

Projektbericht

Aufbau eines Wissensclusters

zur Implementierung der Biogaserübe
als Substratalternative in maisstarken Anbauregionen und
Erprobung produktionstechnischer Prozessketten
für Biogaserüben 2011



Projektpartner:



In Zusammenarbeit mit:



Zukunft säen
mit Tütten



Landwirtschaftskammer
Niedersachsen

Kompetenzentrum
Niedersachsen - Netzwerk
Nachwachsende Rohstoffe e.V.



Mit personeller Unterstützung von:



Inhalt

1. Einleitung	3
1.1. Ziel des Projekts	3
2. Zuckerrübenanbau	3
2.1. Anteil Ackerfrüchte im Landkreis Emsland/Grafschaft Bentheim	3
2.2. Sortenversuche Zuckerrüben	3
2.3. Düngungsversuche (Gärrest-Versuch)	4
2.4. Herbizid-Demoversuche	6
3. Zuckerrübenernte	7
4. Aufbereitung von Zuckerrüben zu Biogassubstrat	8
4.1. Beschreibung der Verfahren	8
4.2. Leistung und Kosten der Verfahren	11
4.3. Energieeinsatz	14
4.4. Arbeitsqualität	16
4.5. Umweltaspekte	17
5. Wirkung der Rübe im Fermenter	18
6. Diskussion	21
6.1. Prozessbeobachtung	21
6.2. Optimierungsvorschläge	21
7. Fazit und Ausblick	22

Impressum:

Redaktion: Claus Pommerehne | Nordzucker AG | Küchenstraße 9 | 38100 Braunschweig

Das Projekt wurde durch das Niedersächsische Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung unterstützt.

Druck gefördert durch:



Herausgeber:

3N Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V. | Kompaniestraße 1 | 49757 Werlte |

Tel.: +49(0)5951 9893 - 0 | Fax: +49(0)5951 9893 - 11 | E-Mail: info@3-n.info | www.3-n.info

Nachdruck nur mit Genehmigung der Nordzucker AG

1. Einleitung

Vor dem Hintergrund der steigenden Anzahl an Biogasanlagen und des steigenden Anbaus des Hauptsubstrats Mais speziell im Landkreis Emsland und Grafschaft Bentheim ist das Projekt »Aufbau eines Wissensclusters zur Implementierung der Biogasrübe als Substratalternative in maisstarken Anbauregionen und Erprobung produktionstechnischer Prozessketten für Biogasrüben im Emsland« für die Kampagne 2011 ins Leben gerufen worden. Das Projekt ist finanziell vom Niedersächsischen Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz und Landesentwicklung gefördert worden. Im Rahmen des Landesprojekts arbeiten die Nordzucker AG in Braunschweig (Projektträger) sowie die Projektpartner RWG Emsland-Süd in Lünne, Ralf Otten Biogas GmbH in Dalum / Geeste, KWS-Saat AG in Einbeck, die Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Meppen und das 3N-Kompetenzzentrum (Niedersachsen Netzwerk Nachwachsende Rohstoffe e.V.) in Werlte sowie Maschinenhersteller und regionale Dienstleister daran, den Zuckerrübenanbau im Emsland zu entwickeln und zu stärken.

1.1. Ziel des Projekts

Das Verfahren des Rübenanbaus und der -verarbeitung wird im Emsland/Grafschaft Bentheim bisher in einem begrenzten Rahmen durchgeführt. Um die Zuckerrübe als Substrat für die Biogasproduktion zu etablieren, muss der Prozess vom Rübenanbau über Rübenaufbereitung und Rübensubstratlagerung entwickelt und optimiert werden.

Der Projektumfang umfasst grob skizziert den

- Zuckerrübenanbau (Herbizid-Demoversuche)
- Düngungsversuche mit Gärresten
- Rübenernte, Aufbereitung von Rübensubstrat und dessen Einlagerung
- Wirkung der Zuckerrübe im Fermenter

Ein Schwerpunkt in diesem Projekt ist die Ermittlung des Verfahrensaufwands der Rübenaufbereitung zu Biogassubstrat mit den dazugehörigen Kosten.

2. Zuckerrübenanbau

2.1. Anteil Ackerfrüchte im Landkreis Emsland/Grafschaft Bentheim

Der Zuckerrübenanbau hatte im Landkreis Emsland/Grafschaft Bentheim bisher keine große Bedeutung. Hier steht der Anbau von Mais, Getreide und Kartoffeln im Vordergrund. Die Zuckerrübe wurde 2011 mit 1.036 ha auf etwa 0,5 % der Ackerflächen angebaut. 2010 waren es 530 ha Zuckerrüben. Im Gegensatz dazu werden auf 45 % der Flächen Mais angebaut.

Eine weitere Ausdehnung der Biogasproduktion zieht eine Steigerung des Maisanteils in der Fruchtfolge nach sich.

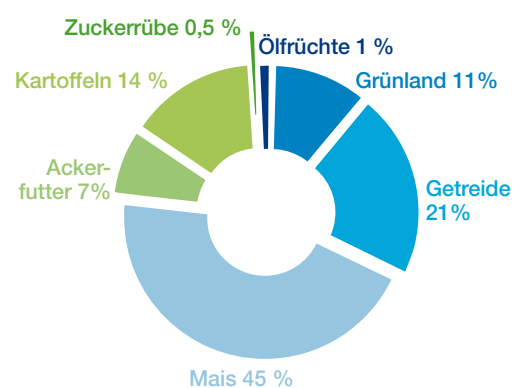


Abbildung 1: Anbauverteilung der Feldfrüchte im Emsland/Grafschaft Bentheim 2011

2.2. Sortenversuche Zuckerrüben

Das Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen hat in Deutschland insgesamt sieben Leistungsvergleiche zur Biomasseproduktion (SVB) für Zuckerrüben durchgeführt. Auf der Versuchsfläche in Werlte wurde einer dieser Versuche angelegt. Das Experiment in Werlte und ein weiteres konnten von insgesamt sieben Versuchen bundesweit aufgrund zu hoher Fehler nicht gewertet werden. Da die Sortenversuche nicht direkt innerhalb dieses Projekts bearbeitet worden sind, aber thematisch mit der Projektfrage direkt im Zusammenhang stehen, werden die Ergebnisse zum Leistungsvergleich zur Biomasseproduktion (SVB) in diesem Bericht mit dargestellt.

Sortenversuch Biomasse 2011 Methanertrag und Trockenmasse (TM)

Basis Sortenversuch 2011 und durchschnittlicher Zuckerertrag in Deutschland von 2008-2010

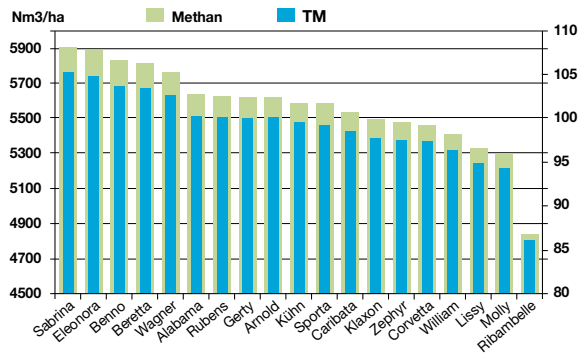


Abbildung 2: Sortenversuch Biomasse 2011 – Methanertrag

Sortenversuch Biomasse 2011

Zuckerertrag (ZE) und Trockenmasse (TM) relativ bundesweites Ergebnis 2011

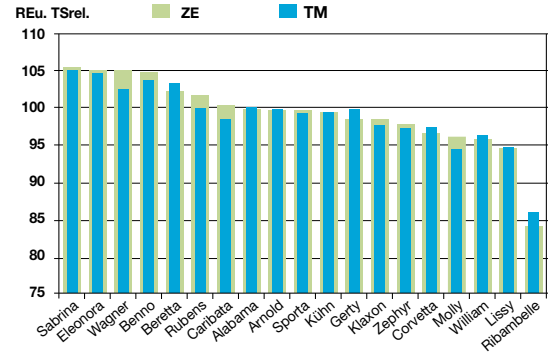


Abbildung 3: Sortenversuch Biomasse – ZE und TM

Quelle ARGE Nord

Die aktuellen Ergebnisse des Sortenleistungsvergleichs Biomasseproduktion 2011 (SVB) zeigen deutlich, dass die besten Zuckerrübensorten auch die besten Biogassorten sind. Sorten mit einem hohen Zuckerertrag zeigen auch hohe Trockensubstanzgehalte und ein hohes Methanbildungspotenzial. Es besteht direkt eine Korrelation zwischen Zuckerertrag und Trockenmasseertrag.

Im Sortiment wurden sowohl bekannte Zuckerrübensorten als auch die in 2011 angebotenen Energierübensorten wie Gerty, Lissy, Klaxon und Molly verglichen. Auffällig ist, dass die angebotenen Energierübensorten im Vergleich zu den leistungsstarken Zuckerrübensorten im Methanertrag deutlich schlechter liegen. Im vorliegenden Sortenvergleich war auch eine Futterrübe (Sorte Ribambelle) enthalten. Wie erwartet konnte ihr hoher Frischmasseertrag den geringen Trockensubstanzgehalt nicht ausgleichen, weshalb sie im Vergleich mit den Zuckerrübensorten nicht konkurrenzfähig zu sein scheint.

2.3. Düngungsversuche (Gärrest-Versuch)

Die Stickstoff-Düngung zu Zuckerrüben wurde vom Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen über viele Jahre verfolgt.

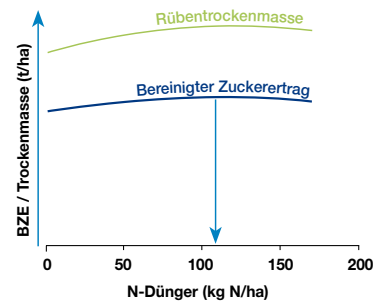


Abbildung 4: Einfluss der N-Düngung auf den Ertrag von Zuckerrüben (Dauerversuch IfZ, 1993-2002)

Danach wird der höchste bereinigte Zuckerertrag und damit auch der höchste Trockenmasseertrag in einem Bereich von 110-160 kg/ha N-Angebot erreicht. Von diesen Werten sind die N-min-Gehalte im Boden von ca. 30-40 kg/ha abzuziehen, so dass eine N-Düngung von 70-110 kg N/ha ausreichend ist, um höchste Trockenmasseerträge zu erreichen.

Eine höhere Stickstoff-Düngung in Zuckerrüben ist sowohl ökonomisch als auch ökologisch nicht sinnvoll.

Auch die Stickstoffdüngungsempfehlung der Landwirtschaftskammer Niedersachsen geht von einem Sollwert in Höhe von 160 kg N/ha aus. Der Düngebedarf ergibt sich nach Abzug des Nmin-Gehaltes des Bodens. Zudem kann die Düngung bei langjährig organischer Düngung um 20 kg N/ha und zudem bei guter N-Nachlieferung des Bodens um 20 kg N/ha reduziert werden. Auf Standorten mit schlechter Stickstoffnachlieferung muss die N-Gabe jedoch manchmal auch um 20 bis 40 kg N/ha angehoben werden.

In einem Gärrest-Düngungsversuch in Werlte sollte überprüft werden, welche Mengen an Stickstoff als organische oder als mineralische Düngung notwendig sind, um optimale Trockensubstanzerträge zu erhalten.

