlagt [36]. Den Maschinenkosten liegen eigene Erhebungen und Befragungen zu den Ernteverfahren zugrunde, die durch Kalkulationsdaten des KTBL für landwirtschaftliche Maschinen [37] ergänzt werden.

Die wesentlichen Faktoren für die Erntekosten sind die Investitionskosten in die Technik, die Auslastung der Technik sowie die realisierbare Schlagkraft, d.h. die Flächenleistung, die mit der eingesetzten Technik unter den jeweiligen Standort- und Flächeneigenschaften erreicht wird.

Die Auslastung der Grünlandtechnik wird, wie im Praxisbeispiel (s. Kap. 9) ermittelt, im Bereich der Abschreibungsschwelle angenommen. Die Auslastung der Spezialmaschinen in der Landschaftspflege und der Dachschilfwerbung schwankt erheblich. Hier wird für die Dachschilferntemaschinen eine Auslastung von 250 h pro a und für die Häckselgutverfahren eine Auslastung von 500 h pro a angenommen [38]. Um zu verdeutlichen, welchen Einfluss die Auslastung der Technik

auf das Ergebnis hat, wird zusätzlich eine Dachschiifvariante mit 350 h pro Jahr und eine Häckselgutvariante mit 1.200 h pro Jahr gerechnet.

Um die Erntekosten zu reduzieren muss eine hohe Auslastung der Erntemaschinen und eine hohe Flächenleistung erzielt werden. Ggf. müssen Maschinen auch im Lohnbetrieb und die raupenbasierte Technik auch in

anderen Bereichen eingesetzt werden (z.B. in der Landschafts- oder Deichpflege, zum Siloschieben etc.), um die Auslastung zu steigern und damit die durchschnittlichen Fixkosten zu reduzieren bzw. die erforderliche Flächenkulisse zu erreichen.

Tab. 6.1 Überblick über die untersuchten Verfahren und Varianten

| | Verfahren 1 | Verfahren 2 | | Verfahren 3 | |
|---------------------------------|---|---|---|---------------------------------------|---|
| | Sommerernte von Heurundballen | Winterernte von Häckselgut | | Winterernte von Dachschiif | |
| Beschreibung | Angepasste Grünlandtechnik | Kettenbasierte Spezialtechnik | | Ballonreifen Seiga | Kettenbasiert WildApp |
| Mähetechnik | Traktor 118 kW, Breitreifen, Rotationsmäherwerke (Front-/Heck) Traktor 70 kW, Heuwender, Heuschwader | Umgebaute Pistenraupe, Wurfschlegelmulcher und Bunker | Kettenbasierte Spezialtechnik, Wurfschlegelmulcher und Hänger | Ballonreifentechnik, Dachschiifernter | Kettenbasierte Spezialtechnik, Dachschiifernter |
| Aufbereitung | Pressen (Rundballenpresse mit Tandemachse) | Häckseln (bei der Mahd) | | Binden zu Rohbunden (bei der Mahd) | |
| Transport zum Flächenrand | Traktor mit Doppelballenspieß | Bunker 9m ³ | Hänger 50m ³ | Ladefläche | |
| Investitionskosten ¹ | 192.000 € | 210.000 € ^{2,3} | 400.000 € ^{2,3} | 50.000 € ³ (gebraucht) | 350.000 € ³ |
| Transport | gezogener Ballen-transportwagen | Häckselgutwagen/LKW | | Häckselgutwagen/LKW | |
| Lagerung | Im Freien (abgedeckt) oder Altgebäude | Im Freien (abgedeckt) oder Altgebäude | | Im Freien (abgedeckt) | |

¹ s. Anhang im Online-Teil der Broschüre, ² Gesamtvolumen, je nach vorhandener Ausstattung, ³ ohne Kosten für Tieflader und Schlepper für den Straßen-transport

Flächenleistung und Arbeitszeitbedarf

Der Arbeitszeitbedarf der Verfahren wurde im Paludi-Pellets-Projekt für Einzelbeispiele erhoben und anhand eines auf der Teilzeitmethode (TGL 22289 [39]) aufbauenden Modells ausgewertet (Abb. 6.1). Hierfür wurden die erfassten Zeiten in einzelne Arbeitsschritte zerlegt, analysiert und als Basis für die Modellierung des Arbeitszeitbedarfs unter gleichen, konservativen Annahmen genutzt. Mit dieser Methode werden eine

bessere Vergleichbarkeit und realistischere Ergebnisse gegenüber bisherigen Angaben erreicht; bei den hier dargestellten Ergebnissen handelt es sich um konservative Werte.

Die Einschränkungen der Modellrechnung und der erhobenen Daten muss durch weitere Forschung verbessert werden. Im Online-Teil der Broschüre können die Modellannahmen eingesehen und individuell angepasst werden, um Einzelfallbedingungen der Praxis zu berücksichtigen.

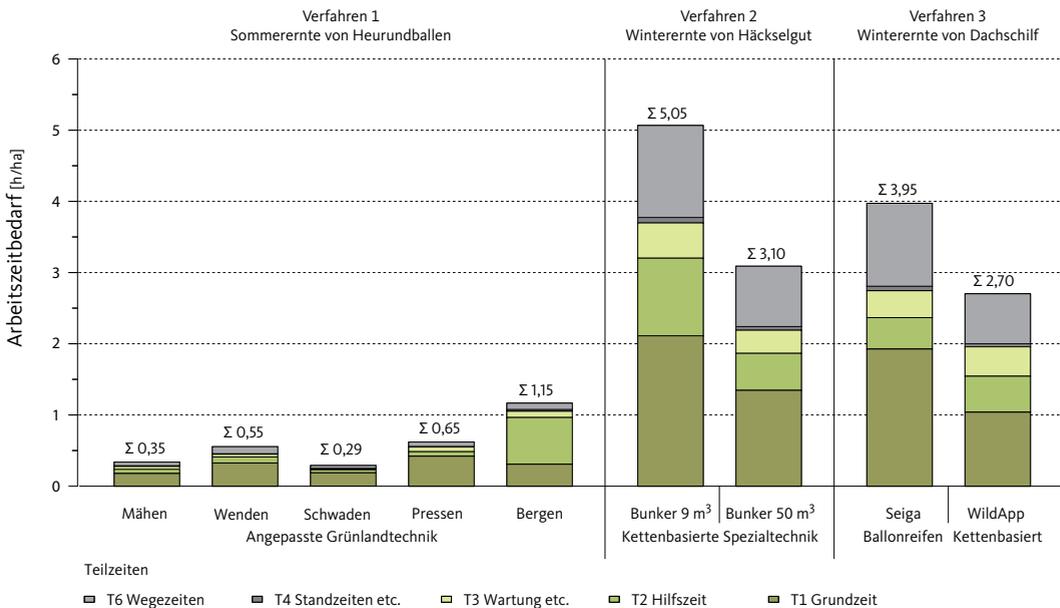


Abb. 6.1 Ergebnis der Modellrechnung zum Arbeitszeitbedarf für die Ernte (Arbeitszeitklassifizierung nach TGL 22289 [39]; Arbeitsschritte: An- und Abfahrt, Mahd, Beräumung und Transport zum Umschlagplatz; weitere Berechnungsgrundlagen: Flächengröße 4 ha, Produktivität 4,5 t TM/ha*a, Entfernung Hof-Feld 5 km, Feld-Umschlagplatz 0,1 km, Arbeitstag 8 h)

Erntekosten

Die Erntekosten (s. Tab. 6.2) werden auf Basis des Arbeitszeitbedarfs und der Maschinen- und Arbeitskosten bestimmt. Im Falle der Spezialtechnik liegen die Ergebnisse deutlich über den bisherigen Literaturangaben [2, 35]. Das liegt zum einen an unterschiedlichen Annahmen (z.B. geringere Produktivität) und zum anderen an den berücksichtigten Teilzeiten (s. Abb. 6.1). Unter günstigeren Rahmenbedingungen (z.B. höherer Produktivität, Flächengröße und Maschinenauslastung) können geringere Erntekosten anfallen (vergl. Online-Teil der Broschüre).

Im Falle der Dachschilfernte wird zwar der Gesamtbedarf dargestellt (Zeit: Abb. 6.1, Kosten: Tab. 6.2). Bei der Ausputzbiomasse handelt es sich jedoch um ein Kopelprodukt, weshalb für die weiteren Berechnungen nur die zusätzlich anfallenden Transportkosten der sonst auf der Fläche verbleibenden Biomasse berücksichtigt werden. Die Kosten für das auch ohne Verwertung der Ausputzbiomasse erfolgende Ausputzen werden den Dachschilfbunden als deren Veredelungsschritt zugerechnet. Die ggf. durch die Nutzung vermiedenen Entsorgungskosten werden nicht berücksichtigt.

Verfahren 1 basiert auf Daten eines Praxisbetriebes (s. Kap. 9), der auf diese Form der Nutzung spezialisiert ist und über mehrjährige Erfahrungen bei der Bewirtschaftung von Nasswiesen verfügt. Die Ergebnisse sind ggf. nicht in jedem Betrieb und auch nicht in jedem Jahr erreichbar.

grün = Basis für weitere Berechnungen, zusätzl. = zusätzliche Kosten, die nur für den Ausputz anfallen

1 entspricht einer Produktivität von 4,5 t TM/ha*a abzüglich der auftretenden Ernteverluste, die Höhe der Ernteverluste basiert auf Schätzwerten

