

Rüben als Biogassubstrat – Teil 2/2

– Konservierung und Rübenkonzepte im Anlagenbetrieb



Nr. II – 32/2018

Zusammengestellt für die Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung) im „Biogas Forum Bayern“ von:



Sebastian Schaffner
KWS SAAT SE



Dr. Fabian Lichti, Rainer Kissel, Diana Andrade
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft – Institut für Landtechnik und Tierhaltung



Kerstin Maurus, Prof. Dr. Marian Kazda
Universität Ulm - Institut für Systematische Botanik und Ökologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
2	Verfahrensübersicht zur Lagerung und Konservierung	3
2.1	Mietenlagerung (Versorgung mit frischen Rüben)	3
2.2	Überwinterung als Bestand in der Erde.....	3
2.3	Silierung	3
2.3.1	Rübensilierung solo	4
2.3.1.1	Silierung von Rübenbrei im Hochbehälter	4
2.3.1.2	Silierung von Rübenbrei im Folienerdbecken	4
2.3.1.3	Silierung unzerkleinerter Rüben im Folienschlauch	5
2.3.1.4	Silierung unzerkleinerter Rüben im Fahrsilo	5
2.3.2	Mischsilagen.....	8
2.4	Vergleich verschiedener Zuckerrübenlagerungsverfahren	9
3	Die Zuckerrübe als Co-Substrat im Fermenter.....	12
3.1	Mehrertrag aus faserreichen Substraten.....	12
3.2	Effizienzsteigerung durch die Co-Silierung von Zuckerrüben mit Stroh.....	14
4	Die Rübe als Spitzenlastsubstrat	15
5	Gasertrag Zuckerrüben.....	17

1 Einleitung

Diese Fachinformation fasst den derzeitigen Stand der technischen Möglichkeiten zur Einlagerung und Konservierung von Zuckerrüben zusammen. Die Darstellung neuester Erkenntnisse aus der Forschung soll deutlich machen, welche biologischen Effekte durch den Einsatz der Zuckerrübe als Co-Substrat erzielt werden können. Im Biogas Forum Bayern ist zum Thema Rüben eine weitere Fachinformation mit folgendem Titel erschienen: „[Rüben als Biogassubstrat Teil 1: Überblick über Verfahrenswege zu Transport und Aufbereitung](#)“.

2 Verfahrensübersicht zur Lagerung und Konservierung

2.1 Mietenlagerung (Versorgung mit frischen Rüben)

Das einfachste und günstigste Verfahren beim Einsatz von Rüben als Biogassubstrat ist die Verwertung frischer Rüben während der Erntekampagne bis ins folgende Frühjahr hinein. Von Mitte September bis Ende November/Dezember kann die Anlage während der Erntekampagne mit frischen Rüben versorgt werden. Abhängig von der Witterung und dem Zustand der Rüben bei Einlagerung können Rüben am Feldrand oder auf der frei werdenden Silofläche bis in den März hinein gelagert werden. Wichtig ist dabei eine Abdeckung mit Vlies als Schutz vor Frost und Regen. Zudem ermöglicht das Vlies den nötigen Gasaustausch.

Hinweise zur Rübenernte und Lagerung:

http://www.liz-online.de/fileadmin/user_upload/pdf/ruebenernteundruebenlagerung.pdf

2.2 Überwinterung als Bestand in der Erde

Die Überwinterung von Zuckerrüben im Feld ist eine interessante Alternative zur Mietenlagerung bzw. Silierung. Bei der Standortauswahl ist darauf zu achten, dass nur die besten und gleichmäßigsten Bestände überwintern sollten, da sich ein guter Rübenbestand mit gesundem Blattwerk bis zu einem gewissen Grad selbst mit dem Blattwerk vor Frost schützen kann. Lückige Bestände und Rüben mit hoher Scheitelhöhe bieten eine große Angriffsfläche für Frost. In der Praxis findet dieses Verfahren kaum Umsetzung und ist aufgrund der Frostgefahr immer ein Risiko. Ist der Bestand durchgefroren, muss eine zügige Weiterverarbeitung der Rüben nach der Rodung durchgeführt werden!

2.3 Silierung

Über einen längeren Zeitraum lassen sich die Rübe nur in Form einer Silage sicher lagern. Zudem bietet die silierte Rübe ein deutlich höheres Methanertragspotenzial als die frische Rübe (WEISSBACH 2009). Ziel einer gezielten Substratversorgung der Biogasanlage muss sein, die Rüben solo einzusilieren. Hier gilt, dass die Rübe in ihren Extremen, entweder als Brei oder unzerkleinert, sehr gut siliert. Dennoch sind auch Mischsilagen weit verbreitet und etabliert. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es mehrere standardisierbare Verfahren zur Rübensilierung gibt. Diese müssen je nach Einsatzmenge und betriebsindividuellem Ablauf einzeln bewertet und ausgewählt werden.

Tab. 1 kann bei der Entscheidung für ein Verfahren behilflich sein:

Tab. 1: Übersicht über mögliche Wege der Rübensilierung (Quelle: KWS 2013)

	Silierung von Rübenbrei		Mischsilagen		Silierung ganzer Rüben	
Kurzbeschreibung	Silierung von homogenem, pumpfähigem Rübenbrei		Mischungen mit Silomais, CCM oder LKS		Unzerkleinerte Rüben im Fahrsilo oder im Folienschlauch	
	Edelstahl- / Betonbehälter	Erdbecken			Fahrsilo	Folienschlauch
Empfohlener Anwendungsbereich	ab ca. 1.500 t bis ca. 3.000 t	ab ca. 3.000 t	bis ca. 1.500 t		ab ca. 1.500 t	bis ca. 1.000 t
Umgang mit Steinen	Keine / wenige	viele	Keine / wenige	viele	Keine / wenige	viele
	„steintolerante“ Häckseltechnik	Steintrennung durch Nasswäsche	Einsatz „steintoleranter“ Häcksel-schaufeln	Steintrennung durch Nasswäsche vor der Einbringung	Einsatz „steintoleranter“ Häcksel-schaufeln	Entsteinung durch Nasswäsche vor Silierung oder Trockenentsteinung nach Silierung

Beim Lagern von Rüben sind die wasserwirtschaftlichen Anforderungen an JGS-Anlagen (Anlagen zum Lagern und Abfüllen von Jauche, Gülle, Festmist und Silagesickersäften) einzuhalten, vgl. § 62 Abs. 1 Satz 3 WHG i.V. mit Anlage 7 AwSV und TRwS 792

2.3.1 Rübensilierung solo

Die Rübensilierung ohne Mischungspartner lässt sich entweder mit einer homogenen Zerkleinerung der Rüben zu Brei oder komplett unzerkleinert realisieren.

2.3.1.1 Silierung von Rübenbrei im Hochbehälter

Vollständig und homogen zerkleinert lassen sich Rüben als Brei entweder im Edelstahlhochsilo oder in beschichteten Betonbehältern gut silieren. Bei der Wahl der Zerkleinerungstechnik muss man genau auf eine feine „Vermahlung“ des Substrates achten, um Entmischungen im Lager zu vermeiden und eine kontinuierliche Beschickung des Fermenters zu gewährleisten. Je nach Steinbesatz im Erntegut lassen sich Holzschredder gut einsetzen, die bei geringem Fremdkörperanteil auch Steine kleinmahlen können. Andere Techniken bedingen eine vorherige Steinabtrennung. Zu beachten ist, dass sich frisch erzeugter Rübenbrei nicht problemlos pumpen lässt. Abhängig von der Technik ist die Zugabe einer gewissen Wassermenge erforderlich. Auch die Entnahme aus dem Hochsilo kann in der Praxis zu Problemen führen. Praktiker berichten, dass ein Entnahmetrichter mit einem zentralen Entnahmeschacht von Vorteil ist.

