Verfahrenstechnische, mikrobiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen

Modul 1: Lagerung und Aufbereitung

(N/15/05)

Endbericht

Impressum:

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising
Internet: http://www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising
E-Mail: TierundTechnik@LfL.bayern.de
Tel.: 08161/71-3450

Dezember 2018

ILT© LfL

LfL
Tier und Technik

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Verfahrenstechnische, mikrobiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen

Modul 1: Lagerung und Aufbereitung

(N/15/05)

Rainer Kissel
Dr. Fabian Lichti

Auftraggeber:	Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Ludwigstraße 2 86179 München
Auftragsdatum:	
Projektleitung:	Dr. agr. Fabian Lichti
Bearbeiter:	Dipl. Ing. (FH) Rainer Kissel
Berichtsabschluss:	31.12.18
Berichtsumfang:	62 Seiten

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **7**
Tabellenverzeichnis **9**
Zusammenfassung **10**
Abstract **11**
1 Einleitung **12**
2 Stand des Wissens **13**
3 Zielsetzung **16**
4 Material und Methoden **16**
4.1 Versuchsplan 16
4.2 Versuchsaufbau 19
4.3 Rohstoffbeschaffung 21
4.4 Substrataufbereitung 22
4.4.1 Reinigung 22
4.4.2 Zerkleinerung 23
4.5 Messtechnik 24
4.5.1 Wiegetechnik 24
4.5.2 Temperatur 25
4.5.3 pH-Wert 25
4.6 Analytik 25
4.6.1 Laboranalytik 25
4.6.2 Massenverlust 26
4.6.3 oTS-Verlust 26
4.6.4 Biogaspotential 27
5 Ergebnisse **28**
5.1 Silagetemperatur 28
5.2 pH-Wert 31
5.3 Analytik 33
5.3.1 oTS-Gehalt 33
5.3.2 Inhaltsstoffe 34
5.4 Massenverlust (FM und oTS) 36
5.4.1 Abdeckung 37
5.4.2 Strohanteil 38

5.4.3 Aufbereitung 39
5.4.4 Strohanteil bei Rübenblättern....39
5.4.5 Bodenart (Standort) und Reinigung 40
5.5 Massenverlust (FM und oTS) - Statistik 41
5.5.1 Lagerdauer....42
5.5.2 Strohbeimischung....44
5.5.3 Abdeckung 45
5.5.4 Aufbereitung 46
5.5.5 Bodenart (Standort)....47
5.6 Massenverlust (FM und oTS) – mehrfaktorielle Varianzalalyse 49
5.7 Sickerwasser....49
5.8 Biogaspotential....51
6 Schlussfolgerung....55
7 Literaturverzeichnis....56
Anhang 57

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Einfluss des Lagerverfahrens auf den oTS- Verlust bei Zuckerrübenmus (nach THAISEN ET AL. 2012) 14

Abb. 2: Silobehälter auf Sockeln und Betongewichte zur Drucksimulation....19

Abb. 3: Temperaturmessung des Silos durch Temperatursonde; Ablasshahn für Sickersaft unten in Bildmitte....20

Abb. 4: Silobehälter zur Bestimmung des Einflusses der Lagerungsart und Lagerdauer bei Zuckerrüben 21

Abb. 5: Abwiegen und Verladen der Zuckerrüben von mittelschwerem Boden 21

Abb. 6: Bergung der Rübenblätter in der Nähe von Landshut....22

Abb. 7: Trommelwaschmaschine: Gesamtansicht und Funktionsweise 22

Abb. 8: Reinigungseffekt: gewaschene und ungewaschene Rübe (rechts) von mittlerem Standort....23

Abb. 9: Schneidscheibe und Zerkleinerungseffekt der Rübenschnitzelmaschine....23

Abb. 10: Maschine zur Herstellung von Zuckerrübenbrei; Produkt nach der Aufbereitung....24

Abb. 11: Einwaage von Rübenbrei bzw. Rübenblättern mit Hilfe eines Hubwagens 25

Abb. 12: Temperaturverlauf der Variante „Rübenbrei - luftdicht abgedeckt“ (links); Temperaturverlauf (MW) von unterschiedlich eingelagertem Rübenbrei (rechts); 28

Abb. 13: linke Seite: Temperaturverlauf der Blatt- und Breivarianten mit unterschiedlicher Strohbeimischung (Mittelwerte)) rechte Seite: Temperaturverlauf der einzelnen Varianten mit ganzen unterschiedlich abgedeckten Rüben (Mittelwerte) 29

Abb. 14: Links: Alle 2016 gemessenen Silotemperaturen und mittlere Außentemperaturen (schwarze Punkte); Rechts: Mittelwerte aller 2017 gemessenen Varianten und mittlere Außentemperaturen (schwarze Punkte); 30

Abb. 15: Mittlere organische Trockensubstanzgehalte der unterschiedlichen Varianten nach 0,4,7 und 10 Monaten Einlagerungszeit....33

Abb. 16: Organische Trockensubstanzgehalte der unterschiedlichen Varianten mit Rübenblättern nach 0, 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit....34

Abb. 17: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste bei unterschiedlich abgedecktem Rübenbrei und ganzen Zuckerrüben nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer 37

Abb. 18: Frisch- und Trockenmasseverluste von Rübenbrei mit unterschiedlichen Strohanteilen nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung....38

Abb. 19: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste unterschiedlich aufbereiteter Zuckerrüben und Zuckerrübenblättern nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung....39

Abb. 20: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste unterschiedlich eingelagerter Zuckerrübenblätter (mit 10 bzw. 4 % Strohanteil) nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung....40

Abb. 21: Masseverlust von gereinigtem und ungereinigtem Rübenbrei von verschiedenen Standorten; nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung....41

Abb. 22: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Lagerdauer (n=96)....43

Abb. 23: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Lagerdauer (n=96)....43

Abb. 24: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Strohanteil (n=18)....44

Abb. 25: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Strohanteil (n=18)....44

Abb. 26: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Abdeckung (n=36)....45

Abb. 27: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Abdeckung (n=36)....46

Abb. 28: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Aufbereitung (n=18)....46

Abb. 29: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Aufbereitung (n=18)....47

Abb. 30: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Bodenart (Standort; n=18)....47

Abb. 31: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Bodenart (Standort; n=15)....48

Abb. 32: Sickerwasseraufkommen bei unterschiedlich eingelagerten Rüben und Rübenblättern nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit....50

Abb. 33: Frischmasseverluste mit und ohne Berücksichtigung des Sickerwasseraufkommens (%-Angaben bei Varianten geben den Strohanteil an)....51

Abb. 34: Methanverluste nach 4 und 7 Monaten Einlagerungszeit im Vergleich zum Potential des Ausgangsmaterials....52

Abb. 35: Biogaspotentiale und Methangehalte der Ausgangsmaterialen und der Varianten nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit....53

Abb. 36: Methanausbeuten Ausgangsmaterialen und der Varianten nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit....53

Abb. 37: Biogaspotentiale nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit im Vergleich mit den Ausbeuten der Ausgangsmaterialien....55

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vor- und Nachteile des Anbaues von Zuckerrüben für die Biogasproduktion 13

Tab. 2: Beispiele für Verfahren zur Einlagerung der Zuckerrübe für den Einsatz in Biogasanlagen 14

Tab. 3: oTS Verluste bei der Lagerung von Zuckerrübenmus in Lagunen (verändert nach (Friedrich, 2013)....15

Tab. 4: Versuchsplan zur Zuckerrübeneinlagerung über einen Zeitraum von 10 Monaten....18

Tab. 5: Normbiogaserträge von Zuckerrüben pro kg oTS bei unterschiedlichen Methoden zur Korrektur des oTS....27

Tab. 6: Erster Versuchsansatz (2016) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer 31

Tab. 7: ZweiterVersuchsansatz (2017) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer 32

Tab. 8: Dritter Versuchsansatz (2018) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer 32

Tab. 9: Inhaltsstoffe von luftdicht abgedecktem Rübenbrei in Abhängigkeit von Lagerdauer und Lagermethode in 2017 (Angaben in g/kg Frischmasse) 35

Tab. 10: Weender-Analyse und Gehalte an Alkoholen, Milch- und Fettsäuren in den Ausgangsmaterialien und Rübensilagen nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer aus drei Versuchsansätzen; Angaben in g/kg FM 36

Tab. 11: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) für die sechs Einflussvariablen. * p-Wert zwischen 0,05 und 0,01, ** p-Wert zwischen 0,01 und 0,001, *** p-Wert kleiner als 0,001 42

Tab. 12: Signifikanztest der Haupt- und Interaktionseffekte 49

Tab. 13: Methanpotential der Sickersäfte anteilig an den Gesamtmethanpotentialen der verschieden Zuckerrübensilagen nach 10 Monaten Einlagerungszeit 51

Zusammenfassung

Aufgrund förderrechtlicher Einschränkungen („Maisdeckel“) sowie öffentlicher Diskussionen um regional gestiegene Maisanteile rücken alternative Feldfrüchte für die Biogasproduktion zunehmend in den Fokus. Hinsichtlich ihrer positiven Eigenschaften (hohe Methanhektarerträge, schnelle Umsetzbarkeit, etablierte Feldfrucht) spielt die Zuckerrübe hierbei eine ganz besondere Rolle. Grundlage für eine umfangreiche energetische Nutzung ist jedoch die möglichst ganzjährige Verfügbarkeit des Substrats. Ziel dieser Arbeit war es deshalb, unterschiedliche Verfahren zur Einlagerung von Zuckerrüben hinsichtlich der auftretenden Lagerverluste zu überprüfen. Diese wurden im Wesentlichen anhand der durch die Lagerung verursachten Verluste an Organik und Energiepotentialen ermittelt.

Überprüft wurden dabei die Einflussparameter: Abdeckung (Folie, Stroh, offen), Aufbereitung (ganze Rübe, Brei, Schnitzel), Strohanteil (Rübenbrei: 2,4 %, 5 %, 10 % und 30 %; Rübenblatt 4 % und 10 %), Standort (leichter, mittelschwerer und schwerer Boden), Reinigung (ja, nein) und Lagerdauer (4, 7, 10 Monate). Ferner wurden die Verluste bei luftdicht gelagerten Rübenblättern ermittelt.

Die verschiedenen Varianten wurden in runde Silobehälter mit ca. 1 m Höhe einsiliert. Je nach Probenmaterial wurden zwischen 30 und 60 kg eingefüllt und temporär mit einem ca. 85 kg schweren Betongewicht verdichtet. Anschließend wurden sie für 4, 7 und 10 Monate frostfrei, aber ansonsten unter Außenbedingungen gelagert. Zur Bestimmung der Sickerwassermengen wurden die Behälter der in der Praxis in Fahrsilos lagerbaren Varianten im zweiten Jahr dauerhaft beschwert.

Die ermittelten Silagetemperaturen lagen im Mittel bei 16,2 °C und korrelierten weitgehend mit den Außentemperaturen, die durchschnittlich 1 °C darüber lagen. Fehlgärungen traten nur im ersten Versuchsjahr in 5 (vier Blatt und eine Rübenvariante) von 45 Proben auf. Der mittlere oTS-Gehalt der Ausgangsmaterialien lag bei den Rüben bei 22,6 % (Blätter: 11,4 %) und nahm im Laufe der Einlagerungsdauer bei allen Varianten kontinuierlich ab. Die Milch- und Essigsäuregehalte stiegen im Lauf der Einlagerung kontinuierlich von jeweils durchschnittlich 1 g·kg-1 auf 10 g·kg-1 FM an. Schwer abbaubare flüchtige Säuren waren in den Silagen nicht enthalten.

Statistisch nachgewiesen werden konnte der Einfluss auf den Frischmasseverlust durch die Faktoren *Lagerdauer* (-), *Strohanteil* (-), ohne *Abdeckung* (-), *Aufbereitung* (+). Auf die organischen Verluste konnten lediglich der Einfluss von *Lagerdauer* (-) und *Aufbereitung* (+) statistisch nachgewiesen werden. Die in Batch-Versuchen ermittelten Energieverluste in Abhängigkeit der Einflussparameter zeigten, dass luftdicht abgedeckter Brei nach zehn Monaten Einlagerung praktisch keine Verluste aufwies. Ein ähnlich günstiges Ergebnis brachte mit 2,4 % Stroh eingelagerter Zuckerrübenbrei. Die höchsten Energieverluste wiesen mit rund 65 % offen gelagerte ganze Rüben auf.

Abstract

Due to restrictions in subsidies as well as public discussions, alternative crops for biogas production become more interesting. With regard to its positive characteristics (high methane yield, rapid availability, established crop), sugar beets can be a reasonable replacement for other cultures. Therefore the availability of the substrate throughout the year is required. The aim of this work was to examine different treatments for the storage of sugar beet with regard to energy losses. The following parameters were examined: coverage, processing, straw additive, site effect and storage time (up to 10 months).
The different samples were stored in round silo containers with a height of approx. 1 m filled with 30 - 60 kg and compacted with a concrete weight of about 85 kg. Subsequently, they were stored for 4, 7 and 10 month under outdoor conditions (frost-free). The determined silage temperatures averaged 16.2 ° C and correlated with the outside temperatures, which were on average 1 ° C higher. The initially organic dry matter content was 22.6% (sheet: 11.4%) for the beets and decreased continuously with storage duration. During storage, the lactic- and acetic acid contents increased continuously from an average of 1 g kg-1 to 10 g kg-1 FM.

The influence on losses (fresh-matter) could be statistically proven by the factors storage time (-), straw content (-), without coverage (-), treatment (+). The energy losses determined in batch experiments showed that covered beet pulp had almost no losses after ten months of storage. Sugar beet pulp stored with 2.4 % straw showed similar results. Storing untreated sugar beets without coverage led to the highest energy losses measured.

1 Einleitung

Der Zubau an Biogasanlagen in den vergangenen Jahren hat neben positiven Effekten der Nutzung regenerativer Energien auch dazu geführt, dass Fehlentwicklungen im Bereich der Biogasnutzung zunehmend von einer breiten Öffentlichkeit wahrgenommen werden. Hierzu zählt auch die regional teils starke Zunahme an Maisflächen zur Biogasproduktion. Neben den Möglichkeiten zur Steigerung der Gesamteffizienz bei der Vergärung landwirtschaftlicher Produkte sowie ökonomischer Anreize, ist dies einer der Gründe weshalb Anlagenbetreiber und Landwirte als Substratlieferanten auf der Suche nach Alternativlösungen zur Ergänzung der bestehenden Substratmischung sind. Hinzu kommen förderrechtliche Einschränkungen wie z.B. der „Maisdeckel“ im Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) 2017.

Aufgrund der vielen Vorteile, die der Maiseinsatz mit sich bringt - hohe flächenbezogene Energieerträge, schlagkräftige Anbau- und Erntetechniken, eine bewährte und relativ einfache Art der Konservierung, ganzjährige Verfügbarkeit des Rohstoffs – ist es oftmals für alternative Feldfrüchte schwer zu konkurrieren. Die Zuckerrübe als Substrat für Biogasanlagen weist verschiedene positive Eigenschaften auf, aufgrund derer sie als Alternative in Frage kommt (siehe Tabelle 1). Sie besteht hauptsächlich aus Sacchariden und enthält keine Lignocellulose. Nach WEISSBACH wird durch Umsetzung der Hexosen-Polymere in Monosaccharide und Alkohole während der Silierung das Methanbildungspotential der ZR-Silage gegenüber frischen Rüben je nach Lagerdauer um bis zu 16 % erhöht (Weißbach, 2009). Diese Monomere sind im Sickersaft in hohen Konzentrationen enthalten, so dass dieser eine Biogasausbeute von 120 bis 140 $m^3N\ m^{-3}$ FM mit einem Methangehalt von ca. 54 % liefert (Schaffner, et al., 2013)). In Verbindung mit hohen flächenbezogenen Frischmasseerträgen ist der Energieertrag der Zuckerrübe pro Hektar an Gunststandorten höher als der vieler anderer Feldfrüchte. Ihr Anbau ist insbesondere deshalb von aktuellem Interesse, da durch die flexible Stromeinspeisung ein steigender Bedarf an schnell abbaubaren Einsatzstoffen besteht. Durch die Zuckerrübe kann, aufgrund der Möglichkeit zur flexiblen Gasproduktion, Lagerkapazität für Biogas eingespart werden. Sie kann ferner zur Auflockerung enger Fruchtfolgen dienen und führt zu einer positiven Veränderung des Landschaftsbilds. Aus ökonomischer Sicht kann künftig der Einsatz in Biogasanlagen deshalb von Interesse sein, da er durch die Umstrukturierung im Zuge der Zuckermarktreform, insbesondere in frachtfernen Gebieten, möglicherweise der klassischen Verwertung vorzuziehen ist (Pelka, et al., 2015). Dies wird durch die Tatsache untermauert, dass mit rd. 56.800 ha Rübenfläche, welche der Bayerische Agrarbericht für 2013 auswies, der Zuckerrübenanbau in Bayern seit Bestehen der Zuckermarktordnung am geringsten ausfiel. Gründe hierfür waren die geringeren Vermarktungsaussichten für Nicht-Quotenzucker und ein relativ hoher Vortrag aus dem Jahr 2012. Mit dem Auslaufen der aktuellen Zuckermarktordnung zum 30.09.2017 ist in Zukunft verstärkt mit dem Freiwerden von ZR-Anbauflächen zu rechnen, da die Mengen- und Preisvolatilität des Weltmarktes viel stärker als bisher auf den EU-Zuckermarkt durchschlagen und die wirtschaftliche Vorzüglichkeit des Zuckerrübenanbaus gegenüber anderen Marktfrüchten abnehmen wird (StMELF, 2014)). Die aktuell stark gesunkenen Erzeugerpreise für Zuckerrüben bestätigen dies und schmälern die innerbetriebliche Wettbewerbsfähigkeit der Zuckerrübe für die Zuckerproduktion deutlich. Jedoch birgt der Einsatz von Zuckerrüben in Biogasanlagen auch Risiken und Nachteile. Unter Anderem konnte sich noch kein Standardverfahren zur Einlagerung etablieren, welches eine ganzjährige Nutzung bei möglichst geringen Lagerverlusten erlaubt. In Tab. 1 sind die Vor- und Nachteile zusammenfassend dargestellt.

Tab. 1: Vor- und Nachteile des Anbaues von Zuckerrüben für die Biogasproduktion

Vorteile	***Nachteile bzw. Herausforderungen***
Konkurrenzfähige Methanhektarerträge	*Erdanhang und/oder Steinbesatz erfordern Waschen der Rüben*
Organische Trockenmasse schnell abbaubar	*Zerkleinerung als zusätzlicher Aufbereitungsschritt*
Auflockerung maisbetonter Fruchtfolgen	*Geringe Selbstverträglichkeit (20 - 25 % in der Fruchtfolge)*
Verbesserung der Rührfähigkeit des Gärgemischs	*Risiko zur Schaumbildung im Gärbehälter*
Hohe Stickstoffeffizienz im Anbau (DüV)	*Herausforderungen einer Reihenkultur (Bodenerosion, Humus)*
Größeres Erntefenster als bei Silomais	*Hoher Wassergehalt bedingt hohe Transportkosten und größere Lagerkapazität für Gärrest*
Externe Zwischenlagerung möglich (Feldrandmieten)	*Saisonal begrenzte Verfügbarkeit*
Züchterische Potentiale für die Nutzung als „Energierüben“	*Entwicklungsbedarf bei Aufbereitungs- und Konservierungsverfahren*
Imagevorteil gegenüber Silomais	*Verfügbarkeit techn. Anlagen zur Aufbereitung/Reinigung regional begrenzt*

2 Stand des Wissens

Problematisch stellt sich zunächst die ganzjährige Verfügbarkeit der Zuckerrübe als Biogassubstrat dar. Zudem muss das Material vor der Einlagerung einer effizienten Reinigung unterzogen werden, da ein hoher Verschmutzungsgrad zur Sedimentbildung im Fermenter führen kann, die nur unter erheblichem Aufwand zu beseitigen ist. Da der bisherige Verwendungszweck der Zuckerrüben nur einen begrenzten Lagerungszeitraum in der kühlen Jahreszeit erforderte, konnten die durch Mieteneinlagerung am Feld hervorgerufenen Verluste gering gehalten werden. Für die Biogasproduktion jedoch besteht grundsätzlich der Bedarf einer geeigneten und möglichst verlustarmen Konservierungstechnik über längere Zeiträume hinweg. Dabei soll der technische und finanzielle Aufwand gering gehalten werden. Nach Literaturangaben können die Verluste bei optimaler Gestaltung der Lagerung in der Größenordnung von Maissilage liegen. Technische Lösungen werden allerdings nur in einigen wenigen Fällen angewandt, da bis dato die Zuckerrübe in der Biogasproduktion eine untergeordnete Rolle spielte. Laut einer Umfrage des Deutschen Biomasse Forschungszentrums setzten rund 2 % von 707 Biogasbetrieben ZR als Substrat ein (Gromke, et al., 2014). In der von ASCHMANN et al. betrachteten Stichprobe von 1240 Biogasanlagen in Bayern fiel der Einsatz von ZR unter die Rubrik „Sonstiges“ mit einem Gesamtanteil von 1 % (Aschmann, et al., 2013). Von den bis dato 25 Pilotbetrieben zur Biogasproduktion in Bayern setzten während des Monitorings durch die LfL vier Betriebe ZR ein, davon ein Betrieb nur vorübergehend und mit einem Massenanteil von wenigen Prozent (Bachmeier, et al., 2011). Bei der Einlagerung können grundsätzlich die in Tab. 2 dargestellten Methoden angewandt werden:

Tab. 2: Beispiele für Verfahren zur Einlagerung der Zuckerrübe für den Einsatz in Biogasanlagen

Verfahren	Beschreibung
Mietenlagerung:	Lagerung ganzer Rüben in Mieten am Feldrand
Breilagerung:	Rübenbrei wird in Lagunen oder Hochsilos einsiliert (offen oder mit Überdachung)
Silierung unzerkleinert:	Ganze Rüben werden im Fahrsilo einsiliert und mit Flies abgedeckt
Mischsilage:	Gehäckselte Rüben werden mit Stroh oder anderen saugfähigen NawaRo zusammen einsiliert
Schlauchsilagen:	Einsilieren ganzer Rüben in einen Folienschlauch

Die langfristige Mietenlagerung ist für Zuckerrüben zur Produktion von Biogas ungeeignet, da bei einer Lagerung über den Winter hinaus zu hohe Verluste aufgrund hoher Temperaturschwankungen entstehen.