2 Transport der Spezialtechnik zur Fläche erfolgt per Tieflader

3 bei Verfahren 3 werden 5 bzw. 3 Arbeitskräfte benötigt

4 Auslastung 500 h/a

5 Auslastung 1.200 h/a (bei Doppelnutzung)

6 Auslastung 250 h/a

7 Auslastung 350 h/a (bei Doppelnutzung)

Tab. 6.2 Vergleich der Kosten verschiedener Ernteverfahren

| Verfahren 1 | | | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------|----------|--|
| Beschreibung | Sommerernte von Heurundballen | | | |
| | Angepasste Grünlandtechnik | | | |
| | Mähen | Wenden | Schwaden | |
| Ertrag | | | | |
| t TM/ha*a | | | | |
| MWh/ha*a | | | | |
| Arbeitszeitbedarf | | | | |
| h/ha | 0,34 | 0,55 | 0,29 | |
| h/ha Transp. Tieflader ² | | | | |
| h/t TM | 0,08 | 0,13 | 0,07 | |
| Maschinenkosten | | | | |
| €/h fix | 24,25 | 9,25 | 12,45 | |
| €/h variabel | 43,15 | 29,10 | 26,40 | |
| €/h Arbeitskraft ³ | 15,00 | 15,00 | 15,00 | |
| Transp. Tieflader | | | | |
| €/h fix | - | - | - | |
| €/h variabel | - | - | - | |
| €/h Arbeitskraft ³ | - | - | - | |
| Erntekosten | | | | |
| €/ha | 28,00 | 29,50 | 15,50 | |
| €/t TM | 6,85 | 7,20 | 3,80 | |
| €/MWh | 1,45 | 1,55 | 0,80 | |
| €/MWh zusätzl. | | | | |

| | | | Verfahren 2 | | | Verfahren 3 | | |
|---------|--------|--------------|-------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|
| | | | Winterernte von Häckselgut | | | Winterernte von Dachschiß | | |
| | | | Kettenbasierte Spezialtechnik | | | Ballonreifen | Kettenbasiert | |
| Pressen | Bergen | Summe | 9 m³ Bunker | 50 m³ Hänger | | Seiga | WildApp | |
| | | 4,1 | 3,9 | 3,9 | | 3,9 | 3,9 | |
| | | 16,8 | 16,0 | 16,0 | | 16,0 | 16,0 | |
| 0,62 | 1,17 | 2,97 | 4,5 | 2,5 | | 3,4 | 2,1 | |
| | | | 0,6 | 0,6 | | 0,6 | 0,6 | |
| 0,15 | 0,29 | 0,72 | 1,30 | 0,79 | | 1,02 | 0,69 | |
| | | | | A ⁴ | B ⁵ | | A ⁶ | B ⁷ |
| 32,85 | 10,95 | - | 37,83 | 73,05 | 30,44 | 18,59 | 128,07 | 91,48 |
| 55,40 | 37,65 | - | 58,00 | 79,00 | 65,67 | 58,31 | 56,20 | 46,20 |
| 15,00 | 15,00 | - | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 75,00 | 45,00 | 45,00 |
| - | - | - | 17,20 | 26,85 | 26,85 | 17,20 | 17,20 | 17,20 |
| - | - | - | 32,02 | 35,77 | 35,77 | 32,05 | 32,05 | 32,05 |
| - | - | - | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 | 15,00 |
| 64,00 | 74,50 | 211,50 | 535,50 | 466,00 | 324,50 | 554,00 | 526,50 | 426,50 |
| 15,60 | 18,15 | 51,60 | 137,30 | 119,50 | 83,20 | 142,05 | 135,00 | 109,35 |
| 3,30 | 3,85 | 10,95 | 29,10 | 25,25 | 17,65 | 30,15 | 28,65 | 23,20 |
| | | | | | | 2,66 | 7,46 | 5,94 |

6.2 Kosten für Transport und Lagerung

Das Ergebnis der Berechnung zeigt deutlich, dass dort wo es die Standortbedingungen zulassen, der Einsatz von angepasster Grünlandtechnik die günstigste Variante darstellt (Tab. 6.2). Auf nassen Standorten ist Spezialtechnik erforderlich (s. Kap. 2.2). Diese Einzelanfertigungen sind mit hohen Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten verbunden.

Wo Spezialtechnik eingesetzt wird, bedeutet die stoffliche Nutzung der Biomasse, z.B. als Dachschilf, ein wesentlich geringeres wirtschaftliches Risiko [38]. Der bei der Produktion anfallende Ausputz kann als Brennstoff genutzt werden und ist die kostengünstigste Variante der Rohstoffbereitstellung.

Dort wo die Biomassequalität eine stoffliche Nutzung verhindert, stellt die Nutzung als Brennstoff bei entsprechenden Rahmenbedingungen eine ebenfalls wirtschaftliche Alternative dar [38].

Die Investitionskosten in die Technik, die Auslastung der Technik sowie die Flächenleistung sind die wesentlichen Stellschrauben, um die Erntekosten zu senken. Betriebe müssen deshalb Konzepte finden, die Auslastung durch Doppelnutzung zu erhöhen.

Die Kosten des Transports von Häckselgut, Schilfbunden, Rundballen oder Pellets unterscheiden sich deutlich, da das Material in Abhängigkeit der Aufbereitung eine unterschiedliche Dichte aufweist. Für Häckselgut und Schilfbunde sind die Transportkosten bei Einsatz herkömmlicher landwirtschaftlicher Technik (Schlepper mit 2 Anhängern mit Aufbau) sowie eines Sattel-schleppers mit größerer Transportkapazität angegeben. Letztere Technik wird auch für den Pelletstransport angenommen. Für Ballengut wird von einem Transport-hänger mit 10 t (45 Ballen) Fassungsvermögen ausgegangen. Das Beladen erfolgt mit einem Teleskoplader und ist in den Transportkosten enthalten. Dabei ist berücksichtigt, dass das Be- und Entladen loser Biomasse (Häckselgut, Pellets) schneller erfolgt als von gebundener bzw. gepresster Biomasse.

Es wird deutlich, dass loses Häckselgut gegenüber den Pellets bei Transport mit einem Sattelzug (100 m³) und einer einfachen Entfernung von 5 km bereits das Vierfache an Transportkosten verursacht, bei größeren Entfernungen sogar das Fünffache (s. Tab. 6.3).

Bei der Lagerung werden Varianten im Freien (Ballen, abgedeckt mit Vlies) und unter Dach betrachtet (s. Tab. 6.4). Eine überdachte Lagerung ist aus Gründen des Qualitätserhalts der Biomasse zu bevorzugen.

Tab. 6.3 Transportkosten unterschiedlich aufbereiteter Schilf-Biomasse (Wassergehalt w 20%, bei Pellets w 10%, eigene Berechnungen nach [37])

| Einfache Entfernung | km | 2,5 | 5 | 10 | 20 | 30 | 50 |
|---------------------------------------|---------|------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Einheit | | | | | | |
| Häckselgut (45 kg/m³) | | | | | | | |
| Sattelzug (100 m³) | €/t TM | 9,1 | 10,9 | 14,6 | 21,9 | 29,3 | 44,0 |
| Doppelhänger (40 m³) | €/t TM | 20,6 | 24,7 | 32,7 | 48,9 | 65,1 | 97,4 |
| Dachschilf (112,5 kg/m³) | | | | | | | |
| Sattelzug (100 m³) | €/t TM | 5,9 | 6,6 | 8,1 | 11,0 | 14,0 | 19,8 |
| Doppelhänger (40 m³) | €/t TM | 14,0 | 15,6 | 18,8 | 25,3 | 31,7 | 44,7 |
| Ballengut (220 kg/RB, Ø 1,2 m) | | | | | | | |
| Ballentransportwagen (10 t) | €/t TM | 5,7 | 6,5 | 7,9 | 10,8 | 13,7 | 19,6 |
| Pellets (650 kg/m³) | | | | | | | |
| Sattelzug (100 m³) | €/t TM | 2,3 | 2,7 | 3,4 | 4,8 | 6,1 | 8,9 |

Tab. 6.4 Lagerungskosten (€/t) für Häckselgut, Ballen und Pellets bei unterschiedlicher Lagerungsart (nach [36, 40])

| Lagerungsart | Einheit | Halle | Altgebäude | Im Freien, abgedeckt |
|---------------------|----------------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| Häckselgut | €/t | 10,00 - 20,00 | | 5,70 |
| Ballen | €/t | 24,00 - 27,00 | 11,00 | 5,30 |
| Pellets | €/t | 9,00 - 14,50 | | |

6.3 Kosten der Kompaktierung

Für den im Paludi-Pellets-Projekt durchgeführten Praxisversuch zur mobilen Pelletierung (s. Kap. 3.1) wurden die Verfahrenskosten detailliert ermittelt. Über weitere Varianten wird unten ein Überblick gegeben.

Die Verfahrenskosten der mobilen Pelletierung liegen zwischen 119 und 325 € pro t und sinken im Optimalfall (Häckselnutzung, vergrößerter Bunker, automatisier-

ter Ein- und Austrag) auf 102 € pro t (s. Abb. 6.2). Eine weitere Kostendegression ist durch einen Mehrschichtbetrieb und einen größeren Einsatzumfang, d.h. eine höhere Auslastung möglich.

Eine stationäre Pelletierung ist mit 42 bis 71 € pro t mit deutlich geringeren Kosten verbunden (s. Tab. 6.5).

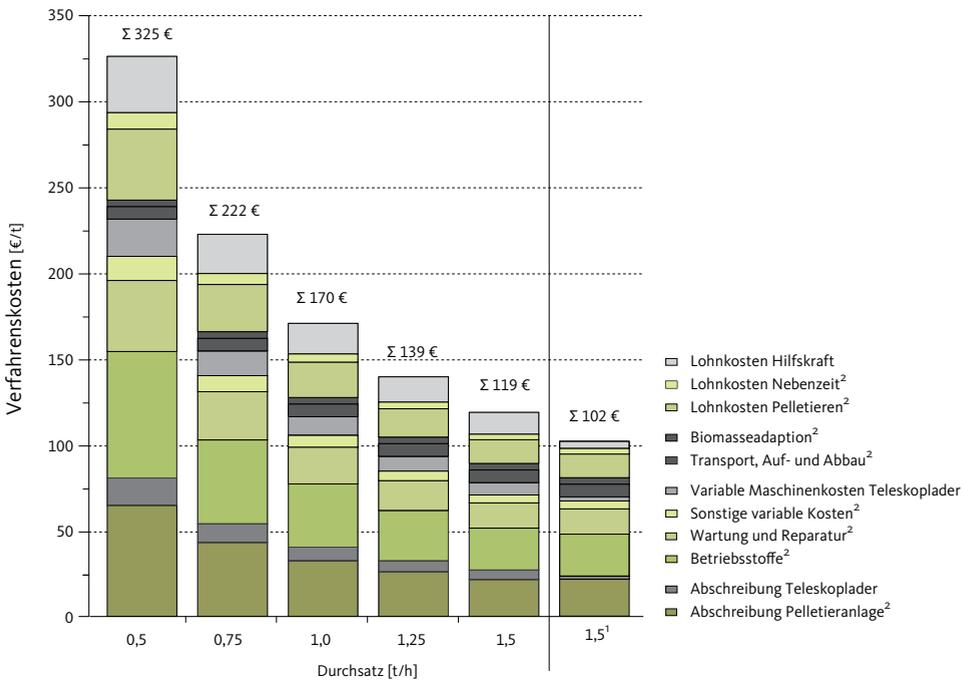


Abb. 6.2 Verfahrenskosten der mobilen Pelletierung in Abhängigkeit vom erzielten Durchsatz. 1 optimiertes Szenario mit Häckselnutzung, vergrößertem Bunker und automatisiertem Ein- und Austrag, 2 beim Betreiber der Pelletieranlage anfallende Kosten

Die Verfahrenskosten der mobilen Pelletierung werden im Wesentlichen vom Durchsatz, der mit der jeweiligen Biomasse erreicht werden kann, bestimmt. Maßnahmen zu Steigerung des Durchsatzes bei gleichbleibender Qualität, z.B. durch Anpassung der Matrize oder Zuschlagsstoffe, sind aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Da die mobile Pelletierung in der Regel als Dienstleistung erfolgt, sind die Verfahrenskosten nur ein Teil der Kosten, die der Auftraggeber zu tragen hat. Der Dienstleister muss seine Gemeinkosten (bis zu 30 %) und einen Zuschlag für Wagnis und Gewinn (5-20 %) aufschlagen. Im Vergleich zu einer stationären Pelletierung hat eine mobile Pelletierung als Dienstleistung die Vorteile, dass hohe Investitionskosten entfallen und dadurch eine Flexibilität gegeben ist. Als Nachteile sind die höheren Kosten je produzierter Einheit, der höhere Arbeitsaufwand und die teilweise auftretende Staubbelastung zu sehen.

