

Institut für Landtechnik

**Kennwerte von Zuckerrüben zur Aufbereitung und
Langzeitlagerung für die Verwendung in Biogasanlagen**

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

der Landwirtschaftlichen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

von

M.Sc. agr. Stefan Dirks

aus

Havixbeck

Bonn 2017

Referent: Prof. Dr.-Ing. Peter Schulze Lammers

Korreferent: Prof. Dr. Ralf Pude

Tag der mündlichen Prüfung: 25.08.2017

Erscheinungsjahr: 2017

Angefertigt mit Genehmigung der Landwirtschaftlichen Fakultät der Universität Bonn

Meinen Eltern

Kurzfassung

Bis zur Novellierung des EEG im Jahr 2014 verzeichnete die Biogasbranche und damit der Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland einen starken Aufschwung. Aufgrund hoher Maisanteile in den Fruchtfolgen und zunehmender öffentlicher sowie politischer Kritik, wurde nach Substratalternativen gesucht, welche in der Lage sind Mais möglichst gleichwertig zu ersetzen. Dabei wurden zunehmend Zuckerrüben als Substrat eingesetzt. Um diese ganzjährig nutzen zu können, ist sowohl eine Aufbereitung als auch eine Konservierung notwendig. Die Aufbereitung umfasst die Reinigung oder Wäsche der Rüben, deren Transport und ihre Zerkleinerung. Bei der Konservierung haben sich verschiedene Verfahren etabliert. Die bei der Silierung auftretenden Verluste sind jedoch nur unzureichend untersucht.

Ziel dieser Arbeit war es, verschiedene Zuckerrübensorten, welche sowohl auf verschiedenen, als auch auf einem gemeinsamen Standort angebaut wurden, hinsichtlich Ihrer Eignung für die Biogasproduktion zu untersuchen. Dazu wurden die bei der Aufbereitung bedeutenden Parameter Erdanhang in der Wurzelrinne, Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen sowie die zur Zerkleinerung aufzuwendende Arbeit im Labormaßstab vergleichend untersucht. Hinsichtlich der Konservierung wurden Silierversuche in geschlossenen Glasbehältern durchgeführt. Ziel war es, den Silierverlauf anhand des pH-Werts zu dokumentieren, die bei der Silierung auftretenden Verluste zu quantifizieren und einen möglichen Einfluss von Sorte und Zuckergehalt festzustellen.

Bezüglich des Erdanhangs wurde festgestellt, dass der Einfluss von Bodenart und Witterung auf die Menge der in der Wurzelrinne anhaftenden Erde den Einfluss des Genotyps deutlich übertrifft. Bei der Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen und auch bei der, für die Zerkleinerung aufzuwendenden Arbeit, konnten zwar signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen festgestellt werden, jedoch konnte auch hier ein starker Einfluss des Standorts nachgewiesen werden.

Bei der Silierung konnte bei allen Varianten eine annähernd parallele Entwicklung des pH-Werts festgestellt werden. Zwar traten signifikante Unterschiede auf, jedoch waren alle pH-Werte ausreichend gering um eine sichere Konservierung zu gewährleisten. Die Verluste an Methanbildungspotenzial bei der Auslagerung schwankten zwischen ca. 10 % und 20 %. Hier konnte vor allem die alkoholische Gärung als Verlustursache identifiziert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Silierung unterschiedlicher Zuckerrübensorten schnell und sicher gelingt, wobei eine intensive alkoholische Gärung zu hohen Verlusten, sowohl an Trockensubstanz als auch an Methanbildungspotenzial, führt.

Abstract

Until the amendment of the EEG in 2014, the number of biogas plants and thereby the cultivation of renewable raw materials in Germany increased. Due to a high amount of maize in crop rotation and increasing public as well as political criticism, the goal was to find an alternative substrate which is equivalent to maize. Therefore sugar beets were increasingly used as substrate in biogas plants. In order to be able to use sugar beet all year round, both, preparation and preservation are necessary. The preparation includes the cleaning or washing of the beets, the transport and the crushing. For preservation, various methods have been established. However, the losses occurring during the ensiling are only insufficiently studied.

The aim of this work was to investigate different sugar beet varieties with regard to their suitability for biogas production. The varieties have been cultivated at different locations in 2013 and 2014 and on one location in 2015. For this purpose, the parameters soil tare in root grooves, susceptibility to mechanical damage as well as energy input for crushing the beets have been investigated in the laboratory. These three parameters are important for preparation. With regard to the preservation, silage experiments were carried out in closed glass containers. The goal was to document the ensiling process using the pH-value, to quantify the losses occurring during the ensiling and to determine the possible influence of the variety and the sugar content.

Regarding the soil tare it was found, that the influence of soil type and weather on the amount of adhering soil in the root grooves is much bigger than the influence of the genotype. In case of the susceptibility to mechanical damage as well as the energy input for crushing the beets, significant differences between the genotypes have been determined. But also a strong influence of the location has been detected.

At the ensiling of the beets, the pH-value developed almost parallel in all variants. Although there were significant differences between the pH-values of the different variants all pH-values were sufficiently low to ensure safe conservation. Losses of methane forming potential after 90 days of storage fluctuated between approximately 10 % and 20 %. Alcoholic fermentation was identified as the reason for these losses. The results show that ensiling of different sugar beet varieties can be achieved quickly and safely, whereby an intensive alcoholic fermentation leads to high losses, both of dry matter and methane forming potential.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1. Einleitung und Zielsetzung	18
2. Stand des Wissens	21
2.1 Zuckerrüben als Biogassubstrat.....	21
2.2 Botanik der Zuckerrübe.....	24
2.3 Anbau für die Biogasproduktion	25
2.3.1 Sortenwahl.....	25
2.3.2 Anbau.....	26
2.3.3 Düngung und Pflanzenschutz	27
2.3.4 Ernte.....	28
2.4 Reinigung und Entsteinung.....	29
2.5 Zerkleinerung.....	30
2.6 Lagerungsvarianten	31
2.6.1 Ganze Rüben im Flachsilo.....	31
2.6.2 Mus im Erdbecken.....	32
2.6.3 Mus im geschlossenen Hochsilo.....	32
2.7 Grundlagen der Aufbereitung.....	33
2.7.1 Energieaufwand zur Zerkleinerung	34
2.7.2 Erdanhang und seine Bedeutung.....	38
2.7.3 Abschlussgewebe der Zuckerrübe und seine Funktion	39
2.7.4 Rheologie des Abschlussgewebes	41
2.8 Silierung von Zuckerrüben	43
2.8.1 Grundlagen der Silierung	43
2.8.2 Verlustursachen.....	45

3.	Material und Methoden	47
3.1	Kennwerte bei der Aufbereitung von Zuckerrüben	47
3.1.1	Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen	48
3.1.2	Erdanhang in der Wurzelrinne	51
3.1.3	Energieaufwand zur Zerkleinerung	53
3.2	Fermentationseigenschaften.....	56
3.2.1	Aufbereitung der Zuckerrüben für die Silierung.....	56
3.2.2	Versuche zur Silierung unter anaeroben Bedingungen.....	56
3.2.3	Messung des pH-Werts	57
3.3	Bestimmung von Lagerungsverlusten.....	58
3.3.1	Korrektur des Trockensubstanzgehalts in Zuckerrübensilagen.....	60
3.3.2	Bestimmung des Methanbildungspotenzials	60
4.	Ergebnisse	62
4.1	Basisdaten der eingesetzten Zuckerrübensorten in den Jahren 2013 bis 2015	62
4.2	Kennwerte der Aufbereitung	64
4.2.1	Anfälligkeit des Abschlussgewebes gegenüber mechanischen Beschädigungen.....	64
4.2.2	Erdanhang in der Wurzelrinne	69
4.2.3	Energieaufwand zur Zerkleinerung	77
4.3	Fermentationseigenschaften.....	84
4.3.1	Verlauf der Silierung	84
4.3.2	Gärprodukte	88
4.3.3	Bestimmung von Verlusten.....	93
5.	Diskussion	102
5.1	Kennwerte bei der Aufbereitung von Zuckerrüben	102
5.1.1	Das Abschlussgewebe	102
5.1.2	Die Wurzelrinne als Quelle von Erdanhang	104
5.1.3	Zerkleinerung von Zuckerrüben	106

5.2	Silierung unter anaeroben Bedingungen	109
5.2.1	Beurteilung des Silierverlaufs.....	109
5.2.2	Verluste und Ursachen	111
6.	Zusammenfassung	113
7.	Ausblick	115
8.	Literaturverzeichnis.....	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Abbaugeschwindigkeiten von Stoffgruppen im Fermenter (nach EDER & SCHULZ, 2006)	22
Abbildung 2: Entwicklung der durchschnittlichen Zuckerrübenenerträge (FM) in den Regionen Jülich und Euskirchen von 1999 bis 2015 (nach LIZ, 2016).....	23
Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Zuckergehalt von Zucker- und Futterrüben (nach MÄRLÄNDER, 2010).....	26
Abbildung 4: Aufeinanderfolgende Schritte im Schnittprozess (nach PERSSON, 1987).....	35
Abbildung 5: Kraft-Deformationskurven (n=3) bei einer Zerkleinerung von Kartoffeln mit relativer Skala (JAHR et al., 2012).....	36
Abbildung 6: Kramer Scherzelle	37
Abbildung 7: Abschlussgewebe der Wurzel (Querschnittsbild) am Beispiel der Sumpfdotterblume (<i>Caltha palustris</i>), 1: Rhizodermis, 2: Exodermis, 3: Rindenparenchym (nach THROM, 2007)	39
Abbildung 8: Schema des kambialen sekundären Dickenwachstums der Wurzel. Links: Beginnendes sekundäres Dickenwachstum durch Kambiumbildung. Rechts: Absprengung des äußeren Gewebes (Rhizodermis, Exodermis und Rindenparenchym) (nach LIEBEREI & REISDORFF, 2012)	40
Abbildung 9: Typische Kraft-Deformations-Kurve von Kartoffeln (nach NÉMETH, 2003), P_W =Wendepunkt, D_W =Deformation bis zum Wendepunkt	42
Abbildung 10: Typischer Verlauf der Kraft-Weg-Kurve zur Erfassung der maximalen Kraft (F_{max}). 49	
Abbildung 11: Anordnung von Zuckerrübe und Stempel zur Überprüfung der Festigkeit des Abschlussgewebes	50
Abbildung 12: Rübenwaschanlage nach IIRB-Standard.....	51
Abbildung 13: In der Wurzelrinne nach der Wäsche anhaftende Erde (links) und manuelle Separation der Erde mittels Schlitz-Schraubendreher (rechts).....	52
Abbildung 14: Kramer Scherzelle in offener Form mit eingelegter Probe (links) und in geschlossener Form (rechts).....	53
Abbildung 15: Die im Versuch verwendeten Messer mit Keilwinkeln von 15°, 20° und 30° (von links nach rechts) (CLEVER, 2015).....	55

Abbildung 16: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt, aus vier Wiederholungen auf der Einzelrübe am Beispiel der Sorte K 1 im Jahr 2013.....	64
Abbildung 17: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2013).....	65
Abbildung 18: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2014).....	66
Abbildung 19: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt, über eine Lagerungszeit von acht Wochen (im Jahr 2014). (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$, n.s.=nicht signifikant).....	67
Abbildung 20: Durchschnittliche maximale Kraft die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2015). Anbau aller Sorten an einem Standort. (Tukey-HSD mit $p < 0,05$).....	68
Abbildung 21: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) in der Wurzelrinne je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2013), differenziert nach Standorten.....	70
Abbildung 22: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2014), differenziert nach Standorten.....	71
Abbildung 23: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2015), von einem Standort.....	73
Abbildung 24: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe in den Jahren 2013, 2014 und 2015.....	74
Abbildung 25: Durchschnittlicher Erdanhang je Kilogramm frischer Zuckerrübe vor der Wäsche in den drei Versuchsjahren auf TM-Basis (n=25).....	75
Abbildung 26: Relativer Erdanhang in der Wurzelrinne vom Gesamterdanhang (auf Basis TM) in den drei Versuchsjahren.....	76
Abbildung 27: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2013.....	77
Abbildung 28: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2014.....	78
Abbildung 29: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit in den Jahren 2013 und 2014.....	79

Abbildung 30: Entwicklung der für die Zerkleinerung der Zuckerrüben aufzuwendenden Arbeit über einen Lagerungszeitraum von acht Wochen im Jahr 2014, (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$, n.s.=nicht signifikant).....	80
Abbildung 31: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2015 (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$)	82
Abbildung 32: Boxplots der ermittelten Arbeit für die jeweiligen Kombination aus Keilwinkel, Geschwindigkeit und Schnittrichtung (n=15 je Kombination) (CLEVER, 2015).....	83
Abbildung 33: Verlauf des pH-Werts im Rübenmus zwölf verschiedener Zuckerrübensorten von vier Standorten (12 Varianten) im Jahr 2013. Silierung über 90 Tage in geschlossenen Glasgefäßen (n=4)	85
Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Alkoholgehalt und TS-Verlust in zwölf Zuckerrübensilagen im Jahr 2014 (Lagerungsdauer: 90 Tage unter anaeroben Bedingungen)	96
Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Alkoholgehalt und TS-Verlust in zwölf Zuckerrübensilagen im Jahr 2015 (Lagerungsdauer: 90 Tage unter anaeroben Bedingungen)	100
Abbildung 36: Einfluss von Verletzungen der Zuckerrübe auf die Höhe der Zuckerverluste während der Lagerung bei 10°C nach HUIJBREGTS (2008)	103
Abbildung 37: Wirkungsdreieck der Einflussfaktoren auf den Erdanteil nach der Ernte (nach KROMER, 1988)	105
Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Kraft, welche zu einer Beschädigung des Periderms führt und der für die Zerkleinerung notwendigen Arbeit im Jahr 2015.....	107

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Im Rahmen der Vergärung auftretende Mikroorganismen und deren Ansprüche an das Regime (nach STEINHÖFEL, 2008).....	44
Tabelle 2:	Übersicht über Qualitätsminderungen von Silagen (erstellt nach NUSSBAUM, 2011)	45
Tabelle 3:	Kennzeichnung der Sorten, des Standorts und der Erntetermine im Jahr 2014.....	48
Tabelle 4:	Kombinationen zur Untersuchung der Schnittkräfte bei der Zerkleinerung (verändert nach CLEVER, 2015)	55
Tabelle 5:	Kennzeichnung der im Versuch eingesetzten Sorten, des Standorts und des Erntetermins im Jahr 2013	57
Tabelle 6:	Analysierte Parameter in frischem und siliertem Rübenmus (2013-2015).....	59
Tabelle 7:	Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2013 (n=25)	62
Tabelle 8:	Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2014 (n=25)	63
Tabelle 9:	Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2015 (n=25)	63
Tabelle 10:	Signifikante Unterschiede im pH-Wert der Silagen zwölf unterschiedlicher Zuckerrübensorten von vier Standorten im Jahr 2013 nach 90 Tagen, n=4.....	86
Tabelle 11:	Zuckergehalt der frischen Rüben und die während der Silierung entstandenen Gehalte an Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) aus dem Jahr 2013. Silierung in geschlossenen Glasgefäßen über 90 Tage bei 15°C im Klimaschrank.....	87
Tabelle 12:	Übersicht über die Korrelationen zwischen Zuckergehalt in den frischen Rüben und den Gehalten von Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) in der Silage nach 90 Tagen, sowie zwischen dem pH-Wert nach 90 Tagen und den Gehalten von ES und MS im Jahr 2013.....	88
Tabelle 13:	Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr 2013	90
Tabelle 14:	Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr 2014	91

Tabelle 15:	Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr 2015 .92
Tabelle 16:	Trockensubstanzgehalte (TS) in frischen und korrigierte Trockensubstanzgehalte (TS _k) (nach WEIßBACH und STRUBELT, 2008) in silierten Zuckerrüben und daraus resultierende Verluste an Trockensubstanz und Methanbildungspotenzial (MBP) (nach WEIßBACH, 2009) im Jahr 2014. (s=Standardabweichung, n=4)93
Tabelle 17:	Bei der Silierung der zwölf Varianten in Glasgefäßen entstandene Gehalte an Alkohol sowie Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) und daraus resultierende Frischmasse-(FM) und Trockensubstanzverluste (TS) im Jahr 2014. (s=Standardabweichung, n=4)94
Tabelle 18:	Vergleich zwischen Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen und dem während der Silierung aufgetretenen Trockensubstanzverlust im Jahr 201495
Tabelle 19:	Korrelation zwischen Zuckergehalt (Luff-Schoorl) der frischen Rüben und dem Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen im Jahr 2014.....97
Tabelle 20:	Trockensubstanzgehalte (TS) in frischen und korrigierte Trockensubstanzgehalte (TS _k) in silierten Zuckerrüben und daraus resultierende Verluste an Trockensubstanz und Methanbildungspotenzial (MBP) im Jahr 2015, (s=Standardabweichung, n=4) ..98
Tabelle 21:	Korrelation zwischen Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen und dem während der Silierung aufgetretenen Trockensubstanzverlust (TS-Verlust) im Jahr 201599
Tabelle 22:	Korrelation zwischen Zuckergehalt (Luff-Schoorl) der frischen Rüben und dem Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen im Jahr 2015..... 101

Abkürzungsverzeichnis

ADF _{org}	Acid Detergent Fiber organisch
AL	Summe der Gehalte aller Alkohole
BISZ	Beratung und Information für den Süddeutschen Zuckerrübenbau
BS	Buttersäure
CCM	Corn Cob Mix
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ES	Essigsäure
FM	Frischmasse
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
FoTS	fermentierbare organische Trockensubstanz
ha	Hektar
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
l _N	Normliter
MBP	Methanbildungspotenzial
MS	Milchsäure
NfE	N-freie Extraktstoffe
NFS	Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren
n.s.	nicht signifikant
oTM	organische Trockenmasse
PS	Propionsäure
TM	Trockenmasse
TS	Trockensubstanz
TS _k	korrigierte Trockensubstanz
V	Volumen
XA	Rohasche

1. Einleitung und Zielsetzung

Der Bestand an Biogasanlagen nahm mit Einführung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) im Jahr 2000 und den anschließenden Novellierungen des EEG besonders in den letzten 10 Jahren in Deutschland deutlich zu. Diese Entwicklung hatte bis zur Novellierung des EEG im Jahr 2014 Bestand. So stieg die Anzahl der Biogasanlagen von 7553 Stück im Jahr 2012 mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 3.352 MW auf 9004 Anlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 4.166 MW im Jahr 2016 (FACHVERBAND BIOGAS e.V., 2016). Die Versorgung dieser Anlagen erfolgt zu großen Teilen über den Anbau nachwachsender Rohstoffe.

Um den Substratbedarf zu decken, wurden im Jahr 2012 auf ca. 1,16 Mio. ha nachwachsende Rohstoffe für die Produktion von Biogas angebaut (DÖHLER et al., 2013). Dabei bildete Mais mit einer Fläche von 829.000 ha die Pflanze mit der größten Anbaufläche (DEUTSCHES MAISKOMITEE e.V., 2013). Bis zum Jahr 2015 steigerte sich die Anbaufläche nachwachsender Rohstoffe für die Biogasproduktion auf ca. 1,39 Mio. ha. Auch hier stellt der Mais mit einer Fläche von 894.000 ha das Hauptsubstrat der nachwachsenden Rohstoffe für die Biogasproduktion dar (FNR, 2015).

Durch die hohe Dichte an Biogasanlagen und den damit verbundenen Maisanbau, ist dieser zunehmend in die öffentliche Kritik geraten. Die engen Fruchtfolgen mit hohem Maisanteil begünstigen zudem das Auftreten von Problemschädlingen wie Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) und Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera*). Aus diesen Gründen gewinnen alternative Gärsubstrate, die in der Lage sind Mais hinsichtlich des Energieertrags möglichst gleichwertig zu ersetzen, an Bedeutung (AUGUSTIN, 2013).

Bisher spielt die Zuckerrübe (*beta vulgaris ssp. altissima*) dabei nur eine untergeordnete Rolle, obwohl die positiven Gäreigenschaften und die hohen Gaserträge pro Hektar für die Nutzung als Gärsubstrat in einer Biogasanlage sprechen. Ein weiteres Argument für die energetische Nutzung der Rübe ist die Änderung der Zuckermarkordnung und die daraus entstehenden Veränderungen an den Rohstoffmärkten. Für Landwirte in Rübenanbauregionen stellt die energetische Nutzung der Rübe eine interessante Einkommensalternative dar, zumal das nötige Wissen und die geeignete Technik vorhanden sind. Darüber hinaus ist der Anbau von Zuckerrüben in den bereits existierenden Biogasregionen eine wünschenswerte Fruchtfolgeerweiterung. Durch den Wechsel von Halm- und Blattfrüchten einerseits sowie von Winter- und Sommerungen andererseits werden Infektionsketten unterbrochen und Schaderregerpopulationen reduziert. Fruchtfolgen fördern die Ertragsstabilität, wirken Nährstoffverlagerungen entgegen, verhindern Bodenmüdigkeit und erhalten und verbessern die Bodengare (AIGNER, 2006). Ein weiteres gesellschaftspolitisches Ziel ist der Beitrag zur biologischen Vielfalt, wenn verschiedene Kulturarten angebaut werden.

Kulturpflanzen wie beispielsweise Getreide, Zuckerrüben oder Zwischenfrüchte gestalten die Fruchtfolgen in den Einzugsgebieten von Biogasanlagen aus. Die Zuckerrübe bietet auf Grund ihres hohen Ertragspotentials und ihrer guten Gäreigenschaften günstige Voraussetzungen für die energetische Verwertung in der Biogasanlage.

Da für den kontinuierlichen und störungsfreien Betrieb einer Biogasanlage die kontinuierliche Zufuhr einer gleichbleibenden Substratzusammensetzung erwünscht ist (FNR, 2012), wird angestrebt, Substrate ganzjährig und in gleichbleibender Menge und Qualität einzusetzen. Aufgrund des geringen Trockenmassegehalts der Zuckerrüben von ca. 23 % gestaltet sich die konservierende Lagerung über mehrere Monate schwieriger als bei Mais und kann mit hohen Verlusten verbunden sein. Die Zuckerrüben müssen vor der Zugabe in den Fermenter zudem aufbereitet werden. Diese Aufbereitung umfasst je nach Steinbesatz und Grad der Verschmutzung eine Trocken- oder Nassreinigung, Entsteinung und Zerkleinerung der Zuckerrüben, welche für die Einbringung und schnelle Umsetzung des Substrats im Fermenter nötig ist.

Fehlender Bestandteil bisheriger Untersuchungen zur Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben für den Einsatz in Biogasanlagen ist der Einfluss der Zuckerrübensorte, des Zuckergehalts und des Standorts. Aus diesem Grund wurden sowohl physikalische Eigenschaften, welche eine Rolle bei der Aufbereitung der Rüben spielen, als auch der mögliche Einfluss der eingesetzten Sorte und des Standorts auf den Verlauf der Silierung und die dabei auftretenden Verluste untersucht.

Die Reinigung von Zuckerrüben wird hauptsächlich im Trockenreinigungsverfahren mit Reinigungsladern durchgeführt. Dabei kommt es, wie bereits beim Roden, zu mechanischen Beschädigungen an den Zuckerrüben, die eine Eintrittspforte für Mikroorganismen darstellen, welche die Höhe der Zuckerverluste bei anschließender Lagerung negativ beeinflussen. Daher war die Anfälligkeit der untersuchten Zuckerrüben gegenüber mechanischen Beschädigungen ein Schwerpunkt der Untersuchungen. Da die Zuckerrüben für den Einsatz in der Biogasanlage zerkleinert werden müssen und dabei häufig Mengen von mehreren tausend Tonnen umgesetzt werden, wurde ebenfalls untersucht, ob sich Zuckerrübensorten hinsichtlich des Energieaufwands, welcher für ihre Zerkleinerung benötigt wird, unterscheiden. Um den Aufwand für die Reinigung der Zuckerrüben zu reduzieren, ist es langjähriges Ziel der Zuckerrübenzüchtung das Volumen der Wurzelrinne zu reduzieren und damit Erdanhänge zu minimieren. Dieses Ziel gilt sowohl für die Zucker verarbeitende Industrie, als auch für die Biogasproduktion aus Zuckerrüben. Um den Erfolg der Züchtung und den Einfluss der Wurzelrinne auf den Gesamterdanhang zu beurteilen war dieser Parameter ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen.

Bei der für den ganzjährigen Einsatz von Zuckerrüben notwendigen Silierung waren bisher die Verluste in unterschiedlichen Lagerungsvarianten Gegenstand vorheriger Untersuchungen. Die

Frage, ob es dabei auch innerhalb einer Lagerungsvariante zu Schwankungen der Verlusthöhe, möglicherweise beeinflusst durch den Zuckergehalt oder die Sorte kommt, wurde bisher nicht beantwortet. Auch der Verlauf der Silierung ist nicht dokumentiert. Um die bestehenden Defizite im Wissen um die Konservierung der Zuckerrübe auszugleichen, wurden Untersuchungen am Beispiel der Lagerung von Zuckerrübenmus unter anaeroben Bedingungen durchgeführt. Ziel hierbei war die Bewertung der Silage und der bei der Silierung und Lagerung aufgetretenen Verluste durch die qualitative und quantitative Analyse der gebildeten Säuren und Alkohole.

Abschnitte dieser Arbeit wurden im Rahmen eines Abschlussberichts (Schulze Lammers et al, 2017) sowie eines Journalbeitrags (Dirks et al., 2017) bereits im Vorfeld veröffentlicht.

2. Stand des Wissens

In den folgenden Kapiteln werden die grundlegende Eignung der Zuckerrübe für die Biogaserzeugung erläutert und die derzeit eingesetzten Verfahren der Langzeitlagerung vorgestellt. Ebenfalls werden die für die Biogasproduktion bedeutenden Schritte der Aufbereitung, insbesondere der Reinigung und Zerkleinerung dargestellt. Es folgt eine Einführung in Botanik und Anbau der Zuckerrübe in Deutschland. Anschließend wird der Stand des Wissens zu den Parametern: Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen, Energieaufwand zur Zerkleinerung, sowie Erdanhang näher erläutert. Die bei der Silierung unter anaeroben Bedingungen ablaufenden Prozesse werden unter Berücksichtigung der beteiligten Mikroorganismen aufgeführt und mögliche Verlustquellen benannt.

2.1 Zuckerrüben als Biogassubstrat

Die landwirtschaftliche Biogasgewinnung hat in den vergangenen zehn Jahren stark zugenommen. Hintergrund ist die politische Forderung nach der verstärkten Nutzung erneuerbarer Energien zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen (FNR, 2004) und die damit einhergehende Preisstützung von Strom aus Biomasse. Biogas entsteht in einem komplexen, mehrstufigen Prozess, an dem sehr unterschiedliche Gruppen von Mikroorganismen beteiligt sind. Diese stehen teilweise in engen Wechselbeziehungen. Sowohl die Prozessstabilität als auch die Effizienz einer Biogasanlage hängen entscheidend von der Stoffumsatzleistung der Bakterien ab. Bei der Passage durch den Fermenter verstoffwechseln die Mikroorganismen unter Ausschluss von Sauerstoff die komplexe Substrat-Biomasse aus Milchsäure, Eiweiß, Fetten und Kohlenhydraten in vielen Folgereaktionen zu Essigsäure (CH_3COOH) bzw. Kohlendioxid (CO_2) und Wasserstoff (H_2). Aus diesen Mikromolekülen können die „Substratspezialisten“ das Methangas synthetisieren. (EDER & SCHULZ, 2006)

Das Ausgangssubstrat spielt für die Vergärung eine bedeutende Rolle, denn die Art und die Qualität des Substrates beeinflussen Menge und Qualität des Biogases. Die Zuckerrübe wurde als Ausgangssubstrat für Biogasanlagen bisher unterschätzt. Besonders vorteilhaft sind die gärbioologischen Aspekte der Zuckerrübe (Abbildung 1). Die Trockenmasse der Zuckerrüben besteht zu 90 % aus leicht fermentierbaren N-freien Extraktstoffen (NfE), hauptsächlich in Form von Zucker (HOFFMANN, 2010). Zucker ist dabei eine sehr gute und effiziente Speicherform der Energie, die für Mikroorganismen leicht und in kurzer Zeit zu erschließen ist.

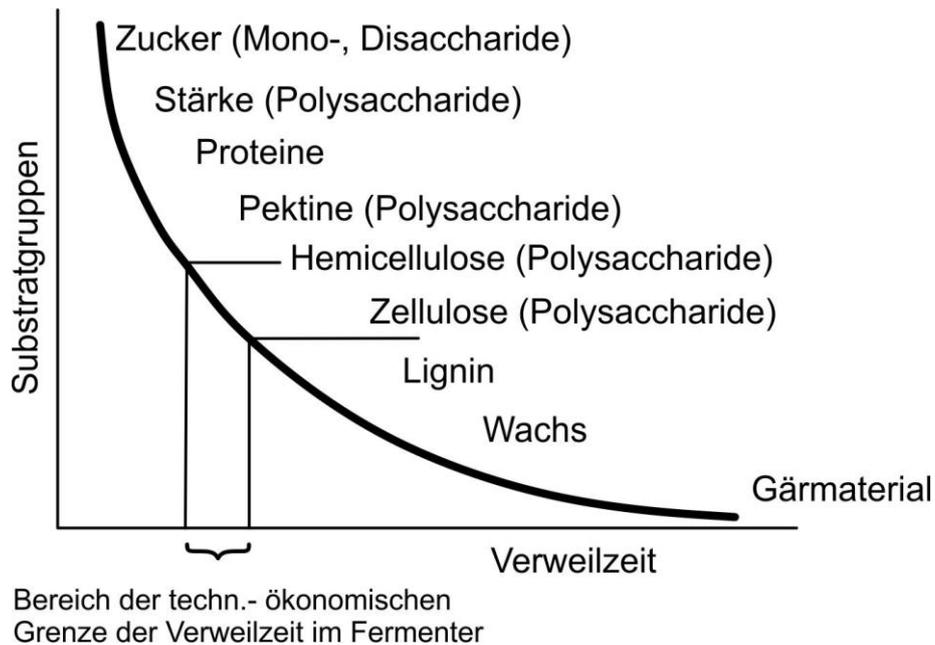


Abbildung 1: Abbaugeschwindigkeiten von Stoffgruppen im Fermenter (nach EDER & SCHULZ, 2006)

Die Methanausbeute von Zuckerrübensilage liegt bei ca. 360 l kg^{-1} organischer Trockenmasse (oTM). Die Methanausbeute für Maissilage wird hingegen nur mit ca. 340 l kg^{-1} oTM angegeben (KTBL, 2013). Der Trockenmasseertrag als Produkt aus Frischmasseertrag und Trockensubstanzgehalt ist dabei die entscheidende Größe für die Biogasproduktion (KTBL, 2012). Die bei der Zuckergewinnung unerwünschten Melassebildner wie Kalium, Natrium und Amino-N haben keinen negativen Einfluss auf den Prozess der Biogasbildung (HOFFMANN, 2010). Aus diesem Grund reicht es bei der Ernte aus, die zur Biogaserzeugung vorgesehenen Zuckerrüben zu entblättern, anstatt diese zu köpfen (THAYSEN, 2011). So können beim Anbau von Zuckerrüben für die Biogasgewinnung zusätzliche Ertragspotenziale genutzt werden. Durch den Verzicht des Köpfens kann ein höherer Ertrag von 3-4 % erzielt werden (SCHULZE LAMMERS & ROLLER, 2010). Außerdem kann durch eine geringere Verletzung des Rübenkörpers eine höhere Lagerstabilität erreicht werden.

Das Potenzial zur Steigerung der TM-Erträge, welches dazu beiträgt, die Zuckerrübe als Alternative zum Mais zu fördern, spiegelt sich in den primär durch züchterische Fortschritte erreichten Ertragssteigerungen der letzten 15 Jahre wieder. Dies ist graphisch in Abbildung 2 dargestellt.

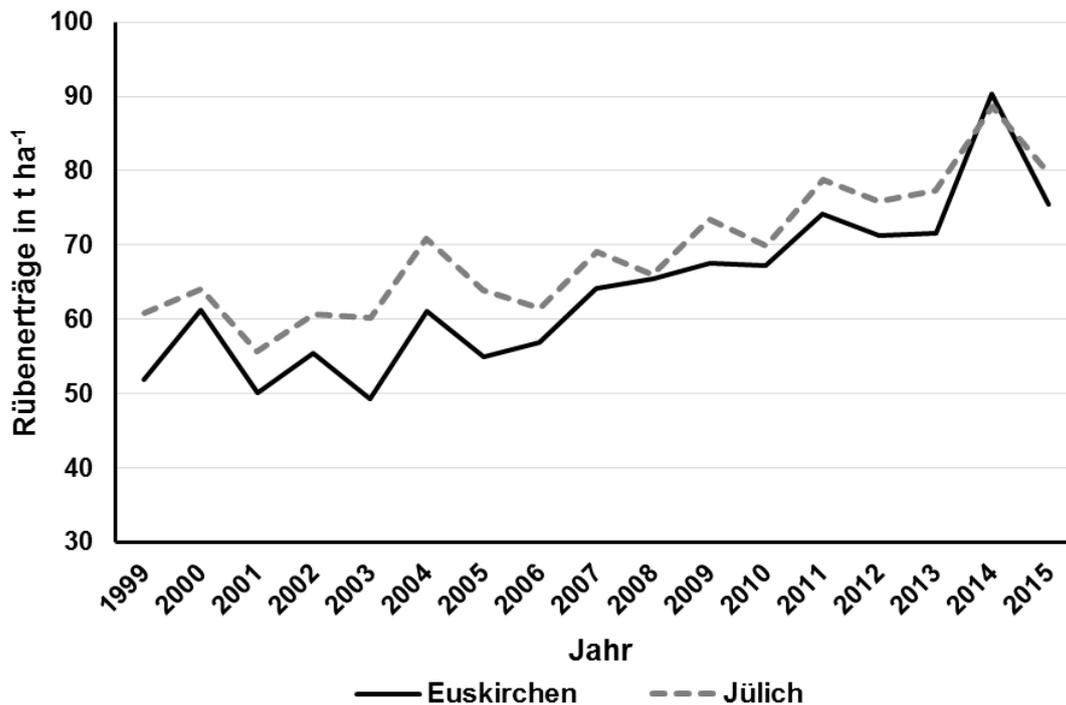


Abbildung 2: Entwicklung der durchschnittlichen Zuckerrübenenerträge (FM) in den Regionen Jülich und Euskirchen von 1999 bis 2015 (nach LIZ, 2016)

Die Entwicklung der durchschnittlichen Zuckerrübenenerträge in den Regionen Jülich und Euskirchen zeigt, dass bei anhaltender Entwicklung in Zukunft mit deutlichen Ertragssteigerungen im Zuckerrübenanbau zu rechnen ist. Dadurch wird die Attraktivität von Zuckerrüben als Biogassubstrat weiter gesteigert. Die pflanzenbaulichen Aspekte der Zuckerrübe sind als unproblematisch anzusehen und in Fruchtfolgen mit Getreide seit langem erprobt. Rüben haben außerdem einen hohen Vorfruchtwert (AUMÜLLER-GRUBER, 2014a). Aufgrund der späteren Ernte, verglichen mit dem konventionellen Zuckerrübenanbau und der dadurch längeren Vegetationsperiode, ist die Nährstoffausnutzung, auch von organischen Düngern, gut. Im Gegensatz zu anderen landwirtschaftlichen Kulturen verfügt die Rübe zum Ende der Wachstumsperiode über ertragsbildende Blattfläche, die an sonnigen Herbsttagen einen erheblichen Ertragszuwachs ermöglicht. Dadurch werden auch zu Vegetationsende die Stickstoffvorräte im Boden genutzt. Der Rübenenertrag nimmt so auch bei späten Ernteterminen je nach Witterung zu. (SCHÄFER, 2008)

Für den Einsatz in der Biogasanlage müssen die Zuckerrüben zunächst trocken oder nass gereinigt und, je nach Standort, von Steinen befreit werden. Besonders der Entfernung von Steinen kommt eine besondere Bedeutung zu, da diese zu mechanischen Beschädigungen der Förder- und Pumpenelemente, sowie der Zerkleinerungstechnik führen. Die Abreinigung von Erde erfolgt wie bei der Produktion von Zuckerrüben für die Zuckererzeugung bereits in den Zuckerrübenrodern, sowie

nach mindestens einwöchiger Mietenlagerung im Feld durch die Verladung mit einem Reinigungslader. Der Erdanhang kann dadurch auf bis zu 5 % reduziert werden. Eine zusätzliche Wäsche der Rüben führt zwar zu einer deutlichen Reduktion des Erdanhangs, wird jedoch aufgrund von Kosten zwischen 3 und 5 € t⁻¹ selten durchgeführt. (AUGUSTIN et al., 2010)

Da frische Zuckerrüben nur für eine relativ kurze Zeit im Jahr zur Verfügung stehen, müssen diese für einen ganzjährigen Einsatz in der Biogasanlage konserviert werden. Aufgrund ihres geringen Trockenmassegehalts von ca. 23 % haben sich verschiedene Verfahren der Silierung etabliert (KTBL, 2012). Die Silierung ganzer Rüben im Flachsilo unter Folie, sowie in gemuster Form im Erdbecken oder im Hochsilo stellen dabei die üblichen Verfahren dar (BEECK et al., 2014).

Vor dem Eintrag in den Fermenter werden die Zuckerrüben zerkleinert. Dies geschieht je nach Verfahren vor oder nach der Silierung (SCHAFFNER et al., 2011).

Die Zermusung der Zuckerrüben findet ausschließlich vor der Lagerung statt. Die Zerkleinerung der ganzen Zuckerrüben erfolgt nach der Lagerung. Dabei werden die Zuckerrüben jedoch nicht gemust sondern grob auf Größe einer Streichholzschachtel gehäckselt.