2.3.1.2 Silierung von Rübenbrei im Folienerdbecken

Die Lagerung von Rübenbrei in Folienerdbecken („Lagunen“) ist derzeit eine viel diskutierte Variante zur Lagerung in der Praxis. Das Verfahren ist als kostengünstig in der Investition und für den Arbeitsablauf zu bewerten, da die Förderung des Rübenbreis voll automatisiert laufen kann. Dabei müssen die regionalen Gegebenheiten zur Genehmigungsfähigkeit beachtet werden. Die durch die meist fehlende Abdeckung hervorgerufenen Energieverluste werden derzeit in verschiedenen Forschungseinrichtungen überprüft (vgl. auch Kapitel 2.4).

Vom KTBL wurde 2017 eine Zusammenstellung bereits gewonnener Erkenntnisse publiziert. Die Entnahme des Breis ist ähnlich anspruchsvoll wie beim Edelstahlsilo: Es ist bei der Einlagerung genau darauf zu achten, dass das Material homogen zerkleinert wird, um Entmischungen zu vermeiden. Zudem ist eine Fangmulde für Fremdstoffe an der Entnahmestelle anzuraten. Eine Anlage zur Lagerung von Rübenbrei ist eine JGS-Anlage, da es sich in diesem Fall um ein Gärsubstrat handelt. Entsprechend Anlage 7 AwSV dürfen für solche Anlagen nur Bauprodukte, Bauarten oder Bausätze verwendet werden, für die die bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweise unter Berücksichtigung wasserrechtlicher Anforderungen vorliegen. Sie müssen flüssigkeitsundurchlässig, standsicher und gegen die zu erwartenden mechanischen, thermischen und chemischen Einflüsse widerstandsfähig sein (Belau, 2017).

2.3.1.3 Silierung unzerkleinerter Rüben im Folienschlauch

Eine flexible Möglichkeit der Silierung unzerkleinerter Rüben bietet der Folienschlauch. Zwar sind die Kosten der Silierung/t höher, die Stundenleistung bei der Einlagerung geringer und die Entnahme erfordert etwas mehr Zeit als bei anderen Silagevarianten, allerdings überzeugt der Folienschlauch durch eine sehr gute Silierqualität. Austretendes Sickerwasser wird sich an der tiefsten Stelle sammeln und muss abgepumpt werden. Zerkleinerte Rüben können nicht im Schlauch gelagert werden, da der massiv auftretende Sickersaft den Schlauch zum Platzen bringt.

2.3.1.4 Silierung unzerkleinerter Rüben im Fahrsilo

Eine vielversprechende Variante Rüben kostengünstig und verlustarm einzulagern, bietet die Einsilierung unzerkleinerter Rüben im Fahrsilo. Die hohe Flexibilität bei der Nutzung des Fahrsilos sowie die Möglichkeit zur Kombination der hohen Schlagkraft von Ernte- und Einlagerungskette stellen nur einige Vorteile dieses Verfahrens dar.

Luftdichter Abschluss und ausreichende Lagerhöhe

Ein absolut luftdichter Abschluss des Siliergutes mit verschiedenen Silofolien und Vogelschutznetzen ist Voraussetzung für eine erfolgreiche Silierung. Die Rübenmiete kann nicht mit Traktoren oder anderen Geräten rückverdichtet werden! Das Befahren der Rüben würde die Rüben zudem stark beschädigen und so die anfallende Sickersaftmenge deutlich erhöhen. Neben dem luftdichten Abschluss ist eine „Eigen-Verdichtung“ der Rüben durch eine Lagerhöhe von mind. ca. 5 m eine weitere Voraussetzung. Lagerhöhen über 7 m sind technisch schwer zu erreichen und bedingen einen noch stärkeren Saftfluss. Das Verfahren eignet sich für Rübenmengen ab ca. 1.500 Tonnen.

Schon bei der Einlagerung der Rüben sollte darauf geachtet werden, dass eine Silo- oder Unterziehfolie nach Abschluss der Einlagerung am Rand, ca. 1 m unter die Rüben ragt. Diese Folie muss zum luftdichten Abschluss der Miete anschließend nach oben umgeschlagen werden. Zum besseren Begehen der Miete sollte zunächst ein Vogelschutznetz aufgelegt werden. Die komplette Miete sollte dann mit Unterziehfolie, Silofolie und Vogelschutznetz intensiv abgedeckt werden. Erst so kann sichergestellt werden, dass die Rüben luftdicht abgeschlossen sind und bei der Silierung entstehendes CO₂ nicht durch den Luftpumpeneffekt entweichen kann.

Eine derartig abgedeckte Rübe siliert so – je nach Temperatur - innerhalb von ca. 4 Wochen vollständig durch. Während des Siliervorgangs werden Rüben weicher. Bedingt durch den

hohen Eigendruck bei einer Lagerhöhe von ca. 5 - 7 m sackt die Miete auf ungefähr die Hälfte der ursprünglichen Einlagerungshöhe zusammen. Die Hohlräume zwischen den Rüben verschwinden, da sich die weichen Rüben einander anpassen. Es entsteht eine stehende Anschnittwand, die keine Luft mehr nach Öffnung der Silage ins Innere Vordringen lässt. Die Abdeckfolien müssen regelmäßig kontrolliert und nachgespannt werden!



Abb. 1: Dicht gelagerte und silierte Rüben Foto: KWS



Abb. 2: Rübensilo im Juni 2012, Eine echte Anschnittwand, Foto: KWS

Nacherwärmung

Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass die Gefahr der Nacherwärmung einer Rübensilage aufgrund der fehlenden Zerkleinerung und der damit verbundenen geringen Angriffsfläche bei ordnungsgemäßem Vorschub insgesamt gering ist. Allerdings ist aufgrund der ungenügenden Rückverfestigung in der obersten Schicht (ca. 50 cm) die Gefahr des Verderbs in diesem Bereich recht hoch. Durch ein entsprechendes Silomanagement können diese Verluste reduziert werden.

Anfall und Verwertung von Sickersaft

Rüben bestehen neben Zucker auch zu einem großen Teil aus Wasser und abhängig von der Einlagerungshöhe entsteht im Zuge der Silierung auch Sickersaft. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass über den gesamten Zeitraum der Lagerung etwa 30 bis 40 % Sickersaft bezogen auf die eingelagerte Frischmasse abgegeben werden kann (Abb. 3) Der größte Saftanfall erfolgt während der drei- bis vierwöchigen Silierphase und nimmt dann kontinuierlich mit der Entnahme ab. In der Praxis zeigt sich, dass gewaschene Rüben deutlich mehr Sickersaft abgeben als ungewaschene.