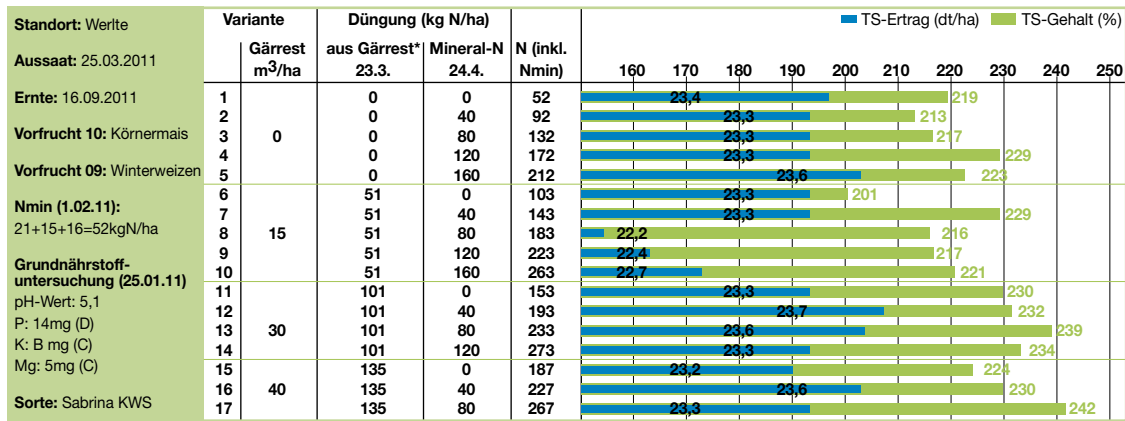


Abbildung 5: Gärrest-Versuch 2011 – Standort Werlte

Beratervariante		Nmin 0-90 (kg N/ha)	N mineralisch (kg N/ha)	N aus Gärrest (70% verfügb.) (kg N/ha)	N-Angebot (kg N/ha)	Nmin-Rest nach Ernte*
Ohne (B)	ohne (B)	52	71	54,1	177,1	
	15 m ² Gärrest	52	0	0	52	30
	30 m ² Gärrest	52	0	50,7	102,7	32
	40 m ² Gärrest	52	0	101,4	153,4	35
40 kg N/ha	ohne	52	40	135,2	187,2	68
	15 m ² Gärrest	52	40	0	92	-
	30 m ² Gärrest	52	40	50,7	142,7	-
	40 m ² Gärrest	52	40	101,4	193,4	32
80 kg N/ha	ohne	52	80	135,2	227,2	-
	15 m ² Gärrest	52	80	0	132	32
	30 m ² Gärrest	52	80	50,7	182,7	-
	40 m ² Gärrest	52	80	101,4	233,4	30
120 kg N/ha	ohne	52	120	135,2	267,2	-
	15 m ² Gärrest	52	120	0	172	39
	30 m ² Gärrest	52	120	50,7	222,7	-
160 kg N/ha	ohne	52	160	101,4	273,4	41
	15 m ² Gärrest	52	160	0	212	37
				50,7	262,7	-

Nmin: Nitrat + Ammonium-N *aus Untersuchungen der LWK Niedersachsen

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Höhe der Stickstoff-Düngung in diesem Versuch 2011 keinen Einfluss auf den Trockenmasseertrag hatte. Das Ertragsniveau war 2011 an sich schon sehr hoch, allein in der ungedüngten Parzelle wurde bereits ein respektablem Trockensubstanz-Ertrag (TS-Ertrag) in Höhe von 219 dt/ha erzielt. Anhand der alpha-Amino-N-Werte kann man aber sehen, dass der Stickstoff von den Pflanzen aufgenommen wurde. Noch höhere Erträge werden mit Stickstoffgaben auf dem Niveau des empfohlenen Sollwertes zu Zuckerrüben (160 kg N/ha) erreicht. Dies kann sowohl mineralisch (Variante 4), mineralisch und organisch (Variante 7) als auch auf rein organischem Wege (Variante 11) geschehen. Höhere N-Gaben führen zu keiner signifikanten Steigerung des Trockenmasseertrags und sind sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Sicht nicht sinnvoll. Auch eine Gärrestgabe in Höhe von 40 m³ ist nicht empfehlenswert, da sich die Erträge nicht weiter steigern lassen. Zudem steigt der verbleibende N-Gehalt im Boden hiernach deutlich an. Im Mittel der untersuchten Varianten liegt der Nmin-Gehalt im Boden nach der Ernte bei ca. 37 kg N/ha, nach der 40 m³-Gabe bei 68 kg N/ha.

Bekanntermaßen reduziert eine erhöhte Stickstoffdüngung den Zuckergehalt. Zuckergehalt und TS-Gehalt korrelieren eng miteinander, so dass auch der TS-Gehalt bei erhöhter N-Düngung sinken muss. Dieses lässt sich im Versuch zumindest in den 30 und 40 m³ Gärrestvarianten auch wiederfinden. Durch den erhöhten Rübenenertrag ergibt sich dennoch eine Steigerung des TS-Ertrags. In der Variante 14, der 273 kg N zur Verfügung standen, geht der TS-Ertrag jedoch wieder zurück, da sowohl Ertrag als auch TS-Gehalt durch die hohe N-Gabe wieder sinken. In den rein mineralisch gedüngten Varianten sowie den 15 m³-Gärrestvarianten lässt sich dies nicht so deutlich ablesen, was mit dem insgesamt sehr guten Ertragsniveau erklärt werden kann. Der Boden scheint ein sehr gutes Nachlieferungsvermögen zu haben, was sich aus der langjährig organischen Düngung ergibt.

2.4. Herbizidmoversuche

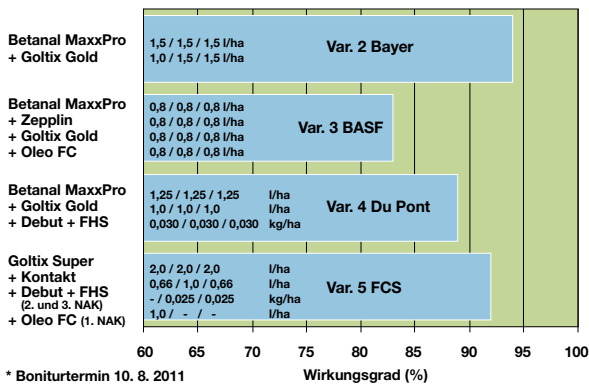
Auf den Flächen der RWG EL-Süd in Hesselte und auf dem landwirtschaftlichen Betrieb Ralf Otten in Dalum / Geeste wurden gemeinsam mit den Pflanzenschutzmittelfirmen und Zuckerrübensaatgut-Züchtungsunternehmen ein Herbizid-Demoversuch mit acht Varianten und drei Wiederholungen durchgeführt. Die Versuche wurden von einem Versuchstechniker angelegt und abschließend auf die Herbizidwirkung bonitiert.

In 2011 wurde die Herbizidwirkung durch die trockene Witterung im April/Mai deutlich beeinflusst. Die Schwerpunkt-Verunkrautung war der Weiße Gänsefuß, auf den die Herbizidvarianten ausgerichtet waren. Jede Pflanzenschutzmittelfirma konnte ihre eigene Herbizidmischung in ihrer Variante bestimmen.

Die Herbizidwirkung der eingesetzten Mittel lag in Dalum zwischen 83 und 94% und somit etwas schlechter als in Hesselte mit 88-100%. Zwischen den Herbizidvarianten gibt es deutliche Unterschiede, die in den folgenden Abbildungen ersichtlich werden.

Herbizidversuch in Zuckerrüben - Dalum 2011

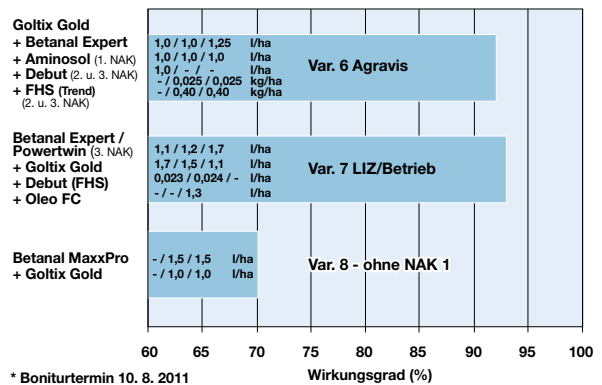
Wirkung gegen Weißen Gänsefuß* - Teil 1



Abbildungen 6+7: Herbizidversuch Dalum 2011 Teil 1

Herbizidversuch in Zuckerrüben - Dalum 2011

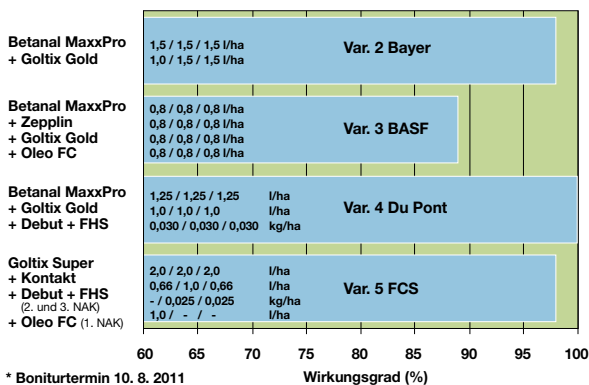
Wirkung gegen Weißen Gänsefuß* - Teil 2



Teil 2

Herbizidversuch in Zuckerrüben - Hesselte 2011

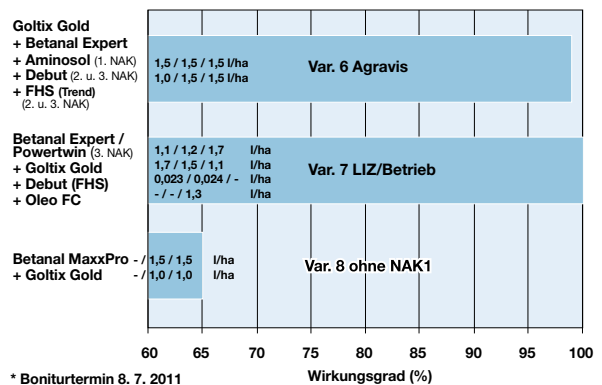
Wirkung gegen Weißen Gänsefuß* - Teil 1



Abbildungen 8+9: Herbizidversuch Hesselte 2011 Teil 1

Herbizidversuch in Zuckerrüben - Hesselte 2011

Wirkung gegen Weißen Gänsefuß* - Teil 2



Teil 2

In Variante 8 ist bewusst auf die 1. Nachaufaufbehandlung (NAK) verzichtet worden. Man kann erkennen, dass die erste Herbizidanwendung enorm wichtig für die gesamte Herbizidwirkung ist. In der Endbonitur lag die Wirkung nur bei 65-70%. Dies ist eindeutig zu gering. Der Herbizideinsatz in Zuckerrüben bedarf gerade bei solch trockenen und damit schwierigen Witterungsbedingungen einer ständigen Unkrautkontrolle mit entsprechendem Fingerspitzengefühl bei der Herbizidmischung. Sehr hilfreich ist die Entscheidungshilfe des Landwirtschaftlichen Informationsdienstes Zuckerrübe (LIZ) mit dem online-Programm »LIZ-Herbizid«. Dieses kann kostenfrei genutzt werden und ist für den unsicheren Rübenanbauer als Unterstützung wie für den erfahrenen Rübenanbauer zur Selbstkontrolle sehr hilfreich, um eine gute Herbizidwirkung zu erzielen. Dieses zeigen auch die Ergebnisse der Variante 7, in der »LIZ-Herbizid« genutzt worden ist.

3. Zuckerrübenerte

Die Erntebedingungen im Jahr 2011 waren durch eine trockene Herbstwitterung ausgesprochen gut. Im September fielen in Meppen 67 mm, im Oktober 57 mm und im November nur 3 mm. Die Rübenerte konnte unter trockenen Bedingungen stattfinden.

Die beiden Testbetriebe haben bei der Aussaat einen unterschiedlichen Reihenabstand gewählt. Bei der RWG Emsland-Süd waren es 45 cm und bei Ralf Otten 50 cm Reihenabstand. Generell ist zu sagen, dass bei einem engeren Reihenabstand die Beschattung des Unkrauts schneller durch das Rübenblatt erfolgt und somit besser unterdrückt wird.

