

Friedrich Weißbach, Klaus Parr, Uwe Reinsdorf, Christina Warnke-Gurgel und Bernd Losand

# Verluste an Methanbildungspotenzial von Zuckerrübenmus in offenen Erdbecken

In der vorliegenden Studie wurden die Verluste an Methanbildungspotenzial untersucht, die bei der Lagunenlagerung von Zuckerrübenbrei entstehen. Dazu wurde eine Methode entwickelt, die eine Quantifizierung dieser Verluste ohne Massenbilanz ermöglicht. Als Substrat für die Biogasgewinnung werden Zuckerrüben zu einer breiigen Masse aufbereitet und in mit Folie ausgekleideten offenen Erdbecken (Lagunen) gelagert. Im Inneren der Masse kommt es durch anaerobe Bedingungen und Milchsäuregärung zur Konservierung der organischen Trockensubstanz (oTS). An der Oberfläche, die dem Luftzutritt ausgesetzt ist, entstehen zusätzliche Verluste durch aeroben Stoffabbau und Verdunstung flüchtiger Stoffe.

## Schlüsselwörter

Biogas, Zuckerrüben, Konservierung, offene Erdbecken, Lagunen, Methanbildungspotenzial

fermentation. In the surface layer, which is exposed to the atmosphere, additional losses are generated by aerobic substrate degradation and evaporation of volatile compounds.

## Keywords

Biogas, sugar beets, conservation, open ground basins, lagoons, methane forming potential

## Abstract

Weissbach, Friedrich; Parr, Klaus; Reinsdorf, Uwe; Warnke-Gurgel, Christina and Losand, Bernd

Losses of methane forming potential of pulpified sugar beets stored in open ground basins

Landtechnik 68(1), 2013, pp. 50–57, 2 figures, 6 tables, 5 references

The aim of this study was to examine the losses of methane forming potential during storage of pulpified sugar beets in open lagoons. A method was developed enabling the quantification of the losses without the need of a mass balance. For the use as substrate for biogas production, it has been proposed to pulpify sugar beets and to store this material in open ground basins (lagoons) which are lined with plastic film. The organic matter (OM) in the inner regions of the lagoon is preserved by anaerobic conditions and lactic acid

Um Zuckerrüben ganzjährig als Substrat für die Biogasproduktion zu nutzen, müssen sie konserviert werden. Für eine Silierung mit herkömmlichen Technologien sind Zuckerrüben aber nicht geeignet, da ihr Hauptinhaltsstoff Zucker wasserlöslich ist. Beim Silieren entstehen sehr große Mengen an Gärstoff, der den Zucker und die Gärungsprodukte enthält und deshalb im Silo zurückgehalten werden muss. Dieser Gärstoff hat nach Abschluss der Milchsäurebildung einen sehr niedrigen pH-Wert und ist extrem korrosiv gegenüber Beton und metallischen Werkstoffen. Der Einsatz im Biogasfermenter erfordert eine starke Zerkleinerung der Rübenkörper. Es ist deshalb naheliegend, die Rüben bereits vor der Konservierung zu einer pumpfähigen Masse zu verarbeiten. Das hat den Vorteil, dass sich später die tägliche Entnahme der Rübenbreisilage und ihre Einspeisung in den Fermenter technologisch sehr einfach gestalten lassen. Ein Luftabschluss zur Vermeidung aeroben Nährstoffabbaus ist dann aber auf herkömmlichem Wege, etwa durch das Aufbringen einer Folie wie bei einer Grünfuttersilage, kaum möglich. Aus diesen Gründen wären für eine optimale Konservierung wasser- und zugleich gasdichte Behälter aus korrosionsfestem Material wünschenswert, die aber viel zu teuer wären.

Als Lösung wurde die Silierung unzerkleinerter Zuckerrüben in Folienschläuchen vorgeschlagen und untersucht [1; 2]. Dieses Verfahren führt zwar zu geringstmöglichen Konservierungsverlusten, ist aber wegen der notwendigen Aufbereitung

der Rüben vor der Einlagerung (Steinabtrennung, Waschen, Oberflächenbehandlung mit einem Siliermittel) und nach der Entnahme aus dem Schlauch (Zerkleinern) technologisch sehr aufwendig und relativ teuer. Dieses Verfahren ist deshalb nur unter speziellen Bedingungen, etwa zur Verlängerung der Kampagne im Anschluss an den Einsatz frischer Rüben, sinnvoll.

Um Zuckerrüben ganzjährig einsetzen zu können, wird seit 2009 auch die Möglichkeit der Lagerung von breiförmiger Zuckerrübensilage in flüssigkeitsdichten, offenen Erdbecken (Lagunen), die mit Schweißbahnen von Plastikfolie ausgelegt sind, diskutiert und erprobt [3]. Dieses Silierverfahren bietet viele Vorteile, wie geringe Baukosten, Korrosionsfestigkeit des Behälters, komplette Zurückhaltung des Gärstoffes und eine einfache technologische Gestaltung der Silageentnahme. Es müssen jedoch zusätzliche Konservierungsverluste in Kauf genommen werden, die infolge der freien Oberfläche entstehen. Über den tatsächlichen Umfang dieser Verluste gibt es bisher keine hinreichend begründeten Zahlen. Ziel der vorliegenden Studie war es, den Verlust an Methanbildungspotenzial bei der Lagerung von breiförmiger Silage aus Zuckerrüben in offenen Erdbecken zu bestimmen.

