

Friedrich Weißbach, Andrea Wagner, Maika Scholtissek, Horst Auerbach und Carsten Herbes

Konservierungsverluste bei der Silierung von Zuckerrüben für die Biogasgewinnung

In einem Gemeinschaftsprojekt mehrerer Firmen wurde mithilfe von Modellversuchen ein Verfahren zur Konservierung von Zuckerrüben entwickelt. Das Verfahrenskonzept sieht vor, gewaschene Zuckerrüben der Oberflächenbehandlung mit einem antimykotischen Siliermittel zu unterziehen und sie dann in Folienschläuche einzulagern. Die Zerkleinerung erfolgt erst nach der Lagerung der Rüben im Schlauch. Im Rahmen dieser Versuche wurde eine Auswertungsmethode entwickelt und erprobt, die es ermöglicht, die Verluste an Methanbildungspotenzial zu bestimmen. Diese Methode ist auch bei anderen Konservierungs- und Lagerungsverfahren für Zuckerrüben anwendbar.

Schlüsselwörter

Biogas, Zuckerrüben, Konservierungsverluste, Methanbildungspotenzial

Keywords

Biogas, sugar beet, conservation losses, methane yield

Abstract

Weißbach, Friedrich; Wagner, Andrea; Scholtissek, Maika; Auerbach, Horst and Herbes, Carsten

Conservation losses in the course of ensiling sugar beet for biogas production

Landtechnik 66 (2011), no. 4, pp. 254–258, 1 figure, 2 tables, 3 references

In a joined research project of several companies a procedure for conservation of sugar beet was developed. Model experiments were carried out for this purpose. The conception of the procedure tested was the ensiling of whole sugar beets in large plastic bags, after the surface of the individual beets is treated with an antimycotic preservative. Chopping of the beets is done after the storage in the bags. In the course of these experiments, a method was developed and tested which enables the determination of the conservation losses expressed as losses of the methane forming potential. This method is also suitable to evaluate other procedures of sugar beet conservation and storage.

Die Nutzung von Zuckerrüben als Energiepflanze erlangt zunehmende Bedeutung. Hoher Flächenertrag und gute Fermentierbarkeit bei der Gewinnung von Biogas sprechen für sie. Erfahrungen in der Praxis haben die hohe spezifische Gasausbeute und vor allem die schnelle Gasbildung bestätigt. Die Rüben sind aber bekanntlich nur begrenzte Zeit lagerfähig, sodass für den ganzjährigen Einsatz eine Konservierung nötig wird. Der Vorteil des hohen Flächenertrages kann nur dann voll wirksam werden, wenn es gelingt, das Gasbildungspotenzial möglichst verlustarm vom Feld zum Fermenter zu bringen. Gegenwärtig werden verschiedene technische Lösungen für eine Bevorratung und Konservierung von Zuckerrüben erprobt und untersucht. Das bestmögliche Verfahren hinsichtlich Erhaltung des Gasbildungspotenzials und vertretbarer Kosten ist bisher noch nicht gefunden.

Besonderheiten der Bewertung

Bei der Bewertung von Zuckerrüben als Biogassubstrat ist zwischen zwei Merkmalen zu unterscheiden: dem auf die Masse bezogene Gasbildungspotenzial und der Umsatzgeschwindigkeit. Wenn in der Praxis ein Teil der Maissilage masseäquivalent durch frische oder auch silierte Zuckerrüben ersetzt wird, steigt regelmäßig der Gasertrag an. Das lässt aber noch nicht auf ein höheres Gasbildungspotenzial gegenüber der Maissilage schließen. Vielmehr kann der Mehrertrag schon durch die größere Umsatzgeschwindigkeit der Rüben im Verhältnis zur Maissilage erklärt werden. Es ist deshalb falsch, den erzielten Mehrertrag an Gas pro Zeiteinheit dem spezifischen Gasbildungspotenzial der Zuckerrüben pro Masseinheit zuzuschreiben, wie es gelegentlich schon geschehen ist.