Durch den bisher geringen Zuckerrübenanbau in der Region Emsland/Grafschaft Bentheim standen für die Ernte nur wenige und zumeist ältere Zuckerrübenroder zur Verfügung. Im Gebiet der RWG EL-Süd war nur ein Roder mit 45 cm Reihenabstand vorhanden, der über eine weite Entfernung anfahren musste. Auf dem Betrieb Ralf Otten mit 50 cm Reihenabstand standen zwei Zuckerrübenroder in der Region zur Verfügung. Aus dieser Erfahrung ist es für die Zukunft sehr wichtig, dass moderne Zuckerrübenroder mit automatischer Einstellung des Reihenabstands (45 oder 50 cm) eingesetzt werden können.

RWG Emsland-Süd



Abbildung 10: Rübenroder im Einsatz bei der RWG Emsland-Süd

Zuckerrübenroder:	Agrifac, 6-reihig
Rodefläche:	109,2 ha
Leistung:	0,8 ha/h
Ertrag:	87 t/ha

Ralf Otten



Abbildung 11: Rübenroder im Einsatz auf dem Betrieb Otten

Vervaet, 9-reihig
98,5 ha
1,25 ha/h
97 t/ha

Abbildung 12: Biogasanlage Gerdes in Messingen



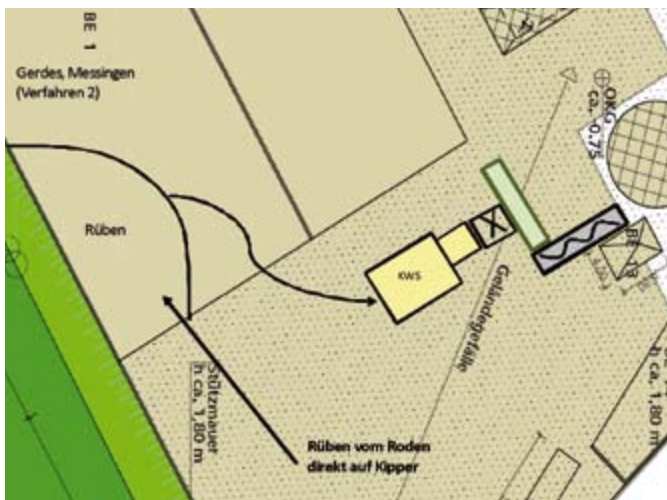
4. Aufbereitung von Zuckerrüben zu Biogassubstrat

4.1. Beschreibung der Verfahren

In diesem Projekt umfasst die Aufbereitung das Entsteinen, Waschen und Zerkleinern der Rüben. In diesem Ablauf wurden sechs verschiedene Verfahren angewendet, die sich in den Abläufen unterscheiden.

Verfahren 1: Roden, Rübenwäsche, Zerkleinerung

Zur Verarbeitung der Rüben für die Biogasanlage (BGA) in Messingen am 12. Dezember 2011 erfolgten das Waschen der Rüben und die Zerkleinerung direkt im Anschluss an das Roden. Die Rüben wurden während des Rodens vom Roder (Agrifac-Selbstfahrer, 6-reihig) auf Anhänger überladen und mit vier Schleppern mit Tandem-Mulden bzw. 16-18 t - Anhängern direkt zur Verarbeitung in die Biogasanlage gebracht. Die Feld-BGA-Entfernung betrug 4 km. An der BGA wurden die Rüben zunächst auf der Siloplatte abgekippt. Mit einem Teleskoplader Claas 9040 (2,5 m³ Schaufel) wurden die Rüben dann in die KWS-Rübenwaschanlage befördert. Danach kamen sie über das 4 m-Förderband zum Putsch-Zerkleinerer und wurden gemustert. Im Anschluss gelangte der Rübenbrei durch den Ligamix in den Hochbehälter.



Danach kamen sie über das 4 m-Förderband zum Putsch-Zerkleinerer und wurden gemustert. Im Anschluss gelangte der Rübenbrei durch den Ligamix in den Hochbehälter.





-  Ligamix, Befüllpumpe zum Ligavator
-  Förderband, 4m Länge
-  Rübenzerkleinerer Putsch
-  KWS-Waschanlage

Abbildung 13: Verfahrensablauf bei der BGA Messingen, Dezember

Verfahren 2: Rübenwäsche KWS (an der Biogasanlage), ohne CCM

Auch bei der Biogasanlage in Beesten und in Messingen (Termin Oktober) erfolgte die Rübenwäsche mit der KWS-Waschanlage.

In Beesten wurden die Rüben am 28. und 29. Oktober zunächst aus einer Miete am Feldrand mit einem Teleskoplader aufgeladen und über ein Reinigungsband abgeseibt. Die Entfernung von der Miete zur Anlage betrug etwa 1 km, wobei die Rüben mit zwei Schleppern mit 16t-Anhängern transportiert wurden. Später wurde hier ein Muldenkipper eingesetzt. Auf dem Biogasanlagengelände wurden die Rüben auf ein Fortschritt T 285 Annahme-Förderband (15 m Länge, 2,5 kw, 2-stufig) abgekippt und über ein Fortschritt Schrägförderband (12 m Länge, 7,5 kw) in die Waschanlage befördert. Nach der Wäsche gelangten die Rüben in den Putsch-Zerkleinerer und der Rübenbrei dann wiederum über ein 4m-Förderband in den Ligamix zur Beförderung in den Ligavator.










-  Fortschritt T 285 Annahme-Förderband
-  Fortschritt Schrägförderband
-  Ligamix, Befüllpumpe zum Ligavator
-  Förderband, 4m Länge
-  CCM-Annahme
-  Rübenzerkleinerer Putsch
-  KWS-Waschanlage

Abbildung 14: Verfahrensablauf bei der BGA Beesten



Abbildung 15: Verfahrensablauf bei der Biogasanlage Messingen

- Fortschritt T 285 Annahme-Förderband
- Fortschritt Schrägförderband
- Ligamix, Befüllpumpe zum Ligavator
- Förderband, 4m Länge
- CCM-Annahme
- Rübenzerkleinerer Putsch
- KWS-Waschanlage

Am Standort Messingen (Verarbeitung 26.-28. Oktober) lief der Prozess ähnlich ab, jedoch lagerten die zu verarbeitenden Rüben bereits auf der Siloplatte. Somit konnten diese sofort in die KWS-Waschanlage geladen werden. Über die Fortschritt-Förderbänder (siehe Abbildung) gelangten die Rüben in den Putsch-Zerkleinerer und von dort aus über ein 4 m-Förderband zum Ligamix und dann in den Ligavator.

Verfahren 3: Rübenwäsche KWS (an der Biogasanlage), mit CCM

Bei der Biogasanlage in Salzbergen lagerten die Rüben nach der Ernte auf der Siloplatte der Biogasanlage. Weitere 130 t Rüben sind während der Verarbeitung am 25./26. Oktober vom Feldrand mit einem Schlepper und Muldenkipper angeliefert worden.

- Fortschritt T 285 Annahme-Förderband
- Fortschritt Schrägförderband
- Ligamix, Befüllpumpe zum Ligavator
- Förderband, 4m Länge
- CCM-Annahme
- Rübenzerkleinerer Putsch
- KWS-Waschanlage

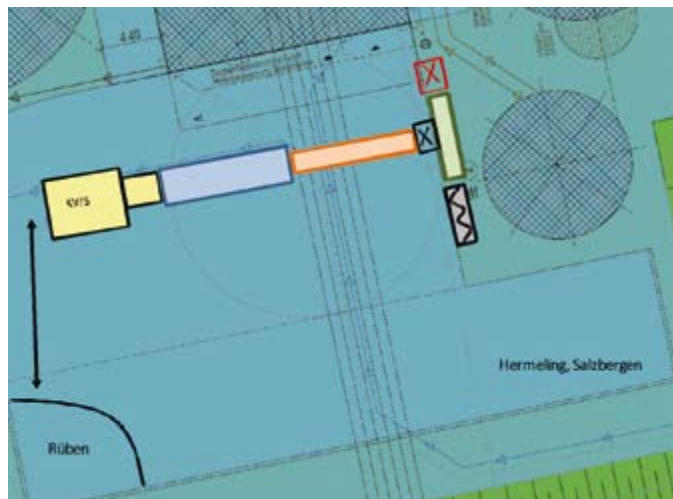


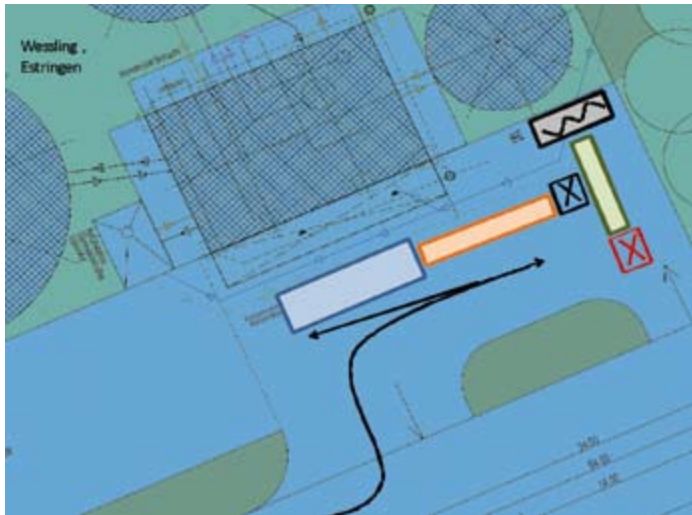
Abbildung 16: Verfahrensablauf bei der BGA Salzbergen

Von der Siloplatte aus wurden die Rüben mit einem Teleskoplader Claas 9040 (Schaufel 2,5 m³) in die KWS-Rübenwaschanlage befördert.

Für die weitere Beförderung schloss sich das Fortschritt T 285 Annahme-Förderband (15 m Länge, 2,5 kw, 2-stufig) und ein Fortschritt Schrägförderband (12 m Länge, 7,5 kw) an, welche die gewaschenen Rüben in den Putsch-Zerkleinerer (35 kw, 38 t/h) transportierten. Aus diesem gelangten die Rüben auf ein 4 m-Förderband (2 kw), mit dem auch CCM kontinuierlich eingemischt wurde. Dieses Substrat aus Rübenbrei und CCM wurde darauf folgend mit dem Lipp-Ligamix zu einem Substrat angemischt und mittels Pumpe in den Ligavator/Betavator befördert.

Verfahren 4: Rübenwäsche Rhino auf dem Feld, Einlagerung mit CCM

Am Standort der Biogasanlage in Estringen wurden die Rüben in einer Feldmiete zwischengelagert. Auf diesem Acker, der ca. 10 km von der Biogasanlage entfernt war, wurde auch die Rübenwäsche durchgeführt. Die Verarbeitung fand am 31. Oktober und 1. November statt. Mit einem Teleskoplader wurden die Rüben auf ein Verladeband geladen, diese grob abgesiebt und in die Rhino-Waschanlage befördert.




-  Fortschritt T 285 Annahme-Förderband
-  Fortschritt Schrägförderband
-  Ligamix, Befüllpumpe zum Ligavator
-  Förderband, 4m Länge
-  CCM-Annahme
-  Rübenzerkleinerer Putsch
-  KWS-Waschanlage

Abbildung 17: Verfahrensablauf bei der BGA Estringen

Die gewaschenen Rüben wurden dann mit zwei 16 t- Anhängern und einem Muldenkipper vom Feld zur Verarbeitungsstation an der Biogasanlage transportiert.

Hier gelangten die Rüben über das Fortschritt T 285 Annahme-Förderband und das Fortschritt Schrägförderband in den Putsch-Zerkleinerer. Wie beim Verfahren in Salzbergen wurde über ein 4 m-Förderband, auf dem der Rübenbrei weiter in den Ligamix befördert wurde, CCM hinzudosiert. Die Rübenmus-CCM-Mischung wurde in dem Ligavator eingelagert.