### Biologische Prozesse während der Lagerung

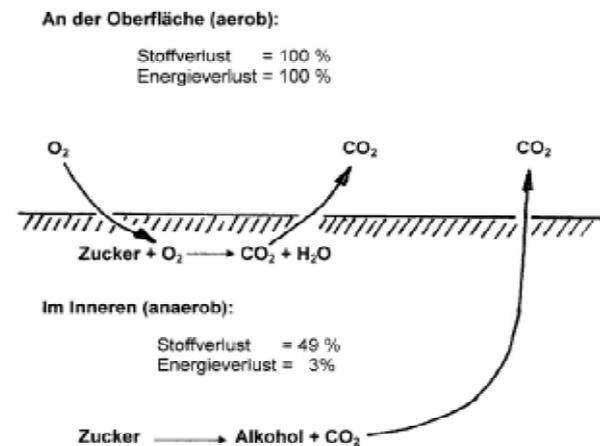
Es hat sich gezeigt, dass die Masse aus geschredderten Zuckerrüben innerhalb von weniger als 24 Stunden von einem Schüttgut zu einer pumpfähigen Masse wird. Ursache dafür ist das Absterben des Pflanzengewebes, das im Inneren eines Haufens von zerkleinerten Rüben unter Sauerstoffmangel steht. Dadurch verlieren die Zellen ihre Turgeszenz und geben Zellsaft frei. Die entstehende Suspension aus festen Partikeln von abgestorbenem Rübengewebe und freigesetztem Zellsaft fließt in der Lagune selbsttätig breit und ist dann ein nicht begehrter, pumpfähiger Brei.

In diesem Zuckerrübenbrei setzen sofort Gärungsvorgänge ein. Zunächst dominiert die Milchsäuregärung, die beendet wird, wenn der pH-Wert auf ein Niveau von 3,3 bis 3,5 abgesunken ist. Bei diesem Säuregrad sind Bakterien nicht mehr stoffwechselaktiv, sondern nur noch Pilze (Hefen und Schimmelpilze). Im Inneren des Breis vergären Hefen den verbliebenen Zucker zu Ethanol. Dabei werden erhebliche Mengen  $\text{CO}_2$  freigesetzt (**Abbildung 1**), die aus den tieferen Schichten der breiigen Masse z. T. gut sichtbar austreten.

An der Oberfläche bauen Hefen und andere Pilze unter der Einwirkung von Luftsauerstoff den Zucker, später auch die Milchsäure sowie andere Bestandteile des Gärstoffes und des Rübenmarks, von letzterem vor allem Pektine, zu  $\text{CO}_2$  und Wasser ab. Als Folge des Milchsäureabbaus steigt der pH-Wert wieder an, sodass sich auch Bakterien erneut vermehren und am Abbau der organischen Substanz teilnehmen können. Zurück bleiben die nicht oder nur schwer umsetzbaren Stoffe. Sie bilden auf der Oberfläche eine dunkelbraun gefärbte, je nach Witterung mehr oder weniger ausgetrocknete Kruste. Wenige Zentimeter unter dieser Kruste sind auch Schimmelpilze aktiv, wie die häufig auftretende, meist rötliche Verfärbung des Mate-

Abb. 1

### Abbau von Zucker durch Hefen



Stoffabbau durch Hefen in Zuckerrüben-Breisilage in einem offenen Erdbecken (Verlustangaben bezogen auf Monosaccharide)

Fig. 1: Substrate degradation by yeasts in silage from pulpified sugar beets stored in an open ground basin (loss figures related to monosaccharides)

rials zu erkennen gibt. Schimmelpilze vertragen wie die Hefen niedrige pH-Werte, benötigen aber wenigstens ein Minimum an Luftsauerstoff. Unmittelbar auf der Oberfläche kommt es jedoch nicht zur Ausbildung eines sichtbaren Schimmelbewuchses. Ursache dafür ist die Hemmung der Myzelbildung durch die UV-Strahlung, wenn Sonnenlicht auf die Oberfläche einwirken kann. Es ist zu erwarten, dass eine Beschattung, z. B. durch ein Regenschutzdach oder das Aufbringen einer gefärbten Folie, diese Hemmung aufhebt und zu verstärktem Stoffabbau durch Schimmelbewuchs führt.

### Methodische Probleme und Lösungsweg

Das Bestimmen der Konservierungsverluste durch eine Mengenzu- und abflussbilanzierung von Input und Output ist für die Lagunenlagerung technisch nicht realisierbar. Weder ist es möglich, die eingebrachte Menge an Rüben-Frischmasse noch die über einen langen Zeitraum entnommenen Mengen an Silage exakt zu erfassen. Eine Frischmassebilanz wird zudem noch durch den nicht kontrollierbaren Eintrag von Niederschlagswasser und die ebenso unkontrollierbare Wasserverdunstung verhindert. Auch erscheint eine repräsentative Probenahme als Grundlage für die Übertragung der Ergebnisse von Laboruntersuchungen auf definierte Frischmasse-Mengen und Beobachtungszeitspannen praktisch unmöglich. Modellversuche in offenen Kleinbehältern (z. B. 1-m<sup>3</sup>-Container) ermöglichen eine Massebilanzierung und geben Anhaltspunkte für die Höhe der Verluste. Sie sind jedoch, u. a. wegen der geringen Füllstandshöhe, nicht geeignet, die Vorgänge in einer Lagune vollständig nachzubilden.

Als Möglichkeit bleibt deshalb nur, den Konzentrationsanstieg derjenigen Stoffe zu nutzen, die am biologischen Stoff-

abbau nicht beteiligt sind. Arbeitshypothese war es, dass sich die Gehalte an Rohasche (XA) oder an mineralischen Bodenbestandteilen wie salzsäureunlösliche Asche, vereinfachend meist als „Sand“ bezeichnet, als interne Marker eignen.

Wenn Konzentrationsänderungen als Maß für das Verlustgeschehen genutzt werden sollen, ist es nötig, eine für diese Konzentrationsangaben geeignete Bezugsgröße zu definieren. In Anbetracht des unkontrollierbaren Wasserein- und Wasserstrags kommt dafür nur die auf alle flüchtigen organischen Stoffe korrigierte Trockensubstanz ( $TS_k$ ) in Betracht. Die Methode für diese Korrektur der Trockensubstanz von Zuckerrübensilage liegt vor [4].