Bei der Einlagerung von Rübenbrei sinkt der pH Wert auf 3,2 ab, was zu einer Stabilisierung des Materials führt (Gröblinghoff, 2010). Der Silierungsprozess ist bereits nach 10 Tagen abgeschlossen, das Substrat ist pumpfähig und die Fütterung damit automatisierbar. Untersuchungen an der Landwirtschaftskammer Schleswig Holstein haben gezeigt, dass die Verluste an oTS bei der offenen Lagerung bei bis zu 25 % liegen. Wird das Material gut abgedeckt, lässt sich der Verlust auf ca. 15 % verringern (Abb. 1). Weitere Tests ergaben, dass einsilierte Varianten höhere Gasausbeuten pro kg oTS aufweisen, und die Lagerdauer nur bei den abgedeckten Varianten ohne Einfluss war (Thaysen, et al., 2012). Folglich ist das Einsilieren in abgedeckten Hochbehältern aus Stahl verlustarm, bedeutet jedoch einen hohen finanziellen und technischen Aufwand.

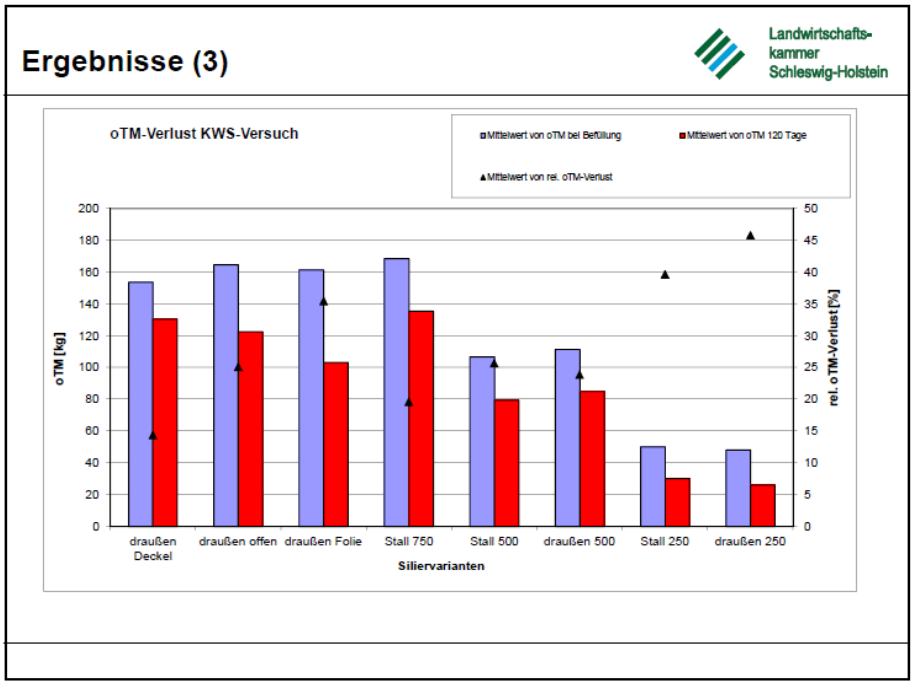


Abb. 1: Einfluss des Lagerverfahrens auf den oTS-Verlust bei Zuckerrübenbrei (nach THAISEN ET AL. 2012)

Angaben von FRIEDRICH zufolge betragen die Verluste an oTS in den oberflächennahen Schichten von in Lagunen gelagertem Zuckerrübenbrei (0-50 cm) über 50 %, ab Tiefen von 1,50 m gehen nur noch rund 10 % der wertbestimmenden Organik verloren (Tab. 3) (Friedrich, 2013).

Tab. 3: oTS Verluste bei der Lagerung von Zuckerrübenbrei in Lagunen (verändert nach (Friedrich, 2013)

Schichttiefe unter der Oberfläche in cm	Verlust an oTS in %
0 – 50	56 (+/- 10)
50 –100	36 (+/- 6)
100 –150	24 (+/- 8)
>150	8 (+/- 6)

* oTS auf flüchtige Säuren und Alkohole korrigiert

Laut eines Vortrags im Rahmen eines C.A.R.M.E.N. Fachgespräch von SCHAFFNER wiesen die Zuckerrüben, welche unzerkleinert in einem Fahrsilo unter einer Silofolie einsiliert wurden eine gute Qualität auf (Zuckerrüben als Biogassubstrat, 2010). Aus der Präsentation geht hervor, dass die Rüben mindestens bis Juni eingelagert waren. Hinweise auf Lagerverluste sind darin nicht enthalten. Aus Ganzrüben fallen nach SCHAERFF (Schaerff, et al., 2015) etwa 40 bis 70 L Sickersaft je t FM an, aus Rübenhäcksel ca. 100 L t^{-1}. SCHAFFNER et al. (2013) geben hingegen an, dass über den gesamten Zeitraum der Lagerung etwa 30 bis 40 % Sickersaft bezogen auf die eingelagerte Frischmasse abgegeben werden können. Dabei ist für die Biogasproduktion die Menge an Sickersäften nur deshalb relevant, da das darin enthaltene Methanpotential der Biogasanlage zugeführt werden sollte. Andernfalls erhöhen sich die Energieverluste mit steigendem Sickersaftanfall

Das Herstellen von Mischsilagen, bei der ein bestimmter Anteil zerkleinerter Rüben mit einem anderen Substrat wie z. B. Mais zusammen einsiliert wird, verspricht einige Vorteile. Laut SCHAFFNER (2010) ist ein sicheres und kostengünstiges Einsilieren möglich und die Entnahme ist einfach und unproblematisch. Dem Inhalt des Beitrags ist zu entnehmen, dass die Verluste gering ausfallen, jedoch wurde dies nicht anhand von Zahlen belegt.

Bei der Lagerung ganzer Rüben in Folienschläuchen wird die Gärsaftbildung eingeschränkt, da nicht gehäckselt wird. Diese Methode besitzt den Nachteil, dass die Rüben aufwändig entnommen und vor dem Eintrag mit Hilfe einer Häckselschaufel zerkleinert werden müssen.

Insgesamt ist die Informationslage zu Lagerverlusten bei unterschiedlichen Methoden zur Konservierung von Zuckerrüben für den Einsatz in Biogasanlagen unzureichend und es besteht, auch aufgrund der Notwendigkeit zur Bereitstellung schnell abbaubarer Substrate für die Versorgung von BHKW die flexibel Strom einspeisen, dringender Bedarf an belastbaren Daten.

3 Zielsetzung

Da bezüglich der Effizienz verschiedener Einlagerungsmethoden keine ausreichenden Kenntnisse vorliegen, war Ziel des Projektes den Informationsstand durch belastbare Untersuchungsergebnisse zu erweitern. Dabei liegt das Hauptaugenmerk im Modul 1 bei den Verlusten, welche durch die Lagerung hervorgerufen werden und ob diese durch das Lagerungsverfahren beeinflusst werden. Im Einzelnen werden folgende Fragestellungen untersucht.

- oTS Verluste in Abhängigkeit der Lagerungstechnik und -dauer
- Energieverluste bezogen auf Lagerungstechnik und -dauer
- Erarbeitung optimaler Mischungsverhältnisse bei Co-Silierung mit Stroh
- Anfall von Sickersaft (für die in Fahrsilos lagerbaren Varianten)

Diese Fragestellungen werden anhand eines geeigneten Versuchsaufbaus bearbeitet. Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Modul II („Biogasrüben Prozessoptimierung“) können auch Fragestellungen bezüglich ggf. vorhandener biologisch bedingter Limitierungen beim langfristigen Zuckerrübeneinsatz in Biogasanlagen bzw. Fragen hinsichtlich der Abbaukinetik beantwortet werden. Anhand der in Modul III („Biogasrüben Monitoring“) beteiligten Praxisbiogasanlagen mit Zuckerrübeneinsatz können die erworbenen Erkenntnisse mit denen aus der Praxis verglichen und verifiziert werden.

4 Material und Methoden

Es folgt eine detaillierte Darstellung des Versuchsplans sowie eine Beschreibung der verwendeten technischen Einrichtungen. Darüber hinaus erfolgt eine Dokumentation zur Herkunft und Beschaffung der eingesetzten Zuckerrüben.

4.1 Versuchsplan

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurde zunächst ein Konzept entwickelt in dem die zu untersuchenden Varianten zur Einlagerung festgelegt wurden. Der Versuchsplan wurde so gestaltet, dass er Aussagen zu sechs verschiedenen Einflussfaktoren zulässt. Die Varianten, die jeweils in drei Wiederholungen angesetzt wurden, werden im Folgenden näher beschrieben. Zusätzlich sind die einzelnen Versuchsglieder im Versuchsplan (Tab. 4) übersichtlich dargestellt. Von allen Varianten, die in einem Fahrsilo eingelagert werden könnten, wurde der anfallende Sickersaft entnommen und analysiert. Dies umfasst die Varianten mit ganzen Zuckerrüben, die mit Stroh eingelagerten Brei- sowie die Blattvarianten. Damit sind Aussagen über die Höhe der auftretenden Verluste möglich, falls der Sickersaft nicht einer Biogasanlage sondern einem Restlager zugeführt wird.

- *Strohanteil bei Rübenmus- und Rübenblattlagerung*

  Um herauszufinden, in welchem Bereich das optimale Verhältnis von Stroh und Zuckerrübe liegt wurde Zuckerrübenbrei aus gewaschenen Rüben mit auf die Frischmasse bezogenen Strohanteilen von 0 %, 5 %, 10 % und 30 % einsiliert. Zur Beurteilung der Lagereigenschaften von Rübenblättern wurden diese ohne und mit 10 % Strohanteil eingelagert. Alle Varianten wurden luftdicht abgedeckt. Nach Abschluss des Verdichtungsvorgangs wurden die dafür verwendeten Gewichte wieder entfernt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse aus dem ersten Ansatz wurden die Varianten im zweiten Versuchsjahr leicht modifiziert und die Strohmengen auf 2 %, 4 %, 5 % und 10 % reduziert. Den Rübenblättern wurde 4 % Stroh beigemischt und alle Varianten über den gesamten Versuchszeitraum mit Gewichten beschwert. Außerdem wurde aufgrund der besseren Homogenisierung das Stroh im zweiten Jahr gemeinsam mit den Rüben durch den Muser geschleust. In einem dritten Versuchsansatz wurden nur Breivarianten mit 2% ,4 % bzw. 5 % Strohanteil ohne dauerhafte Beschwerung durch Gewichte geprüft.

- *Reinigung*

  Um Aussagen zum Einfluss von Schmutzanteilen auf die Lagerfähigkeit und –Verlustrate der Zuckerrüben zu ermitteln, wurde Zuckerrübenbrei von gereinigten und ungereinigten Rüben eingelagert. Beide Varianten wurden luftdicht eingelagert. Diese Fragestellung wurde in zwei Versuchen geprüft.

- *Abdeckung*

  Zur Überprüfung des Einflusses verschiedener Methoden der Abdeckung wurden drei Versuche durchgeführt. Dabei wurden jeweils gemuste und ganze Zuckerrüben mit Folie sowie mit Stroh abgedeckt. Eine fünfte und sechste Variante wurde jeweils offen gelagert. Die Rüben aller sechs Varianten wurden zuvor gereinigt.

- *Aufbereitungsverfahren*

  Der Einfluss einer Behandlung auf das Verhalten von Zuckerrüben bei der Einlagerung wurde untersucht, indem gewaschene Rüben in unterschiedlicher Form eingelagert wurden. Die Varianten umfassten ganze, geschnitzelte und zu Brei verarbeitete Rüben, die alle mit Folie abgedeckt wurden. Die Aufbereitungsverfahren wurden in zwei Versuchsansätzen geprüft.

- *Standort*

  Zur Überprüfung des Standorteinflusses wurden ungereinigte und zu Brei verarbeitete Zuckerrüben von Standorten mit leichtem, mittlerem und schwerem Boden einsiliert und mit Folie abgedeckt. Der Standorteinfluss wurde in zwei Versuchsansätzen geprüft.

Tab. 4: Versuchsplan zur Zuckerrübeneinlagerung über einen Zeitraum von 10 Monaten

Parameter	Name	Reinigung	Aufbereitungsverfahren	Art der Abdeckung	Strohbeimischung Jahr 1	Strohbeimischung Jahr 2	Strohbeimischung Jahr 3	Standort	Sickersaft entnahme
Strohbei-mischung	**1**	j	Brei	luftdicht	0%	0%	0%	m	
	2	j	Brei	luftdicht	5%	2%	2%	m	x
	3	j	Brei	luftdicht	10%	5%	5%	m	x
	4	j	Brei	luftdicht	30%	10%	-	m	x
	5	j	Blatt	luftdicht	10%	4%	-	m	x
Rübenform	**6**	j	ganz	luftdicht	0%	0%	0%	m	x
	7	j	Schnitzel	luftdicht	0%	0%	-	m	
	entspricht Vgl 1	j	Brei	luftdicht	0%	0%	0%	m	
Wäsche	**entspricht Vgl 1**	j	Brei	luftdicht	0%	0%	0%	m	
	8	n	Brei	luftdicht	0%	0%	-	m	
Standort	**9**	n	Brei	luftdicht	0%	0%	-	s	
	10	n	Brei	luftdicht	0%	0%	-	l	
	entspricht Vgl 8	n	Brei	luftdicht	0%	0%	-	m	
Abdeckung	**entspricht Vgl 1**	j	Brei	luftdicht	0%	0%	0%	m	
	11	j	Brei	offen	0%	0%	0%	m	
	12	j	Brei	Stroh	0%	0%	0%	m	
	entspricht Vgl 6	j	ganz	luftdicht	0%	0%	0%	m	
	13	j	ganz	offen	0%	0%	0%	m	x
	14	j	ganz	Stroh	0%	0%	0%	m	x
Rübenblatt	**15**	j	Blatt	luftdicht	0%	0%	-	m	x
	entspricht Vgl 5	j	Blatt	luftdicht	10%	10%	-	m	

J: j, n: nein, m: mittel, s: schwer, l: leicht

4.2 Versuchsaufbau

Zur Einlagerung der unterschiedlichen Zuckerrübensilagen wurden spezielle Versuchssilos des Institutes für Landtechnik und Tierhaltung verwendet. Die Behälter wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts angefertigt, welches den Energieverlust von Silagen für die Biogasproduktion zum Inhalt hatte.

Die ausgewählten Behälter bestehen aus 1100 mm langen Kunststoffrohren (KG) mit einem Innendurchmesser von 370 mm und weisen damit ein Fassungsvermögen von ca. 100 L auf. Die Füllhöhe liegt bei ca. 900 mm und entspricht der, den die ursprünglich geplanten IBC-Container aufweisen. Da vorangegangene Forschungsprojekte zeigten (Kapitel 2), dass die höchsten Verluste in der obersten Schicht von 0 bis 50 cm auftreten, sind die Behälter mit 1 m Höhe gut geeignet Verlustraten zu erkennen. Die Silos sind auf einem Holzsockel montiert, so dass sie mit einem Hubwagen transportiert werden können. Am Behälterboden befindet sich eine verschließbare Öffnung, durch die das auftretende Sickerwasser durch einen Ablasshahn entnommen werden kann. Damit dort keine Verstopfungen entstehen ist die Öffnung mit einem Sieb geschützt. Um die zur Beprobung erforderliche Entleerung der Behälter zu erleichtern wird vor der Befüllung ein Folienschlauch eingesetzt. Zur Simulation des in der Praxis beim Einsilieren ausgeübten Drucks bei der Verdichtung werden die Behälter nach der Befüllung mit einem Betongewicht (ca. 90 kg) beschwert. Diese Beschwerung wurde im ersten Versuchsjahr nach ca. 20 Minuten wieder entfernt. Der durch die Mietenhöhe ausgeübte, dauerhafte Druck auf die unteren Schichten von Rübenlagern in der Praxis wird nur im zweiten Versuchsjahr simuliert, indem die Betongewichte die Siloinhalte dauerhaft beschweren. Ausgenommen hiervon sind die Varianten mit Rübenbrei, bei denen keine Sickersaftentnahme erfolgt. Hier würde sich das Sickerwasser auf die Betonkerne legen. Verdunstung und Verderb hätten einen negativen Einfluss auf das Ergebnis. In Abb. 2 sind die verwendeten Behälter, sowie die Betongewichte abgebildet.

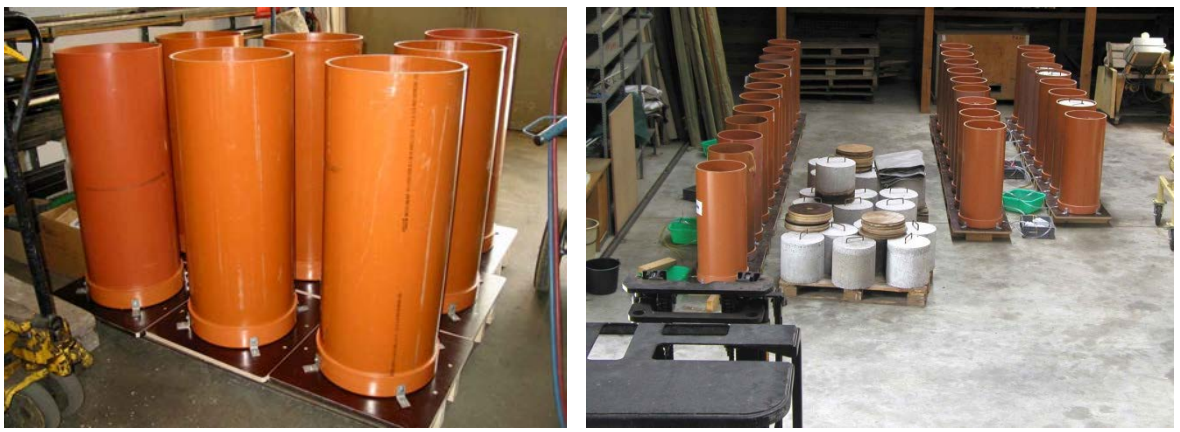


Abb. 2: Silobehälter auf Sockeln und Betongewichte zur Drucksimulation

Zur Bestimmung der Temperatur innerhalb der Silage wurden die Silos nachträglich mit Bohrungen (Ø = 3 mm) versehen und ein M 4 Innengewinde geschnitten, so dass nach der Temperaturbestimmung durch Einführen einer Temperatursonde, die Öffnung durch Einschrauben einer M 4 Schraube wieder verschlossen werden kann (Abb. 3). Der Abstand der Bohrung vom Behälterboden beträgt 30 cm. Zum Schutz vor Lufteintritt bzw. Austritt von Flüssigkeiten bei der Messung muss die Sonde mit einem Tuch umwickelt werden, welches beim Messvorgang per Hand gegen die Öffnung gepresst wird. Nach Entfernen

der Sonde muss die Bohrung sehr rasch wieder verschlossen werden. So kann sichergestellt werden, dass die Mengen an austretender Flüssigkeit in vernachlässigbarem Bereich bleibt (< 0,01 % bezogen auf das Füllgewicht). Sind die Behälter mit Betongewichten beschwert, muss die Messung stark eingeschränkt werden, da der Druck der Gewichte einen unkontrollierbaren Austritt von Sickerwasser hervorruft.

Abb. 3: Temperaturmessung des Silos durch Temperatursonde; Ablasshahn für Sickersaft unten in Bildmitte

Ziel des Versuchsaufbaus war es, möglichst praxisnahe Bedingungen nachzustellen und da große Zuckerrübenmieten oder Lagunen im Winter nicht komplett durchfrieren, galt es dies auch für die Silos zu verhindern. Aus diesem Grund wurden sie in einem unbeheizten Container untergebracht, der lediglich mit einem Frostwächtersystem ausgestattet wurde. Nachteilig macht sich dabei bemerkbar, dass dadurch keine Aussagen über den Einfluss des Niederschlagswassers auf die Verlustrate der Silage getroffen werden können. Auf diese Lösung wurde zurückgegriffen, da davon ausgegangen werden kann, dass Niederschlagswasser einen wesentlich geringeren Einfluss auf Lagerverluste aufweist, als Frost, durch den die Zellstrukturen der Zuckerrübe zerstört werden.

Da die Füllgewichte der einzelnen Varianten um die 60 kg betragen sollten, ergaben sich unterschiedliche Füllhöhen. Dabei beträgt das Füllvolumen von Rübenbrei nur ca. 60% des Volumens, das ganze Rüben bei etwa gleicher Einwaage einnehmen. Dadurch konnten die Behälter der Breivarianten um 10 cm eingekürzt werden, so dass sie in zwei Etagen gestapelt untergebracht werden konnten. Dieses Vorgehen wurde notwendig, da aufgrund der Anzahl der Behälter (45) und der begrenzten Containerfläche nicht alle Silos eingestellt werden können, wenn sie nicht übereinander angeordnet werden. In Abb. 4 sind die im Container untergebrachten Silobehälter abgebildet. Aufgrund der beengten Platzsituation wurden die Behälter im zweiten Versuchsjahr in einer mit einem Frostwächter ausgestatteten Tenne untergebracht.