Verfahren 5: Trockenreinigung, Lagerung in Erdbecken

Das Verfahren der Trockenreinigung fand am 21. und 22. November bei der Biogasanlage in Dalum statt. Die Verarbeitung der Rüben erfolgte auf dem Feld. Mit einem Radlader wurden die Rüben aus der Miete zum Radbagger gebracht. Dieser war mit einer Schaufel ausgestattet, der die Rüben grob von loser Erde befreite. Der Radbagger ver lud die Rüben auf ein Reinigungsband Holmer RRL 1.200, welches mit einem John Deere 7430 über die Zapfwelle angetrieben wurde. Die Rüben kamen von dort in einen großen Schredder als Zerkleinerer, der auf einem Sattelzug aufgebaut war. Der Schredder wird normalerweise für das Zerkleinern von Baumwurzeln eingesetzt. Aus diesem Zerkleinerer transportierte das angebaute Förderband (schwenkbar hoch-runter) die Rüben auf LKW oder Muldenkipper.

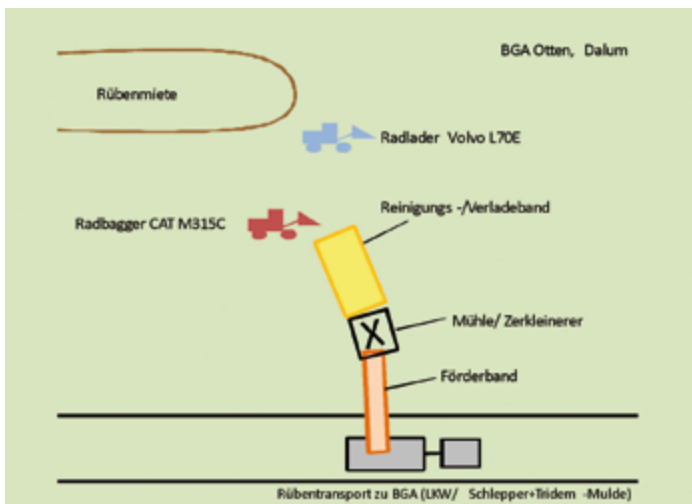


Abbildung 18: Verfahrensablauf bei der BGA Dalum

Die Entfernung zur Biogasanlage betrug 8,5 km. Die Lagerung der Rüben erfolgte in einem 8.000 m³ (60x40 m) Erdbecken. Über eine Rampe (40 m) wurden die zerkleinerten Rüben in dieses Erdbecken gefahren – die LKW schieben dazu rückwärts die Rampe hoch und stehen während der Abladung eben.

4.2. Leistung und Kosten der Verfahren

Das Verfahren der Verarbeitung von Zuckerrüben zu Rübenbrei und zur Einlagerung in einen Hochbehälter (RWG Emsland-Süd) ist im Aufbau und in der Erprobung. Die örtlichen Gegebenheiten ließen, wie vorab beschrieben, an einigen Anlagen keinen optimalen Verarbeitungsablauf zu. Somit kommen neben den verschiedenen Wasch- und Reinigungstechniken auch Unterschiede im Verfahrensaufbau und Ablauf hinzu.

Die Tabelle 1 zeigt eine Auswahl von Rübenverarbeitungsprozessen an den Standorten der RWG Emsland-Süd, die so nicht miteinander vergleichbar sind. Sie gibt einen Überblick zu der verarbeiteten Rübenmenge und der ermittelten Verarbeitungsleistung.

Standort	Verarbeitete Menge	Zeit Rübenverarbeitung	Ausfallzeit	Arbeitsleistung
Estringen	650t	25,5 h	15,7%	25,5 t/h
Beesten	800t	19,5 h	12,8%	41,0 t/h
Messingen I	510t	16,5 h	27,3%	30,9 t/h
Messingen II	486t	16,5 h	27,3%	30,9 t/h

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Rübenverarbeitungsprozesse

Deutliche Unterschiede gibt es in den Ausfallzeiten und der Arbeitsleistung. Während bei der BGA Estringen nur 25,5 t/h verarbeitet werden konnten, steigerte sich die Verarbeitungsleistung, so dass diese in Messingen II (Dezembertermin) bereits 60 t/h betrug. Auch die Ausfallzeiten schwankten von knapp 13 % in Beesten bis zu 27 % in Messingen I (erster Verarbeitungstermin).

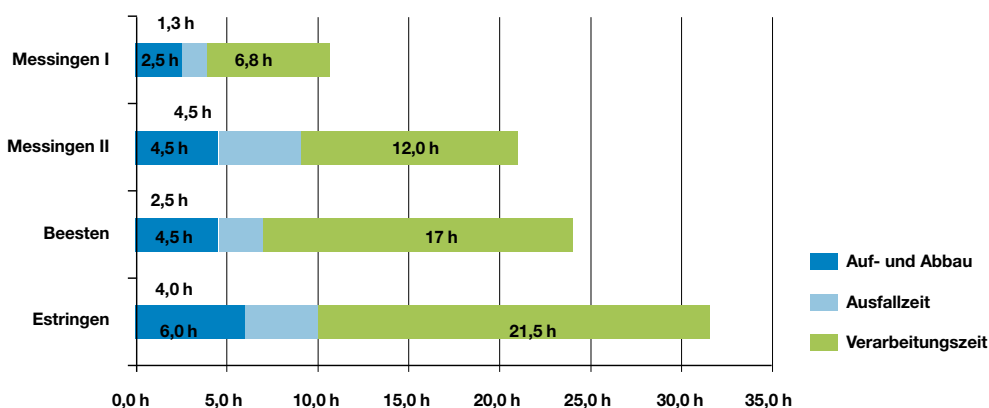


Abbildung 19: Ausfall-, Rüst- und Verarbeitungszeiten

An dem Standort Estringen war der Aufbau der Verarbeitungsstrecke sehr beengt. Das Rangieren der Schlepper am Annahmehunker nahm sehr viel Zeit in Anspruch. Während dieser Zeit lief die Anlage leer. Auch die Waschleistung der Rhino-Wäsche war mit einer Leistung von ca. 30 t/h ein begrenzender Faktor.

Tabelle 2: Kostenermittlung BGA Estringen

KOSTENERMITTLUNG BGA ESTRINGEN				
31.10. - 01.11.2011	Anzahl/h	Kosten je Einheit	Kosten je h	ohne Transport 275€/h
Schlepper Transport	3	55€/h	165€/h	
Telekop Laden + Reinigungsband	1	65€/h	65€/h	
Personal Anlage	1	30€/h	30€/h	
Rübenwäsche Rhino	1	100€/h	100€/h	
AfA/Unterhaltung Verarbeitungs/Zins	1	20€/h	20€/h	
Energie	1	20€/h	20€/h	
Putsch-Zerkleinerer	1	40€/h	40€/h	
Summe Netto			440€/h	
... bei einer Leistung von	30 t/h	(max)	14,55€/t	9,10€/t
	25 t/h	(+ Ausfall)	17,26€/t	10,79€/t
		(+ Rüstz.)	18,28€/t	

Während der Verarbeitungszeit kam es immer wieder zu Ausfällen. Da der Rübenzerkleinerer an seiner Auslastungsgrenze war, kam es zu Verstopfungen. Die Beseitigung dieser Störung dauerte ca. 15-20 Minuten. Neben den Zuckerrüben wurde gleichzeitig CCM in den Hochbehälter eingebracht. Dessen Anlieferung unterbrach den Verarbeitungsprozess ebenfalls. Die maximale Verarbeitungsleistung (temporäre Betrachtung) war mit 30 t/h unterdurchschnittlich. Zieht man die Ausfallzeit hinzu, verbleibt eine Leistung von 25 t/h. Die Kosten der Rübenaufbereitung von der Feldmiete bis in den Hochbehälter belaufen sich auf 440 €/h, was Verfahrenskosten (inkl. Transport Feld-BGA) von 17,26 €/t entspricht. Die reinen Verarbeitungskosten (Laden, Waschen und Zerkleinern der Rüben ohne den Transport) beliefen sich auf 10,79 €/t.

Die in der Abbildung 19 ausgewiesene Rüstzeit für die Rübenverarbeitung an der BGA Estringen lag mit 6 Stunden ebenfalls verhältnismäßig hoch. Zwei Mitarbeiter waren gleichzeitig mit Teleskoplader, Schlepper bzw. LKW damit beschäftigt, die Einzelnen Aggregate auf- und abzubauen. Bei einem Stundensatz von 55 € entstehen Kosten für diese Sequenz in Höhe von 660 €, was bei einer verarbeiteten Menge von 650 Tonnen 1,02 €/t entspricht.

Die Rübenverarbeitung an der BGA Besten präsentiert sich insgesamt effektiver und kostengünstiger (vergl. Tabelle 3). Mit 47 t/h maximaler Leistung konnte an dieser BGA die höchste Leistung mit dem Putsch-Zerkleinerer in der ersten Verarbeitungsreihe erzielt werden. Die Ausfallzeit von 4,5 Stunden beinhaltet Standzeiten aus der Überlastung des Zerkleinerers sowie die Zeit für den Wasserwechsel der KWS-Wäsche (ca. eine Stunde). Mit Verarbeitungskosten von 8,41 €/t konnte hier ein annehmbarer Wert erzielt werden. Begrenzender Faktor in der Verarbeitungskette an dieser Anlage war der Rübenzerkleinerer.

KOSTENERMITTLUNG BGA BEESTEN				
28.10. - 30.10.2011	Anzahl/h	Kosten je Einheit	Kosten je h	
Schlepper Transport	2	55€/h	110€/h	ohne Transport
Telekop Laden + Reinigungsband	1	65€/h	65€/h	345€/h
Personal Anlage	2	20€/h	40€/h	
Rübenwäsche KWS	1	160€/h	160€/h	
AfA/Unterhaltung Verarbeitungs/Zins	1	20€/h	20€/h	
Energie	1	20€/h	20€/h	
Putsch Zerkleinerer	1	40€/h	40€/h	
Summe Netto			455€/h	
... bei einer Leistung von	47 t/h	(max)	9,67€/t	7,33€/t
	41 t/h	(+ Ausfall)	11,09€/t	8,41€/t
		(+ Rüstz.)	11,71€/t	

Tabelle 3: Kostenermittlung BGA Beesten

An der BGA Messingen bestehen günstigere räumliche Voraussetzungen als bei den vorab beschriebenen Anlagen. In der bestehenden Fahrloanlage konnten die Rüben zwischengelagert werden, so dass die Verarbeitungsketten unterbrochen werden konnten.

KOSTENERMITTLUNG BGA MESSINGEN				
26.10. - 28.10.2011	Anzahl/h	Kosten je Einheit	Kosten je h	
Schlepper Transport	3	55€/h	165€/h	ohne Transport
Telekop Laden + Reinigungsband	1	65€/h	65€/h	360€/h
Personal Anlage + Teleskoplader	1	55€/h	55€/h	
Rübenwäsche KWS	1	160€/h	160€/h	
AfA/Unterhaltung Verarbeitungs/Zins	1	20€/h	20€/h	
Energie	1	20€/h	20€/h	
Putsch Zerkleinerer	1	40€/h	40€/h	
Summe Netto			525€/h	
... bei einer Leistung von	42 t/h	(max)	12,43€/t	8,52€/t
	32 t/h	(+ Ausfall)	16,57€/t	11,36€/t
		(+ Rüstz.)	18,09€/t	

Tabelle 4: Kostenermittlung BGA Messingen

Das Verladen und Vorreinigen der Rüben sowie der Transport konnten hier unabhängig von der Verarbeitung erfolgen. Die erhebliche Standzeit von 4,5 h bzw. 27% resultierte aus dem Ausfall eines Förderbands und aus der Überlastung des Zerkleinerers, der wie bei der Anlage in Besten die Verarbeitungsgeschwindigkeit begrenzte.

Die durchschnittliche Verarbeitungsmenge von 32 t/h sowie die Maximale Verarbeitungsmenge von 42 t/h liegen deutlich unter der möglichen Wasch-Leistung der KWS Wäsche. Dieses mit 160 t/h relativ teure Aggregat war bei den Einsätzen an den BGA Beesten und Messingen nicht ausgelastet.