### Material und Methoden

Im Rahmen dieser Studie wurde ein mit Zuckerrübenmus gefülltes Erdbecken untersucht. Das Erdbecken ist an der Böschungsoberkante 35 m lang und 30 m breit, am Boden 27 m lang und 22 m breit. Die durchschnittliche Tiefe beträgt 4 m, der Böschungswinkel  $45^\circ$ . Ende Oktober 2011 waren hier rund 2 200 t geschredderte Zuckerrüben eingebracht worden. Die Rüben waren zuvor mithilfe von Kainit-Lösung in einer sogenannten „Weber-Wanne“ (Strube GmbH & Co. KG) entsteint und dabei zugleich grob gewaschen worden.

Die Entnahme von Rübenmus mittels Dickstoffpumpe begann Anfang 2012 und wurde bis zur neuen Ernte fortgesetzt. Während dieser Zeit sind in Abständen von jeweils etwa 4 Wochen Proben von der am Beckengrund abgepumpten Masse gezogen und untersucht worden. Für die Auswertung standen die Untersuchungsergebnisse von 7 Proben zur Verfügung, die von Februar bis August entnommen worden waren. Zusätzlich erfolgte die Entnahme von 6 Proben auf die gleiche Weise in kurzen Zeitabständen während einer Woche Ende Mai 2012.

Um die Auswirkungen des ungehinderten Zutritts von Luftsauerstoff zu erfassen, wurden mit verschiedenen Probenstechern Proben in definiertem Abstand zur Oberfläche entnommen. Im April 2012 wurden Proben zunächst von einer Plattform aus gezogen, die am Ausleger eines seitlich postierten Krans befestigt war. Die dabei gewonnenen Proben erfassten nur den Randbereich der Silage. Eine Beprobung im Zentrum der Lagune bzw. von Material aus definierten Tiefenhorizonten wurde erst mit speziellen Vorrichtungen möglich. Dazu gehörten ein begehbare Floß und ein Probenstecher, der sich unter der Oberfläche in beliebiger Tiefe öffnen und verschließen ließ. Mit diesem Gerät wurden Mitte Juli 2012 die für diese Untersuchung entscheidenden 18 Proben entnommen.

In den Proben wurde Trockensubstanz (TS), Rohasche (XA), salzsäureunlösliche Asche (SAND), der organische Anteil der Säure-Detergens-Faser ( $ADF_{org}$ ), Zucker und die Gehalte an den einzelnen Gärssäuren und Alkoholen sowie der pH-Wert bestimmt. Der Gehalt an TS wurde mit folgender Gleichung auf die bei der Probentrocknung flüchtigen Stoffe korrigiert [4]:

$$TS_k [g / kgFM] = TS_n + 0,95(NFS) + 0,08(MS) + 1,00(AL) [g / kgFM] \quad (Gl. 1)$$

Darin bedeuten:  $TS_k$  den korrigierten TS-Gehalt,  $TS_n$  den nicht korrigierten TS-Gehalt, NFS die Summe der niederen Fettsäuren ( $C_2$  bis  $C_6$ ), MS die Milchsäure und AL die Summe aller ein- und zweiwertigen Alkohole ( $C_1$  bis  $C_4$ ). Die in den getrockneten Proben und üblicherweise auf  $TS_n$  bezogenen Gehalte an XA, SAND und  $ADF_{org}$  wurden durch Multiplikation mit dem Quotienten aus  $TS_n/TS_k$  auf den Gehalt in der  $TS_k$  umgerechnet:

$$XA_{Silage} [g / kgTS_k] = \frac{TS_n}{TS_k} XA_{Silage} [g / kgTS_n] \quad (Gl. 2)$$

Auf analoge Weise sind auch die Gehalte an SAND und  $ADF_{org}$  korrigiert worden. Der Gehalt an oTS der Silage ergibt sich aus Gleichung 3:

$$oTS_{Silage} [g / kgTS_k] = 1000 - XA_{Silage} [g / kgTS_k] \quad (Gl. 3)$$

Für die Schätzung des TS-Verlustes (TSV) und des Verlustes an oTS (oTSV) anhand der Veränderung des XA-Gehaltes wurden folgende Gleichungen formuliert:

$$TSV [\%] = 100 \left( 1 - \frac{XA_{Rüben} [g / kgTS]}{XA_{Silage} [g / kgTS_k]} \right) \quad (Gl. 4)$$

$$oTSV [\%] = 1000 \frac{TSV [\%]}{1000 - XA_{Rüben} [g / kgTS]} \quad (Gl. 5)$$

Der XA-Gehalt dient hier als interner Marker. In analoger Weise kann dazu auch der Gehalt an salzsäureunlöslicher Asche (SAND) genutzt werden:

$$TSV [\%] = 100 \left( 1 - \frac{SAND_{Rüben} [g / kgTS]}{SAND_{Silage} [g / kgTS_k]} \right) \quad (Gl. 6)$$

Die Umrechnung auf oTSV erfolgte dann wie bei der Verwendung von XA als Marker nach Gleichung 5.

Um diese Gleichungen anwenden zu können, werden neben den in den Silagen gemessenen Gehalten an XA und SAND auch die Gehalte an XA und SAND im Ausgangsmaterial, den einsilienten Zuckerrüben, benötigt. Diese Parameter standen zum Zeitpunkt der Untersuchung der Silage jedoch nicht zur Verfügung.

Aus den gemessenen Gehalten an XA und SAND in der Silage aus dem anaeroben Bereich der Lagune kann jedoch auf die Gehalte im Ausgangsmaterial geschlossen werden. Das ist möglich, wenn der dort durch Gärung entstandene TS-Verlust bekannt ist. Dieser lässt sich auf stöchiometrischem Wege aus den gemessenen Konzentrationen an Gärungsprodukten berechnen.