Abb. 4: Silobehälter zur Bestimmung des Einflusses der Lagerungsart und Lagerdauer bei Zuckerrüben

4.3 Rohstoffbeschaffung

Die für den Versuch verwendeten Zuckerrüben stammen von leichten, mittleren und schweren Böden. Insgesamt wurden 2,4 t Rüben benötigt, die Vorgehensweise bei der Bergung zeigt Abb. 5.

Abb. 5: Abwiegen und Verladen der Zuckerrüben von mittelschwerem Boden

Das Bergen der für die Blattvarianten erforderlichen Rübenblätter musste über einen anderen Landwirt erfolgen, dessen Lohnunternehmen über eine Rübenvollerntemaschine verfügt, der die Rübenblätter separat in einem Schwad ablegen kann. Die im Feld abgelegten Blätter wurden per Hand in Kisten abgelegt und anschließend zum Versuchsstandort transportiert (Abb. 6).

Abb. 6: Bergung der Rübenblätter in der Nähe von Landshut

4.4 Substrataufbereitung

Zunächst wurden, bis auf die ungereinigten Varianten von leichten, mittleren und schweren Böden, alle Rüben gereinigt. Die Breivarianten wurden mit Hilfe eines Musers zu Brei verarbeitet und die Rüben für die Schnitzelvarianten mit einem Häcksler bearbeitet.

4.4.1 Reinigung

Zur Reinigung der einzulagernden Zuckerrüben wurde eine Trommelwaschmaschine eingesetzt, die vom Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (IPZ) zur Verfügung gestellt wurde. Die Maschine verfügt über eine langsam drehende Trommel (40 U/min) mit einem Durchmesser von 70 cm. Über eine Leitung gelangt das Waschwasser zu den vier in ein Stahlrohr in gleichen Abständen angeordneten Düsen, die das zu reinigende Material von oben besprühen. Eine Gesamtansicht sowie ein Reinigungsvorgang der Maschine sind in Abb. 7 dargestellt. Der Reinigungseffekt ist in Abb. 8 dargestellt.

Abb. 7: Trommelwaschmaschine: Gesamtansicht und Funktionsweise

Abb. 8: Reinigungseffekt: gewaschene und ungewaschene Rübe (rechts) von mittlerem Standort

4.4.2 Zerkleinerung

Für die Varianten mit ganzen Rüben wurde vor dem Silieren neben der Reinigung keine Aufbereitung durchgeführt. Da ganze Rüben zur Durchführung von Laboranalysen jedoch ungeeignet sind, mussten sie vor dem Einfüllen in Probenflaschen zerkleinert werden. Dafür, und darüber hinaus für die Variante in der die Lagerverluste von Zuckerrübenschnitzeln geprüft werden sollten, wurde ein Häcksler eingesetzt. Die beiden Fotos in Abb. 9 zeigen den Annahmebunker und die Schneidscheibe der eingesetzten Maschine sowie den erreichten Zerkleinerungseffekt.

Abb. 9: Schneidscheibe und Zerkleinerungseffekt der Rübenschnitzelmaschine

Für die Herstellung von Zuckerrübenbrei wurde vom IPZ ein Muser zur Verfügung gestellt. Das Funktionsprinzip zur Herstellung des Zuckerrübenbreis ähnelt dem des Schnitzlers jedoch ist die Schneidscheibe mit Gegenschneide horizontal angeordnet und die beiden auf der Scheibe montierten Messer nicht gezahnt. Durch die hohe Drehzahl wird ein weitaus höherer Zerkleinerungseffekt gegenüber der Schnitzelmaschine erreicht, so dass das Endprodukt in Form eines Rübenbreis vorliegt (Abb. 10).

Abb. 10: Maschine zur Herstellung von Zuckerrübenbrei; Produkt nach der Aufbereitung

Das zur Herstellung der Varianten mit Strohbeimischung verwendete Stroh wurde nicht aufbereitet und wies Halmlängen bis 25 cm auf.

4.5 Messtechnik

Zur Durchführung der Versuche wurden Messgeräte zur Gewichts-und Temperaturbestimmung sowie ein pH-Meter benötigt.

4.5.1 Wiegetechnik

Das Gerät mit einem Messbereich von 0 bis 300 kg wurde vor dem Einsatz mit geeichten Gewichten überprüft und eine Genauigkeit von +/- 50 g festgestellt. Bei Füllgewichten von ca. 60.000 g entspricht dies einer Abweichung von unter 0,1%. Zum Einwiegen des Frischmaterials wurden die Behälter mittels eines Hubwagens auf die Waage gestellt, tariert und Rüben bzw. Rübenblätter bis zum Erreichen des Sollgewichts eingefüllt (Abb. 11).

Zur Gewichtsbestimmung des austretenden Sickersafts durch Öffnen des Probenahmehahns und anschließendem Auffangen in Laborflaschen, kommt eine herkömmliche Laborwaage zum Einsatz. Dies betrifft ausschließlich die Varianten die in Fahrsilos eingelagert werden können.

Abb. 11: Einwaage von Rübenbrei bzw. Rübenblättern mit Hilfe eines Hubwagens

4.5.2 Temperatur

Zur Bestimmung von Außentemperatur und Temperatur im Silo wurde ein Temperaturmessgerät der Fa. Testo eingesetzt. Das Gerät ist mit einem Rechenwerk mit Display versehen. Die 30 cm lange Temperatursonde mit einem Durchmesser von 2 mm ist mit einem PT-100 Fühler ausgestattet (Abb. 3).

4.5.3 pH-Wert

Der Messung des pH Werts in den Silagen kann nur jeweils zu den Terminen der Probenahme durchgeführt werden – also nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer. Die Bestimmung erfolgt mit einem Taschengerät der Fa. WTW welches gleichzeitig auch die Temperatur des Probenmaterials messen kann. Der Messbereich des Geräts liegt zwischen pH 2 und pH 19.

4.6 Analytik

Die Analytik gliedert sich in drei Teilbereiche. Es müssen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Ausgangsmaterialien sowie der unterschiedlich lang eingelagerten Varianten überprüft und ggf. auftretende Veränderungen festgestellt und interpretiert werden. Darüber hinaus gilt es den Masseverlust in Abhängigkeit der Variante und der Einlagerungsdauer zu bestimmen und anhand von Batchversuchen das Biogaspotential und einen durch die Behandlung bzw. die Lagerdauer eventuell auftretenden Energieverlust festzustellen.

4.6.1 Laboranalytik

Um Aussagen darüber treffen zu können, ob die Art der Einlagerung bzw. die Lagerdauer die chemischen bzw. physikalischen Eigenschaften der Silage beeinflusst, sind umfangreiche chemische Analysen erforderlich. Diese werden von AQU am Standort Grub durchgeführt. Analysiert werden folgende Materialien:

- Ausgangsmaterial (Blatt, Stroh, Zuckerrüben von leichten, mittleren und schweren Standorten)

- Silage nach vier Monaten
- Silage nach 7 Monaten
- Silage nach 10 Monaten

Zu den Probenahmeterminen muss jeweils ein Silo jeder Variante geöffnet, einer optischen Beurteilung unterzogen, fotografisch dokumentiert und anschließend homogenisiert werden. Die Inhalte der beprobten Silos werden anschließend nicht mehr zur Fortführung des Versuchs verwendet und verworfen. Somit steht für eine Lagerdauer von 10 Monaten für jede Variante nur noch eine Probe zur Verfügung. Zur Beurteilung der Materialien werden im Labor folgende chemischen und physikalischen Eigenschaften untersucht:

1.	Trockensubstanz,	2.	Milch- Essig-, Butter- und Propionsäure
3.	organischer Trockensubstanz		Rohprotein, Rohfaser, Rohfett
4.	pH-Wert	5.	Ethanol (Äquivalent)

4.6.2 Massenverlust

Zur Bestimmung der Lagerverluste wurden zunächst alle 45 eingestellten Behälter verwogen. Eine zweite Gewichtsbestimmung aller Behälter erfolgte zum Termin der ersten Probenahme nach vier Monaten, eine zweite und dritte nach 7 und 10 Monaten. Für die ersten beiden Versuchsansätze standen dann zur zweiten Wägung noch 30 und zur letzten noch 15 Behälter zur Verfügung. Im letzten Versuchsjahr wurden die Varianten reduziert und insgesamt nur 24 Behälter angesetzt.

4.6.3 oTS-Verlust

Aufgrund sehr hoher auf den oTS bezogenen Gasausbeuten, die anhand von Batch Tests (nach VDI 4630) ermittelt wurden, fand eine Überprüfung der Werte durch eine zusätzliche Bestimmung des CSB statt. Diese Methode wurde gewählt, da möglicherweise neben den analysierten flüchtigen Bestandteilen, um welche die ermittelten oTS-Werte nach Weißbach (2009) korrigiert wurden, weitere, unbekannte Substanzen enthalten sind, die bei der standartmäßigen Erfassung des oTS-Gehaltes nicht erfasst werden. Dieser Umstand würde zu hohe oTS-bezogene Gasausbeuten erklären. Zur Klärung wurden 10 Varianten der zehn Monate eingelagerten Zuckerrübenproben zentrifugiert. Der feste Anteil wurde im Labor mit der Standartmethode auf den oTS-Gehalt untersucht. Vom Überstand (flüssiger Anteil), bei dem davon ausgegangen wurde, dass darin die meisten flüchtigen Substanzen enthalten sein müssten, wurde eine CSB Analyse durchgeführt. Mittels einer standardisierten Methode kann der oTS-Gehalt des Überstands durch dessen CSB Gehalt berechnet werden. Das Ergebnis ist in Tab. 5 dargestellt und zeigt deutliche Unterschiede bezüglich der spezifischen Biogasausbeuten. Durch die nach Weißbach (2009) korrigierten Werte wurde der spezifische Biogasertrag offenbar immer noch überschätzt. Die durch die CSB Methode erhaltenen Werte lieferten plausible spezifische Gasausbeuten. Da nur die zehn Monate eingelagerten Proben mit der CSB-Methode analysiert, alle anderen Varianten aber nur durch die Weißbachformel korrigiert wurden, konnten die Proben nicht untereinander verglichen werden. Somit konnte der Einfluss dieser Methode auf die Ergebnisse zu den organischen Verlusten nicht ermittelt werden. Anhand weiterer Forschungen gilt es an dieser Stelle herauszufinden, ob die CSB-Methode gegenüber der herkömm-

lichen oTS Bestimmung in Verbindung mit einer Korrektur nach Weißbach, bei der Analyse von Zuckerrüben bessere Ergebnisse liefern kann.

Tab. 5: Normbiogaserträge von Zuckerrüben pro kg oTS bei unterschiedlichen Methoden zur Korrektur des oTS

Variante	oTS über CSB	oTS*
Brei luftdicht	543	817
Brei offen	529	768
Brei Strohabdeckung	536	813
Brei mittel	619	821
Brei schwer	610	696
Brei leicht	525	694
Rübe luftdicht	581	929
Rübe loffen	572	878
Rübe Strohabdeckung	593	891
Brei 2,4 % Stroh	531	771

* korrigiert nach Weißbach, 2009

4.6.4 Biogaspotential

Anhand von Gärversuchen wird das Biogaspotential der einzelnen Varianten aber auch der Ausgangsmaterialien und Sickersäfte überprüft. Die Potentialbestimmung erfolgt in Batchversuchen. Die Versuchsanlage ist so ausgeführt, dass die Versuche in Anlehnung an die VDI Richtlinie 4630 und VDLUFA Methodenbuch durchgeführt werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Anlage erfolgte bereits im Abschlussbericht zur Weiterentwicklung der Methode für Batchversuche (Lichti, et al., 2016).

5 Ergebnisse

Die Silagetemperaturen wurden im ersten Jahr innerhalb der zehnmonatigen Versuchsdauer 24mal gemessen. Aufgrund der Erkenntnisse aus dem ersten Versuchsjahr wurden die Silotemperaturen im zweiten Jahr nur achtmal bestimmt. Von den Varianten, die in der Praxis in Fahrsilos untergebracht werden können, wurde in den ersten beiden Jahren jeweils zwölfmal Sickerwasser abgelassen. Somit konnten Erkenntnisse zum Sickerwasseranfall gewonnen werden. Für die ausgewählten Varianten des dritten Versuchsjahrs erfolgte keine Dokumentation der Silagetemperaturen und des Sickerwasseraufkommens. Inhaltsstoffe, oTS-Gehalt, pH sowie Frischmassegewicht wurden jeweils zu Versuchsbeginn und zu den Probenahmeterminen ermittelt bzw. analysiert. Aufgrund limitierter Kapazitäten konnte im ersten Versuchsjahr das Biogaspotential nicht für alle Varianten bestimmt werden (siehe Kapitel 5.8). Aus dem gleichen Grund konnte auch für die 10 Monate eingelagerten Proben keine Überprüfung des Energiepotentials durchgeführt werden. Aussagekräftige Ergebnisse lieferte nur die Prüfung der Methanpotentiale im dritten Versuchsjahr. Diese werden in Kapitel 5.8 ausführlich besprochen.

5.1 Silagetemperatur

Die Nacherwärmung von Silagen im Silostock ist einer der wichtigsten Indikatoren zur Erkennung von Fehlgärungen. Aus diesem Grunde wurden die Lagerungsvarianten einer Temperaturüberwachung unterzogen.

In der Blattvariante ohne Strohbeimischung wurde mit 5 °C bei einer Außentemperatur von 3,8 °C (in unmittelbarer Nähe des Silos) die niedrigste Temperatur gemessen. Die höchste Temperatur verzeichnete die Variante „ganze Rüben ohne Abdeckung“. Hier betrug der Messwert 34, 1 °C bei einer Außentemperatur von 21,5 °C. Die mittlere Temperatur aller Varianten betrug 16,2 °C, die mittlere Außentemperatur lag um knapp 1 °C darunter.

In Abb. 12 (links) ist der Temperaturverlauf der Variante „Rübenbrei mit Folienabdeckung“ exemplarisch dargestellt. Hier zeigt sich, dass die Schwankungen weniger stark ausgeprägt sind als bei der Außentemperatur und dass innerhalb einer Variante nur geringfügige Unterschiede auftraten. Aus diesem Grund werden für die folgenden Darstellungen, bei denen die Varianten untereinander verglichen werden, die Mittelwerte der drei Wiederholungen herangezogen.

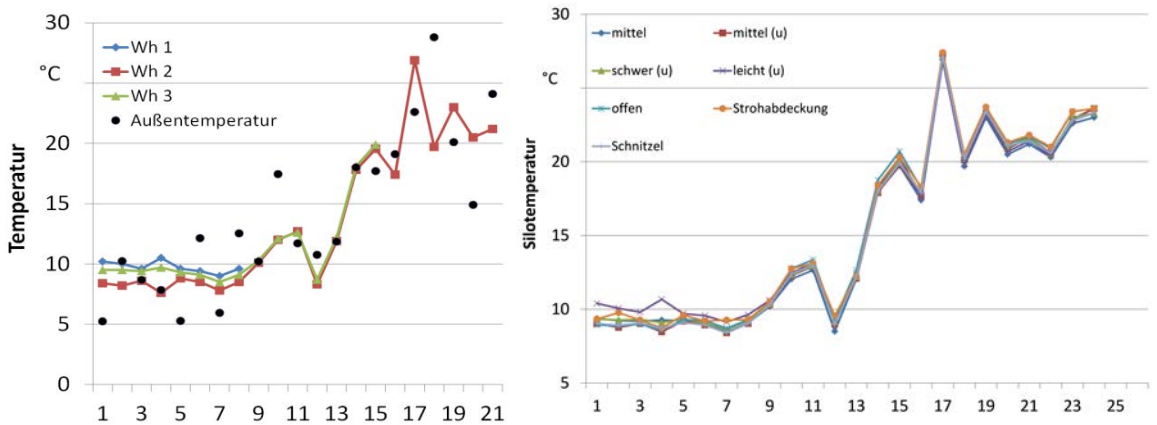


Abb. 12: Temperaturverlauf der Variante „Rübenbrei - luftdicht abgedeckt“ (links); Temperaturverlauf (MW) von unterschiedlich eingelagertem Rübenbrei (rechts)

Abb. 12 (rechts) zeigt die Temperaturverläufe der Breivarianten und von Rübenschnitzeln. Auffällig ist, dass sich die gemessenen Temperaturen in den einzelnen Varianten nur wenig voneinander unterscheiden. In der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums schwankten die mittleren Temperaturen leicht um 10 °C und pendelten im Lauf des Sommers um 23 °C. Im Mittel betrug die Silagetemperatur der Zuckerrübenschnitzel und aller Breivarianten 15,2 °C.

Alle Breivarianten mit Strohbeimischung sowie die Blattvariante ohne Stroh wiesen praktisch gleiche Temperaturverläufe auf. Nur die mit Stroh vermischte Blattvariante lag meist geringfügig über den anderen vier Varianten. Im Mittel betrug die Silagetemperatur der Varianten mit Strohbeimischung 16,1 °C (Abb. 13 links).

Anders stellt sich das Temperaturverhalten in den Silagen dar, die mit ganzen Rüben bei unterschiedlicher Abdeckung angesetzt wurden. Hier lag der Unterschied zwischen folienbedeckter und strohbedeckter bzw. offener Variante in der zweiten Hälfte des Messzeitraums zwischen 3 und 9 °C. Im Mittel betrug die Silagetemperatur aller eingelagerten ganzen Rüben 18,3 °C. Dies sind rund 2 °C bzw. 3 °C mehr als bei den Varianten „Rübenbrei“ bzw. „Rübenbrei oder -Blatt mit Strohbeimischung“ (Abb. 13 rechts).

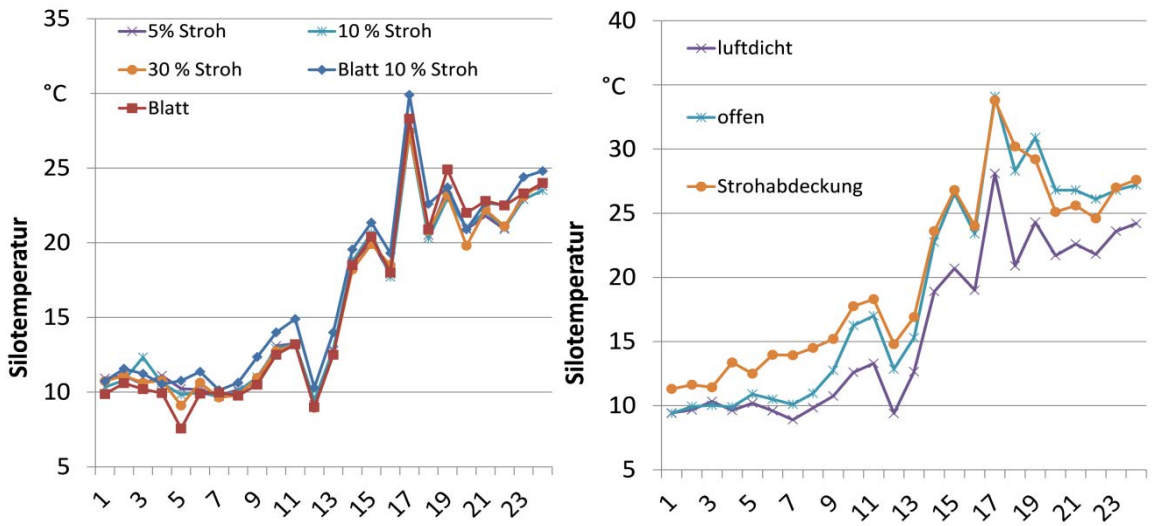


Abb. 13: linke Seite: Temperaturverlauf der Blatt- und Breivarianten mit unterschiedlicher Strohbeimischung (Mittelwerte))
rechte Seite: Temperaturverlauf der einzelnen Varianten mit ganzen unterschiedlich abgedeckten Rüben (Mittelwerte)

Um die geringe Schwankungsbreite zu verdeutlichen und die im Vergleich dazu wenigen Ausnahmen sichtbar zu machen, bei denen ein leicht höheres Temperaturniveau festgestellt wurde (offene und mit Stroh abgedeckte Rüben), sind in Abb. 14 (links) alle gemessenen Temperaturverläufe ohne Angabe der Variante dargestellt.

Im zweiten Versuchsjahr wurden alle Behälter, deren Inhalt in der Praxis in einem Fahrsilo gelagert werden können, dauerhaft mit Gewichten beschwert, die die Belastung des Rübenmaterials im unteren Bereich eines Silos simulieren sollten. Dies betraf die Varianten 2 bis 7 und 13 bis 15 (vgl. Tab. 4). Aufgrund der Gewichtsbelastung kommt es bei der Temperaturbestimmung zu unkontrolliertem Sickerwasseraustritt durch die Sondenöff-

nung, der im Fall häufig durchgeführter Messungen nicht mehr zu vernachlässigen ist. Aufgrund dessen und da die Ergebnisse des ersten Versuchsjahres zeigten, dass die Temperaturverläufe in den Silagen mit den Außentemperaturen korrelieren und weitgehend synchron ablaufen, wurden die Behältertemperaturen im zweiten Jahr weniger häufig gemessen. Die mittlere Temperatur in allen Behältern betrug 12,5 °C und in Abb. 14 (rechts) sind die Mittelwerte jeder Variante graphisch dargestellt.