2.2 Botanik der Zuckerrübe

Die Zuckerrübe (*Beta vulgaris L. var. altissima*) gehört zur Familie der Gänsefußgewächse (*Chenopodiaceae*) und ist ein zweijähriges Gewächs. Nach der Aussaat entwickeln sich im ersten Jahr eine Blattrosette und eine fleischige Rübe. Diese ist konisch geformt, weiß gefärbt und zeigt, wie alle Rüben der Gattung *Beta*, ein atypisches Dickenwachstum (LIEBEREI & REISDORFF, 2012). Das Dickenwachstum erfolgt über mehrere Kambien. Es wird durch das primäre Kambium eingeleitet, welches sich eine begrenzte Zeit teilt und dann durch ein zweites Kambium abgelöst wird. Durch Wachstum des zweiten Kambiums wird die primäre Rinde nach anfänglicher Dehnung abgesprengt. Das Wachstum dieses Kambiums ist jedoch auch begrenzt, sodass an der am äußeren Rand erzeugten sekundären Rinde ein dritter Kambiumring entsteht. Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach. Dadurch entstehen konzentrisch angeordnete Wachstumszonen, die jeweils von einem Holz- und einem Bastring umfasst werden. (WEILER & NOVER, 2008)

Die Rübe lässt sich nach Winner (1982) botanisch in drei verschiedene Abschnitte unterteilen: den oberen Teil der Hauptwurzel (Wurzelkörper), den Übergangsabschnitt zwischen Wurzel und Spross (Hypokotyl) und den unteren Teil des Sprosses (Epikotyl). Nach unten schließt die Rübe mit einer dünner werdenden Pfahlwurzel ab. Diese wird ab einem Durchmesser < 1 cm als Rübenschwanz bezeichnet. Der Wurzelkörper trägt feine Seiten- und Faserwurzeln, welche „in zwei einander gegenüberliegenden, leicht spiralig gedrehten, mehr oder weniger deutlich ausgeprägten Wurzelrinnen angeordnet“ sind. Das Hypokotyl liegt zwischen dem Ansatz der untersten Blätter und

dem Ansatz der obersten Seitenwurzeln und trägt weder Wurzeln noch Blätter. Der Rübenkopf (Epikotyl) beginnt unterhalb des Ansatzes der untersten Blätter und reicht bis zum Vegetationskegel der Herzblätter. (WINNER, 1982)

Auf das vegetative Wachstum im ersten Jahr folgt im zweiten Jahr die generative Phase. In dieser entsteht ein ca. 1,5 m hoher verzweigter Spross mit unscheinbaren, fünfblättrigen Blüten. Die Bestäubung erfolgt über Fremdbefruchtung.

Da die Ernte der Zuckerrüben bereits im ersten Jahr erfolgt, erreichen Zuckerrüben im landwirtschaftlichen Anbau die generative Phase nicht.

2.3 Anbau für die Biogasproduktion

Der Anbau von Zuckerrüben für die Biogasproduktion unterscheidet sich nur unwesentlich vom Anbau für die Zuckererzeugung. Nachfolgend findet sich ein Überblick über Maßnahmen und Produktionsschritte, die es beim Anbau von Zuckerrüben zu berücksichtigen gilt. Besonderheiten für den Anbau für die Biogasproduktion finden hierbei Berücksichtigung.

2.3.1 Sortenwahl

Grundsätzlich lassen sich Zuckerrüben in drei Sortentypen unterscheiden. Dabei wird differenziert zwischen:

- ertragsbetonten Sorten (E-Typen) mit geringerem Zuckergehalt
- zuckerbetonten Sorten (Z-Typen) mit geringerem Rübenertrag und
- Sorten mit mittlerem Rübenertrag und Zuckergehalt (N-Typen). (KTBL, 2012)

Für die Biogasproduktion ist der Trockenmasseertrag das entscheidende Kriterium bei der Sortenwahl (BISZ, 2017). Dabei sind sowohl die Parameter Zucker- und Trockenmasseertrag, als auch die Parameter Zucker- und Trockensubstanzgehalt (siehe Abbildung 3) positiv miteinander korreliert (MÄRLÄNDER, 2010). Da Futterrüben zwar hohe Frischmasseerträge liefern, jedoch deutlich geringere Trockenmassegehalte aufweisen, liegen auch die Trockenmasseerträge unter denen leistungsstarker Zuckerrübensorten. Aus diesem Grund empfiehlt sich der Anbau von Zuckerrüben anstatt von Futterrüben. Nach MÄRLÄNDER (2010) eignen sich in besonderer Weise E-Typen mit hohem Zuckerertrag aber etwas geringerem Zuckergehalt. Auch AUMÜLLER-GRUBER (2014a) stellt fest, dass in Deutschland überwiegend zuckerbetonte Sorten für die Biogasproduktion eingesetzt werden, da der Zuckerertrag eine wichtige Kenngröße für den Methanertrag darstellt.

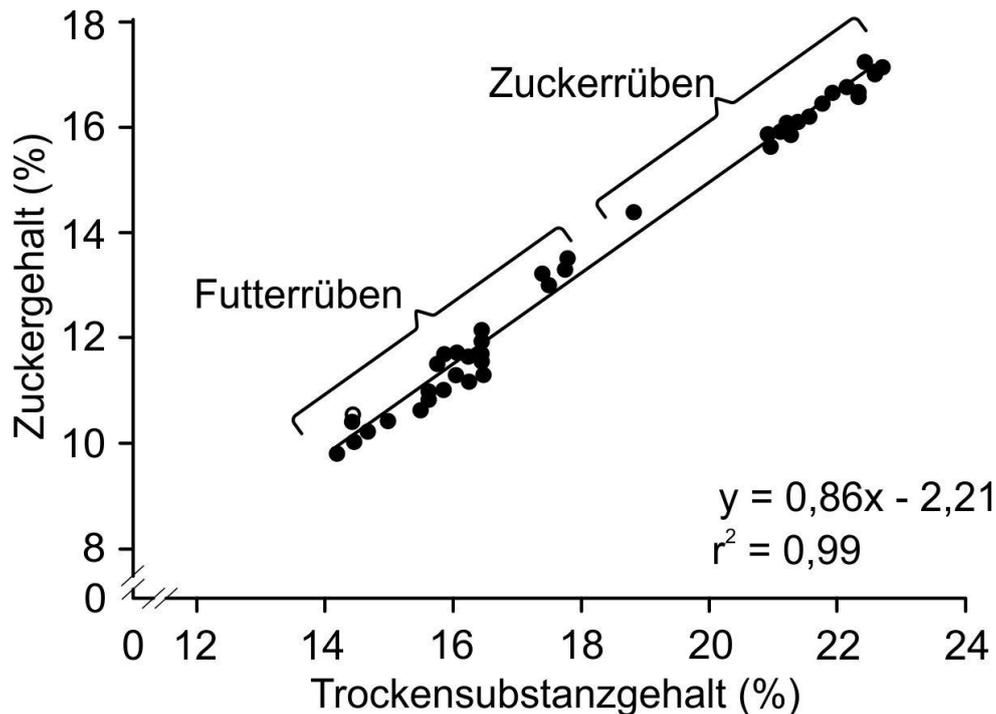


Abbildung 3: Zusammenhang zwischen Trockensubstanzgehalt und Zuckergehalt von Zucker- und Futterrüben (nach MÄRLÄNDER, 2010)

Im Gegensatz zur Zuckerproduktion sind beim Anbau von Zuckerrüben für die Biogasproduktion die Melassebildner Kalium, Natrium und Amino-N-Verbindungen nicht von Bedeutung. Ziel bei der Züchtung spezieller Biogassorten sind daher primär eine Steigerung des Trockenmasseertrags, sowie geringer Erdanhang und eine Eignung zur Überwinterung. Da Erdanhang in der Prozesskette der Biogaserzeugung unerwünscht ist, sollte auf Standorten, auf denen viel Erdanhang zu erwarten ist, der Parameter Erdanhang bei der Sortenwahl ebenfalls berücksichtigt werden. (HOFFMANN & GLAUERT, 2013)

Generell muss bei der Auswahl der Sorte auf die individuellen Standortanforderungen geachtet werden. Wie auch beim Anbau für die Zuckerproduktion muss je nach Gefahr des Befalls durch Krankheiten oder Schaderreger auf entsprechend resistente oder tolerante Sorten zurückgegriffen werden (KTBL, 2012). Darüber hinaus sind neben dem Trockenmasseertrag alle anbautechnischen Parameter für den erfolgreichen Zuckerrübenanbau zu berücksichtigen. Dazu zählen neben den jeweiligen Toleranzen, bzw. Resistenzen auch der Feldaufgang oder die Schossneigung (MÄRLÄNDER, 2010).

2.3.2 Anbau

Der Anbau von Zuckerrüben für die Biogasproduktion unterscheidet sich aus pflanzenbaulicher Sicht nicht vom Anbau von Zuckerrüben für die Zuckerproduktion. Der Anbau unterliegt denselben

fachlichen Bestimmungen, Cross Compliance-Verpflichtungen, sowie der guten fachlichen Praxis. Angestrebt wird eine Bestandesdichte von mindestens 80.000 Pflanzen je ha, die durch entsprechend hohe Feldaufgänge nach Aussaat in einen ausreichend abgetrockneten Boden erreicht wird. (STOCKFISCH, 2010)

Als Anforderung an den Standort nennt KTBL (2012) tiefgründige, mittelschwere Böden ohne Störschichten mit geringem Steinanteil und guter Wasserführung sowie mittlere bis hohe Jahresniederschläge. Bei ausreichender Wasserversorgung können Zuckerrüben aber auch auf sandigen Standorten angebaut werden. Bei Böden mit hohem Steinanteil müssen diese nach der Ernte entfernt werden, um Beschädigungen der Biogasanlagentechnik zu vermeiden. Der Anteil von Rüben in der Fruchtfolge sollte 25 % nicht übersteigen. Zudem sollten in der Fruchtfolge Wirtspflanzen für Rübennematoden (Kreuzblütler) vermieden werden. Anstatt dessen empfiehlt sich der Anbau nematodenresistenter Zwischenfrüchte wie Senf oder Ölrettich. (KTBL, 2012)

2.3.3 Düngung und Pflanzenschutz

Die Zuckerrübe stellt relativ geringe Ansprüche an die Versorgung mit Stickstoff und Phosphor. Jedoch ist der Bedarf an Kalium im Vergleich zu Getreide höher (BIERTÜMPFEL et al., 2012). Der Stickstoffsollwert für Biogasarüben liegt bei 180 bis 200 kg N ha⁻¹. Höhere Stickstoffmengen führen zu einer Zunahme der Blattmasse und haben keinen positiven Einfluss auf den Rübenertrag (KTBL, 2012). Um hohe bereinigte Zuckererträge zu erzielen, wird auf den meisten Standorten zusätzlich zur organischen Düngung mit 80 bis 120 kg N ha⁻¹ mineralisch gedüngt. Da Zuckerertrag und Trockenmasseertrag positiv miteinander korreliert sind, gilt dies auch als Richtwert für den Anbau von Rüben für die Biogasproduktion (STOCKFISCH, 2010). Wird mehr Stickstoff gedüngt als benötigt, kommt es zu einer Zunahme der Nichtzuckerstoffe Aminostickstoff, Kalium und Natrium, sowie zu einem Rückgang des Zuckergehalts (KTBL, 2012). Da die Nichtzuckerstoffe keinen Einfluss auf die Biogasproduktion haben, liegt der N-Sollwert von Biogasarüben häufig leicht über dem von Zuckerrüben für die Zuckerproduktion.

Besonders bei der Produktion von Biogas bietet es sich an, einen Teil der Düngung über Gärreste abzudecken. Durch die lange Vegetationszeit hinterlässt die Zuckerrübe am Ende des Jahres relativ wenig Reststickstoff im Boden. Dies kommt Boden- und Wasserschutz zugute. (AUMÜLLER-GRUBER, 2014a) Die in den Gärresten enthaltenen Nährstoffe müssen entsprechend ihrer Wirksamkeit auf die Gesamtdüngemenge angerechnet werden, um Nährstoffüberschüsse zu vermeiden (KTBL, 2012).

Der Pflanzenschutz im Zuckerrübenanbau bezieht sich vornehmlich auf Unkräuter und Ungräser, verschiedene Pilze, sowie tierische Schaderreger in Form von Insekten. Pilzkrankheiten und

Insekten können die Zuckerrübe dabei schon während der Keimung und auch noch einige Wochen nach dem Aufgang stark schädigen oder sogar zu deren Absterben führen (WINNER, 1982).

Um die Rübe vor tierischen Schädlingen und Pilzbefall zu schützen, wird die Hüllsubstanz des Saatkorns mit insektiziden und fungiziden Wirkstoffen gebeizt. Dadurch werden Keimling und Jungpflanze sowohl vor oberirdischen, als auch vor im Boden lebenden Schädlingen geschützt. (BISZ, 2017; KTBL, 2012) Zur Bekämpfung von Unkräutern und Ungräsern empfiehlt sich die Nachauflaufbehandlung mit zwei bis vier Herbizidanwendungen im Keimblattstadium der Unkräuter (BIERTÜMPFEL et al., 2012; KTBL, 2012). Aufgrund ihrer geringen Konkurrenzkraft in der frühen Jugendentwicklung ist die Kontrolle von Unkräutern und Ungräsern für einen erfolgreichen Anbau von großer Bedeutung (BIERTÜMPFEL et al., 2012). Im späteren Verlauf der Vegetationsperiode kommt es vermehrt zum Befall der Zuckerrüben mit Blattkrankheiten. Je nach Infektionszeitpunkt und -verlauf können diese einen Ertragsverlust verursachen (KTBL, 2012). Zu den bedeutenden Blattkrankheiten zählen Echter Mehltau (*Erysiphe betae*), die Blattfleckenkrankheiten (*Cercospora beticola* und *Ramularia beticola*), sowie Rübenrost (*Uromyces betae*) (KTBL, 2012; WINNER, 1982).

Grundsätzlich kann durch die Gestaltung der Fruchtfolge, sowie durch die Wahl der Sorte vorbeugend auf Krankheiten und Schädlinge reagiert werden. Dies trifft besonders auf den Befall mit Nematoden zu.

2.3.4 Ernte

Die Ernte der für die Biogasproduktion vorgesehenen Zuckerrüben erfolgt mit Rodesystemen, welche ebenfalls im konventionellen Zuckerrübenanbau eingesetzt werden. Da die im Rübenkopf enthaltenen Melassebildner bei der Produktion von Biogas keine negativen Auswirkungen haben reicht es aus die Zuckerrüben zu entblatten anstatt diese zu köpfen (SCHAFFNER et al., 2011; THAYSEN, 2011). Dadurch lässt sich der TM-Ertrag zusätzlich steigern (BISZ, 2017). Nach SCHULZE LAMMERS und ROLLER (2010) kann durch den Verzicht des Köpfens ein höherer Ertrag von 3-4 % erzielt werden. Neben dem Verfahren der Entblattung kann durch eine höhere Einstellung von Köpfer und Blattschlegler (Minimalköpfung) an praxisüblichen Rübenrodern der gleiche Effekt erzielt werden (BISZ, 2017).

Der Erntezeitpunkt wird unter Berücksichtigung der betrieblichen Voraussetzungen, der Arbeitsspitzen und den Bodenbedingungen möglichst ans Ende der Vegetationsperiode gelegt. HERMUS und ROTTMANN-MEYER (2012) stellten in der Zeit von Mitte September bis Mitte November einen Ertragszuwachs von 14,6 % bei der Zuckerrübensorte Benno fest. Diese Ertragszuwächse können durch die Wahl eines späten Erntetermins genutzt werden. Die Befahrbarkeit der Böden kann im Winter jedoch aufgrund feuchter Witterung problematisch sein.

Die Ernte und Bergung des Rübenblattapparates ist eine Möglichkeit zusätzliche TM-Erträge zu generieren. Nach SCHAFFNER et al. (2011) können je nach Rübenertrag, Sorte und Jahr bis zu 40 t Frischmasse Rübenblatt ha⁻¹ geerntet werden. Die TS des Rübenblattes liegt allerdings nur bei ca. 15 %, so dass viel Wasser transportiert werden muss und sich die wirtschaftliche Transportentfernung auf wenige Kilometer um die Anlage beschränkt. Auch der Aufwand einer zusätzlichen Transporteinheit (KTBL, 2012) führt dazu, dass sich das Verfahren der Blatternte in der Praxis nicht etablieren konnte.

2.4 Reinigung und Entsteinung

Der Bedarf einer Reinigung und Entsteinung wird von der Menge des Erdanhangs und der Höhe des Steinbesatzes bestimmt. Dies gilt unabhängig davon, ob die Rüben frisch in der Biogasanlage verfüttert werden oder ob diese für die Langzeitlagerung siliert werden. Außerdem muss nach Art des anhaftenden Bodens unterschieden werden. Während Ton- und Schluffminerale aufgrund ihrer geringen Korngrößen im Fermenter in der Schwebe bleiben, geht man davon aus, dass es bei Sandfraktionen zur Sedimentation im Fermenter kommt (SCHAFFNER et al., 2011).

In der Regel werden die Zuckerrüben in Mieten am Feldrand zwischengelagert (POMMEREHNE, 2011). Die Rüben trocknen dabei ab und beim anschließenden Verladen mittels Reinigungsladern wird der Anteil anhaftender Erde bereits im Feld auf bis zu 5 % reduziert (AUGUSTIN et al., 2010). In Regionen mit geringem Steinbesatz reicht diese Variante der Reinigung bereits aus, sodass kein Wäsche oder Entsteinung der Rüben nachgeschaltet wird und die Rüben weiterverarbeitet werden können. In Regionen mit höheren Steinanteilen ist es notwendig die geernteten Zuckerrüben von Steinen zu befreien, da diese Anlagenteile, wie beispielsweise Pumpen, beschädigen können (POMMEREHNE, 2011). Neben akustischen Verfahren der Entsteinung sind Verfahren der Nassreinigung in Kombination mit einer Steintrennung die häufigsten Verfahren in der Praxis. Dabei wird die unterschiedliche spezifische Dichte von Steinen und Zuckerrüben genutzt, um diese im Wasser voneinander zu trennen. Zuckerrüben haben ein spezifisches Gewicht von ca. 1,1 (KROMER et al., 2004), daher gibt es zwei verschiedene Lösungen um diese im Wasser von Steinen zu trennen. Eine Möglichkeit ist die Zugabe von Düngesalzen zum Waschwasser, welche die Dichte des Wassers erhöhen, sodass Rüben aufschwimmen. Alternativ dazu wird ein Wasserauftrieb erzeugt, der die Rüben im Reinigungsbecken aufschwimmen lässt und diese somit von den Steinen trennt. Bei der Passage durch die Waschanlage erfolgt zusätzlich zur Steintrennung eine Reinigung der Rüben, welche durch das intensive aneinander reiben erreicht wird. (SCHAFFNER et al., 2011)

Wird eine Nassreinigung durchgeführt, muss Waschwasser bereitgestellt und das Aufkommen von Schmutzwasser beachtet werden. Durch das Anhaften von Wasser an den, in die Lagerstätte

eingebrachten, Zuckerrüben erhöht sich die Gärstoffmenge. Die Nassreinigung erfolgt in Waschtrommeln oder im Wasserbad mit Einsatz von Düngesalzen, durch welches der Gutstrom hindurchgeleitet wird. Es ist zu beachten, dass sich gewaschene Rüben nicht lange lagern lassen, da bereits nach ca. 5 bis 10 Tagen Fäulnis einsetzt. Aus diesem Grund sollten gewaschene Rüben zeitnah weiterverarbeitet werden. Aufgrund des hohen Kostenaufwands von ca. 5 € t⁻¹ (AUGUSTIN et al., 2010) für die Nassreinigung und Entsteinung wird bei geringen Steinanteilen und geringem Erdanhang auf diesen Arbeitsschritt verzichtet. (SCHAFFNER et al., 2011)

Zur trockenen Abtrennung von Steinen können neben dem bereits erwähnten akustischen System bei geringen Steinmengen auch Häckselschaufeln oder Rübenschnitzler eingesetzt werden, welche die Rüben zerkleinern. Gerät ein Stein in die Häckselwelle blockiert diese. Daraufhin kann die Schaufel ausgekippt und der Stein entfernt werden (POMMEREHNE, 2011). Dieses System bietet sich jedoch nur an, wenn wenige Steine im Erntegut vorhanden sind. Einsatz finden diese Systeme bei der täglichen Beschickung der Biogasanlage mit ganzen frischen oder silierten Zuckerrüben.

2.5 Zerkleinerung

Vor dem Eintrag in den Fermenter werden die Zuckerrüben grundsätzlich zerkleinert, um ein Absinken der Rübenkörper auf den Boden des Fermenters zu vermeiden und die Oberfläche des Substrates zu vergrößern, sodass diese für die Mikroorganismen nutzbar ist (BIERTÜMPFEL et al., 2012). Je nach Art der Lagerung variieren dabei Zeitpunkt und Intensität der Zerkleinerung. Werden Zuckerrüben als Mus gelagert, erfolgt die Zerkleinerung vor der Silierung. In der Regel wird dabei die gesamte Erntemenge innerhalb eines kurzen Zeitraums zerkleinert. Für die Zerkleinerung ist der Einsatz von Kompost- oder Holzschreddern weit verbreitet (KTBL, 2012; BIERTÜMPFEL et al., 2012). Der Vorteil dieser Maschinen liegt in einer hohen Durchsatzleistung und der Möglichkeit auch Steine zu zerkleinern.

Eine weitere Option ist die Verwendung von Mühlen mit schnell laufenden Werkzeugen. Hier dürfen jedoch keine Steine mehr im Erntegut vorhanden sein. Auch der Einsatz von „Querstromzerspanern“ oder „Prallreaktoren“ ist möglich, jedoch sind diese meistens nicht mobil und daher nicht überbetrieblich verfügbar. (SCHAFFNER et al., 2011)

Werden ganze Zuckerrüben siliert und eingelagert, erfolgt die Zerkleinerung erst nach der Lagerung und damit kurz vor dem Eintrag in den Fermenter. Dazu verwendet man mit Ölmotoren angetriebene Häckselschaufeln, welche an Teleskop- oder Radlader angebaut werden können (AUGUSTIN et al., 2010). Je nach Einstellung werden die Rüben in faust- bis streichholzschachtelgroße Schnitzel zerkleinert und über den Feststoffdosierer eingebracht. Das

Fassungsvermögen der auf dem Markt erhältlichen Schaufeln liegt zwischen 1,5 bis 3 t. (SCHAFFNER et al., 2011)

2.6 Lagerungsvarianten

2.6.1 Ganze Rüben im Flachsilo

Bei der Lagerung ganzer Zuckerrüben im Flachsilo ist es wichtig das Haufwerk der zu silierenden Rüben möglichst vollständig mit einer Folie zu umschlagen, um den Eintritt von Luft weitestgehend zu unterbinden. Dazu wird eine Folie bis ca. 2 m tief unter den Mietenrand gezogen und nach oben umgeschlagen um das Entweichen von CO₂ und das Eindringen von atmosphärischer Luft zu verhindern. Dies ist notwendig, da die Rübenmiete nicht befahrbar und damit nicht rückverdichtbar ist. Anschließend erfolgt eine Abdeckung der Rüben mit Unterziehfolie, Silofolie und Vogelschutznetz, nach dem bei Maissilagen üblichen Verfahren. (SCHAFFNER et al, 2011)

Zum Zeitpunkt der Einlagerung bilden sich zwischen den Zuckerrüben viele Hohlräume, welche sich bei zunehmender Silierung durch Auflösung der Gewebestruktur und eine Verdichtung durch das Eigengewicht weitgehend schließen (HEILMANN, 2012). Nach HEILMANN (2012) fallen dabei ca. 45 Litern Sickersaft je Tonne eingelagerter Zuckerrüben an. Aufgrund des hohen Energiegehalts wird der Sickersaft aufgefangen und in die Biogasanlage eingespeist.

Die vollständige Silierung der Zuckerrüben dauert ca. 3 bis 4 Wochen (SCHAFFNER et al, 2011). Vorteilhaft an diesem Verfahren ist, dass bereits bestehende Flachsiloanlagen genutzt werden können, sodass hohe Investitionskosten entfallen. Jedoch muss die Stahlbetonfläche bereits bestehender Anlagen mit einem Schutzanstrich versehen werden, um Beschädigungen zu vermeiden. (HEILMANN, 2012)

Die ganzen Zuckerrüben werden mit angebauten Arbeitsgeräten wie Häckselschaufeln oder Siloblockschnidern aus dem Silostock entnommen und nach der Zerkleinerung mittels Häckselschaufel oder stationärer Zerkleinerungseinheit über den Feststoffdosierer in den Fermenter eingespeist. (AUGUSTIN et al., 2010)

Kritisch zu sehen ist die Höhe der bei der Lagerung auftretenden Verluste. Zwar wurde diese Thematik bis jetzt nur unzureichend untersucht, jedoch ermittelten BEECK et al. (2014) bei der Lagerung ganzer Zuckerrüben im Flachsilo Methanbildungspotenzialverluste (MBP-Verluste) von 63 %. Die Höhe des Silostocks in diesem Versuch betrug jedoch nur 1,80 m bei der Einlagerung, was nicht den in der Praxis üblichen Bedingungen von bis zu 9 m entspricht.

2.6.2 Mus im Erdbecken

Bei diesem Verfahren wird Zuckerrübenmus in offenen, mit Kunststofffolien ausgekleideten Erdbecken/Lagunen gelagert. Beim Bau des Erdbeckens ist darauf zu achten, dass die Sohle über dem Grundwasserspiegel liegt, um ein Aufschwemmen der Folie zu vermeiden. Der beim Bau anfallende Erdaushub kann für die Errichtung eines Erdwalls um die Lagune genutzt werden. Dadurch lässt sich die Tiefe und damit auch die Lagerungskapazität der Lagune erhöhen (HEILMANN, 2012). Der für die Planung der Lagune zu veranschlagende Lagerraumbedarf wird von ERDELJAN (1994) mit $1,21 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ kalkuliert. An der Stirnseite der Lagune wird in der Regel die Entnahmestelle für das Rübenmus eingerichtet. Diese stellt den tiefsten Punkt der Lagune dar (GRÖBLINGHOFF, 2011). Die Sohle ist so zu konzipieren, dass sowohl ein Gefälle, als auch eine mittig verlaufende Rinne das Zuckerrübenmus zur Entnahmestelle leiten. Die Gestaltung des Walls, dessen Höhe, sowie die Böschungswinkel sind an die örtlichen Gegebenheiten anzupassen. Zusätzlich sind aus Gründen der Betriebssicherheit eine Umzäunung der Anlage, sowie eine ausreichende Anzahl von Notausstiegshilfen vorgeschrieben. (HEILMANN, 2012)

Das Zuckerrübenmus wird in der Regel direkt aus dem Schredder in eine der Entnahmestelle gegenüberliegenden Ecken des Erdbeckens eingefüllt. Das Mus ist fließfähig und verteilt sich selbstständig im Erdbecken (BEECK et al., 2014; HEILMANN, 2013). Eine Vermischung von altem und frischem Zuckerrübenmus findet dabei nicht statt. Das frische Mus schiebt bereits in der Lagune befindliches Mus in Richtung der Entnahmestelle. Nach kurzer Zeit der Lagerung und Silierung bildet sich eine 10 bis 20 cm dicke Deckschicht, die sich dunkel verfärbt und je nach Witterung eine trockene oder feuchte Konsistenz aufweist. Diese Schicht ist einer direkten Auswirkung von atmosphärischer Luft ausgesetzt, was zu einer hohen mikrobiellen Aktivität und damit zu hohen Verlusten führt (HEILMANN, 2013). Innerhalb von acht bis zehn Tagen vergärt das unterhalb der Deckschicht liegende Mus zu einer lagerstabilen Flüssigsilage mit einem pH-Wert von ca. 3,5 (KTBL, 2012).

Vergorenes Zuckerrübenmus lässt sich mit Verdrängerpumpen aus dem Silostock entnehmen und befördern (AUGUSTIN et al., 2010). Das Pumpen lässt sich vollständig automatisieren, wodurch sich der Arbeitsaufwand nach der Einlagerung auf ein Minimum reduziert (GRÖBLINGHOFF, 2011).

2.6.3 Mus im geschlossenen Hochsilo

Bei den für die Lagerung von Zuckerrübenmus genutzten Behältern handelt es sich entweder um Edelstahl tanks oder beschichtete Betonbehälter. Aufgrund des geringen pH-Werts des Muses von ca. 3,5 ist die Verwendung korrosionsfreier, säurebeständiger Materialien von hoher Bedeutung.

Grundsätzlich können für die Lagerung auch Güllehochbehälter genutzt werden, diese müssen jedoch ebenfalls mit einer säurebeständigen Beschichtung versehen werden (HEILMANN, 2012). Um eine restlose Entleerung der Behälter zu gewährleisten läuft der Boden konisch zusammen (GRÖBLINGHOFF, 2011). Je nach Lagerraumbedarf werden verschlossene Behälter in unterschiedlichen Größen angeboten. Bei der Vergärung entstehende Gase können über ein Überdruckventil entweichen. Der Eintritt von atmosphärischer Luft wird bei den geschlossenen Behältern weitestgehend unterbunden. Dies führt, im Vergleich zum Erdbecken, zu geringeren Verlusten bei der Lagerung. (HEILMANN, 2012)

Die Einfüllung der gemusterten Zuckerrüben erfolgt über rotierende Verdrängerpumpen in eine Einfüllöffnung im Hochbehälter, so dass das Mus luftfrei in den Behälter hineingedrückt wird. Die entstehende Flüssigsilage kennzeichnet sich durch geringe Konservierungsverluste und einen hohen Futterwert (TÜRK & HÖRING, 1998). Neben dem Pumpen ist eine Befüllung der Behälter mit Elevatorbändern oder Betonpumpen möglich, die das Material unmittelbar von oben in die Behälter einfüllen. Die Entnahme des vergorenen Zuckerrübenmuses aus den Behältern erfolgt ebenfalls mittels Verdrängerpumpen (GRÖBLINGHOFF, 2011).

Die generelle Funktionsweise der Hochbehälter erlaubt je nach Bauart die Lagerung verschiedener Futterpflanzen wie Feuchtmais, Körnermais, CCM, Getreide oder Hackfrüchte, was eine flexible Nutzung ermöglicht (WYSS, 2011).

Nachteil von Hochsilos sind die hohen Investitionskosten (KTBL, 2012), die dazu führen, dass diese Form der Lagerung die kapitalintensivste ist (HEILMANN, 2012).

2.7 Grundlagen der Aufbereitung

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben, durchlaufen die Zuckerrüben nach der Ernte verschiedene Aufbereitungsschritte, die jedoch betriebsindividuell variieren können. Zu diesen Aufbereitungsschritten zählen die Reinigung der Rüben von Erde und zum Teil auch von Steinen, die Zwischenlagerung und der Transport der Rüben, sowie deren Zerkleinerung in frischer oder siliierter Form. Wie bereits im Kapitel 1 beschrieben, ist die Zielsetzung dieser Arbeit festzustellen, ob sich verschiedene Zuckerrübensorten, von zum Teil unterschiedlichen Standorten, im Prozess der Aufbereitung voneinander unterscheiden. Dazu zählen die Parameter Energieaufwand zur Zerkleinerung, Erdanhang in der Wurzelrinne, sowie die Eignung zur Trockenreinigung. Die bestehenden Erkenntnisse, an die im Rahmen der Arbeit angeknüpft wurde, finden sich in den folgenden Kapiteln. Dabei handelt es sich primär um physikalische bzw. mechanische qualitätsbestimmende Eigenschaften der Zuckerrüben, zu denen nach OLTSMANN et al. (1984) die

Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse wie Quetschungen, Brüchigkeit oder die Elastizität des Zuckerrübengewebes gehören.

2.7.1 Energieaufwand zur Zerkleinerung

Das Zerkleinern von Materialien jedweder Art, unter anderem auch von landwirtschaftlichen Produkten, ist mit einem Trennvorgang verbunden. In der Regel handelt es sich dabei um das Schneiden. Der Vorgang des Schneidens beschreibt die mechanische Trennung eines Körpers an einer Stelle in einer Richtung mit einem Schneidwerkzeug (STROPPEL, 1953).

STROPPEL (1953) definiert das Schneiden folgendermaßen:

„Das Schneiden ist ein mechanischer Trennvorgang an einem festen Körper mittels eines Schneidwerkzeuges, dessen keilförmige Schneide unter Druck (Schnittdruck) den Verband des zu trennenden Körpers infolge hoher spezifischer Normal- und Schubkräfte längs der Schneidkante durch Überschreiten der plastischen Verformbarkeit auflöst [...]“

Anhand dieser Definition kann das Schneiden gegen andere mechanische Trennvorgänge an festen Körpern abgegrenzt werden.

Der genaue Ablauf des Schnittvorgangs wurde von PERSSON (1987) ermittelt und graphisch dargestellt (siehe Abbildung 4). Eingeleitet wird der Schnittvorgang, sobald das keilförmige Schnittwerkzeug mit der äußersten Kante den zu durchtrennenden Körper berührt. Durch das Einwirken der Kraft F auf den Körper steigen bei fortlaufender Bewegung des Messers bzw. der Klinge die Kontaktkräfte und Spannungen innerhalb des Materials und es kommt zur Deformation (Abbildung 4 a). Mit zunehmender Krafteinwirkung wird die Widerstandskraft des Materials überwunden und die Klinge durchtrennt das Material (b). Der Schnittprozess setzt sich durch das gesamte zu trennende Material fort (c), bis dieses vollständig zerlegt ist.

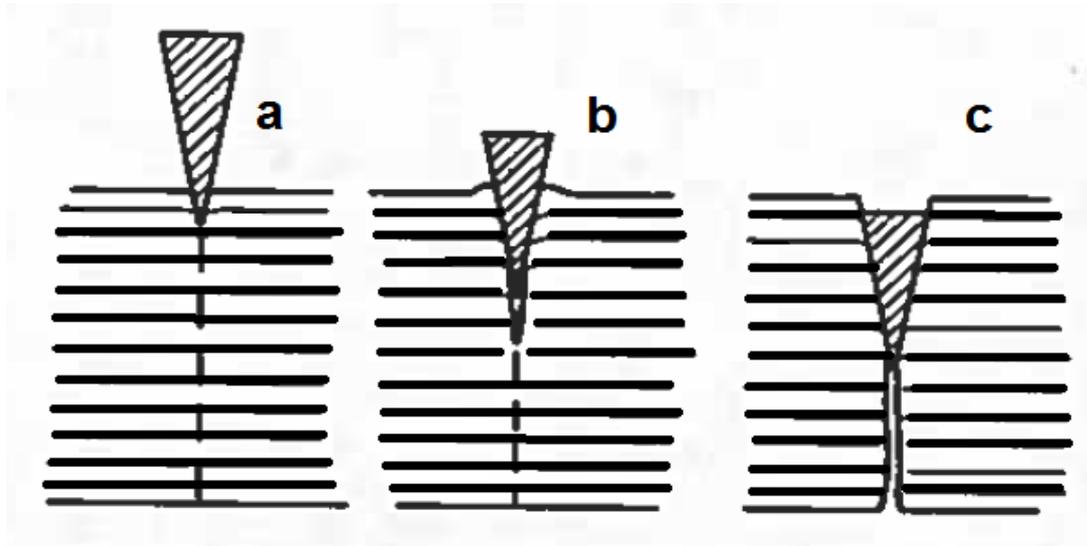


Abbildung 4: Aufeinanderfolgende Schritte im Schnittprozess (nach PERSSON, 1987)

Das Schneiden stellt dabei nicht einen einzelnen Vorgang dar, sondern eine Abfolge aus Deformations- und Trennprozessen, die über das Einwirken der Kraft F über die Strecke s zur Teilung des Körpers führt. (PERSSON, 1987)

Im Labor lassen sich die auftretenden Schnittkräfte an verschiedenen Prüfständen ermitteln. JAHN et al. (2012) führten Versuche mit Kartoffeln durch und zeichneten die Kraft-Deformationskurve während der Zerkleinerung auf (Abbildung 5). Mit Auftreffen der Klinge auf die Kartoffel steigt die aufgewendete Kraft F zunächst stark an. Mit zunehmender Deformation steigt der Kraftaufwand bis auf sein Maximum im Trennungsprozess. An diesem Punkt kommt es nach einer anfänglichen Deformation durch das Auftrennen der Zellstruktur zum Beginn des Schnittprozesses.

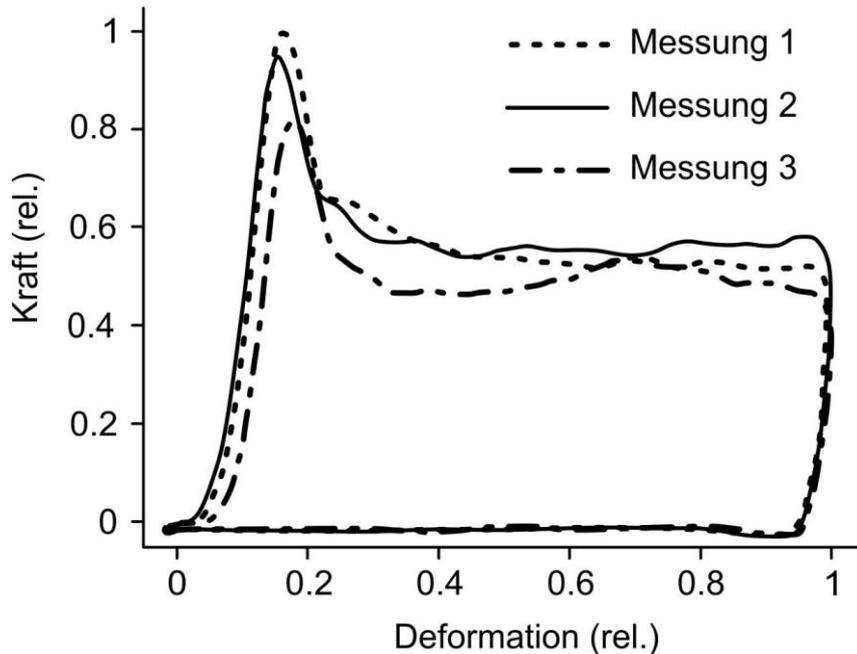


Abbildung 5: Kraft-Deformationskurven (n=3) bei einer Zerkleinerung von Kartoffeln mit relativer Skala (JAHR et al., 2012)

Der Kraftaufwand reduziert sich danach, pendelt sich jedoch auf einem relativ konstanten Niveau ein. Im weiteren Verlauf der Zerkleinerung unterliegt der Kraftaufwand nur geringen Schwankungen. Daraus lässt sich ableiten, dass bei einem Schnittprozess an Kartoffeln zunächst eine erhöhte Kraft F aufgewendet werden muss, um die Widerstandskraft des Gewebes zu durchbrechen. Im Anschluss verläuft die Zerkleinerung unter geringerem und relativ konstantem Kraftaufwand über die gesamte Strecke des Schnittvorgangs. An deren Ende fällt die benötigte Kraft auf null. (Jahr et al., 2012)

Um den Energieaufwand bzw. die bei der Zerkleinerung geleistete Arbeit zu ermitteln, lässt sich diese über die Faktoren Kraft und Weg mathematisch bestimmen. Die geleistete Arbeit ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$W = \int \vec{F}(\vec{s}) * d\vec{s} \quad (1)$$

W =Arbeit

F =Kraft

d =Weg

Da sich der Kraftaufwand über den Weg nicht linear verhält (siehe Abbildung 5) ergibt sich die Arbeit aus der Fläche unter der Kurve.