Je kg Essigsäure werden 733 g  $CO_2$  und je kg Ethanol 955 g  $CO_2$  freigesetzt. Da der weitaus überwiegende Anteil der niederen Fettsäuren aus Essigsäure und der der Alkohole aus Ethanol besteht, können die  $CO_2$ -Bildungsraten auf die Summenfraktionen NFS und AL übertragen werden. Der prozentuale Gärverlust (GV) an TS bzw. an oTS wurde deshalb folgendermaßen berechnet:

$$GV_{TS}[\%] = 100 \frac{0,733(NFS) + 0,955(AL)[g/kgFM]}{TS_k + 0,733(NFS) + 0,955(AL)[g/kgFM]} \quad (\text{Gl. 7})$$

$$GV_{oTS}[\%] = 1000 \frac{GV_{TS}[\%]}{1000 - XA_{Rüben}[g/kgTS]} \quad (\text{Gl. 8})$$

Ausgehend vom gemessenen XA- bzw. SAND-Gehalt können nun die zu erwartenden  $GV_{TS}$ -Werte für die Berechnung des XA- bzw. SAND-Gehaltes in den frischen Zuckerrüben benutzt werden:

$$XA_{Rüben}[g/kgTS] = 100 \frac{XA_{Silage}[g/kgTS_k]}{100 + GV_{TS}[\%]} \quad (\text{Gl. 9})$$

$$SAND_{Rüben}[g/kgTS] = 100 \frac{SAND_{Silage}[g/kgTS_k]}{100 + GV_{TS}[\%]} \quad (\text{Gl. 10})$$

Der Gehalt der Zuckerrübensilage an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS) und ihr Methanbildungspotenzial (MBP) wurden mit folgenden Schätzgleichungen berechnet [5]:

$$FoTS[g/kgTS_k] = 991 - (XA) - 0,50(ADF_{org})[g/kgTS_k] \quad (\text{Gl. 11})$$

$$Methan[Normliter/kgTS_k] = 0,375(FoTS) + 0,32(AL)[g/kgTS_k] \quad (\text{Gl. 12})$$

## Ergebnisse und Diskussion

In **Tabelle 1** sind die Untersuchungsergebnisse zu den Gehalten an Gärungsendprodukten in der Silagefrischmasse zusammengefasst. Der Zucker aus den Rüben war weitgehend vergoren und zwar hauptsächlich zu Milchsäure, Essigsäure und

Ethanol. Das Methanol stammt aus dem Pektinabbau. Andere als die aufgeführten Säuren und Alkohole kommen nur in sehr geringen Mengen vor. Alle diese Stoffe sind mehr oder weniger wasserdampflich. Bei der TS-Bestimmung führt dies zu einer Fehlbewertung der Gehalte an TS und oTS sowie aller üblicherweise darauf bezogenen Größen.

In **Tabelle 2** sind die Größen  $TS_n$  und  $TS_k$  einander gegenübergestellt und die gemessenen Gehalte an XA, SAND und  $ADF_{org}$  je kg  $TS_k$  zusammengefasst. Angegeben sind, wie auch in den folgenden zwei Tabellen, Mittelwerte und Standardabweichungen.

Zunächst ist festzustellen, dass in Bezug auf den Gehalt an XA und SAND enorme Unterschiede zwischen den an unterschiedlichen Stellen und auf unterschiedliche Weise gezogenen Proben bestehen und dass es außerdem eine enge Korrelation zwischen den beiden Größen gibt. Diese Korrelation beweist, dass der XA-Gehalt im Wesentlichen von den Feinerdebestandteilen aus dem nach grobem Waschen noch verbliebenen Schmutzbesatz der Rüben bestimmt wird. Diese enge Beziehung zwischen den beiden Messgrößen erlaubte die zweifelsfreie Erkennung von einzelnen zufallsbedingten Extremwerten. Auf diese Weise konnten die XA- und SAND-Gehalte von je einer aus 6 entnommenen Proben aus den beiden unteren Schichttiefen als Ausreißer identifiziert und von der weiteren Auswertung ausgeschlossen werden.

Des Weiteren zeigt **Tabelle 2**, dass in den oberen Schichten der aerobe Stoffabbau – und sicherlich auch die Verdunstung von Alkoholen – zu einem je nach Oberflächennähe abgestuften Konzentrationsanstieg von XA und SAND geführt haben. Dieser Konzentrationsanstieg betrifft auch die  $ADF_{org}$ . Ein eventueller Eintrag von mineralischen Partikeln während der Lage-

Tab. 1

Gehalte an Gärungsendprodukten und Zucker in der Frischmasse (FM) von Zuckerrüben-Breisilage, die in einem offenen Erdbecken gelagert wurde  
Table 1: Contents of fermentation end-products and sugar in the fresh matter (FM) of silage from pulpified sugar beets stored in an open ground basin

Probenahme- technik Sampling technique	Schicht unter der Oberfläche Layer below the surface	Probenzahl Number of samples	pH	Milchsäure Lactic acid	Essigsäure Acetic acid	Propionsäure Propionic acid	Methanol Methanol	Ethanol Ethanol	Zucker Sugar	g/kg FM
Stechproben vom Rand/Core samples from edge										
	0–5 cm	6	n. b. <sup>3)</sup>	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
	0–20 cm	6	4,0	11,9	1,8	0,3	0,5	1,2	n. b.	
	70–90 cm	6	3,5	26,3	3,1	0,2	0,7	5,8	n. b.	
Stechproben vom Zentrum/Core samples from center										
	0–50 cm	3	3,5	19,6	8,5	0,4	0,4	6,4	17,1	
	50–100 cm	3	3,3	28,0	8,5	0,2	0,9	11,0	19,7	
	100–150 cm	6	3,3	34,9	8,9	0,1	1,1	13,6	35,5	
	150–200 cm	6	3,3	33,9	9,0	0,1	1,0	10,9	43,7	
Absaugproben/Samples taken by suction										
	Grund/Bottom <sup>1)</sup>	6	3,3	21,8	10,5	0,1	1,0	12,3	45,0	
	Grund/Bottom <sup>2)</sup>	7	3,3	20,7	8,6	0,2	0,9	10,5	22,3	

<sup>1)</sup> Mai/May. <sup>2)</sup> Februar bis August/February to August. <sup>3)</sup> n. b. = nicht bestimmt/not determined.