Die an dieser Anlage eingesetzten Förderbänder für die Weiterleitung der gewaschenen Rüben in den Zerkleinerer wären an dieser Anlage nicht notwendig gewesen, da die KWS-Wäsche – wie an der BGA Beesten – in der Lage ist, die Rüben direkt in den Zerkleinerer zu fördern.

In der zweiten Verarbeitungsreihe im Dezember 2012 wurde ein Zerkleinerer der Firma Putsch mit einer deutlich höheren Durchsatzleistung eingesetzt. Das Beispiel des Prozessaufbaus an der BGA Messingen (vergl. 4.1. – Verfahren 1) stellt im Vergleich zu der ersten Verarbeitungsreihe einen schlanken Verarbeitungsprozess dar. Bei diesem Anlagenaufbau wurden die in der Fahrsiloanlage zwischengelagerten Rüben mit einem Teleskoplader in den Bunker der KWS-Wäsche gegeben. Diese förderte die gewaschenen Rüben direkt in den Zerkleinerer. Die Förderbänder aus dem ersten Einsatz entfallen. Somit auch eventuelle Ausfallzeiten, die aus diesen Geräten resultieren. Auch der Zeitaufwand für das Auf- und Abbauen der Förderbänder entfällt.

KOSTENERMITTLUNG BGA MESSINGEN II				
12.12.2011	Anzahl/h	Kosten je Einheit	Kosten je h	
Schlepper Transport	4	55€/h	220€/h	ohne Transport
erhöhter Aufwand Rübenroder 1)	1	20€/h	20€/h	310€/h
Personal Anlage + Teleskoplader	1	55€/h	55€/h	
Rübenwäsche KWS	1	160€/h	160€/h	
AfA/Unterhaltung Verarbeitungs/Zins	1	15€/h	15€/h	
Energie	1	20€/h	20€/h	
Putsch Zerkleinerer	1	40€/h	40€/h	
Summe Netto			530€/h	
... bei einer Leistung von	71 t/h	(max)	7,42€/t	4,34€/t
	60 t/h	(+ Ausfall)	8,83€/t	5,17€/t
		(+ Rüstz.)	9,40€/t	

Tabelle 5: Kostenermittlung BGA Messingen II

Die in der Abbildung 19 ausgewiesene Ausfallzeit beinhaltet den Wasserwechsel sowie eine technische Störung der KWS-Wäsche. Mit einer durchschnittlichen Verarbeitungsmenge von 60 t/h konnte eine deutliche Leistungssteigerung erreicht werden.

Mit Verarbeitungskosten von 5,17 €/t bei einer Verarbeitungsleistung von 60 t/h konnten die Kosten je Tonne Rüben gegenüber dem ersten Verarbeitungstermin an dieser Anlage mehr als halbiert werden (vergl. Tabelle 5).

Für die Biogasanlage von Ralf Otten in Dahlum kamen ebenfalls zerkleinerte Rüben zum Einsatz. Diese wurden jedoch nicht in Hochbehältern, wie bei den Anlagen der RWG Emsland-Süd, sondern in einem Erdbecken eingelagert. Im Zuge der Verarbeitung erfolgte nur eine Trockenreinigung der Rüben, da auf diesem Standort auf eine Entsteinung verzichtet werden konnte.

Die Umsetzung der Rübenverarbeitung hatte der Betreiber an Unternehmen vergeben, die nach verarbeiteten Mengen abrechnen. Der Transport der Rüben erfolgte nach Zeitaufwand. Die gesamte verarbeitete Rübenmasse wurde mit einer Brückenwaage erfasst und belief sich auf 5.652 t. Die Kosten der Verarbeitung summierte sich auf 25.448 €. Somit errechnen sich für die Tonne Rüben Verarbeitungskosten in Höhe von 4,50 €/t (vergl. Tabelle 6).

Dieser Prozessaufbau zeichnete sich durch seine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit aus. Mit bis zu 95 t/h lieferten die LKW im 15 Minuten-Takt die Ware in das Erdbecken.

KOSTENERMITTLUNG RÜBENVERARBEITUNG BIOGASANLAGE OTTEN, DALUM				
	Anzahl/h	Kosten je Einheit	Gesamtkosten	
Schlepper + LKW Transport	256,5 h	62€/h	15.903€/h	ohne Transport
Radlager + Reinigungsband	5.652 t	1,50€/h	8.478€/h	25.448€
Zerkleinerer und Bagger	5.652 t	2,70€/h	15.260€/h	
Schlepper für Reinigungsband	68,4 h	25€/h	1.709€/h	
Summe Netto			41.351€	
... bei einer Leistung von	95,5 t/h	(max)	7,01€/t	4,50€/t
	82,7 t/h	(+ Ausfall 13,4%)	7,32€/t	

Tabelle 6: Kostenermittlung BGA Otten, Dalum

Die Ausfallzeit von 13,4 % betrifft aus wirtschaftlicher Sicht nur den Transport der zerkleinerten Rüben, da das Laden, Reinigen und Zerkleinern zum Tonnenpreis abgerechnet wurden. Daher ist die Differenz der Verarbeitungskosten zu der maximalen Verarbeitungsmenge mit 0,31 €/t auch relativ gering. Kosten für den Auf- und Abbau der Maschinen und Geräte sind im Tonnenpreis enthalten.

Kosten und Leistung der Rübenverarbeitungsprozesse 2011

Für die Praxis entscheidend ist die Leistung inkl. Ausfallzeiten. Die Ausfallzeiten machen 15 - 30% der gesamten Kosten aus.

Eine hohe Leistung je h hat deutlichen Einfluss auf die Kosten.

- Spitzenleistung o. Ausfall
- Kosten €/t ohne Transport
- Leistung mit Ausfallzeiten
- Kosten €/t ohne Transport

Zuzüglich Transport Feld/BGA:

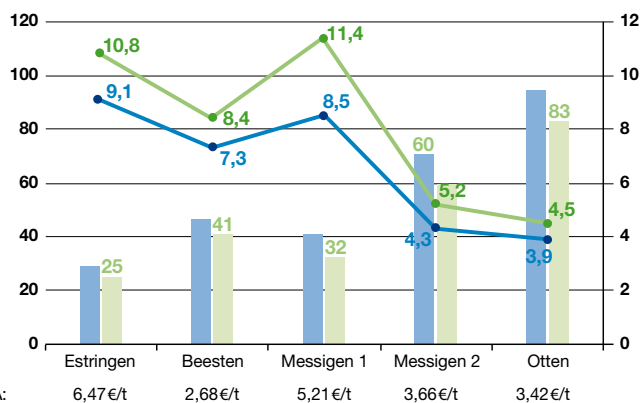


Abbildung 20: Übersicht von Kosten und Leistungen im Vergleich

4.3. Energieeinsatz

Hinsichtlich der Energieeffizienz stellt sich bei der Biomasse- und Biogasproduktion die Frage, wie viel fossile Energie verbraucht wird, um eine Kilowattstunde elektrische Leistung zu erzeugen. Eine solche Bilanzierung bezieht auch die Verarbeitung und Einbringung der Biomasse in die Anlage mit ein. Für die beschriebenen Verarbeitungsprozesse wird im Folgenden der Energieeinsatz für die Verarbeitung von 1.000 kg Zuckerrüben in den Hochbehälter bzw. in ein Erdbecken ermittelt.

Für die Verarbeitungsprozesse der RWG Emsland-Süd ist in der Tabelle 7 das Verfahren an der BGA Messingen dargestellt, da bei dieser Anlage die Rübenverarbeitung aus den Erfahrungen der ersten Verarbeitungsreihe deutlich effektiver gestaltet werden konnte.

Energieaufwand am Beispiel Messingen II					
Aggregat	Motortyp	Dieserverbrauch		Umrechnungsfaktor	Energieverbrauch
KWS Wäsche	Dieselmotor	6 l/h		11,8 kWh/l	71 kWh
Teleskopklader	Dieselmotor	10l/h		11,8 kWh/l	71 kWh
Leistung aus Diesel					189 kWh
Aggregat	Motortyp	Motorleistung	Wirkungsgrad	Auslastung	Stromverbrauch
Putsch-Zerkleinerer	E-Motor	38 KW	90%	90%	38 kWh
Förderband	E-Motor	2 KW	90%	30%	1 kWh
Putsch-Zerkleinerer	E-Motor	38 KW	90%	90%	30 kWh
Leistung aus Strom					69 kWh
Wirkungsgrad Umwandlung fossiler Energie in elektrische Energie (37%)					186 kWh
Gesamtverbrauch je Stunde					374 kWh
Energiebedarf je Tonne Rüben (Leistung 60t/h)					6,2 kWh

Tabelle 7: Energieaufwand am Beispiel Messingen II

Um die unterschiedlichen Transportstrecken außer Acht lassen zu können, setzt diese Berechnung voraus, dass die Rüben auf der Anlage zwischengelagert sind. Als Energiequellen dienen Diesel für den Generator der KWS-Wäsche und den Teleskoplader sowie elektrischer Strom für den Zerkleinerer, ein Förderband und die Verdrängerpumpe zur Einbringung des Rübenbreis in den Hochbehälter.

Die verbrauchten Dieselmengen wurden über den Tagesverbrauch ermittelt. Da kein separater Zwischenzähler für die Stromanschlüsse vorhanden war, wurde der Stromverbrauch über die Nennleistung der Motoren, deren Wirkungsgrad und Auslastung berechnet. In der Summe wurden je Stunde 14 Liter Diesel bzw. umgerechnet 165 kWh verbraucht. Hinzu kommen 69 kWh elektrische Energie. Da es sich bei der elektrischen Energie um eine »veredelte« Energieform handelt, muss diese mit dem Wirkungsgrad für die Umwandlung von fossiler Energie in elektrische Energie (37%) dividiert werden. Der Gesamtenergiebedarf an fossiler Energie für die Verarbeitung von Rüben beträgt somit bei diesem Verarbeitungsaufbau 351 kW je Stunde.

Vergleichswert elektrische Leistung nach KTBL:	
150 m_Biogas je 1000kg FM Rüben x 52% CH4	_ 78m_CH4
78 m_CH4 x 10 =	780 kWh
780 kWh x 37% Wirkungsgrad =	289 kWh elektrische Leistung

Dies bedeutet, dass die Energie, die sich aus der Vergärung von einer Tonne Rüben ergibt, für die Aufbereitung von 125 t Rübenbrei ausreicht.

Im Vergleich dazu: Eine Tonne Zuckerrüben (Frischmasse) ermöglichen nach KTBL-Berechnungen die Produktion von 150 m³ Biogas, die umgerechnet 780 kWh bzw. 289 kWh elektrischer Leistung entspricht.

Für den Auf- und Abbau der Verarbeitungstechnik haben zwei Personen mit zwei Zugmaschinen gearbeitet, was für die vorab beschriebene Biogasanlage 2 ½ Stunden in Anspruch genommen hat. Der aus dem Dieserverbrauch von 22 Liter je Stunde errechnete Energiebedarf beträgt 260 kW je Stunde (vergl. Tabelle 8).

Energieaufwand Auf- und Abbau					
Aggregat	Motortyp	Dieserverbrauch		Umrechnungsfaktor	Energieverbrauch
Schlepper/LKW	Dieselmotor	12l/h		11,8 kWh/l	142 KWh
Teleskoplader	Dieselmotor	10l/h		11,8 kWh/l	118 KWh
Leistung aus Diesel					260 KWh

Tabelle 8: Energieaufwand Auf- und Abbau

Die Rübenverarbeitung für die Biogasanlage von Ralf Otten (Tabelle 9) erfolgte ausschließlich mit Dieselmotoren. Der Transport des Rübenbreis wurde in dieser Berechnung nicht berücksichtigt. Für die gesamte Verarbeitungsmenge von 5.652 t Zuckerrüben wurden in diesem Verarbeitungsprozess 4.778 Liter Diesel verbraucht, was 0,85 l/t bzw. 952 kWh je 1.000 kg Rüben entspricht. Im Vergleich zu dem erstgenannten Verfahren wurden bei dieser Verarbeitungskette 60 % mehr Energie je 1.000 kg Rüben aufgewandt. Die größte Differenz fällt zwischen diesen Verfahren beim Zerkleinern der Rüben auf. Während der elektrisch betriebene Zerkleinerer 27 % des Gesamtenergieverbrauchs verursacht, ist dem dieselseetriebenen Schredder über 60 % zuzuschreiben.