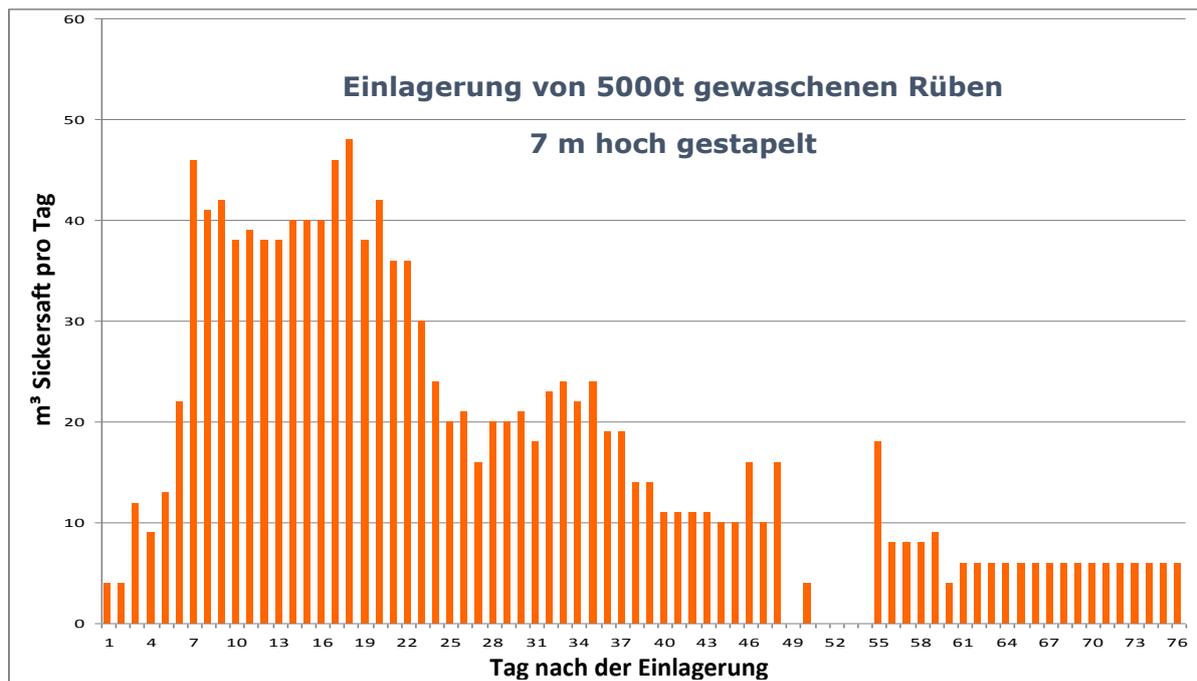


Abb. 3: Sickersaftmengen seit Einlagerung von 5000 t gewaschenen Rüben im November 2011, Quelle: KWS gemäß Praxiserhebung Bioenergie Harmelingen

Durch die gelösten organischen Bestandteile weist der Sickersaft TS-Gehalte zwischen 14 und 16 % auf. Sein pH liegt bei ca. 3,5. Ein m³ Saft liefert zwischen 120 und 140 m³ Biogas mit einem Methangehalt um 54 %. Der Saft sollte daher unbedingt aufgefangen werden und kann durch Pumpen ohne weitere Aufbereitung kontrolliert in den Fermentationsablauf gelangen. Hierbei ist besonders interessant, dass der hochverdauliche Sickersaft auch in der kalten Lagerform des gasdichten Endlagers vollständig vergären kann. Muss an der Biogasanlage eine Mindestverweildauer (z.B. aus EEG oder Genehmigung) eingehalten werden, ist zu klären, ob eine direkte Einleitung in das Endlager zulässig ist.

Die Verwertung des Sickersaftes in der Anlage muss mit großem Fingerspitzengefühl erfolgen! Die gesamte Futtermenge muss angepasst werden, eine Verteilung auf möglichst alle Gärbehälter ist anzuraten. Die im Saft konzentrierten und schnell verdaulichen Säuren können bei unsachgemäßer Dosierung zur Übersäuerung führen.

Um einen zügigen Abfluss des Sickersaftes zu gewährleisten, sind Gefälle von bis zu 5 % eingebaut. Der Saft fließt größtenteils unter der Miete zusammen und entlang einer Rinne zum Sickerschacht, wird hier an einer zentralen Stelle im Vorlager aufgenommen und direkt in die einzelnen Gärbehälter gepumpt. Bei angepasster Dosierung werden die Sickersäfte im alkalischen Milieu sofort neutralisiert und fermentieren rasch.

Großtechnische Umsetzung möglich

Das Verfahren der Einsilierung unzerkleinerter Rüben im Fahrsilo ist vor allem bei großen Biogasanlagen verbreitet. Mit neuer Technik und zum Teil speziell dafür entwickelten Fahrsilos ist es heute bereits möglich Mengen im Maßstab von 5000 bis 10.000 t und mehr einzulagern (Abb. 4).



Abb. 4: Einlagerung mit dem BeetLoader-System von Grimme, Foto: KWS

2.3.2 Mischsilagen

Mischsilagen (Co-Silierung) bedingen immer einen Kompromiss für den einen oder anderen Mischungspartner und stellen hohe Ansprüche an die Logistik und Kombination der Ernteketten. Werden Mais und Rüben gemeinsam siliert, muss man sich für den optimalen Erntetermin einer Kultur entscheiden. Da meist der Mais den Termin der Ernte Ende September bis Anfang Oktober vorgibt, werden der Rübe 6 bis 8 Wochen Vegetationszeit und damit Ertrag genommen! Die Mischsilage von Mais und Rüben ist dennoch eine einfache und relativ kostengünstige Variante. Legt man den Fokus im Ertrag auf die Rübe, so bietet es sich an, den Mais als CCM (Corn Cob Mix) oder LKS (Lieschkolbenschrot) zu ernten. Klar ist, dass der Ertragsverlust dann beim Mais liegt. CCM oder LKS bieten aber aufgrund der hohen TS des Materials die Möglichkeit mit „wenig Mais viel Rübe“ zu silieren. Rechnerisch ist bei einer TS des LKS von 60 % ein Anteil von bis zu 70 % Rübe in der Mischung denkbar. Der LKS könnte dann von weiter entfernten Schlägen mit guter Transportwürdigkeit geerntet werden. In Mischungen können die Rüben direkt gebröckelt einsiliert werden, da für die Silierung von gebröckelten Rüben ein Mischungspartner erforderlich ist, der den austretenden Saft bindet. Die praktische Umsetzung erfolgt auf vielfältige Weise. Rüben können zerkleinert oder unzerkleinert in die Mischung gebracht werden. Vor dem Eintrag in den Fermenter sollte jedoch eine Zerkleinerung erfolgen. Auch Mischungen mit Stroh oder Gras sind in der Praxis erfolgreich. Eine Mischung mit Maisstroh als Reststoff der Körnermaiserzeugung ist eine neue interessante Variante. Auch der Erntezeitpunkt passt besser zur Vegetation der Rübe. Sowohl Mischungen mit zerkleinerten Rüben als auch mit ganzen Rüben sind denkbar. In jedem Fall sollten eine Unterlage aus Maisstroh ins Silo gelegt werden um den Sickersaft der Rübe aufzufangen. Die Höhe ist je nach Menge anzupassen. Die Gesamtmischung im Silo sollte einen TS-Gehalt von ca. 30% erreichen.



Abb. 5: Mischung Rübe und Maisstroh Foto: KWS Abb. 6: Unterlage aus Maisstroh Foto: KWS

Unbedingt zu beachten ist hierbei, dass der anfallende Sickersaft aggressiv gegenüber Beton und Stahl wirkt. Vor allem in den Luftwechselzonen zeigt sich auch im Silo nach wenigen Jahren deutlich, wo Sickersaft entlang geflossen ist.