Tab. 2

Gehalte an Rohasche (XA), HCl-unlöslicher Asche (SAND) und organischem Anteil der Säure-Detergenz-Faser ( $ADF_{org}$ ) in der korrigierten TS ( $TS_k$ ) von Zuckerrüben-Breislage, die in einem offenen Erdbecken gelagert wurde

Table 2: Contents of crude ash (XA), HCl-insoluble ash (SOIL) and the organic proportion of ADF ( $ADF_{org}$ ) in the corrected DM ( $DM_c$ ) of silage from pulpified sugar beets stored in an open ground basin

Probenahme- technik Sampling technique	Schichttiefe unter der Oberfläche Layer below the surface	Probenzahl Number of samples	$TS_n$ $DM_n$ %	$TS_k$ $DM_c$ %	XA Crude ash	SAND SOIL g/kg $TS_k$ g/kg $DM_c$	$ADF_{org}$ $ADF_{org}$
Stechproben vom Rand / Core samples from edge							
	0–5 cm	6	18,9	18,9	436 ± 30	386 ± <sup>3)</sup>	442 ± 34
	0–20 cm	6	9,7	10,2	322 ± 40	260 ± 43	238 ± 13
	70–90 cm	6	8,5	9,7	187 ± 42	151 ± 40	118 ± 26
Stechproben vom Zentrum / Core samples from center							
	0–50 cm	3	18,5	20,2	221 ± 39	n. b. <sup>4)</sup>	102 ± 20
	50–100 cm	3	18,8	21,1	161 ± 13	n. b.	82 ± 3
	100–150 cm	5	18,8	21,7	138 ± 13	102 ± 11	67 ± 7
	150–200 cm	5	18,4	20,8	117 ± 7	79 ± 6	61 ± 6
Absaugproben / Samples taken by suction							
	Grund / Bottom <sup>1)</sup>	6	16,3	18,8	81 ± 11	45 ± 12	85 ± 2
	Grund / Bottom <sup>2)</sup>	7	15,3	17,6	84 ± 34	n. b.	61 ± 5

<sup>1)</sup> Mai / May. <sup>2)</sup> Februar bis August / February to August. <sup>3)</sup> n = 2. <sup>4)</sup> n. b. = nicht bestimmt / not determined.

rung (etwa als angeflogener Staub) kann damit als Ursache für die hohen XA- und SAND-Gehalte an der Oberfläche zuverlässig ausgeschlossen werden.

In den Proben des abgepumpten Materials wurden geringere Gehalte an XA und SAND gefunden als in dem in der Lagune verbliebenen Material. Das bedeutet, dass es bei der Silageentnahme zu einer Separierung gekommen ist. Eine Auswertung der Untersuchungsergebnisse der monatlich aus dem

abgepumpten Material gezogenen Proben ergab, dass im Zeitverlauf die Alkohol- und Milchsäuregehalte abnahmen und der XA-Gehalt zunahm. Für den XA-Gehalt ist diese Beziehung in **Abbildung 2** dargestellt.

Wegen der unvermeidbaren Separierung des Materials beim Abpumpen aus der Lagune sind die XA- und SAND-Gehalte des abgepumpten Materials als Referenzwerte für die Bestimmung der Verluste ungeeignet. Als Referenzwerte können vielmehr nur XA- und SAND-Gehalte des in der Lagune verbliebenen Materials dienen. Von der untersten beprobten Materialschicht ist am sichersten anzunehmen, dass die jeweilige Differenz zwischen Silage und Ausgangsmaterial im XA- und SAND-Gehalt ausschließlich auf Gärungsvorgänge und nicht auf aeroben Stoffabbau oder Verdunstung zurückzuführen ist. Die Richtigkeit dieser Annahme kann mithilfe des für diese Materialschicht stöchiometrisch berechneten Gärverlustes überprüft werden. Kriterium sollte die größtmögliche Annäherung des über die Markeremethode berechneten Verlusts an den stöchiometrisch berechneten Gärverlust sein.

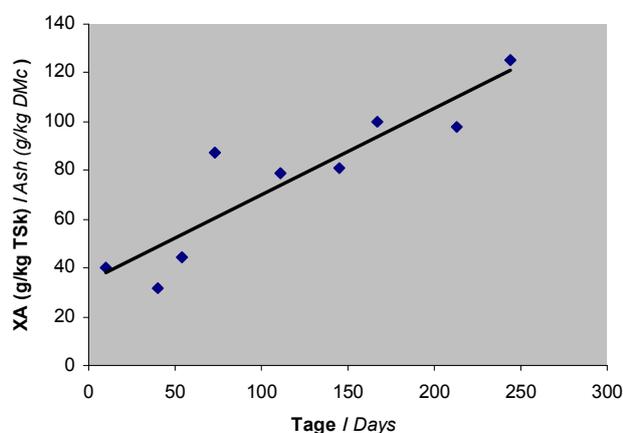
**Tabelle 3** zeigt die Ergebnisse der Berechnung der Verluste an TS und an  $\sigma$ TS. Die Silage aus der Schichttiefe von 150 bis 200 cm hatte einen Gehalt an Gärungsendprodukten (NFS und AL), der nach Gleichung 7 einen Gärverlust an TS von 8 % ergibt. Diese Materialschicht enthielt im Mittel 117 g XA und 79 g SAND je kg  $TS_k$  (vgl. **Tabelle 2**).