Gegenüber der Pelletierung ist die Brikettierung bei Anlagen mit geringem Durchsatz (z.B. 100 kg/h) mit geringeren Investitionskosten und weniger technischem Aufwand verbunden. Aufgrund des niedrigeren Durchsatzes können jedoch nur geringe Mengen an Briketts produziert werden, so dass der Preis auch hier mit etwa 60 € pro t (Anlage mit einem Durchsatz von 100 kg pro h, Investitionskosten gebraucht 12.000 €, 5.000 Betriebsstunden pro Jahr) zu veranschlagen ist.

Eine weitere Variante der Kompaktierung ist das Pressen von Ballen abseits der Fläche (z.B. am Flächenrand oder auf dem Betriebsgelände). Die Kosten hierfür liegen als Dienstleistung bei etwa 40 € pro t [41].

Tab. 6.5 Kosten einer stationären Pelletierung von Halmgütern (Ballen) in 1- und 2-schichtigem Betrieb (nach [36, 40])

| | Einheit | 1-schichtiger Betrieb | 2-schichtiger Betrieb | |
|-------------------|---------|-----------------------|-----------------------|-------|
| Durchsatzleistung | t/h | 0,7 | 1,5 | 2,5 |
| Jahresproduktion | t/a | 2.080 | 4.160 | 8.990 |
| Stückkosten | €/t FM | 61,28 | 41,97 | 71,23 |

6.4 Brennstoffkosten

Bei der Kalkulation der Brennstoffkosten wurden Transportentfernungen vom Feld zum Betriebsgelände (5 km) und vom Betriebsgelände zum Ort der energetischen Verwertung (Ballen/Häckselgut: 10 km, Pellets: 50 km) berücksichtigt. Die Lagerkosten wurden anhand der Daten aus Tabelle 6.4 berechnet.

Die ermittelten Brennstoffkosten fallen im Vergleich zu Angaben in der Literatur (vgl. Tab. 6.6) relativ hoch aus. Dies ist in den zugrunde gelegten ungünstigeren Rahmenbedingungen begründet, die im Einzelfall optimiert werden können und dann zu geringeren Kosten führen.

Tab. 6.6 Brennstoffkosten und -preise frei Feuerungsanlage

| Brennstoff | Verfahren | Aufbereitung | €/t TM | €/MWh |
|--|-----------|--|--------|-------|
| Kosten | | | | |
| Seggenheu-Ballen | 1 | Rundballen | 71,00 | 15,05 |
| Seggenheu-Pellets | 1 | Rundballen → Pellets ¹ | 252,00 | 49,80 |
| Schilf-Häcksel | 2 | Häckselgut | 173,00 | 36,70 |
| Schilf-Häcksel (Hohe Auslastung) | 2 | Häckselgut | 119,00 | 25,25 |
| Dachschilfausputz-Pellets | 3 | Koppelprodukt → Pellets | 235,00 | 46,45 |
| Dachschilfausputz-Ballen | 3 | Koppelprodukt → Rundballen | 99,00 | 21,00 |
| Dachschilfausputz-Briketts | 3 | Koppelprodukt → Briketts | 124,00 | 26,30 |
| Schilf (natürlicher Bestand) [35, 42] | | Rundballen | 69,00 | 13,80 |
| Schilf (Anbau) [35, 42] | | Rundballen | 97,00 | 19,40 |
| Miscanthus (Anbau, 20 ha) [35, 42] | | Quaderballen | 76,00 | 15,50 |
| Preise (Vergleich) ² | | | | |
| Stroh [42] | | Quaderballen | 65,00 | 13,50 |
| Holzpellets [43] | | Liefermenge 5 t, 2015 | 255,48 | 46,93 |
| Holz-briketts [43] | | Liefermenge 1 t, 2014 | 273,34 | 50,21 |
| Holz-hackschnitzel [43] | | w 20 %, 2015 | 164,60 | 33,20 |
| Holz-hackschnitzel [43] | | w 35 %, 2015 | 140,83 | 29,49 |

fett Brennstoffform, **grün** = Basis für weitere Berechnungen, ¹ Kosten der Pelletierung bei einem Durchsatz von 1 t/h, ² Hierbei handelt es sich um Marktpreise, deren Höhe durch Angebot und Nachfrage bestimmt ist

6.5 Kosten der Wärmeerzeugung

Bei der Wärmeerzeugung aus Halmgütern ergibt sich, anders als bei fossilen Energieträgern, der Hauptteil der anfallenden Kosten aus den Investitions- und Betriebskosten, während die Brennstoffpreise vergleichsweise gering sind. Bei einem Vergleich der Kosten für die Wärmeerzeugung müssen daher die Wärmegestehungskosten betrachtet werden.

Eine hohe Zahl von Volllaststunden, d.h. eine hohe Auslastung, ist bei der Wärmeerzeugung aus Halmgütern von großer Bedeutung. Dies wird bei einem Vergleich der Wärmegestehungskosten eines Heizwerkes für Heurundballen mit einer Leistung von 800 kW bei der Bereitstellung von 1.500 bzw. 4.000 MWh pro Jahr deutlich (Abb. 6.3).

Die Verfeuerung von Rundballen ist für die Deckung von betriebsinternem Wärmebedarf (z.B. bei der Ferkelaufzucht) oder zur Bereitstellung der Grund- und Mittellast in Fernwärmenetzen (s. Fallbeispiel Malchin) geeignet. Der Einsatz von Schilfpellets ist hingegen auch bei Abnehmern mit kleineren Anlagen mit hohem

Wärme- und Automatisierungsbedarf möglich. Konkurrenzfähig mit den Wärmegestehungskosten einer ggf. sogar abgeschriebenen Erdgasanlage (vgl. Erdgaspreis Abb. 6.3) ist Wärme aus Paludi-Biomasse nur unter günstigen Voraussetzungen, d.h. bei einem hohen und gleichmäßig über das Jahr verteilten Wärmebedarf oder bei geringeren als hier angenommenen Brennstoffbereitstellungskosten (vgl. Tab. 6.6). Bei einem Ausbau von Wärmenetzen sollte die Option einer thermischen Verwertung von Paludi-Biomasse immer geprüft werden.

Um die Nutzung von Paludi-Biomasse durch Integration von angepassten Biomassekesseln in bestehenden Heizwerken zu ermöglichen, müssen Instrumente zur Honorierung der mit der Nutzung verbundenen Synergieeffekte (vergl. Kap. 9) entwickelt werden.

Berechnungsgrundlagen und weitere Informationen finden sich im Online-Teil der Broschüre unter www.ppb.paludikultur.de.

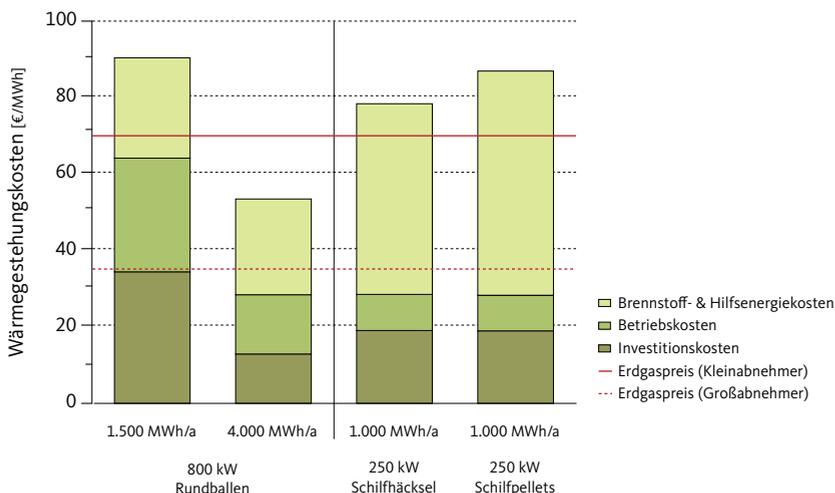


Abb. 6.3 Wärmegestehungskosten im Vergleich zum Brennstoffpreis von Erdgas für Klein- und Großabnehmer

7. Treibhausgas- und Energiebilanzen

Bei den hier durchgeführten Vergleichen zu Energie- und Treibhausgasbilanzen werden Nutzungsformen entwässerter und wiedervernässter Moorstandorte einem natürlichen Moor als Referenzsystem gegenübergestellt. Daraus lässt sich ableiten, welche Auswirkungen die Nutzung auf Treibhausgas- und Energiebilanz hat und welche Nutzungsoption für bereits entwässerte Standorte aus dieser Sicht zu empfehlen ist.