Im dritten Versuchsansatz, bei dem nur ausgewählte Varianten geprüft wurden, erfolgte keine Dokumentation der Silagetemperaturen.

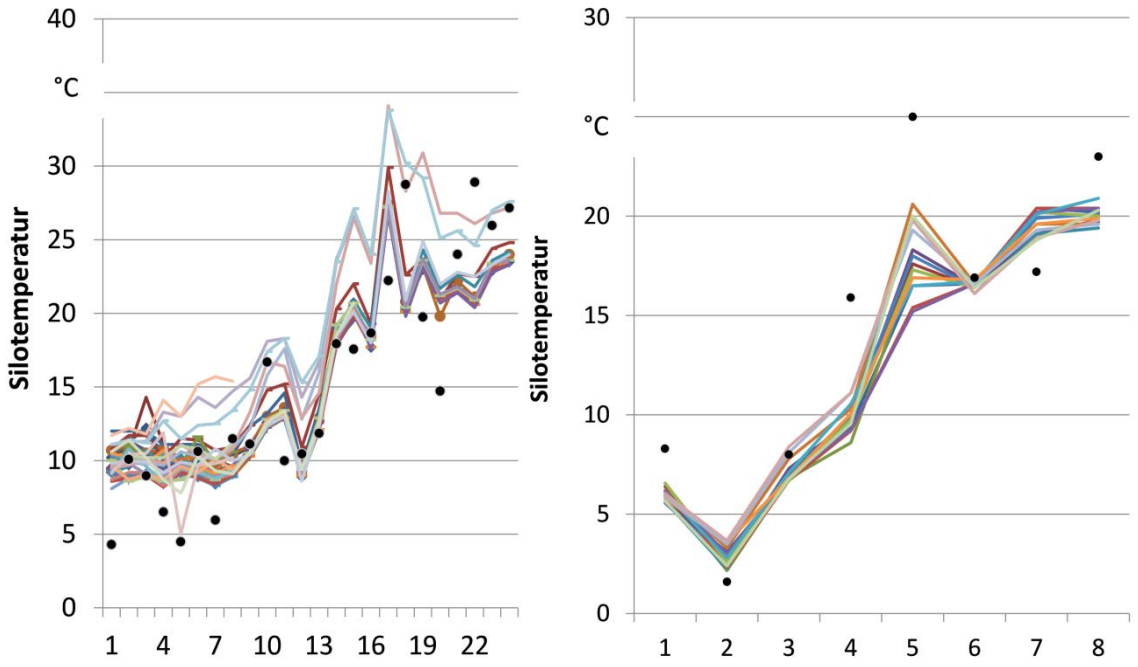


Abb. 14: Links: Alle 2016 gemessenen Silotemperaturen und mittlere Außentemperaturen (schwarze Punkte);
Rechts: Mittelwerte aller 2017 gemessenen Varianten und mittlere Außentemperaturen (schwarze Punkte)

5.2 pH-Wert

Für alle drei durchgeführten Einlagerungsversuche wurden die pH-Werte eines jeden Silos gemessen. Die Messung erfolgte unmittelbar bei der Beprobung der Behälter, konnte deshalb nur jeweils einmal durchgeführt werden.

Im ersten Versuchsjahr wurden bei einigen wenigen Proben hohe pH-Werte ermittelt. Bei diesen Proben war auch kein säuerlicher Geruch wahrnehmbar, was wiederum auf Fehlgärungen hinweisen kann. Eine gleichzeitige Nacherwärmung der betroffenen Varianten (alle Rübenblätter und vier Monate eingelagerter Rübenbrei mit 5 % Strohbeimischung) wurde jedoch nicht beobachtet. Die pH – Werte der übrigen 90 % aller Versuchsglieder zeigen an, dass der Siliervorgang störungsfrei abgelaufen ist. Im Mittel lag der gemessene pH-Wert bei 4,2. In Tab. 6 sind die Einzelwerte dargestellt.

Tab. 6: Erster Versuchsansatz (2016) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer

Varianten		**Einlagerungszeit**		
		4 Monate	7 Monate	10 Monate
1	Brei luftdicht	3,9	3,7	3,7
2	Brei mit 5 % Stroh	8	4,3	4,3
3	Brei mit 10 % Stroh	4	4	4,3
4	Brei mit 30 % Stroh	4	4,4	4,4
5	Blatt mit 10 % Stroh	7,5	7,4	4,5
6	Rübe luftdicht	3,6	3,6	4,1
7	Rübenschnitzel	4	3,6	3,6
8	Brei ungereinigt (mittel)	3,7	4	3,7
9	Brei ungereinigt (schwer)	3,9	3,5	3,5
10	Brei ungereinigt (leicht)	3,6	3,6	3,7
11	Brei offen	4,1	3,8	3,8
12	Brei Strohabdeckung	3,7	4,1	3,7
13	Rübe offen	3,9	3,9	4,8
14	Rüben Strohabdeckung	3,6	3,6	4,1
15	Blatt	7	4,5	7

Im zweiten Versuchsansatz wurden keine Fehlgärungen festgestellt. Mit Werten mehrheitlich unter pH 4 ist der Siliervorgang als gut zu bewerten. Lediglich bei den ganz eingelagerten Rüben verlief die Konservierung zunächst etwas weniger intensiv als bei den Brei bzw. Blattvarianten, da hier nach vier Monaten Werte von knapp über 5 gemessen wurden. Im Mittel errechnet sich ein pH-Wert von 4,0. In Tab. 7 sind die ermittelten Werte der einzelnen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer dargestellt.

Tab. 7: ZweiterVersuchsansatz (2017) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer

Varianten		**Einlagerungszeit**		
		4 Monate	7 Monate	10 Monate
1	Brei luftdicht	3,8	3,6	3,2
2	Brei mit 2,4 % Stroh	3,8	3,9	3,8
3	Brei mit 5 % Stroh	3,7	3,9	3,6
4	Brei mit 10 % Stroh	3,7	4,1	3,8
5	Blatt mit 4 % Stroh	4,3	4,3	3,9
6	Rübe luftdicht	5,0	4,0	3,3
7	Rübenschnitzel	4,0	3,9	3,7
8	Brei ungereinigt (mittel)	3,9	3,6	3,9
9	Brei ungereinigt (schwer)	3,9	4,0	3,5
10	Brei ungereinigt (leicht)	4,2	3,8	4,1
11	Brei offen	3,9	3,6	3,8
12	Brei Strohabdeckung	3,8	3,5	3,7
13	Rübe offen	5,9	4,1	4,3
14	Rüben Strohabdeckung	5,3	4,0	5,3
15	Blatt	4,3	4,4	4,3

Die acht ausgewählten Varianten des dritten Versuchsansatzes wiesen bereits nach vier Monaten Einlagerungszeit pH-Werte von 4 oder darunter auf. In der Regel nahmen diese mit der Einlagerungsdauer leicht ab. Im Mittel errechnet sich ein pH-Wert von 3,7. Die Werte belegen eine gute Silagequalität. In Tab. 8 sind die ermittelten Werte der einzelnen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer dargestellt.

Tab. 8: Dritter Versuchsansatz (2018) - mittlere pH-Werte der unterschiedlichen Varianten in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer

Varianten		**Einlagerungszeit**		
		4 Monate	7 Monate	10 Monate
1	Brei luftdicht	3,9	3,7	3,4
2	Brei mit 2,4 % Stroh	3,9	3,9	3,6
3	Brei mit 4 % Stroh	3,9	3,9	3,4
6	Rübe luftdicht	4,0	3,8	3,6
11	Brei offen	3,9	3,8	3,4
12	Brei Strohabdeckung	3,8	3,7	3,4
13	Rübe offen	3,8	3,8	3,8
14	Roben Strohabdeckung	3,8	3,8	3,6

5.3 Analytik

Die Inhaltsstoffe der Ausgangsmaterialien, aber auch die der einzelnen Varianten nach entsprechender Einlagerungszeit wurden im Labor analysiert. Dabei wurden die in Kapitel 4.6.1 aufgelisteten Parameter erhoben:

5.3.1 oTS-Gehalt

In Kapitel 5.4 werden die organischen Verluste der einzelnen Varianten detailliert beschrieben. Diese stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit den oTS-Gehalten. Aus diesem Grund ist in Abb. 15 nur eine Auswahl an Zuckerrübenvarianten abgebildet, die die Entwicklung der oTS-Gehalte in Abhängigkeit der Einlagerungsdauer veranschaulichen soll. An dieser Stelle ist jedoch auch auf die problematische oTS-Bestimmung wie in Kap. 4.6.3 beschrieben hinzuweisen. Für die Darstellung wurden Mittelwerte aus drei Versuchsergebnissen gebildet. Die oTS-Gehalte nahmen in allen Fällen mit der Dauer der Einlagerung ab. Die Intensität scheint abhängig von der Aufbereitung zu sein, denn im Fall von ganzen Rüben war die Abnahme der Organik deutlich stärker ausgeprägt als bei allen Varianten mit Rübenbrei.

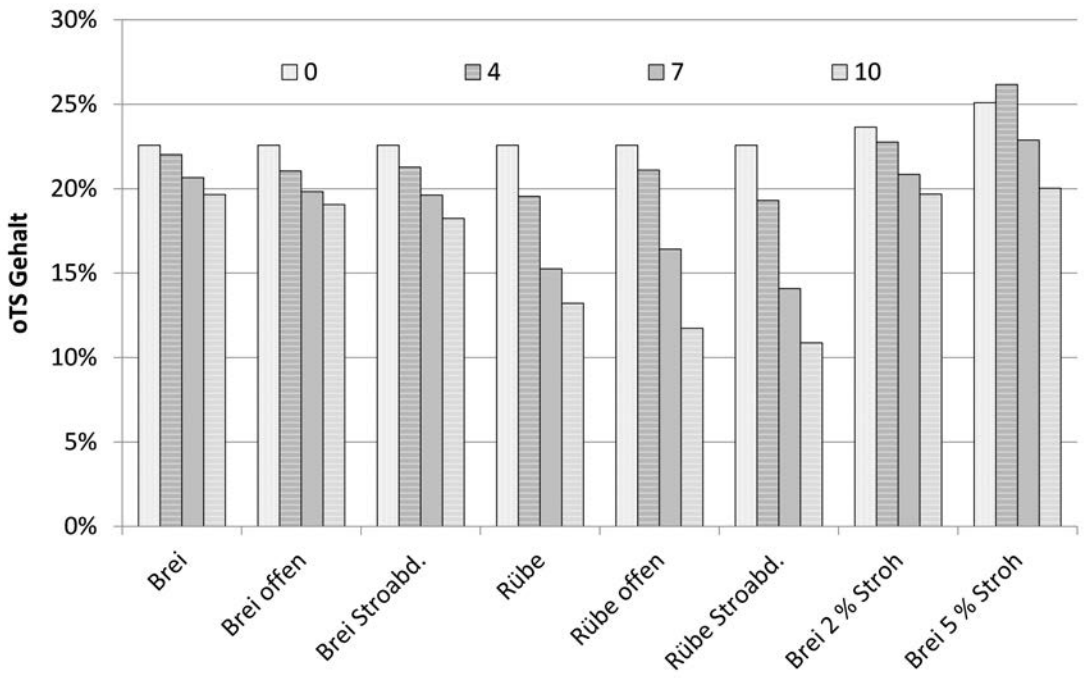


Abb. 15: Mittlere organische Trockensubstanzgehalte der unterschiedlichen Varianten nach 0, 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit

Rübenblätter wurden zweimal geprüft und in Abb. 16 sind die mittleren Trockensubstanzgehalte im Laufe der Einlagerungszeit dargestellt. Die Blätter hatten zu Beginn der Versuche einen oTS-Gehalt um 13 % auf. Dieser fiel nach 10 Monaten um 3 Prozentpunkte ab. Praktisch identisch verhielt sich die Variante, der 4 % Stroh beigemischt wurde. Bei einem Strohanteil von 10 % war die Abnahme des oTS-Gehalts mit ca. 6 Prozentpunkten deutlich stärker ausgeprägt. Beide Blattvarianten mit Strohbeimischung wurden jeweils nur einmal geprüft.

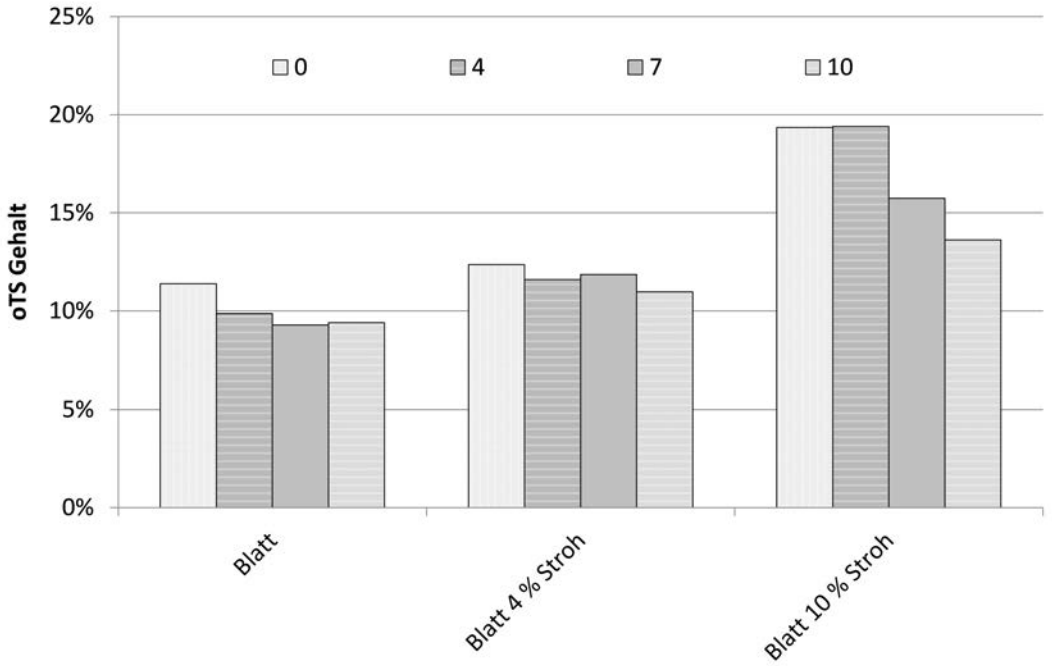


Abb. 16: Organische Trockensubstanzgehalte der unterschiedlichen Varianten mit Rübenblättern nach 0, 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit

5.3.2 Inhaltsstoffe

Alle Proben wurden auch auf ihre Inhaltsstoffe hin im Labor untersucht. Exemplarisch sind die Ergebnisse der luftdicht abgedeckten Variante von Rübenbrei in Tab. 9 dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Zuckerrüben im Vergleich zu anderen in Biogasanlagen verwendeten Substraten wenig Stickstoff enthalten und einen sehr geringen Faseranteil aufweisen. Fett ist praktisch nicht enthalten. Im Gegensatz zur Lagerungsdauer übt die Einlagerungsmethode (luftdicht, offen oder Strohabdeckung) nur einen sehr geringen Einfluss auf die Gehalte von Nährstoffen, Alkoholen und Säuren aus. Somit können die Rübenproben in Kategorien eingeteilt, und von diesen Mittelwerte aus den einzelnen Messergebnissen gebildet werden. Zusammengefasst werden z.B. die Ergebnisse aller Breivarianten. Somit ist die Vielzahl an einzelnen Laborergebnissen in einer übersichtlichen Form darstellbar.

Tab. 9: Inhaltsstoffe von luftdicht abgedecktem Rübenbrei in Abhängigkeit von Lagerdauer und Lagermethode in 2017 (Angaben in g/kg Frischmasse)

	Brei luftdicht				Brei offen			Brei Strohabdeckung		
Lagerdauer	0	4	7	10	4	7	10	4	7	10
oTS korr.	21,8%	21,2%	19,3%	17,7%	20,2%	19,3%	18,4%	21,1%	17,9%	17,4%
Rohprotein (XP)	10	10	9	9	9	10	10	9	9	10
Rohfaser (XF)	11	11	11	11	12	13	12	11	14	13
Rohfett (XL)	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Milchsäure	1	4	7	11	3	7	11	3	8	11
Essigsäure	1	4	4	15	4	3	9	4	4	10
Propionsäure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buttersäure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ethanol, Alkohol	0	2	10	9	2	4	7	2	7	8
Anthronzucker	197	141	106	83	125	139	74	130	96	76

Die Weender-Werte schwanken innerhalb der drei untersuchten Jahre nur schwach. So traten beim Rübenbrei und bei den ganzen Rüben innerhalb des Untersuchungszeitraums praktisch keine Schwankungen auf und bei den Blättern sind sie schwach ausgeprägt. Bei den Breivarianten mit Stroh sind nur bezüglich des Rohfasergehalts Unterschiede erkennbar, wobei diese durch die unterschiedlichen Strohanteile hervorgerufen wurden, die in den einzelnen Jahren geprüft worden sind.

Der Gehalt an Milchsäure nahm durch die Silierung kontinuierlich zu. Bereits nach einer Einlagerungszeit von vier Monaten lag bei den Rüben im Durchschnitt ein Gehalt von 4 g/kg FM vor. Dieser stieg auf 5 g nach sieben und auf 10 g nach zehn Monaten Einlagerungszeit an. Bei den Blättern wurde ebenfalls ein Anstieg festgestellt. Die Probe mit ZR-Blatt nach 10 Monaten Lagerdauer aus dem Jahr 2016 wies einen pH von 7 auf, was auf eine Fehlgärung hinweist. Diese Schlussfolgerung wird durch das Fehlen von Milchsäure bestätigt. Auffällig ist, dass in den Sickersäften deutlich höhere Milchsäuregehalte gemessen wurden als in den festen Materialien. Der Gehalt an flüchtigen Fettsäuren einer Silage nimmt Einfluss auf die Geschwindigkeit des anaeroben Abbaus, da sie von den Methanogenen direkt in Methan umgewandelt werden können. Dabei ist die Essigsäure am einfachsten umsetzbar und auch deren Gehalte nahmen im Lauf der Einlagerung kontinuierlich zu. Bei den Rübensilagen auf durchschnittlich 4 g/kg FM, nach vier und sieben, und auf 10 g/kg FM nach zehn Monaten Lagerungsdauer. Bei den Blättern (ohne Fehlgärung) verlief der Anstieg des Essigsäuregehalts weniger stark ausgeprägt. Schwieriger abbaubare Propion- und Buttersäuren wurden in den Rübensilagen praktisch nicht gefunden. Bei den Rübenblättern wurden erhöhte Gehalte nur in der Probe nachgewiesen, die durch Fehlgärungen beeinträchtigt war. Der Gehalt an Alkoholen stieg bei den Rübensilagen von durchschnittlich 4 g/kg FM (nach vier Monaten) auf 6 g/kg FM (nach 7 Monaten) und nach zehn Monaten auf 8 g/kg FM an. Die Zuckergehalte nahmen mit der Lagerungsdauer deutlich ab. Sie verloren bei Betrachtung aller Varianten mindestens 60 % ihres ursprünglichen Gehaltes.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse zu den Inhaltsstoffen, dass in nahezu allen Fällen, durch die Silierung, günstige Bedingungen für einen zügigen anaeroben Abbau geschaffen werden konnten. Gegebenenfalls über die Einlagerungszeit festgestellte Energieverluste, sind dann folglich nicht auf die Verringerung der Silagequalität zurückzuführen sondern müssen durch den Masseverlust verursacht worden sein. Zu dieser Schlussfolgerung führt auch

das in Kapitel 5.8 besprochene Ergebnis zu den auf die Frischmasse bezogenen Methanausbeuten, welche mit der Dauer der Einlagerung zum Teil deutlich ansteigen.

Tab. 10: Weender-Analyse und Gehalte an Alkoholen, Milch- und Fettsäuren in den Ausgangsmaterialien und Rübensilagen nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer aus drei Versuchsansätzen; Angaben in g/kg FM

2016	Rübenbrei				ganze Rüben					Rübenbrei-Stroh				Rübenblatt				
Lagerdauer	0	4	7	10	0	4	7	10	Saft	4	7	10	Saft	0	4	7	10	Saft
Rohprotein (XP)	10	11	11	21	10	12	12	11	8	13	12	14	9	27	21	23	20	9
Rohfaser (XF)	12	12	11	21	12	12	12	12	0	84	45	46		19	20	17	18	0
Rohfett (XL)	1	0	0	1	1	1	1	1	1	3	1	2	2	4	5	7	5	1
Milchsäure	0	6	4	11	0	2	5	6	9	8	7	9		0	10		0	17
Essigsäure	0	5	4	12	0	2	3	8	7	4	4	7		0	4		13	6
Propionsäure	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		0	0		3	1
Buttersäure	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		7	1
Ethanol, Alkohol	0	2	1	7	0	4	7	8	13	12	11	13	12	0	2		0	2

2017	Rübenbrei				ganze Rüben					Rübenbrei-Stroh					Rübenblatt				
Lagerdauer	0	4	7	10	0	4	7	10	Saft	0	4	7	10	Saft	0	4	7	10	Saft
Rohprotein (XP)	11	11	11	11	10	9	10	11	6	12	11	11	14	6	25	29	29		13
Rohfaser (XF)	11	12	14	12	11	12	13	14	0	35	36	35	43	0	13	26	21		0
Rohfett (XL)	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	2	0	2	7	9		0
Milchsäure	1	5	9	15	1		4	8	12	1	5	7	16	20	0	6	12		21
Essigsäure	1	5	5	11	1		4	9	12	1	5	5	10	10	0	2	2		5
Propionsäure	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		1
Buttersäure	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0		1
Ethanol, Alkohol	0	2	4	6	0	1	10	15	15	0	0	10	11	14	0	1	0		3
Anthronzucker	198	118	112	75	197	167	69	25	26	178	118	94	37	40	25	12	8		1

2018	Rübenbrei				ganze Rüben				Rübenbrei-Stroh			
Lagerdauer	0	4	7	10	0	4	7	10	0	4	7	10
Rohprotein (XP)	12	11	11	11	12	10	11	9	12	11	12	12
Rohfaser (XF)	11	11	11	12	11	11	12	10	25	25	27	26
Rohfett (XL)	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1
Milchsäure	1	4	4	11	1	0	2	8	1	5	6	12
Essigsäure	1	5	4	12	1	0	3	7	1	6	5	9
Propionsäure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Buttersäure	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ethanol, Alkohol	0	1	1	3	0	1	5	8	0	1	8	11

5.4 Massenverlust (FM und oTS)

Der Frischmasseverlust ergibt sich aus der Differenz der Behältergewichte beim Start des Versuchs und den Gewichten nach vier sieben und zehn Monaten Einlagerungszeit. In den ersten beiden Versuchsansätzen wurden je 15 Varianten geprüft, im dritten und letzten nur noch acht. Dabei wurde im zweiten Jahr auf die aufgrund des unverhältnismäßigen Strohanteils bzw. Flächenbedarfs wenig praxisnahe Methode mit 30 % Strohanteil verzichtet und diese durch eine mit 2,4 % Strohanteil ersetzt. Aus den gleichen Gründen wurde die Blattvariante mit 10 % Stroh im zweiten Jahr durch eine mit nur 4 % Stroh ersetzt. Nachfolgend werden die Ergebnisse bezüglich des Masseverlusts für alle Varianten dargestellt.