Daraus ergeben sich nach Gleichung 9 und 10:

$$\blacksquare XA_{Rüben} = 108 \text{ g/kg TS und}$$

$$\blacksquare SAND_{Rüben} = 73 \text{ g/kg TS}$$

Abb. 2



Anstieg des Rohaschegehaltes der Zuckerrüben-Breislage, die aus einem offenen Erdbecken abgepumpt wurde im Jahresverlauf  
Fig. 2: Increase of ash content of silage made from pulpified sugar beets and taken out by suction from an open ground basin during the course of the year

Tab. 3

Schätzung der Konservierungsverluste von Zuckerrüben-Breislage in einem offenen Erdbecken mittels Rohasche- (XA) bzw. SAND-Gehalt als internen Markern oder über stöchiometrische Berechnung aus dem Gehalt an Gärungsendprodukten

Table 3: Estimation of conservation losses of silage from pulpified sugar beets in an open ground basin by using crude ash (XA) and SOIL contents as internal markers or by stoichiometric calculation from the concentrations of fermentation end-products

Probenahme- Technik Sampling technique	Schichttiefe unter der Oberfläche Layer below the surface	Probenzahl Number of samples	Verluste nach Markermethode/Losses by marker method			
			XA als Marker/ Crude ash as marker		SAND als Marker/SOIL as marker	
			TS <sub>k</sub> /DM <sub>c</sub> %	oTS/OM %	TS <sub>k</sub> /DM <sub>c</sub> %	oTS/OM %
Stechproben vom Rand/Core samples from edge						
	0–5 cm	6	75 ± 2	84 ± 2		
	0–20 cm	6	66 ± 4	74 ± 5	71 ± 5	80 ± 5
	70–90 cm	6	40 ± 14	44 ± 16	48 ± 15	54 ± 17
Stechproben vom Zentrum/Core samples from center						
	0–50 cm	3	50 ± 9	56 ± 10		
	50–100 cm	3	33 ± 5	36 ± 6		
	100–150 cm	5	21 ± 7	24 ± 8	28 ± 7	31 ± 8
	150–200 cm	5	7 ± 5	8 ± 6	8 ± 7	9 ± 8
Verluste nach der stöchiometrischen Berechnung aus dem Gehalt an Gärungsendprodukten Losses by stoichiometric calculation from the concentrations of fermentation end-products						
			TS <sub>k</sub> /DM <sub>c</sub> %	oTS/OM %		
Stechproben vom Zentrum/Core samples from center						
	150–200 cm	6	8 ± 1	9 ± 1		
Absaugproben/Samples taken by suction						
	Grund/Bottom <sup>1)</sup>	6	10 ± 1	11 ± 1		
	Grund/Bottom <sup>2)</sup>	7	10 ± 2	11 ± 3		

<sup>1)</sup> Mai/May. <sup>2)</sup> Februar bis August/February to August.

Werden diese Werte für die frischen Rüben auf alle geprüften Materialschichten übertragen und XA<sub>Silage</sub> bzw. SAND<sub>Silage</sub> in Gleichung 4, 5 bzw. 6 eingesetzt, so erhält man die in **Tabelle 3** zusammengestellten Ergebnisse der Verlustbestimmung nach der Markermethode.

Im unteren Teil der **Tabelle 3** sind die stöchiometrisch zu erwartenden Gärverluste angegeben. Die Gärverluste an TS wurden aus den Gehalten an Gärungsendprodukten mittels Gleichung 7 berechnet. Diese wurden schließlich über Gleichung 8 in die Gärverluste an oTS umgerechnet. Für den letzten Schritt wird wieder der XA-Gehalt der frischen Rüben benötigt, für den 108 g/kg TS kalkuliert worden waren. Für die Proben aus dem abgesaugten Material wurden 74 bzw. 77 g XA/kg TS in den frischen Rüben angenommen. Diese beiden Werte sind – auf analoge Weise wie die 108 g/kg TS – aus den in dem abgesaugten Material gemessenen Gehalten an Gärungsendprodukten und XA ermittelt worden.

Zieht man die nicht unerheblichen Standardabweichungen der über die Markermethode berechneten Verluste in Betracht, so wird mit den gewählten Referenzwerten für XA und SAND in den Rüben eine sehr gute Annäherung an die stöchiometrisch abgeleiteten Gärverluste erreicht, deren Größenordnung durch

zahlreiche Bilanzen aus Modellversuchen mit Zuckerrüben in gasdichten Behältern belegt ist [2]. Innerhalb des anaeroben Bereiches der Lagune ist hiernach mit

■ rund 10 % oTS-Verlust

zu rechnen. In allen anderen, von der offenen Oberfläche mehr oder weniger beeinflussten Silageschichten liegen die oTS-Verluste deutlich darüber. Dabei bestätigen die mittels SAND-Gehalt berechneten Verluste die Größenordnung der mittels XA-Gehalt kalkulierten – sie fallen in der Tendenz sogar noch etwas höher aus.

Aus den Gehalten an XA und ADF<sub>org</sub> in den Silageproben wurde nach Gleichung 11 der jeweilige Gehalt an FoTS berechnet. Anschließend ist aus FoTS und AL nach Gleichung 12 das Methanbildungspotenzial (MBP) ermittelt worden (**Tabelle 4**). Bezogen auf ein Kilogramm oTS entspricht das MBP der Silage bis auf den oberflächennahen Bereich demjenigen Niveau, das auch von anderen Untersuchungen für Zuckerrübensilagen bekannt ist [2]. Das MBP der beiden untersten Materialschichten unterscheidet sich nicht signifikant. Die Ergebnisse können deshalb zusammengefasst werden. Im Mittel der 10 Proben, die unterhalb von 100 cm Tiefe mit dem Probenstecher entnommen und in die Auswertung einbezogenen wurden, ergaben sich