Eine Möglichkeit den Energieaufwand bei der Zerkleinerung von Zuckerrüben zu messen und daraus die geleistete Arbeit zu ermitteln ist die Kramer-Scherzelle (Abbildung 6). Diese Vorrichtung stammt aus der Lebensmitteltechnologie und ist konzipiert für die Texturbestimmung von Lebensmitteln. Der Einsatz erfolgt unter Laborbedingungen und ermöglicht es bereits geringe Materialunterschiede festzustellen.

Nach WINOPAL et al. (2015) ist die Texturprüfung ein Teil der Rheologie. Die Rheologie befasst sich mit dem Fließ- und Verformungsverhalten fester und fluider Körper unter dem Einfluss mechanischer Kräfte. Die Textur von Lebensmitteln oder auch der Zuckerrübe kann unter anderem über mechanische Rezeptoren gemessen werden. Anders als bei den für Lebensmittel bedeutenden Textureigenschaften wie Knackigkeit, Klebrigkeit oder Bindung, spielen bei der Beurteilung von Zuckerrüben die Eigenschaften Festigkeit und Härte eine besondere Rolle. Größe, Form und Zellstruktur haben einen entscheidenden Einfluss auf die Textureigenschaften. (WINOPAL et al., 2015)

Mit der Kramer-Scherzelle wird der Biss an Nahrungsmitteln simuliert. Dabei wird die aufgewendete Kraft aufgezeichnet. In der Lebensmitteltechnologie werden die Daten genutzt um die Bissfestigkeit, Knusprigkeit oder Festigkeit der Probe zu beurteilen (ZWICK ROELL, 2016).

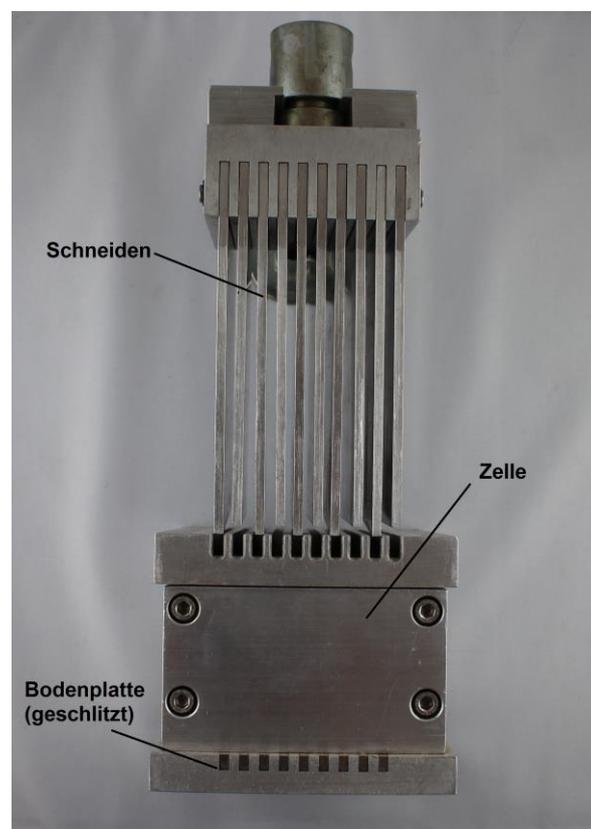


Abbildung 6: Kramer Scherzelle

Je nach Bauart fahren fünf oder zehn Schneiden mit konstanter Geschwindigkeit durch das in die Zelle eingelegte Probenmaterial (siehe Abbildung 6). Die Bodenplatte der Zelle ist geschlitz. Die

Schneiden komprimieren, scheren und extrudieren das Probenmaterial. Da mit mehreren Schneiden an mehreren Stellen gleichzeitig gemessen wird, werden lokale Texturabweichungen in der Probe ausgeglichen (WINOPAL et al., 2015; ZWICK ROELL, 2016).

Durch die Verwendung der Kramer-Scherzelle in einer Materialprüfmaschine wird über einen Kraftaufnehmer die für die Zerkleinerung der Probe aufgewendete Kraft F (in N) über die Strecke s (in mm) aufgezeichnet. Daraus ergibt sich eine Kraft-Deformationskurve wie sie in Abbildung 5 zu sehen ist.

2.7.2 Erdanhang und seine Bedeutung

Wie bei der Zuckerproduktion spielt der Erdanhang auch bei der Biogasproduktion eine Rolle. Auch wenn es bisher keine wissenschaftliche Untersuchung zur konkreten Auswirkung von Erdeintrag in den Fermenter gibt muss davon ausgegangen werden, dass sich insbesondere Sand im Fermenter absetzt, während die kleinen Ton- und Lehnteilchen in der Schwebe bleiben (AUMÜLLER-GRUBER, 2014b). Da Zuckerrüben je nach Region große Mengen Erde und auch Steine enthalten, müssen diese vor der Verwendung in Biogasanlagen gereinigt werden (NEUMANN, 2013). Neben Bodeneigenschaften, pflanzenbaulichen Maßnahmen und den Witterungsbedingungen zur Ernte wird die an den Rüben anhaftende Erdmenge auch durch die Ausprägung der Wurzelrinne bestimmt (IFZ, 2003). Diese wiederum ist abhängig vom Genotyp. Durch Kreuzung von Futter- und Zuckerrüben und anschließende Selektion von Genotypen mit glatter Rübenoberfläche und gering ausgeprägter bis fehlender Wurzelrinne konnten durch das IFZ (2003) sogenannte „clean beets“ mit einem um 40 bis 50 % reduzierten Erdanhang gezüchtet werden. Im Vergleich mit drei in Deutschland zugelassenen Vergleichssorten konnte jedoch festgestellt werden, dass bei „hohen Erdmassen der Einfluss des Genotyps (Rübenoberfläche, Wurzelrinne) auf die anhaftende Erde durch den Einfluss von Boden und Erntebedingungen überlagert“ wird (IFZ, 2013). Die Wurzelrinne wurde von WINNER (1982) als zwei einander gegenüberliegende, leicht spiralgig gedrehte, mehr oder weniger deutlich ausgeprägte Bereiche am Wurzelkörper beschrieben, in denen die Seitenwurzeln angeordnet sind. WINNER (1982) verweist darauf, dass Rüben mit ausgeprägter Wurzelrinne aufgrund eines erhöhten Erdanhangs unerwünscht sind. Neben pflanzenbaulichen Maßnahmen und der Auswahl eines geeigneten Erntezeitpunkts bietet also die Sortenwahl ein Mittel zur Reduktion des Erdanhangs.

Durch Bemühungen der an der Zuckerproduktion beteiligten Landwirte, Landtechnikhersteller und Zuckerunternehmen, sowie durch Fortschritte in der Züchtung, konnte der in den Zuckerfabriken angelieferte Erdanteil in den letzten Jahren um durchschnittlich 3 bis 3,5 Prozent pro Jahr reduziert werden. Dies geschieht zum einen über technische Vorrichtungen bei der Ernte (rüttelnde Schare,

rotierende Siebsterne, Walzensysteme), als auch durch eine Reinigung der Rüben beim Verladen mit Reinigungsladern. Hier wird Erde durch rotierende Walzen und ein aneinander reiben der Rüben entfernt. Dieser Effekt kann durch eine Zwischenlagerung der Zuckerrüben in abgedeckten Mieten positiv beeinflusst werden, da die Zuckerrüben abtrocknen, was den Reinigungserfolg deutlich erhöht. Dennoch verbleiben durchschnittlich ca. 5 Prozent Erde an den Rüben. Gleichzeitig ist es ein Bestreben der Züchter durch Selektion der Rübenform den Erdanhang zu reduzieren. Hier stehen insbesondere die Wurzelrinnen und die Rübenoberfläche im Fokus. (STRUBE, 2012)

2.7.3 Abschlussgewebe der Zuckerrübe und seine Funktion

Das Abschlussgewebe oberirdischer Pflanzenteile wird als Epidermis bezeichnet. Bei unterirdischen Pflanzenteilen, wie der Wurzel, ist das Abschlussgewebe jedoch aufgrund der abweichenden Struktur und Funktion sowie der unterschiedlichen Entstehung als Rhizodermis (Wurzelepidermis) definiert (JÄGER et al., 2003). Der primäre Unterschied zur Epidermis besteht darin, dass die Rhizodermis nicht von einer Cuticula überzogen ist, was dazu führt, dass Wasser und Nährstoffe aufgenommen werden können. Auch findet sich in der Rhizodermis keine Stomata (THROM, 2007). Aus der Rhizodermis entwickeln sich Wurzelhaare, die zu einer Vergrößerung der Oberfläche führen und der Wasseraufnahme dienen. Zellen aus denen sich die Wurzelhaare differenzieren nennen sich Trichoblasten (LÜTTGE & KLUGE, 2012).

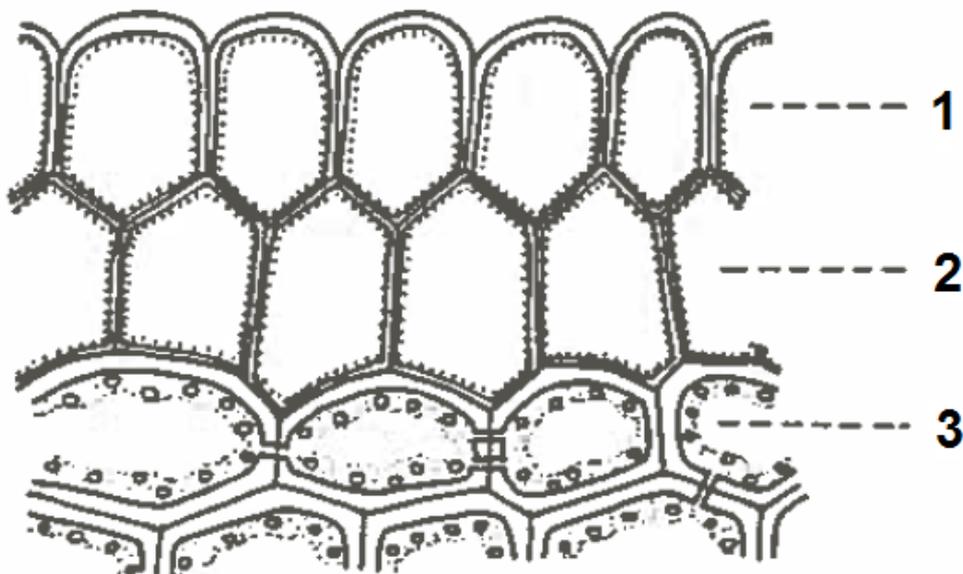


Abbildung 7: Abschlussgewebe der Wurzel (Querschnittsbild) am Beispiel der Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*), 1: Rhizodermis, 2: Exodermis, 3: Rindenparenchym (nach THROM, 2007)

Die unterhalb der Rhizodermiszellen liegenden hypodermalen Zellen werden als Exodermis bezeichnet (BRESINSKY et al., 2008) und übernehmen an Stellen, an denen Wurzelhaare absterben, die Funktion der Rhizodermis. Die Exodermis leitet sich aus dem Apikalmeristem ab und liegt ein- oder mehrschichtig unmittelbar unter der Rhizodermis (siehe Abbildung 7) (THROM, 2007). Unterhalb der Exodermis schließt das Rindenparenchym an, welches typischerweise aus großen, dünnwandigen und abgerundeten Zellen besteht.

Da die Rübe jedoch eine „durch sekundäres Dickenwachstum stark verdickte, fleischige Hauptwurzel allorhizer Pflanzen“ ist (WEILER & NOVER, 2008), ändert sich der beschriebene Aufbau mit dem Wachstum der Zuckerrübe. Die außerhalb des Perizykels (siehe Abbildung 8) liegenden Gewebeschichten der primären Wurzel sind nicht teilungsfähig. Mit Einsetzen des sekundären Dickenwachstums können diese daher der Ausdehnung der Wurzel nur in gewissem Maße standhalten, werden abgesprengt und gehen dadurch verloren. Dazu zählen sowohl Rhizodermis, Exodermis, das Rindenparenchym als auch die Endodermis. Aus dem Perizykel geht ein sekundäres, korkiges Anschlussgewebe hervor. Dieses ist das Periderm (siehe Abbildung 8). (LIEBEREI & REISDORFF, 2012)

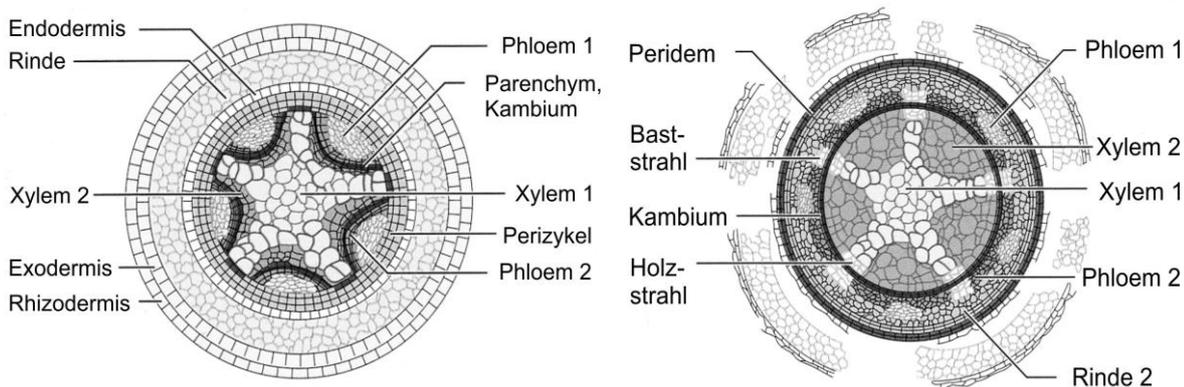


Abbildung 8: Schema des kambialen sekundären Dickenwachstums der Wurzel. Links: Beginnendes sekundäres Dickenwachstum durch Kambiumbildung. Rechts: Abspregung des äußeren Gewebes (Rhizodermis, Exodermis und Rindenparenchym) (nach LIEBEREI & REISDORFF, 2012)

Beim sekundären Dickenwachstum kommt es zunächst zur Bildung eines Kambiumrings. Dieser wächst zu beiden Seiten gleich stark, stellt jedoch nach kurzer Zeit die Zellteilung ein. Aus der äußeren Schicht des Perizykels geht ein zweites Kambium hervor, dessen Teilungsaktivität ebenfalls beschränkt ist. Dieser Prozess wiederholt sich mehrfach. Dabei werden bei jedem Kambium sowohl Zellen nach außen (Bastteil) als nach innen (Holzteil) abgegeben, sodass sich im Rübenquerschnitt mehrere konzentrische Ringe ergeben, die jeweils aus einem Bast- und einem Holzteil bestehen. (LIEBEREI & REISDORFF, 2012)

Das Periderm stellt als Abschlussgewebe einen Schutz vor mechanischen Beschädigungen der Rübe dar, wie sie beispielsweise bei der Ernte der Zuckerrüben auftreten können. Dabei werden die Zuckerrüben bereits während des Rodens mechanisch gereinigt um anhaftende Erde auf dem Feld zu belassen. Die Abreinigungsintensität ist dabei positiv mit dem Ausmaß der Beschädigung korreliert (HOFFMANN, 2014). Durch die Beschädigungen steigen die Lagerungsverluste bei einer anschließenden Mietenlagerung erheblich an. Es wird verstärkt Zucker abgebaut und Invertzucker reichert sich an (KENTER et al., 2006, WILTSHIRE & COBB, 2000). Die Anreicherung von Invertzucker stellt zwar kein Problem für die Produktion von Biogas dar, jedoch betreffen die damit verbundenen Lagerungsverluste auch die Biogasproduktion. Gründe für die durch Beschädigungen hervorgerufenen höheren Verluste bei der Lagerung können zum einen eine gesteigerte Stoffwechselaktivität bei der Wundheilung (KLOTZ et al., 2006) und zum anderen der Befall des beschädigten Gewebes mit Pathogenen wie fakultativen Saprophyten und Schwächeparasiten sein (MUMFORD & WYSE, 1976).

Aus diesem Grund ist es sowohl im Interesse der Biogas produzierenden Betriebe, welche Zuckerrüben in ihren Substratmix integrieren, als auch der Zuckerindustrie, die Beschädigungen an Zuckerrüben auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die Fütterung frischer Zuckerrüben im Herbst (ohne diese zu konservieren), sowie durch eine auseinandergezogene Ernte oder eine unausgereifte Prozesskette bei der Einsilierung, kommt es in der Praxis zum Teil zu längeren Lagerungsphasen frischer Zuckerrüben, die bei Beschädigungen des Periderms mit steigenden Verlusten verbunden sein können.

2.7.4 Rheologie des Abschlussgewebes

Die Rheologie befasst sich mit „Erscheinungen, die beim Fließen und Verformen von Stoffen unter Einwirkung äußerer Kräfte auftreten“ (DUDEN, 2017). Dabei spielen die mechanischen Eigenschaften des Abschlussgewebes eine entscheidende Rolle. Wie bei allen landwirtschaftlichen Produkten verändern sich diese mit der Zeit und sind abhängig von Umwelteinflüssen, wie der Temperatur oder der Luftfeuchtigkeit. Es gibt eine Vielzahl von Methoden, um die physikalischen Eigenschaften landwirtschaftlicher Produkte zu ermitteln. Dazu zählen beispielsweise Druck-, Kompressions-, Penetrometer-, Scher- und Zugtests. Mit ihnen werden unter anderem die Textur, Festigkeit und Knackigkeit von landwirtschaftlichen Produkten ermittelt. (NÉMETH, 2003). Zur Bestimmung der Festigkeit des Abschlussgewebes führte NÉMETH (2003) Druckversuche (Stempeltest) mit einer Materialprüfmaschine an Kartoffeln durch. Durch Aufzeichnen der Kraft-Deformations-Kurve wird die Bruchgrenze des Abschlussgewebes ermittelt (siehe Abbildung 9).

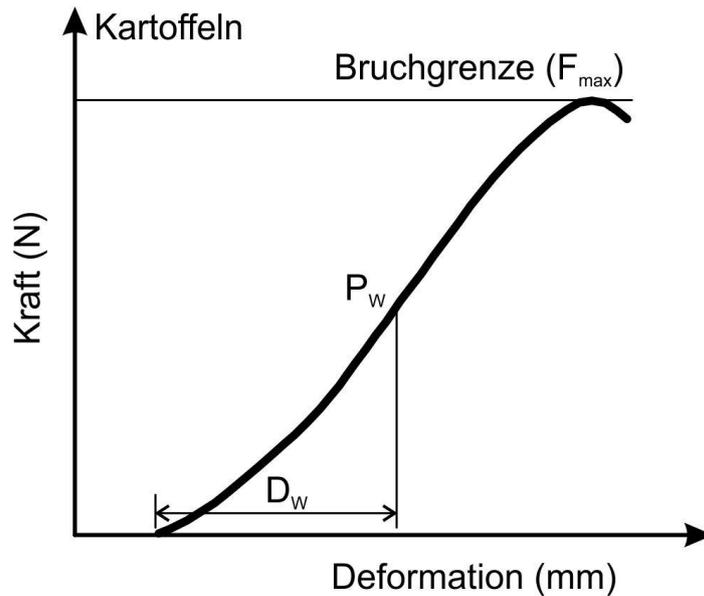


Abbildung 9: Typische Kraft-Deformations-Kurve von Kartoffeln (nach NÉMETH, 2003), P_w =Wendepunkt, D_w =Deformation bis zum Wendepunkt

Die Bruchgrenze ist der Punkt auf der Kraft-Deformations-Kurve, an dem die Kraft bei zunehmender Deformation abrupt abnimmt. Der Punkt zeigt an, ab welcher Kraft und bei welcher Deformation ein Bruch im Gewebe erfolgt.

Der durchgeführte Stempeltest lässt sich mit anderen Druckversuchen unter dem Sammelbegriff Penetrometer zusammenfassen. Dabei wird die zur Penetration benötigte Kraft gemessen. Diese variiert je nach Form und Größe des Stempels. Je nach Art der Penetration und dem zu untersuchenden landwirtschaftlichen Produkt variieren Form und Größe des Stempels. Der Durchmesser des Stempels beträgt in der Regel 8 mm oder 11,1 mm. (ASAE, 1996; TIMBERS et al., 1965)

Ähnliche Versuche wurden von OLCOTT-REID und MOORE (1995) an Erdbeeren durchgeführt. Mittels eines Druckversuchs (Stempeltest) wurde die Epidermisfestigkeit verschiedener Erdbeersorten überprüft um festzustellen, ob einzelne Sorten eine höhere Festigkeit des Abschlussgewebes aufweisen als andere. Die Epidermisfestigkeiten der neun untersuchten Erdbeersorten variierten zwischen 1,04 N und 1,61 N und unterschieden sich signifikant. Dieser Versuch bestätigt, dass es möglich ist, die Festigkeit des Abschlussgewebes landwirtschaftlicher Produkte durch einen Stempeltest mit hoher Sensitivität zu ermitteln.

2.8 Silierung von Zuckerrüben

Im Gegensatz zur Silierung von anderen in der Landwirtschaft üblichen Futtermitteln wie Mais oder Gras, ist die Silierung von Zuckerrüben mit einigen Besonderheiten verbunden. Grund dafür ist primär der geringe Trockenmassegehalt, der mit ca. 23 % deutlich unter dem von Mais- (ca. 35 %) oder Grassilage (ca. 35 %) liegt (KTBL, 2012). Die grundlegenden Prozesse der Silierung sind jedoch gleich und sollen im Folgenden beschrieben werden. Auf die Besonderheiten von Zuckerrüben wird eingegangen. Teile der in diesem Kapitel enthaltenen Inhalte wurden von DIRKS et al. (2017) veröffentlicht.

2.8.1 Grundlagen der Silierung

Durch die Konservierung von pflanzlichem Material soll ein Stoffabbau und -umbau von Nährstoffen auf ein mögliches Minimum reduziert werden. Bei der Silierung unter Luftabschluss kommt es zur Umsetzung der leicht vergärbaren Zucker zu organischen Säuren. Dies geschieht hauptsächlich durch anaerobe Milch- und Essigsäurebakterien. Dadurch sinkt der pH-Wert von ca. 6,5 auf unter 4, wodurch die bei der Silierung unerwünschten Mikroorganismen wie (Buttersäure-) Bakterien, Hefen und Schimmelpilze unterdrückt werden. Starke Verschmutzungen des zu silierenden Gutes können prinzipiell zu einem vermehrten Eintrag von Buttersäurebakterien führen, welche Fehlgärungen zur Folge haben können. (KALTSCHMITT et al., 2009)

Grundsätzlich sind die Anwesenheit siliertauglicher Milchsäurebakterien, ein ausreichender Feuchtigkeitsgehalt des Siliergutes, ausreichend vergärbare Zucker, sowie eine sauerstofffreie Umgebung die Grundvoraussetzungen für eine erfolgreiche Silierung (PAHLOW & HÜNTING, 2011).

Zu Beginn der Silierung wird der vorhandene Restsauerstoff durch die auf dem Siliergut natürlich vorkommenden Mikroorganismen veratmet. Wird ein Nachschub von Sauerstoff durch Verschluss des Silos unterbunden, veratmen diese Mikroorganismen den Sauerstoff innerhalb weniger Stunden. Ab diesem Zeitpunkt setzt die Hauptgärphase ein, in der das Pflanzengewebe innerhalb weniger Tage abstirbt. Dadurch werden die Zellinhaltsstoffe frei und können von der Silagemikroflora (Milch- und Essigsäurebakterien) genutzt werden. Es kommt zur Ansäuerung der Silage. Bis eine Absenkung des pH-Werts erreicht ist, sind auch unerwünschte Keimgruppen aktiv, die sich ohne Sauerstoff vermehren können. Dazu zählen Clostridien, Listerien, Bacillusarten sowie Hefepilze. (PAHLOW & HÜNTING, 2011)

Nach der Absenkung des pH-Werts auf einen Wert unter 3,5 ist die Milchsäuregärung beendet. Ab diesem Niveau sind Bakterien nicht mehr stoffwechselaktiv. Hefen hingegen sind auch bei geringen pH-Werten noch aktiv und vergären den verbliebenen Zucker zu Ethanol (WEIßBACH et al., 2011).

Dieser Zustand wird als Lagerphase definiert und gilt als stabile Phase, solange kein Sauerstoff in den Silostock eindringt. In der mit Öffnung des Silos einsetzenden Entnahmephase werden im Ruhestadium befindliche Mikroorganismen sowie Hefen und Schimmelpilze zu aerober Stoffwechselaktivität und Wachstum angeregt (PAHLOW & HÜNTING, 2011). Dies führt zu einem Anstieg der Verluste.

Bei Zuckerrüben findet jedoch nur bei der Silierung ganzer Rüben im Flachsilo oder bei der Lagerung im Folienschlauch eine Öffnung des Silos statt. Somit kommt es nur bei diesen Lagerungsvarianten zu einer klassischen Entnahmephase, wie man sie von Mais- oder Grassilagen kennt. Bei der Lagerung von Mus im Erdbecken oder im Hochsilo ändert sich die Sauerstoff-Situation durch Entnahme der Silage nicht. Die Silierung der Zuckerrüben läuft bei allen Verfahren im Wesentlichen unter den gleichen vorherrschenden Bedingungen ab und zeigt tendenziell die gleichen charakteristischen Stoffwechselprodukte.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die an der Vergärung in unterschiedlichem Ausmaß beteiligten Mikroorganismen, deren Aktivitätsgrenze und Verhalten unter dem Einfluss von Sauerstoff.

Tabelle 1: Im Rahmen der Vergärung auftretende Mikroorganismen und deren Ansprüche an das Regime (nach STEINHÖFEL, 2008)

Mikrobengruppe	Verhalten zu Luft-O ₂	Aktivitätsgrenze (pH-Wert)	Kohlenhydrat-Vergärung	Eiweißabbau
Milchsäurebakterien	fakultativ bis obligat anaerob	3,0 - 3,6	stark zu Milchsäure, Alkohol, CO ₂ , H ₂ O, (Essigsäure)	ohne
Coli-Aerogenes-Gruppe (coliforme Keime)	fakultativ anaerob	4,3 - 4,5	stark zu Essigsäure, CO ₂ , H ₂ O (Ameisensäure)	ohne oder schwach
Clostridien				
Saccharolyten	obligat anaerob	4,2 - 4,4	stark zu Buttersäure, CO ₂ , 2 H (Essigsäure)	ohne
Proteolyten			ohne	stark zu Amin + CO ₂ , Carbonsäure + NH ₃
Fäulnisbakterien (<i>Pseudomonas</i> , <i>Alcaligenes</i> -Arten)	aerob bis fakultativ anaerob	4,2 - 4,8	stark	sehr stark
Hefen	aerob bis fakultativ anaerob	1,3 - 2,2	stark zu Alkohol, CO ₂ , H ₂ O (Acetaldehyd)	vorhanden
Schimmelpilze	obligat aerob	2,5 - 3,0	stark	stark

Abweichend vom regulären Verlauf der Silierung kann es durch verfahrenstechnische Fehler oder die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials zu einem unerwünschten Verlauf der Gärung kommen. Dieser ist häufig in der vermehrten Aktivität unerwünschter Mikroorganismen begründet und hat steigende Lagerungsverluste zur Folge. Mögliche Verlustursachen werden im folgenden Kapitel erläutert.

2.8.2 Verlustursachen

Die Beschreibung der Verlustursachen bezieht sich auf den generellen Prozess der Silierung, wird jedoch in diesem Kapitel speziell auf Zuckerrüben bezogen. Die Kennzeichen, Ursachen und Folgen einer Qualitätsminderung der Silage, welche auf einen unerwünschten Verlauf der Gärung zurückzuführen sind, finden sich in Tabelle 2.

Tabelle 2: Übersicht über Qualitätsminderungen von Silagen (nach NUSSBAUM, 2011)

Kennzeichen	Ursache	Folgen
Auftreten von Buttersäure	<ul style="list-style-type: none"> nasses und/oder verschmutztes Futter wenig Kohlenhydrate und Nitrat 	<ul style="list-style-type: none"> zu hoher pH-Wert übler Geruch Verderb möglich Energieverluste
Auftreten von Essigsäure	<ul style="list-style-type: none"> längerer Lufteinschluss beim Einlagern verlangsamte Ansäuerung 	<ul style="list-style-type: none"> Energieverluste (reduzierte Futteraufnahme)
Auftreten von Schimmel	<ul style="list-style-type: none"> k.A. 	<ul style="list-style-type: none"> Giftstoffe
Auftreten von Fäulnis	<ul style="list-style-type: none"> Eindringen von Wasser und Luft 	<ul style="list-style-type: none"> Energieverluste Verfaulen (Verfärbungen, modriger Geruch)
Auftreten von Alkohol	<ul style="list-style-type: none"> Vermehrung von Hefen unter Luftabschluss 	<ul style="list-style-type: none"> Nacherwärmung bei der Entnahme (<i>aerob</i>)
Nacherwärmung	<ul style="list-style-type: none"> Abbauprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> Wärmebildung Um- und Abbauprozesse Geruchsabweichungen erhöhter Keimbesatz, ggf. Toxine

Beeinflusst werden die Silagequalität und damit auch die Höhe der Verluste vom Zuckergehalt des zu silierenden Materials, dem Nitratgehalt und der Pufferkapazität. Nitratstickstoff beeinflusst den Gärverlauf positiv, da dieser über Nitrit zu Ammoniak verstoffwechselt wird, welches eine hemmende Wirkung gegenüber Buttersäurebakterien, Colibakterien und Listerien besitzt. Weiterhin wird die Gäreignung durch eine geringe Pufferkapazität positiv beeinflusst. Die Pufferkapazität hängt vom Eiweiß- und Mineralstoffgehalt, sowie dem Grad der Verschmutzung des Siliergutes ab. Je höher die Pufferkapazität, desto höher der Widerstand gegen eine Ansäuerung durch Milchsäurebakterien. Ein Kriterium zur Beurteilung der Silierfähigkeit ist das Verhältnis von Zucker

zur Pufferkapazität (Z/PK-Quotient). Je höher der Z/PK-Quotient ausfällt, desto besser lässt sich das Material silieren. (GALLER, 2011)

Aus diesem Grund ist bei Zuckerrüben nicht mit einer Fehlgärung zu rechnen, da diese nach THAYSEN (2011) neben ausreichend Nitrat über eine hohe Zuckerkonzentration und eine niedrige Pufferkapazität verfügen.

Hefen hingegen finden insbesondere durch den hohen Restzuckergehalt bei silierten Zuckerrüben gute Bedingungen zur alkoholischen Gärung. Sie sind nach GROSS (1974) auch mit einem sehr niedrigen pH-Wert verträglich und können damit auch nach abgeschlossener Milchsäuregärung (pH<4) Zucker und Milchsäure unter anaeroben Bedingungen zu Alkohol, Kohlensäure und Wasser abbauen.

Kennzeichen wie Schimmel, Fäulnis oder Nacherwärmung sind in der Regel nicht auf Eigenschaften des zu silierenden Materials zurückzuführen, sondern ergeben sich bei unzureichendem Verschluss des Silos bzw. in der Entnahmephase nach Öffnung des Silostocks.

Bei der Lagerung ganzer Zuckerrüben im Flachsilo oder im Folienschlauch kommen die Bildung und der Abfluss von Gärsäften als weitere Verlustursache in Betracht. Als Gärssaft wird dabei die säurehaltige Flüssigkeit bezeichnet, die durch Zellaufschluss oder Pressdruck im Rahmen der Gärfutterbereitung entsteht. Gelangt während der Lagerungs- oder Entnahmephase zusätzlich Niederschlagswasser in die Silage und vermischt sich dort mit den Silageinhaltsstoffen spricht man von Sickersaft. (NUSSBAUM, 2011)

Der Austritt von Sickersaft, welcher sich durch eine hohe Energiekonzentration kennzeichnet, ist charakteristisch für die Vergärung von Zuckerrüben (THAYSEN, 2011). Ein Abfluss von Sickersaft aus Zuckerrüben, der durch hohe Zuckergehalte gekennzeichnet ist, führt zu einer weiteren Reduzierung des Gehalts an organischer Trockensubstanz des verbleibenden Materials (WEIßBACH, 2009). Es gilt, jegliche Säfte, vor allem den Gärssaft auf Grund ihrer Umweltrelevanz und zur Vermeidung von Verlusten an Energie und Nährstoffen, abzuleiten und einer geeigneten Verwendung, wie der Einspeisung in den Fermenter der Biogasanlage, zuzuführen. Im Erdbecken und bei der Lagerung von Mus im geschlossenen Hochbehälter verbleibt der gesamte Gärssaft im Behälter und muss nicht aufgefangen werden.

3. Material und Methoden

Die in diesem Kapitel dargestellten Methoden und die verwendeten Materialien wurden dazu genutzt die Eignung verschiedener Zuckerrübensorten von zum Teil unterschiedlichen Standorten (Sorte x Standort = Variante) im Prozess der Aufbereitung und bei der Silierung zur Langzeitlagerung für die Nutzung in Biogasanlagen zu untersuchen.

Um den Einfluss der verschiedenen Aufbereitungsschritte, wie der mechanischen Trockenreinigung oder der Zerkleinerung auf die unterschiedlichen Varianten vergleichend zu untersuchen, wurden deren Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen und der für die Zerkleinerung benötigte Energieaufwand im Labor ermittelt. Untersuchungen zum Erdanhang und dessen Anteil in der durch den Genotyp bedingten Wurzelrinne wurden ebenfalls durchgeführt.

Zur Beurteilung der, für die Langzeitlagerung notwendigen, Silierung erfolgten Versuche zur Konservierung von Zuckerrübenmus der verschiedenen Sorten unter anaeroben Bedingungen. Die Berechnung der dabei auftretenden Verluste war ebenfalls Bestandteil der angewendeten Methode.

3.1 Kennwerte bei der Aufbereitung von Zuckerrüben

Zur Einordnung der nachfolgend aufgeführten Versuche und der darin ermittelten Ergebnisse, wird darauf hingewiesen, dass die drei Sorten eines jeden Züchters in den Jahren 2013 und 2014 von jedem der Züchter auf einem eigenen Standort angebaut wurden. Die Kombination aus Standort und Genotyp wird im Folgenden als Variante bezeichnet. In Tabelle 3 sind die relevanten Anbaubedingungen für das Jahr 2014 als grundlegende Information aufgeführt. Die entsprechende Tabelle für das Jahr 2013 findet sich in Kapitel 3.2.3. Eine tabellarische Unterteilung für das Jahr 2015 entfällt, da in diesem Jahr alle Sorten auf einem Standort angebaut wurden.

Tabelle 3: Kennzeichnung der Sorten, des Standorts und der Erntetermine im Jahr 2014

Kennzeichnung Sorte*	Standort	Bodenart	Ackerzahl	Ernte
SY 1	Bad Salzuffen	sandiger Lehm	75	13.10.14
SY 2				
SY 3				
VH 1	Euerfeld (Würzburg)	schluffiger Lehm	82	07.10.14
VH 2				
VH 3				
K 1	Einbeck	schluffiger Lehm	82	26.10.14
K 2				
K 3				
ST 1	Söllingen	schluffiger Lehm	92	26.10.14
ST 2				
ST 3				

*SY=Syngenta, VH=SES VanderHave, K=KWS SAAT SE, ST=Strube GmbH & Co. KG

3.1.1 Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen

Die Bestimmung der Festigkeit des Abschlussgewebes (Periderm) der Rüben erfolgte mittels eines Stempeltests mit einer Materialprüfmaschine (Zwick Roell, Ulm, Deutschland, siehe Abbildung 11). Dabei handelt es sich um eine Druckprüfung. Erfasst wird bei dieser destruktiven Methode die auftretende Kraft (N) über die Deformation (mm) der Rübe mittels eines Stempels mit einem Durchmesser von 8 mm und einer ebenen Stirnfläche. Ziel der Untersuchung war die Feststellung der maximal auftretenden Kraft (F_{\max}) während der Deformation des Rübengewebes, die auftritt, wenn es zum Bruch der Zellen und somit zum abrupten Kraftabfall kommt (siehe Abbildung 10).

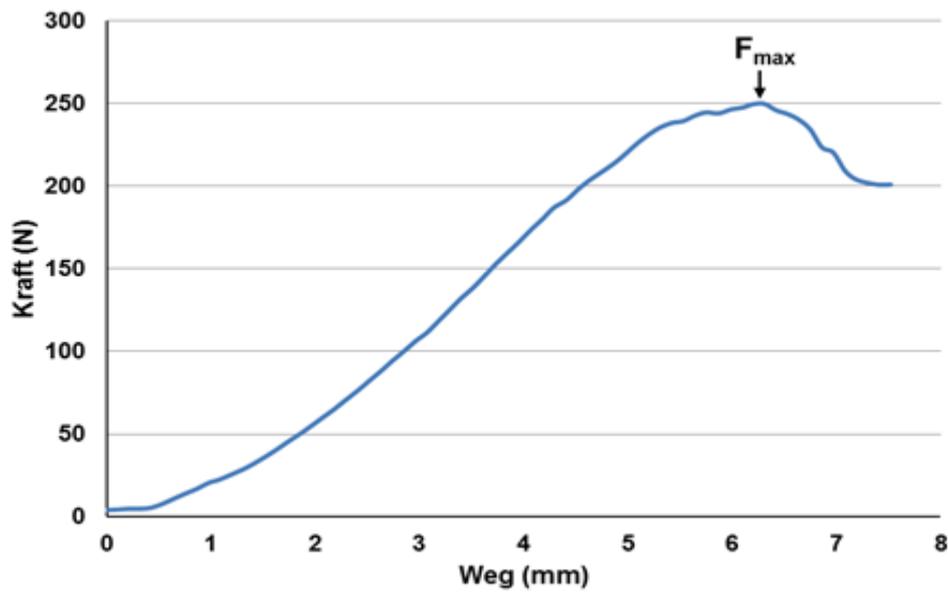


Abbildung 10: Typischer Verlauf der Kraft-Weg-Kurve zur Erfassung der maximalen Kraft (F_{\max})

Die Beprobung erfolgte an jeweils 25 Einzelrüben pro Sorte, sowie im Jahr 2013 an jeweils fünf Rüben pro Sorte mit einer vierfachen Wiederholung an der Einzelrübe. Für eine stabile und störungsfreie Beprobung der Rüben wurden diese auf einem Sandkissen gelagert (siehe Abbildung 11). Um ein Auftreffen des Stempels mit seiner gesamten Fläche auf das Rübenengewebe sicherzustellen, fand die Beprobung der Rüben immer an der Stelle des Rübenkörpers mit dem größten Durchmesser statt. Dadurch konnte ein Auftreffen des Stempels im Winkel von 90° zu dem zu beprobenden Material annähernd erreicht werden.