2.4 Vergleich verschiedener Zuckerrübenlagerungsverfahren

Seit 2015 werden an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft am Institut für Landtechnik und Tierhaltung Versuche zur Einlagerung von Zuckerrüben zur Biogasproduktion durchgeführt.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Frischmasseverluste von der Art der Einlagerung stark beeinflusst werden. Nach zehn Monaten Einlagerungszeit wurden Schwankungen zwischen 3 und 17 % festgestellt. Die höchsten Verluste traten bei offen gelagertem Zuckerrübenbrei und bei den drei Varianten mit ganzen Rüben auf (offen gelagert bzw. mit Stroh- oder Folienabdeckung). Die geringsten Verluste lieferten die luftdicht abgedeckten Breivarianten. Die Höhe der Verluste war dabei unabhängig von Bodenart und Reinigungsgrad, welcher u.a. auch geprüft wurde. Bei luftdicht gelagertem Brei, dem Stroh beigemischt wurde, lagen die Verluste geringfügig höher als bei purem Brei mit gleicher Abdeckung (Abb.7). Im zweiten Versuchsjahr (ohne Abbildung) konnten die in 2016 gemachten Beobachtungen hinsichtlich der Frischmasseverluste bestätigt werden. Lediglich die Varianten, denen Stroh beigemischt war, wiesen 2017 höhere Verluste auf (um 8 %). Allerdings wurde das Stroh im zweiten Jahr zusammen mit den Rüben in die Lagerbehälter gehäckselt, während das Material 2016 geschichtet eingefüllt wurde.

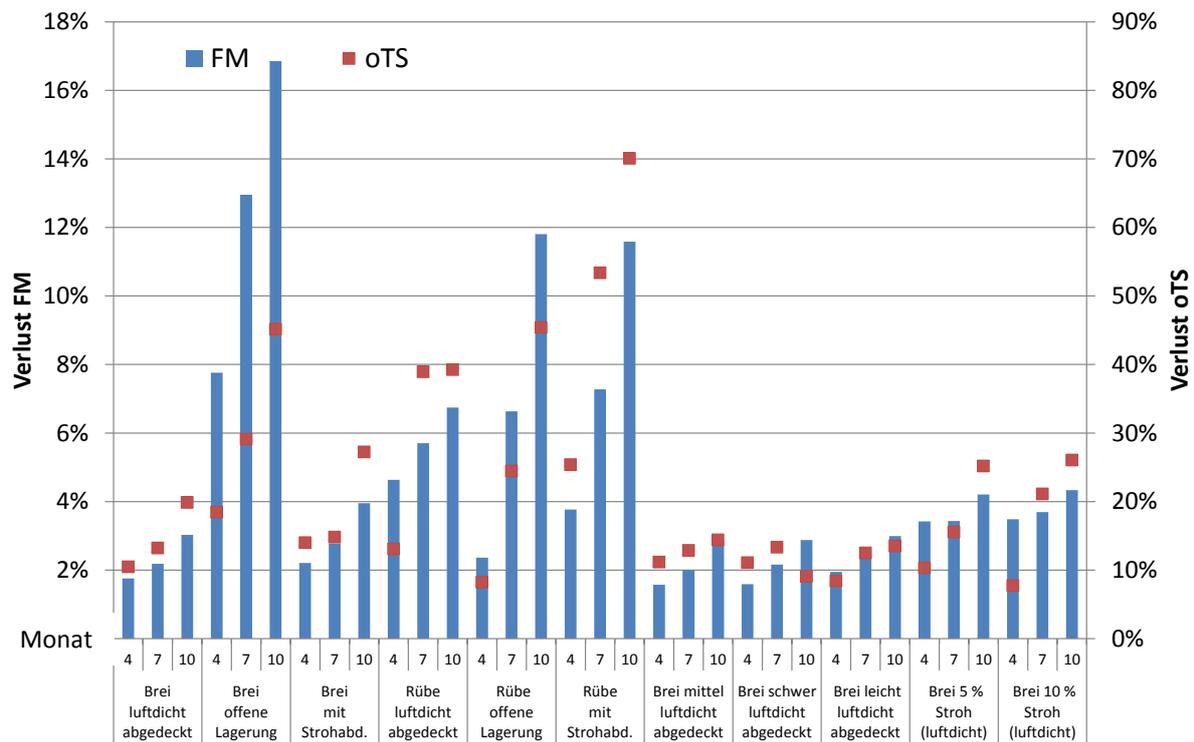


Abb. 7: Frischmasse und oTS-Verluste (vorläufig) von Zuckerrüben in Abhängigkeit von Abdeckung, Standort, Strohanteil und Zerkleinerung nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer

In Abb. 8 sind die durch die Lagerung verursachten Methanertragsverluste einzelner Varianten dargestellt. Diese ergeben sich aus den Gasausbeuten und den Frischmasseverlusten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer (vgl. Tab. 2).

Tab. 2: Gaserträge und Frischmasseverluste nach 4 und 10 Monaten Lagerungsdauer (2017)

Variante	Methanausbeuten (L /kg FM)			Frischmasseverluste (%)	
	Beginn	4 Monate	10 Monate	4 Monate	10 Monate
Rübenbrei (luftdicht abgedeckt)	79	82	81	1,7	3,3
Rübenbrei (offen)	79	77	78	5,1	11,9
Rübenbrei (Strohabdeckung)	79	73	78	2,3	4,7
Rübe (luftdicht abgedeckt)	79	76	71	0,9	6,4
Rübenbrei (2,4 % Strohanteil)	83	88	91	4,1	8,9
Rübenbrei (5 % Strohanteil)	88	-	93	4,0	8,1
Rübenblatt	37	35	36	3,7	8,5

Bei der Auswertung wurden die aus einem 100 L Versuchssilo erzielten Methanerträge zu Beginn des Versuchs mit den Ausbeuten des Silos nach vier bzw. sieben Monaten verglichen, so dass bei den Ergebnissen Gewichtsverlust, Strohanteil oder Verschmutzungsgrad immer mit berücksichtigt sind. Bei der luftdicht abgedeckten Breivariante erhöhte sich das Methanpotential zunächst. Dies entspricht den Ergebnissen von Weißbach (2009), demzufolge die Methanausbeute durch die Umwandlung von Zucker

zu Alkohol ansteigt. Jedoch wird dieser positive Effekt durch die nach 10 Monaten auftretenden Lagerverluste wieder kompensiert. Diese machen sich bei offenem bzw. mit Stroh abgedecktem Rübenbrei bereits nach vier Monaten Lagerdauer bemerkbar. Hier konnte aus den Silos um 8 % weniger Methan gewonnen werden als durch das Ausgangsmaterial. Nach zehn Monaten stiegen die Methanverluste bei offen gelagertem Brei auf über 12 % an. Ganze Rüben verhielten sich bezüglich der Methanverluste unabhängig von der Art der Abdeckung weitgehend ähnlich, weshalb hier nur die luftdicht abgedeckte Variante dargestellt ist. Hier traten nach vier Monaten Verluste von 4 % und nach zehn Monaten von 16 % auf. Überraschend positiv fällt das Ergebnis der mit Stroh eingelagerten Varianten aus. Bei einem Strohananteil von 2,4 % wurden auch nach zehnmonatiger Lagerung praktisch keine Methanverluste festgestellt. Wurden 5 % Stroh beigemischt traten nach zehn Monaten Methanverluste von 3 % auf.