Die Methode orientiert sich an den Vorgaben der ISO Standards 14040 und 14044 [44, 45] zur Ökobilanzierung. Als Datengrundlage wurden die im Paludi-Pellets-Projekt erhobenen Daten zur Ernte, Aufbereitung und zur thermischen Nutzung von Paludi-Biomasse verwendet. Außerdem wurden Daten zu Emissionen und Energieaufwand von Produkten und Prozessen sowie deren vorgelagerten Ketten aus den Datenbanken ecoinvent [46], GEMIS [47] und weiteren Quellen [35, 48-54] genutzt. Die Berechnungen beziehen sich jeweils auf die Nutzung von 1 ha entwässertem oder wiedervernässtem Moorstandort. Der Vergleich basiert auf der Annahme, dass jedes Produkt ein äquivalentes ersetzt und dafür eine Gutschrift für die dabei vermiedenen Umweltauswirkungen des ersetzten Produktes erhält. Wenn die Gutschrift für das ersetzte Produkt höher als die durch die Produktion verursachten Umweltauswirkungen ist, führt die Nutzungsoption in der Bilanz zu Einsparungen, im umgekehrten Fall zu zusätzlichen Umweltbelastungen. Die Betrachtung findet gegenüber dem Referenzszenario „keine Entwässerung“ statt. Natürliche, unberührte Moore haben auf lange Sicht eine ausgeglichene Klima-/Kohlenstoffbilanz, d.h. Emission und Festlegung von Kohlenstoff gleichen sich aus. Für die entwässerungsbasierte Nutzung von Moorstandorten wird die Produktion von Grassilage zur Futternutzung (Szenario 1.1) analysiert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Prozess Maissilage ersetzt und

dabei indirekte Landnutzungsänderungen durch Nutzungsverdrängung vermieden werden, hierfür erfolgt eine Gutschrift (50 % iLUC) [48]. Außerdem wird die Produktion von Gras- (Szenario 1.2) und Maissilage (Szenario 1.3) für die Biogasproduktion untersucht. Es wird angenommen, dass durch die Biogasproduktion Strom aus dem deutschen Strommix und Wärme aus einem Erdgasheizwerk ersetzt wird.

Für wiedervernässte Standorte wird die Ernte von Seggen-Heuballen mit angepasster Grünlandtechnik und deren Verbrennung in einem Heizwerk zur Substitution von Erdgas untersucht (Szenario 2.1) (s. Kap. 9). Des Weiteren wird die Ernte und Produktion von Pellets aus Schilf sowie deren Transport und Nutzung als Korbrennstoff in einem 75 km entfernten 600 MW Steinkohlekraftwerk betrachtet (Szenario 2.2). Entsprechende Gutschriften werden für die substituierte Steinkohle angerechnet. Als dritte Option wird der Nutzungsverzicht nach Wiedervernässung analysiert (Szenario 2.3). In Abbildung 7.1 sind die Lebenswegabschnitte der Nutzungsszenarien schematisch dargestellt.

Bei der Bilanzierung werden direkte Treibhausgas- und Energieflüsse durch Torfoxidation, Photosynthese, Biomasseernte, -transport und -aufbereitung, sowie durch Aufbereitung und Verbrennung im Heiz-/Kraftwerk bzw. in der Biogasanlage und die Ascheentsorgung berücksichtigt. Gutschriften werden für die Substitution von Produkten, Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen (iLUC) durch den Erhalt der Produktion und die Bindung von CO₂ im Rahmen der Photosynthese erteilt. Für den bei Entwässerung oxidierten Torf werden 5,6 kWh pro kg TM in der Energiebilanz verrechnet.

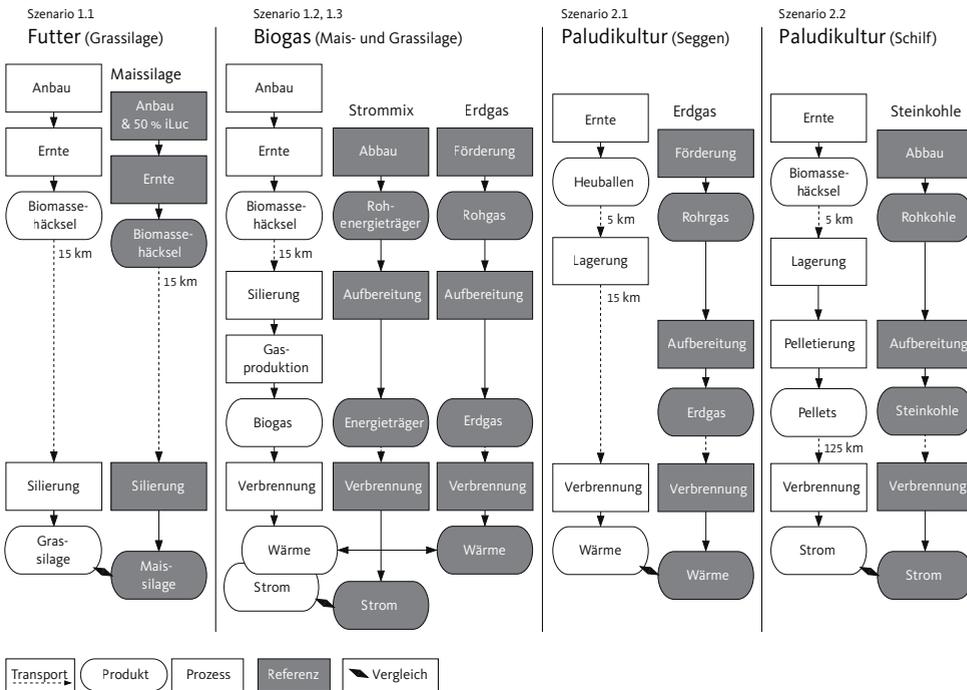


Abb. 7.1 Schematische Darstellung der Lebenswegabschnitte der verglichenen Produktsysteme (ohne Szenario 2.3)

Die Ergebnisse der Betrachtung zeigen, dass im Vergleich zur Referenz „natürliches Moor“ sowohl die entwässerungsbasierte als auch die wiedervernässte Nutzung von Mooren zu negativen Umweltauswirkungen führt (s. Abb. 7.2).

Die Biomasseproduktion auf entwässerten Moorstandorten führt zu massiven Treibhausgasemissionen (durch Torfoxidation, die hier auch energetisch bilanziert wird), die sämtliche durch die erzeugten Produkte (Futter, Wärme und Strom aus Biogas) erzielten Einspa-

rungen übertreffen. Landwirtschaft auf entwässerten Mooren führt trotz der Biomasseproduktion weder bei Treibhausgasemissionen noch im Falle der Energiebilanz zu Einsparungen gegenüber natürlichen Mooren. Auch im Vergleich zu einer Wiedervernäsung und Nutzungsaufgabe (Szenario 2.3) wird trotz der Gutschriften für die Produktion von Futter oder Biogas ein Vielfaches der Treibhausgasemissionen und des Energieaufwandes verursacht.

Im Fall wiedervernässter Moore weist nur das Szenario 2.2 „Nutzung von Schilfpellets zur Substitution von Steinkohle“ gegenüber der Referenz „natürliches Moor“ Einsparungen im Bereich Energieaufwand und Treibhausgasemissionen auf. Die Nutzung von Seggenheu (Szenario 2.1) und der Nutzungsverzicht (Szenario 2.3) führen im Vergleich zur Referenz zu Mehraufwand. Aus dem Vergleich der Bilanzen der einzelnen Szenarien lässt sich ableiten, dass bei der Umstellung von entwässertem auf wiedervernässte Nutzung in allen Fällen Einsparungen erzielt werden können. Diese Einsparungen finden zum einen durch die Reduktion der Torfoxidation und zum anderen durch die Substitution fossiler Energieträger statt.

Zu den besten Ergebnissen führt das Szenario 2.2, bei dem hohe Wasserstände und Biomasseproduktion kombiniert werden. Die Bilanzierungsergebnisse der Szenarien Seggenheu-Produktion mit angepasster Grünlandtechnik (2.1) und Nutzungsaufgabe (2.3) unterscheiden sich nur geringfügig, da in Szenario 2.1 die höheren Emissionen (aufgrund der etwas niedrigeren Wasserstände nach Wiedervernässung) durch die Substitution von fossilen Energieträgern ausgeglichen werden können.

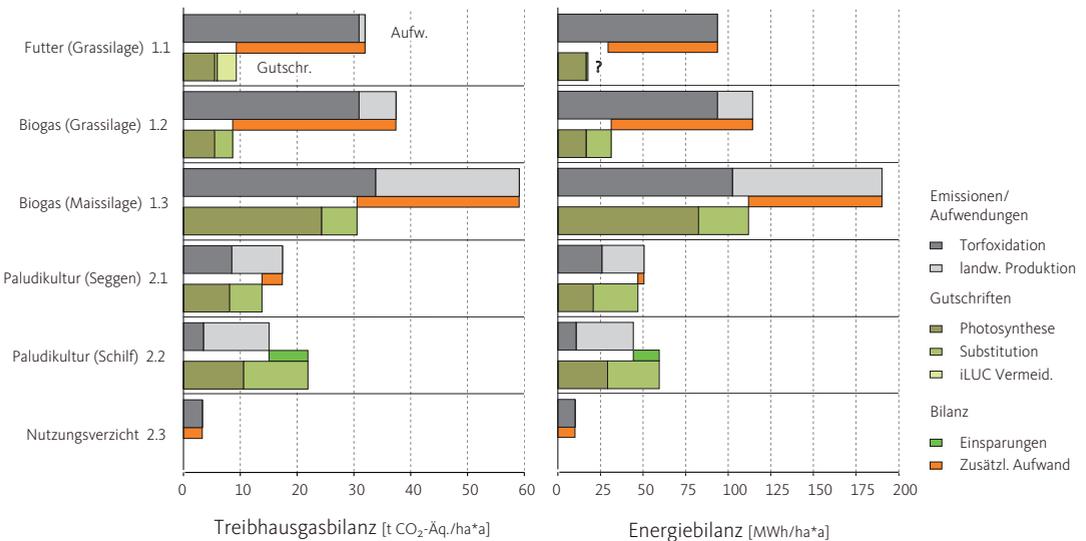


Abb. 7.2 Treibhausgas- (links) und Primärenergiebilanzen (rechts) der untersuchten Szenarien, die Differenz zwischen dem oberen (negative Umweltauswirkungen) und dem unteren (positive Umweltauswirkungen) Balken entspricht der Bilanz im Vergleich zum jeweiligen Substitut. Aufw. = Aufwendungen/Emissionen, Gutschr. = Gutschriften, Einsparungen, iLUC Vermeid. = Vermeidung indirekter Landnutzungsänderungen

Im Falle des Praxisbeispiels Malchin (entspricht Szenario 2.1, s. Kap. 9) führt die Substitution von Erdgas im Heizwerk durch Paludi-Biomasse von 200 ha Niedermoor zu Emissionseinsparungen von etwa 850 t CO₂-Äq. pro Jahr. Durch die Wiedervernässung werden gegenüber der entwässerten Nutzung nochmals etwa 1.000 bis 2.000 t CO₂-Äq. pro Jahr eingespart [55]. Ist eine weitere Anhebung des mittleren Wasserstandes möglich, lassen sich die Einsparungen auf der Fläche noch deutlich erhöhen.