Tab. 4

Gehalte an fermentierbarer organischer Trockensubstanz (FoTS), Gesamtgehalt an Alkoholen (AL) und Methanbildungspotenzial von Zuckerrüben-Breisilage, die in einem offenen Erdbecken gelagert wurde

Table 4: Content of fermentable organic matter (FOM), total content of alcohols (AL) and methane forming potential of silage from pulpified sugar beets stored in an open ground basin

Probenahmetechnik Sampling technique	Schicht unter der Oberfläche Layer below the surface	Probenzahl Number of samples	FoTS/FOM	AL/AL	Methan/Methane	
			g/kg TS <sub>k</sub> g/kg DM <sub>c</sub>		l/kg oTS l/kg OM	m <sup>3</sup> /t FM m <sup>3</sup> /t FM
Stechproben vom Rand/Core samples from edge						
	0–5 cm	6	335 ± 45	n. b.	222 ± 19	24 ± 5
	0–20 cm	6	550 ± 45	14 ± 7	298 ± 5	21 ± 4
	70–90 cm	6	745 ± 41	63 ± 22	319 ± 12	25 ± 10
Stechproben vom Zentrum/Core samples from center						
	0–50 cm	3	719 ± 49	39 ± 23	362 ± 12	57 ± 5
	50–100 cm	3	790 ± 14	59 ± 34	375 ± 13	66 ± 4
	100–150 cm	5	819 ± 14	76 ± 20	385 ± 7	72 ± 3
	150–200 cm	5	844 ± 6	59 ± 17	379 ± 5	70 ± 2
Absaugproben/Samples taken by suction						
	Grund/Bottom <sup>1)</sup>	6	868 ± 11	72 ± 5	368 ± 1	64 ± 3
	Grund/Bottom <sup>2)</sup>	7	877 ± 34	70 ± 23	385 ± 8	56 ± 11

<sup>1)</sup> Mai/May. <sup>2)</sup> Februar bis August/February to August.

### ■ 382 Normliter Methan je kg oTS.

Nach oben hin nimmt das MBP deutlich ab. Je stärker die oberflächennahen Materialschichten aeroben Stoffabbauvorgängen und der Verdunstung flüchtiger Stoffe ausgesetzt waren, umso mehr ist das MBP pro kg oTS vermindert.

Bezogen auf die Frischmasse liegt das MBP der Rübenbreisilage aus der Lagune aber selbst in den unteren Schichten mit nur rund 70 m<sup>3</sup>/t erheblich niedriger als von Silage aus

geschlossenen Silos, was als Folge des Eintrags von Niederschlagswasser zu werten ist.

**Tabelle 5** fasst die Ergebnisse der bisherigen Auswertung sowohl für den oTS-Verlust als auch für das spezifische Methanbildungspotenzial je kg oTS in den einzelnen Silageschichten zusammen. Für das Ausgangsmaterial, die frischen Zuckerrüben, können nach früheren Untersuchungen 360 Liter Methan pro kg oTS als Potenzial vorausgesetzt werden [2; 5].

Mit diesen Zahlen lassen sich für Lagunen und beliebige andere Lagerbehälter mit offener Oberfläche, je nach deren Abmessungen und der jeweiligen Füllstandshöhe, Kalkulationen über den Verlust an oTS und an Methanbildungspotenzial anstellen. Zu diesem Zweck ist die Behälterfüllung in Schichten von 0,5 m Mächtigkeit einzuteilen und deren jeweiliger Volumenanteil zu berechnen. Das gewogene Mittel aus den oTS-Verlusten der einzelnen Schichten nach Maßgabe ihres Volumenanteils und den Angaben aus **Tabelle 5** ergibt den Gesamtverlust an oTS für den ganzen Behälter.

Um die Verluste an MBP zu ermitteln, ist für jede dieser Schichten eine MBP-Bilanz zu erstellen. Unter vereinfachender Annahme einer Dichte von 1 kg/l, der Verwendung des gemessenen Gehaltes von oTS/kg FM in der jeweiligen Silageschicht und den Angaben aus **Tabelle 5** lässt sich errechnen, aus wie viel oTS der Rüben diese Silageschicht hervorgegangen ist und welche Menge an MBP darin enthalten war. Dann ist diese Menge an MBP mit derjenigen zu vergleichen, die zum Zeitpunkt der Probenahme in der Silage noch vorlag und daraus der prozentuale Verlust an MBP für die betreffende Schicht zu errechnen. Das gewogene Mittel der einzelnen MBP-Verluste nach

Tab. 5

Verlust an oTS und Methanbildungspotenzial der oTS von Zuckerrüben-Breisilage nach ihrer Lagerung in offenen Behältern innerhalb der einzelnen Schichten

Table 5: Loss of OM and methane forming potential of OM of silage from pulpified sugar beets during storage in open silos within every single layer

Schicht unter der Oberfläche Layer below the surface	Verlust an oTS Loss of OM %	Methanbildungspotenzial Methane forming potential m <sup>3</sup> /kg oTS m <sup>3</sup> /kg OM
Silage/Silage		
0–50 cm	56	362
50–100 cm	36	375
100–150 cm	24	382
> 150 cm	10	382
Frische Zuckerrüben/Fresh sugar beets		
		360

Tab. 6

Erwartete Mindestverluste während der Lagerung von Zuckerrüben-Breisilage in Behältern mit offener Oberfläche

Table 6: Expected minimum of losses during storage of silage from pulpified sugar beets in silos with open surface

Füllstandshöhe Filling height	Verluste/Losses [%]		
	oTS OM	MBP Methane forming potential	Differenz Difference
Im Durchschnitt des ganzen Silos/On average of the total silo			
3 m	26,3	<b>22,5</b>	3,8
4 m	23,0	<b>18,8</b>	4,2
10 m	14,3	<b>9,2</b>	5,1
Im anaeroben Bereich <sup>1)</sup> /In the anaerobic region			
	10,0	<b>4,5</b>	5,5

<sup>1)</sup> Tiefer als 1,5 m unter der offenen Oberfläche/more than 1.5 m below the open surface.