Dafür werden aufgrund der Übersichtlichkeit die Ergebnisse aus den einzelnen Versuchsjahren zusammen dargestellt.

5.4.1 Abdeckung

In Abb. 17 sind Massenverluste von unterschiedlich abgedeckten Rüben und Rübenbrei dargestellt. Aufgrund der Beschwerung der ganzen Rüben zur Simulation des Lagerdrucks, sind die Daten aus 2017 nicht mit den anderen vergleichbar. Hier wurde der Luftaustausch durch die verwendeten Gewichte beeinträchtigt, wodurch deutlich geringere Massenverluste gemessen wurden.

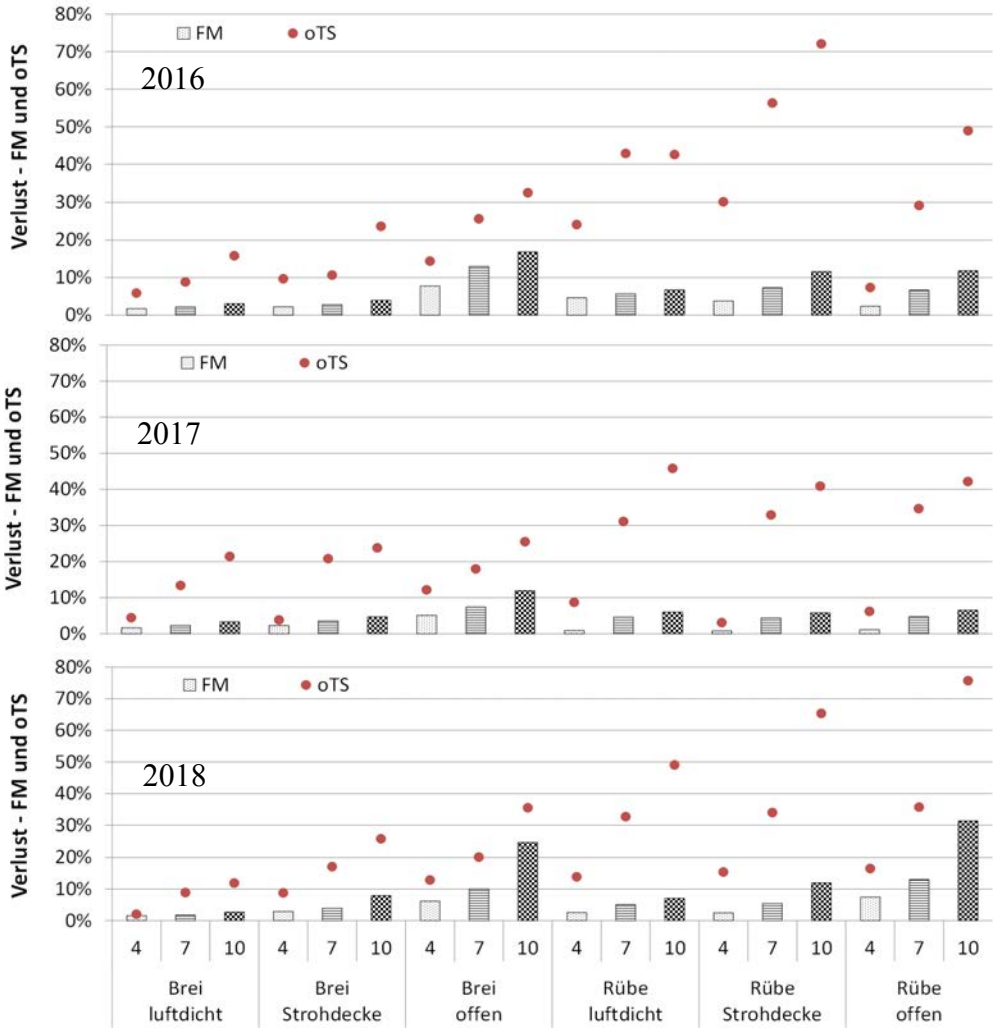


Abb. 17: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste bei unterschiedlich abgedecktem Rübenbrei und ganzen Zuckerrüben nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerdauer

Der Masseverlust nahm bei allen Varianten mit der Dauer der Einlagerung zu. Dies gilt sowohl für die Frischmasse als auch für die organische Trockenmasse.
Bei allen abgedeckten Varianten (Folie und Stroh) lagen die Frischmasseverluste nach vier Monaten Einlagerung durchschnittlich deutlich unter 3 %, die offen gelagerten Varianten verloren im gleichen Zeitraum rund das Doppelte. Nach zehn Monaten stiegen die FM-Verluste auf 6 % (mit Abdeckung) bzw. 19 % (ohne Abdeckung) an. Hinsichtlich der organischen Verluste spielte die Form in der die Rüben eingelagert wurden offenbar eine größere Rolle als die Abdeckung, denn alle ganz eingelagerten Rüben wiesen höhere Verluste auf als die in Breiform getesteten Varianten. Dieser Umstand war besonders ausge-

prägt, wenn über einen Zeitraum von 10 Monaten eingelagert wurde. Durchschnittlich verloren die Breivarianten nach 10 Monaten 24 % der oTS und die ganzen Rüben knapp 59 %. Mit 16 % wies luftdicht abgedeckter Rübenbrei die niedrigsten oTS-Verluste auf.

5.4.2 Strohanteil

In Abb. 18 sind die Frisch- und Trockenmasseverluste der Breivarianten mit unterschiedlichen Strohanteilen dargestellt. Brei mit 30 % Strohanteil wurde nur einmal geprüft, Brei mit 2 %, 4 % bzw. 10 % Strohanteil je zweimal. In 2017 wurden alle Behälter der Strohvarianten dauerhaft beschwert.

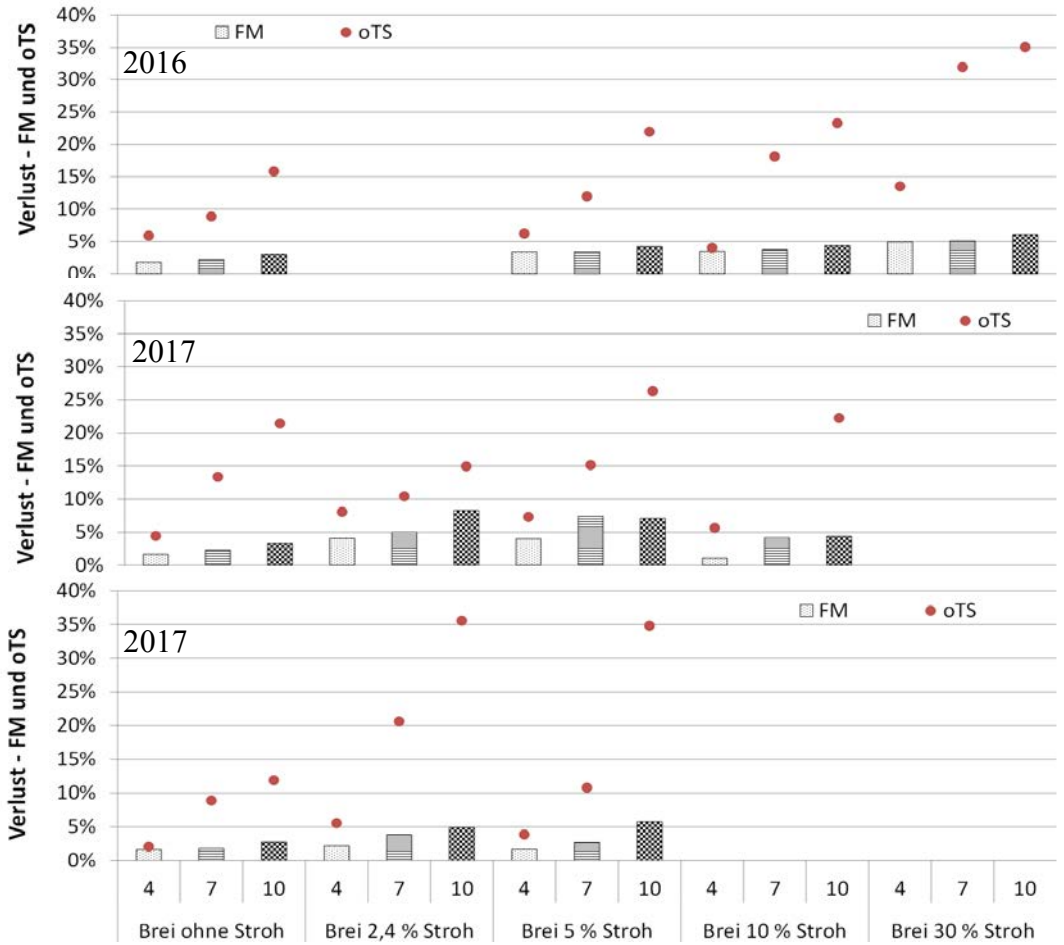


Abb. 18: Frisch- und Trockenmasseverluste von Rübenbrei mit unterschiedlichen Strohanteilen nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

Auffällig ist, dass sich bis auf eine Ausnahme (30 % Strohanteil) sowohl die FM-als auch die oTS-Verluste der verschiedenen Versuchsglieder nach vier Monaten nur unwesentlich voneinander unterschieden. Nach zehn Monaten Einlagerung dagegen lagen die Frischmasseverluste zwischen 3 und 6 %, die der Organik zwischen 20 und 35 %. Nur die Variante „2,4 % Stroh mit Beschwerung“ wies nach 10 Monaten geringere oTS-Verluste gegenüber der Variante „ohne Strohbeimischung“ auf. In allen anderen Fällen zog die Beimischung von Stroh, im Vergleich zur Einlagerung von purem Rübenbrei höhere oTS-Verluste nach sich. Unter den Strohvarianten bewegten sich die Verluste etwa auf dem gleichen Niveau (sofern der Strohanteil nicht höher als 10 % lag). Nach zehn Monaten

Einlagerung schwankten diese bezogen auf Frischmasse zwischen 5 und 8 % und bezogen auf oTS zwischen 25 und 35 %.

5.4.3 Aufbereitung

In Abb. 19 sind die Masseverluste von unterschiedlich aufbereiteten Zuckerrüben und Zuckerrübenblättern dargestellt. Diese Varianten wurden nur zweimal geprüft, wobei die Schnitzelvariante im zweiten Versuchsjahr aufgrund eines Lagerungsfehlers verworfen werden musste. Die Verluste nahmen mit zunehmender Lagerungsdauer zu und betrugen bezogen auf die Frischmasse nach zehn Monaten zwischen 3 und knapp 10 %. Die Verluste von oTS lagen zwischen 16 und knapp 46 %. Die geringsten Verlustraten wiesen die Brei- und die Blattvariante auf. Bei ganz eingelagerten Rüben fielen sie am höchsten aus. Rübenschnitzel lagen dazwischen.

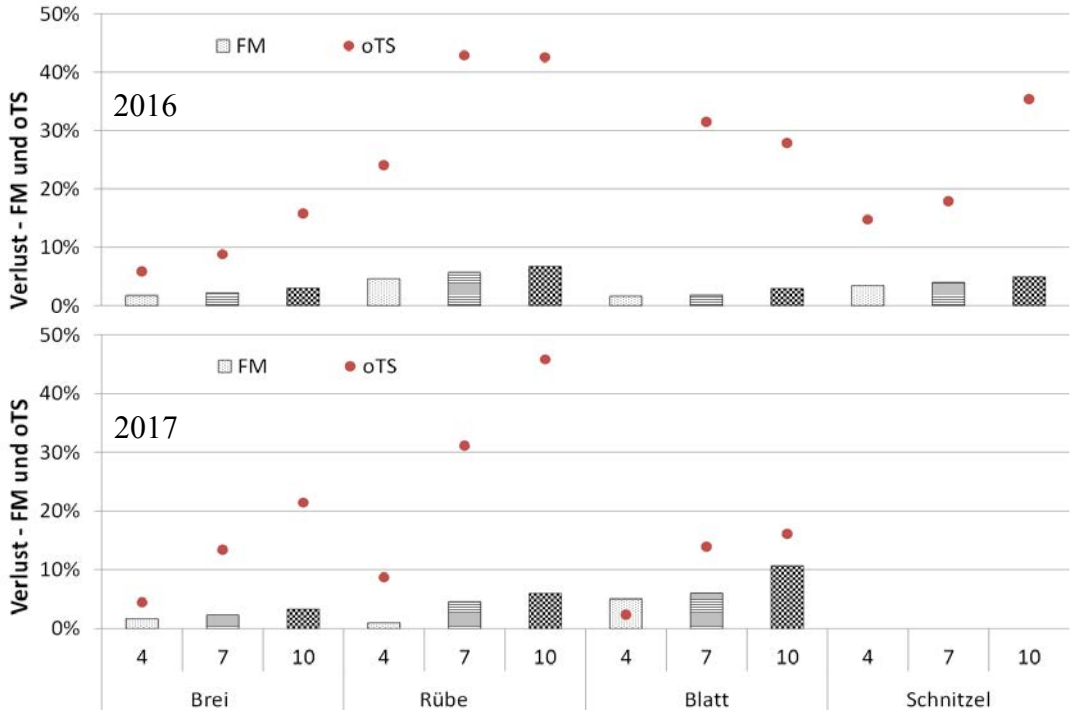


Abb. 19: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste unterschiedlich aufbereiteter Zuckerrüben und Zuckerrübenblättern nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

5.4.4 Strohanteil bei Rübenblättern

Rübenblätter konnten zweimal geprüft werden, Rübenblätter mit unterschiedlichem Strohanteil jeweils nur einmal. Die Ergebnisse bezüglich der Frisch- und Trockenmasseverluste sind in Abb. 20 dargestellt. Durchschnittlich verloren die Blätter nach 10 Monaten zwischen 5 und 10 % an Frisch- und zwischen 18 und 33 % an Trockenmasse. Die geringsten Verluste an Organik wies die Blattvariante auf, die im Jahr 2017 geprüft wurde. Die Ergebnisse des Jahres 2016 dürften von Fehlgärungen beeinflusst worden sein, die sich anhand von erhöhten pH-Werten belegen ließen (vgl. Kapitel 5.2).

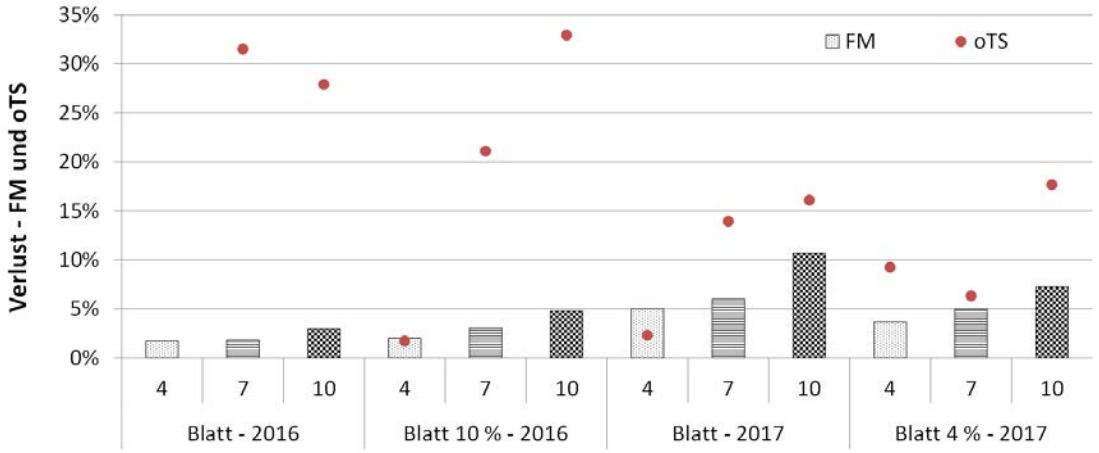


Abb. 20: Mittlere Frisch- und Trockenmasseverluste unterschiedlich eingelagerter Zuckerrübenblätter (mit 10 bzw. 4 % Strohanteil) nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

5.4.5 Bodenart (Standort) und Reinigung

Alle Breivarianten ungereinigter Rüben von verschiedenen Bodenarten (Standorten) wiesen nach 10 Monaten die geringsten Massenverluste aller getesteten Varianten auf. Diese lagen bezogen auf die Frischmasse bei rund 3 % und unterscheiden sich unter den Varianten praktisch nicht. Bezogen auf die organische Trockensubstanz schwanken sie zwischen 7 und 13 %. Offenbar hat sich die Reinigung negativ ausgewirkt, da die saubere Variante nach 10 Monaten mit durchschnittlich knapp 19 % die höchsten oTS-Verluste aufwies. Dass die Trockenmasseverluste der Variante ungereinigt von schwerem Standort nach 10 Monaten niedriger ausfielen, als nach 4 und 7 Monaten, dürfte auf die Probenahme zurückzuführen sein. Trotz Homogenisierung hat hier offenbar ein größerer Anteil Erdanhang den Wert beeinflusst (Abb. 21).

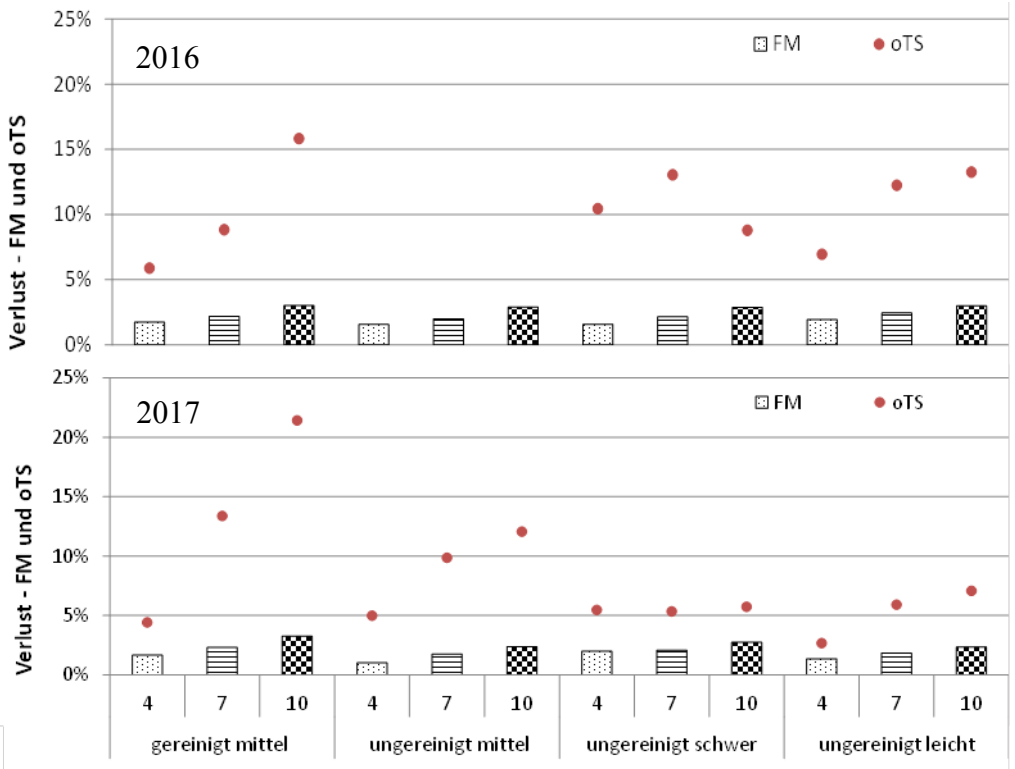


Abb. 21: Masseverlust von gereinigtem und ungereinigtem Rübenbrei von verschiedenen Standorten; nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

5.5 Massenverlust (FM und oTS) - Statistik

Um über die in Kapitel 5.4 dargestellten Messergebnisse gesicherte Aussagen treffen zu können wurde der Einfluss der Einlagerungsmethode bzw. der Lagerdauer auf den Massenverlust auch statistisch überprüft. Hierfür wurde die einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) angewandt. Dazu wurde zunächst überprüft, ob die Daten normalverteilt sind. Die Verteilung wurde mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test bei einem Signifikanzniveau von 0,05 überprüft. Da die Daten logarithmisch normalverteilt sind, konnten sie logarithmisch transformiert werden (Logtransformation).