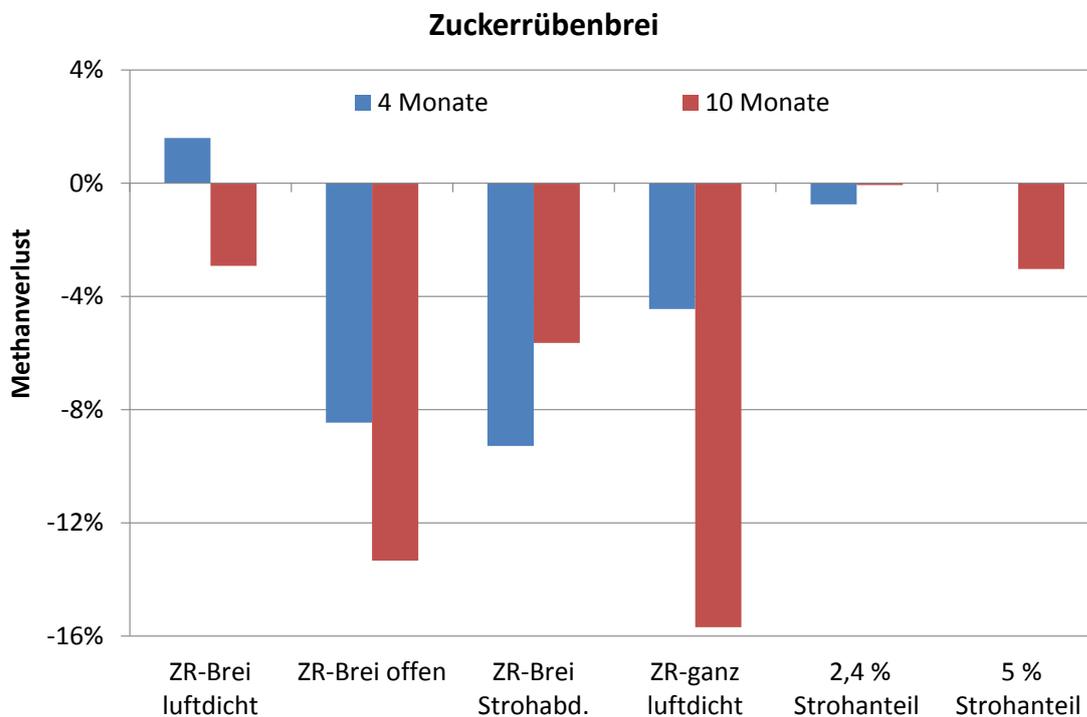


Abb. 8: Methanertragspotential ausgewählter Varianten in Abhängigkeit der Lagerdauer

Ziel der Lagerungsversuche war, in einer Vielzahl von Varianten das Verlustpotential unterschiedlicher Lagerungsvarianten vergleichen zu können. Zu berücksichtigen ist daher, dass die zur Einlagerung verwendeten Behältnisse ausschließlich die in den obersten 80 cm einer Siloanlage auftretenden Verluste widerspiegeln. Da die Verluste in tieferen Schichten geringer ausfallen dürften, bedeutet ein Methanverlust von 10 % in der oberen Schicht eines 5 m hohen Breilagers bezogen auf die Gesamtmasse einen Verlust von 1 – 2 %. Dies gilt nicht für eingelagerte ganze Rüben, da nicht bekannt ist wie viel der in den tieferen Schichten eingeschlossenen Luft veratmet wird und wie viel davon entweicht.

3 Die Zuckerrübe als Co-Substrat im Fermenter

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse wurden im Labormaßstab ermittelt. Eine Übertragung in die Biogas-Praxis ist noch zu prüfen.

3.1 Kombination mit faserreichen Substraten

Die Monovergärung von faserreichen Substraten in Biogasanlagen ist ein schwieriger Prozess. Die auftretenden Probleme, wie Einschränkung der Pufferkapazität oder Nährstoffarmut führen zu einer geringen Methanproduktionsrate. Substrate wie beispielsweise Grassilage oder Grünschnitt, enthalten außerdem wenige wasserlösliche Kohlenhydrate und einen hohen Anteil an Proteinen. Die Methanbildungsrate kann auch durch den hohen Anteil an Stickstoff belastet werden. Um diese Substrate dennoch in Biogasanlagen zu nutzen, stellt sich die Frage, in wie weit sich die Biogasausbeute und die Prozessstabilität durch die Verwendung von schnell verfügbaren Co-Substraten steigern lässt. Diese Thematik wurde in einem vom BMEL und seiner Agentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR) geförderten Vorhaben an der Universität Ulm bearbeitet.

Zuckerrüben zählen zu diesen schnell vergärbaren Substraten und gelten als regelrechte „Biogas-Booster“ (Bensmann, 2010). Der Rübe wird ein hohes Potential zugesprochen, um verschiedenste landwirtschaftliche Substrate für die Biogasproduktion nutzbar zu machen, indem deren Abbau durch die schnell verfügbare Kohlenhydrate der Zuckerrübe verbessert und beschleunigt werden kann. Dies wurde an der Universität Ulm in Batch- und kontinuierlichen Fermentern (12 Liter, 50 Tage Verweilzeit) durchgeführt. In den Versuchen wurde Zuckerrübensilage als Co-Substrat in unterschiedlichen Verhältnissen zusammen mit Mais- bzw. faserreicher Grassilage vergoren.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Gärversuche mit dem theoretischen Ertrag der jeweiligen Substrate verglichen. Die theoretischen Erträge der Mais- bzw. Grassilage stellen dabei die Ergebnisse der durchgeführten Monovergärung dar. Der theoretische Ertrag für Zuckerrübensilage wird durch Zahlen des KTBL gezeigt. Durch die Beimischung von Zuckerrübensilage zu Maissilage entsteht erst ab einem überwiegenden Zuckerrübenanteil (oTS-Verhältnis von Mais- und Zuckerrübensilage: 1:3) mehr Biogasvolumen (Abb. 10a). Auch hinsichtlich der Dynamik der Biogasbildung lassen sich bei einem mehrheitlichen Maissilageanteil keine Vorteile durch die Co-Vergärung von Mais mit Zuckerrübensilage erkennen.

Sehr viel besser fielen die Ergebnisse bei den Mischungen mit stark faserreichen Substraten aus, deren Biogas- und Methanertrag durch die Zugabe von Zuckerrübensilage gesteigert werden konnte. Bereits eine Beimischung von 14 % Zuckerrübensilage (oTS-Verhältnis von Gras- und Zuckerrübensilage: 6:1) zu faserreicher Grassilage (TS 57 %) führte zu einem Biogas-Mehrertrag von 17 % gegenüber der Biogasausbeute bei einer Monovergärung von Grassilage (Abb. 10b). Durch die Zuckerrübensilage konnte außerdem die Biogas- und Methanproduktion beschleunigt werden. Die Verweilzeit faserreicher Substrate kann somit durch den Einsatz von Zuckerrübensilage als Co-Substrat reduziert werden.

Die Möglichkeit, den Methanertrag bereits bei geringer Beimischung der Zuckerrübensilage zu steigern, ist für die praktische Anwendung auch deshalb ein wichtiges Ergebnis, da es bei

hoher Zuckerrübenzufuhr zu Problemen der Fermenterversauerung durch Säureakkumulation kommen kann.