Nicht nur aus Sicht von Treibhausgas- und Energiebilanz ist für natürliche Moore die vorteilhafteste Variante der Nutzungsverzicht bzw., wenn sich eine Nutzung nicht vermeiden lässt (z.B. in Asien), eine Nutzung ohne Beeinflussung des Wasserhaushaltes. Bei natürlichen Mooren (in Deutschland nur noch <1 % der ursprünglichen Moorfläche, international jedoch relevant) ist der in Mooren gespeicherte Kohlenstoffvorrat, nicht deren Funktion als Kohlenstoffsенke von Bedeutung.

Durch Entwässerung werden Moore zur Quelle von hohen Treibhausgasemissionen. Anders als bei der Rodung von Wäldern treten diese Emissionen nicht einmalig auf, sondern dauern solange an, wie entwässert wird oder bis der Torfkörper aufgezehrt ist. Das bedeutet aber auch, dass die Emissionen jederzeit durch Wiedervernässung stark reduziert werden können. Bei Entwässerung sind diese Emissionen so hoch, dass eine Biomasseproduktion diese nicht aufwiegen kann. Sogar die Nutzung des Torfs selbst als Brennstoff spart gegenüber der Biogasproduktion Energieaufwand und Treibhausgasemissionen ein (vergl. [56]).

Die Wiedervernässung entwässerter Moorstandorte kann die Emissionen deutlich reduzieren, aber auch dann werden noch wesentliche Mengen an Treibhausgasen emittiert. Nur eine Kombination von Wiedervernässung und Biomassenutzung bietet ein Potential zur

Vermeidung von Treibhausgasemissionen und zum Einsparen von fossilen Rohstoffen.

Die weltweite Förderung der Biomasseproduktion als Strategie für mehr Energiesicherheit und als Klimaschutzmaßnahme, z.B. die Erneuerbare-Energien-Richtlinie der Europäischen Union, schafft starke Anreize, Biomasse auf entwässerten Mooren zu produzieren. Dies führt zu höheren Treibhausgasemissionen als die Nutzung der fossilen Substitute. Zusätzlich ist die Nutzung entwässerter Moore mit zahlreichen weiteren negativen Umwelteinflüssen wie Nährstoffausträgen, Biodiversitätsverlust und langfristig in manchen Fällen auch mit dem Verlust der Produktionsfläche verbunden. Diese Auswirkungen können durch eine Wiedervernässung reduziert werden [2, 57, 58].



Abb. 7.3 Wiedervernässte Flächen im Trebeltal, Mecklenburg-Vorpommern

8. Rahmenbedingungen: Förderung, Normen und Gesetze

8.1 Moornutzung

Landnutzungsentscheidungen – insbesondere auf Marginalstandorten wie Moorböden – werden durch die landwirtschaftliche Förderpolitik maßgeblich mitbestimmt. Die Beihilfefähigkeit von Paludikultur über die Erste Säule der EU-Agrarpolitik (Direktzahlungen) ist jedoch in Teilen ungeklärt.

Die Sommer- bzw. Herbstmahd von Nasswiesen erscheint förderfähig: In zahlreichen Praxisfällen in Deutschland und in anderen EU-Ländern werden Direktzahlungen für Flächen ausgereicht, deren Vegetation sich aus Rohrglanzgras, Seggen und anderen, an hohe Wasserstände angepassten Pflanzenarten zusammensetzt. Die Verwertung dieser Grünland-Aufwüchse (energetisch, als Futter bzw. Streu oder reine Pflegemahd) scheint dabei keine Rolle zu spielen. Während das Vorkommen von Schilf (abgestorbene Halme) u. U. als Indikator für eine Nicht-Nutzung gewertet und sanktioniert wird, ist andernorts auch eine überjährige Nutzung toleriert.

Die Anerkennung der Wintermahd von Schilfkulturen als beihilfefähige landwirtschaftliche Nutzung ist derzeit nicht gegeben, aber in Diskussion. Bei entsprechendem politischem Willen kann Schilf, z. B. ähnlich wie Chinaschilf (*Miscanthus*) oder Kurzumtriebsplantagen, als landwirtschaftliche Dauerkultur eingestuft werden. Soll Dauergrünland in eine Dauerkultur umgewandelt werden, gelten mit der neuen EU-Förderperiode die Greening-Vorgaben zum Grünlanderhalt. Hierzu zählen Genehmigungsvorbehalt, Pflicht zur Anlage einer Ersatzfläche und Verbot von Grünlandumbruch in FFH-Gebieten. Für Paludikultur sollte hier auf politischer Ebene eine Sonderregelung zu diesen Einschränkungen

gefunden werden, da eine nasse Moornutzung im Gegensatz zum rein quantitativen Erhalt des Dauergrünlandumfanges qualitative Vorteile (z.B. Klimaschutz, Wasserrückhalt, Vorkommen standorttypischer Arten) erbringt.

Neben dem Bezug von Flächenprämien, der lediglich eine Gleichstellung mit der herkömmlichen Moornutzung bedeutet, ermöglichen die Förderprogramme der Zweiten Säule zusätzliche Anreizkomponenten wie z.B. die Honorierung ökologischer Leistungen über Agrar-Umwelt- bzw. -Klima-Programme sowie Investitionsförderungen für die Anschaffung von Spezialtechnik oder von Anlagen zur Biomasseveredlung bzw. -verwertung. Für Schilfbestände, die dem gesetzlichen Biotopschutz unterliegen, sind Ausnahmegenehmigungen der Unteren Naturschutzbehörde erforderlich, hier ist ausschließlich eine Wintermahd (01.11. bis 15.03.) möglich. Wurde im Zuge von Moorwiedervernässungen eine Grundsteuerbefreiung festgelegt und eine Nutzung der Flächen ausgeschlossen, kommen diese Flächen für Biomasseerzeugung nicht mehr in Frage. Ist in Schutzgebieten aufgrund von Habitat- oder Artenschutzgründen eine Pflege vorgesehen, kann die hierbei anfallende Biomasse durchaus verwertet werden. Hier führen allerdings ungünstige Bedingungen wie Kleinflächigkeit oder schlechte Zugänglichkeit häufig dazu, dass eine wirtschaftliche Nutzung erschwert ist. Das größte Nutzungspotential bieten bisher intensiv genutzte Niedermoorflächen, die vornehmlich aus Klimaschutzgründen wiedervernässt werden könnten. Die Wirtschaftlichkeit der Nutzung wird dann maßgeblich von der bisher ungeklärten Beihilfefähigkeit bestimmt.

8.2 Brennstoffnormen

Für den Handel von biogenen Festbrennstoffen gilt seit September 2014 die DIN EN ISO 17225-Reihe „Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen“. Diese Normen basieren auf der 14961-Reihe. Die Produktnormen „klassifizieren“ Biobrennstoffe für den gewerblichen oder industriellen Bereich.

Die Einordnung der losen Paludi-Biomasse kann nach ISO 17225-1 [59] für Festbrennstoffe zur nicht-industriellen Verwendung erfolgen. Biogene Festbrennstoffe werden darin durch zwei Merkmale eingeordnet: Nach Herkunft und Quelle der Biomasse und nach hauptsächlichen Handelsformen und Eigenschaften.

Die Einordnung von Pellets aus halmgutartiger Biomasse

erfolgt nach ISO 17225-6 [27] für nicht-holzartige Pellets, die wesentliche Eigenschaften und deren Grenzwerte klassifiziert (Tab. 8.1). Die Norm gilt auch für den gewerblichen Bereich. Je nach Pflanzenart und Qualität können Pellets unterschiedlich eingeordnet werden. Qualitätsunterschiede werden in die Eigenschaftsklassen A und B unterteilt. Mischpellets aus Paludi-Biomasse und Holz werden den definierten bzw. undefinierten Mischungen zugeordnet, für die die gleichen Spezifikationen gelten, wie für halmgutartige Biomasse (Tab. 8.1). Für Ballen aus Stroh, Rohrglanzgras und Miscanthus gibt die Norm (ISO 17225-1, Tabelle 10 [59]) spezifische Werte für im Handel einzuhaltende Eigenschaften vor.

Tab. 8.1 Normative Anforderungen von Pellets aus Schilf, Seggen und Rohrglanzgras, nach ISO 17225-6, Tabelle 1 & 2 [27]

| Einheit | | Seggen und Schilf 100%/ Mischungen mit Holz | | Rohrglanzgras 100% |
|-------------------------------------|----------------------------|---|-------------|-------------------------|
| Herkunft und Quelle ¹ | | Halmgutartige Biomasse/definierte und undefinierte Mischungen | | Gräser und Ganzpflanzen |
| Eigenschaftsklasse | | Klasse A | Klasse B | |
| Durchmesser | mm | 6 bis 25 | 6 bis 25 | 6 bis 25 |
| Länge | mm | 3,15 bis 50 | 3,15 bis 50 | 3,15 bis 50 |
| Wassergehalt ² | Ma.-% | ≤ 12 | ≤ 15 | ≤ 12 |
| Aschegehalt | 550 °C Ma.-% _{TS} | ≤ 6 | ≤ 10 | ≤ 8 |
| Mechanische Festigkeit ² | Ma.-% | ≥ 97,5 | ≥ 96,0 | ≥ 96,5 |
| Feingutanteil ² | Ma.-% | ≤ 2,0 | ≤ 3,0 | ≤ 1,0 |
| Additive | Ma.-% _{TS} | ≤ 5 | ≤ 5 | anzugeben |
| Heizwert ² | MJ/kg | ≥ 14,5 | ≥ 14,5 | ≥ 14,5 |
| Schüttdichte ² | 2 kg/m ³ | ≥ 600 | ≥ 600 | ≥ 550 |
| Stickstoff | Ma.-% _{TS} | ≤ 1,5 | ≤ 2 | ≤ 2,0 |
| Schwefel | Ma.-% _{TS} | ≤ 0,20 | ≤ 0,30 | ≤ 0,20 |
| Chlor | Ma.-% _{TS} | ≤ 0,10 | ≤ 0,30 | ≤ 0,10 |
| Asche-Schmelzverhalten | °C | anzugeben | | |

¹ Herkunft nach DIN EN ISO 17225-1, Tabelle 1 [59], ² bei Anlieferung

8.3 Immissionsschutz

Immissionen sind auf Menschen, Tiere, Pflanzen, Boden, Wasser, die Atmosphäre oder auch Kultur- und Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen (TA Luft [30]).