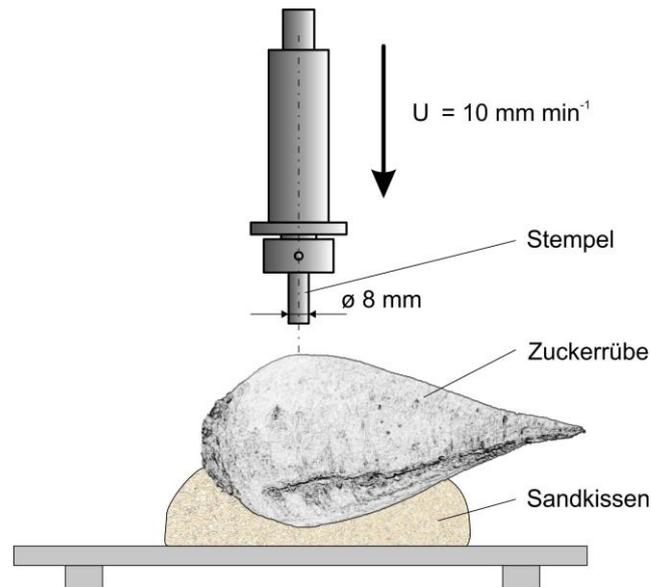


Abbildung 11: Anordnung von Zuckerrübe und Stempel zur Überprüfung der Festigkeit des Abschlussgewebes

Die Steuerung der Materialprüfmaschine erfolgte über den zugehörigen PC mit der Materialprüfsoftware testXpert Maschine (Version: testXpert V12.0). Dabei fanden die Untersuchungen unter folgenden Bedingungen statt:

LE-Geschwindigkeit: 500 mm min^{-1}

Vorkraft: $0,5 \text{ N}$

Vorkraft Geschwindigkeit: 150 mm min^{-1}

Prüfgeschwindigkeit: 10 mm min^{-1}

Kraftabschaltswelle: $20 \% \text{ von } F_{\text{max}}$

Durch die Definition der Kraftabschaltswelle auf den Wert von $20 \% \text{ unter } F_{\text{max}}$ wurde eine Begrenzung der Versuchsdauer gewährleistet. Gleichzeitig wurde durch den Bereich von $20 \% \text{ eine ausreichende Toleranz für eventuell während der Messung auftretende, kleinere Schwankungen berücksichtigt. Somit konnte eine zuverlässige Erfassung der tatsächlichen } F_{\text{max}}\text{-Werte sichergestellt werden, welche eine Aussage über die Bruchkraft der Zellen der jeweiligen Sorte zulässt. Die Untersuchungen erfolgten jeweils innerhalb der ersten fünf Tage nach Ernte der Rüben. Geringe Abweichungen von bis zu zwei Tagen konnten aus praktischen Gründen nicht vermieden werden.}$

Im Versuchsjahr 2014 wurde der Umfang der Untersuchungen um den Faktor der Lagerungszeit erweitert. Aus diesem Grund erfolgte eine Beprobung der Rüben innerhalb von fünf Tagen nach der Ernte (1. Phase), sowie nach einer Lagerungszeit von vier (2. Phase) und acht Wochen (3. Phase). Die Lagerung der Rüben erfolgte nach der ersten Untersuchungsphase in einem Kühlhaus bei $4 \text{ bis } 6^\circ\text{C}$. Während der zweiten und dritten Untersuchungsphase wurde auf eine vierfache Wiederholung

des Stempeltests an fünf Einzelrüben verzichtet, da in den vorherigen Versuchsreihen nur geringe Schwankungen festgestellt wurden.

Im Jahr 2015 erfolgte die Beprobung wieder wie im Jahr 2013.

3.1.2 Erdanhang in der Wurzelrinne

Die Bestimmung des in der Wurzelrinne enthaltenen Erdanteils dient als Merkmal zur Beurteilung der untersuchten Rüben hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz als Energierübe in Biogasanlagen. Ein hoher Anteil anhaftender Erde in der Wurzelrinne muss dabei nicht als Ausschlusskriterium gewertet werden, es wird jedoch angestrebt möglichst geringe Mengen anhaftender Erde in den Fermenter einzutragen. Die im Folgenden beschriebene Methode dient dazu verschiedene Rübensorten von unterschiedlichen Standorten auf ihren Erdanhang in der Wurzelrinne zu untersuchen, wobei die Höhe des Erdanhangs von der Bodenart, den Witterungsverhältnissen bei der Ernte und den sortencharakteristischen Ausprägungen der Wurzelrinne abhängig ist.

Um den in der Wurzelrinne anhaftenden Erdanhang zu bestimmen, wurden die zu untersuchenden Rüben zunächst mittels einer Rübenwaschanlage (Abbildung 12) nach IIRB-Standard gewaschen, um am Rübenkörper anhaftende Erde zu entfernen. Gewaschen wurden je 20 Rüben pro Waschgang mit einer fünffachen Wiederholung. Somit wurden pro Variante 100 Rüben bonitiert. Der Anteil von 20 Rüben pro Waschgang ergab sich aufgrund des Fassungsvermögens der in Abbildung 12 dargestellten Waschtrommel.

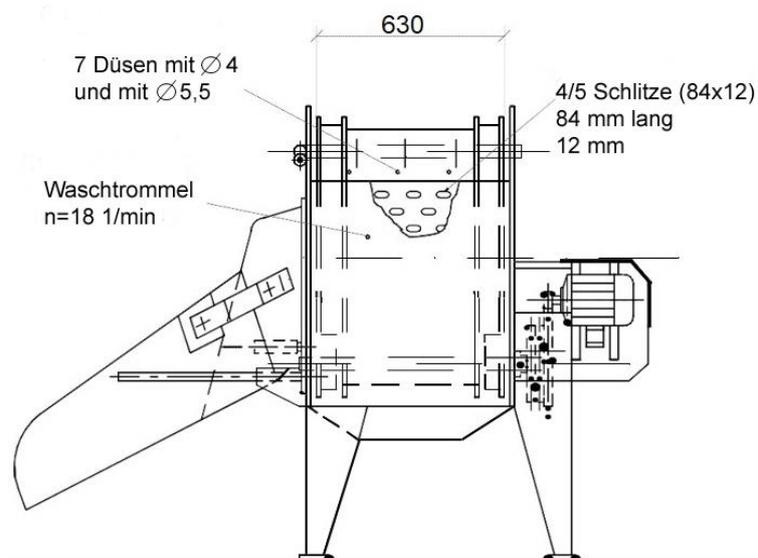


Abbildung 12: Rübenwaschanlage nach IIRB-Standard

Das Prinzip der Waschanlage basiert auf einer sich um eine horizontale Achse drehenden, perforierten Metalltrommel und dem Einsatz von Wasser, welches mit Druck permanent auf die Rüben aufgesprüht wird. Durch die Perforation der Trommel kann das Wasser nach unten aus der Anlage entweichen und trägt abgewaschene Erde und andere Bestandteile in einen Abfangkorb aus der Anlage aus.

Das Befüllen der Anlage erfolgt über einen an der Rückseite angebrachten Trichter (in der Abbildung nicht enthalten), über den die Rüben von oben in die Anlage eingefüllt werden können. Die zur Entnahme der Rüben angebrachte Öffnung an der Vorderseite der Wäsche ist hierbei geschlossen. Diese kann zur späteren Entnahme seitlich verschoben werden, sodass sich am tiefsten Punkt der Waschtrommel eine ausreichend dimensionierte Öffnung ergibt, aus der die Rüben entnommen werden können.

Um eine ausreichende Reinigung der Rüben zu erreichen, wird ein Eingangsdruck des Wassers von 6 bar benötigt. Die Waschdauer betrug drei Minuten pro Waschgang. Um diese Bedingungen für alle Waschgänge konstant sicherzustellen, wurde die eingesetzte Pumpe mit einer Zeitschaltuhr versehen. Die Zufuhr des Wassers in die Waschtrommel erfolgte über ein innerhalb der Trommel gelegenes, perforiertes Rohr, welches das zugeführte Wasser über die gesamte Tiefe der Trommel auf die zu waschenden Rüben abgab.



Abbildung 13: In der Wurzelrinne nach der Wäsche anhaftende Erde (links) und manuelle Separation der Erde mittels Schlitz-Schraubendreher (rechts)

Nach dem Waschvorgang wurden die Rüben aus der Anlage entnommen und der in der Wurzelrinne verbleibende Erdanteil manuell herausgetrennt (siehe Abbildung 13). Als geeignetes Werkzeug erwies sich ein handelsüblicher Schlitz-Schraubendreher um die anhaftende Erde möglichst vollständig aus der Wurzelrinne zu entfernen. Die in Einzelfällen am Rübenkörper, also außerhalb der Wurzelrinne anhaftende Erde, wurde dabei nicht berücksichtigt. Die Erde der je 20

Rüben eines Waschgangs wurde in einer zuvor eingewogenen Aluminiumschale gesammelt. Anschließend wurden die so gewonnenen Erdproben im Trockenschrank bei 105°C bis zur Gewichtskonstanten getrocknet. Nach der Trocknung wurde das Gewicht der Proben ermittelt, sodass pro untersuchter Sorte Erdproben in fünffacher Wiederholung vorlagen.

Um die in der Wurzelrinne anhaftende Erde in Bezug zum Gesamterdanhang setzen zu können, wurde dieser zuvor an 25 Rüben je Variante bestimmt. Dazu wurden die Rüben zunächst mit dem gesamten Erdanhang gewogen. Anschließend erfolgte eine Reinigung der gesamten Rübe mittels Hochdruckreiniger, um die gesamte anhaftende Erde zu entfernen. Nach einer Trockenphase wurden die Rüben erneut gewogen und durch Subtraktion der Werte der Gesamterdanhang bestimmt.

3.1.3 Energieaufwand zur Zerkleinerung

Die Untersuchungen zur Feststellung des für die Zerkleinerung der Zuckerrüben benötigten Energieaufwandes erfolgten ebenfalls durch den Einsatz der Materialprüfmaschine in Kombination mit einer Kramer-Scherzelle. Bei der Kramer-Scherzelle (Abbildung 14) handelt es sich um eine Apparatur, die zur Bestimmung der Textur von Nahrungsmitteln eingesetzt wird.

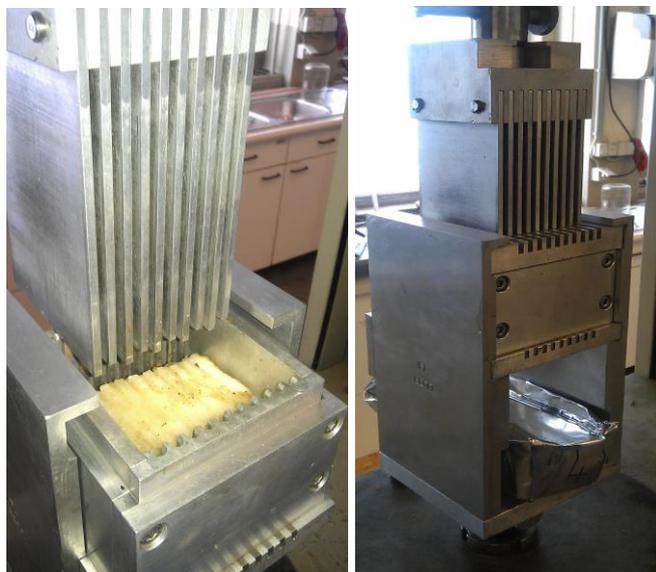


Abbildung 14: Kramer Scherzelle in offener Form mit eingelegter Probe (links) und in geschlossener Form (rechts)

Sie besteht aus einer oben und unten geschlitzten Zelle mit einer Innenabmessung von 6,5 cm x 6,5 cm x 6,5 cm, wobei der obere Teil der Zelle abnehmbar ist, so dass das zu beprobende Material eingelegt werden kann. Ein Schneidenhalter führt die zehn rechteckigen Schneiden, welche in ihrer Abmessung den in der Zelle vorhandenen Schlitzten entsprechen. Sowohl Zelle als auch

Schneidenhalter wurden in eine Materialprüfmaschine eingespannt. Da das zu beprobende Material auf diese Weise zeitgleich von zehn Schneiden durchschnitten wird, werden lokale Texturabweichungen ausgeglichen (ZWICK ROELL, 2016). Da die Abmessungen der Scherzelle das Volumen des zu beprobenden Materials begrenzen, wurde aus jeweils 15 Rüben pro Sorte ein Würfel mit einer Kantenlänge von 5 cm aus dem Inneren der Rübe herausgeschnitten. Um eine möglichst genaue Abmessung des Probenmaterials und eine glatte Schnittkante zu gewährleisten, wurden die Würfel mittels einer Bandsäge aus der Rübe herausgetrennt. Dabei wurden Abweichungen von der vorgegebenen Kantenlänge von maximal 1 mm toleriert. Das Probenmaterial wurde aus praktischen Gründen aus dem Bereich der Rübe mit dem größten Durchmesser gewonnen. Mit dieser Methode konnte sichergestellt werden, dass unabhängig von der Wuchsform der Rüben über alle Sorten vergleichbare Proben gewonnen werden konnten. Die Beprobung der Würfel erfolgte vertikal zum Rübenkörper, also vom Blattansatz zur Wurzelspitze. Die Ausrichtung in der Zelle erfolgte anhand der im Rübengewebe sichtbaren konzentrischen Bast- und Holzringe.

Für den Prüfvorgang wurden an der Materialprüfmaschine folgende Einstellungen vorgenommen:

Vorkraft F_V : 5 N

Geschwindigkeit bis F_V : 150 mm min^{-1}

Prüfgeschwindigkeit: 15 mm min^{-1}

Bruchabschaltswelle: 15 % F_{\max}

Oberer Kraftskalenwert: 8000 N

Max. Längenänderung: 40 mm

Die vorgenommenen Einstellungen ergaben sich aus Vorversuchen sowie zum Schutz der Prüfmaschine vor Beschädigungen. Die Definition der Bruchabschaltswelle auf den Wert von 15 % unter F_{\max} diente dazu, die Messungen zeitlich zu begrenzen. Es wurde davon ausgegangen, dass bei einem Kraftabfall von unter 15 % von F_{\max} ein Bruch bzw. eine Zerschering des Probenmaterials stattgefunden hat, welcher die Bedingung der Zerkleinerung und des dazu benötigten Energieaufwandes erfüllt.

Mit Hilfe eines Kraftaufnehmers (bis 1 kN) wurde während der Messung für jeden Würfel ein Kraft-Weg-Diagramm erstellt, welches anschließend nach Übertragung auf den Rechner ausgewertet werden konnte. Als vergleichender Parameter wurde die bei der Zerkleinerung verrichtete Arbeit herangezogen. Dieser wurde nach der in Kapitel 2.7.1 angeführten Formel (1) aus dem Integral unter dem Kraft-Weg-Diagramm errechnet. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mittels Microsoft Excel und IBM SPSS Statistics 23.0.

Versuch zum Einfluss der Schnittrichtung

Zusätzlich zu den beschriebenen Versuchen in der Kramer-Scherzelle wurde im Rahmen einer Abschlussarbeit von CLEVER (2015) ermittelt, ob der Energiebedarf für die Zerkleinerung von der Schnittrichtung abhängig ist. Dazu wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 5 cm (Toleranz ± 1 mm) aus den Zuckerrüben herausgetrennt. Die Würfel wurden anschließend mit der Materialprüfmaschine unter dem Einsatz keilförmiger Messer (Abbildung 15) untersucht. Da neben der Zerkleinerungsrichtung auch der Einfluss von Zerkleinerungsgeschwindigkeit und Keilwinkel (β) (siehe Abbildung 15) des Messers untersucht wurden, fanden die Untersuchungen mit je 15 Zuckerrüben je Kombination statt. Verwendet wurde die Sorte Pauletta.

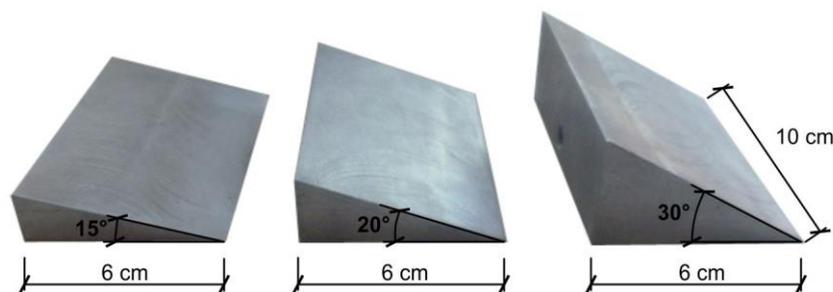


Abbildung 15: Die im Versuch verwendeten Messer mit Keilwinkeln von 15°, 20° und 30° (von links nach rechts) (CLEVER, 2015)

Folgende Kombinationen wurden dabei untersucht:

Tabelle 4: Kombinationen zur Untersuchung der Schnittkräfte bei der Zerkleinerung (verändert nach CLEVER, 2015)

Kombination	Keilwinkel	Geschwindigkeit	Schnittrichtung	n
1	15°	5 mm s ⁻¹	horizontal	15
2	15°	30 mm s ⁻¹	horizontal	15
3	15°	5 mm s ⁻¹	vertikal	15
4	15°	30 mm s ⁻¹	vertikal	15
5	20°	5 mm s ⁻¹	horizontal	15
6	20°	30 mm s ⁻¹	horizontal	15
7	20°	5 mm s ⁻¹	vertikal	15
8	20°	30 mm s ⁻¹	vertikal	15
9	30°	5 mm s ⁻¹	horizontal	15
10	30°	30 mm s ⁻¹	horizontal	15
11	30°	5 mm s ⁻¹	vertikal	15
12	30°	30 mm s ⁻¹	vertikal	15

Die Variation der Schnittrichtung erfolgte horizontal und vertikal zum Rübenkörper. Wie bei der Kramer-Scherzelle wurde die zur Zerkleinerung benötigte Kraft über den Weg mittels

Kraftaufnehmer an der Materialprüfmaschine erfasst. Die geleistete Arbeit wurde nach der in Kapitel 2.7.1 angeführten Formel (1) aus der Fläche unter dem Kraft-Weg-Diagramm errechnet.

3.2 Fermentationseigenschaften

Zweiter Schwerpunkt der Untersuchungen war die Erfassung und Dokumentation des Konservierungsprozesses und die damit verbundenen Verluste an Trockenmasse und Methanbildungspotenzial in Abhängigkeit vom Genotyp und dessen Zuckergehalt bei der Einlagerung. Besonderes Augenmerk lag auf der qualitativen und quantitativen Bestimmung der während der Silierung gebildeten organischen Säuren und Alkohole vor dem Hintergrund unterschiedlicher Zuckergehalte im Ausgangsmaterial. Auch der Verlauf und die Geschwindigkeit der Silierung wurden für den jeweiligen Genotyp untersucht.

3.2.1 Aufbereitung der Zuckerrüben für die Silierung

Die Zuckerrüben wurden nach der Ernte in Big Bags aufbewahrt und ca. zwei Wochen nach der Ernte verarbeitet. Dies sollte dem in der Praxis üblichen Zeitraum zwischen Ernte und Silierung entsprechen. Da alle Rüben nur mit geringen Mengen Erde behaftet waren (bis 5 %), wurde keine Reinigung durchgeführt.

Jeweils 100 Zuckerrüben je Sorte wurden mit einem für die Tierfütterung konzipierten Rübenmuser (BISO) zerkleinert. Um eine ausreichende Zerkleinerung zu erreichen und somit eine feine Struktur des Rübenmuses zu gewährleisten, wurde das Rübenmaterial jeweils drei Mal dem Muser zugeführt. Nach dem Musen waren ca. 80 % der Partikel kleiner als 5 mm und ca. 20 % kleiner als 15 mm. Aus der Mischprobe der 100 gemusterten Rüben wurde eine Probe von ca. einem Kilogramm entnommen, luftdicht verpackt und umgehend eingefroren, um beginnende Umsetzungsprozesse zu unterbinden.

3.2.2 Versuche zur Silierung unter anaeroben Bedingungen

Die Durchführung der Silierversuche erfolgte in verschließbaren Glasbehältern (Weck, Wehr-Öflingen, Deutschland) mit einem Fassungsvermögen von 1,5 L in Anlehnung an die DLG-Richtlinie für die Prüfung von Siliermitteln auf DLG-Gütezeichen-Fähigkeit (DLG, 2013). Die Gläser wurden dabei jeweils mit 1000 g Rübenmus gefüllt und mittels Gummidichtung und Metallklammern verschlossen. Der Füllstand betrug ca. 75 % des Behältervolumens, um einen Verlust der

entstehenden Silage durch Übersäumen zu vermeiden. Das bei der Silierung entstehende Gas konnte per Überdruck durch die Dichtungen entweichen. Die Lagerung der Silage erfolgte über einen Zeitraum von 90 Tagen in einem Klimaschrank (BINDER, Tuttlingen, Deutschland) bei 15°C. Eine Beeinflussung der Ergebnisse durch schwankende Umwelteinflüsse konnte somit ausgeschlossen werden. Für jede Variante erfolgte die Anlage des Versuchs in vierfacher Wiederholung (4 Gläser mit je 1 kg Zuckerrübenmus) aus dem Mus der 100 zerkleinerten Zuckerrüben.

3.2.3 Messung des pH-Werts

Zur Beurteilung des Silierungsprozesses wurde der pH-Wert der angesetzten Silage und dessen Entwicklung als Kriterium herangezogen.

Im Versuchsjahr 2013 fanden Versuche zur Entwicklung des pH-Werts während der Silierung der einzelnen Sorten statt. In diesem Jahr wurden jeweils drei Sorten von jedem der beteiligten Züchter auf einem Standort angebaut. Daraus ergibt sich ein Umfang von 12 Varianten. Die Variation von Sorten, Standorten und Erntezeitpunkten wurde gewählt, um heterogene Ausgangsbedingungen zu schaffen (siehe Tabelle 5). Der Anbau der Zuckerrüben erfolgte in Streifenversuchen in vierfacher Wiederholung. Aussaat, Düngung und Pflanzenschutz erfolgten nach guter fachlicher Praxis. Die Ernte wurde mit Parzellenrodern durchgeführt. Die Zuckerrüben wurden dabei lediglich entblattet.

Tabelle 5: Kennzeichnung der im Versuch eingesetzten Sorten, des Standorts und des Erntetermins im Jahr 2013

Kennzeichnung Sorte	Standort	Bodenart	Ackerzahl	Ernte
SY 1	Bad Salzuflen	Löss	76-80	14.10.13
SY 2				
SY 3				
VH 1	Euerfeld (Würzburg)	schluffiger Lehm	82	07.10.13
VH 2				
VH 3				
K 1	Einbeck	Löss/ Lehm	82	01.11.13
K 2				
K 3				
ST 1	Söllingen	Lehm	85	25.10.13
ST 2				
ST 3				

Die Messung des pH-Werts erfolgte umgehend im frischen Rübenmus mit einer pH-Einstabmesskette (SI-Analytics GmbH, Modell: BlueLine 21, Mainz, Deutschland). Danach wurde das Mus, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, siliert.

Während der ersten acht Tage nach Beginn des Versuchs wurden die Gläser einmal täglich geöffnet und der pH-Wert gemessen. Dabei wurden die Gläser nacheinander und nur für den Zeitraum der Messung geöffnet und anschließend wieder verschlossen. Da sich der pH-Wert nach ca. acht Tagen auf einem relativ konstanten Niveau einstellte, wurde auf weitere Messungen des pH-Werts verzichtet, um eine zusätzliche Beeinflussung der Silage durch eintretenden Sauerstoff zu verhindern.

Nach der Lagerungszeit von 90 Tagen wurden die Gläser erneut geöffnet und der pH-Wert in dem, zu diesem Zeitpunkt vollständig silierten, Rübenmus erfasst. Zur Darstellung der Ergebnisse wurde der pH-Wert jeweils aus dem Mittel der vier Wiederholungen errechnet. Für die abschließende Analyse der Silagen im Labor wurde aus den vier Wiederholungen je Variante eine Mischprobe gebildet, luftdicht verpackt und umgehend eingefroren, um eine Umsetzung der Silage durch Kontakt mit Sauerstoff zu verhindern.

Sowohl die Proben des frischen, noch nicht silierten Materials, als auch die Mischproben der fertigen Silagen wurden einem externen Labor zur Analyse übergeben. Bei dem Labor wurde auf das Analytiklabor für Landwirtschaft und Umwelt „Blgg Deutschland GmbH“ zurückgegriffen, da in diesem Labor bereits Erfahrungen mit der Analyse von Zuckerrübensilage aus anderen Projekten vorlagen. Die Analyse umfasste die Bestimmung des Zuckergehalts nach Luff-Schoorl in den frischen Zuckerrüben, sowie der Restzuckergehalte und der organischen Säuren mittels Photometrie und Gaschromatographie in der Silage.

Die Versuche zum Verlauf des pH-Werts wurden aufgrund der hohen Ähnlichkeit in den folgenden Versuchsperioden nicht wiederholt.

3.3 Bestimmung von Lagerungsverlusten

Zur Bestimmung der während der Konservierung auftretenden Verluste, wurde in den Jahren 2014 und 2015, anknüpfend an die Untersuchungen zum Verlauf der Silierung, das Methanbildungspotenzial im frischen und silierten Rübenmus in Kombination mit einer Massenbilanzierung bei der Ein- und Auslagerung des Materials berechnet. Dabei wurden die gleichen Sorten genutzt wie im Jahr 2013. Auch das Versuchsdesign entsprach dem aus dem Jahr 2013. Im Jahr 2014 wurden die Zuckerrüben wie bereits 2013 von jedem der Züchter auf einem eigenen Standort angebaut. Im Jahr 2015 fand der Anbau der Sorten jedoch auf einem

gemeinsamen Standort (Bad Salzuflen) statt. Die Aussaat der Zuckerrüben erfolgte in diesem Jahr am 18.04.15. Düngung und Pflanzenschutz erfolgten nach guter fachlicher Praxis. Die Ernte fand am 25.10.15 statt und wurde mit einem Parzellenroder durchgeführt. Die Rüben wurden entblattet und nicht geköpft. Die Bodenart des Standorts war Löss mit einer Ackerzahl von 62. Bis zur Verarbeitung am 04.11.15 erfolgte die Lagerung der Zuckerrüben wie im Jahr 2013 in Big Bags im Freiland. Alle Schritte der Aufbereitung und Silierung erfolgten analog zum Versuch aus dem Jahr 2013.

Das in die Glasgefäße eingefüllte Material wurde mit einer Genauigkeit von 0,1 g verwogen. Nach dem Verschluss erfolgte über den gesamten Versuchszeitraum keine erneute Öffnung der Gläser. Die Lagerung der Gläser fand unter konstanten Temperaturbedingungen bei 15°C im Klimaschrank statt. Bei der Öffnung der Gläser nach 90 Tagen, wurde umgehend der pH-Wert ermittelt, sowie das Material zurückgewogen. Aus dem silierten Material der vier Wiederholungen wurde eine Mischprobe gebildet, luftdicht verpackt und eingefroren. Da die Analyse der Proben mit hohen Kosten verbunden ist, konnte keine Analyse aller Wiederholungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund erfolgten die Laboranalysen jeweils aus den Mischproben des frischen sowie des silierten Materials. Aus Tabelle 6 ist zu entnehmen, welche Bestandteile im frischen und silierten Rübenmus analysiert wurden.

Tabelle 6: Analytierte Parameter in frischem und siliertem Rübenmus (2013-2015)

Analyseparameter	Mus, frisch	Mus, siliert
Trockensubstanz (TS/TS _k *)	x	x
Rohasche (XA)	x	x
Zucker nach VDLUFA (Luff Schoorl)	x	x
ADForg*	x	x
Gärsäuren (MS, ES, PS, BS)*		x
Alkohole (Methanol, Ethanol, Propanol, Butanol, 1,2-Propandiol, 2,3-Butandiol)		x

*TS_k=korrigierte Trockensubstanz, ADF_{org}=Acid Detergent Fiber_{organisch}, MS=Milchsäure, ES=Essigsäure, PS=Propionsäure, BS=Buttersäure

Anhand der Laborergebnisse und den bei der Ein- und Auslagerung bestimmten Gewichten des Rubenmuses erfolgte die Berechnung der Methanbildungspotenzialverluste nach WEIßBACH (2009). Grundlage zur Berechnung des Methanbildungspotenzials war jeweils die Trockensubstanz bei der Ein- und Auslagerung der Silagen.

3.3.1 Korrektur des Trockensubstanzgehalts in Zuckerrübensilagen

Bei der Bestimmung des TS-Gehaltes von Silagen sind flüchtige organische Substanzen wie Säuren und Alkohole zu berücksichtigen. Da die organische Trockensubstanz bei Silagen aus Zuckerrüben bis zur Hälfte aus flüchtigen Gärprodukten bestehen kann, muss deshalb der TS-Gehalt korrigiert werden. Die Flüchtigkeitsquote von niederen Fettsäuren liegt, wie bei Maissilagen, bei 95 %. Die für den Durchschnitt aller Silagearten ermittelte Wasserdampflichkeit der Milchsäure von 8 % kann auf Zuckerrübensilagen übertragen werden und die Flüchtigkeitsquote für einwertige Alkohole wird, wie bei Mais- und Grassilagen, mit 100 % veranschlagt. Zweiseitige Alkohole kommen nur in Spuren vor, daher wird das vollständige Verdampfen für die Summe aller Alkohole angenommen. (WEIßBACH & STRUBELT, 2008)

Es ergibt sich folgende Gleichung:

$$TS_k = TS_n + 0,95 NFS + 0,8 MS + 1,00 AL \quad (2)$$

NFS=Summe der Gehalte an niederen Fettsäuren

MS=Milchsäure

AL=Summe der Gehalte aller Alkohole

Alle Gehalte werden in g je kg_{FM} in die Gleichung eingesetzt (WEIßBACH & STRUBELT, 2008).

Durch Korrektur des TS-Gehalts lässt sich die tatsächlich in den Silagen enthaltene Trockensubstanz bestimmen. Diese bildet die Grundlage zur massebilanzierten Verlustbestimmung. Ohne Korrektur der TS um die flüchtigen Bestandteile würden die bei der Silierung aufgetretenen Verluste deutlich überschätzt.

3.3.2 Bestimmung des Methanbildungspotenzials

Anhand der Gewichtserfassung des frischen und des silierten Materials erfolgte eine Bestimmung der aufgetretenen Verluste nach WEIßBACH (2009).

Dabei dient die fermentierbare organische Trockensubstanz (FoTS) als Grundlage der Berechnung. WEIßBACH (2009) geht von einer Verdaulichkeit der organischen Substanzen von über 90 % aus. Die FoTS wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$FoTS = 991 - XA - 0,50 ADF_{org} \quad (3)$$

XA=Rohasche in g kg⁻¹ TS

ADF_{org}=Acid Detergent Fiber (organisch) in g kg⁻¹ TS

Als potenzielle Gasausbeute bei frischen Zuckerrüben können ca. 375 Liter Methan, bzw. 750 Liter Biogas je kg FoTS angenommen werden (WEIßBACH, 2009). Deswegen errechnet sich das spezifische Methanvolumen für frische Rüben mit der Gleichung:

$$V_{\text{CH}_4}=0,375 \text{ FoTS} \quad (4)$$

Bei Silagen sind Zuschläge für den enthaltenen Alkohol zu machen. Ethanol liefert je Masseinheit ca. 86 % mehr Methan als Saccharose (WEIßBACH, 2009). Darum gilt:

$$V_{\text{CH}_4}=0,375 (\text{FoTS}+0,86 \text{ AL}) \quad (5)$$

Durch Auflösen der Klammern ergibt sich:

$$V_{\text{CH}_4}=0,375 \text{ FoTS}+0,32 \text{ AL} \quad (6)$$

V_{CH_4} =spezifisches Methanvolumen unter Normbedingungen in l kg⁻¹ TS

l_N =Normliter

AL=Summe der Gehalte aller Alkohole in g kg⁻¹ TS_k

FoTS=fermentierbare organische Trockensubstanz in g kg⁻¹ TS

Durch Einsetzen der Ergebnisse aus den Laboranalysen in die Gleichungen wurde das Methanbildungspotenzial der jeweiligen Masse bei der Einlagerung und bei der Auslagerung bestimmt. Die Differenz zwischen den beiden Ergebnissen ergab den jeweiligen Verlust an Methanbildungspotenzial. Der damit eng korrelierte Verlust von Trockensubstanz konnte ebenfalls anhand der Laborergebnisse und der jeweiligen Masse berechnet werden.

4. Ergebnisse

4.1 Basisdaten der eingesetzten Zuckerrübensorten in den Jahren 2013 bis 2015

Dieser Abschnitt enthält eine Übersicht über die durchschnittlichen Rübengewichte, -längen und -durchmesser aus den drei Versuchsjahren. Die Daten dienen zur grundlegenden Einordnung des verwendeten Rübenmaterials. Einzelne Werte werden dabei nicht erläutert. Die starken Schwankungen der durchschnittlichen Zuckerrübengewichte in den verschiedenen Jahren sind auf die Witterungsbedingungen während der Vegetationsperiode zurückzuführen. Besonders im Jahr 2014 wurden, aufgrund guter Wachstumsbedingungen, hohe durchschnittliche Rübengewichte erzielt, die zu einer überdurchschnittlichen Ernte in ganz Deutschland führten.

Die in den Tabellen dargestellten Ergebnisse ergeben sich als Mittel aus 25 Zuckerrüben je Sorte mit der jeweiligen Standardabweichung (s).

Tabelle 7: Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2013 (n=25)

Sorte	Ø Rübengewicht	s	Ø Rübenlänge	s	Ø Rübendurchmesser	s
VH 1	1108,28	403,70	22,99	5,68	12,68	1,44
VH 2	874,10	249,46	29,63	5,53	10,40	1,34
VH 3	1030,90	397,49	28,26	5,36	11,18	1,72
SY 1	1011,40	285,39	19,74	2,55	11,05	1,70
SY 2	948,82	294,34	19,25	2,74	11,27	1,36
SY 3	1056,18	321,47	19,74	3,32	11,42	1,47
K 1	1280,31	549,50	18,53	3,06	12,91	2,02
K 2	1213,76	651,08	19,49	2,88	11,83	1,71
K 3	1228,40	430,23	19,21	3,56	12,07	1,67
ST 1	1182,58	389,80	25,57	4,31	11,00	1,82
ST 2	1103,06	357,59	24,81	3,63	11,11	1,28
ST 3	1105,25	493,02	25,76	5,95	11,59	1,76

Tabelle 8: Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2014 (n=25)

Sorte	Ø Rübengewicht	s	Ø Rübenlänge	s	Ø Rübendurchmesser	s
VH 1	1329,80	451,69	28,15	5,75	12,96	1,95
VH 2	1251,95	303,24	33,43	6,82	10,80	0,99
VH 3	1327,86	261,91	31,17	6,41	11,91	1,02
SY 1	1793,37	578,16	21,86	3,22	13,99	2,19
SY 2	1283,10	352,43	17,85	2,55	12,38	1,68
SY 3	1621,84	568,16	20,13	3,26	13,99	2,29
K 1	1303,37	473,57	20,41	3,31	12,72	1,56
K 2	1396,20	668,27	21,05	4,10	12,92	2,00
K 3	1419,12	572,95	20,07	5,13	13,61	1,74
ST 1	1400,92	380,61	29,51	5,87	12,46	1,33
ST 2	1400,09	417,91	28,94	4,11	12,35	1,51
ST 3	1278,43	428,25	29,70	4,06	12,05	1,53

Tabelle 9: Durchschnittliches Rübengewicht, Rübenlänge und Rübendurchmesser mit den jeweiligen Standardabweichungen (s) im Jahr 2015 (n=25)

Sorte	Ø Rübengewicht	s	Ø Rübenlänge	s	Ø Rübendurchmesser	s
VH 1	1233,26	457,77	17,18	3,25	13,02	1,92
VH 2	1327,08	356,90	21,80	3,69	11,26	1,30
VH 3	1194,02	488,78	19,06	3,15	11,78	1,68
SY 1	1298,17	563,65	19,34	3,04	12,42	2,12
SY 2	1117,86	391,68	18,74	2,72	11,62	1,39
SY 3	1252,20	444,94	18,98	2,48	12,24	1,61
K 1	1328,55	513,47	18,74	3,08	13,06	1,93
K 2	1270,08	521,23	20,22	3,43	12,26	2,10
K 3	1293,45	468,76	19,80	2,42	12,44	1,73
ST 1	1295,56	484,57	19,48	2,98	11,56	1,49
ST 2	1281,78	478,97	19,16	3,05	12,00	1,62
ST 3	1167,90	481,98	17,68	3,17	12,40	2,08

4.2 Kennwerte der Aufbereitung

4.2.1 Anfälligkeit des Abschlussgewebes gegenüber mechanischen Beschädigungen

Ziel der Untersuchungen zur Festigkeit des Abschlussgewebes war, festzustellen, ob sich die verschiedenen Sorten bezüglich ihrer Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen unterscheiden. Da das Periderm, also die äußere Zellschicht der Zuckerrüben, das darunterliegende Gewebe vor mechanischen Schäden schützt, wurde die Festigkeit des Periderms mittels einer Druckprüfung (Stempeltest) getestet.