Energieaufwand der Rübenverarbeitung: Otten, Dalum					
Aggregat	Motortyp	Dieserverbrauch		Umrechnungsfaktor	Energieverbrauch
Schredder	Dieselmotor	50l/h	2.960l	11,8 kWh/l	34.928 KWh
Bagger mit Rübenkorb	Dieselmotor	12l/h	710l	11,8 kWh/l	8.383 KWh
Radlader	Dieselmotor	15l/h	888l	11,8 kWh/l	10.478 KWh
Schlepper a. Reinigungsband	Dieselmotor	3,7l/h	220l	11,8 kWh/l	2.596 KWh
Leistung aus Diesel					56.385 KWh
... je Stunde					952 KWh
Energiebedarf je Ronne Rüben					56.385 KWh
					10,0KWh/t

Tabelle 9: Energieaufwand der Rübenverarbeitung Otten, Dalum

Zusammenfassend ist festzustellen, dass für die Rübenverarbeitung an der Biogasanlage Otten deutlich mehr Energie verbraucht wurde. Der »überdimensionierte« Schredder und die Arbeit von zwei Lademaschinen sind dafür überwiegend verantwortlich.

4.4. Arbeitsqualität

Ein wichtiger Aspekt im Hinblick auf die Arbeitsqualität ist die Qualität der verarbeiteten Rüben.

Für den Einsatz von Rüben in der Biogasanlage besteht die Voraussetzung, dass das eingesetzte Material steinfrei ist. Der Schmutzgehalt wurde bei der BGA Messingen vor und nach dem Waschen gemessen.

Besatz* vor dem Waschen der frisch gerodeten Rüben:	2,24 %
Besatz* nach der Wäsche:	0,64 %
Abreinigung durch Waschvorgang	1,60 %

*Untersuchung im Werk Nordstemmen

Außerdem wurde der Zerkleinerungsgrad der Rüben beurteilt. Hierzu wurde die »Schüttelbox« (siehe Abbildung 21) als Mess- und Beurteilungsmethode herangezogen. Die eingesetzte »Schüttelbox« dient in der Rinderfütterung zur Beurteilung des Grundfutters hinsichtlich dessen Größenstruktur.



Abbildung 21: Elemente der Schüttelbox

Bei der Ermittlung des Zerkleinerungsgrades der Zuckerrüben mit dem Gerät der Firma Putsch spielt bei dieser Messmethode die Fraktion über und unter 7,5 mm eine Rolle. Bei dem ersten zum Einsatz gekommenen Putsch-Gerät hatten ca. 50 % der zerkleinerten Rüben eine Größe von unter bzw. über 7,5 mm. Bei dem zweiten Putsch-Gerät lag der Anteil der Rübenstücke über 7,5 mm bei 40 %.

Putsch-Zerkleinerer 1 (35 kW, 38 t/h) vom 27. Oktober 2011		Putsch-Zerkleinerer 2 vom 12. Dezember 2011	
Mittelwert aus 3 Wiederholungen			
1. Fraktion > 19 mm	0,8%	1. Fraktion > 19 mm	0,5%
2. Fraktion > 7,5 mm	49,3%	2. Fraktion > 7,5 mm	38,0%
3. Fraktion > 1 mm	49,9%	3. Fraktion > 1 mm	61,5%

Obwohl der Putsch-Zerkleinerer 2 die Rüben feiner zerkleinert als der Putsch-Zerkleinerer 1, ist das Endprodukt von einer Fließfähigkeit noch weit entfernt (vergl. Abbildung 22). Zwischen den beiden Fotos liegt eine Zeitspanne von 40 Minuten.



Abbildung 22: Rüben nach Putsch-Zerkleinerer (Zeitabstand 40 Min.)

Bei der Rübenverarbeitung im Betrieb Otten der BGA Dalum, wurde ein großer Schredder als Zerkleinerer eingesetzt. Der damit hergestellte Rübenbrei war so fein, dass er mit der Schüttelbox nicht auf dessen Größenstruktur auswertbar war. Die einzelnen Rübenteile waren sehr klein, klebten zusammen und es bauten sich in der Schüttelbox Brücken auf.

4.5. Umweltaspekte

Beim Verfahren der Rübenaufbereitung für die Biogasproduktion sind einige Schwachstellen aufgetreten, die optimiert werden müssen, um langfristig negative Folgen insbesondere für den Boden zu unterbinden. Folgende Ansatzpunkte sind während der Rübenverarbeitung aufgefallen:

a) Hoher Anfall abgeseibter Erde

Bei der Vorreinigung der Rüben auf den Absieb-Förderbändern werden vor allem Rübenkraut und Erde von den Rübenkörpern entfernt. Dieser Schmutz fällt je nach Verarbeitungsverfahren entweder auf dem Acker oder auf dem Gelände der Biogasanlage an. Eine ordnungsgemäße Abfuhr dieser Reststoffe erfolgt, indem sie auf dem abgeernteten Rübenacker z. B. mit einem Miststreuer ausgebracht werden.

b) Wasserverbrauch bei der Rübenwäsche

Für die Rübenwäsche ist ein recht hoher Wasseraufwand erforderlich. Die KWS-Waschanlage benötigt z. B. zur Erstbefüllung des Containers 12 m³, der Wasserbedarf in Betrieb beträgt 3-4 m³/h. Auch für die Rhino-Wäsche ist eine Wassermenge von ca. 11 m³ erforderlich, die je nach Betriebsdauer, Leistung und Verschmutzung der Rüben mehrmals pro Tag ausgewechselt werden muss.

Das Schmutzwasser, das die Waschanlage wieder verlässt, darf nicht an einer Stelle versickern, sondern muss z. B. mit einem Güllefass auf der Ackerfläche verteilt werden.

c) Bodenverdichtungen bei Rübenwäsche auf der Ackerfläche

Die Zuckerrübenwäsche wurde bei der Verarbeitung der Zuckerrüben für die Biogasanlagen Esstringen und Ahlde auf dem Acker installiert. Das Aufladen der Rüben mit einem Teleskoplader aus der Miete, das Befüllen eines Reinigungsbandes zum Absieben, die Beladung der Rübenwaschanlage und das Überladen der Rüben auf Kipper fand auf dem Feld statt. Bei anderen Biogasanlagen wurden diese Arbeitsgänge auf befestigten Flächen direkt am Weiterverarbeitungsstandort durchgeführt.

Das Waschen der Zuckerrüben auf dem Acker bringt einige Nachteile mit sich. Durch das vielfache Befahren des Vorgewendes der Ackerfläche mit Teleskopladern und Transportfahrzeugen wurde der Boden belastet. In einigen Bereichen wurden mit Hilfe einer Bodensonde Verdichtungen in 10 cm Bodentiefe festgestellt. Diese Bereiche befanden sich dort, wo der Teleskoplader wiederholt zur Befüllung des Förderbandes fuhr und wendete (siehe Abbildungen 23 und 24). In anderen kaum befahrenen Bereichen wurde bei den Beprobungen mit der Bodensonde eine festere Schicht erst in der Tiefe der Pflugsohle (ca. 30 cm) ermittelt.

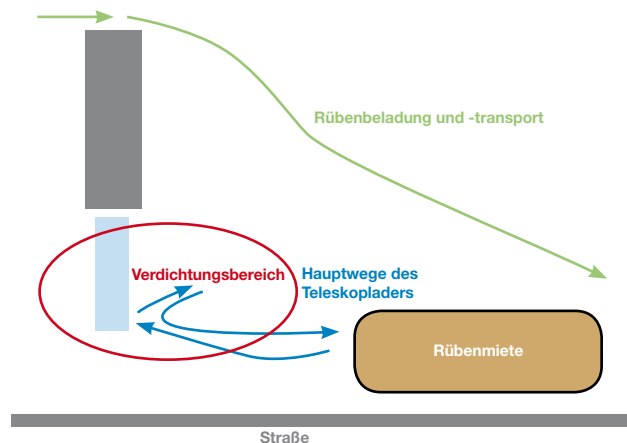


Abbildung 23: Skizze zum Aufbau der Anlage auf dem Rübenacker



Abbildung 24: Stark befahrener Bereich des Rübenackers

Zu den Bodenverdichtungen ist zu sagen, dass die Witterung im Herbst 2011 verhältnismäßig gute Bedingungen für das Verfahren der Rübenwäsche auf dem Acker mit sich brachte. Im September 2011 fielen größere Niederschlagsmengen lediglich am 6. und 7. mit 45 mm, im Oktober gab es vom 6.-11. Oktober einige niederschlagsreiche Tage (46 mm) und weitere 8 mm am 18. Oktober (September 68 mm, Oktober 57 mm). Im November fielen lediglich 3 mm. Durch die Periode nahezu ohne Niederschläge von Mitte Oktober bis zum Verarbeitungstermin der Rüben (Standort Estringen am 01. November 2011) konnte unter sehr guten Bedingungen gearbeitet werden. In einem Jahr mit stärkeren Niederschlägen im Oktober und November ist die Durchführung der Rübenwäsche auf einer Ackerfläche nicht möglich. Ebenfalls besteht für diesen Standort mit einem leichten Boden (hoher Sandanteil) eine nicht allzu starke Verdichtungsgefährdung. Auf anderen Standorten mit höheren Ton- und Lehmanteilen im Boden ist das Verfahren der Rübenwäsche auf dem Acker generell nicht möglich, da die Befahrbarkeit eingeschränkt ist und zu starke Schädigungen der Bodenstruktur durch Verdichtungen auftreten.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Bodenstruktur in den stark befahrenen Bereichen geschädigt wurde. Die Strukturstabilität der Bodenbestandteile Festsubstanz, Wasser und Gas wird bei starker Beanspruchung so verändert, dass es zu Verdichtungen kommt, um die Tragfähigkeit aufrecht zu erhalten. Die Struktur des Bodens kann bis zum Anbau der Folgefrucht sicherlich nicht wieder hergestellt werden. Dadurch zieht die Strukturschädigung des Bodens möglicherweise Minderungen der Ernteerträge der kommenden Jahre nach sich. Verdichtungsgebiete lassen sich visuell z. B. an der Pflanzenentwicklung erkennen.

d) Bereifung der Kipper beim Fahren auf dem Acker

Ähnliche Bodenverdichtungen wie bei c) können auftreten, wenn die Abfuhr der Rüben während der Rodung vorgenommen wird. Dabei fährt der Schlepper mit einem Anhänger neben dem Rübenroder, um ein Überladen während der Fahrt zur Zeiteinsparung vornehmen zu können. Durch das Befahren mit schmalen Reifen sowie einem hohen Reifendruck ist die Belastung besonders hoch.



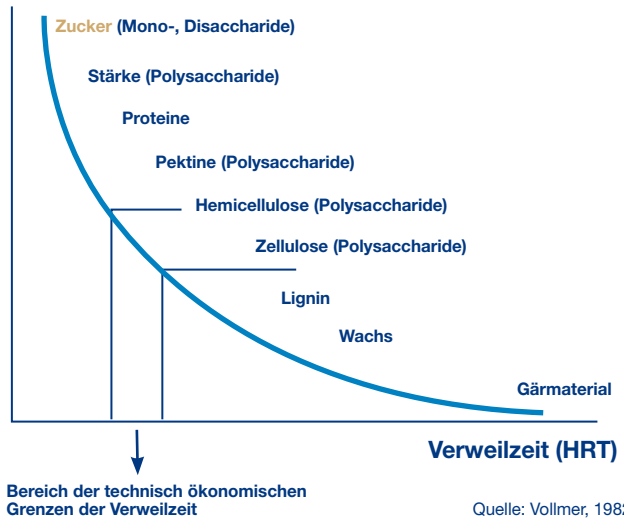
Abbildung 25: Bodenverdichtungen auf dem Acker durch schmale Bereifung (siehe linkes Foto)

5. Wirkung der Rübe im Fermenter

Für die Geschwindigkeit und das Ausmaß der Umsetzung in der Biogasanlage ist die Zusammensetzung des pflanzlichen Materials entscheidend. Nur die organische Trockensubstanz ist fermentierbar. Daher muss von der Trockensubstanz der Rohaschegehalt, d. h. die Summe aus den Mineralstoffen, abgezogen werden. Organische Trockensubstanz kann sich sehr unterschiedlich zusammensetzen.