Für biogene Festbrennstoffe aus Paludikultur, einschließlich Pellets, gelten die gleichen gesetzlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich des Immissionsschutzes wie auch für Stroh, Miscanthus und andere Halmgüter aus der Landwirtschaft – Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) [60] und Bundesimmissionsschutzverordnungen (BImSchV) [29, 33]. Die Verordnungen sind an unterschiedliche Anlagengrößen gebunden und enthalten auch Emissionsgrenzwerte, die im laufenden Betrieb einzuhalten sind.

Kleine und mittlere Feuerungsanlagen mit einer Leistung von 4 bis 100 kW_{NWL} sind nicht genehmigungspflichtig, für sie gilt die 1. BImSchV [29], in der Paludi-Biomasse als „Stroh und ähnliche pflanzliche Stoffe, [...]

sowie Pellets aus den vorgenannten Brennstoffen, [...]“ eingeordnet werden kann (§ 3 Nr. 8). Diese Brennstoffe dürfen jedoch nur in Feuerungsanlagen eingesetzt werden, die im Rahmen einer Typprüfung für den jeweiligen Brennstoff geprüft wurden, einschließlich gesonderter Messungen von Dioxin- und Furan-Emissionen (§5 Abs. 3, §4 Abs.7) (Tab. 8.2). Im Falle von Pellets ist zu beachten, dass nur der Einsatz von Pellets mit einem Durchmesser von 6 mm zulässig ist.

Größere Anlagen von 100 kW_{FWL} bis 50 MW_{NWL} sind genehmigungspflichtig, für sie kann ein vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG ohne Öffentlichkeitsbeteiligung erfolgen. Die Emissionsgrenzwerte sind in der 4. BImSchV/TA Luft [30, 33] geregelt (Tab. 8.2). Paludi-Biomasse kann hier in die Gruppe Stroh oder ähnliche pflanzliche Stoffe, z.B. Getreidepflanzen, Gräser und Miscanthus eingeordnet werden (TA Luft, Nr. 5.4.1.3).

Tab. 8.2 Emissionsgrenzwerte für die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen aus Paludikultur nach 1. BImSchV, 4. BImSchV und TA Luft

| Parameter | Einheit | 1. BImSchV für Brennstoffe nach §3, Abs.1, Nr.8 | 4. BImSchV und TA Luft (Nr. 5.4.1.3) | |
|------------------------|-------------------|---|---|-------------------------|
| Leistungsbereich | | ≥4 - <100 kW _{NWL} | 0,1 - <1 MW _{NWL} | ≤1-50 MW _{NWL} |
| Bezugssauerstoff | Vol.-% | 13 | | 11 |
| Staub | g/m ³ | 0,02 | 0,05 | 0,02 |
| Kohlenmonoxid | g/m ³ | 0,25 ¹ | | 0,25 |
| Org. Kohlenwasserstoff | mg/m ³ | – | | 50 |
| Stickstoffoxide | g/m ³ | 0,5 ¹ | 0,5 | 0,4 |
| Schwefeloxide | g/m ³ | – | | 0,35 |
| Chlorwasserstoff | mg/m ³ | – | | 30 |
| Dioxine/Furane | ng/m ³ | 0,1 ¹ | 0,1 (Minimierungsgebot) | |

¹ Anforderungen bei der Typprüfung von Feuerungsanlagen

8.4 Möglichkeiten und Richtlinien der Ascheverwertung

Biomasseaschen werden nach der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) [61] als Abfälle eingeordnet. Abfälle sollten im Sinne einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft umweltverträglich weiterverwertet werden, wenn dies möglich ist (Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)) [62]. Biomasseaschen können als Düngemittel eingesetzt werden, da sie wertvolle Nährstoffe enthalten (Kap. 5.2). Andererseits können diese Aschen Schwermetalle enthalten. Als Düngemittel für die Landwirtschaft sind daher nur nährstoffreiche und schwermetallarmer Aschen (wie z.B. Rost- und Zyklonflugaschen) geeignet [63]. Schwermetallreiche Filteraschen müssen deponiert werden. Biomasseaschen können nur als Düngemittel gehandelt werden, wenn sie einem Düngemitteltyp nach der Düngemittelverordnung (DüMV) [34] entsprechen. Die Einordnung in die verschiedenen Typen erfolgt anhand der Nährstoffzusammensetzung. Zudem müssen die Aschen Schadstoffgrenzen einhalten (DüMV). Entspricht die Asche einem Düngemitteltyp kann sie prinzipiell ebenfalls als Zugabe für Bioabfälle dienen, z.B. als Beigabe zu Kompost (Bioabfallverordnung - BioAbfV) [64], die auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden angewendet werden dürfen. Dann gelten neben den Grenzwerten der DüMV auch weitere der BioAbfV. Im Rahmen des Paludi-Pellet-Projektes wurden Rostaschen von Verbrennungsversuchen mit Schilf- und Seggenpellets hinsichtlich der Verwertbarkeit der Asche untersucht (vergl. Kap. 5.2).



Abb. 8.1 Verbrennungsversuch mit Paludi-Pellets

9. Praxisbeispiel Heizwerk Malchin

Seit Juni 2014 versorgt eine Biomasse-Feuerungsanlage in der Stadt Malchin 543 Haushalte, einen Kindergarten, zwei Schulen und Bürogebäude mit Wärme. Der Brennstoff für das Heizwerk stammt von Niedermoor-Feucht-Grünland am Kummerower See (Mecklenburg-Vorpommern), welches im Rahmen der Landschaftspflege bewirtschaftet wird.

Durch die Wiedervernässung der Neukalener Moorwiesen ab 1992 im Rahmen des Naturschutzgroßprojektes „Peenetal/Peene-Haff-Moor“ veränderte sich die Vegetation auf den Flächen und diese konnte aufgrund des verringerten Futterwertes nur noch begrenzt für die Mutterkühe des Betriebes genutzt werden. Um weiterhin eine Wertschöpfung auf diesen Flächen zu ermöglichen, wurde ab 2009 ein Konzept zur energetischen Nutzung der Biomasse entwickelt [35]. Das Fernwärmenetz der 12 km entfernten Stadt Malchin bot hierfür optimale Voraussetzungen. Durch die Integration einer Biomasse-Feuerungsanlage in das bestehende Erdgas-Heizwerk wurde es möglich, das energetische Potential der halmgutartigen Biomasse – vorwiegend Seggen, Binsen und Rohrglanzgras – zu nutzen.

Insgesamt waren 6 Jahre Planungszeit und 6 Monate Bauzeit für die Umsetzung des Konzeptes erforderlich. Die Heuernte wird in einem mehrstufigen Verfahren (Mähen, Wenden, Schwaden, Pressen, ggf. einzelner Abtransport der Rundballen zum Flächenrand) mit an nassere Bedingungen angepasster Grünlandtechnik (Schlepper mit Breitreifen, leichte Rundballen-Festkammerpresse mit Tandemachse) zwischen Juni und September durchgeführt, wenn der Wasserstand unter Flur fällt. Die Lagerung erfolgt auf dem Landwirtschaftsbetrieb und auf dem Gelände des Heizwerkes. Von 200 ha können rund 800 - 1.200 t Brennstoff bereitgestellt werden, was etwa 350.000 l Heizöl entspricht.

Die Feuerungsanlage der dänischen Firma LIN-KA wird kontinuierlich über einen 24 Rundballen fassenden Bal-

Kenndaten

| | |
|--------------------|---|
| Flächen | Feuchtwiesen Rohrglanzgras- und Seggen-Dominanzbestände |
| Ertrag (2013) | Ø 4,5 bzw. Ø 6 t TM je ha und Jahr |
| Flächenkulisse | ca. 300 ha Niedermoor-Grünland (beerntbarer Anteil witterungsabhängig, Bedarf ca. 200 ha) |
| Erntetechnik | Angepasste Grünlandtechnik |
| Ernteverfahren | Mehrstufiges Heuernteverfahren, Rundballen |
| Nutzung | Integriertes Biomasse-Heizwerk |
| Leistung | 800 kW |
| Hersteller | LIN-KA |
| Investitionskosten | 670.000 € |
| Förderung | EU EFRE 30% |

lenauflöser beschickt. Die Bestückung der Anlage mit Ballen erfolgt im Winter einmal täglich. Das zerkleinerte lose Halmgut gelangt vom Ballenauflöser über ein Doppelförderschneckensystem zur Stokerschnecke in den Brennraum.

Die bereitgestellte Wärme wird in einem Speicher mit einer Kapazität von 24.000 l Wasser gepuffert und dient zur Abdeckung von Grund- und Mittellast. Die bestehenden Erdgaskessel decken Lastspitzen und Ausfallzeiten ab. Insgesamt werden etwa 4.000 MWh Wärme bereitgestellt, das entspricht 5.000 Volllaststunden im Jahr.

Die Abgase werden durch eine Filteranlage mit Multizyklon und Gewebefiltern gereinigt. Die zurückbleibende Asche wird automatisiert ausgetragen und bisher auf der Deponie entsorgt.



Abb. 9.1– 9.8 Nutzung von Biomasse aus Paludikultur im Heizwerk Malchin

Zur Realisierung des Heizwerkes wurde ein Netzwerk regionaler Kooperationspartner gebildet. Die Biomasse wird durch den Landwirtschaftsbetrieb Hans Voigt und die Moorhof GmbH geerntet, Anlagenbetreiber ist die Agrotherm GmbH, Energieversorger ist die Energicos Malchin GmbH. Die Wärme wird von der Stadt Malchin und der Wohnungsgesellschaft WOGEMA abgenommen. Die wissenschaftliche Begleitung erfolgt durch die Universität Greifswald, DUENE e.V. und den Förderverein „Naturschutz im Peenetal“.

Das Heizwerk Malchin vereint auf bisher einmalige Weise Moorschutz, den Erhalt von Kulturlandschaft, nachhaltige Energiebereitstellung und neue Perspektiven für regionale Wertschöpfung. Dabei ergeben sich Synergien in den Bereichen:

- **Bioenergie:** durch die Substitution von Erdgas werden ca. 850 t CO₂-Äq. pro Jahr eingespart,
- **Klimaschutz:** durch die Reduzierung der Treibhausgasemissionen um ca. 5 t CO₂-Äq. pro ha und Jahr gegenüber entwässerten Mooren,
- **Gewässerschutz:** durch die Vermeidung von Nährstoff-Austrägen und Eutrophierung gegenüber entwässerten Mooren,
- **Biodiversität:** durch Erhaltung und Schaffung des Lebensraums moortypischer Tier- und Pflanzenarten,
- **Tourismus:** durch Erhaltung einer vielfältigen, offenen Erholungslandschaft.