Zur Einordnung der Ergebnisse erfolgt zunächst die Darstellung der Ergebnisse aus der vierfachen Wiederholung des Stempeltests auf jeweils fünf Einzelrüben je Sorte. Die in Abbildung 16 dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die Sorte K 1. Das Kriterium zur Beurteilung der auf einer Einzelrübe auftretenden Streuung hinsichtlich der Gewebefestigkeit, stellt die jeweilige Standardabweichung dar. Da sich die Standardabweichungen über alle untersuchten Sorten hinsichtlich ihrer Ausprägung nur geringfügig voneinander unterscheiden, dienen die Ergebnisse der Sorte K 1 exemplarisch zur Veranschaulichung.

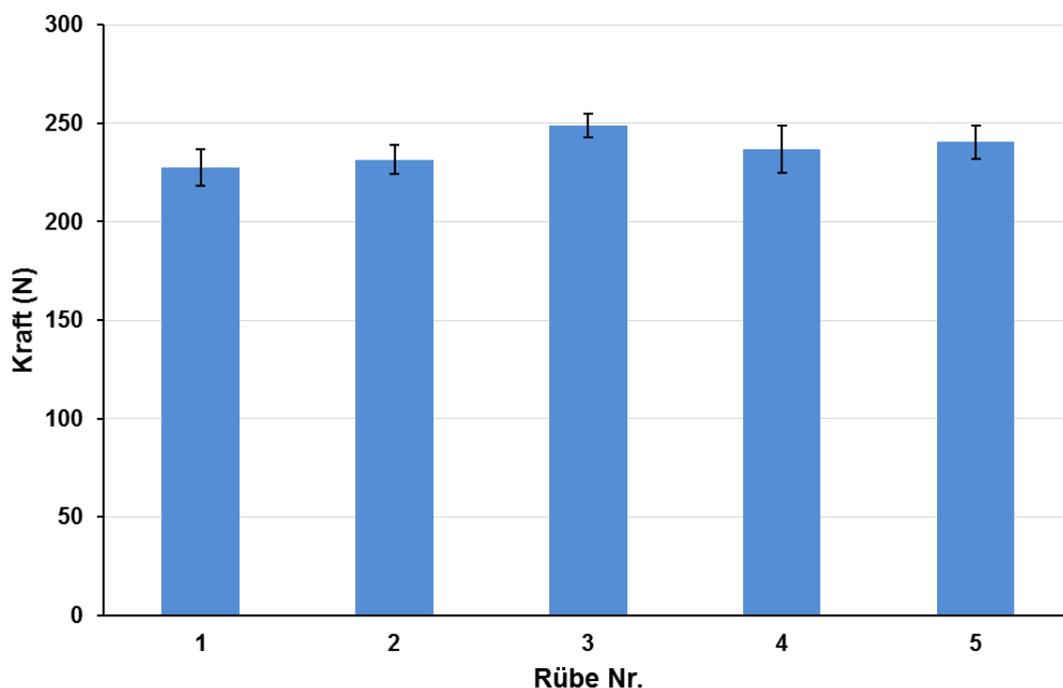


Abbildung 16: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt, aus vier Wiederholungen auf der Einzelrübe am Beispiel der Sorte K 1 im Jahr 2013

Wie in Abbildung 16 ersichtlich, schwanken die Mittelwerte der fünf untersuchten Rüben zwischen ca. 225 N und knapp 250 N. Die Streuung der Werte von bis zu 10 % spiegelt die natürliche Heterogenität des Rübenmaterials einer Sorte wieder. Die Standardabweichung, welche die Heterogenität des Abschlussgewebes auf der jeweiligen Einzelrübe beschreibt, fällt hingegen deutlich geringer aus. Hier liegt die Streuung bei allen Sorten im niedrigen bis mittleren einstelligen Prozentbereich. Die größte Standardabweichung beträgt bei Rübe Nummer 4 ± 5 %. Dies trifft mit wenigen Ausnahmen für alle in vierfacher Wiederholung untersuchten Rüben über alle Sorten zu. Aufgrund dieses Ergebnisses kann davon ausgegangen werden, dass die Anzahl von 25 Wiederholungen je Sorte ausreicht, um die geringfügigen Schwankungen auf der Einzelrübe durch den Stichprobenumfang auszugleichen.

In Folgenden finden sich die Ergebnisse der Stempeltestversuche aus den drei Versuchsjahren. Die dargestellten Ergebnisse ergeben sich als arithmetisches Mittel der maximalen Kraft aus 25 Wiederholungen, bei der es zum Bruch der äußeren Zellschicht kam. Die Darstellung für die Jahre 2013 und 2014 erfolgt je nach Standort in unterschiedlichen Mustern.

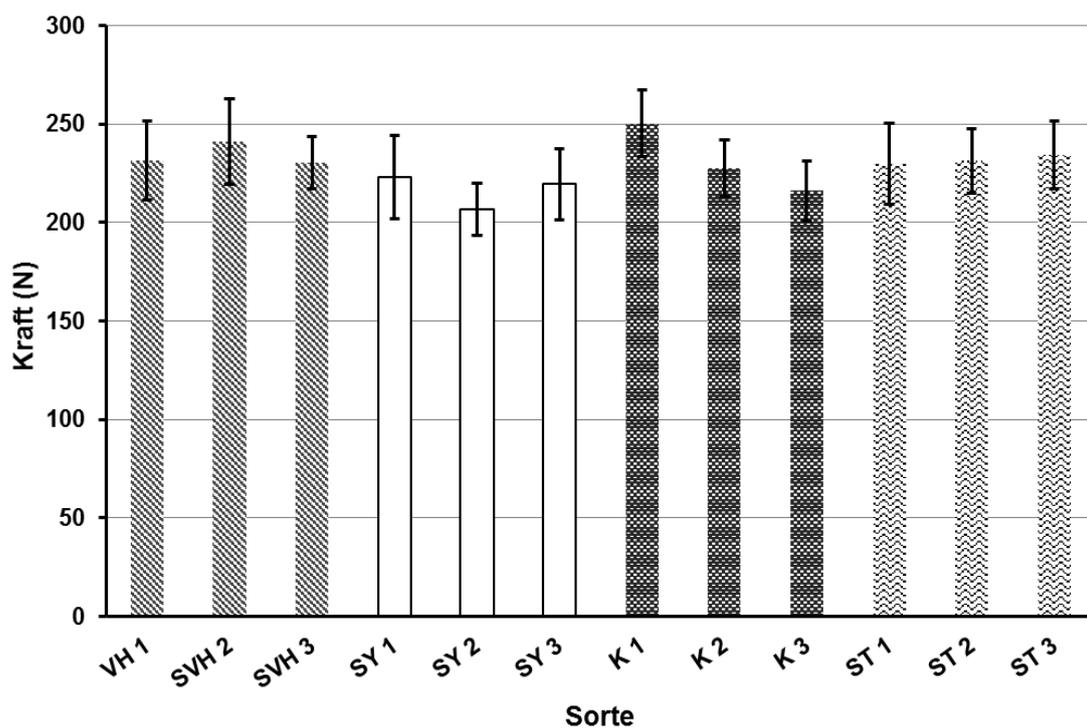


Abbildung 17: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2013)

Abbildung 17 zeigt die Ergebnisse des Stempeltests aus dem Jahr 2013. Es ist festzustellen, dass die Unterschiede im Maximum knapp 44 N zwischen den Varianten SY 2 und K 1 betragen. Dabei kann kein eindeutiger Unterschied zwischen den verschiedenen Standorten festgestellt werden. Die auftretenden Schwankungen betreffen alle vier Standorte und auch auf den jeweiligen Standorten

ist eine Heterogenität zwischen den Sorten festzustellen. So liegt die größte Differenz der Sorten eines Standorts bei gut 34 N zwischen den Sorten K 1 und K 3. Die geringste Differenz zwischen den Sorten eines Standorts beträgt nur knapp 5 N zwischen den Sorten ST 3 und ST 1. Eine statistische Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich der Signifikanz der Unterschiede erfolgte in den Jahren 2013 und 2014 nicht, da die Rüben aus organisatorischen Gründen auf unterschiedlichen Standorten angebaut wurden.

In gleicher Weise wie im Jahr 2013 fanden die Versuche im Jahr 2014 statt. Jedoch wurden diese um den Faktor der Lagerungsdauer erweitert. In Abbildung 18 finden sich die Ergebnisse der Versuche, welche mit den frischen Rüben direkt nach der Ernte durchgeführt wurden.

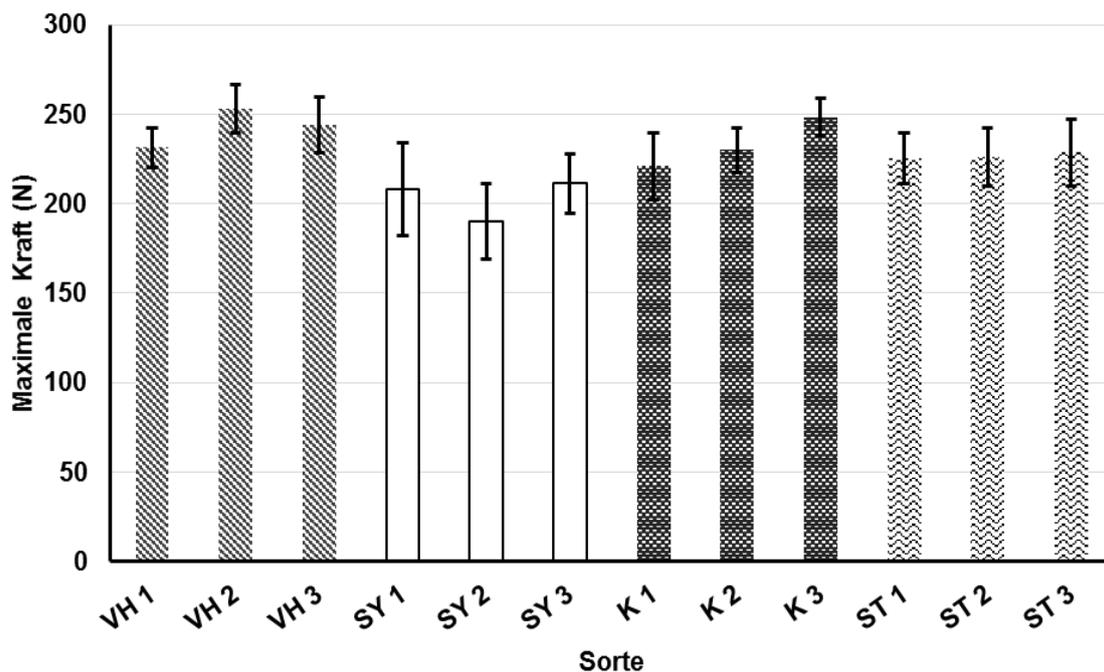


Abbildung 18: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2014)

Diese Ergebnisse ähneln denen aus 2013. Das Niveau weicht nur geringfügig von dem des Vorjahres ab. Über alle Sorten ergibt sich eine Differenz zwischen der minimal und der maximal aufgewendeten mittleren Kraft von knapp 63 N. Dabei zeigte die Sorte VH 2 mit ca. 253 N die höchste Festigkeit des Abschlussgewebes und damit die geringste Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen, während das Abschlussgewebe der Sorte SY 2 mit ca. 190 N die geringste Festigkeit im Jahr 2014 aufweist. Mit der Differenz von 63 N fallen die maximalen Unterschiede zwischen den Sorten damit um ca. ein Drittel höher aus als im Vorjahr. Jedoch muss auch hier berücksichtigt werden, dass der Anbau der Sorten nach Züchtern getrennt stattfand.

Die größte Differenz zwischen den Sorten eines Standorts tritt mit knapp 28 N bei den Sorten K 1 und K 3 auf. Zwischen den VH-Sorten betragen die Unterschiede hingegen nur gut 3 N.

Es zeigt sich, dass die Differenzen zwischen den Sorten eines Standorts deutlich geringer ausfallen als beim Vergleich aller Sorten ohne Berücksichtigung des Standorts. Damit decken sich die Ergebnisse sowohl in Bezug auf die maximalen und minimalen Differenzen zwischen den Sorten, als auch in der Abhängigkeit vom Standort mit den Ergebnissen aus 2013.

Ergänzend zur Untersuchung der Festigkeit des Periderms unmittelbar nach der Ernte wurden die Sorten analog zur Versuchsreihe „Energieaufwand zur Zerkleinerung“ im Jahr 2014 über einen Lagerungszeitraum von acht Wochen untersucht. Dazu wurde die Versuchsreihe an eingelagerten Rüben sowohl nach vier, als auch nach acht Wochen erneut durchgeführt.

Die Ergebnisse hierzu finden sich in Abbildung 19.

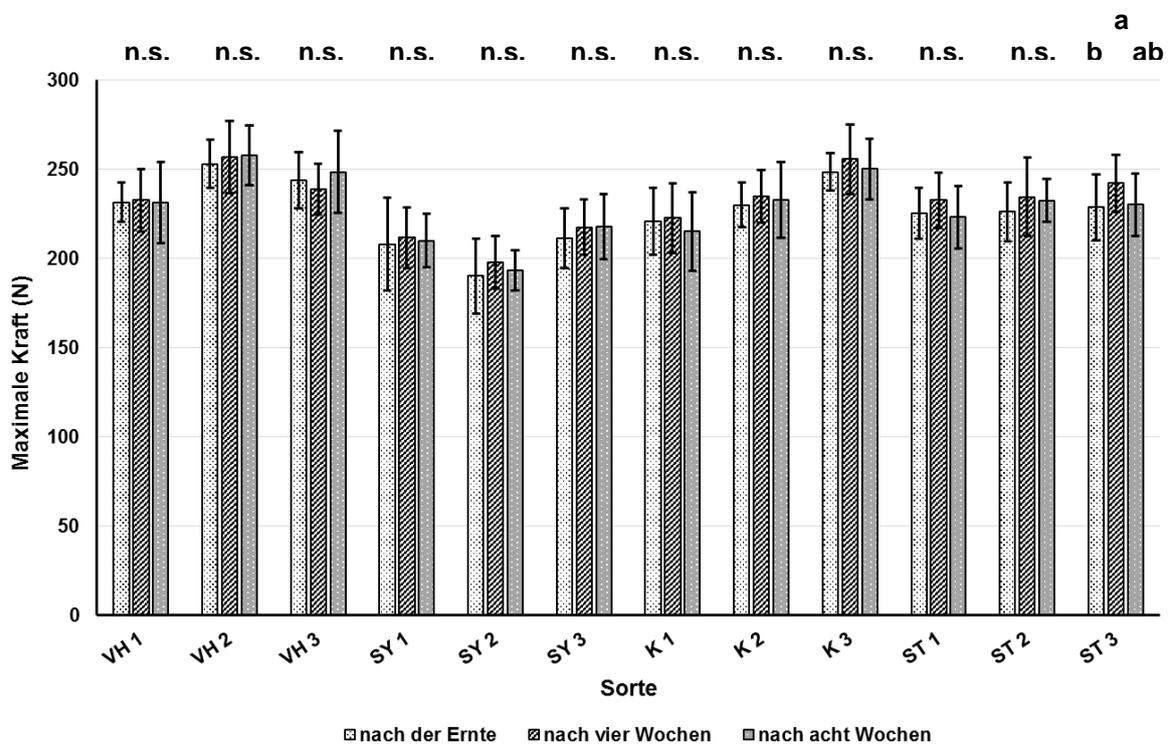


Abbildung 19: Durchschnittliche maximale Kraft, die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt, über eine Lagerungszeit von acht Wochen (im Jahr 2014). (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$, n.s.=nicht signifikant)

Der Abbildung lässt sich entnehmen, dass die bereits frisch nach der Ernte festgestellten Differenzen zwischen den Varianten in ihrer Ausprägung fast unverändert bestehen bleiben. Bei allen untersuchten Varianten ist keine bedeutende Veränderung der Festigkeit des Periderms über die Lagerungszeit von acht Wochen festzustellen. Dies spiegelt sich auch in der statistischen Auswertung wieder, die allein bei der Variante „ST 3“ eine signifikante Veränderung zwischen den drei Terminen ergibt. Dabei zeigen die untersuchten Rüben der Variante „ST 3“ die höchste Festigkeit nach einer Lagerungszeit von vier Wochen. Da dieses Ergebnis nur bei dieser einen Variante auftritt, ist nicht davon auszugehen, dass es mit zunehmender Lagerungsdauer zu einer

Zunahme der Gewebestabilität kommt. Die in geringfügigem Maße über die drei Versuchstermine auftretenden Streuungen innerhalb einer Variante liegen deutlich unter der jeweiligen Standardabweichung und treten sowohl in positiver als auch negativer Ausprägung auf, sodass keine Tendenz bei der Festigkeit des Periderms festzustellen ist. Vielmehr lässt sich aufgrund der geringen Streuungen und der fehlenden Tendenz in der Entwicklung über alle Varianten ableiten, dass es bei konstanten Lagerungsbedingungen bei keiner der Sorten zu einer maßgeblichen Veränderung der Gewebestabilität kommt. Dies zeigt, dass alle untersuchten Sorten, unabhängig von der Festigkeit und damit der Widerstandsfähigkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen, nach der Ernte dieses Niveau bei konstanten Lagerungsbedingungen über einen Zeitraum von acht Wochen beibehalten. Aufgrund dieser Erkenntnis wurden die Versuche zur Entwicklung der Festigkeit des Periderms über die Lagerungsdauer im Jahr 2015 nicht wiederholt.

Durch den Anbau aller Sorten auf einem gemeinsamen Standort im Jahr 2015 konnten *ceteris paribus* Bedingungen geschaffen werden, die es erlauben, mögliche Unterschiede dem Einfluss des Genotyps zuzuordnen. Aus diesem Grund fand für diese Ergebnisse eine statistische Auswertung über alle Sorten statt.

Die jeweils bis zur irreversiblen Beschädigung des Periderms aufgewendete Kraft findet sich, dargestellt über alle Sorten, in Abbildung 20.

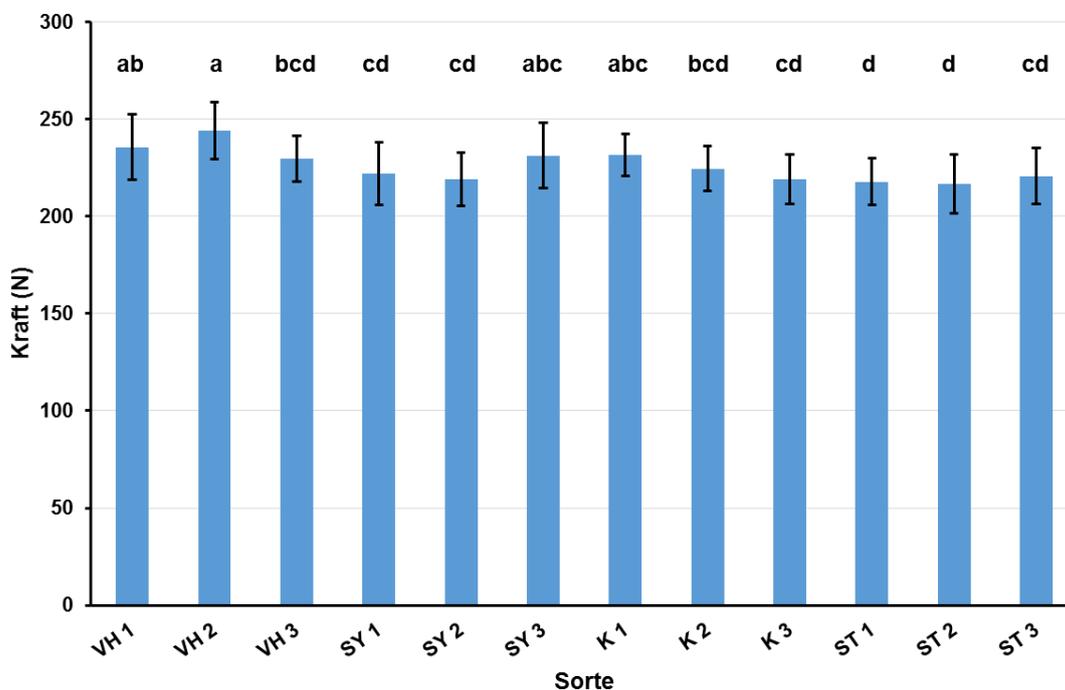


Abbildung 20: Durchschnittliche maximale Kraft die zur Beschädigung des Abschlussgewebes führt (im Jahr 2015). Anbau aller Sorten an einem Standort. (Tukey-HSD mit $p < 0,05$)

Im Jahr 2015 variiert die maximale durchschnittliche Kraft, die zum Bruch der Zellen des Abschlussgewebes führt, zwischen knapp 217 N (ST 2) und 244 N (VH 2). Dies entspricht einer maximalen Differenz von ca. 27 N und somit ca. 11 % vom Maximum zwischen den Sorten. Im Vergleich zu den Vorjahren, in denen die maximale Differenz bei 44 N (2013) und 63 N (2014) lag, fallen die Unterschiede im Jahr 2015 somit deutlich geringer aus. Dennoch sind zwischen einzelnen Sorten signifikante Unterschiede zu verzeichnen. Nach Überprüfung auf Normalverteilung der Daten mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test (K-S-Test) und auf Homogenität der Varianzen mittels Levene-Statistik konnten durch eine einfaktorielle Varianzanalyse signifikante Unterschiede zwischen den Sorten ermittelt werden. Durch einen multiplen Mittelwertvergleich mittels Tukey-Test erfolgte eine Einteilung der Sorten in homogene Untergruppen, welche die signifikanten Unterschiede sichtbar machen. Diese lassen sich anhand der in der Abbildung vermerkten Buchstaben unterscheiden. Homogene Untergruppen sind durch den gleichen Buchstaben gekennzeichnet.

Die Sorte VH 2 verträgt dabei im Mittel signifikant die größte Krafteinwirkung bis es zum Bruch der Zellen des Periderms und damit zu einer irreversiblen Beschädigung des Rübenkörpers kommt, die eine mögliche Eintrittspforte für Mikroorganismen darstellt. Diese Unterschiede sind jedoch nicht gegenüber allen Sorten signifikant, sondern treten bei den Sorten VH 1, SY 3 und K 1 nur in tendenzieller Form auf.

Die Unterteilung der Sorten erfolgt in vier homogenen Untergruppen, wobei viele der Sorten in mehreren Untergruppen vertreten sind. Hier bestehen also nur tendenzielle Unterschiede. Das Periderm mit der signifikant geringsten Festigkeit und damit der größten Anfälligkeit gegenüber Beschädigungen weisen die Sorten ST 1 und Stube 2 auf. Jedoch gehören einige der anderen Sorten zur selben Untergruppe (d), sodass die Unterschiede hier nur tendenziell auftreten. Ein Vergleich der Ergebnisse aus dem Jahr 2015 mit den Ergebnissen der Vorjahre zeigt, dass die Anfälligkeit des Abschlussgewebes gegenüber mechanischen Beschädigungen zwar durch den Genotyp beeinflusst wird, dass aber auch Faktoren des Standorts einen Einfluss haben. Welche Faktoren des Standorts dabei die Festigkeit des Gewebes beeinflussen, konnte im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch nicht geklärt werden.

4.2.2 Erdanhang in der Wurzelrinne

Bei den Untersuchungen zum Einfluss des Genotyps auf den in der Wurzelrinne verbleibenden Erdanhang nach der Wäsche diente die aus der Wurzelrinne separierte Erde als vergleichender Parameter. Besonders im Rahmen dieser Untersuchungen muss darauf hingewiesen werden, dass der Anbau der Sorten in den Jahren 2013 und 2014 von jedem der beteiligten Züchter auf einem

eigenen Standort durchgeführt wurde. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden, da Standort und Witterung einen bedeutenden Einfluss auf die Menge des Erdanhangs nehmen. Aus diesem Grund zeigen die Grafiken aus diesen Jahren eine optische Differenzierung zwischen den Sorten eines jeden Standorts/Züchters. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Gramm Erde je Kilogramm frischer Zuckerrübe (siehe Abbildung 21). Somit kann trotz unterschiedlicher durchschnittlicher Größe, Form und Gewicht der Sorten ein einheitlicher Vergleich stattfinden. Da in den Versuchen jeweils fünf Waschgänge je Sorte mit je 20 Rüben durchgeführt wurden und der ermittelte Erdanhang jeweils für diese 20 Rüben bestimmt wurde, musste in den Grafiken auf die Anzeige der Standardabweichung verzichtet werden, da die Angabe aus dem Mittel der 20 Rüben errechnet wurde.

Abbildung 21 zeigt die Ergebnisse aus dem Jahr 2013.

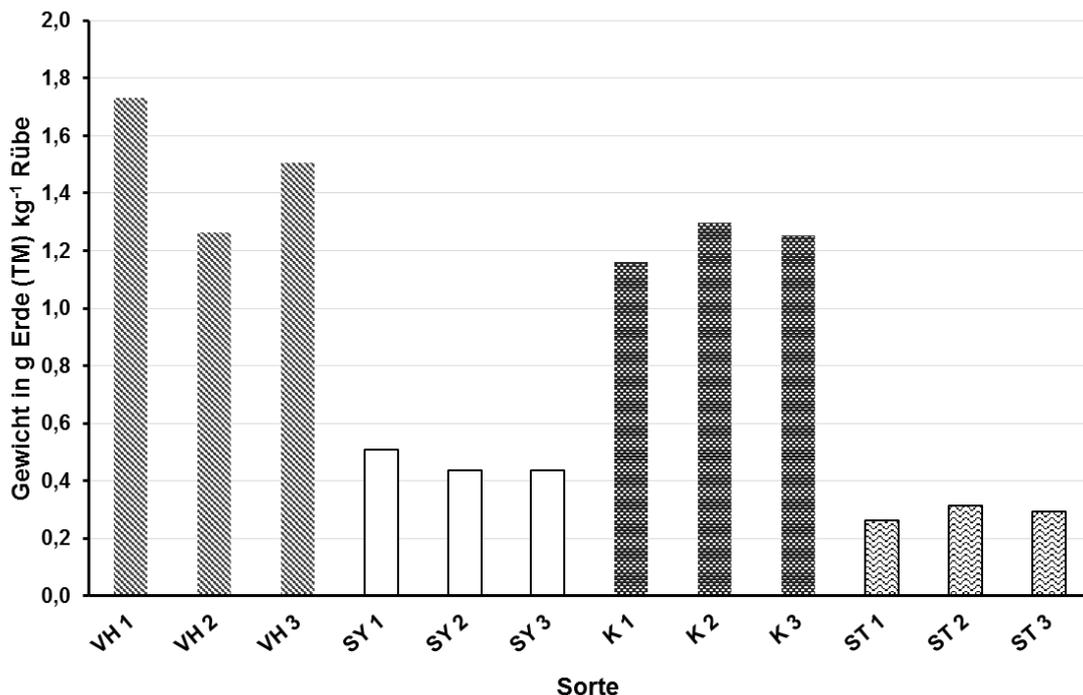


Abbildung 21: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) in der Wurzelrinne je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2013), differenziert nach Standorten

Wie in der Abbildung ersichtlich, bestehen vor allem zwischen den Sorten der verschiedenen Standorte deutliche Unterschiede, die sich im Fall der Sorten ST und SY um mehr als den Faktor fünf unterscheiden. Die Schwankungen zwischen den Sorten eines jeden Standorts fallen hingegen gering aus und betragen im Maximum 0,47 g zwischen den Sorten VH 1 und VH 2. Das Niveau der durchschnittlich in der Wurzelrinne anhaftenden Erde ist relativ gering, auch wenn zwischen den Sorten der verschiedenen Standorte zum Teil große Unterschiede auftreten. So macht der Erdanhang bei der Sorte VH 1 mit einer Menge von ca. 1,7 g nur einen Anteil von 0,17 % der

frischen Rübenmasse aus. Akkumuliert auf einen Ertrag von 80 t ha⁻¹ würde dies einen Erdeintrag in den Fermenter von 136 kg ha⁻¹ nach der Wäsche bedeuten. Geht man von einer Jahresmenge von z.B. 6000 t Zuckerrüben aus, würde dies einem Eintrag von 10,2 t trockener Erde pro Jahr in den Fermenter entsprechen. Es zeigt sich also, dass trotz geringer relativer Erdanhaftungen durchaus ein Anreiz besteht, diesen Anteil durch züchterische Maßnahmen zu reduzieren. Der Einfluss des Genotyps auf die Menge der anhaftenden Erde scheint nach Betrachtung der Ergebnisse aus dem Jahr 2013 nur gering ausgeprägt zu sein. Nur die Sorte VH 2 zeigt gegenüber den anderen Sorten des gleichen Standorts einen bemerkenswert geringeren Erdanhang, der gegebenenfalls auf die genetisch bedingte Ausformung der Wurzelrinne zurückzuführen ist. Alle anderen Sorten der jeweiligen Standorte konnten durch die Wäsche auf ein annähernd gleiches Niveau gereinigt werden. Dass dabei zwischen den verschiedenen Standorten deutliche Unterschiede auftreten, spricht für eine starke Beeinflussung der Erdanhaftungen durch den Standort (Boden) und die Umweltbedingungen bei der Ernte, die deutlich über dem Einfluss des Genotyps liegen. Die in Abbildung 22 dargestellten Ergebnisse aus dem Jahr 2014 unterstreichen diese Annahme.

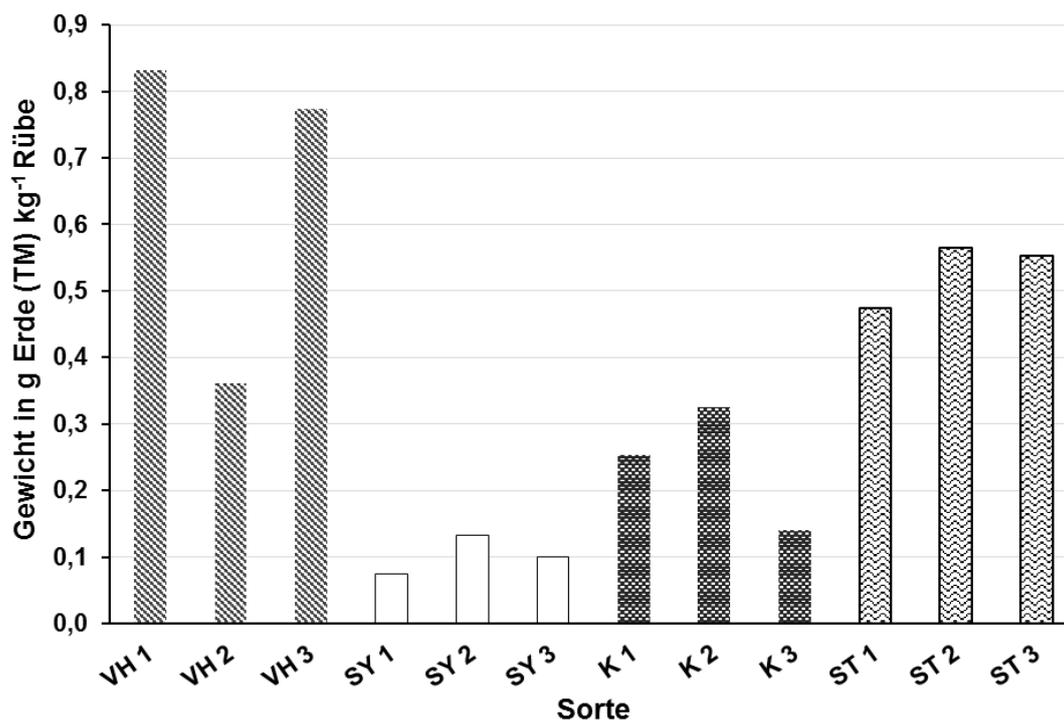


Abbildung 22: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2014), differenziert nach Standorten

Die Ergebnisse aus dem Jahr 2014 zeigen dabei ähnliche Tendenzen wie die Ergebnisse aus dem Jahr 2013. Jedoch ist zu beachten, dass das Niveau mit Ausnahme der ST-Sorten deutlich geringer ist als noch im Vorjahr. So liegen die maximalen Erdanhaftungen wieder bei der Sorte VH 1, jedoch betragen diese im Jahr 2014 nur gut 0,8 g kg⁻¹ frischer Zuckerrüben und nicht wie im Vorjahr über 1,6 g und somit mehr als das Doppelte. Dieser Unterschied zwischen den Jahren, der bei allen

Sorten sowohl in positiver als auch in negativer Ausprägung (ST) auftritt, bestätigt den Einfluss von Standort und Umweltbedingungen auf den Anteil der anhaftenden Erde. Dabei ist bei allen Sorten der Züchter VH, SY und K eine Reduktion des Erdanhangs im Jahr 2014 festzustellen, während der Anteil der Erdanhaftungen bei den ST-Sorten höher ausfällt als im Vorjahr. Es fällt auf, dass neben den Schwankungen zwischen den Standorten im Jahr 2014 auch Differenzen zwischen den Sorten eines Züchters auftreten. Vor allem die Sorte VH 2 zeigt im Vergleich zu den anderen beiden Sorten des Standorts, wie im Vorjahr, einen deutlich geringeren Erdanhang. Dadurch, dass sich dieses Ergebnis in beiden Jahren wiederholt, ist hier von einer Beeinflussung durch den Genotyp auszugehen. Die Differenzen der anderen Sorten eines Standorts fallen wie im Vorjahr deutlich geringer aus und lassen keine Vorzüglichkeit eines Genotyps erkennen.

Im dritten Versuchsjahr (2015) wurden die Versuche der ersten beiden Jahre wiederholt. Im Gegensatz zu den Vorjahren fand der Anbau aller Sorten im Jahr 2015 auf dem gleichen Standort (Bad Salzuflen) statt. Daher können die in Abbildung 23 dargestellten Ergebnisse aller Sorten untereinander verglichen werden.

Besonderer Bedeutung kommt bei dieser Abbildung der Skalierung zu. Diese fiel im Vergleich zu den Vorjahren deutlich geringer aus, da die Erdanhänge in der Wurzelrinne bei allen Sorten mit Werten zwischen 0,07 g (ST 3) und 0,24 g (SY 1) trockener Erde kg^{-1} Zuckerrübe (FM) auf einem niedrigen Niveau lagen. Auch wenn sich die relativen Unterschiede mit einem Faktor von drei hoch darstellen, sind die absoluten Unterschiede zwischen den Sorten gering. Dabei fielen die Sorten VH 3, K 2 sowie ST 2 & 3 durch besonders geringe Mengen anhaftender Erde in der Wurzelrinne auf. Hier schwankten die Werte um 0,1 g kg^{-1} frischer Zuckerrübe. Bis auf die Sorten SY 1 und K 3 (beide $> 0,2 \text{ g kg}^{-1}$) wiesen alle anderen Sorten Erdanhänge zwischen 0,15 g und 0,2 g kg^{-1} Zuckerrübe auf.

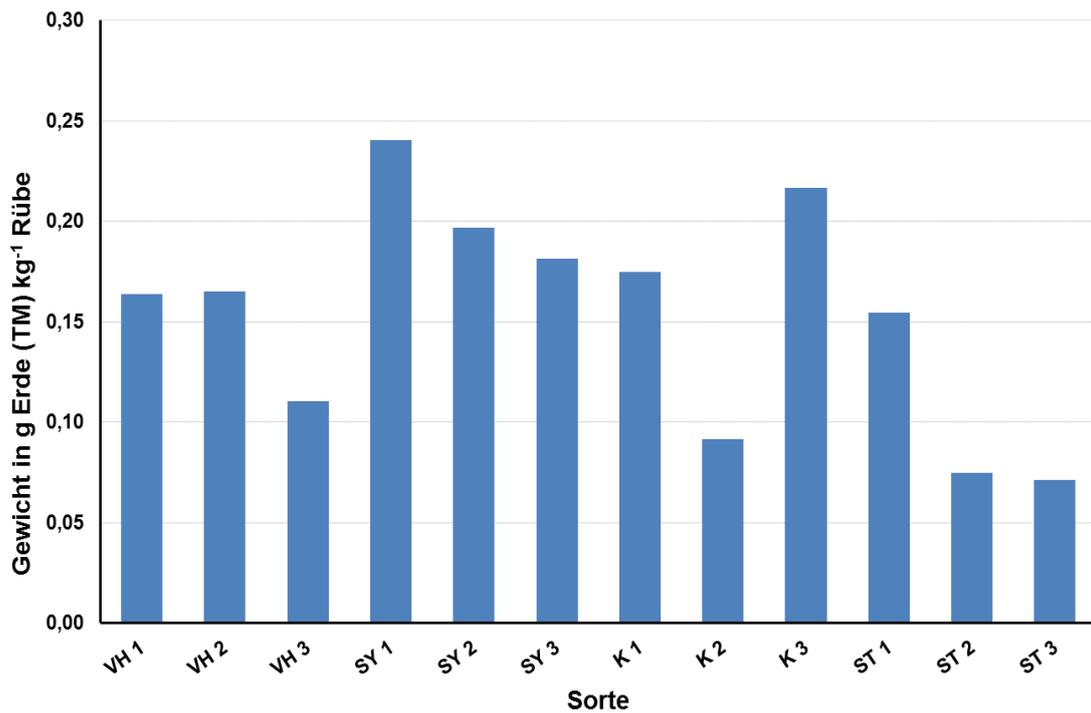


Abbildung 23: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe (im Jahr 2015), von einem Standort

Die Ergebnisse aus 2015 bewegen sich dabei auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie die Ergebnisse der bereits in den Vorjahren von Syngenta in Bad Salzuflen angebauten Sorten. Das alle Sorten im Jahr 2015 auf diesem niedrigen Niveau liegen, spricht für einen starken Einfluss des Standortes, welcher auf den von Syngenta in Bad Salzuflen genutzten Flächen geringe Erdanhaftungen bedingt, welche sich gut durch die Wäsche der Rüben entfernen lassen. Bei der Bodenart handelte es sich um sandigen Lehm mit einer Ackerzahl von 62.