Wenn Silage aus Zuckerrüben in den Fermenter eingebracht wird, nimmt oft auch der Methangehalt des Biogases zu.

Ursache dafür ist der Alkohol in der Silage, denn dieser hat einen wesentlich höheren Energiegehalt als der Zucker, aus dem er entstanden ist. Aus diesem Grund sind auch die Verluste an organischer Trockensubstanz (oTS), die beim Silieren entstehen, höher als die an Energie. Die Kenntnis des Verlustes an oTS reicht deshalb bei Zuckerrüben nicht aus, um die Effizienz der Konservierung zu bewerten. Außerdem liegt das auf die oTS bezogene Gasbildungspotenzial von silierten Rüben meist deutlich höher als das von frischen Rüben und darf deshalb nicht auf den Flächenertrag der unsilierten Rüben übertragen werden. Wenn dies doch geschieht, wird der Gasertrag pro ha überschätzt. Die Bewertung von frischen und silierten Zuckerrüben als Biogassubstrat hat also ihre Besonderheiten, die es bei der Ermittlung von Erträgen und Konservierungsverlusten zu beachten gilt.

Der vorliegende Artikel beschäftigt sich mit der Erhaltung des massespezifischen Gasbildungspotenzials bei der Silierung und Lagerung von Zuckerrüben. Für die Ermittlung des Gasbildungspotenzials aus Laboranalysen sind bereits methodische Vorschläge unterbreitet worden [1]. Auf welche Weise die Verluste an Gasbildungspotenzial bei der Silierung bestimmt werden können, soll im Folgenden gezeigt werden. Das geschieht anhand der Ergebnisse eines Gemeinschaftsprojektes zur Silierung von Zuckerrüben, über die bereits an anderer Stelle berichtet worden ist [2], ohne jedoch die Berechnungsweise der Verluste im Einzelnen offen zu legen.

Material und Methode

Das hier geprüfte Verfahrenskonzept sieht vor, gewaschene Zuckerrüben der Oberflächenbehandlung mit einem chemischen Siliermittel zu unterziehen und sie in Folienschläuche einzulagern. Zur Simulation der Bedingungen, wie sie im Folienschlauch vorliegen, wurden Modellversuche in 215 Liter fassenden Plastik-Fässern mit Zuckerrüben aus dem Erntejahr 2008 durchgeführt. Die Fässer waren mit Vorrichtungen zur Begrenzung des Gasaustausches und zum Ablassen des Gärstoffes versehen. Die Zuckerrüben wurden gebröckelt oder unzerkleinert, und jeweils ohne bzw. mit Siliermittel-Behandlung siliert. Vergleichsweise wurde auch eine simulierte Mietenlagerung geprüft, nämlich die Lagerung ganzer Rüben in solchen Fässern unter freiem Luftzutritt und -abfluss. Die Lagerung erfolgte generell bei Außentemperatur. Je Prüfglied wurden 8 Fässer gefüllt. Die Hälfte der Fässer wurden Ende März 2009 nach 4½ Monaten Lagerdauer, die restlichen im August nach 9 Monaten geöffnet. Was die Silierung betrifft, werden hier nur die Ergebnisse nach 9 Monaten Lagerdauer, die also unter Einschluss sommerlicher Lagertemperaturen zustande gekommen sind, dargestellt.

Bewertungskriterien waren das Methanbildungspotenzial (MBP) von frischen und konservierten Zuckerrüben sowie die Verluste an MBP, die während der gesamten Konservierung und Lagerung entstehen. Silage und Gärstoff wurden auf alle einzelnen Gärprodukte (Gärsäuren und Alkohole) untersucht und die Trockensubstanzgehalte auf diese flüchtigen Stoffe hin korrigiert [3]. Gleichzeitig erfolgte die Messung der für die Be-

wertung notwendigen Gehalte an Rohasche (XA) und an ADF_{org} (organischer Anteil der *acid detergent fiber*) in den frischen und den silierten Rüben. Die Gehalte an Gärprodukten sowie die an XA und ADF_{org} wurden dann bei Silagen und Gärstoff auf die korrigierte Trockensubstanz (TS_k) umgerechnet. Dazu wurden die üblicherweise bei der Laboranalyse auf TS bezogenen Gehalte an XA und ADF_{org} mit dem Quotienten TS/TS_k multipliziert. Das Methanbildungspotenzial ist schließlich aus dem Gehalt an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) und an Alkohol berechnet worden [1].