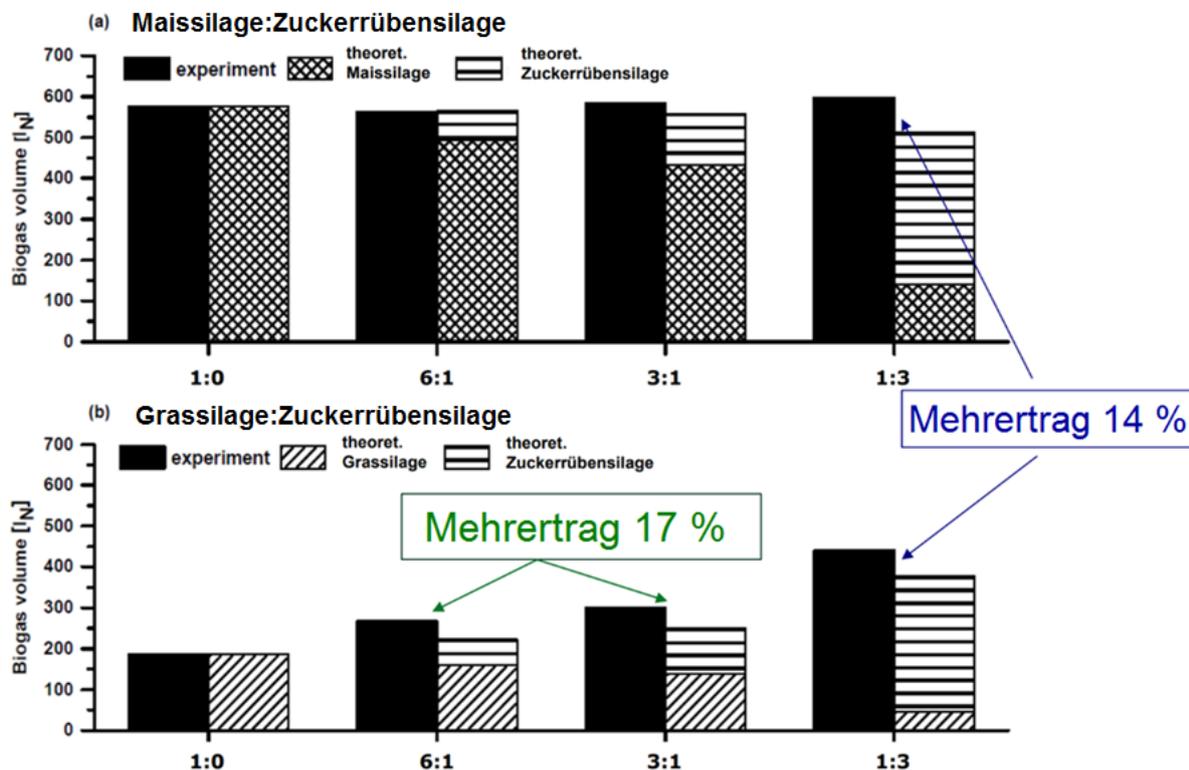


Abb. 10: Durch Versuche und Kennzahlen (KTBL 2007) berechneter, theoretischer Biogasertrag im Vergleich zu den Erträgen nach 50 Tagen im Versuch mit der Mischung von Mais- (a) und Grassilage (b) mit Zuckerrübensilage in unterschiedlichen Verhältnissen

Die Verbesserung und Beschleunigung des Substratabbaus faserreicher Substrate und die damit verbundene Erhöhung der Methanausbeute wird als sogenannter „priming effect“ bezeichnet. Die Zuckerrübe begünstigt dabei die allgemeine mikrobielle Aktivität, was dafür sorgt, dass ein höherer Gesamtertrag entsteht und auch die Co-Substrate besser abgebaut werden können (Ahmed et al., 2016).

Insgesamt betrachtet bietet die Zuckerrübe ein großes Biogaspotential für den kombinierten Einsatz mit faserreichen Substraten. Schon geringe Mengen an Zuckerrübensilage deuten auf Vorteile hinsichtlich des Biomasseabbaus und dessen Beschleunigung hin.

3.2 Effizienzsteigerung durch die Co-Silierung von Zuckerrüben mit Stroh

Wie bereits im Kapitel 2.3.2 Mischsilagen erwähnt, kann die Cosilierung von Zuckerrüben viele Vorteile bei der Substratlagerung mit sich bringen. Wie sich diese Art der Konservierung auf wesentliche gärobiologische und verfahrenstechnische Parameter auswirkt, soll im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts am Institut für Landtechnik und Tierhaltung geklärt werden. Es werden Laborversuche mit der wissenschaftlichen Begleitung von Praxisanlagen kombiniert, um den Einsatz von Zuckerrüben zur flexiblen Stromproduktion zu optimieren. Dabei sollen Effekte auf die Methanbildungsrate sowie Synergien durch die Nutzung mit landwirtschaftlichen Koppelprodukten geprüft werden.

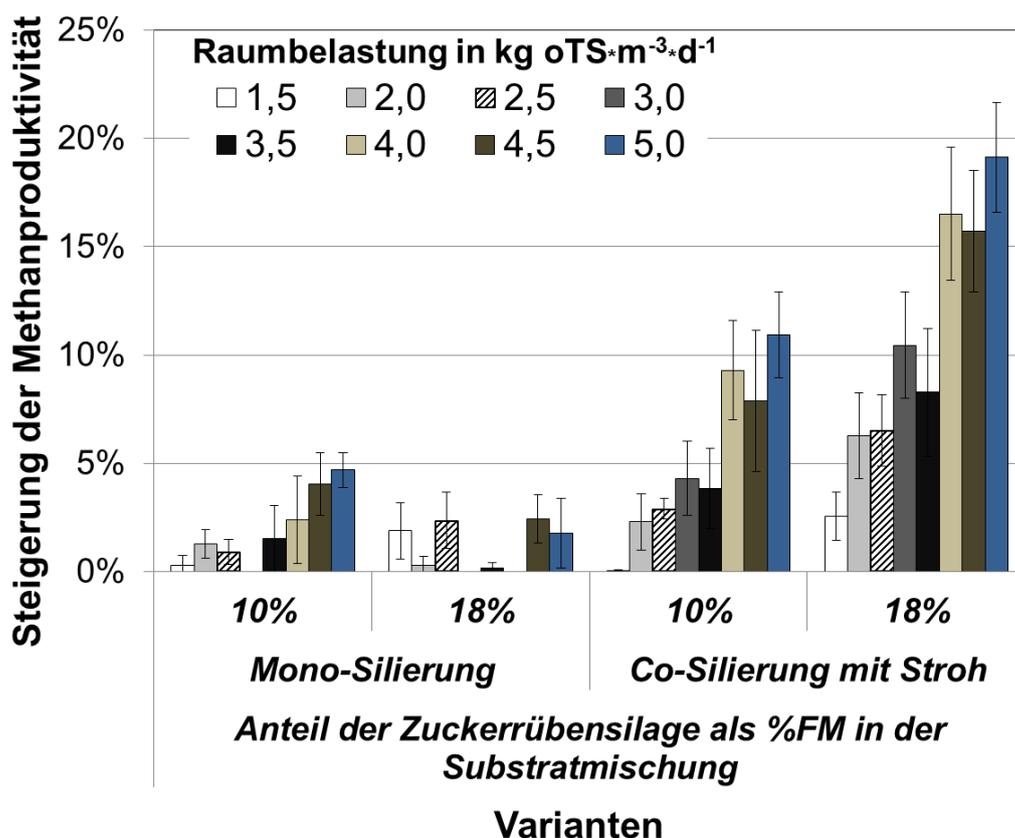
Zwei Silagevarianten werden in einstufigen, stehenden Durchflussfermentern (28 Liter Arbeitsvolumen) bei semi-kontinuierlicher Betriebsweise getestet: 1. reine Zuckerrübensilage und 2. Zuckerrüben mit Stroh (5 % FM). Gleichzeitig wird der Einfluss des Zuckerrübenanteils in der Substratmischung (10 und 18 % FM) auf die Biogasproduktion untersucht.

Es werden zwei Anlagekonstellationen simuliert, die relevante Praxismodelle in Bayern repräsentieren sollen. Anlagentyp 1 entspricht einer Hofanlage mit 80 % Rindergülle und 20 % Mais- und Grassilage in der Substratmischung (bezogen auf Frischmasse). Anlagentyp 2 kommt einer typischen NawaRo-Biogasanlage gleich. Die Substratmischung besteht aus Mais- und Grassilage.

Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Einsatz von Zuckerrüben-Stroh Silage die Leistung v. Anlagentyp 1 verbessern kann. Bei einer Raumbelastung von $5,0 \text{ kg oTS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ konnte die Produktivität um 15 bis ca. 23 % im Vergleich zur Variante ohne Zuckerrübensilage gesteigert werden. Das bedeutet, dass durch die Verwendung von Zuckerrüben-Stroh Silage in einem Reaktor bis zu 23 % mehr Methan in der gleichen Zeit produziert werden konnte. Bei reiner Zuckerrübensilage lag diese Steigerung deutlich niedriger (siehe Abb. 12).