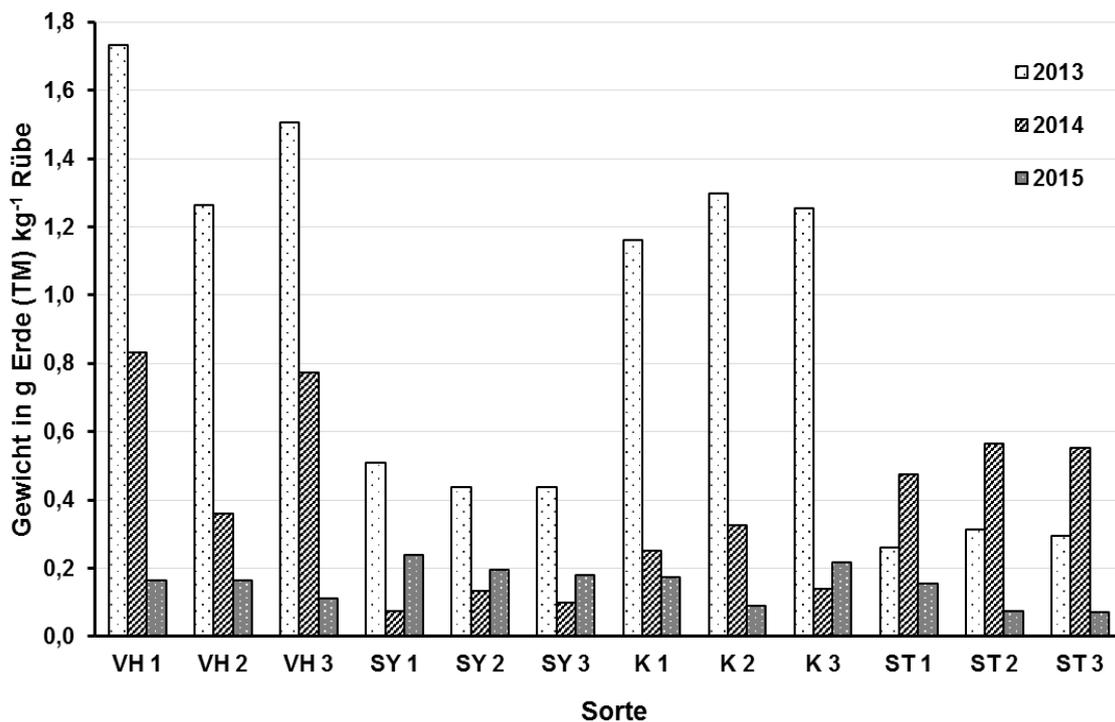


Abbildung 24: Durchschnittlicher Erdanhang (TM) je Kilogramm frischer Zuckerrübe in den Jahren 2013, 2014 und 2015

Abbildung 24 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse aller drei Versuchsjahre. Dabei werden bewusst die Ergebnisse des Anbaus auf verschiedenen Standorten mit denen des Anbaus auf einem Standort in 2015 nebeneinander dargestellt. Dies zeigt in besonderem Maße die Auswirkung des Standorts und der Umweltbedingungen auf den Anteil der in der Wurzelrinne anhaftenden Erde. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse aus dem Jahr 2015 im Vergleich zu den Vorjahren sehr gering ausfallen und nur geringen Schwankungen unterliegen. Ein Einfluss des Genotyps, welcher in den Vorjahren z.B. bei der Sorte VH 2 zu vermuten war, bestätigt sich hier nicht. Trotz fehlender Möglichkeit der statistischen Absicherung ist vor dem Hintergrund der dreijährigen Untersuchung nur von einer sehr geringen Beeinflussung des Erdanhangs in der Wurzelrinne nach der Wäsche durch die Sorte auszugehen. Der Einfluss von Standort und Umweltbedingungen hingegen fällt deutlich stärker aus.

Um die generelle Eignung aller untersuchten Sorten für eine effektive Reinigung mittels Waschanlage zu überprüfen, müssen die Ergebnisse vor dem Hintergrund der vor der Wäsche anhaftenden Erde betrachtet werden. Diese ist für alle drei Versuchsjahre in Abbildung 25 dargestellt.

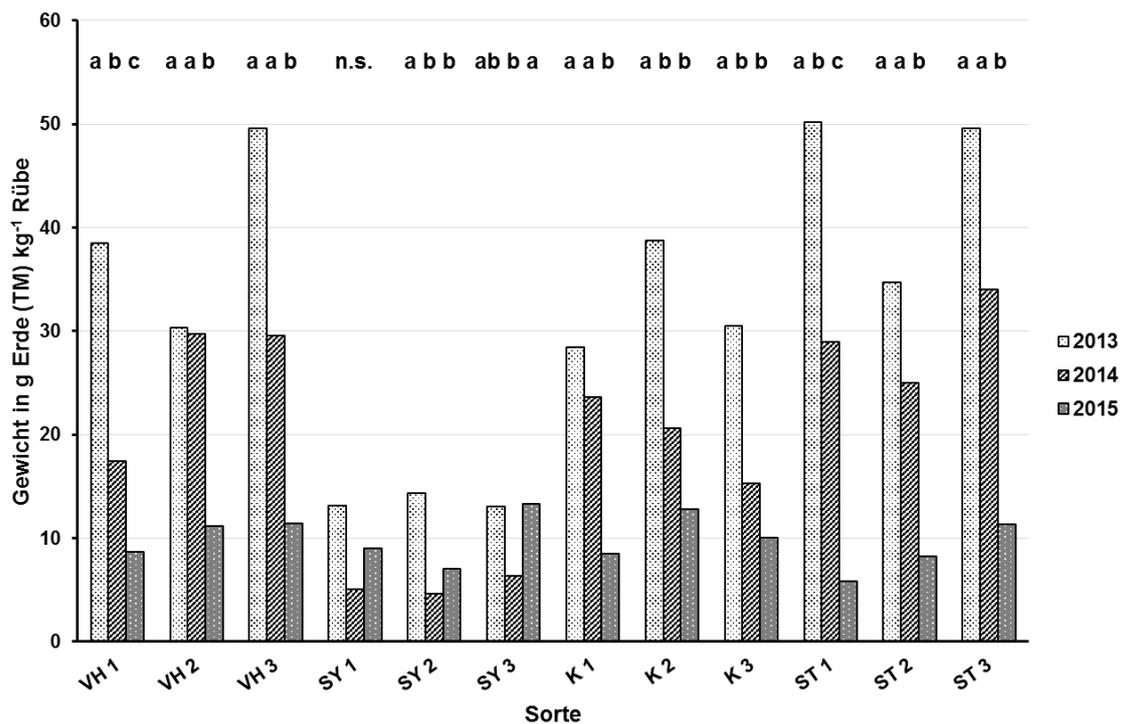


Abbildung 25: Durchschnittlicher Erdanhang je Kilogramm frischer Zuckerrübe vor der Wäsche in den drei Versuchsjahren auf TM-Basis (n=25)

Es zeigt sich, dass nicht nur zwischen den untersuchten Sorten und den jeweiligen Jahren zum Teil erhebliche Unterschiede auftreten, sondern dass auch die durchschnittlichen Erdanhaftungen der Zuckerrüben einer Sorte zwischen den einzelnen Anbaujahren starken Schwankungen unterliegen und sich in den meisten Fällen auch signifikant voneinander unterscheiden. Dadurch, dass der Erdanhang in g kg^{-1} Zuckerrübe angegeben wird, kann die zwischen den Jahren variierende Größe und das Gewicht der Zuckerrüben als Grund für die Differenzen bei den Erdanhängen ausgeschlossen werden.

Es bestätigt sich die Annahme aus den Ergebnissen der Erdanhaftungen nach der Wäsche, dass es, bedingt durch Standort und Witterung, zu einer deutlichen Beeinflussung des Erdanhangs kommt. Dies hat nicht nur Einfluss auf den Reinigungserfolg, sondern bereits auf die Menge der vor der Wäsche am gesamten Rübenkörper anhaftenden Erde. Die größte Menge anhaftender Erde konnte im Jahr 2013 festgestellt werden. Hier lagen die Erdanhaftungen zwischen 50,22 und 13 g kg^{-1} Zuckerrübe. Deutlich geringer fielen die Erdanhaftungen an den Zuckerrüben in den beiden Folgejahren aus. Vor allem im Jahr 2015 lagen die Erdanhaftungen mit Werten zwischen 12,8 und 5,25 g kg^{-1} Zuckerrübe deutlich unter denen der ersten beiden Jahre. Die maximale Differenz zwischen den Sorten fiel hier mit nur 7,55 g kg^{-1} ebenfalls deutlich geringer aus und ist ein Beleg für den Einfluss des Standorts auf den Erdanhang. Als der Anbau der Sorten in den

Vorjahren auf unterschiedlichen Standorten stattfand, fielen die Differenzen mit Werten von 37,22 und 26,41 g kg⁻¹ deutlich größer aus.

Unabhängig von der Menge der Erdanhaftungen kann eine Aussage über die Reinigungsleistung der Wäsche getroffen werden. Dazu wurde der nach der Wäsche in der Wurzelrinne ermittelte durchschnittliche Erdanhang je kg Zuckerrübe in Bezug zum Gesamterdanhang vor der Wäsche gesetzt. Die Ergebnisse finden sich in Abbildung 26 als prozentualer Anteil des Gesamterdanhangs, welcher nach der Wäsche in der Wurzelfurche verblieb.

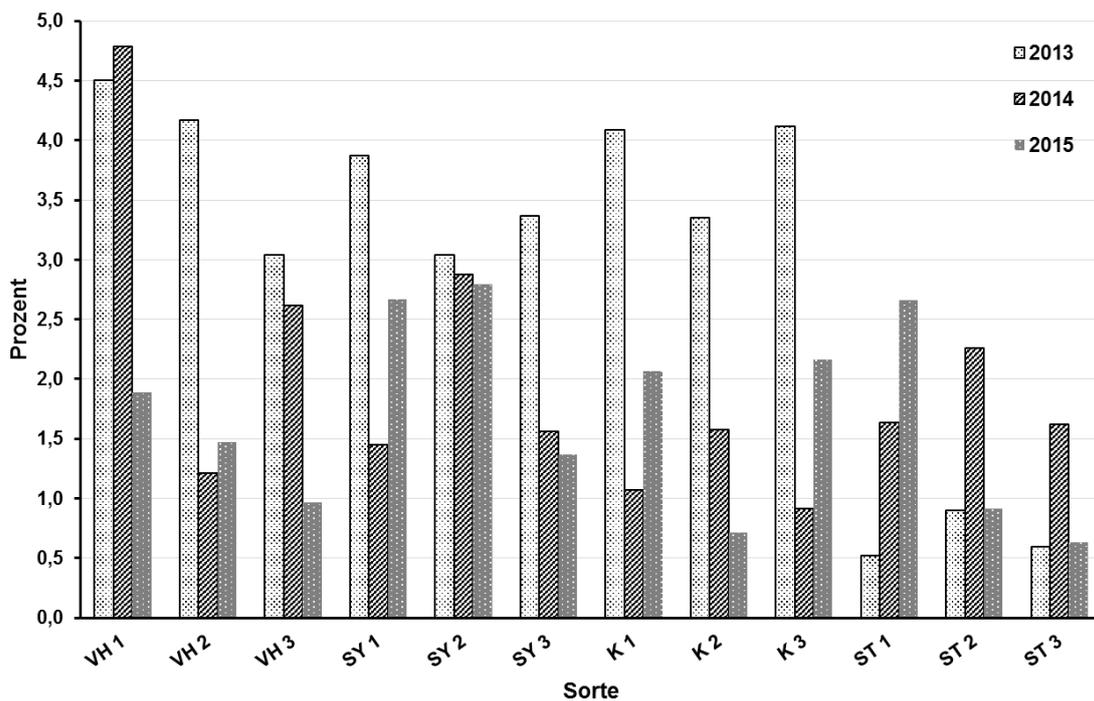


Abbildung 26: Relativer Erdanhang in der Wurzelrinne vom Gesamterdanhang (auf Basis TM) in den drei Versuchsjahren

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass bei einer intensiven Wäsche der Zuckerrüben zwischen ca. 0,5 % und 4,7 % des Erdanhangs in der Wurzelrinne verbleiben und damit in den Fermenter eingetragen werden. Die Wurzelrinne stellte dabei die einzige Region am Rübenkörper dar, an der nach der Wäsche noch Erde anhaftete. Alle anderen Flächen waren vollständig von Erde befreit. Ein Vergleich aller Sorten im Jahr 2015 zeigt, dass sich die einzelnen Sorten unterschiedlich gut reinigen ließen. Der Erdanhang in der Wurzelrinne lag zwischen knapp 3 % (ST 1) und ca. 0,6 % (ST 3) des Gesamterdanhangs. Die Sorten mit einem höheren prozentualen Erdanhang in der Wurzelrinne waren auch diejenigen, welche absolut höhere Erdanhänge in der Wurzelrinne aufwiesen. Da der relative Anteil des Erdanhangs in der Wurzelrinne bei allen Sorten über die Jahre deutlichen Schwankungen unterliegt, kann abschließend keine Empfehlung zur Wahl einer Sorte gegeben werden. Allein die Ergebnisse aus dem Jahr 2015 lassen erkennen, dass einige Sorten aufgrund ihrer phänotypischen Ausprägung besser von anhaftender Erde befreit

werden können als andere. Da das Niveau in diesem Jahr mit absoluten Werten zwischen 0,07 g und 0,24 g (siehe Abbildung 23) trockener Erde je kg Zuckerrübe (FM) sehr gering war, sollte daraus keine Empfehlung abgeleitet werden. Dazu bedürfte es einer mehrjährigen Überprüfung aller Sorten auf einem gemeinsamen Standort.

4.2.3 Energieaufwand zur Zerkleinerung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Energieaufwand für die Zerkleinerung der Zuckerrüben beziehen sich auf den Bereich von 0 bis 12 mm des beprobten Zuckerrübenwürfels, da eine Auswertung der gesamten Strecke aus technischen Gründen nicht möglich war. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse als relative Aussage zu verstehen und geben keine Auskunft über den absoluten Energieaufwand, welcher benötigt wird, um die Rüben der entsprechenden Sorte zu zerkleinern. Gleichwohl lassen es die Ergebnisse zu, die Sorten untereinander zu vergleichen und erfüllen damit den Zweck der Untersuchung. Abbildung 27 zeigt die für die Zerkleinerung auf der Strecke von 12 mm erbrachte Arbeit im Jahr 2013 über die untersuchten Sorten. Die graphische Darstellung der Säulen variiert zwischen den Sorten der verschiedenen Züchter und somit zwischen den unterschiedlichen Standorten, auf denen die Zuckerrüben in diesem Jahr angebaut wurden.

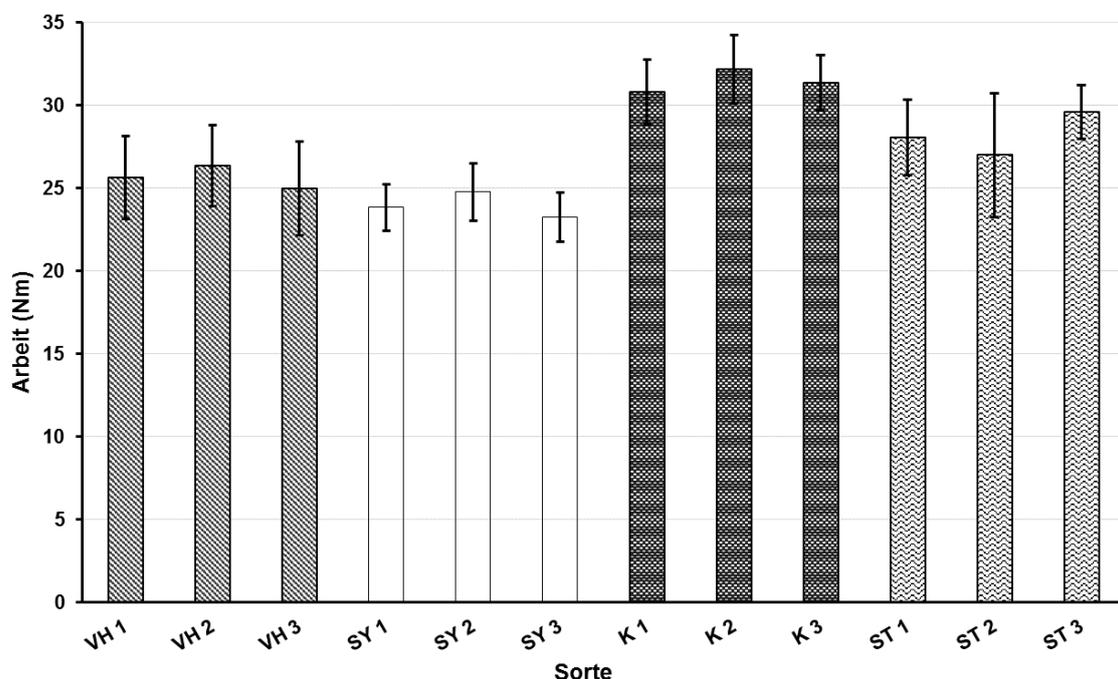


Abbildung 27: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2013

Die Darstellung soll den Vergleich innerhalb der jeweiligen Sorten eines Standortes optisch erleichtern. Es ist zu erkennen, dass der Energiebedarf zwischen 23 und 32 Nm liegt und sich

zwischen den Sorten eines jeden Standorts nur geringe Unterschiede ergeben. Diese betragen im Maximum ca. 2,5 Nm bei den drei ST-Sorten. Zwischen den vier Standorten zeigen sich hingegen zum Teil deutliche Unterschiede. Diese liegen bei annähernd 9 Nm zwischen der Sorte mit dem geringsten (SY 3) und dem höchsten Energiebedarf (K 2). Die in der Abbildung enthaltenen Standardabweichungen lassen erkennen, dass über die Wiederholungen eine gewisse Streuung auftritt, welche die zwischen den Sorten eines jeden Züchters auftretenden Unterschiede relativiert. Allgemein zeigt sich, dass der Standort und die dort vorherrschenden Umweltbedingungen größeren Einfluss auf den für die Zerkleinerung benötigten Energieaufwand zu haben scheinen, als die jeweilige Sorte.

Im Jahr 2014 wurden die Versuche in gleicher Weise wie im Vorjahr durchgeführt. Auch in diesem Jahr fand der Anbau der drei Sorten eines Züchters auf dessen eigenem Standort statt.

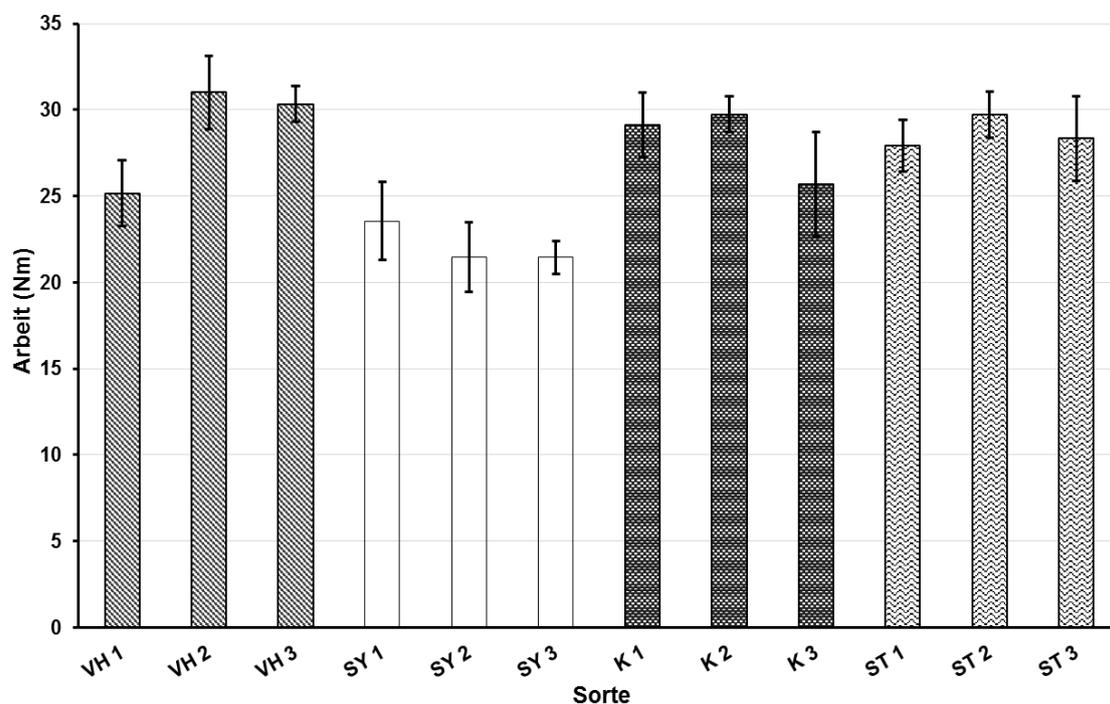


Abbildung 28: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2014

Die in Abbildung 28 dargestellten Ergebnisse aus dem Jahr 2014 ergeben für den Energieaufwand Werte zwischen knapp 22 und 31 Nm und bestätigen damit die Aussagen aus dem Jahr 2013. Mit zwei Ausnahmen (VH 1 und K 3) zeigen sich zwischen den Sorten eines jeden Züchters nur geringe Unterschiede. Dabei ist die hohe Standardabweichung bei der Sorte K 3 zu beachten. Die starke Streuung der Messergebnisse bei dieser Sorte im Jahr 2014 kommt als Grund für die relativ große Differenz zu den anderen K-Sorten in Betracht. Auch hier ergeben sich größere Unterschiede zwischen den jeweiligen Standorten des Jahres. Dabei fällt die Differenz zwischen der Sorte mit dem geringsten Energiebedarf (SY 3) zur Zerkleinerung und der Sorte mit dem höchsten

Energiebedarf (VH 2) mit ca. 9,5 Nm ähnlich aus wie im Jahr 2013. Es fällt auf, dass in beiden Jahren die Sorte SY 3 den geringsten Arbeitsaufwand zur Zerkleinerung benötigt hat. Dabei fällt die Schwankung zwischen den beiden Jahren bei dieser Sorte mit 23,23 Nm (2013) und 21,44 Nm (2014) deutlich geringer aus als die maximale Differenz zwischen den Sorten mit dem jeweils geringsten und höchsten Energiebedarf zur Zerkleinerung in den einzelnen Jahren. Dies zeigt eine gewisse Abhängigkeit der Ergebnisse vom untersuchten Genotyp in Interaktion mit dem Standort und den dortigen Umweltbedingungen. Abbildung 29 unterstreicht den Zusammenhang von Genotyp und Umweltbedingungen. Hier sind die Ergebnisse der Jahre 2013 und 2014 im Vergleich dargestellt.

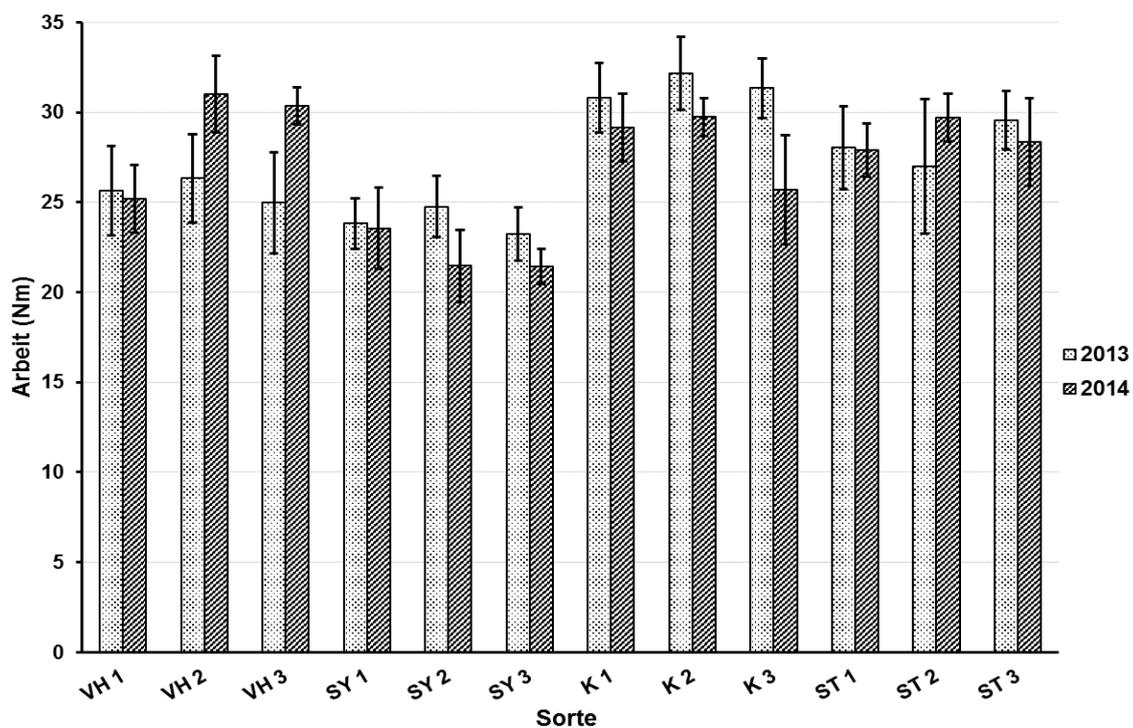


Abbildung 29: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit in den Jahren 2013 und 2014

Dabei zeigt sich, dass bei allen untersuchten Sorten Unterschiede zwischen den beiden Versuchsjahren zu verzeichnen sind, wobei diese mit Ausnahme der Sorten VH 2, VH 3 und K 3 in einem Umfang von zum Teil deutlich unter 3 Nm und somit unter 10 % auftreten. Dies bestätigt wiederum die Beeinflussung des für die Zerkleinerung benötigten Energiebedarfs durch die Interaktion von Genotyp und Umwelt.

Weiterhin wurde im Jahr 2014 der Einfluss der Lagerungsdauer auf die für die Zerkleinerung aufzuwendende Energiemenge untersucht. Dazu wurden die Rüben wie schon im Jahr 2013 zunächst frisch nach der Ernte beprobt und anschließend wurde ein Teil der Rüben für vier bzw. acht Wochen in einem Kühlhaus bei ca. 4°C gelagert und nach diesen Zeiträumen beprobt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung finden sich in Abbildung 30.

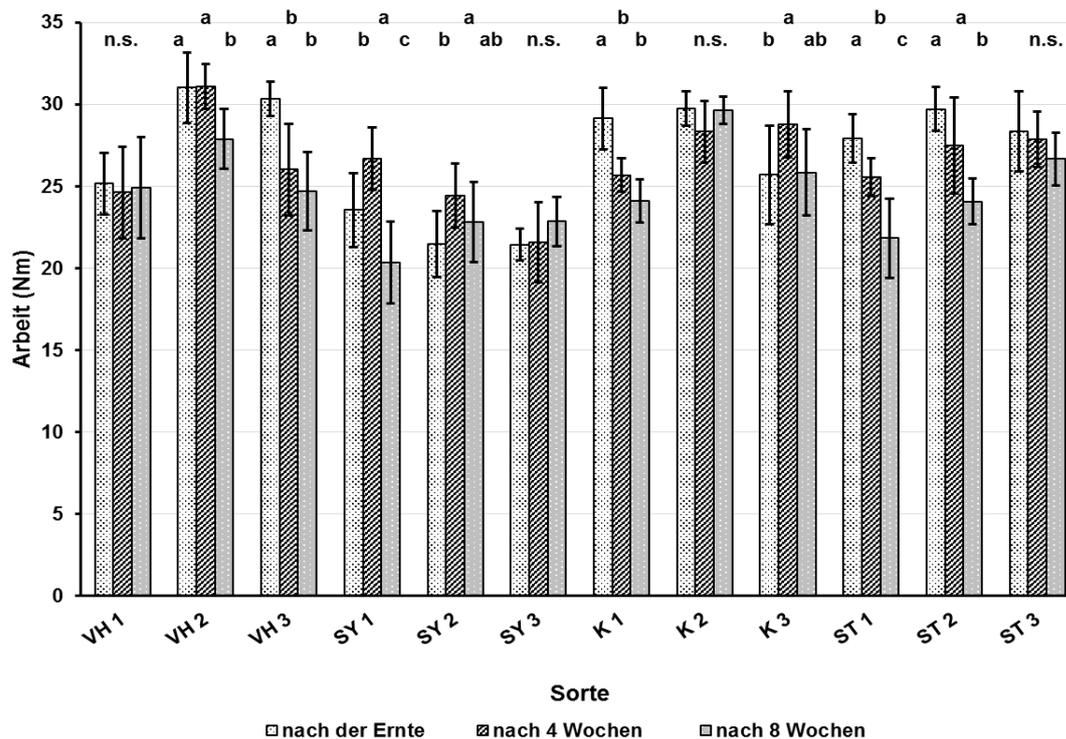


Abbildung 30: Entwicklung der für die Zerkleinerung der Zuckerrüben aufzuwendenden Arbeit über einen Lagerungszeitraum von acht Wochen im Jahr 2014, (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$, n.s.=nicht signifikant)

Wie in der Abbildung zu erkennen, kann keine für alle Sorten zutreffende allgemeine Entwicklung der aufzuwendenden Arbeit über einen Lagerungszeitraum von vier bzw. acht Wochen festgestellt werden. Die Annahme, dass eine Lagerung der Rüben das Gewebe beeinträchtigt, was wiederum dazu führt, dass die aufzuwendende Energie reduziert wird, bestätigt sich nur bei einigen der untersuchten Sorten (VH 2+3, K 1, sowie alle ST-Sorten). In diesen Fällen kommt es mit Ausnahme der Sorte VH 3 zu einer signifikanten Reduktion der aufgewendeten Energiemenge über die Lagerungszeit. Bei den Sorten VH 1 und K 2+3 kommt es, wenn auch mit geringen Schwankungen, zu keiner Veränderung über den Versuchszeitraum und insbesondere nur zu minimalen Unterschieden zwischen den Ergebnissen frisch nach der Ernte und nach einer Lagerungszeit von 8 Wochen. Bestätigt wird dies bei den Sorten VH 1 und K 2 auch durch die statistische Auswertung, welche keine signifikanten Unterschiede nachweist. Bei der Sorte K 3 treten zwar signifikante Unterschiede auf, jedoch nicht im Vergleich zwischen dem Termin frisch nach der Ernte und nach acht Wochen der Lagerung. Alle drei von SY zur Verfügung gestellten Sorten zeigen entweder deutliche Schwankungen über den Versuchszeitraum (SY 1) oder weisen eine leichte Zunahme der für die Zerkleinerung aufzuwendenden Energie nach acht Wochen auf. In diesen Fällen liegen die Standardabweichungen der drei Versuchstermine jedoch über den Differenzen zwischen den

Terminen. Auch hier konnte im Fall der Sorte SY 3 keine signifikante Veränderung nachgewiesen werden. Bei der Sorte SY 2 konnten zwar signifikante Unterschiede festgestellt werden, jedoch nicht im Vergleich der Ergebnisse frisch nach der Ernte und nach der Lagerungszeit von 8 Wochen.

Es bleibt festzuhalten, dass die mehrwöchige Lagerung der Zuckerrüben nur bei einigen Sorten zu einer Reduktion der für die Zerkleinerung aufzuwendenden Arbeit geführt hat. Eine allgemeine Aussage zum Einfluss der Lagerung auf die Zerkleinerung lässt sich daraus jedoch nicht ableiten.

Im Versuchsjahr 2015 fand der Anbau aller zwölf Sorten auf demselben Standort statt. Dieser befand sich in Bad Salzuflen in Ostwestfalen. Da durch den Anbau auf einem Standort die Umweltbedingungen als beeinflussender Faktor für den Vergleich der Sorten eliminiert werden konnten, war es möglich, alle Sorten untereinander zu vergleichen. Aus diesem Grund wurde für dieses Jahr eine statistische Auswertung der Ergebnisse mittels IBM SPSS Statistics 23.0 über alle Sorten durchgeführt. Der Test auf Normalverteilung erfolgte mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test (K-S-Test) und ergab bei allen Sorten eine Normalverteilung der ermittelten Werte. Mittels anschließender Levene-Statistik wurde die Varianzhomogenität innerhalb der Werte bestätigt. Durch eine einfaktorielle Varianzanalyse wurde im nächsten Schritt festgestellt, dass signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Gruppen (Sorten) vorliegen, sodass anschließend mit der Scheffé-Prozedur (unterschiedliche Anzahl an Wiederholungen) ein multipler Mittelwertvergleich durchgeführt wurde, um eine Klassifizierung der Sorten in signifikante Untergruppen vornehmen zu können. Alle Untersuchungen basieren auf einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$.

Wie in Abbildung 31 zu erkennen, treten wie in den Vorjahren Unterschiede zwischen den Sorten auf, jedoch fallen diese deutlich geringer aus. So beträgt die Differenz zwischen der Sorte mit der maximal benötigten Arbeit (K 2) und der Sorte mit der minimal benötigten Arbeit (ST 1) im Jahr 2015 nur knapp 4,8 Nm und damit fast die Hälfte der maximalen Differenz aus den Vorjahren.

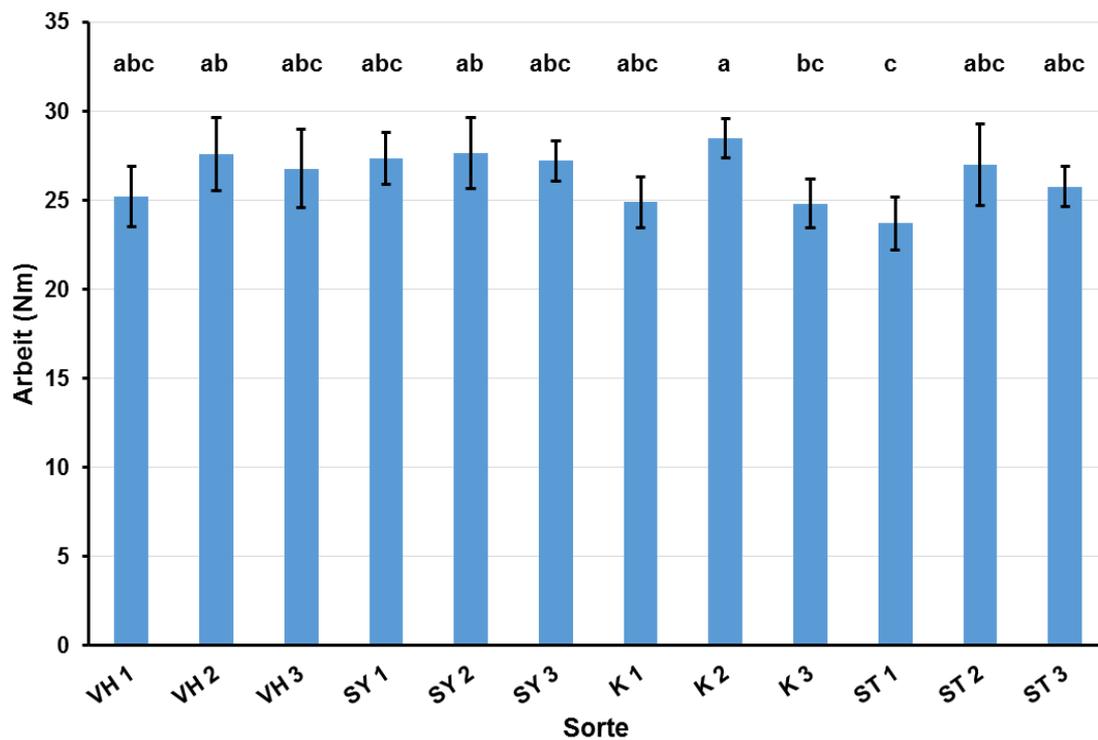


Abbildung 31: Für die Zerkleinerung der Zuckerrüben auf einer Strecke von 12 mm aufgewendete Arbeit für das Jahr 2015 (Scheffé-Prozedur mit $p < 0,05$)

Dabei schwanken die Werte im Bereich zwischen 23,68 Nm und 28,44 Nm und fallen somit tendenziell niedriger aus als in den Jahren zuvor. Die untersuchten Sorten unterscheiden sich mit Ausnahme von K 3 und ST 1 nicht signifikant voneinander. Durch die Aufteilung in drei homogene Untergruppen ergibt sich, dass allein die Sorte ST 1 einen signifikant geringeren Arbeitsaufwand zur Zerkleinerung benötigt als die Sorten VH 2, SY 2 und K 2. Zu allen anderen Sorten ergibt sich kein signifikanter Unterschied. Dies bestätigt den Eindruck aus den Vorjahren, dass der Einfluss von Standort und Umwelt auf den Arbeitsaufwand bei der Zerkleinerung deutlich größer ist als der Einfluss des Genotyps.

Einfluss der Schnittrichtung

Im Rahmen dieses Abschnitts werden neben dem Einfluss der Schnittrichtung auch die Einflüsse des Keilwinkels und der Geschwindigkeit auf den Energieaufwand dargestellt. Da die Versuche immer als Kombination der Parameter erfolgten, werden auch diese Ergebnisse aufgeführt. Der Fokus dieses Abschnitts richtet sich jedoch auf den Einfluss der Zerkleinerungsrichtung auf den Energieaufwand, da dieser Parameter zur Einordnung der Ergebnisse aus den Versuchen mit der Kramer-Scherzelle von Bedeutung ist.

Abbildung 32 enthält die durchschnittlich zur Zerkleinerung eines Zuckerrübenwürfels aufgewendete Arbeit in Form von Boxplots.