Abb. 9.9 Exkursion mit Ludwig Bork auf den Ernteflächen am Kummerower See bei Malchin

„Natürlich stehen wir als Vorreiter noch zahlreichen Herausforderungen gegenüber, aber zukunftsfähige Energiegewinnung erfordert moderne Konzepte, die wirtschaftliche Tragfähigkeit, geringe Umweltbelastung und soziale Verantwortung verbinden. Und genau dies kann Paludikultur hier in Malchin und auch weltweit leisten.“

Ludwig Bork
Geschäftsführer Agrotherm GmbH
Malchiner Biomasseheizwerk

10. Fazit

Die Wiedervernässung und Nutzung bisher entwässerter Moorstandorte ist klima- und umweltentlastend, erzeugt nachwachsende Rohstoffe und kann Einkommensalternativen für strukturschwache Räume schaffen, indem regionale Wertschöpfungskreisläufe gestärkt und Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern reduziert werden.

Biomasse aus Paludikultur eignet sich als Brennstoff und kann unterschiedlich aufbereitet in verschiedenen Feuerungsanlagen eingesetzt werden. Pellets erzielen hinsichtlich der relevanten Parameter der Norm ISO 17225-6 gute bis sehr gute Ergebnisse. Die thermische Verwertung von Paludi-Biomasse ist im Heizwerk Malchin (Mecklenburg-Vorpommern) in der Praxis umgesetzt.

Der Energieertrag der Biomasse entspricht mehreren tausend Litern Heizöl pro ha. Wenn 20 % der Moorflächen Mecklenburg-Vorpommerns wiedervernässt würden, könnte die dort gewonnene Biomasse 400 Paludi-Heizwerke versorgen und so zur Wärmewende beitragen.

Die Brennstoffkosten werden im Wesentlichen durch die Ernte bestimmt. Um die Erntekosten zu reduzieren, müssen eine hohe Auslastung der Erntemaschinen (auch durch Mehrfachnutzung) und eine hohe Flächenleistung erzielt werden. Wo die Qualität der Biomasse es zulässt, ist eine stoffliche Nutzung mit geringerem wirtschaftlichen Risiko verbunden. Im Falle von Dachschilf kann der anfallende Ausputz als Brennstoff genutzt werden.

Auch aus Sicht des Umwelt- und Ressourcenschutzes ist eine energetische Nutzung nur dann sinnvoll, wenn eine stoffliche Verwertung oder eine Kaskadennutzung nicht möglich ist.

Auf Betriebsebene stellen die mit der Nutzung verbundenen Kosten eine Herausforderung dar und ermöglichen nur unter bestimmten Rahmenbedingungen eine wirtschaftliche Nutzung. Durch Paludikultur werden jedoch enorme, von der Gesellschaft und zukünftigen Generationen zu tragende Schadenskosten vermieden, sodass aus volkswirtschaftlicher Sicht diese Art der Nutzung zu bevorzugen ist.

Der Umsetzung dieser nachhaltigen Nutzung stehen jedoch noch Hemmnisse entgegen, die durch Forschung und Politik beseitigt oder abgemildert werden müssen. So sind agrarpolitische Förderstrategien und rechtliche Rahmenbedingungen anzupassen, um bestehende Hemmnisse abzubauen und Paludikultur als landwirtschaftliche Nutzung auf Moorstandorten zu etablieren. Dann können halmgutartige Festbrennstoffe aus nassen Mooren eine zukunftsfähige Energieversorgung sicherstellen, die Klimaschutz, Moorschutz und soziale Verantwortung verbindet.

Ergänzungen und weitere Informationen finden sich im Online-Teil der Broschüre (www.ppb.paludikultur.de) und im umfassenden Fachbuch Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore [2].

Abkürzungen

| | | | |
|----------------------|---|-------------------------------|---|
| [1] | Literaturverweis | l | Liter |
| < | kleiner als | L | Länge |
| > | größer als | landw. | landwirtschaftlich |
| Ø | Durchschnitt, arithmetische Mittel | m ³ | Kubikmeter |
| a | Jahr | Ma.-% | Masseanteil in Prozent |
| Abb. | Abbildung | Ma.-% _{TS} | Masseanteil in Prozent im wasserfreien Zustand |
| AVV | Abfallverzeichnisverordnung | Mech. | mechanisch |
| BImSchG | Bundes-Immissionsschutzgesetz | mg | Milligramm |
| BImSchV | Bundesimmissionsschutzverordnung | m/s | Meter pro Sekunde |
| BioAbfV | Bioabfallverordnung | MW | Megawatt |
| CaO | Calciumoxid | MWh | Megawattstunde |
| Cl | Chlor | n | Anzahl der Stichproben |
| CO | Kohlenmonoxid | N | Stickstoff |
| CO ₂ | Kohlenstoffdioxid | ng | Nanogramm |
| CO ₂ -Äq. | CO ₂ -Äquivalent | NO _x | Stickoxide |
| d | Durchmesser | org. | organisch |
| DBFZ | Deutsches Biomasseforschungszentrum | P ₂ O ₅ | Phosphorpentoxid |
| DT | Erweichungstemperatur | PCDD/F | Dioxine und Furane |
| DUENE | Institut für Dauerhaft Umweltgerechte Entwicklung von Naturräumen der Erde | PM | Feinstaub/Aerosole (Particulate Matter) |
| DüMV | Düngemittelverordnung | RB | Rundballen |
| FFH | Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie | S | Schwefel |
| FM | Frischmasse | s. | siehe |
| g | Gramm | SO ₂ | Schwefeldioxid |
| h | Stunde | St. | Stück |
| ha | Hektar (10.000 m ²) | t | Tonne, 1.000 kg |
| HCl | Chlorwasserstoff | TA Luft | Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft |
| H _u | Heizwert | Tab. | Tabelle |
| Hz | Hertz, Vorgänge pro Sekunde | TGL | Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen der DDR |
| iLUC | indirekte Landnutzungsänderungen | TM | Trockenmasse |
| inkl. | inklusive | U/min | Umdrehungen pro Minute |
| K ₂ O | Kaliumoxid | vergl. | vergleiche |
| Kap. | Kapitel | Vol.-% | Volumenanteil in Prozent |
| kg | Kilogramm | w | Wassergehalt |
| KrWG | Kreislaufwirtschaftsgesetz | W _{FWL} | Watt Feuerungswärmeleistung |
| KTBL | Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft | W _{NWL} | Watt Nennwärmeleistung |
| kWh | Kilowattstunde | Zusätzl. | Zusätzlich |

Literatur

- [1] Bonn A., Berghöfer A., Couwenberg J. et al. (2015): *Klimaschutz durch Wiedervernässung von Kohlenstoffreichen Böden*. In: Hartje V., Wüstemann H. & Bonn A., (Hrsg.) *Naturkapital und Klimapolitik – Synergien und Konflikte (Naturkapital Deutschland – TEEB DE)*. Technischen Universität Berlin, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ, Berlin, Leipzig.
- [2] Wichtmann, W., Schröder, C. & Joosten, H. (Hrsg.) (2016): *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore: Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- [3] Haslam S. M. (1969): *Stem types of Phragmites communis Trin.* *Annals of Botany* 33: 127-131.
- [4] Gryseels M. (1989): *Nature management experiments in a derelict reedmarsh. II: Effects of summer mowing*. *Biological Conservation* 48: 85-99.
- [5] Wichmann S. & Köbbing J.F. (2015): *Common reed for thatching—A first review of the European market*. *Industrial Crops and Products* 77: 1063-1073.
- [6] Timmermann T. (1999): *Anbau von Schilf (Phragmites australis) als ein Weg zur Sanierung von Niedermooren – Eine Fallstudie zu Etablierungsmethoden, Vegetationsentwicklung und Konsequenzen für die Praxis*. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung* 33: 111-143.
- [7] Roth S., Seeger T., Poschold P. et al. (2001): *Etablierung von Röhrrieten und Seggenrieden*. In: Kratz R. & Pfadenhauer J., (Hrsg.) *Ökosystemmanagement für Niedermoore. Strategien und Verfahren zur Renaturierung*. Ulmer, Stuttgart.
- [8] Kersten U., Lindner H., Melzer R. et al. (1999): *Ergebnisse des Projektes „Regeneration und alternative Nutzung von Niedermoorflächen im Landkreis Ostvorpommern“ – Kurzfassung*. Stiftung Odermündung, Anklam.
- [9] Schulz K., Timmermann T., Steffenhagen P. et al. (2011): *The effect of flooding on carbon and nutrient standing stocks of helophyte biomass in rewetted fens*. *Hydrobiologia* 674: 25-40.
- [10] Jensen K. (1998): *Species composition of soil seed bank and seed rain of abandoned wet meadows and their relation to aboveground vegetation*. *Flora* 193: 345-359.
- [11] Grzelak M., Waliszewska B., Sieradzka A. et al. (2011): *Ecological meadow communities with participation of species from sedge (Carex) family*. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering* 56: 122-126.
- [12] El Bassam N. (2010): *Handbook of bioenergy crops: A complete reference to species, development and applications*. Earthscan, London.
- [13] Kaltschmitt, M., Hartmann, H. & Hofbauer, H. (Hrsg.) (2009): *Energie aus Biomasse : Grundlagen, Techniken und Verfahren*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [14] Lewandowski I., Scurlock J. M. O., Lindvall E. et al. (2003): *The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe*. *Biomass and Bioenergy* 25: 335-361.
- [15] Timmermann T., Margoczi K., Takacs G. et al. (2006): *Restoration of peat-forming vegetation by rewetting species-poor fen grasslands*. *Applied Vegetation Science* 9: 241-250.
- [16] Oehmke C. & Wichtmann W. (2016): *Kritische Inhaltsstoffe von Festbrennstoffen aus Paludikultur*. In: Wichtmann W., Schröder C. & Joosten H., (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore: Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- [17] Wichmann S., Dettmann S. & Dahms T. (2016): *Landtechnik für nasse Moore*. In: Wichtmann W., Schröder C. & Joosten H., (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore: Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung*. E. Schweizerbart, Stuttgart.