Die Untersuchung der Silagequalität zeigte höhere Gehalte an flüchtigen Fettsäuren im Silo der Zuckerrüben-Stroh-Variante (bis zu 160 % im Vergleich zur reinen Zuckerrübensilage). Der während der Silierung anfallende Sickersaft wird vom Stroh aufgenommen. Dadurch könnte die Vergärbarkeit der Lignozellulosekomponenten im Stroh begünstigt worden sein. Beide Effekte dürften zu einer Steigerung der Abbaugeschwindigkeit geführt haben.

In den laufenden Untersuchungen wird der Einfluss von Zuckerrüben zur Biogaserzeugung in der zweiten Anlagenkonstellation „typische NawaRo-Biogasanlage“ geprüft. Die Substratmischung wird aus Maissilage und Grassilage zusammengestellt. Außerdem wird parallel eine Variante mit 30 % Rindergülle und 70 % NawaRo geprüft.



Substratmischung als Anteil von der gesamten zugeführten Frischmasse

Variante	Maissilage	Grassilage	Rindergülle	Zuckerrübensilage	Zuckerrüben-Stroh Silage
Referenz	14%	6%	80%	0%	0%
Mono-Silierung	Zuckerrüben (10 %FM)	8%	2%	80%	10%
	Zuckerrüben (18 %FM)	1%	1%	80%	18%
Co-Silierung	Zuckerrüben-Stroh (10 %FM)	8%	2%	80%	10%
	Zuckerrüben-Stroh (18 %FM)	1%	1%	80%	18%

Abb. 12 Steigerung der Methanproduktivität ($m^3_N CH_4 \cdot m^{-3} Fermentervolumen \cdot d^{-1}$) im Durchflussversuch durch die Covergärung mit Zuckerrübensilage im Vergleich zur Referenz (Substratmischung ohne Zuckerrübensilage) bei steigender Raumbelastung. Einfluss der Cosilierung Zuckerrüben mit Stroh (5 % FM in der Silage) auf den Biogasprozess. Mittelwert während des Steady State, n = 6.

4 Die Rübe als Spitzenlastsubstrat

Aktuell beschäftigt sich die Forschungsgruppe an der Universität Ulm mit dem Einsatz der Zuckerrübensilage für eine zeitlich vorhersehbare Biogaserzeugung, die einen Beitrag zur Flexibilisierung der Biogasanlagen leisten soll.

Die Stromerzeugung durch Biogasanlagen stellt eine wesentliche Option zur bedarfsgerechten Energiebereitstellung (Strom und Wärme) aus regenerativen Quellen dar. Der Einsatz der Zuckerrübe wird gerade als Alternative zu Modellen der gezielten Speicherung des laufend produzierten Biogases untersucht. Neben der Einsparung von großen Speicherkapazitäten liegt der Vorteil der Zuckerrübe vor allem in der kosteneffektiven

bedarfsgerechten Stromerzeugung und in der möglichen Unterstützung des Netzes bei Strombedarfsspitzenlasten.

Durch ein spezielles Substratmanagement auf Zuckerrübenbasis kann eine teure Erweiterung der Gasspeicher in Bestandsanlagen umgangen werden. Es werden hier nur BHKW-Kapazitäten vorgehalten.

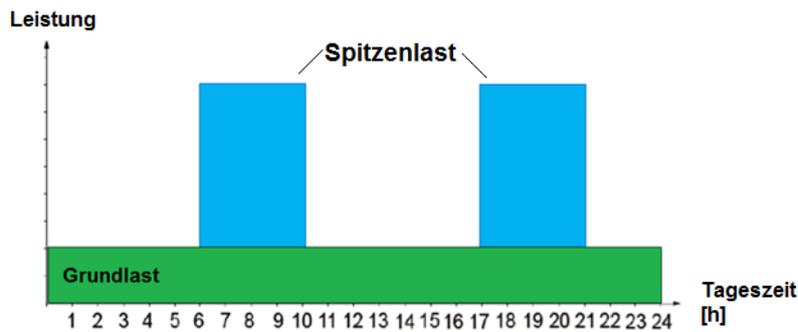


Abb. 13: Beispiel von Strombedarfsspitzen („Doppelhöcker“), die durch bedarfsgerechte Biogasproduktion abgefangen werden können

Für die Versuche an der Universität Ulm wurden die Versuchsfermenter stündlich mit Maissilage und zweimal täglich jeweils im Abstand von 12 Stunden mit Zuckerrübensilage gefüttert. Die Zugabe der Zuckerrübensilage wurde umgehend in einer steigenden Biogasproduktion sichtbar, welche direkt vom Anteil der gegebenen Zuckerrübensilage abhing. Ohne Verzögerung steigen sowohl die Biogasbildungsrate als auch die Methanbildungsrate für einen Zeitraum von circa zwei Stunden nach der Zuckerrübenfütterung an. Bei hohen Konzentrationen an Zuckerrübensilage sinkt zwar die Methankonzentration im Biogas, ergibt aber durch die insgesamt größere Methanproduktion einen Mehrertrag an Methan. Abbildung 14 zeigt einen Ausschnitt von drei Tagen während der stoßweisen Zufuhr von Zuckerrübensilage. Die Ausschläge der Biogas- und Methanbildungsrate wiederholen sich alle 12 Stunden jeweils nach der Zuckerrübenzufuhr. Für die Versuchsfermenter ergab sich beispielsweise eine Verdreifachung der produzierten Methanmenge für die Spitzenproduktion bei der höchsten eingesetzten Zuckerrübenkonzentration. Und auch ein geringeres Mischungsverhältnis von 3:1 (Maissilage:Zuckerrübensilage) liefert bereits einen Zuwachs von 20-30 % mehr Methan nach der Zuckerrübenzufuhr.