Der Abbau einfacher Moleküle wie Saccharose (Zucker) verläuft in der Biogasanlage wesentlich schneller als der Abbau komplex aufgebauter Verbindungen wie Hemicellulose und Cellulose, während Lignin (Rohfaser) und Wachse überwiegend nicht abgebaut werden (siehe Abbildung 26). Daraus ergibt sich, dass Substrate mit einem hohen Anteil an Rohfaser langsamer und auch nur unvollständig abgebaut werden.

Abbildung 26: Verweilzeit und Abbau verschiedener Moleküle



Im Vergleich zu anderen Substraten zeichnen sich Zuckerrüben dadurch aus, dass sich die Trockensubstanz zu 90 % aus leicht umsetzbaren N-freien Extraktstoffen (NfE), hauptsächlich Zucker, geringem Gehalt an N-haltigen Stoffen (Rohprotein) und sehr geringem Gehalt an Rohasche zusammensetzt. Dieser besonders hohe Gehalt in leicht fermentierbaren Kohlenhydraten führt dazu, dass Zuckerrüben sehr schnell vollständig abgebaut werden und somit geringe hydraulische Verweilzeiten im Fermenter haben. In Laborversuchen mit Batch-Fermentern waren silierte Zuckerrüben nach bereits ca. 6 bis 8 Tagen zu über 90 % umgesetzt, was im Gegensatz dazu bei Mais ca. 12 bis 18 Tage und bei Schweinegülle über 20 Tage dauerte. Eine ausreichende Zerkleinerung der Rüben fördert zusätzlich die zügige Fermentation. Die ermittelten hydraulischen Verweilzeiten können jedoch nur als Schätzung gelten, da sie von Batch-Fermenteruntersuchungen abgeleitet wurden. In der Praxis werden jedoch in der Regel Durchfluss-Fermentersysteme betrieben.

Grundsätzlich führt eine schnellere Vergärbarkeit zu kürzeren Verweilzeiten im Fermenter und ermöglicht eine höhere Raumbelastung und somit eine bessere Auslastung der Fermenterkapazität. Allerdings erhöht das »schnelle Gas« auch die Anforderungen an die Prozesstechnik und den Betrieb einer Biogasanlage. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um eine Monofermentation handelt. Bei der Vergärung von Energiepflanzen (z. B. Zuckerrüben, Silo- und/oder Körnermais, Sonnenblumen oder Getreide) wird inzwischen davon ausgegangen, dass Mischungen (Kofermentation) fast immer einen Vorteil gegenüber Monofermentation haben.

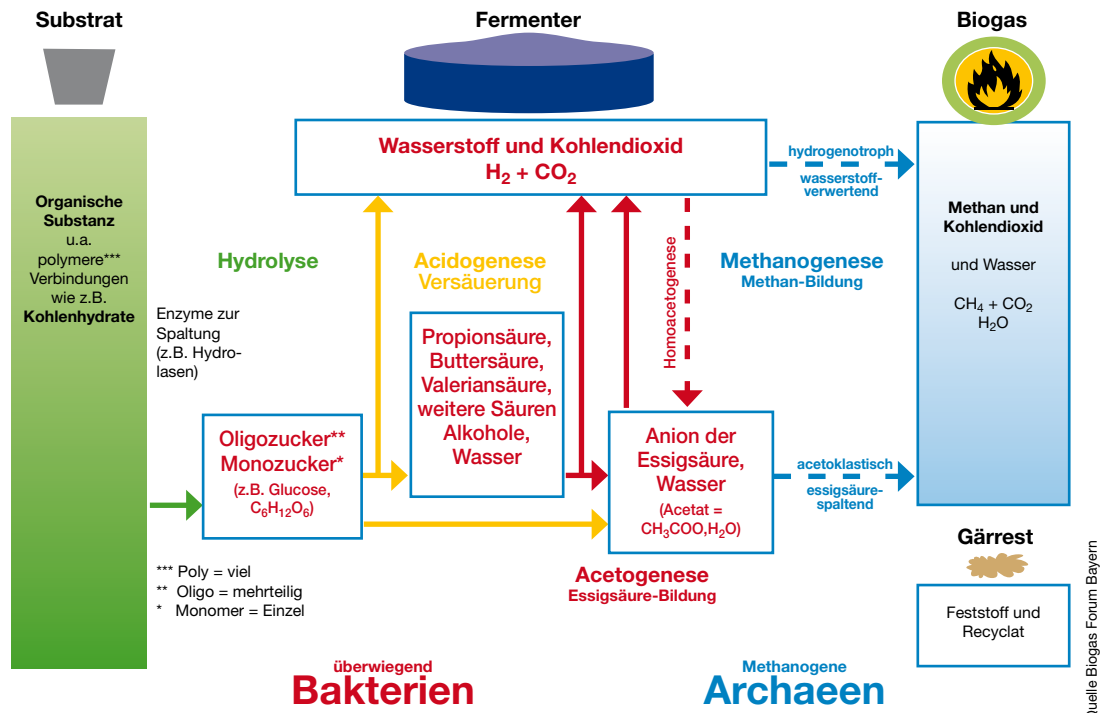


Abbildung 27: Vereinfachte Darstellung des Abbaus von Kohlenhydraten

Dass die Rüben gerade wegen ihrer positiven Gäreigenschaften zum Einsatz kommen, zeigen insbesondere auch die Ergebnisse aus der Praxis:

Im Versuchsgut Relliehausen der Universität Göttingen haben Erfahrungen gezeigt, dass die Einbeziehung der Zuckerrübe als Kosubstrat die Gasausbeute aus der organischen Substanz des gesamten vielseitigen Substratmix um etwa 2 % erhöht. Allein diese Erhöhung durch einen 20 %igen Anteil Zuckerrüben bedeutet eine um 10 % höhere Gasausbeute bezogen auf die Zuckerrüben. Ebenso die Verbesserung der Rührfähigkeit und die damit einhergehende Verringerung des Rühraufwands stellen im DLG-Versuch einen Vorteil dar. Die sich daraus ergebende Verringerung des Eigenstrombedarfs ist umso größer, je höher der TS-Gehalt des Substrates ist, und wird mit bis zu 25 % des Eigenstromanteils angegeben.

Ähnliche Ergebnisse kommen von der KWS aus eigenen Erhebungen in Praxisanlagen:

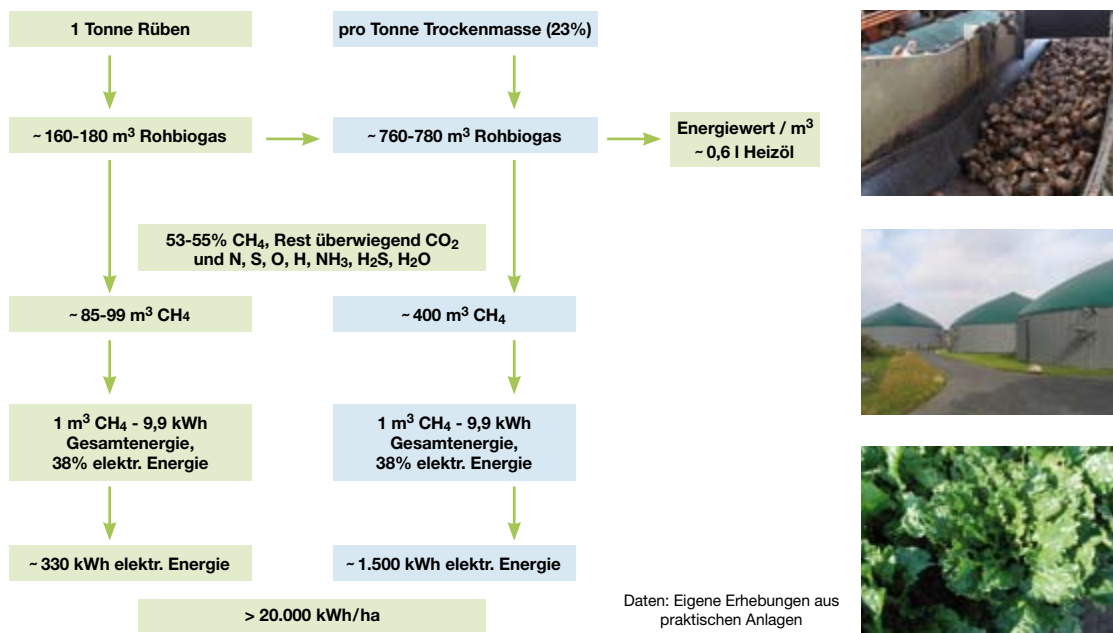


Abbildung 28: Faustzahlen nach Praxistests zur Rübe (Quelle: KWS)

Die Projektbeteiligten Biogasanlagen im Emsland konnten leider bis zum heutigen Tage kein belastbares Zahlenmaterial über die Wirkung der Rübe im Fermenter vorlegen. Aus Gesprächen mit den Anlagenbetreibern, den Herrn Temmen und Otten, lassen sich folgende Erfahrungen zusammenfassen:

Die RWG Emsland-Süd fährt aktuell in der Biogasanlage Gerdes einen Rübenanteil von 15-20 % (max. 25 %) und erreicht dabei im Substratmix mit Silomais eine Gasausbeute von 220 m³ Rohbiogas/t FM Inputmaterial. Im Vergleich mit Standardwerten aus der KTBL-Datensammlung (Biogasertrag Silomais 200 m³/t FM bzw. Zuckerrübe 150 m³/t FM) ist dies eine beachtliche Leistung, die den Synergieeffekt der Rübe im Substratmix auch in diesem Projekt widerspiegelt. Zusätzlich ist der Methangehalt seit dem Einsatz von Zuckerrüben um 2 % auf 54-55 % CH₄ angestiegen. Weiterhin berichtet Herr Temmen von einem massiven Anstieg der Essigsäuren beim Start mit Zuckerrüben. Bei kontinuierlicher Fütterung hat sich dieser allerdings auf leicht erhöhtem Niveau eingependelt.

Ähnliche Erfahrungen mit Gasausbeute und Methangehalt hat auch Herr Otten von der Biogasanlage Otten aus Dalum gemacht. Merkliche Vorteile des Rübeneinsatzes in seiner Biogasanlage sieht er zusätzlich noch in der deutlich verbesserten Rührfähigkeit. Bedingt durch das mehrstufige Anlagenkonzept wird sich hier großes Einsparpotential im Eigenstromverbrauch ergeben.

Der Gärrest ist in den Projektanlagen durch den Einsatz von Zuckerrüben insgesamt flüssiger (<TS) und cremiger geworden. Der Kaliumgehalt als durchlaufender Faktor im Biogasprozess ist ebenfalls leicht angestiegen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Zuckerrübe im Fermenter einer Biogasanlage im Substratmix eine höhere Gasausbeute, ein besseres Gärverhalten und einen schnelleren Abbau der eingesetzten Substrate mit sich bringt.

6. Diskussion

6.1. Prozessbeobachtung

Wie die Ergebnisse der Kosten- und Leistungsberechnungen zeigen, unterscheiden sich die effektiven Verarbeitungszeiten bei den einzelnen Verfahren deutlich. Beim Vergleich fällt eine Leistungssteigerung auf, die durch umfangreiche Veränderungen des laufenden Verarbeitungsprozesses zu begründen sind. Bei der RWG Emsland-Süd wurde der Verarbeitungsprozess im Laufe der Zeit so vereinfacht, dass bei der Anlage Messingen II (letzter Verarbeitungstermin) die Ausfallzeiten und der Auf- und Abbau deutlich reduziert werden konnten. Der Hauptgrund für die hohe Leistung mit max. 71 t/h (im Vergleich zu den anderen Anlagen mit 30-47 t/h) liegt jedoch auch im Einsatz eines leistungsfähigeren Putsch-Zerkleinerers, der somit nicht mehr das »Nadelöhr« der Verarbeitungskette darstellt.