Die folgenden Einflussvariablen (Faktoren) wurden mittels ANOVA untersucht:

- Lagerdauer mit drei Varianten (4, 7 und 10 Monate). Insgesamt wurden 96 Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.
- Strohbeimischung mit zwei Varianten (0 und 5 % Weizenstroh) Insgesamt wurden 18 Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.
- Abdeckung mit drei Varianten (Luftdicht, Offen, Strohdecke). Insgesamt wurden 36 Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.
- Aufbereitung mit zwei Varianten (ja für Zuckerrübenbrei; nein für ganze Rüben) Insgesamt wurden 18 Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.
- Bodenart (Standort) mit drei Varianten (leicht, mittel, schwer). Insgesamt wurden 18 (FM) und 15 (oTS) Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.
- Erntejahr mit drei Varianten (2016, 2017, 2018). Insgesamt wurden 36 Beobachtungen im Datensatz berücksichtig.

Tab. 11 stellt die Ergebnisse des Signifikanztests zur Prüfung von Unterschieden für die sechs Faktoren dar.

Tab. 11: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse (ANOVA) für die sechs Einflussvariablen. * p-Wert zwischen 0,05 und 0,01, ** p-Wert zwischen 0,01 und 0,001, *** p-Wert kleiner als 0,001

Faktor	Effekt auf den Verlust FM	Effekt auf den Verlust oTS
Lagerdauer	Ja***	Ja***
Strohbeimischung	Ja **	nein
Abdeckung	Ja***	nein
Aufbereitung	Ja *	Ja **
Bodenart (Standort)	nein	nein
Erntejahr	nein	nein

Zu den Mittelwertvergleichen wurde der Student-Newman-Keuls-Test verwendet. Unterschiede zwischen den Varianten sind mit den Buchstaben a, b, c gekennzeichnet, wobei gleiche Buchstaben bei verschiedenen Varianten bedeuten, dass keine signifikanten Unterschiede bestehen.

5.5.1 Lagerdauer

Die statistische Auswertung von 96 Daten zeigt, dass sich der Massenverlust mit steigender Lagerungsdauer signifikant erhöht ($p < 0,001$). Das betrifft den Frischmasse- als auch den Verlust an Organik über alle überprüften Lagerperioden hinweg. In Abb. 22 und Abb. 23 sind die Details zur statistischen Auswertung dargestellt. Die einfaktorielle Varianzanalyse und der Signifikanztest zeigen, dass sich die Mittelwerte der Verluste für die drei Varianten (4, 7 und 10 Monate) unterscheiden.

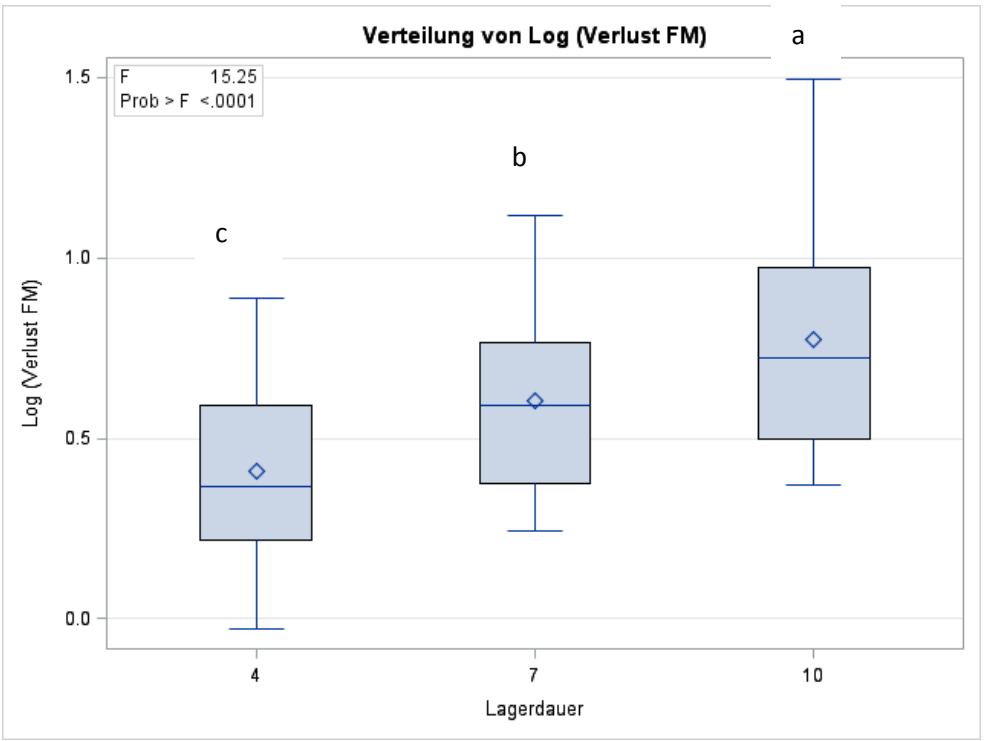


Abb. 22: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Lagerdauer (n=96)

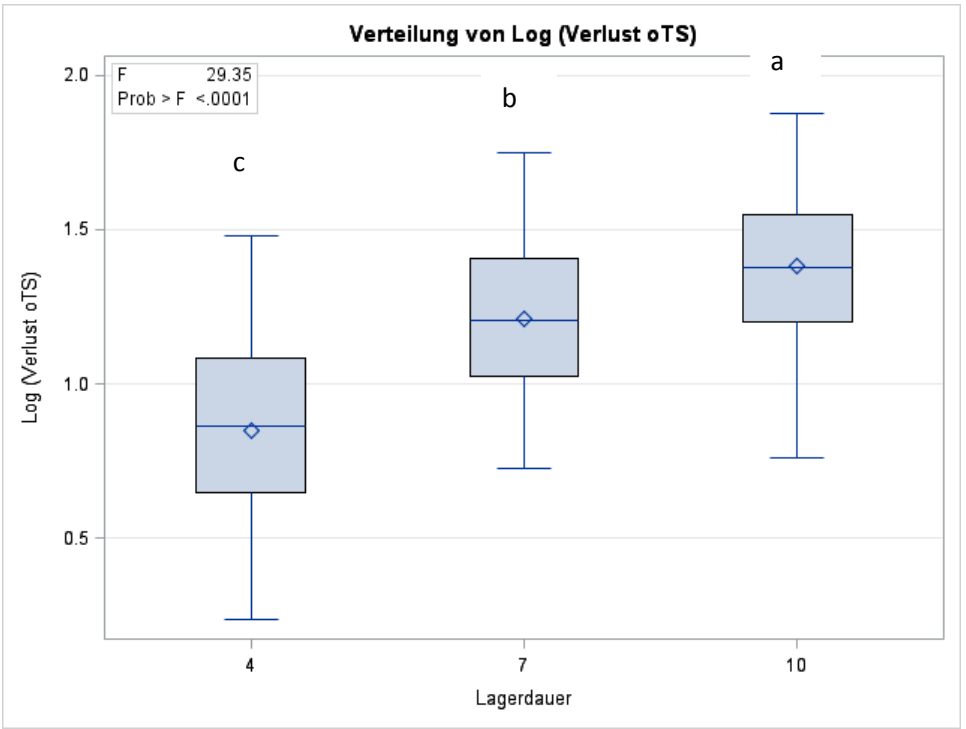


Abb. 23: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Lagerdauer (n=96)

5.5.2 Strohbeimischung

Bezüglich der Strohbeimischung konnte die statistische Auswertung nur für den Vergleich 0 und 5 % Strohanteil durchgeführt werden, da nur diese beiden Varianten dreimal geprüft wurden. Wurde dem Rübenbrei 5 % Stroh zugemischt, so wurde ein signifikant höherer Frischmasseverlust beobachtet ($p < 0{,}01$). Für den oTS-Verlust war kein Einfluss des Strohanteils statistisch nachweisbar (Abb. 24 und Abb. 25).

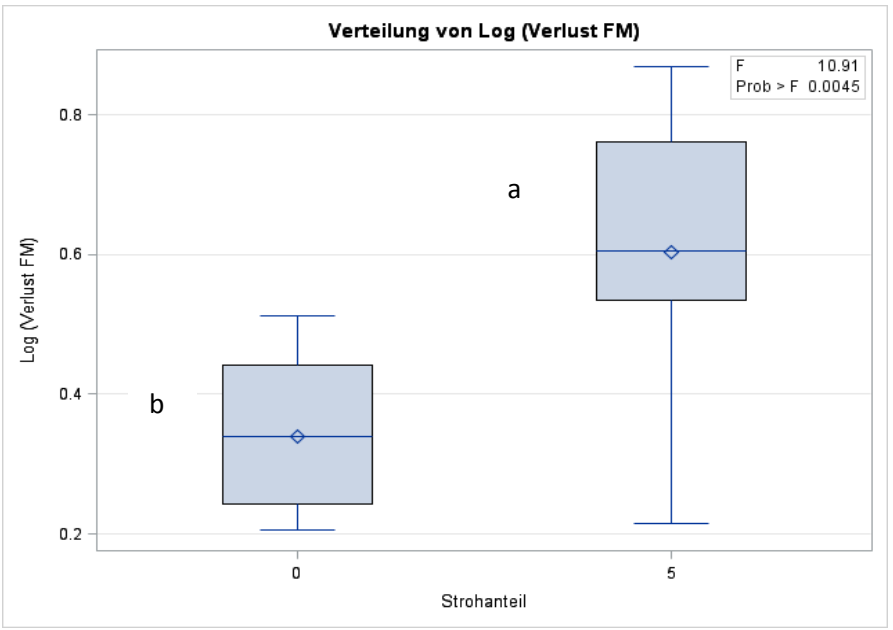


Abb. 24: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Strohanteil (n=18)

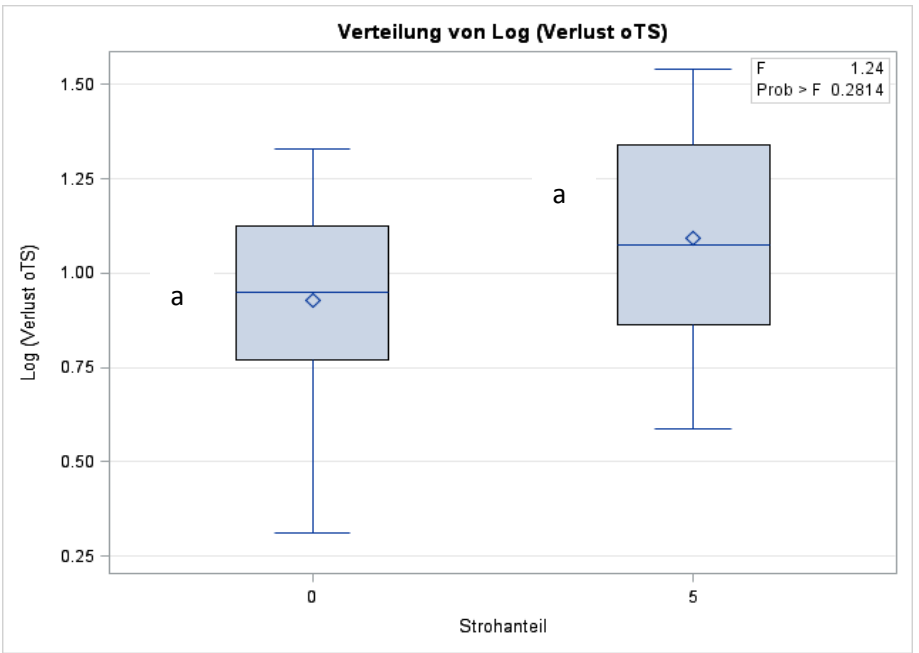


Abb. 25: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Strohanteil (n=18)

5.5.3 Abdeckung

Ein Einfluss der Abdeckung auf den Massenverlust konnte statistisch nur in zwei Fällen nachgewiesen werden. Bezogen auf die Frischmasse sind die Lagerverluste bei offener Lagerung höher als wenn luftdicht oder mit Stroh abgedeckt wurde ($p < 0{,}001$). Ein Unterschied zwischen luftdichter Lagerung oder Strohabdeckung konnte nicht belegt werden. Bezüglich der oTS-Verluste unterschieden sich die drei Varianten nicht (Abb. 26 und Abb. 27).

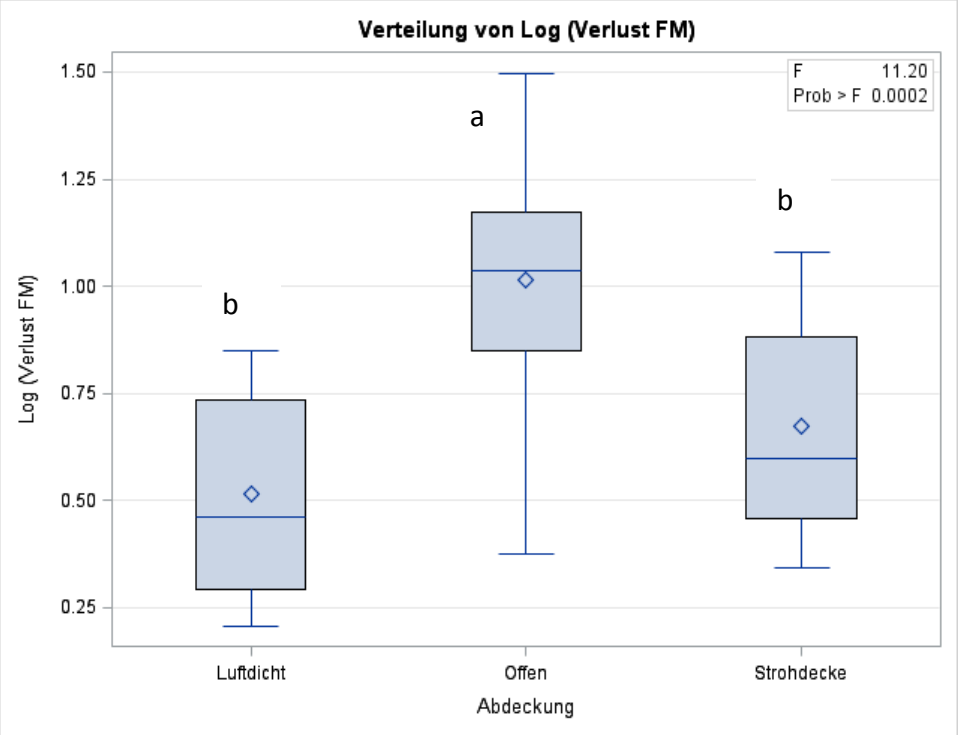


Abb. 26: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Abdeckung (n=36)

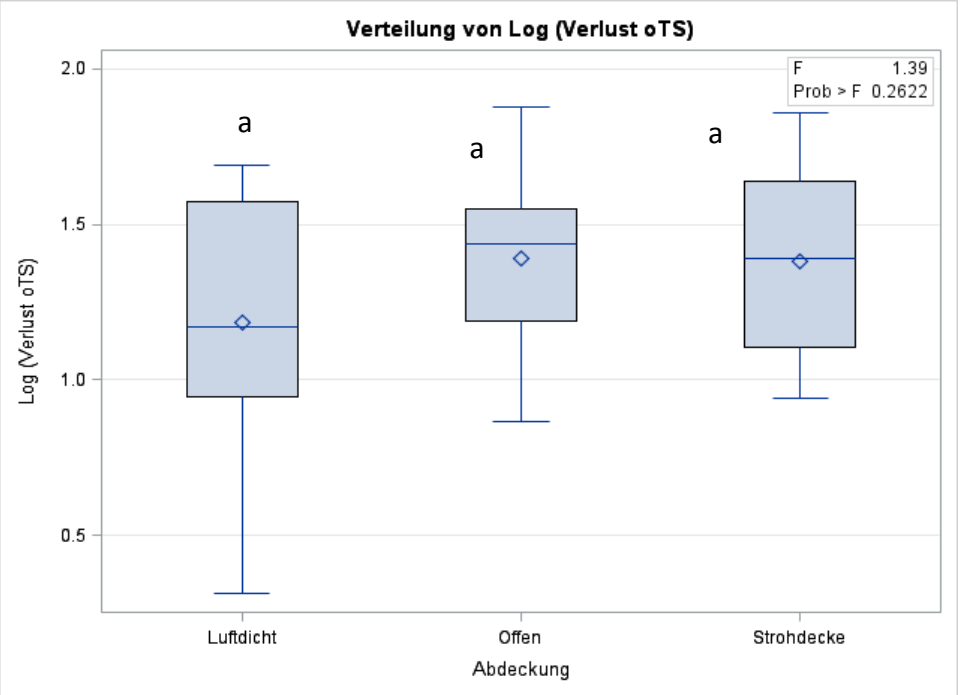


Abb. 27: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Abdeckung (n=36)

5.5.4 Aufbereitung

Ein Einfluss der Aufbereitung auf den Massenverlust konnte sowohl bezüglich der Frischmasse als auch der Organik statistisch nachgewiesen werden. Ganze Rüben wiesen höhere Verluste auf, als wenn sie vor der Einlagerung zu Rübenbrei verarbeitet wurden (Abb. 28 und Abb. 29).

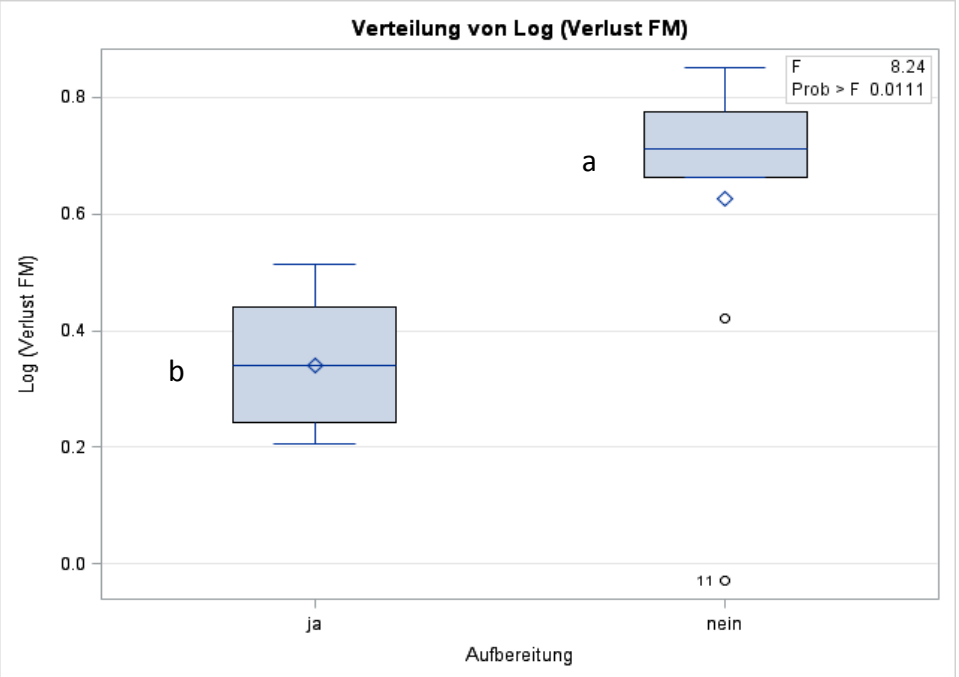


Abb. 28: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Aufbereitung (n=18)

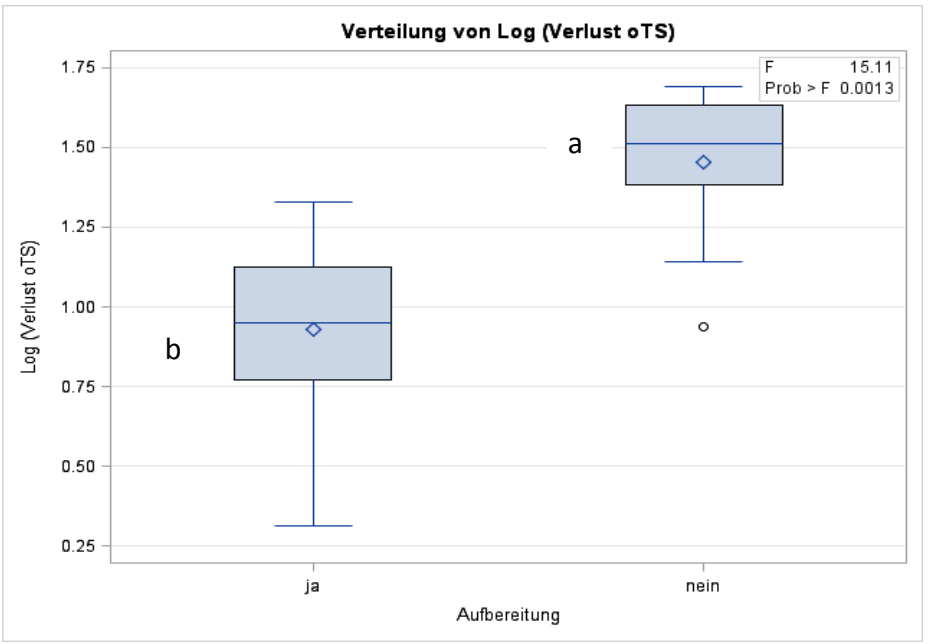


Abb. 29: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Aufbereitung (n=18)

5.5.5 Bodenart (Standort)

Weder bezüglich der FM noch bezüglich der oTS-Verluste konnten Unterschiede zwischen den ungereinigten Rüben von verschiedenen Standorten (mit unterschiedlichen Bodenarten) nachgewiesen werden.