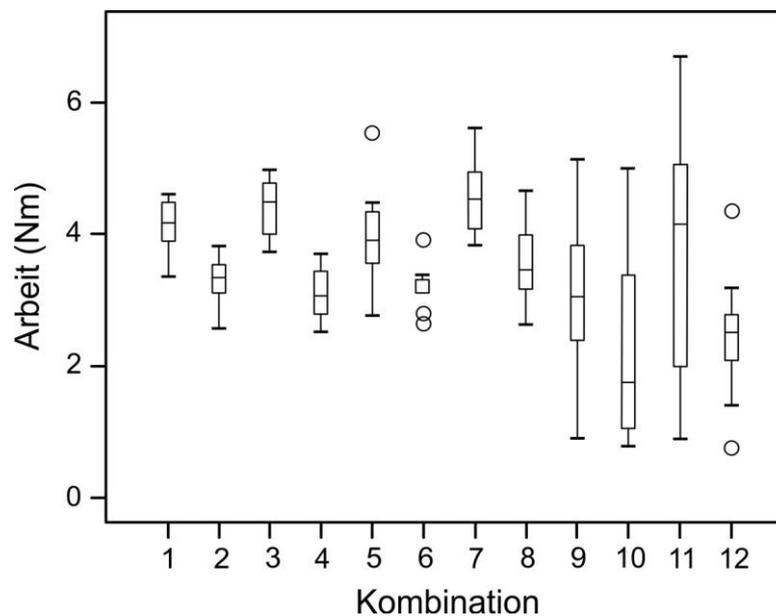


Abbildung 32: Boxplots der ermittelten Arbeit für die jeweiligen Kombination aus Keilwinkel, Geschwindigkeit und Schnittrichtung (n=15 je Kombination) (CLEVER, 2015)

Es ist festzustellen, dass die Kombinationen (9 bis 12, siehe Kapite 3.1.3, Tabelle 4) mit dem größten Keilwinkel (30°) einen geringeren Energieaufwand zur Zerkleinerung benötigten als die Varianten mit Keilwinkeln von 15° und 20° . Auch reduzierte sich der Energieaufwand bei einer höheren Zerkleinerungsgeschwindigkeit. Bei den ungeraden Kombinationen betrug die Zerkleinerungsgeschwindigkeit jeweils 5 mm s^{-1} , bei den geraden Kombinationen betrug die Geschwindigkeit 30 mm s^{-1} . Vergleicht man die Kombinationen bei denen die Zerkleinerungsrichtung geändert wurde (1+3, 2+4, 5+7, 6+8,...) lassen sich keine eindeutigen Unterschiede feststellen. Um dies zu überprüfen wurden die Ergebnisse mittels SPSS Statistics auf ihre Signifikanz untersucht. Ebenfalls wurden für den Keilwinkel und die Geschwindigkeit die Korrelationskoeffizienten zum Energieaufwand ermittelt.

Die Korrelationskoeffizienten von $-0,41$ zwischen Keilwinkel und Energieaufwand, sowie $-0,38$ zwischen Geschwindigkeit und Energieaufwand belegen, dass diese Parameter jeweils schwach negativ miteinander korreliert sind. Da bei beiden Parametern ein Signifikanzniveau von $p < 0,05$ nachgewiesen werden konnte, kann festgehalten werden, dass sowohl der Keilwinkel des Messers, als auch die Geschwindigkeit bei der Zerkleinerung einen signifikanten Einfluss auf den Energieaufwand haben. Bei der Schnittrichtung und der dabei aufgewendeten Energie konnte hingegen mit einem Signifikanzniveau von $0,25$ (bei $p < 0,05$) kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. (CLEVER, 2015)

Es kann festgehalten werden, dass die Schnittrichtung keinen signifikanten Einfluss auf den Energieaufwand bei der Zerkleinerung hat, sodass diese sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung erfolgen kann.

4.3 Fermentationseigenschaften

Zweiter Schwerpunkt der Sortenuntersuchungen war die Erfassung und Dokumentation des Konservierungsprozesses und der damit verbundenen Verluste an Trockenmasse und Methanbildungspotenzial in Abhängigkeit von Genotyp und Umwelt. Besonderes Augenmerk lag auf der qualitativen und quantitativen Bestimmung der während der Silierung gebildeten organischen Säuren und Alkohole vor dem Hintergrund unterschiedlicher Zuckergehalte im Ausgangsmaterial. Auch der Verlauf und die Geschwindigkeit der Silierung wurden, sowohl für den jeweiligen Genotyp, als auch für die Kombination von Genotypen und verschiedenen Umwelten untersucht.

4.3.1 Verlauf der Silierung

Zur Beurteilung des Silierungsprozesses wurde der pH-Wert der angesetzten Silage und dessen Entwicklung als Kriterium herangezogen. Da bei der Untersuchung der pH-Werte in den Silagen nicht zwischen den verschiedenen Sorten von den jeweiligen Standorten differenziert wird, werden diese als Varianten bezeichnet.

Die Ergebnisse der pH-Wert Messungen aus 2013 (Abbildung 33) zeigten einen annähernd parallelen Verlauf über alle Varianten. Der pH-Wert der frisch gemusteten Rüben lag zwischen 6,2 und 6,7. Dieser fiel bei allen Varianten in weniger als 48 Stunden auf einen Wert unter 4,5. Da die Messungen aus praktischen Gründen in der Zeit zwischen 0,5 und 2 Stunden nach dem Musen durchgeführt wurden, hatte bereits bei einigen Varianten eine Ansäuerung der Silage stattgefunden, welche die relativ großen Differenzen bei den Anfangs-pH-Werten erklärt. Nachdem es direkt zu Beginn der Silierung zu einer starken Reduktion der pH-Werte gekommen war, flachte diese Entwicklung nach ca. 48. Stunden deutlich ab. Mit deutlich verminderter Intensität sanken die pH-Werte aller Silagen innerhalb der folgenden 6 Tage (8 Tage nach dem Musen) auf Werte zwischen 3,5 und 3,9.

Nach Ende der Versuchsperiode (90 Tage) lag der pH-Wert nur geringfügig unter dem bereits nach einer Woche erreichten Niveau. Die bei der Auslagerung gemessenen pH-Werte lagen zwischen 3,4 (K 3) und 3,7 (SY 3). Zum Ende der Lagerungsphase unterschieden sich die pH-Werte

zwischen den Varianten somit im Maximum um 0,3. Es bleibt festzuhalten, dass die Säuerung des Rübenmuses bereits nach einer Woche der Silierung fast vollständig abgeschlossen war.

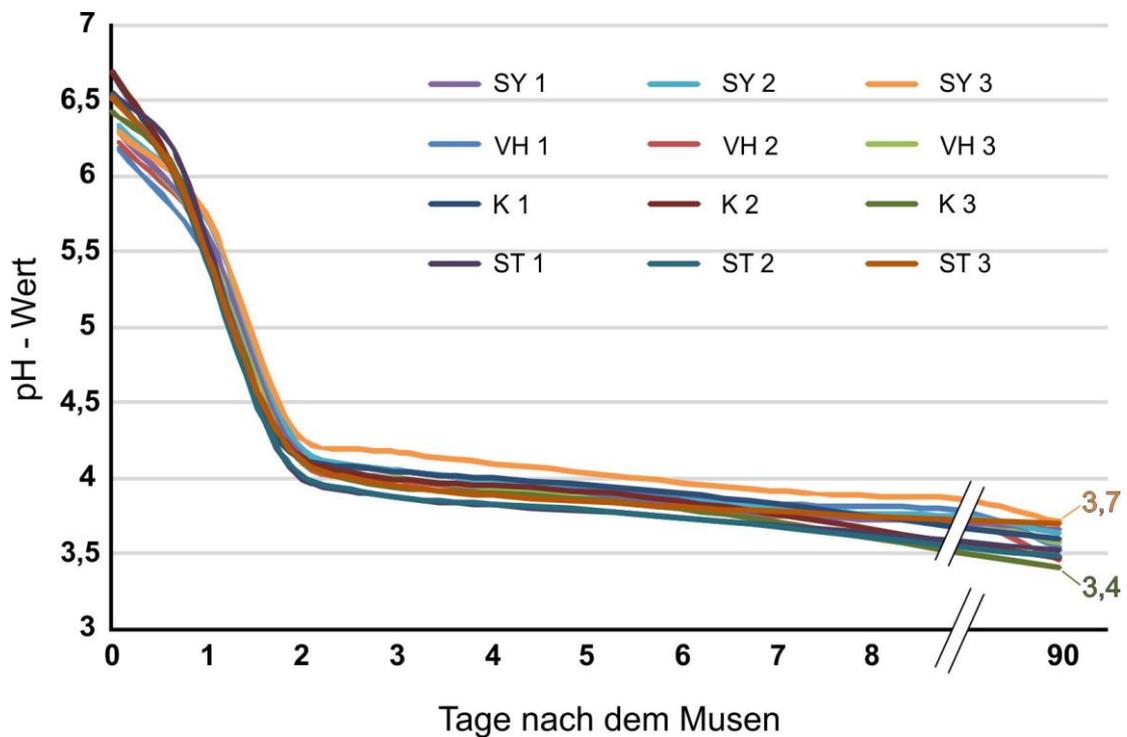


Abbildung 33: Verlauf des pH-Werts im Rübenmus zwölf verschiedener Zuckerrübensorten von vier Standorten (12 Varianten) im Jahr 2013. Silierung über 90 Tage in geschlossenen Glasgefäßen (n=4)

Die statistische Auswertung der pH-Werte ergab signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Diese traten jedoch erst nach ca. 48 Stunden auf. Die Werte der ersten Messung wurden nicht statistisch überprüft, da diese nicht bei allen Varianten zum gleichen Zeitpunkt erfolgen konnte (s.o.). Die Ausprägung der signifikanten Unterschiede nahm mit zunehmender Silierungsdauer zu. In Tabelle 10 erfolgt eine Unterteilung der signifikant unterschiedlichen pH-Werte einzelner Varianten in homogene Untergruppen. Dies betrifft den Zeitpunkt der Auslagerung nach 90 Tagen, da hier die signifikanten Unterschiede am größten waren.

Tabelle 10: Signifikante Unterschiede im pH-Wert der Silagen zwölf unterschiedlicher Zuckerrübensorten von vier Standorten im Jahr 2013 nach 90 Tagen, n=4

Variante	Homogene Untergruppen für p=0.05*								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K 3	3,40								
VH 2	3,45	3,45							
K 2	3,46	3,46							
ST 2		3,47	3,47						
ST 1		3,52	3,52	3,52					
VH 1			3,54	3,54	3,54				
VH 3				3,56	3,56	3,56			
K 1					3,59	3,59	3,59		
SY 2						3,63	3,63	3,63	
SY 1							3,65	3,65	3,65
ST 3								3,66	3,66
SY 3									3,70

*Ermittelt mittels Tukey-HSD. Die Mittelwerte für die in homogenen Untergruppen befindlichen Gruppen werden angezeigt.

Die große Zahl der homogenen Untergruppen (9) im Vergleich zur Gesamtanzahl (12) der Varianten zeigt, dass sich die pH-Werte der Silagen am Ende der Lagerungszeit von 90 Tagen bei einem Großteil der Varianten (75 %) signifikant voneinander unterscheiden. Die Standardabweichungen zwischen den vier Wiederholungen einer jeden Messung schwankten dabei über alle Messtermine zwischen 0,00 und 0,08. Die Mittlere Standardabweichung über alle Varianten an allen Messterminen betrug 0,02.

Da die pH-Werte in allen Silagen jedoch deutlich unter 4 lagen, wurde die von GALLER (2011) formulierte Anforderung an eine Nasssilage, die bei einem TS-Gehalt < 20 % einen pH-Wert < 4 aufweisen soll, erfüllt. Aus diesem Grund ist trotz signifikant unterschiedlicher End-pH-Werte von einer vollständigen Silierung aller Varianten auszugehen.

Da der Zuckergehalt in den frischen Rüben ein möglicher Einflussfaktor auf die Höhe der während der Silierung daraus gebildeten Säuren und damit auf den pH-Wert ist, sind die in den frischen Zuckerrüben enthaltenen Zuckergehalte und die daraus entstandenen Säuren in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Zuckergehalt der frischen Rüben und die während der Silierung entstandenen Gehalte an Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) aus dem Jahr 2013. Silierung in geschlossenen Glasgefäßen über 90 Tage bei 15°C im Klimaschrank

Variante	Zuckergehalt (frische Rüben)*		ES	MS	∑ Säuren
	g kg ⁻¹ FM	g kg ⁻¹ TS	g kg ⁻¹ FM	g kg ⁻¹ FM	g kg ⁻¹ FM
VH 1	151	725	9,78	6,47	16,25
VH 2	161	754	12,6	7,52	20,12
VH 3	159	725	7,76	6,60	14,36
SY 1	152	726	7,16	6,34	13,50
SY 2	151	725	6,97	5,94	12,91
SY 3	151	717	6,95	6,47	13,42
K 1	176	738	7,38	4,75	12,13
K 2	175	718	7,36	5,15	12,51
K 3	165	719	9,83	9,77	19,6
ST 1	159	726	7,37	11,60	18,97
ST 2	159	727	9,81	8,84	18,65
ST 3	162	731	5,74	4,49	10,23

*Zuckergehalt nach Luff-Schoorl.

Die Zuckergehalte in der Frischmasse (FM) des Ausgangsmaterials lagen zwischen 15,1 % (SY 2 & 3, VH 1) und 17,6 % (K 1). Im Vergleich dazu lagen die pH-Werte dieser vier Varianten nach 90 Tagen bei 3,63 (SY 2), 3,71 (SY 3), 3,54 (VH 1) und 3,59 (K 1). Die Gehalte an Essigsäure schwankten zwischen 5,74 g kg⁻¹ FM (VH 2) und 12,6 g kg⁻¹ FM (ST 3). Bei der Milchsäure lagen die Gehalte zwischen 4,49 g kg⁻¹ FM (ST 3) und 11,60 g kg⁻¹ FM (ST 1). Dabei ist zu beachten, dass mit Ausnahme der Variante ST 1 die Gehalte an Essigsäure in der Silage immer leicht über denen der Milchsäure lagen. Bei der Aufstellung der in der Silage vorhandenen Säuren in Tabelle 11 wurden sowohl Propionsäure (PS) als auch Buttersäure (BS) nicht berücksichtigt, da die Gehalte in der Silage jeweils im Bereich unter 0,1 g kg⁻¹ FM lagen.

Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen Zuckergehalt im Ausgangssubstrat und den daraus während der Silierung entstehenden Säuren besteht, wurden die Korrelationen berechnet und in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Übersicht über die Korrelationen zwischen Zuckergehalt in den frischen Rüben und den Gehalten von Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) in der Silage nach 90 Tagen, sowie zwischen dem pH-Wert nach 90 Tagen und den Gehalten von ES und MS im Jahr 2013

	ES	MS	Σ Säuren	pH
	g kg ⁻¹ FM	g kg ⁻¹ FM	g kg ⁻¹ FM	
Zuckergehalt g kg ⁻¹ FM	-0,01	-0,18	-0,12	-0,42

Es zeigt sich, dass im Falle der Essigsäure mit einem Korrelationskoeffizienten von -0,01 kein Zusammenhang mit dem Zuckergehalt im Ausgangssubstrat festgestellt werden konnte. Auch bei der Milchsäure und dem Gesamtgehalt der Säuren bestehen mit Korrelationskoeffizienten von -0,18 und -0,12 nur minimale negative Zusammenhänge. Durch den geringen Einfluss des Zuckergehalts auf den Gehalt der Säuren erklärt sich ebenfalls der schwach negative Zusammenhang zwischen Zuckergehalt und pH-Wert in der Silage, welcher mit einem Korrelationskoeffizient von -0,42 nachgewiesen werden konnte.

Somit kann festgestellt werden, dass die Silierung verschiedener Zuckerrübensorten von vier unterschiedlichen Standorten zwar innerhalb der ersten 48 Stunden annähernd parallel verläuft, sich die pH-Werte in der fertigen Silage jedoch signifikant voneinander unterscheiden. Eine Beeinflussung des pH-Werts in der Silage durch den Zuckergehalt konnte jedoch nicht nachgewiesen werden, da zwischen diesen Parametern nur ein schwach negativer Zusammenhang ermittelt werden konnte.

Es bleibt festzuhalten, dass unabhängig von der eingesetzten Sorte, deren Zuckergehalt oder dem Standort eine sichere und schnelle Silierung erreicht wurde.

4.3.2 Gärprodukte

Die qualitative und quantitative Erfassung der bei der Silierung entstehenden Gärprodukte erfolgte im Jahr 2013 analog zum pH-Wert Versuch. In den Jahren 2014 und 2015 wurden die Versuche in gleicher Weise wie im Jahr 2013 in Form von Mus in geschlossenen Glasgefäßen angelegt. Die Lagerung erfolgte in beiden Jahren ebenfalls bei 15°C im Klimaschrank über einen Zeitraum von 90 Tagen. Im Gegensatz zu 2013 wurde in diesen Jahren der pH-Wert nur zu Beginn und zur Auslagerung der Versuche gemessen und nicht während der Silierung. Dies erfolgte um die Silage nicht durch den Eintrag von Sauerstoff zu beeinträchtigen und somit die Höhe der auftretenden Verluste, welche ebenfalls mit diesem Versuch ermittelt wurden, zu beeinflussen.

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Analysen finden sich in Tabelle 13, Tabelle 14 und Tabelle 15. Sie zeigen die durchschnittlichen Trockensubstanz- und Zuckergehalte, sowie den pH-Wert der Sorten zu Beginn des Silierversuchs. Weiterhin geben die Tabellen Auskunft über die während der neunzig-tägigen Silierung entstandenen Gärprodukte in Form von Alkoholen und Säuren. Auch der pH-Wert zum Ende der Silierung ist angegeben. Bei den dargestellten Säuren handelt es sich um Milch- und Essigsäure (MS & ES). Andere Säuren, wie die in Silagen unerwünschte Buttersäure, wurden nicht nachgewiesen. Bei den Alkoholen wurden überwiegend Ethanol und Methanol nachgewiesen, sowie in geringeren Mengen 1,2 Propandiol und 2,3 Butandiol. Die in den Tabellen dargestellten Ergebnisse dienen als Grundlage zur Beurteilung der Silage und zur Berechnung der während der Silierung aufgetretenen Verluste nach Weißbach (2009).

Die durchschnittlichen Trockensubstanzgehalte (TS) der Sorten im frischen Zustand schwankten über die Jahre zwischen 20,8 % und 24,6 %. Durch die Silierung kam es zu einer Reduktion der TS-Gehalte. Da diese nach der Silierung um die flüchtigen Stoffe wie Alkohole und Säuren zu korrigieren sind, wird der Begriff der TS_k (korrigierte Trockensubstanz) verwendet. Diese lag bei allen Sorten in den drei Versuchsjahren zwischen 17,6 % und 22,2 %. Die durchschnittlichen Zuckergehalte in der Trockensubstanz der frischen Rüben wichen mit Werten zwischen 66,7 % und 87 % über die Jahre stark voneinander ab. Deutlich stärker ausgeprägt waren diese Differenzen jedoch nach der Silierung. Hier betrugen die Restzuckergehalte in der korrigierten Trockensubstanz zwischen 4,8 % und 44 % über die drei Jahre. Die Ergebnisse zeigen, dass die Umsetzung des in der Silage vorhandenen Zuckers in sehr unterschiedlicher Intensität verläuft. Dies führte zu stark variierenden Restzuckergehalten zwischen den Silagen der einzelnen Sorten.

Abweichend von Erfahrungen aus der Silierung anderer landwirtschaftlicher Güter wurde über die drei Jahre über alle Sorten in 31 von insgesamt 36 Silagen mehr Essigsäure (ES) als Milchsäure (MS) nachgewiesen. Dabei schwankten die Gehalte an Milch- und Essigsäure sowohl zwischen den Jahren als auch zwischen den Silagen stark.

Alkohol wurde überwiegend in Form von Ethanol nachgewiesen. Weiterhin traten in einem Teil der Silagen ebenfalls bedeutende Anteile von Methanol auf. Diese lagen jedoch deutlich unter dem Niveau von Ethanol. 1,2 Propandiol und 2,3 Butandiol fanden sich nur in geringen Mengen in den untersuchten Silagen und blieben mit wenigen Ausnahmen unter einem Gehalt von $5 \text{ g kg}^{-1} TS_k$. Auffällig war die breite Streuung der Gesamtalkoholgehalte in den Silagen aller Sorten über die drei Jahre. Diese lagen zwischen $2,16 \text{ g kg}^{-1} TS_k$ (ST 3, 2015) und $306,5 \text{ g kg}^{-1} TS_k$ (ST 3, 2013).

2013
 Tabelle 13: Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr

Sorte	frisch			siliert										
	TS	Zucker (Luff-Schoorl)	pH	Säuren			Alkohole							
				TS _k	Zucker (Luff-Schoorl)	pH	MS	ES	MS+ES	Methanol	Ethanol	2,3 Butandiol	1,2 Propandiol	Alkohol gesamt
g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS		g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS _k		g*kg ⁻¹ TS _k								
VH 1	208	725	5,18	193	60	3,50	33,52	50,67	84,20	13,99	100,52	3,01	4,87	122,38
VH 2	211	754	5,17	209	68	3,47	35,98	60,29	96,27	8,18	72,25	1,24	2,30	83,97
VH 3	219	725	5,23	191	119	3,47	34,55	40,63	75,18	20,10	170,16	2,30	1,05	193,61
SY 1	209	726	5,15	185	124	3,60	33,18	38,94	72,12	21,96	178,21	2,68	0,67	202,85
SY 2	208	725	5,27	179	125	3,54	35,16	37,77	72,93	19,40	166,85	1,41	0,98	188,64
SY 3	211	717	5,39	184	104	3,61	34,27	38,70	72,97	20,76	205,41	1,30	0,00	227,46
K 1	238	738	5,29	197	80	3,44	24,11	37,46	61,57	22,84	163,96	2,49	1,42	190,71
K 2	244	718	4,99	219	117	3,38	23,52	33,61	57,12	16,71	147,95	1,55	0,82	167,03
K 3	229	719	5,07	203	133	3,39	48,13	48,42	96,55	9,61	95,07	1,38	2,02	108,08
ST 1	219	726	5,03	182	181	3,41	63,74	40,49	104,23	21,54	178,57	1,87	0,88	202,86
ST 2	219	727	5,18	176	150	3,39	50,23	55,74	105,97	19,55	139,20	1,36	3,18	163,30
ST 3	221	731	5,33	177	79	3,61	25,37	32,43	57,80	27,46	275,14	2,71	1,19	306,50

2014
 Tabelle 14: Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr

Sorte	frisch			siliert										
	TS	Zucker (Luff-Schoorl)	pH				Säuren			Alkohole				
				TS _k	Zucker (Luff-Schoorl)	pH	MS	ES	MS+ES	Methanol	Ethanol	2,3 Butandiol	1,2 Propandiol	Alkohol gesamt
g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS	g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS _k	g*kg ⁻¹ FM										
VH 1	221	762	6,78	186	105	3,71	28,12	43,23	71,35	6,72	71,51	1,29	3,17	82,69
VH 2	237	726	6,70	213	111	3,69	30,85	47,42	78,27	3,99	35,07	0,85	2,96	42,87
VH 3	227	797	6,77	176	82	3,67	31,19	35,80	66,99	17,05	151,70	0,00	0,00	168,75
SY 1	195	684	6,57	186	48	3,68	40,48	56,45	96,93	0,00	1,56	2,37	0,00	3,93
SY 2	196	775	6,63	184	224	3,71	29,89	38,04	67,93	0,00	13,75	1,30	0,00	15,05
SY 3	200	787	6,74	190	176	3,73	21,95	44,32	66,27	0,00	2,05	2,32	0,00	4,37
K 1	234	811	6,78	195	135	3,71	29,64	42,26	71,90	19,49	84,62	0,00	0,00	104,11
K 2	234	757	6,80	218	370	3,61	31,33	39,72	71,05	0,00	15,55	0,00	0,00	15,55
K 3	232	760	6,57	180	108	3,58	28,06	41,28	69,34	20,72	138,89	0,00	0,00	159,61
ST 1	228	870	6,60	222	402	3,63	29,64	33,02	62,66	0,00	1,76	1,22	0,00	2,98
ST 2	229	757	6,64	190	261	3,60	22,84	41,11	63,95	24,11	96,84	0,00	0,00	120,95
ST 3	231	805	6,72	221	440	3,64	26,02	38,28	64,30	0,00	15,34	0,00	0,00	15,34

2015
 Tabelle 15: Ergebnisse der Analyse von frischem und siliertem Zuckerrübenmus im Jahr

Sorte	frisch			siliert										
	TS	Zucker (Luff-Schoorl)	pH	Säuren						Alkohole				
				TS _k	Zucker (Luff-Schoorl)	pH	MS	ES	MS+ES	Methanol	Ethanol	2,3 Butandiol	1,2 Propandiol	Alkohol gesamt
g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS		g*kg ⁻¹ FM	g*kg ⁻¹ TS _k		g*kg ⁻¹ TS _k								
VH 1	236	713	5,69	188	50	3,42	60,64	58,51	119,15	15,69	69,15	0,80	1,76	87,39
VH 2	246	680	5,80	207	93	3,44	49,28	77,29	126,57	3,38	39,81	1,11	3,24	47,54
VH 3	241	686	5,78	210	73	3,43	48,57	63,81	112,38	1,76	23,43	1,05	7,10	33,33
SY 1	224	716	5,80	205	92	3,40	43,95	55,12	99,07	0,00	3,46	1,56	3,12	8,15
SY 2	228	713	5,63	202	76	3,42	47,72	67,33	115,05	4,70	21,53	1,04	11,63	38,91
SY 3	237	708	6,00	209	73	3,50	49,76	55,50	105,26	0,00	1,44	1,15	4,40	6,99
K 1	240	667	5,70	215	104	3,44	40,70	40,05	80,74	0,00	1,35	0,60	0,98	2,93
K 2	241	685	5,66	216	114	3,38	56,94	53,70	110,65	0,88	7,27	0,83	1,44	10,42
K 3	236	673	5,68	195	76	3,40	72,82	81,54	154,36	5,79	55,90	0,82	1,90	64,41
ST 1	226	704	5,68	207	118	3,38	50,72	49,28	100,00	0,00	1,69	0,87	1,30	3,86
ST 2	226	704	5,78	199	160	3,38	45,28	48,84	94,12	2,91	19,45	0,95	1,56	24,87
ST 3	236	678	6,18	218	104	3,43	40,73	49,54	90,28	0,00	1,61	0,55	0,00	2,16

4.3.3 Bestimmung von Verlusten

Die Bestimmung der Verluste erfolgte mit den zwölf im Versuch beteiligten Sorten in den Jahren 2014 und 2015 nach den in Kapitel 3.3 beschriebenen Methoden. Da die Sorten im Jahr 2014 auf verschiedenen Standorten angebaut wurden, können in diesem Jahr jeweils nur die Varianten und nicht die Sorten miteinander verglichen werden.

Die im Jahr 2014 mithilfe von Laboranalysen in Kombination mit einer Massebilanzierung errechneten Verluste, sowohl an Trockensubstanz (TS) als auch an Methanbildungspotenzial (MBP), unterschieden sich zum Teil deutlich zwischen den Varianten. Die im Labor ermittelten TS-Gehalte, sowie die korrigierten TS-Gehalte im silierten Rübenmus und die daraus resultierenden Verluste finden sich in Tabelle 16.

Tabelle 16: Trockensubstanzgehalte (TS) in frischen und korrigierte Trockensubstanzgehalte (TS_k) (nach WEIßBACH und STRUBELT, 2008) in silierten Zuckerrüben und daraus resultierende Verluste an Trockensubstanz und Methanbildungspotenzial (MBP) (nach WEIßBACH, 2009) im Jahr 2014. (s=Standardabweichung, n=4)

Variante	TS	TS _k	TS Verlust		MBP Verlust		pH-Wert
	(frische Rübe) g kg ⁻¹	(Silage) g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	%	%	s	
VH 1	221	186	35	15,84	14,24	0,40	3,59
VH 2	237	213	24	10,13	9,37	0,42	3,54
VH 3	227	176	51	22,47	18,28	0,18	3,55
SY 1	195	186	9	4,62	5,95	0,02	3,49
SY 2	196	184	12	6,12	5,67	0,51	3,49
SY 3	200	190	10	5,00	5,82	0,00	3,53
K 1	234	195	39	16,67	13,91	0,56	3,61
K 2	234	218	16	6,84	6,91	0,44	3,44
K 3	232	180	52	22,41	18,73	0,85	3,49
ST 1	228	222	6	2,63	3,05	0,01	3,47
ST 2	229	190	39	17,03	13,61	1,39	3,49
ST 3	231	221	10	4,33	3,95	0,01	3,45

Die TS-Gehalte der frischen Rüben lagen im Bereich zwischen 195 und 237 g kg⁻¹ FM. Es wird darauf hingewiesen, dass die Schwankungen der TS-Gehalte, welche eng mit dem Zuckergehalt korreliert sind, mit hoher Wahrscheinlichkeit durch die unterschiedlichen Erntezeitpunkte der Zuckerrüben begründet sein können. Die nach Lagerung und Silierung ermittelten und korrigierten TS-Gehalte in den Silagen lagen zwischen 176 und 222 g kg⁻¹ FM. Die daraus resultierenden TS-Verluste traten in einer Spannweite von 2,63 % (ST 1) bis zu 22,47 % (VH 3) auf. Auffällig ist, dass vor allem die SY-Varianten, welche geringe TS-Gehalte von ca. 20 % im frischen Material aufwiesen, nur geringe TS-Verluste um 5 % verzeichneten. Die Verluste an

Methanbildungspotenzial, welches maßgeblich für die Beurteilung der Silage als Biogassubstrat ist, fielen zum Teil geringer aus als die Verluste an Trockensubstanz. Vor allem bei Varianten mit hohen TS-Verlusten war die Differenz zu den MBP-Verlusten größer. Die maximalen Verluste lagen hier bei 18,28 % bei der Variante VH 3. Die geringsten Verluste konnten mit 3,05 % bei der Variante ST 1 ermittelt werden. Beachtet man die Standardabweichung der jeweiligen MBP-Verluste, ist zu erkennen, dass diese bei allen Varianten sehr gering ausfielen und mit Ausnahme der Variante ST 2 deutlich unter 1 lagen. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Berechnung zwar mit Hilfe der Massebilanz eines jeden Glases, jedoch nur mit einem aus der Mischprobe der Wiederholungen gewonnenen Laborergebnis errechnet werden konnte.

Als Indiz für die erfolgreiche Silierung aller Varianten kann der pH-Wert gewertet werden, welcher bei allen Silagen in einem sehr engen Bereich zwischen 3,44 und 3,61 lag und somit die Ergebnisse aus dem Jahr 2013 bestätigt. Zudem konnte in keiner der Silagen Buttersäure nachgewiesen werden. Die Darstellung des Methanbildungspotenzials in Tabelle 16 ergibt sich als arithmetisches Mittel aus den vier Wiederholungen.

Um die ausgeprägten Unterschiede bei der Höhe der Verluste erklären zu können, wurde der Einfluss der in den Silagen ermittelten Gärprodukte untersucht. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die bedeutenden Gärprodukte in Form von Essig- und Milchsäure (ES & MS), sowie über die Summe der Alkohole und die daraus resultierenden Verluste von Frischmasse und Trockensubstanz.

Tabelle 17: Bei der Silierung der zwölf Varianten in Glasgefäßen entstandene Gehalte an Alkohol sowie Essigsäure (ES) und Milchsäure (MS) und daraus resultierende Frischmasse (FM) und Trockensubstanzverluste (TS) im Jahr 2014. (s=Standardabweichung, n=4)

Variante	Σ Alkohole	ES	MS	FM Verlust		TS Verlust
	g kg ⁻¹ TS _k	g kg ⁻¹ TS _k	g kg ⁻¹ TS _k	%	s	%
VH 1	82,69	43,23	28,12	1,65	0,26	15,84
VH 2	42,86	47,42	30,85	0,95	0,23	10,13
VH 3	168,75	35,80	31,19	2,54	0,11	22,47
SY 1	3,92	56,45	40,48	0,65	0,01	4,62
SY 2	15,05	38,04	29,89	0,48	0,32	6,12
SY 3	4,37	44,32	21,95	0,43	0,01	5,00
K 1	104,10	42,26	29,64	1,69	0,33	16,67
K 2	15,55	39,72	31,33	0,62	0,26	6,84
K 3	159,61	41,28	38,06	2,50	0,61	22,41
ST 1	2,97	33,02	29,64	0,32	0,01	2,63
ST 2	120,95	41,11	22,84	2,31	0,93	17,03
ST 3	15,34	38,28	26,02	0,79	0,01	4,33

Zur Ermittlung des Einflusses der dargestellten Parameter wurde deren Korrelation mit dem jeweiligen TS-Verlust ermittelt. Die Gehalte von Essig- und Milchsäure unterlagen im Vergleich zu den Alkoholgehalten einer deutlich geringeren Streuung. Es wurden zwischen 33,02 und 56,45 g kg⁻¹ TS_k Essigsäure und zwischen 21,95 und 40,48 g kg⁻¹ TS_k Milchsäure ermittelt. Während zwischen dem Gehalt an Essigsäure und der Höhe der TS-Verluste ein Korrelationskoeffizient von -0,12 berechnet wurde, betrug dieser bei der Milchsäure 0,13. Dies zeigt, dass die Menge der organischen Säuren keinen Einfluss auf die Höhe der TS-Verluste nimmt. Bei der Summe an Alkohol konnte hingegen ein konkreter Zusammenhang zur Höhe der TS-Verluste nachgewiesen werden. Die Gesamtmenge des in den Silagen ermittelten Alkohols (Methanol, Ethanol, 1,2 Propandiol, 2,3 Butandiol) variierte stark zwischen den Varianten. So wurden Werte zwischen 3,92 und 168,75 g kg⁻¹ TS_k Alkohol ermittelt. Eine Berechnung des Korrelationskoeffizienten zwischen Alkoholgehalt und TS-Verlust (siehe Tabelle 18) ergab einen Wert von 0,99. Dies entspricht einem starken linearen Zusammenhang.

Tabelle 18: Vergleich zwischen Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen und dem während der Silierung aufgetretenen Trockensubstanzverlust im Jahr 2014

Probe	∑ Alkohol g kg ⁻¹ TS _k	TS Verlust %
VH 1	82,69	15,84
VH 2	42,86	10,13
VH 3	168,75	22,47
SY 1	3,92	4,62
SY 2	15,05	6,12
SY 3	4,37	5,00
K 1	104,10	16,67
K 2	15,55	6,84
K 3	159,61	22,41
ST 1	2,97	2,63
ST 2	120,95	17,03
ST 3	15,34	4,33
Korrelation	0,99	

Sortiert man die in Tabelle 18 enthaltenen Daten, lässt sich der Zusammenhang von Alkoholgehalt in der Silage und dem damit verbundenen TS-Verlust auch graphisch darstellen. Dies findet sich in Abbildung 34.

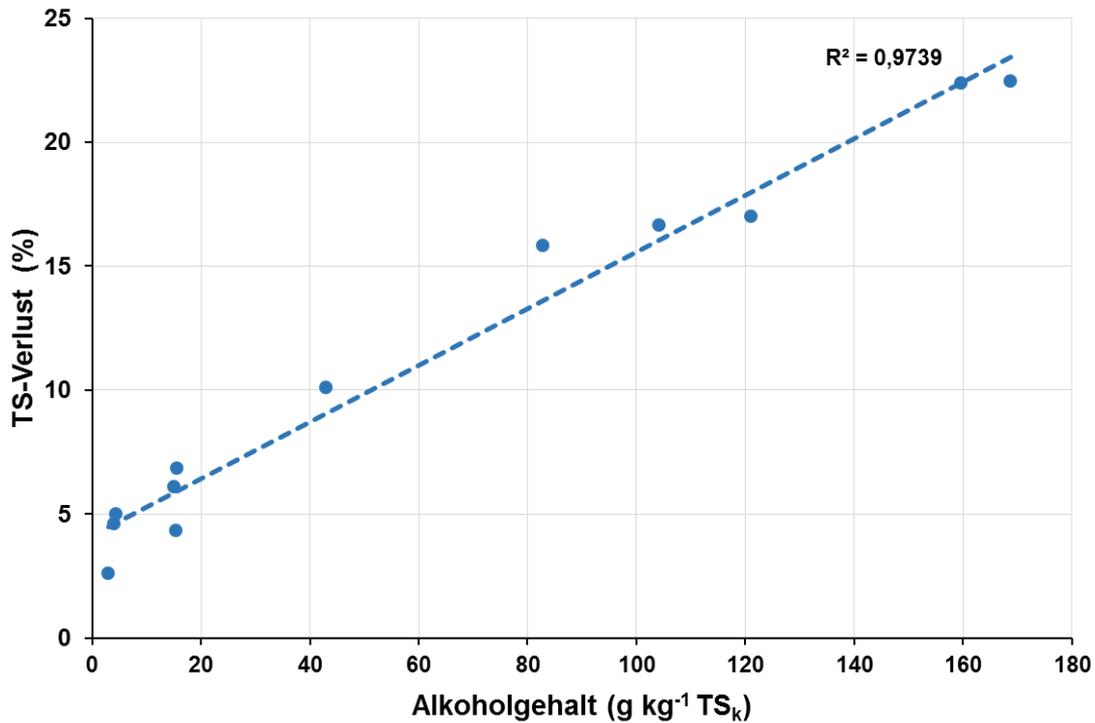


Abbildung 34: Zusammenhang zwischen Alkoholgehalt und TS-Verlust in zwölf Zuckerrübensilagen im Jahr 2014 (Lagerungsdauer: 90 Tage unter anaeroben Bedingungen)

Über die eingefügte Trendlinie und ein Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,97$ lässt sich der stark lineare Zusammenhang zwischen den beiden Parametern erkennen. Aufgrund dieses Ergebnisses ist eine Untersuchung zur Reduzierung der alkoholischen Gärung, beispielsweise durch den Einsatz geeigneter Siliermittel, in Erwägung zu ziehen. Um zu überprüfen, ob der Zuckergehalt in den frischen Rüben einen Einfluss auf die Menge des gebildeten Alkohols hat, wurde die Korrelation zwischen dem Zuckergehalt der frischen Rüben und den bei der Silierung entstandenen Alkoholen nach der anaeroben Lagerung über 90 Tage berechnet. Dies erfolgte vor dem Hintergrund, dass Zucker die Grundlage der alkoholischen Gärung durch Hefen darstellt. Die Ergebnisse finden sich in Tabelle 19.