Folgende Gleichungen dienen zur Berechnung des Gehaltes an FoTS

in frischen Zuckerrüben:

$$FoTS [g/kg TS] = 991 - (XA) - 0,50 (ADF_{org}) [g/kg TS] \quad (Gl. 1)$$

sowie in Silagen und Gärstoff:

$$FoTS [g/kg TS_k] = 991 - (XA) - 0,50 (ADF_{org}) [g/kg TS_k] \quad (Gl. 2)$$

Die Gehalte an XA und an ADF_{org} sind als g/kg TS bzw. TS_k in die Gleichungen einzusetzen. (Beim Gärstoff entfällt selbstverständlich die Berücksichtigung von ADF_{org}).

Die hier verwendeten Gleichungen zur Berechnung des MBP lauten

für frische Zuckerrüben:

$$Methan [Liter/kg TS] = 0,375 FoTS [g/kg TS] \quad (Gl. 3)$$

und für die daraus hergestellten Silagen sowie den Gärstoff:

$$Methan [Liter/kg TS_k] = 0,375 FoTS + 0,32 AL [g/kg TS_k] \quad (Gl. 4)$$

AL bedeutet die Summe der Gehalte aller Alkohole (C_1 bis C_4 , inklusive der Diöle), bezogen auf die korrigierte Trockensubstanz.

Die potenziellen Verluste an oTS bzw. MBP durch Gärstoffabfluss („Sickersaftverlust“ = SV) wurden mit folgenden Gleichungen berechnet (AM = Ausgangsmaterial):

$$SV_{oTS} [\%] = 100 \frac{\text{kg Gärstoff} \cdot oTS_{\text{Saft}} [g/kg FM]}{\text{kg Rüben} \cdot oTS_{AM} [g/kg FM]} \quad (Gl. 5)$$

$$SV_{MBP} [\%] = 100 \frac{\text{kg Gärstoff} \cdot MBP_{\text{Saft}} [l/kg FM]}{\text{kg Rüben} \cdot MBP_{AM} [l/kg FM]} \quad (Gl. 6)$$

$$GV_{\text{oTS}} [\%] = 100 - 100 \frac{(\text{kg Silage} \cdot \text{oTS}_{\text{Silage}} [\text{g/kg FM}]) + (\text{kg Gärssaft} \cdot \text{oTS}_{\text{Saft}} [\text{g/kg FM}])}{\text{kg Rüben} \cdot \text{oTS}_{\text{AM}} [\text{g/kg FM}]} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$GV_{\text{MBP}} [\%] = 100 - 100 \frac{(\text{kg Silage} \cdot \text{MBP}_{\text{Silage}} [\text{l/kg FM}]) + (\text{kg Gärssaft} \cdot \text{MBP}_{\text{Saft}} [\text{l/kg FM}])}{\text{kg Rüben} \cdot \text{MBP}_{\text{AM}} [\text{l/kg FM}]} \quad (\text{Gl. 8})$$

Die Verluste an oTS bzw. an MBP durch Gärung und Atmung („Gärverlust“ = GV) sind mit den Gleichungen 7 und 8 berechnet worden.

Die Gehalte an oTS und MBP sind jeweils als g/kg FM bzw. Liter/kg FM in die Gleichungen einzusetzen (FM = Frischmasse).