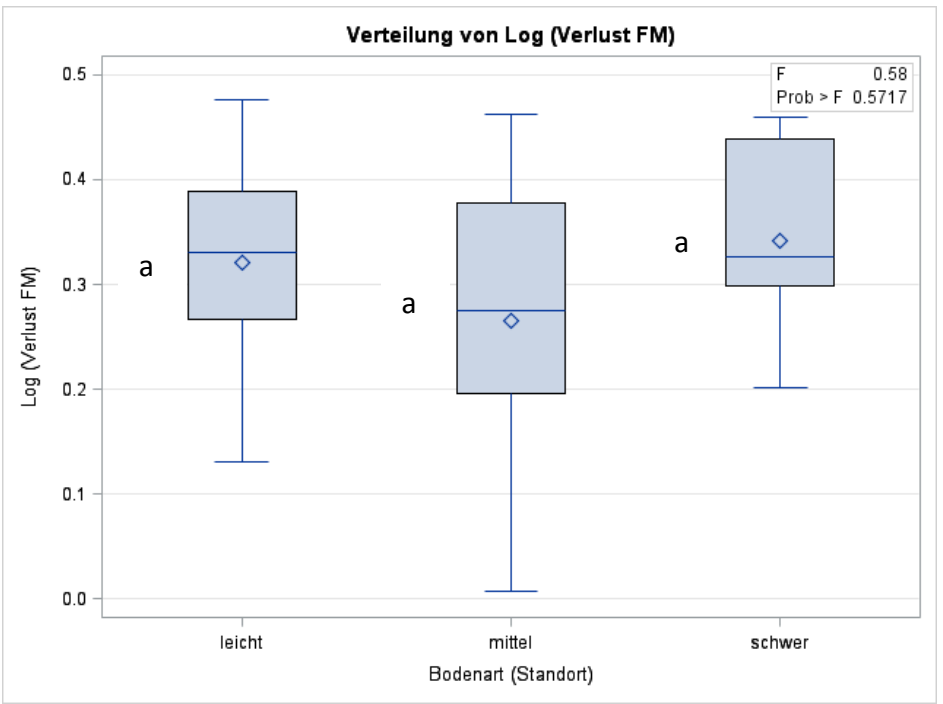


Abb. 30: Boxplot Diagramm der Logarithmen des FM-Verlusts für den Faktor Bodenart (Standort; n=18)

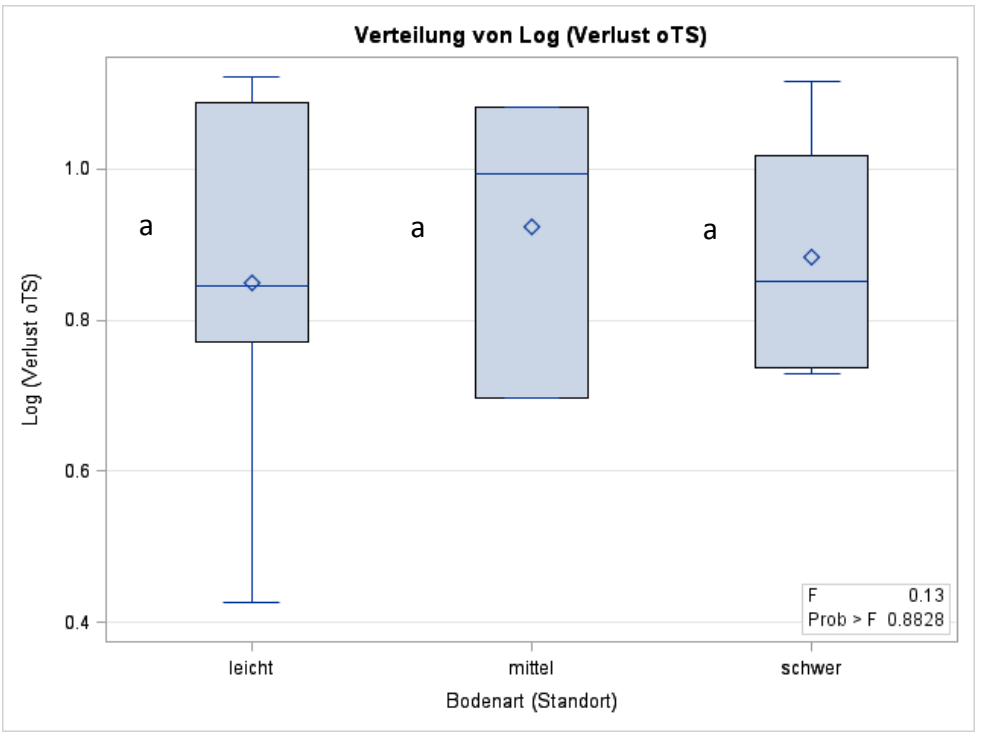


Abb. 31: Boxplot Diagramm der Logarithmen des oTS-Verlusts für den Faktor Bodenart (Standort; n=15)

5.6 Massenverlust (FM und oTS) – mehrfaktorielle Varianzalalyse

Um auch die Interaktionseffekte der Faktoren auf den Massenverlust zu untersuchen, wird eine mehrfaktorielle ANOVA eingesetzt. Folglich kann nicht nur der Haupteffekt der Faktoren, sondern auch der kombinierte Einfluss (Interaktionseffekt) zwischen den Faktoren untersucht werden. Für diese statistische Auswertung wurde ein Datensatz mit 36 Beobachtungen analysiert. Die Haupteffekte der Faktoren „Abdeckung“, „Aufbereitung“ und „Lagerdauer“ wurden untersucht. Darüber hinaus wurden die Interaktionseffekte zwischen den Faktoren „Abdeckung x Aufbereitung“, „Abdeckung x Lagerdauer“ und Aufbereitung x Lagerdauer“ überprüft. Tab. 12 stellt die Ergebnisse der mehrfaktoriellen ANOVA dar.

Tab. 12: Signifikanztest der Haupt- und Interaktionseffekte

Faktor	F-Wert	p-Wert
Abdeckung	40.91	<.0001
Aufbereitung	13.13	0.0015
Lagerdauer	29.13	<.0001
Abdeckung x Aufbereitung	9.9	0.0009
Abdeckung x Lagerdauer	1.2	0.3404
Aufbereitung x Lagerdauer	1.28	0.2977

Der Haupteffekt aller drei Faktoren (Abdeckung, Aufbereitung und Lagerdauer) auf den Massenverlust ist hoch signifikant. Der Interaktionseffekt von Abdeckung und Aufbereitung auf den Massenverlust ist auch signifikant. Das bedeutet, dass der Effekt der Abdeckung zu einem gewissen Teil von der Aufbereitung abhängt. Der Interaktionseffekt von Abdeckung x Lagerdauer und Aufbereitung x Lagerdauer auf den Massenverlust ist für beide Faktoren nicht signifikant. Das bedeutet, dass der Effekt der Lagerdauer nicht von der Abdeckung und Aufbereitung abhängt.

5.7 Sickerwasser

Das Sickersaftaufkommen wurde nur für Varianten bestimmt, die in der Praxis in einem Fahrsilo untergebracht werden können. Dies betrifft ganze Rüben, Rübenblätter und Rübenbrei, der mit Stroh vermischt eigelagert wurde. Bei reinem Rübenbrei oder –Schnitzeln fällt in der Praxis kein Sickerwasser an, da diese in Lagunen oder Gruben eingelagert werden.

Zur Bestimmung wurden die entsprechenden Varianten über den gesamten Versuchszeitraum des zweiten Versuchsjahrs mit Gewichten beschwert und in regelmäßigen Abständen Sickerwasser abgelassen und verwogen. Die Breivarianten denen Stroh beigemischt wurde wiesen die niedrigsten Sickerwassermengen auf. Offensichtlich konnte ein Teil der austretenden Flüssigkeit durch das Stroh aufgenommen werden. Durchschnittlich betrug der Sickerwasseranfall für die Brei-Strohmischungen nach 10 Monaten Einlagerungszeit rund 10 % der eingewogenen Frischmasse. Das meiste Wasser der ZR-Strohvarianten verlor die Variante mit 10 % Strohanteil (13 %).

Möglicherweise aufgrund guter Bedingungen zur Konservierung trat bei den ganzen Rüben nach vier Monaten Einlagerungszeit kein Sickerwasser aus. Das änderte sich mit Beginn des Frühjahrs. Nach sieben Monaten betrug das Sickerwasseraufkommen durchschnittlich knapp 9 % und nach zehn Monaten rund 17 %, wobei die luftdicht abgedeckte Variante, wahrscheinlich aufgrund der niedrigeren Verdunstungsrate, einen leicht höheren Sickerwasseranfall aufwies als die beiden anderen. Ohne Stroh eingelagerte Rübenblätter verloren mit gut 42 % der Einwaage das meiste Wasser und als einzige Variante die größte Menge gleich innerhalb der ersten vier Monate. Wurde den Blättern 4 % Stroh beigemischt, reduzierte sich der Sickerwasseranfall deutlich auf 29 % der eingewogenen Frischmasse.

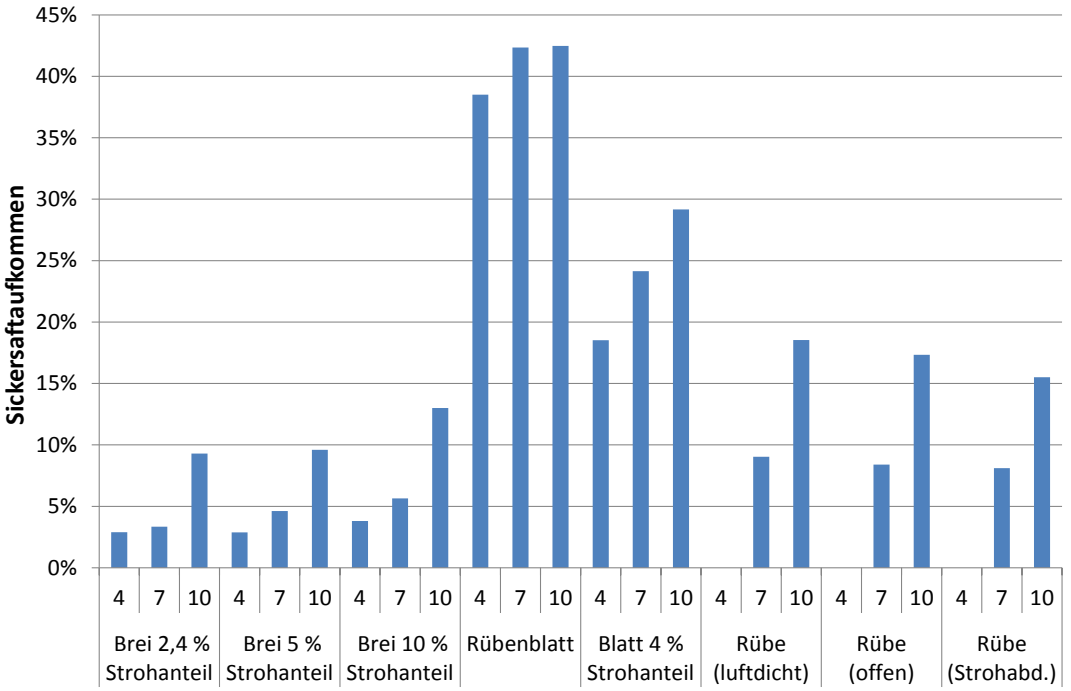


Abb. 32: Sickerwasseraufkommen bei unterschiedlich eingelagerten Rüben und Rübenblättern nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit

Bezüglich der Frischmasseverluste hat die Nutzung des aufkommenden Sickerwassers einen entscheidenden Einfluss. In Abb. 33 sind die unterschiedlichen Frischmasseverluste mit und ohne Berücksichtigung des anfallenden Sickersaftes dargestellt. Mit Ausnahme der Rübenblätter verloren die betrachteten Varianten auch nach 10 Monaten Einlagerungszeit z. T. deutlich unter 10 % des eingelagerten Frischmassegewichts. Für den Fall dass der Sickersaft nicht genutzt würde, stiege dieser für die Breivarianten mit Stroh auf mehr als durchschnittlich 17 % und im Fall der ganzen Rüben auf durchschnittlich 23 % an. Mit 36 % (Blatt mit 4 % Stroh) bzw. mehr als 53 % (Blatt) lägen die Frischmasseverluste bei Nichtnutzung des Sickerwassers aus Rübenblättern deutlich höher.

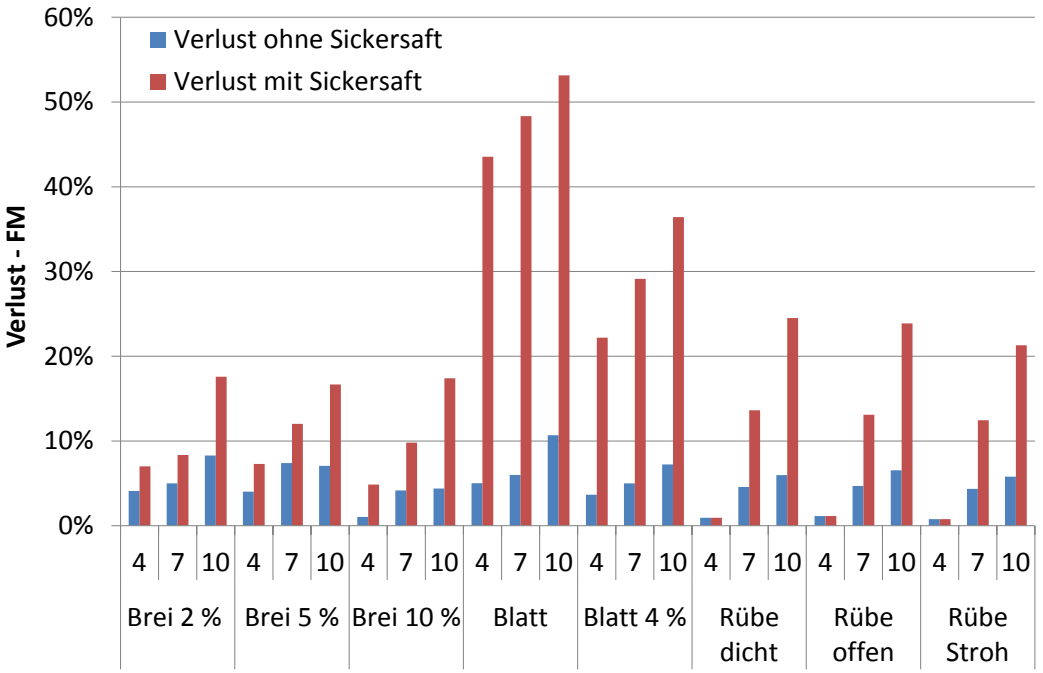


Abb. 33: Frischmasseverluste mit und ohne Berücksichtigung des Sickerwasseraufkommens (%-Angaben bei Varianten geben den Strohanteil an)

Dass die Nutzung des austretenden Saftes aus energetischer Sicht sinnvoll ist, zeigen die genormten Methanpotentiale der Sickersäfte, die in Batch-Versuchen an den Versuchsanlagen des ILT überprüft wurden. Diese betrugen bei den Rübensäften durchschnittlich 53 L_N $CH_4 \cdot kg^{-1}$ und bei den Brei-Strohvarianten durchschnittlich 73 L_N $CH_4 \cdot kg^{-1}$. Mit nur 18 L_N $CH_4 \cdot kg^{-1}$ wiesen die Sickersäfte der Rübenblätter die geringsten Energiepotentiale auf.

Am Gesamtmethanertrag der einzelnen Varianten (Ertrag: Sickerwassers + Festmaterial) nehmen die Sickersäfte die in Tab. 13 dargestellten Anteile ein.

Tab. 13: Methanpotential der Sickersäfte anteilig an den Gesamtmethanpotentialen der verschieden Zuckerrübensilagen nach 10 Monaten Einlagerungszeit

Variante	Brei 2 %	Brei 5 %	Brei 10 %	Blatt	Blatt 4 %	Rübe dicht	Rübe offen	Rübe Strohdecke
Methananteil	8 %	8 %	12%	29 %	13 %	14 %	18 %	11 %

5.8 Biogaspotential

Das Biogaspotential der unterschiedlichen Varianten wurde mehrfach untersucht. Aufgrund von nicht ausreichender Kapazitäten konnte im ersten Versuchsjahr nur eine Auswahl der Varianten und diese nur nach 4 bzw. 7 Monaten Einlagerungszeit durchgeführt werden. Die in Abb. 34 dargestellten Ergebnisse geben an, wie sich das Energiepotential des gesamten Inhalts eines Lagerbehälters über die Einlagerungszeit verändert hat. In dieser Darstellung sind also auch die Frisch- und Trockenmasseverluste mit berücksichtigt. Verglichen wurden die Ergebnisse der eingelagerten Varianten mit den Resultaten der ebenfalls in Batch Versuchen getesteten Ausgangsmaterialien.

Bei den luftdicht verschlossenen Brei- und Schnitzelvarianten traten praktisch keine bzw. nur geringe Verluste auf. Nach sieben Monaten lagen die Verluste des offen gelagerten Breis bei rund 13 % und damit etwa doppelt so hoch wie die der strohbedeckten Breivariante. Die höchsten Verluste wurden bei sieben Monate eingelagerten Rübenblättern festgestellt (29 %), was auf Fehlgärungen zurückzuführen sein dürfte (vgl. pH-Wert Tab. 6). Überraschend ist das positive Ergebnis des Rübenbreis, dem 5 % Stroh beigemischt wurden. Hier konnte der Siliervorgang offenbar Energiepotentiale aus den lignocellulosen Komplexen mobilisieren, die im Stroh enthalten sind. Die in den Komplexen enthaltenen Bestandteile Cellulose und Hemicellulose sind für anaerobe Bakterien schwer umsetzbar und könnten durch das saure Milieu in der Silage einen Aufschluss erfahren haben.

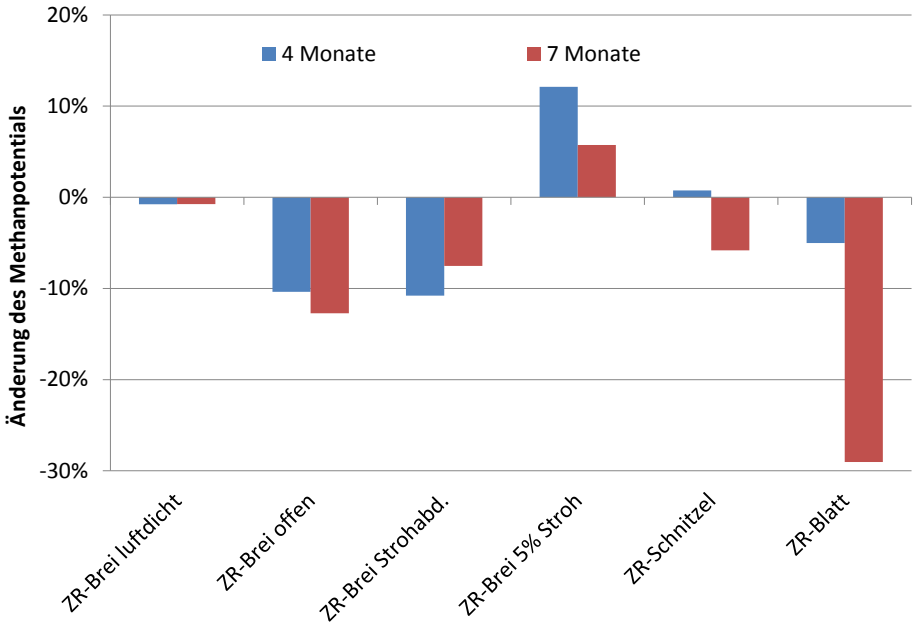


Abb. 34: Methanverluste nach 4 und 7 Monaten Einlagerungszeit im Vergleich zum Potential des Ausgangsmaterials

Im zweiten Versuchsjahr konnten keine repräsentativen Ergebnisse zu den Energiepotentialen der Varianten ermittelt werden, da in diesem Jahr der Lagerungsdruck einer Praxismiete simuliert und der Anfall von Sickerwasser überprüft wurde. Aus diesem Grund mussten die festen und die flüssige Bestandteile getrennt überprüft werden. Zudem wurden die Ergebnisse in zwei aufeinanderfolgenden Versuchsansätzen getrennt ermittelt. Dadurch war die Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet.
Im dritten Versuchsjahr konnten acht Varianten innerhalb eines Batchansatzes geprüft werden. Um die Ergebnisse so wenig wie möglich zu verfälschen wurden bei der Probenahme den Varianten, bei denen Sickersaft anfiel (z. B. ganze Rüben) dieser den festen Bestanteilen in entsprechender Menge wieder zugemischt. In Abb. 35 sind die Biogaspotentiale der Ausgangsmaterialien und der verschiedenen Varianten in Abhängigkeit der Lagerdauer sowie deren Methangehalte dargestellt. Erkennbar ist ein leichter Anstieg des frischmassebezogenen Biogasertrags in der ersten Phase der Lagerung von Rübenbrei. Wurde länger als sieben Monate eingelagert sank der Ertrag ab. Bei ganz eingelagerten Rüben beginnt der Biogasertrag bereits nach vier Monaten zu sinken. Dabei ist die Abnahme des Ertrags stärker ausgeprägt als bei den Breivarianten. Anders verhält sich der

Methangehalt des produzierten Gases der einzelnen Rübensilagen. Mit Ausnahme der nicht luftdicht abgedeckten Rübenbrei-Varianten nimmt dieser im Laufe der Einlagerung in allen Fällen zu. Die Zunahme ist besonders bei den ganzen Rüben und bei der Breivariante mit 2,5 % Strohanteil ausgeprägt.