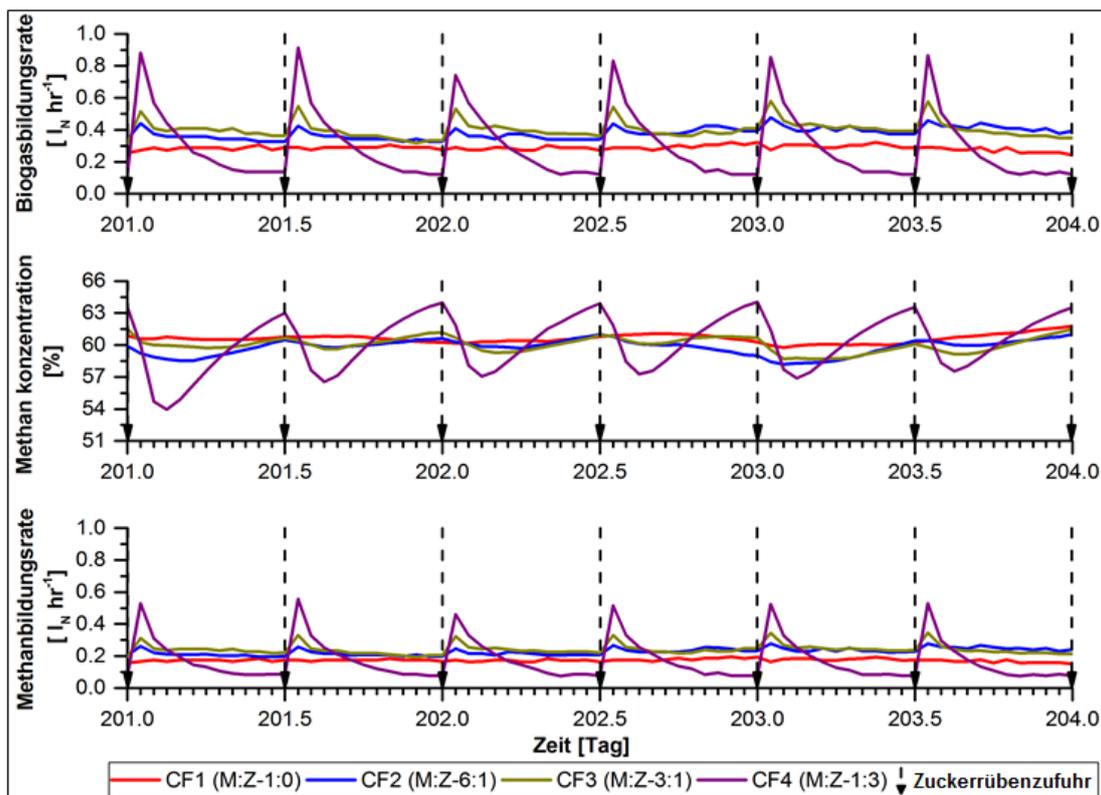


Abb. 14: Biogasbildungsrate, Methankonzentration und Methanbildungsrate in einem Zeitraum von vier Tagen während der stoßweisen Zuckerrübenfütterung; CF=kontinuierlicher Fermenter, M = Maissilage, Z = Zuckerrübensilage, Verhältnisse auf oTS-Basis

Die Steigerung der Methanproduktion unmittelbar nach Zufuhr von Zuckerrübensilage ist ein weiteres Ergebnis für die Umsetzung eines solchen flexibilisierten Verfahrens in der Praxis. Neue Erkenntnisse zeigen außerdem, dass hohe Anteile an Zuckerrübensilage (Verhältnis M:Z 1:3) bei einer stoßweisen Belastung schneller zur Prozessüberlastung führen können als eine gleichmäßige Substratzufuhr. Daher ist nach dem aktuellen Kenntnisstand das Verhältnis Mais-/Zuckerrübensilage von 3:1 für die bedarfsgerechte flexible Fahrweise als optimal anzusehen.

5 Gasertrag Zuckerrüben

Aufgrund ihrer Eigenschaften bietet die Zuckerrübe gegenüber anderen nachwachsenden Rohstoffen Vorteile bei der Produktion von Biogas:

- Relativ rasche Umsetzung zu Biogas
- Gute Eignung zur flexiblen (Gas-) Stromproduktion
- Verdünnungseffekt (hoher Wassergehalt, niedriger Stickstoffgehalt)
- Auflockerung der Fruchtfolge
- Hohe flächenbezogene Energieerträge

Außerdem bietet die Biogasproduktion eine lukrative Verwertungsmöglichkeit für Übrerüben, die nicht in die Zuckerproduktion gehen. Abschließend sind in

Tab. 3 Gasausbeuten der Zuckerrübe von verschiedenen Quellen dargestellt.

Tab. 3: Gaserträge der Zuckerrübe (verschiedene Quellen)

Zuckerrübe nach	KTBL (2007 Richtwert)	KTBL (2017))	WEIßBACH (2009)	WEIßBACH (2009)	THAYSEN (2011)
Eigenschaften	frisch	siliert	frisch	Siliert > 6 Monate	siliert
TM [%]	23	22,6			23
oTM [% TM]	92	85			
Normbiogasertrag [l/kg oTM]	700	733			
Normbiogasertrag [l/kg FoTS]			756	797	
Normbiogasertrag [m ³ /t TS _k]					747
Methangehalt %	51	52,5	49,1	53,6	52,9

Literaturverzeichnis

Ahmed S., Einfalt D., Kazda M. (2016). Co-digestion of sugar beet silage increases biogas yield from fibrous substrates. *BioMed Research International*. doi:10.1155/2016/2147513

Belau, M. (2017): Rechtliche Grundlagen zur Erdbeckenlagerung von Rübenbrei in Bayern. Mündliche Mitteilung, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, Referat 57 - Grundwasserschutz und Wasserversorgung, Oktober 2017.

Bensmann M. (2010): Zuckerstückchen als Biogas-Booster. *Biogasjournal Sonderheft Energiepflanzen*, S. 48-49

Bischoff, M., Gruber, W., Heilmann, H., Hermus, S., Lemmer, A., Schaiper, D., Strobl, M., Thaysen, J. (2017): Zuckerrüben auf Biogasanlagen. Verfahren – Lagerungsverluste – Kosten, Hrsg: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, ISBN 978-3-945088-50-0

KTBL (2007): *Faustzahlen Biogas*, Darmstadt 2007, S.60

KWS SAAT AG 2013: *In der Rübe liegt die Kraft – auf dem Feld und im Fermenter*.

Langer S. G., Ahmed S., Einfalt D., Bengelsdorf F. R., Kazda M. (2015). Functionally redundant but dissimilar microbial communities within biogas reactors treating maize silage in co-fermentation with sugar beet silage. *Microbial Biotechnology* 8:828–836. doi:10.1111/1751-7915.12308

Thaysen, J. (2010): Vortrag: Zuckerrüben im Biogasprozess, *BioEngery* November 2010, Hannover

Thaysen, J. (2011): Zucker- und Futterrübeneinsatz in Biogasanlagen Potenzial und Praxis, *Bauernblatt* 11. Juni 2011, S. 30-32

Weißbach, F. (2009): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben, *Landtechnik* 64 (2009), H. 6

Wollenweber, D., Töppe, D., Schäfer, B.C. (2010): Rüben entblättern statt köpfen?, *Top Agrar* 3/2010, S. 86-90

Zitiervorlage:

Schaffner, S., F. Lichti, R. Kissel, D. Andrade, K. Maurus und M. Kazda (2018): Rüben als Biogassubstrat - Konservierung und Rübenkonzepte im Anlagenbetrieb. In: *Biogas Forum Bayern* Nr. II – 32/2018, Hrsg. ALB-Bayern e.V., LINK, Stand [Abrufdatum].

Das „Biogas Forum Bayern“ ist eine Informationsplattform zum Wissenstransfer für die landwirtschaftliche Biogasproduktion in Bayern

Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung)

hier erarbeiten Experten Fachinformationen zu folgenden Themen:

- Logistik der Ernte
- Gärrestausbringung
- Konservierung und Silagequalität

Mitglieder der Arbeitsgruppe II (Substratbereitstellung)

- **Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Amberg, Erding, Ingolstadt, Neumarkt i.d. Oberpfalz, Nördlingen Pfaffenhofen a. d. Ilm und Uffenheim**
- **Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten**
- **Bayerisches Landesamt für Umwelt**
- **Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft**
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Institut für Tierernährung und Futterwirtschaft
Institut für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik
- **Biogasanlagenbetreiber**
- **Böck Silosysteme GmbH**
- **CLAAS**
- **Fachverband Biogas e.V.**
- **Kuratorium Bayerischer Maschinen- und Betriebshilfsringe e.V.**
- **KWS SAAT SE**
- **Landeskuratorium der Erzeugerringe für tierische Veredelung in Bayern (LKV) e.V.**
- **Landmaschinenschule Landsberg am Lech, Landshut**
- **Landwirtschaftliche Lehranstalten des Bezirkes Oberfranken**
- **Regens Wagner Hohenwart**
- **Technologie- und Förderzentrum (TFZ) Straubing**
- **UDI Bioenergie GmbH**



Herausgeber:

Arbeitsgemeinschaft Landtechnik
und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
Vöttinger Straße 36
85354 Freising
Telefon: 08161/71-3460
Telefax: 08161/71-5307
Internet: <http://www.biogas-forum-bayern.de>
E-Mail: info@biogas-forum-bayern.de