Ergebnisse und Diskussion

Das Prinzip des Konservierens durch Silierung besteht bekanntlich darin, dass das Lagerungsgut unter Luftabschluss gebracht wird und dann Milchsäuregärung darin stattfindet. Zuckerrüben geben unter diesen Bedingungen nach dem Absterben des Pflanzengewebes sehr große Mengen an nährstoffreichem Gärssaft ab, der voll erhalten bleiben und mit verwertet werden muss. Die Konservierung von Zuckerrüben im Folienschlauch sichert zwar einen weitgehenden Luftabschluss, ist aber nur dann anwendbar, wenn relativ wenig Gärssaft entsteht. In unseren Versuchen wurden bei der Silierung gebröckelter Zuckerrüben rund 400 Liter Gärssaft je t Ausgangsmaterial gebildet, bei der Silierung von ganzen Rüben dagegen erheblich weniger, nämlich 120 bis 140 Liter je t [2]. Nur diese stark reduzierte Menge an Gärssaft lässt sich in Folienschläuchen zurückhalten und bei sorgfältigem Management der vollständigen Verwertung zuführen. Durch den Verzicht auf die Zerkleinerung der Rüben wird ihre Silierung im Folienschlauch überhaupt erst möglich.

Wie wertvoll der entstehende Gärssaft ist, kann den durch zahlreiche Analysen festgestellten Gehalten an oTS und an MBP entnommen werden (**Tabelle 1**). Im Unterschied zu anderer pflanzlicher Biomasse besteht die oTS von Zuckerrüben zum großen Teil aus wasserlöslichen Stoffen, nämlich dem Zucker

und seinen Umsetzungsprodukten. Deshalb ist der abfließende Gärssaft praktisch gleichviel wert wie die im Silo zurückbleibende Rübensilage.

Wie **Tabelle 1** weiter zeigt (angegeben sind Mittelwerte und Spannweiten), geht der oTS-Gehalt der Rüben bei der Silierung infolge der Gärgasbildung etwas zurück, während das spezifische Gasbildungspotenzial je kg oTS ansteigt. Dieser Anstieg wird dadurch verursacht, dass das Hauptgärprodukt in Zuckerrübensilage aus Ethanol besteht. Auf die Frischmasse berechnet, liefern Silage und Gärssaft wie auch erntefrische oder bis zum Ausgang des Winters sorgfältig (in Mieten oder Hallen) gelagerte Rüben nahezu die gleiche Menge an Methan.

Neben der erwünschten Reduzierung des Gärssaftanfalls hat der Verzicht auf das Zerkleinern der Zuckerrüben auch Nachteile, die sich aus den Hohlräumen zwischen den unzerkleinerten Rüben ergeben. Durch dieses relativ große Hohlraumvolumen wird nicht nur Luftsauerstoff beim Einlagern der Rüben mit eingeschlossen, sondern es gelangt auch während der Lagerung durch unvermeidbare Vorgänge des Druckausgleichs mit der Atmosphäre immer wieder einmal etwas Luftsauerstoff in das Innere des Schlauches. Die Folge davon sind höhere Gärverluste als bei der Silierung von zerkleinerten Rüben (**Abbildung 1**).

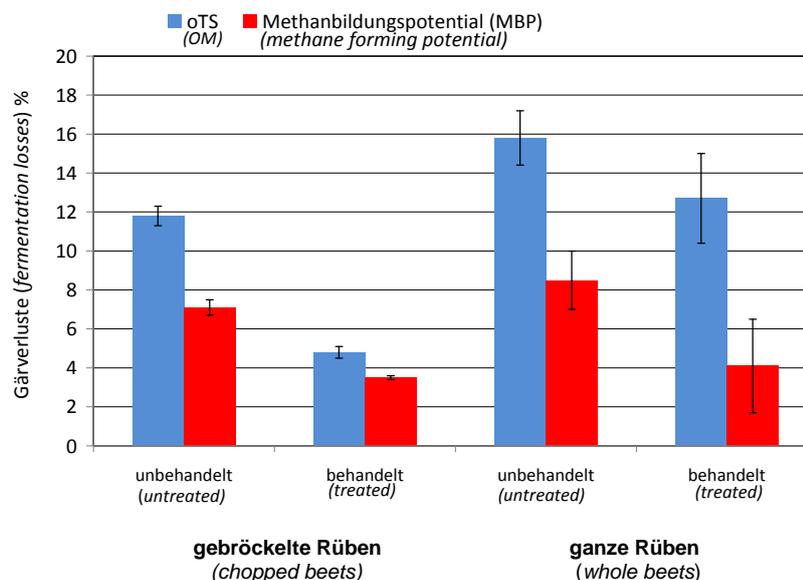
Um diesen Nachteil zu kompensieren, kam das chemische Siliermittel zum Einsatz. Geprüft wurde ein Flüssigpräparat, welches antimykotische Wirkstoffe enthält, die das Wachstum von Hefen und Schimmelpilzen unterdrücken. Die ganzen Rüben wurden vor dem Silieren einer Oberflächenbehandlung mit dem Siliermittel unterzogen, in die gebröckelten Rüben wurde das Siliermittel eingemischt. Die Behandlung mit dem Silier-