Maßgabe des Volumenanteils der Schichten ergibt schließlich den Gesamtverlust an MBP für den ganzen Behälter.

Solche Berechnungen sind für die hier untersuchte Lagune mit der tatsächlichen Füllstandshöhe nach dem Einbringen der zerkleinerten Rüben von rund 3 m sowie vergleichsweise mit einer angenommenen Füllstandshöhe von 4 m und für einen Hochbehälter mit einer effektiven Füllstandshöhe von 10 m vorgenommen worden (**Tabelle 6**).

Die Verluste sind umso geringer, je größer die Füllstandshöhe im Lagerbehälter ist, d.h. je mehr Material unter einem Quadratmeter freier Oberfläche gelagert wird. Die Lagerung in Hochbehältern führt deshalb zu wesentlich geringeren Verlusten als die Lagerung in Lagunen. Im Übrigen liegen die Verluste an oTS stets deutlich höher als die an MBP. Ursache für diese Differenz ist die Tatsache, dass bei der alkoholischen Gärung mehr Masse als Energie verloren geht.

Die Werte in **Tabelle 6** sind als „Mindestverluste“ bezeichnet worden, weil im Randbereich von oberflächennahen Materialschichten einer Lagune höhere Verluste als im Zentrum zu erwarten sind und weil die vorliegenden Untersuchungen nicht die gesamte Lagerungszeit bis zum Anschluss an die nächste Ernte erfasst haben. Die Wirkung dieser beiden Faktoren ist schwer zu quantifizieren. Ob sie durch die eventuell etwas geringeren Verluste ausgeglichen werden, denen die bereits in den ersten Lagermonaten abgepumpte Silage unterlag, ist möglich aber nicht sicher. Lediglich für diejenige Silage, die im anaeroben Bereich des Behälters liegt (>1,5 m unter der freien Oberfläche), sind zusätzliche Verluste, etwa durch eine längere Lagerungszeit als sie hier untersucht wurde, auszuschließen.

## Schlussfolgerungen

Die Lagerung von Zuckerrübenbrei als Substrat für die Biogasgewinnung in mit Folie ausgekleideten Erdbecken bietet wesentliche technologische und ökonomische Vorteile gegenüber anderen bisher vorgeschlagenen Konservierungsverfahren für

Zuckerrüben. Diese Vorteile werden aber mit nicht unerheblichen Konservierungsverlusten erkauft und schmälern den mit Zuckerrüben realisierbaren Methanertrag je Hektar. Diese Verluste sind größer als bisher vielfach angenommen wurde und sollten bei Verfahrens- und Fruchtartenvergleichen künftig in realistischer Höhe berücksichtigt werden.

Die in offenen Behältern im Vergleich zu gasdichten Silos entstehenden höheren Konservierungsverluste sind auf die freie Oberfläche zurückzuführen. In den tieferen Materialschichten sind die unvermeidbaren Verluste mit rund 10% an oTS und mit rund 5% an Methanbildungspotenzial gering – unabhängig von der Behälterform und der Lagerungsdauer.

Die wirksamste Möglichkeit, Konservierungsverluste in offenen Behältern zu vermindern, ist die Vergrößerung der Füllstandshöhe. Das gilt für die Dimensionierung und Nutzung von Erdbecken wie auch von Hochbehältern. Ob ein größerer Aufwand für die Lagerung durch veränderte Behälterbauformen gerechtfertigt ist, bemisst sich am ökonomischen Vorteil der erreichbaren Verlustreduktion.

## Literatur

- [1] Wagner, A.; Weber, U.; Weber, G.; Scholtissek, M.; Auerbach, H.; Weißbach, F. (2009): Preservation of sugar beets in plastic bags for biogas production. Proceedings of the XVth International Silage Conference, July 27–29, Madison, Wisconsin, USA, pp. 471–472
- [2] Weißbach, F.; Wagner, A.; Scholtissek, M.; Auerbach, H.; Herbes, C. (2011): Konservierungsverluste bei der Silierung von Zuckerrüben für die Biogasgewinnung. Landtechnik 66(4), S. 254–258
- [3] Pommerehne, C.; Gröblichhoff, N. (2010): Erfahrungen mit Rübenbrei als Biogassubstrat. BioEnergy Decentral, 16.–19. November, Hannover, <http://www.proagri.de/app/download/5780440805/R%25C3%25BCbenrei%2Bals%2BBiogassubstrat.pdf>; Zugriff am 17.01.2013
- [4] Weißbach, F.; Strubelt, C. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen. Landtechnik 63(6), S. 354–355
- [5] Weißbach, F. (2009): Das Gasbildungspotenzial von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung. Landtechnik 64(6), S. 394–397

## Autoren

**Prof. Dr. agr. habil. Friedrich Weißbach** ist als freischaffender Firmenberater tätig. 18107 Elmenhorst, E-Mail: [prof.f.weissbach@web.de](mailto:prof.f.weissbach@web.de)

**Dipl.-Ing. agr. Klaus Parr** ist Betriebsleiter der Gut Dummerstorf GmbH, Wilhelm-Stahl-Allee 7, 18196 Dummerstorf

**Dipl.-Ing. Uwe Reinsdorf** und **Dr. agr. Christina Warnke-Gurgel** sind Mitarbeiter der NAWARO BioEnergie Park Güstrow GmbH, Am Langen Bruch 1, 18273 Güstrow

**Dr. agr. Bernd Losand** ist Mitarbeiter in der Landesanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Wilhelm-Stahl-Allee 2, 18196 Dummerstorf

## Danksagung

Die Autoren danken der NAWARO BioEnergie AG für die finanzielle Förderung des Projektes, dessen Ergebnisse hier dargestellt sind.