- [18] Wichmann S. & Schröder C. (2016): *Die „Paludi-Raupe“ im VIP-Projekt (Box in Kap. 5)*. In: Wichtmann W., Schröder C. & Joosten H., (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore: Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- [19] Schröder C., Dahms T. et al. (2015): *Towards large-scale paludiculture: addressing the challenges of biomass harvesting in wet and rewetted peatlands*. *Mires and Peat* 16: 1-18.
- [20] Dahms T. & Wichmann S. (2014): *Vom Halm zum Pellet: Bereitstellungsketten für feste Bioenergieträger von nassen Niedermooren*. In Nelles M. (Hrsg.) *Tagungsband zum 8. Rostocker Bioenergieforum*. Universität Rostock, Rostock.
- [21] KTBL. (2009): *Faustzahlen in der Landwirtschaft*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- [22] KTBL. (2005): *Landschaftspflege 2005*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Münster.
- [23] Wulf A. (2008): *Bericht zum Teilprojekt „Charakterisierung und Analyse der Biobrennstoffe „Schilfrohr“ und „Rohrglanzgras“ und Verbrennungstests“ im Forschungs- und Entwicklungsprojekt Energiebiomasse aus Niedermooren (ENIM)*. unveröffentlicht, Fachhochschule Stralsund.
- [24] Jantzen C. (2013): *Endbericht des Verbundprojektes Vorpommern Initiative Paludikultur, TP 5/3 Energetische Verwertung*. unveröffentlicht, Fachhochschule Stralsund.
- [25] Obernberger I., Brunner T. & Bärnthaler G. (2006): *Chemical properties of solid biofuels – significance and impact*. *Biomass and Bioenergy* 30: 973-982.
- [26] Obernberger I. & Thek G. (2010): *The pellet handbook: The production and thermal utilisation of biomass pellets*. Earthscan, London.
- [27] DIN. (2014): *DIN EN ISO 17225-6:2014-09 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 6: Klassifizierung von nicht-holzartigen Pellets*.
- [28] Sauter P., Billig E., Bosch J. et al. (2013): *Grünlandenergie Havelland. Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland*. Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Leipzig.
- [29] BGBl. (2010): *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes*. (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV).
- [30] BGBl. (2002): *Erste allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz*. (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft).
- [31] Krumm W. (2011): *Biobrennstoffdesign mit Mischungen aus landwirtschaftlichen Reststoffen unter Berücksichtigung der Austauschbarkeit der Brennstoffkomponenten nach regionalem Aufkommen und der Endnutzung in kleinen Anlagen*. Abschlussbericht. Universität Siegen, Siegen.
- [32] Salomo B. & Schneider R. (2015): *Verbrennungsversuche im Rahmen des ESF-Projektes „Paludi-Pellets“*. Bericht. unveröffentlicht, Hochschule Zittau/Görlitz.
- [33] BGBl. (2013): *Vierte Verordnung zur Durchführung des Bundes- Immissionsschutzgesetzes*. (Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen – 4. BImSchV).
- [34] BGBl. (2015): *Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln*. (Düngemittelverordnung – DüMV).
- [35] Wichmann, S. & Wichtmann, W. (Hrsg.) (2009): *Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsprojekt Energiebiomasse aus Niedermooren (ENIM)*. Universität Greifswald, DUENE e.V., Greifswald.

- [36] KTBL (2012): *Anbau und thermische Nutzung von Miscanthus*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- [37] KTBL (2015): *MaKost – Maschinenkosten und Reparaturkosten*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt.
- [38] Wichmann S. (2016): *Commercial viability of paludiculture: A comparison of harvesting reeds for biogas production, direct combustion, and thatching*. Ecological Engineering 18.
- [39] DDR (1975): *Zeitgliederung in der Land- und Forstwirtschaft (TGL 22289)*. Staatsverlag der DDR, Berlin.
- [40] Conseur M. (2006): *Ökonomische Analyse einer Anlage zur Herstellung von Halmgutpellets für die energetische Nutzung in Verbrennungsanlagen und in einer BtL-Produktionsanlage*. Abschlussarbeit. Hochschule Neubrandenburg, Neubrandenburg.
- [41] Ludwig Bork. (2015): *Marktpreise Schilfballen und Heuballen*. Persönliche Kommunikation.
- [42] Wichmann S. (2016): *Betriebswirtschaftliche Aspekte von Paludikultur*. In: Wichtmann W., Schröder C. & Joosten H., (Hrsg.) *Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore: Klimaschutz, Biodiversität, regionale Wertschöpfung*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- [43] C.A.R.M.E.N.e.V. (2015): *Preisindizes*. Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk e.V., Straubing.
- [44] ISO. (2006): *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006)*. International Organization for Standardization, Genf.
- [45] ISO. (2006): *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006)*. International Organization for Standardization, Genf.
- [46] ecoinvent Centre. (2011): *Ecoinvent Database*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, St. Gallen.
- [47] GEMIS. (2014): *Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) 4.9*. Institut für angewandte Ökologie e.V., Freiburg.
- [48] Fritsche U. R., Hennenberg K. J., Hermann A. et al. (2010): *Entwicklung von Strategien und Nachhaltigkeitsstandards zur Zertifizierung von Biomasse für den internationalen Handel: Zusammenfassender Endbericht*. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- [49] Dahms T., Schröder C. & Wichtmann W. (2012): *Pilotprojekte zur Nutzung von Biomasse aus Paludikultur in integrierten Biomasseheizwerken in Mecklenburg-Vorpommern*. In: Nelles M. (Hrsg.) *Tagungsband zum 6. Rostocker Bioenergieforum*. Universität Rostock, Rostock.
- [50] Zeng T., Lenz V. & Pollex A. (2013): *Verwertungskonzepte zur energetischen Nutzung von geeignetem Grünlandaufwuchs im Naturpark Drömling*. In Nelles M. (Hrsg.) *Tagungsband zum 7. Rostocker Bioenergieforum*. Universität Rostock, Rostock.
- [51] Borken J., Patyk A. & Reinhardt G. A. (1999): *Basisdaten für ökologische Bilanzierungen: Einsatz von Nutzfahrzeugen in Transport, Landwirtschaft und Bergbau*. Vieweg Verlag, Wiesbaden.
- [52] Drösler M., Freibauer A., Adelman W. et al. (2011): *Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis – Ergebnisse aus dem BMBF-Verbundprojekt „Klimaschutz – Moornutzungsstrategien“ 2006-2010*. Braunschweig, Institut für Agrarrelevante Klimaforschung (AK).
- [53] Joosten H., Brust K., Couwenberg J. et al. (2013): *Moor-Futures – Integration von weiteren Ökosystemdienstleistungen einschließlich Biodiversität in Kohlenstoffzertifikate – Standard, Methodologie und Übertragbarkeit in an dere Regionen*. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

- [54] Dahms T. & Wichtmann W. (2012): *Life cycle assessment of energy biomass from rewetted peatlands*. In: IPS (Hrsg.) Proceedings of the 14th International Peat Congress "Peatlands in Balance" : International Peat Society (IPS), Stockholm.
- [55] Reichelt F. (2015): *Evaluierung des GEST-Modells zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen aus Mooren*. Abschlussarbeit. Universität Greifswald, Greifswald.
- [56] Couwenberg J. (2007): *The CO₂ emission factor of peat fuel*. IMCG Newsletter 2/2007: 24.
- [57] Succow M. & Joosten H. (Hrsg.) (2001): *Landschaftsökologische Moorkunde*. E. Schweizerbart, Stuttgart.
- [58] Parish, F., Sirin, A., Charman, D. et al. (Hrsg.) (2008): *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change: main report*. Global Environment Centre, Wetlands International Kuala Lumpur, Wageningen.
- [59] DIN. (2014): *DIN EN ISO 17225-1:2014-09 Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*.
- [60] BGBL. (2013): *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge*. (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG).
- [61] BGBL. (2001): *Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis*. (Abfallverzeichnis-Verordnung – AVV).
- [62] BGBL. (2012): *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen*. (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG).
- [63] Obernberger I. & Supancic K. (2009): *Possibilities of ash utilisation from biomass combustion plants*. In: ETA-Renewable Energies. In: ETA-Renewable Energies (Hrsg.) Proceedings of the 17th European Biomass Conference & Exhibition. ETA-Renewable Energies, Florenz.
- [64] BGBL. (2013): *Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden*. (Bioabfallverordnung – BioAbfV).
- [65] Abel S., Couwenberg J., Dahms T. et al. (2013): *The Database of Potential Paludiculture Plants (DPPP) and results for Western Pomerania*. Plant Diversity and Evolution 130: 219-228.
- [66] Heinz S. (2011): *Population biology of Typha latifolia L. and Typha angustifolia L.: establishment, growth and reproduction in a constructed wetland*. Dissertation. Technischen Universität München, München.
- [67] Dubbe D. R., Garver E. G., Pratt D. C. (1988): *Production of Cattail (Typha spp.) Biomass in Minnesota, USA*. Biomass 17: 79-104.

Universität Greifswald
Institut für Botanik und Landschaftsökologie

Partner im Greifswald Moor Centrum
www.greifswaldmoor.de

Weiterführende Informationen

Online-Teil der Broschüre
www.ppb.paludikultur.de

Wichtmann, W., Schröder, C. & Joosten, H. (Hrsg.) (2016):
Paludikultur – Bewirtschaftung nasser Moore. Schweizerbart, Stuttgart, 272 S.

Heizwerk Malchin
www.niedermoor-nutzen.de

www.paludikultur.de

Die energetische Nutzung halmgutartiger Biomasse wiedervernässter Moore führt Klimaschutz und Energiepolitik zusammen. Je nach Produktivität kann Biomasse mit einem Heizöläquivalent von 850 bis 5.000 Liter pro Hektar geerntet werden. Die standortgerechte Biomasseproduktion führt zur Reduktion von Treibhausgasemissionen, ermöglicht Beschäftigung und Wertschöpfung im ländlichen Raum und gewährleistet Versorgungssicherheit und höhere Eigenversorgung. Die vorliegende Broschüre widmet sich der energetischen Nutzung von halmgutartiger Biomasse aus Paludikultur und konzentriert sich dabei auf die Möglichkeiten der thermischen Nutzung als Festbrennstoff.

Die Broschüre wird durch einen Online-Teil mit Berechnungsgrundlagen und Rechentools, weiteren Informationen, Literatur sowie Bildern und Videos ergänzt.

www.ppb.paludikultur.de



GREIFSWALD
MOOR
CENTRUM



Paludikultur
Landwirtschaft
Kohlenstoffzertifikat
Moornutzung
Nass
Biomasse
Emissionsre
Umwelt
Wer
Kohlenst
Energ
Grundwasser
Torferhalt
Artenvielfalt
Dachschilf
Biodiversität
Greifswald
Moore
Klimaschutz
Inland
esen
ung
moor
chut
inland
esen
ung
moor
chut