Tab. 1

Gehalte an oTS und Methanbildungspotenzial von gewaschenen Zuckerrüben sowie daraus entstandener Silage und Gärssaft
 Table 1: Content of OM and methane forming potential of washed sugar beets as well as of silage and effluent obtained therefrom

Substrat Substrate	oTS-Gehalt OM content g/kg FM	Methanbildungspotenzial (MBP) Methane forming potential	
		l/kg oTS l/kg OM	m ³ /t FM
Rüben, frisch im November Beets, fresh in November	231 (226–236)	361 (360–361)	83 (82–85)
Rüben, sorgfältig gelagert bis Ende März Beets, carefully stored till end of March	221 (218–225)	363 (361–364)	80 (79–82)
Silage, im Silo bis August Silage, in silo till August	212 (198–231)	383 (357–403)	81 (77–86)
Gärssaft, unverdünnt Effluent, undiluted	199 (177–214)	385 (374–410)	77 (68–80)

Abb. 1



Gärverluste bei der Silierung von zerkleinerten oder ganzen Zuckerrüben jeweils unbehandelt bzw. nach Behandlung mit dem Siliermittel KOFASIL®STABIL

Fig. 1: Fermentation losses during ensiling of chopped or whole sugar beets, both untreated versus treated with the silage additive KOFASIL®STABIL

mittel senkt die Gärverluste. Der Nachteil des Verzichtes auf die Zerkleinerung der Rüben hinsichtlich der Gärverluste wird durch diese Behandlung ausgeglichen. Die höheren Standardabweichungen der Ergebnisse für die ganzen Rüben im Vergleich zu den für die zerkleinerten sind materialtypisch und nicht vermeidbar. Unabhängig davon, ob die Rüben ganz oder zerkleinert siliert wurden, war bei Siliermitteleinsatz der Verlust an MBP im Mittel praktisch gleich und auf sehr niedrigem Niveau.

Ein weiter Nachteil der Silierung von ganzen Rüben für die Erhaltung des MBP wird während der Entleerung der Folienschläuche wirksam. Nach dem Öffnen des Schlauches kann das in den Hohlräumen befindliche sauerstofffreie Gas, das aus Kohlendioxid neben elementarem Stickstoff besteht, ungehin-

dert abfließen und durch einströmende Luft ersetzt werden. Rascher Bewuchs mit Hefen und Schimmel ist die Folge. Dadurch wird die mit Nährstoffverlust verbundene Nacherwärmung der silierten Rüben ausgelöst. Um diesen Verlust gering zu halten, muss der Schlauch bei sommerlichen Außentemperaturen innerhalb von wenigen Tagen entleert werden. Wie durch entsprechende Stabilitätstests nachgewiesen wurde [2], bewirkt das Siliermittel eine wesentliche Verzögerung der Nacherwärmung und ermöglicht damit eine langsamere Entleerung ohne zusätzlichen Verlust.

Tabelle 2 fasst die Bilanzierungsergebnisse zusammen. Zum Vergleich sind auch die von uns gemessenen Verluste bei optimaler Lagerung frischer Zuckerrüben mit aufgeführt.