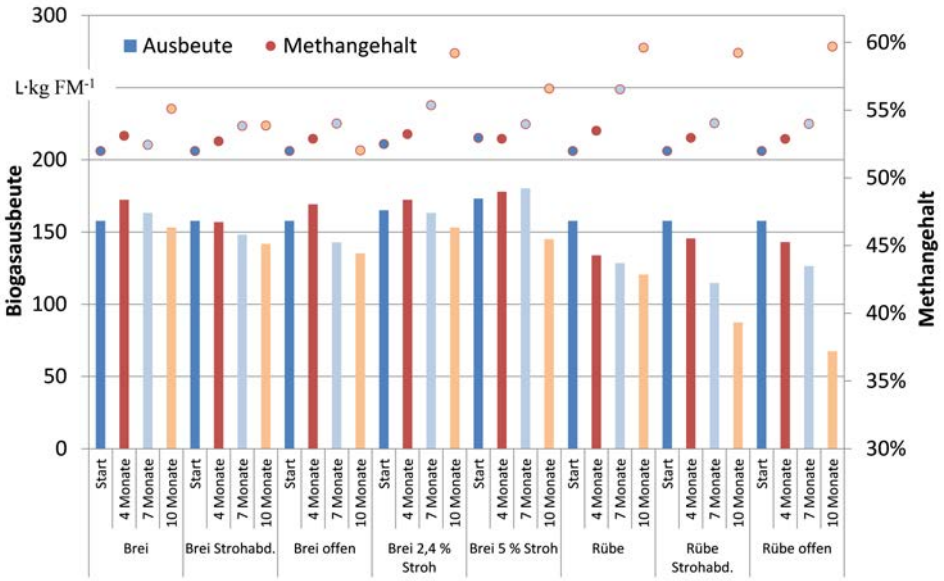


Abb. 35: Biogaspotentiale und Methangehalte der Ausgangsmaterialen und der Varianten nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit

Die mit zunehmender Einlagerungszeit ansteigenden Methangehalte wirken sich jedoch nur unwesentlich auf die Energiepotentiale der Varianten aus. Werden die Biogas- den Methanausbeuten gegenübergestellt so ergibt sich im Wesentlichen das gleiche Bild.

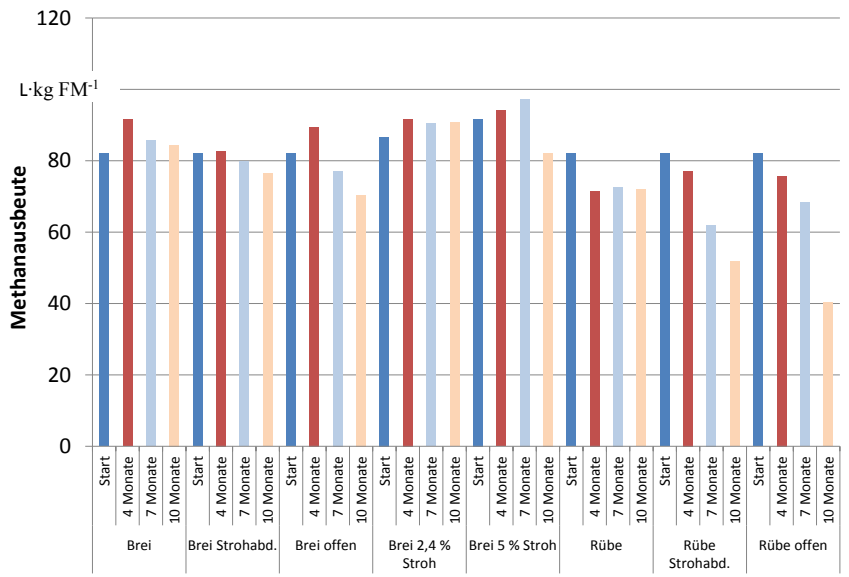


Abb. 36: Methanausbeuten Ausgangsmaterialen und der Varianten nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit

Wie in Abb. 34 geben auch die in Abb. 37 dargestellten Ergebnisse an, wie sich das Energiepotential des gesamten Inhalts eines Lagerbehälters über die Einlagerungszeit verändert hat. Dafür wurden die Ergebnisse mit den Potentialen der Behälter zum Zeitpunkt des Versuchsbeginns verglichen. Die für einzelne Varianten bereits 2016 gemachten Beobachtungen hinsichtlich der Energieverluste konnten zwei Jahre später bestätigt werden.
Mit Ausnahme des Ergebnisses von zehn Monate gelagertem Rübenbrei mit 5 % Strohanteil korrelieren die Ergebnisse des Methanverlusts insgesamt recht gut mit denen des Massenverlusts (vgl. 5.4). Die geringsten Energieverluste wurden beim luftdicht abgedeckten Rübenbrei festgestellt. Bei der Variante ohne Strohbeimischung traten auch nach zehn Monaten Einlagerungszeit praktisch keine Verluste auf. Wurde Stroh zu einem Anteil von 2,4 % zugegeben sank das Methanpotential nach zehn Monaten um gut 2 %, bei 5 % Strohzugabe um 15 %. Bei mit Folie abgedeckten ganzen Rüben zeigte der Luftabschluss zwar nach vier Monaten keine positiven Effekte, wurde aber über einen längeren Zeitraum eingelagert, nahmen die Energieverluste nur noch geringfügig zu. Das dürfte auf die zwischen den Rüben eingelagerte Luft zurückzuführen sein, die einen aeroben Abbau bewirkt, bis sie verbraucht ist. Bei einer Abdeckung mit Stroh wurden bei den ganzen Rüben rund doppelt so hohe Energieverluste ermittelt als bei Rübenbrei. Dies trifft auf alle Einlagerungszeiträume zu. Die höchsten Methanverluste wurden bei der offenen Lagerung von ganzen Rüben ermittelt. Nach 10 Monaten betrugen sie rund 66 % und lagen damit rund doppelt so hoch wie beim offen gelagerten Rübenbrei. Dass die Einlagerung von Rübenbrei günstiger ist als die von ganzen Rüben wird auch dadurch deutlich, dass die offen gelagerte Breivariante deutlich geringere Energieverluste aufwies, als die mit Stroh abgedeckten ganzen Rüben. Offenbar wird bei Rübenbrei der Lufteintrag und damit der aerobe Abbau, durch die nach kurzer Einlagerung entstehende Deckschicht auf der Oberfläche reduziert.
Bei der luftdicht abgedeckten Breivariante wurden nach der Einlagerung höhere Energiepotentiale ermittelt als beim Ausgangsmaterial. Dies könnte daran liegen, dass durch die Silierung günstigere Bedingungen für den anaeroben Abbau hervorgerufen wurden. Bei den Varianten mit Strohbeimischung dagegen wurden, wie bereits 2016 beobachtet, offenbar Energiepotentiale aus den lignocellulosen Komplexen, die im Stroh enthalten sind mobilisiert, wodurch mehr Biogas produziert werden konnte als aus dem Ausgangsmaterial.
In Abb. 37 ist deutlich sichtbar, dass die Biogasverluste höher liegen als die Methanverluste. Offensichtlich ist das bereits während des aeroben Abbaus bei der Lagerung entwichene CO_2 für eine spätere Methanisierung im Biogasprozess nicht mehr enthalten. Dadurch steigt der Methan- und damit der Energiegehalt des Gases, welches im Batch Versuch erzeugt wird.

Ein statistischer Nachweis der Messergebnisse zum Energieverlust war aufgrund der geringen Datenmenge nicht möglich.

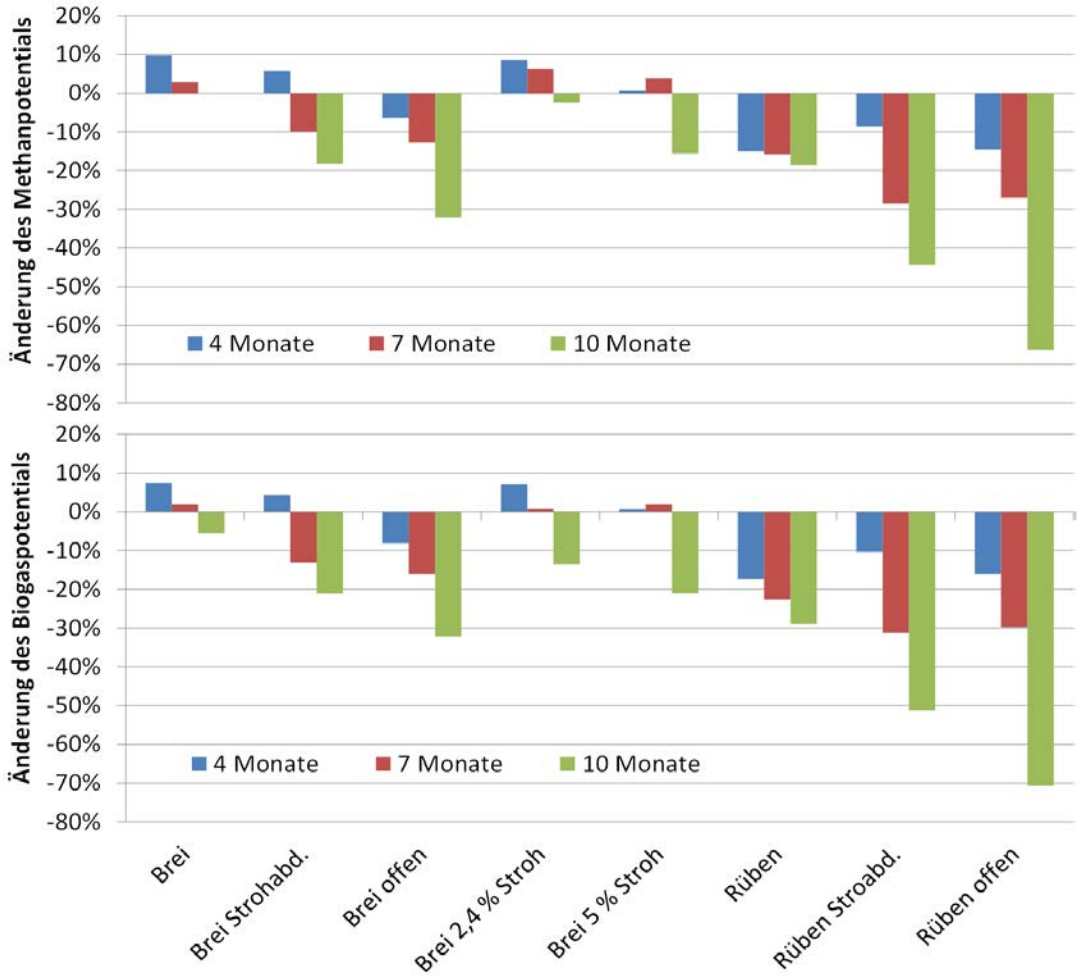


Abb. 37: Biogaspotentiale nach 4, 7 und 10 Monaten Einlagerungszeit im Vergleich mit den Ausbeuten der Ausgangsmaterialien

6 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass die ganzjährige Lagerung solcher Silagen mit relativ geringen Verlusten durchgeführt werden kann, wenn die richtige Methode angewandt wird. Aus Sicht der Energieverluste ist die Einlagerung von Rübenbrei der von ganzen Rüben vorzuziehen. Werden ganze Rüben gelagert, so können die über einen Lagerzeitraum von zehn Monaten hervorgerufenen Energieverluste halbiert werden, wenn die Rübenmiete luftdicht verschlossen wird. Beim Rübenbrei ist die positive Wirkung einer luftdichten Abdeckung noch deutlicher ausgeprägt, insbesondere in den ersten sieben Lagermonaten. Eine Strohabdeckung bringt zwar gegenüber der offenen Lagerung Vorteile, diese sind jedoch deutlich schwächer ausgeprägt und nicht statistisch nachweisbar. Eine Brei-Strohmischung mit einem Strohanteil von maximal 5 % hat in den ersten 7 Monaten gegenüber der direkt eingelagerten Variante keine Nachteile. Der frischmassebezogene Methanertrag von Rübenblättern betrug unter 60 % des mittleren Ertrags aus Rüben. Zudem fielen bei den Blättern hohe Sickerwassermengen an (> 40 % der Einwaage), die rund 20 % der Gesamtenergie enthielten. Eine Bergung des Blattmaterials zur energetischen Nutzung ist deshalb im Vorfeld genau zu prüfen. Da die austretenden Sickerwässer von Brei-Strohmischungen bzw. ganzen Rüben Energieanteile von 8 % bzw. 12 % enthielten sollte darauf geachtet werden, dass diese ebenfalls einer energetischen Nutzung zugeführt werden.

7 Literaturverzeichnis

[1] **Aschmann, V., et al. 2013.** Einsatz von Biogas zum Ersatz von Gaskraftwerken. *Bayernplan.* Freising, Deutschland/Bayern : Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft; Schriftenreihe 7/2013, 2013.

[2] **Bachmeier, H., et al. 2011.** Wissenschaftliche Begleitung der Pilotbetriebe zur Biogasproduktion in Bayern. Freising, Deutschland/Bayern : Bayerische Landesanstelt für Landwirtschaft, 2011.

[3] **Friedrich. 2013.** Wie viel geht verloren. *Bauernzeitung.* 7 2013, S. 30-31.

[4] **Gröblinghoff, Norbert. 2010.** Erfahrungen mit Rübenbrei als Biogassubstrat. [Online] 19. 11 2010. [Zitat vom: 25. 6 2016.] www.proagri.de/app/download/5780440805/Rübenbrei+als+Biogassubstrat.pdf.

[5] **Gromke, D., et al. 2014.** *Stromerzeugung aus Biomasse.* Leipzig : Deutsches Biomasse Forschungszentrum, 2014.

[6] **Lichti, Fabian., et al. 2016.** *Weiterentwicklung der Methode für Batchversuche zur Gasertragsbestimmung im Technikumsmaßstab.* Freising : Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2016.

[7] **Pelka, N., Buchholz, M. und Mußhoff, O. 2015.** *Die gesamtbetriebliche Bewertung von Zuckerrüben mit Dem Produktionsziel Biogas unter Berücksichtigung von Risiko.* ISSN: 2196-5099 : Bundesministerium vür Ernährung und Landwirtschaft, 2015.

[8] **Schaerff, A. und Brückner, C. 2015.** Rüben ans Netz. [Online] 2015. [Zitat vom: 6. 5 2015.] http://www.landwirtschaft.sachsen.de/landwirtschaft/download/Fachbeitrag_Biogasruebe_030512.pdf.

[9] **Schaffner, S., Wolf, G. und Kawasch, M. 2013.** Rüben als Biogassubstrat. s.l., Deutschland/Bayern : Biogas Forum Bayern II, 2013.

[10] **StMELF. 2014.** Bayerischer Agrarbericht 2014 - Zuckerrüben. [Online] 2014. [Zitat vom: 25. 06 2016.] http://www.agrarbericht-2014.bayern.de/landwirtschaft-laendliche-entwicklung/pdf/zuckerrueben.pdf.

[11] **Thaysen, J. und OHL, S. 2012.** Lagunenlagerung von Rüben im IBC. [Online] 2012. http://www.lksh.de/landwirtschaft/pflanze/.

[12] **Weißbach, F. 2009.** Das Gasbildungspotential von frischen und silierten Zuckerrübenbei der Biogasgewinnung. *Landtechnik 64.* 2009, S. 394 - 397.

[13] *Zuckerrüben als Biogassubstrat.* **Schaffner, S. 2010.** Straubing : C.A.R.M.E.N., 2010. C.A.R.M.E.N. Fachgespräch.

Anhang

Bilddokumentation

Var. 1 - Brei nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var. 2 -Brei mit 2,4 % Strohbeimischung nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var.3 - Brei mit 5 % Strohbeimischung nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var. 4 - Brei mit 10 % Strohbeimischung nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var. 5 - Blatt mit 10 % Strohbeimischung nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var. 6 - ganze Rüben nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

Var. 7 - abgedeckte Rübenschnitzel nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

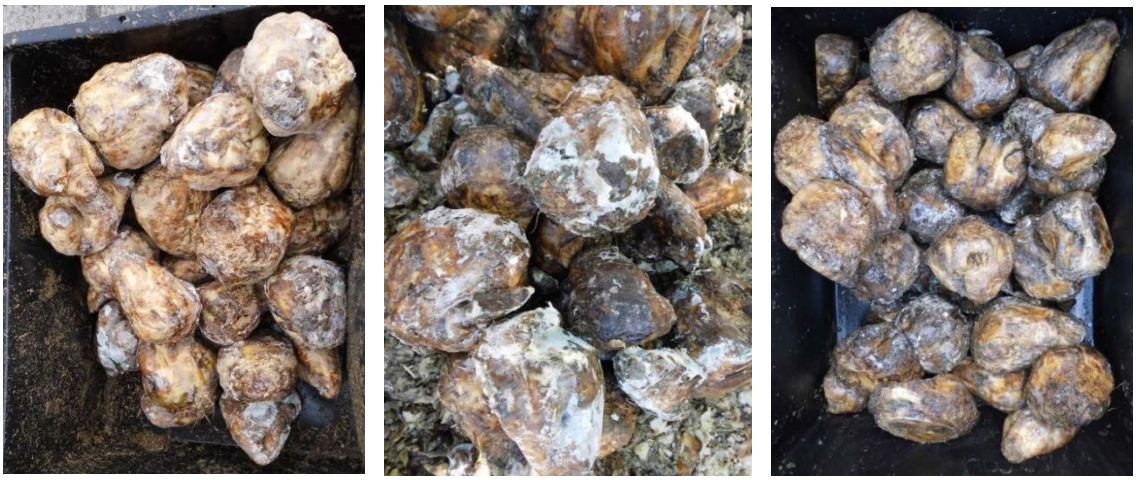
Var. 8 - ungereinigter Brei (mittelschwerer Standort) nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

Var. 9 - ungereinigter Brei (schwerer Standort) nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

Var. 10 - ungereinigter Brei (leichter Standort) nach 4, 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung

Var. 11 Brei nach 4, 7 und 10 Monaten - offen gelagert

Var. 12 - mit Stroh abgedeckter Brei nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerung



Var. 13 - ganze Rüben nach 4, 7 und 10 Monaten offener Lagerung

Var. 14 – mit Stroh abgedeckte ganze Rüben nach 4, 7 und 10 Monaten Lagerung (von links)

Rübenblatt nach 7 und 10 Monaten luftdichter Lagerung (von links)

WiPla - Projekt ID: 5434

Vorträge

Titel	Vortragstyp	Jahr	Referent	Ort	Veranstaltung	Veranstalter	Datum
Energieverluste bei der Einlagerung von Zuckerrüben mit und ohne Beimischung von Getreidestroh	Fachgremium; Wissenstransfer und Beratung	2018	Kissel, R.	Rottersdorf	Zuckerrüben Praxistag	C.A.R.M.E.N.; FVB	15.02.2018
Zusammenfassung laufender Projekte am ILT 2a	Vortrag vor einem Fachgremium	2017	Lichti, F.	München	Jour fix	StMELF	07.12.2017
Verfahrenstechnische Erkenntnisse zum Einsatz von Zuckerrüben für die Biogaserzeugung	Fachsymposium	2017	Kissel, R.	Deggendorf	Landtechnische Jahrestagung 2017	LfL	21.11.2017
Verfahrenstechnische, mikrobiologische und agrarökologische Auswirkungen eines vermehrten Einsatzes von Zuckerrüben in Biogasanlagen	Sonstiger Lehrgang/Seminar	2016	Kissel, R.	München	Jour fixe	StMELF	02.12.2016
Aktuelle Forschungsrojekte im Bereich Biogas	Vortrag vor einem Fachgremium	2016	Lichti, F.	München	Jour fixe Statusseminar 2016	StMELF	02.12.2016
Aktuelle Forschungsrojekte im Bereich Biogas	Vortrag vor einem Fachgremium	2015	Lichti, F.	München	Jour fixe Statusseminar 2015	StMELF	09.12.2015

Veröffentlichungen

Titel	Autor	Publ.typ	erschienen	Abstract	Organ	Journal-Titel
Zuckerrüben für Biogasanlagen mit häufigem Fruchtwechsel anbauen (2018)	Kissel, R. (Co-Autor)	Zeitschriften-beitrag; LfL-Jahresbericht	LfL-Jahresbericht, top agrar, Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Deutschland,	Zusammenfassung einer Veranstaltung für Landwirte, Berater und Industie zum Thema Zuckerrüben	LfL-Jahres-bericht; top agrar online	
Verfahrenstechnische Erkenntnisse zum Einsatz von Zuckerrüben für die Biogaserzeugung (2017)	Kissel, R.	Tagungsband-beitrag - LfL Schriftenreihe	LfL-Schriftenreihe, Ausg.: 6/2017, Ackerbau - technische Lösungen für die Zukunft, S. 37 bis 50, 14 Seiten, Hrsg.: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Freising, Deutschland, ISSN: 1611-4159,	Zuckerrüben als schneller Energielieferant zur flexiblen Gasproduktion in Biogasanlagen für bedarfsgerechte Stromproduktion. Kenntnisse zum Praxiseinsatz anhand von Daten der Versuchsanlage Grub sowie fünf weiterer Pilotanlagen mit Rübeneinsatz. Ergebnisse eines Forschungsprojekts zu Energieverlusten bei der ganzjährigen Einlagerung von Zuckerrüben.	LfL-Schriften-reihe: Ausgabe 6/2017; S.: 37 - 50; ISSN: 1611-4159	Ackerbau - technische Lösungen für die Zukunft