Bei den Verarbeitungsprozessen, bei denen nur eine begrenzte Leistung erzielt werden konnte, bestand zudem ein Problem darin, dass zu viele Verarbeitungsschritte in direkter Folge und somit direkter Abhängigkeit durchgeführt wurden. Fiel ein Teil dieser Arbeitskette für kurze Zeit aus, war die gesamte Verarbeitung nicht ausgelastet. Es laufen Kosten für die Mitarbeiter und Maschinen weiter, während keine Leistung erbracht werden kann. Bei den Verarbeitungsprozessen, bei denen z. B. eine Zwischenlagerung von Rüben auf dem Anlagenplatz erfolgte, konnte diese Arbeitskette unterbrochen werden, da die Bereiche Laden und Transport von der Verarbeitung getrennt waren. Hierdurch wurde das Ausfall-Risiko begrenzt und die Verarbeitungsleistung gesteigert.

Insbesondere die Anlieferung der Rüben mit Schlepper und Anhänger, von dem die Rüben in ein Annahme-Förderband gekippt wurden, stellte sich als »Zeitfresser« heraus. Das z. T. lange Rangieren kostete dabei wertvolle Zeit. Eine angepasste Variante besteht darin, die Rüben auf dem Anlagenplatz zu lagern und dort mit einem Teleskoplader auf ein Förderband oder möglicherweise direkt in die Rübenwäsche zu laden. Durch diese Unterbrechung der Arbeitskette wird das Verfahren weniger anfällig für Störungen.

Um eine Überlastung z. B. des Putsch-Zerkleinerers zu unterbinden und somit die Ausfallzeiten zu reduzieren, wurde bereits bei einem Verarbeitungsprozess die Auslastung visuell dargestellt. D. h. eine Kontrollleuchte, geschaltet als Ampel, zeigt dabei die Auslastung an. Bei der Gefahr der Überlastung kann dabei die Zufuhr schon geregelt werden, bevor es zu einem Ausfall kommt.

Beim Vergleich der Verfahren wurde außerdem deutlich, dass die Rübenwäsche auf dem Anlagenplatz gegenüber einer Rübenwäsche auf dem Acker zu einer Steigerung der Arbeitsqualität führt. Dabei ist eine geringere Abhängigkeit von der Witterung gegeben, die Schmutzabfuhr sowie der Wasserwechsel sind leichter umsetzbar.

6.2. Optimierungsvorschläge

Wie bereits im vorherigen Kapitel beschrieben, bringt die bisher eingesetzte Fördertechnik oft Zeitverzögerungen im Verfahrensablauf mit sich. Durch die Befüllung des Annahmeförderbandes mit Rüben vom Anhänger gibt es keine kontinuierlich angelieferte Menge und somit auch keine optimale Auslastung des Zerkleinerers. Wenn die Rübenwäsche auf dem Anlagenplatz installiert ist, kann – wie bei der Anlage Messingen im Dezember – eine direkte Befüllung der Waschanlage mit einem Teleskoplader erfolgen, so dass auch in den Zerkleinerer eine gleichbleibende Menge Rüben gelangt und dieser somit optimal ausgelastet wird. Eine zusätzliche Steuerung der Bandgeschwindigkeit über SPS wäre ein weiterer Ansatz, das Verfahren zu optimieren und die Leistung zu steigern.

Zudem müssen die die Verarbeitungsmenge begrenzenden Maschinen ausgetauscht und somit das Verfahren optimiert werden. Das »Nadelöhr« in der Verarbeitungskette war bei der Verarbeitung 2011 oft der Putsch-Zerkleinerer oder die Rübenwaschanlage. Durch den Austausch gegen einen Putsch-Zerkleinerer mit höherer Leistung wurde dieses »Nadelöhr« bereits beseitigt. Unter diesem Aspekt spielt wiederum die Unterbrechung der Arbeitskette eine Rolle, da die Abhängigkeit der einzelnen Verfahrensteile voneinander minimiert wird.

Des Weiteren ist der Zerkleinerungsgrad der Rüben zu überprüfen. Dieser muss dem Verfahren angepasst werden, d. h. mit einem Putsch-Zerkleinerer kann aufgrund zu grober

Verarbeitung kein fließfähiger, homogener Rübenbrei erstellt werden. Für die Einlagerung im Hochbehälter ist dieses Verfahren ausreichend, für eine Einlagerung im Erdbecken aber problematisch.

Für die Einlagerung eines Rübenbreis in ein Erdbecken wurde daher bei der Biogasanlage Otten in Dalum eine Mühle verwendet. Durch diese entsteht ein Rübenbrei, der nach dem LKW-Transport in ein Erdbecken fließen kann. Das Problem dieses Verfahrens bestand darin, dass die Zerkleinerung der Rüben am Feldrand stattfand und ein Überladen auf LKW erforderlich war. Dabei musste die Mühle für den Wechsel der LKW leerlaufen, was Leerlaufzeiten von ca. 20 % mit sich brachte. Um dieses Verfahren zu optimieren und eine kontinuierliche Arbeitsleistung der Mühle zu gewährleisten, sollte eine Zerkleinerung der Rüben direkt am Erdbecken stattfinden. Dies hat zusätzlich die Vorteile der Verminderung von Fahr Schäden auf dem Acker sowie die Verhinderung des Auslaufens von Rübensaft aus dem LKW.

7. Fazit und Ausblick

Es gibt mehrere Rübenaufbereitungsverfahren, die gemäß des Lagerverfahrens des Rübensubstrats, der räumlichen Möglichkeiten auf der Biogasanlage und dem Anspruch an die Fütterungstechnik alle ihre Berechtigung haben. Den »Königsweg« gibt es hierbei nicht. Wenn die Rüben entsteint werden müssen, ist das Aufbereitungsverfahren um 20-100 % teurer als ohne Entsteinung. Die Ausfallzeiten von 15-30 % in einer Aufbereitungskette haben deutlichen Einfluss auf die Kosten. Die Aufbereitungskette ist so zu gestalten, dass die Förderströme der Maschinen aufeinander abgestimmt sind.

Der Energieverbrauch der zur Aufbereitung eingesetzten Maschinen variiert bei den einzelnen Verfahren von 6,2 bis 10,0 Kwh/t Rüben. Zukünftig muss auf Verfahren und Maschinen geachtet werden, die einen geringen Energieverbrauch aufzeigen. Die Verwendung von elektrisch angetriebenen Maschinen scheinen im Vergleich zu den mit Diesel betriebenen Fahrzeugen und Anlagen einen Vorteil beim Energieverbrauch zu haben.

Der Anspruch an die Rübengerkleinerung muss weiterhin intensiv untersucht werden. Je feiner der Rübenbrei desto fließfähiger ist er. Dieses ist besonders für die Befüllung und die Entleerung des Lagers wichtig. Das bedeutet aber auch, dass, je feiner der Rübenbrei, der Energieverbrauch auch höher ist. Es wäre für eine bessere Beschreibung der Rübengerkleinerungsarbeit der Maschinen ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung des Zerkleinerungsgrades sinnvoll.

Umweltaspekte wie die Ausbringung der abgereinigten Erde und des Rübenwaschwassers sowie die Vermeidung von Bodenverdichtungen müssen berücksichtigt werden.

Aus den Ergebnissen dieses Projekts lassen sich bereits jetzt deutliche Optimierungsansätze für den wirtschaftlichen Einsatz von einer Verfahrenskette zur Aufbereitung von Rüben zu Rübenbrei als Biogassubstrat ableiten. Dass die Rübe für die Fermentation vor allem als Co-Substrat hoch interessant ist, bestätigen die Erfahrungen der Betreiber der Biogasanlagen. Dieses gute Gefühl muss in den nächsten Jahren weiter untersucht werden, so dass man hierfür eine gefestigte und mit Untersuchungsergebnissen untermauerte Aussage machen kann.

Zur Fragestellung des Projekts kann man am Ende des Projektberichtes sagen, dass die Zuckerrübe eine Substratalternative in Mais-starken Anbauregionen ist. Es hat sich eine Aufbereitungstechnik für Rüben zu Biogassubstrat im Markt etabliert, die zukünftig immer weiter optimiert werden muss.

März 2012

Claus Pommerehne, Nordzucker AG

Quellen: DLG-Merkblatt 363: Biomasse Rüben
KWS-Biogaspotenziale der Rübe nutzen!
KTBL-Datensammlung 2010/2011

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Anbauverteilung der Feldfrüchte im Emsland/Grafschaft Bentheim 2011	3
Abbildung 2:	Sortenversuch Biomasse 2011 – Methanertrag	4
Abbildung 3:	Sortenversuch Biomasse – ZE und TM	4
Abbildung 4:	Einfluss der N-Düngung auf den Ertrag von Zuckerrüben (Dauerversuch IfZ, 1993-2002)	4
Abbildung 5:	Gärrestversuch 2011 – Standort Werlte	5
Abbildung 6:	Herbizidversuch in Zuckerrüben – Dalum 2011, Teil 1	6
Abbildung 7:	Herbizidversuch in Zuckerrüben – Dalum 2011, Teil 2	6
Abbildung 8:	Herbizidversuch in Zuckerrüben – Hesselte 2011, Teil 1	6
Abbildung 9:	Herbizidversuch in Zuckerrüben – Hesselte 2011, Teil 2	6
Abbildung 10:	Rübenroder im Einsatz bei der RWG Emsland-Süd	7
Abbildung 11:	Rübenroder im Einsatz auf dem Betrieb Otten	7
Abbildung 12:	Biogasanlage Gerdes in Messingen	7
Abbildung 13:	Verfahrensablauf bei der BGA Messingen, Dezember	8
Abbildung 14:	Verfahrensablauf bei der BGA Beesten	8
Abbildung 15:	Verfahrensablauf bei der Biogasanlage Messingen	9
Abbildung 16:	Verfahrensablauf bei der BGA Salzbergen	9
Abbildung 17:	Verfahrensablauf bei der BGA Estringen	10
Abbildung 18:	Verfahrensablauf bei der BGA Dalum	10
Abbildung 19:	Ausfall-, Rüst- und Verarbeitungszeiten	11
Abbildung 20:	Übersicht von Kosten und Leistungen im Vergleich	14
Abbildung 21:	Elemente der Schüttelbox	16
Abbildung 22:	Rüben nach Putsch-Zerkleinerer (Zeitabstand 40 Min.)	16
Abbildung 23:	Skizze zum Aufbau der Anlage auf dem Rübenacker	17
Abbildung 24:	Stark befahrener Bereich des Rübenackers	17
Abbildung 25:	Bodenverdichtungen auf dem Acker durch schmale Bereifung (siehe linkes Foto)	18
Abbildung 26:	Verweilzeit und Abbau verschiedener Moleküle	19
Abbildung 27:	Vereinfachte Darstellung des Abbaus von Kohlenhydraten	19
Abbildung 28:	Faustzahlen nach Praxistests zur Rübe (Quelle: KWS)	20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht ausgewählter Rübenverarbeitungsprozesse	11
Tabelle 2:	Kostenermittlung BGA Estringen	11
Tabelle 3:	Kostenermittlung BGA Beesten	12
Tabelle 4:	Kostenermittlung BGA Messingen	12
Tabelle 5:	Kostenermittlung BGA Messingen II	13
Tabelle 6:	Kostenermittlung BGA Otten, Dalum	14
Tabelle 7:	Energieaufwand am Beispiel Messingen II	14
Tabelle 8:	Energieaufwand Auf- und Abbau	15
Tabelle 9:	Energieaufwand der Rübenverarbeitung Otten, Dalum	15