Tab. 2

Verluste bei der Lagerung und Konservierung von ganzen Zuckerrüben (n = 4)

Table 2: Losses during storage and conservation of whole sugar beets (n = 4)

		Verluste/Losses [%]	
		oTS Organic matter	Methanbildungspotenzial (MBP) Methane forming potential
Konservierende Lagerung bis Ende März/Careful storage till end of March			
		5 (4-7)	5 (3-7)
Silierung im Folienschlauch bis Mitte August/Ensiling in large plastic bags till middle of August			
I	ohne Silierzusatz, Saft weggelaufen/untreated, effluent lost	27 (26-29)	21 (19-23)
II	ohne Silierzusatz, Saft komplett aufgefangen und verwertet/untreated, effluent totally collected and exploited	16 (14-17)	9 (7-11)
III	mit Silierzusatz, Saft komplett aufgefangen und verwertet/treated with silage additive, effluent totally collected and exploited	13 (10-17)	4 (2-6)

Die Verluste an MBP, die beim Silieren nach diesem Verfahrenskonzept entstehen, liegen hiernach auf gleich niedrigem Niveau wie die bei einer optimal gestalteten, „konservierenden“ Lagerung frischer Zuckerrüben bis zum Ausgang des Winters. Das hier geprüfte Verfahren der Silierung ermöglicht es jedoch, Zuckerrüben auch über diese Jahreszeit hinaus mit gleich niedrigen Verlusten an MBP für die Biogasgewinnung bereitzustellen. Wegen des höheren Aufwandes dürfte sich das Silieren aber auch nur für diejenigen Rüben lohnen, die in der warmen Jahreshälfte verwertet werden sollen.

Schlussfolgerungen

Die Bevorratung von Zuckerrüben über das Frühjahr hinaus erfordert ein Verfahren zur verlustarmen Konservierung. Dafür eignet sich das Silieren unzerkleinerter Rüben im Folienschlauch. Zu diesem Verfahren gehört ein sorgfältiges Gärstoff-Management. Aller Gärstoff muss erfasst und verwertet werden.

Der Verzicht auf das Zerkleinern der Rüben vor dem Silieren schränkt die Gärstoffbildung erheblich ein und ermöglicht es, diese Forderung zu erfüllen. Er hat jedoch höhere Verluste durch Gärung und Restatmung sowie ein größeres Risiko für die Nacherwärmung der silierten Rüben während der Entleerung der Schläuche zur Folge. Diese höheren Gärverluste und das Nachgärerisiko lassen sich durch die Oberflächenbehandlung der ganzen Rüben mit einem Siliermittel, welche vor der

Einlagerung in den Folienschlauch durchzuführen ist, wirksam vermindern.

Bei der Anwendung des hier beschriebenen und untersuchten Silierverfahren ist es möglich, mit ebenso niedrigen Verlusten an Methanbildungspotenzial auszukommen wie mit einem optimal gestalteten Verfahren der Lagerung frischer Zuckerrüben bis zum Frühjahr. Diese Verluste liegen auf einem Niveau von etwa 5 %. Daran sollten sich andere, in der Diskussion befindliche Konservierungsverfahren messen lassen.

Literatur

- [1] Weißbach, F. (2008): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. *Landtechnik* 63(6), S. 356–358
- [2] Wagner, A.; Scholtissek, M.; Auerbach, H.; Herbes, C.; Weißbach, F. (2010): Eine Frage der Konservierung. *Biogas Journal* 13(4), S. 58–61
- [3] Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. *Landtechnik* 63(6), S. 354–355

Autoren

Prof. Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach ist als freischaffender Firmenberater tätig, E-Mail: prof.f.weissbach@web.de

Dr. Andrea Wagner und **Maika Scholtissek** arbeiten bei der BAG Budissa Agroservice GmbH, 02694 Kleinbautzen, E-Mail: andrea.wagner@budissa-bag.de, maika.scholtissek@budissa-bag.de

Dr. Horst Auerbach ist bei der ADDCON EUROPE GmbH, 53113 Bonn beschäftigt, E-Mail: horst.auerbach@addcon.com und

Dr. Carsten Herbes bei der NAWARO BioEnergie AG, 04105 Leipzig, E-Mail: carsten_herbes@nawaro.ag