Tabelle 19: Korrelation zwischen Zuckergehalt (Luff-Schoorl) der frischen Rüben und dem Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen im Jahr 2014

Probe	Σ Alkohol g kg ⁻¹ TS _k	Zucker g kg ⁻¹ FM
VH 1	82,69	168
VH 2	42,86	172
VH 3	168,75	181
SY 1	3,92	133
SY 2	15,05	152
SY 3	4,37	157
K 1	104,10	190
K 2	15,55	177
K 3	159,61	176
ST 1	2,97	198
ST 2	120,95	173
ST 3	15,34	186
Korrelation	0,30	

Mit einem Korrelationskoeffizient von 0,3 konnte nur ein schwacher Zusammenhang zwischen dem Zuckergehalt der frischen Rüben und der Menge des bei der Silierung entstehenden Alkohols ermittelt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass auch bei erfolgreicher Silierung unter gleichen Bedingungen deutliche Differenzen bei den auftretenden Verlusten zu verzeichnen sind. Als Grund für diese Differenzen konnte nach Analyse der beteiligten Parameter primär die durch alkoholische Gärung gebildete Menge an Alkohol in den Silagen identifiziert werden. Diese fiel in den Silagen der verschiedenen Varianten sehr unterschiedlich aus.

Die in 2014 durchgeführten Versuche wurden auf gleiche Weise im Jahr 2015 wiederholt. Hier sei darauf verwiesen, dass die Sorten in diesem Jahr nicht von jedem der beteiligten Züchter einzeln, sondern auf einem gemeinsamen Standort angebaut wurden. In diesem Punkt unterscheidet sich der Versuch von dem aus dem Vorjahr. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Vergleich zwischen den einzelnen Sorten und nicht, wie im Jahr 2014, zwischen Varianten gezogen. Die im Labor bestimmten TS-Gehalte, sowie die korrigierten TS-Gehalte aus den Silagen und die daraus resultierenden TS- und MBP-Verluste finden sich in Tabelle 20.

Tabelle 20: Trockensubstanzgehalte (TS) in frischen und korrigierte Trockensubstanzgehalte (TS_k) in silierten Zuckerrüben und daraus resultierende Verluste an Trockensubstanz und Methanbildungspotenzial (MBP) im Jahr 2015, (s=Standardabweichung, n=4)

Sorte	TS	TS _k	TS Verlust		MBP Verlust		pH
	(frische Rübe) g kg ⁻¹	(Silage) g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	%	%	s	
VH 1	236	188	48	20,34	19,58	0,31	3,42
VH 2	246	207	39	15,85	14,93	0,07	3,44
VH 3	241	210	31	12,86	13,42	0,17	3,43
SY 1	224	205	19	8,48	10,35	0,02	3,40
SY 2	228	202	26	11,40	11,15	0,10	3,42
SY 3	237	209	28	11,81	14,23	0,02	3,50
K 1	240	215	25	10,42	11,77	0,05	3,44
K 2	241	216	25	10,37	12,33	0,12	3,38
K 3	236	195	41	17,37	16,44	0,30	3,40
ST 1	226	207	19	8,41	10,10	0,09	3,38
ST 2	226	199	27	11,95	13,13	0,27	3,38
ST 3	236	218	18	7,63	10,16	0,08	3,43

Die in den frischen Rüben ermittelten Trockensubstanzgehalte lagen im Jahr 2015 zwischen 224 und 246 g kg⁻¹ FM. Durch die Silierung kam es bei allen Sorten zu deutlichen TS-Verlusten. Nach Korrektur der TS-Gehalte in der fertigen Silage betrugen diese zwischen 188 und 218 g kg⁻¹ FM. Die daraus resultierenden TS-Verluste variierten zwischen 7,63 % (ST 3) und 20,34 % (VH 1). Da die Höhe der TS-Verluste immer eng mit der Höhe der Methanbildungspotenzialverluste korreliert ist, schwankten auch hier die Verluste zwischen 10,1 % (ST 1) und 19,58 % (VH 1). Die Standardabweichung für die aus der in vierfacher Wiederholung angelegten Massebilanzierung ermittelten Verluste lag über alle Sorten zwischen 0,02 und 0,31 %.

Um den im Vorjahr ermittelten, engen Zusammenhang zwischen Alkoholgehalt in der Silage und TS-Verlust zu überprüfen, wurde erneut die Korrelation der beiden Parameter berechnet. Diese findet sich in Tabelle 21. Die Gehalte an Milch- und Essigsäure lagen zwischen 40,70 und 72,82 g kg⁻¹ TS_k (MS) und zwischen 40,05 und 81,54 g kg⁻¹ TS_k (ES) (Tabelle 14). Auch für diese Parameter wurde die Korrelation zur Höhe der aufgetretenen TS-Verluste ermittelt. Der ermittelte Korrelationskoeffizient lag für Essigsäure bei 0,64 und für Milchsäure bei 0,7. Auch wenn damit ein stärkerer Zusammenhang als im Vorjahr nachgewiesen werden konnte, sind Werte in dieser Höhe kein Indikator für eine starke Beeinflussung der TS-Verluste durch die bei der Silierung gebildeten Säuren.

Tabelle 21: Korrelation zwischen Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen und dem während der Silierung aufgetretenen Trockensubstanzverlust (TS-Verlust) im Jahr 2015

Sorte	\sum Alkohole g kg ⁻¹ TS _k	TS Verlust %
VH 1	87,39	20,34
VH 2	47,54	15,85
VH 3	33,33	12,86
SY 1	8,15	8,48
SY 2	38,91	11,4
SY 3	6,99	11,81
K 1	2,93	10,42
K 2	10,42	10,37
K 3	64,41	17,37
ST 1	3,86	8,41
ST 2	24,87	11,95
ST 3	2,16	7,63
Korrelation	0,94	

Bei der Menge des Alkohols bestätigte sich hingegen mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,94 (siehe Tabelle 21) ein starker linearer Zusammenhang zur Höhe der TS-Verluste. Dabei variierte die Gesamtmenge des in den Silagen ermittelten Alkohols wie im Jahr 2014 zwischen den Sorten stark. So lagen die Gesamtalkoholgehalte zwischen 2,16 und 87,39 g kg⁻¹ TS_k.

Auch in diesem Fall dient die in Abbildung 35 enthaltene graphische Darstellung der Daten zur Einordnung des ermittelten Zusammenhangs. Neben der engen Korrelation beweist das Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,89$, dass ein starker Zusammenhang zwischen dem Alkoholgehalt in der Silage und dem TS-Verlust besteht.

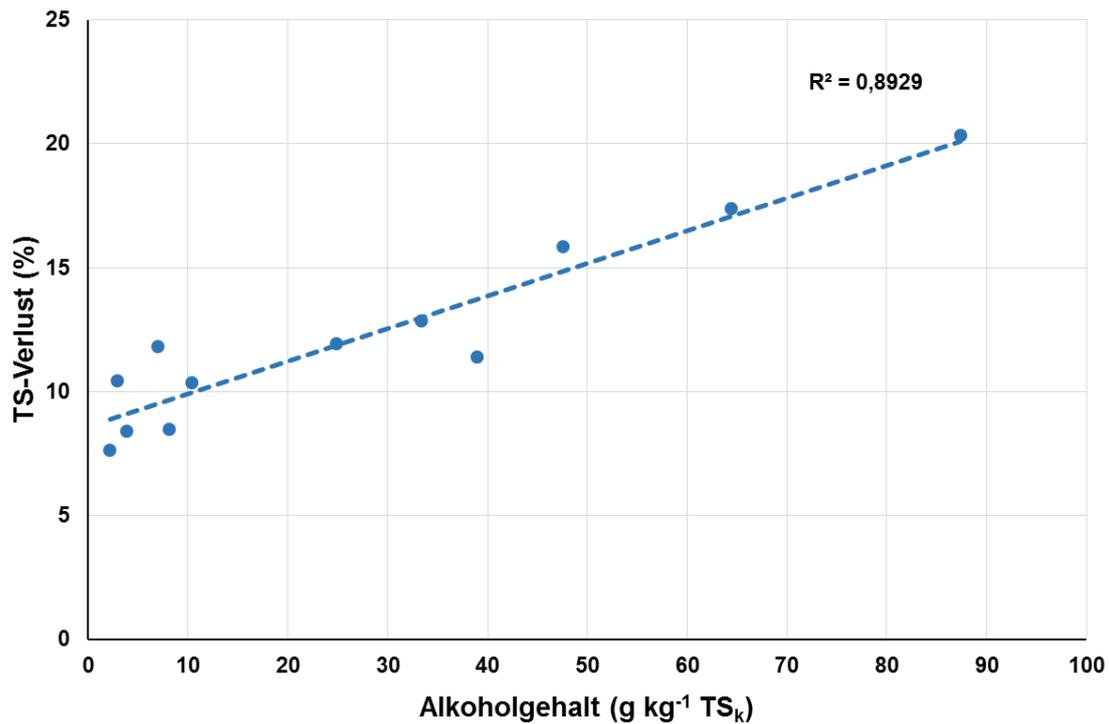


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen Alkoholgehalt und TS-Verlust in zwölf Zuckerrübensilagen im Jahr 2015 (Lagerungsdauer: 90 Tage unter anaeroben Bedingungen)

Dieses Ergebnis betätigt die bereits im Jahr 2014 gewonnene Erkenntnis, dass die Intensität der alkoholischen Gärung starken Einfluss auf die Höhe der TS-Verluste und damit auch auf die Höhe der Methanbildungspotenzialverluste nimmt. Auch in diesem Fall wurde der Zusammenhang zwischen den Zuckergehalten in den frischen Rüben und der Menge des Alkohols in den Silagen untersucht (Tabelle 22). Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,37 konnte dabei ein ähnlich schwacher Zusammenhang wie im Jahr 2014 ermittelt werden.

Tabelle 22: Korrelation zwischen Zuckergehalt (Luff-Schoorl) der frischen Rüben und dem Alkoholgehalt in der Silage nach 90 Tagen im Jahr 2015

Probe	\sum Alkohol g kg ⁻¹ TS _k	Zucker g kg ⁻¹ FM
VH 1	87,39	168
VH 2	47,54	167
VH 3	33,33	165
SY 1	8,15	160
SY 2	38,91	163
SY 3	6,99	168
K 1	2,93	160
K 2	10,42	165
K 3	64,41	159
ST 1	3,86	159
ST 2	24,87	159
ST 3	2,16	160
Korrelation	0,37	

Ein Einfluss der jeweiligen Sorte und deren Zuckergehalt auf die Höhe der Verluste konnte somit auch bei einem Anbau aller Sorten auf einem gemeinsamen Standort nicht nachgewiesen werden.

Da jeweils nur eine Mischprobe der vier Wiederholungen einer jeden Sorte analysiert werden konnte, wurde die Korrelation der dabei ermittelten TS-Verluste mit den in vierfacher Wiederholung vorliegenden FM-Verlusten ermittelt. Hier konnte mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,96 ein starker linearer Zusammenhang nachgewiesen werden. Die Gehalte an Acid Detergent Fiber (ADF) und Rohasche (XA) werden nicht aufgeführt, da sie sowohl in der Silage, als auch bei den frischen Rüben über alle Sorten nur geringfügig voneinander abwichen. Auch Buttersäure sowie andere organische Säuren wurden nur in geringen Mengen von unter 1 g kg⁻¹ TS_k nachgewiesen und sind deshalb hier nicht aufgeführt.

Im Jahr 2015 kann der pH-Wert, welcher über alle Sorten in einem sehr engen Bereich zwischen 3,38 und 3,5 lag und somit die Ergebnisse aus den Jahren 2013 und 2014 bestätigte, als Indiz für die erfolgreiche Silierung aller Sorten gewertet werden.

5. Diskussion

5.1 Kennwerte bei der Aufbereitung von Zuckerrüben

Dieses Kapitel beinhaltet die Diskussion der für die Aufbereitung relevanten Kriterien, welche im Rahmen der Arbeit untersucht wurden. Es erfolgt eine Einordnung der Relevanz der Kriterien im Prozess der Aufbereitung, sowie eine Beurteilung der Beeinflussbarkeit durch Sortenwahl.

5.1.1 Das Abschlussgewebe

Im Rahmen der Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Festigkeit des Abschlussgewebes sowohl durch den Genotyp, als auch durch die Umwelt beeinflusst wird. Der Einfluss des Standorts konnte durch die maximale Differenz zwischen der Sorte mit der geringsten und der Sorte mit der höchsten Festigkeit des Periderms nachgewiesen werden. Bei den Rüben, die in den Jahren 2013 und 2014 auf verschiedenen Standorten angebaut wurden, lag die maximale Differenz bei 44 N (2013) und 63 N (2014). Beim Anbau aller Sorten auf einem Standort betrug die maximale Differenz hingegen nur 27 N und unterlag somit deutlich geringeren Schwankungen als beim Anbau auf verschiedenen Standorten. Daher ist davon auszugehen, dass durch die Interaktion von Genotyp und Umwelt keine konkrete Aussage zur Festigkeit des Periderms einer speziellen Sorte getroffen werden kann. Zwar konnten genotypische Unterschiede festgestellt werden, jedoch unterliegen diese natürlichen Schwankungen. Somit kann die Anfälligkeit einer Sorte gegenüber mechanischen Beschädigungen nicht mit einem absoluten Wert angegeben werden.

Die Unterschiede zwischen den Sorten waren teilweise signifikant. So hatte die Sorte VH 2 im Jahr 2015 das Gewebe mit der signifikant höchsten Festigkeit. Und auch in den Jahren zuvor konnte bei dieser Sorte, wenn auch ohne statistische Absicherung, das festeste (2014), bzw. das zweitfesteste Abschlussgewebe ermittelt werden. Dies kann als Indiz für den Einfluss des Genotyps gewertet werden, sodass durch Sortenwahl und züchterische Tätigkeit der Beschädigungsgrad an Zuckerrüben reduziert werden kann. Da nicht ermittelt werden konnte, welche Inhaltsstoffe der jeweiligen Sorte mit dem Maß der Festigkeit korrelieren, sollte dies Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Als möglicher Inhaltsstoff kommt der Marktgehalt in Frage, welcher durch HOFFMANN (2017) sowie SCHNEPEL und HOFFMANN (2016) mit der Empfindlichkeit gegenüber Wurzelbruch in Zusammenhang gebracht werden konnte und damit auch als Indikator für die Gewebestabilität von Zuckerrüben (-sorten) in Betracht gezogen wird.

Der Einfluss von Beschädigungen auf die Höhe der Lagerungsverluste bei frischen Zuckerrüben wurde in verschiedenen Studien hinlänglich untersucht und dabei als bedeutender Faktor ermittelt (KENTER et al., 2006; STEENSEN & AUGUSTINUSSEN, 2002). Verminderte Beschädigungen an der Zuckerrübe könnten somit dazu beitragen, Verluste während der Mietenlagerung zu reduzieren. HUIJBREGTS (2008) stellte den Zusammenhang zwischen Beschädigungsgrad der Rübe und den daraus resultierenden Respirationsverlusten über eine Lagerungszeit von 20 Tagen dar (Abbildung 36).

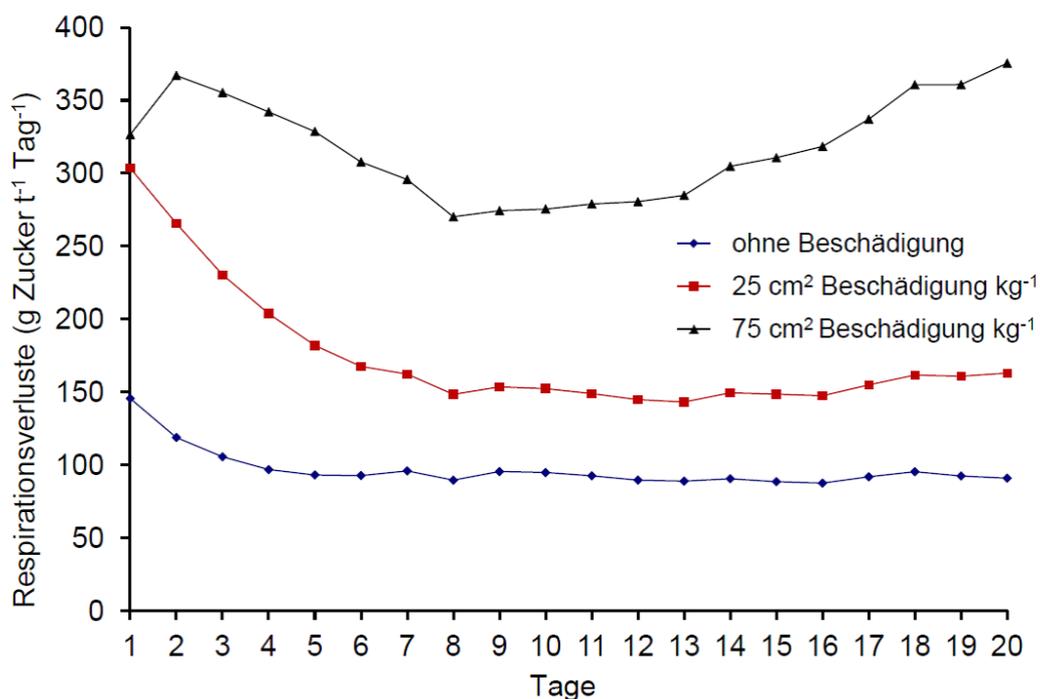


Abbildung 36: Einfluss von Verletzungen der Zuckerrübe auf die Höhe der Zuckerverluste während der Lagerung bei 10°C nach HUIJBREGTS (2008)

In dieser Studie wurde nachgewiesen, dass der Grad der Beschädigung maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Verluste nimmt. Diese Ergebnisse weisen eindeutig darauf hin, dass eine mögliche Verringerung von mechanischen Beschädigungen durch gezielte Sortenwahl von hoher Bedeutung für die Mietenlagerung von Zuckerrüben wäre.

Dies trifft neben der Zuckerindustrie auch auf Biogas produzierende Betriebe zu, welche Zuckerrüben einsetzen. Da es betriebsindividuell verschiedenen Varianten der Nutzung von Zuckerrüben in Biogasanlagen gibt, reichen diese von der ausschließlichen Verfütterung frischer Rüben von September bis Januar bis zur ganzjährigen konservierenden Lagerung, welche jedoch häufig mit einer Zwischenlagerung in Mieten vor der Silierung verbunden ist. In allen Fällen spielen Zuckerverluste während der Mietenlagerung eine mehr oder minder bedeutende Rolle. Neben der Ernte, welche den Hauptgrund für mechanische Beschädigungen von Zuckerrüben darstellt (OLSSON, 2008), ist die Trockenreinigung und Verladung ein weiterer Ursprung von

Beschädigungen. Da die Zuckerrüben an Biogasanlagen nach der Trockenreinigung und Verladung mit einem Reinigungslader teilweise für zum Teil mehrere Tage bis Wochen zwischengelagert werden, ist die Anfälligkeit gegenüber Beschädigungen hier von besonderer Bedeutung. Dass eine intensive Trockenreinigung zu deutlich stärkeren Beschädigungen der Zuckerrüben führt, welche bei einer anschließenden Lagerung zu signifikant höheren Verlusten führen, wurde durch INGELSSON (2002) nachgewiesen. Die Zuckerverluste der intensiv gereinigten und damit signifikant stärker beschädigten Rüben waren mit durchschnittlich 0,19 % je Tag signifikant höher als bei schwach gereinigten Rüben mit weniger Beschädigungen (0,14 %).

Unabhängig von den bereits bei der Ernte entstehenden Beschädigungen haben die Versuche zur Festigkeit des Periderms über eine Lagerungszeit von acht Wochen gezeigt, dass unter kühlen Bedingungen nicht mit einer Veränderung der Gewebefestigkeit zu rechnen ist. Dabei wurden, durch die Lagerung im Kühlhaus (4 bis 6°C), die optimalen Lagerungsbedingungen von Zuckerrüben, mit Temperaturen zwischen 0 bis 4°C und einer relativen Luftfeuchte von 90 bis 95 % (STEINHÖFEL, 2011), eingehalten. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass unter solchen Bedingungen der Zeitpunkt der Trockenreinigung und Verladung keinen Einfluss auf die Intensität der dabei auftretenden Beschädigungen hat. Da sich Beschädigungen dennoch nicht vermeiden lassen, sollte nach der Verladung mittels Reinigungslader eine schnelle Weiterverarbeitung oder Silierung in ganzer Form angestrebt werden, um weitere Respirationsverluste zu vermeiden.

Nach Bestimmung der für die Festigkeit verantwortlichen Inhaltsstoffe der Zuckerrübe könnte durch züchterische Bearbeitung und anschließende Sortenwahl das Ausmaß der Beschädigungen bei der Ernte und Verladung von Zuckerrüben reduziert werden. Dadurch ließen sich sowohl im Prozess der Zuckerproduktion als auch beim Einsatz frischer Zuckerrüben in Biogasanlagen Verluste bei der Mietenlagerung reduzieren.

5.1.2 Die Wurzelrinne als Quelle von Erdanhang

Als wichtigste Erkenntnis aus den Untersuchungen der drei Jahre kann festgehalten werden, dass sowohl der Erdanhang an der gesamten Rübe, als auch die Effektivität der Reinigung deutlichen Schwankungen unterliegen und stark von Standort und Witterung bei der Ernte abhängig sind. Durch den Einsatz einer Wäsche lässt sich ein Großteil der anhaftenden Erde zuverlässig abreinigen, wobei nach der Wäsche anhaftende Erde ausschließlich in der Wurzelrinne zu finden war, so dass diese als Quelle von Erdanhang eindeutig identifiziert werden konnte. Die Identifikation von Standort/Witterung und genotypisch bedingter Wurzelrinne als Faktoren des Erdanhangs decken sich mit den Angaben von KROMER (1988), welcher die Parameter Standort (Bodenart), Morphologie der Rübe und Erntetechnik als Einflussfaktoren auf den Erdanteil in einem

Wirkungsdreieck darstellt (Abbildung 37). Auch der, durch die Witterungsbedingungen beim Erntetermin bedingte Bodenwassergehalt beeinflusst die Menge der anhaftenden Erde.

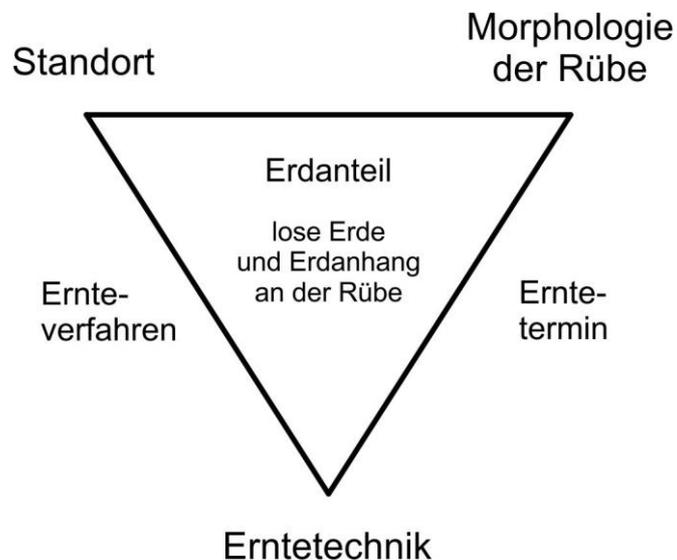


Abbildung 37: Wirkungsdreieck der Einflussfaktoren auf den Erdanteil nach der Ernte (nach KROMER, 1988)

Da die Erntetechnik in dieser Arbeit keiner der variablen Faktoren war, wurde diese nicht berücksichtigt. Insbesondere der Einfluss des Standorts konnte über die drei Versuchsjahre dokumentiert werden. KOCH (2002) stellte ebenfalls fest, dass der Erdanhang von Zuckerrüben besonders von der Witterung während der Ernte und auch von der Bodenart abhängig ist, was mit den Ergebnissen dieser Arbeit übereinstimmt. Der Einfluss der Wurzelrinne konnte dabei im Rahmen dieser Untersuchungen herausgestellt werden. Trotz effektiver Wäsche, bei der 95-99 % der anhaftenden Erde entfernt wurde, wurde der restliche noch verbliebene Erdanhang in der Wurzelrinne lokalisiert. Dies bestätigt den Einfluss der Wurzelrinne auf den Erdanhang, welcher bereits von VERMEULEN & KOOLEN (2002) und VERMEULEN et al. (1997) festgestellt wurde. Diese stellten heraus, dass bei der Ernte von Zuckerrüben ein gewisser Anteil von Erde am Rübenkörper verbleibt und dabei vor allem in der Wurzelrinne anhaftet. Versuche zur Reduktion des Erdanhangs durch Kreuzung von Zucker- und Futterrüben und Selektion von Genotypen mit glatter Oberfläche (sog. Clean beets) ergaben einen um bis zu 50 % reduzierten Erdanhang (GRAM & JØRGENSEN, 2002), was beweist, dass sich der Erdanhang durch züchterische Bearbeitung der Wurzelrinne reduzieren lässt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Parameter wie der Zuckergehalt bei der Züchtung eine größere Rolle spielen als die Reduktion des Erdanhangs. Ein Kompromiss zwischen verschiedenen Parametern wird daher die Basis zur Selektion einer glatten Rübenoberfläche sein. OSSENKOP et al. (2003) stellten jedoch fest, dass die Faktoren Genotyp, Abreinigungssystem und Umwelt zur Beurteilung des Erdanhangs nicht unabhängig voneinander wirken und somit Mittelwertvergleiche der Genotypen nicht im Mittel über alle Umwelten erfolgen dürfen. Dies

bestätigt die in dieser Arbeit getroffene Entscheidung die Zuckerrüben sowohl auf unterschiedlichen Standorten, als auch im letzten Jahr auf einem gemeinsamen Standort anzubauen. Dass dabei im letzten Jahr nur geringen Unterschiede zwischen den Genotypen festgestellt werden konnten, deckt sich mit den Erkenntnissen von OSSENKOP et al. (2003). Diese fanden heraus, dass eine Beurteilung des Einflusses des Genotyps nur möglich ist, wenn ein bestimmtes Niveau anhaftender Erde weder über- noch unterschritten wird. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei hohen Erdmassen der Einfluss des Genotyps auf die anhaftende Erde in der Wurzelrinne durch den Einfluss von Boden und Erntebedingungen überlagert wird. Bei Umwelten auf denen mit geringen anhaftenden Erdmassen zu rechnen ist, wird durch Vorreinigungsmaßnahmen während oder nach der Ernte (in dieser Arbeit durch die Wäsche) so viel der anhaftenden Erde entfernt, dass eine signifikante Sortendifferenzierung nicht mehr möglich ist. Da die Zuckerrüben im Jahr 2015 sowohl vor der Wäsche, als auch danach, Erdanhaftungen auf einem sehr niedrigen Niveau aufwiesen, ist dies als möglicher Grund für die geringen Unterschiede in Betracht zu ziehen. Daher lässt sich im Rahmen der einjährigen Überprüfung der Sorten auf diesem Standort keine Empfehlung zur Vorzüglichkeit eines Genotyps ableiten. Aufgrund des starken Einflusses von Standort und Witterung auf die Menge anhaftender Erde und das im Jahr 2015 bei allen Sorten nachgewiesene Potenzial geringe Erdanhaftungen zu verursachen, bzw. sich gut und effektiv reinigen zu lassen, macht eine weitere Selektion zur Reduktion der Wurzelrinne bei diesen Genotypen fraglich. Dennoch ist es unter Beachtung der jährlich großen umzusetzenden Zuckerrübenmengen, sowohl in der Industrie als auch in der Biogasbranche erstrebenswert, den Anteil anhaftender Erde weiter zu reduzieren. Dieses Selektionsziel sollte, insbesondere bei Zuckerrüben für die Biogasproduktion, nicht mit dem Zuckerertrag als oberstes Selektionskriterium konkurrieren. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht nachgewiesen werden konnte, dass es durch den Eintrag von Erde in den Fermenter zu starken Beeinträchtigungen der Anlagentechnik durch Sedimentation kommt. Berichte aus der Praxis lassen darauf keine Rückschlüsse zu.

5.1.3 Zerkleinerung von Zuckerrüben

Bei den Zerkleinerungsversuchen stellte sich heraus, dass es, wie bei der Festigkeit des Abschlussgewebes, zu einer stärkeren Beeinflussung der Ergebnisse durch den jeweiligen Standort als durch den Genotyp kommt. Als Beleg für diese Aussage kann der Vergleich der Ergebnisse aus den Jahren 2013 und 2014 (Anbau auf verschiedenen Standorten) mit dem Jahr 2015 (Anbau auf einem Standort) betrachtet werden. Betrug die Differenz zwischen der Sorte mit der größten zur Zerkleinerung benötigten Arbeit und der Sorte mit der geringsten zur Zerkleinerung benötigten Arbeit in den Jahren 2013 und 2014 ca. 9 Nm bzw. ca. 9,5 Nm, lag die Differenz im Jahr 2015 bei nur 4,8 Nm. Die relativ geringen Schwankungen innerhalb der drei Sorten eines Standorts in den

Jahren 2013 und 2014 unterstreichen diese Erkenntnis. Dennoch konnte durch den Anbau aller Sorten auf einem Standort nachgewiesen werden, dass auch zwischen den Genotypen signifikante Unterschiede bezüglich der für die Zerkleinerung aufzuwendenden Arbeit auftreten. Hier sind die Sorten K 2 (höchster Arbeitsaufwand) sowie K 3 und ST 1 (geringster Arbeitsaufwand) zu nennen, da diese sich signifikant voneinander unterscheiden. Um zu überprüfen, ob ein Zusammenhang zwischen der, mittels Stempeltest ermittelten, Kraft zur Beschädigung der Rüben und der für die Zerkleinerung aufzuwendenden Arbeit besteht, wurde das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet (siehe Abbildung 38).

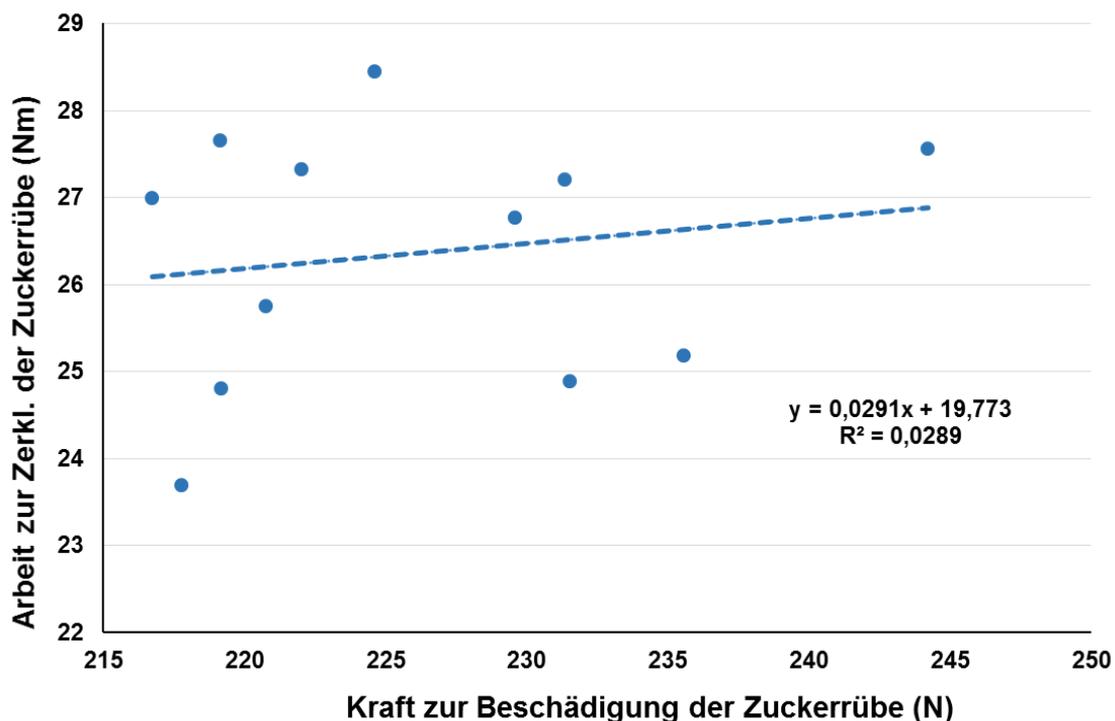


Abbildung 38: Zusammenhang zwischen der Kraft, welche zu einer Beschädigung des Periderms führt und der für die Zerkleinerung notwendigen Arbeit im Jahr 2015

Mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,03 konnte kein Zusammenhang zwischen den beiden Parametern nachgewiesen werden. Somit ist nicht davon auszugehen, dass die Festigkeit des Periderms mit der Festigkeit des inneren Gewebes korreliert. Dieser Effekt ist positiv zu bewerten, da dies eine Zuckerrübensorte mit geringer Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen und einer gleichzeitigen Zerkleinerung bei geringem Energieaufwand als mögliches zukünftiges Zuchtziel nicht ausschließt. Inwiefern die Untersuchungen im Labor auf die Praxis zu übertragen sind, lässt sich schwer einschätzen. Durch die relativ geringen Unterschiede im Jahr 2015 ist zu vermuten, dass beispielsweise Leerlaufzeiten der Zerkleinerungsmaschine zu höheren (Energie-) Verlusten führen als durch die Auswahl der Sorte eingespart werden kann. Werden hier durch die Züchtung in der Zukunft keine deutlichen Unterschiede realisiert, haben Kriterien wie Krankheitsresistenz oder Toleranz gegenüber Nematoden einen deutlich höheren Stellenwert bei

der Sortenwahl. Der Auswahl der Sorte kommt im Vergleich zu anderen Faktoren somit vermutlich nur eine geringe Bedeutung zu, wenn es darum geht Energie bei der Zerkleinerung einzusparen. Auch wenn die Übertragbarkeit in die Praxis schwierig zu beurteilen ist, lieferte die Labormethode zuverlässige Ergebnisse, die es ermöglichen auch feine Unterschiede zwischen Sorten zu quantifizieren. Der Einsatz anderer Methoden, die beispielsweise einen ziehenden Schnitt zur Trennung des Materials nutzen, verspricht keinen Vorteil gegenüber der in diese Arbeit verwendeten Methode. Zum einen entspricht der ziehende Schnitt nicht den Bedingungen der Praxis, zum anderen wurde bereits durch SMIRNOW (1958), sowie EHLERT & PLÖTNER (1975) festgestellt, dass der ziehende Schnitt bei Hackfrüchten zu vermeiden ist, da aufgrund großer Reibwinkel zwischen Hackfrucht und Metall keine Energieersparnis möglich ist.

Trotz fehlender Korrelation zu den Ergebnissen des Stempeltestes kommt auch für die zwischen Genotypen und Umwelten schwankenden Ergebnisse des Zerkleinerungsversuchs der Markgehalt als möglicher Grund in Betracht. Die Feststellung, dass es vor allem zwischen den Versuchsjahren und damit zwischen den Standorten/Umwelten aber auch zwischen den Genotypen zu signifikanten Unterschieden kommt, deckt sich mit Ergebnissen von KENTER und HOFFMANN (2007) sowie MÄRLÄNDER und HOFFMANN (2008) welche die Einflussfaktoren auf die Höhe des Markgehalts untersuchten. KENTER und HOFFMANN (2007) stellten fest, dass sowohl der Genotyp als auch die Umwelt den Markgehalt der Zuckerrüben hochsignifikant beeinflussen, was die in diesem Versuch ermittelten Schwankungen erklären würde. MÄRLÄNDER und HOFFMANN (2008) berichten, dass der Markgehalt aktueller Zuckerrüben genotypen zwischen 3,4 und 4,4 % in der Frischmasse beträgt, wobei die Varianz des Markgehalts zu 30 % auf den Genotyp und zu 24 % auf den Einfluss der Umwelt zurückzuführen ist. Die Höhe des Markgehalts und damit möglicherweise die Festigkeit des Gewebes und die zur Zerkleinerung benötigte Arbeit, hängen zum einen vom Wasserangebot und zum anderen von der Stickstoffdüngung ab (KENTER & HOFFMANN, 2007). Vor diesem Hintergrund wären, sowohl für die Festigkeit des Periderms, als auch für den Energieaufwand zur Zerkleinerung, Folgeuntersuchungen mit variierender Wasser- und Stickstoffversorgung und einer Analyse des Markgehalts sinnvoll. Dadurch könnten mögliche Zusammenhänge identifiziert werden. Sollte der Markgehalt als beeinflussender Parameter identifiziert werden, ließe sich dieser als wichtiges Selektionskriterium für die zukünftige Züchtung nutzen.

5.2 Silierung unter anaeroben Bedingungen

5.2.1 Beurteilung des Silierverlaufs

Inhalte dieses Abschnitts wurden im Vorfeld durch DIRKS et al. (2017) veröffentlicht.

Die in den ersten 48 Stunden und in allen Versuchsbehältern annähernd parallel verlaufende Absenkung des pH-Werts lässt sich durch die im Zuckerrübenmus vorherrschenden Bedingungen begründen. Laut PAHLOW und HÜNTING (2011) läuft die Umwandlung von pflanzlichen Kohlenhydraten in organische Säuren spontan ab, „wenn silieraugliche Milchsäurebakterien (MSB) bei einem ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt eines Siliergutes mit genügend vergärbaren Zuckern auf eine sauerstofffreie Umgebung treffen“. Diese Bedingungen wurden in diesem Versuch erfüllt. Vor allem die große Menge des im frischen Rübenmus enthaltenen Zuckers bietet den vorhandenen Milchsäurebakterien eine günstige Grundlage zur Bildung organischer Säuren, welche zu einer Absenkung des pH-Werts führen. Da jedoch mit Ausnahme einer Variante mehr Essigsäure als Milchsäure festgestellt wurde, ist davon auszugehen, dass die Essigsäurebildung bei der Lagerung von Zuckerrüben unter anaeroben Verhältnissen eine bedeutende Rolle spielt. Dies deckt sich mit der Aussage von JEROCH et al. (1993), die festgestellt haben, dass es bei der Silierung von Zuckerrüben durch heterofermentative Bakterien zur Bildung von Milch- als auch Essigsäure kommt. Durch die Lagerung des Muses in geschlossenen Glasbehältern konnte der Zustand einer nahezu sauerstofffreien Umgebung nach Verbrauch des anfänglich in den Gläsern enthaltenen Sauerstoffs in kurzer Zeit erreicht werden. Um zu überprüfen, ob bei unterschiedlichen Voraussetzungen (Sorten, Standort, Erntezeitpunkt, Zuckergehalt) eine gleichmäßige und schnelle Silierung stattfindet, wurden die beschriebenen heterogenen Bedingungen geschaffen. Anhand der statistischen Auswertung konnte ermittelt werden, dass sich mit zunehmender Lagerdauer zum Teil signifikante Unterschiede zwischen den Varianten ergaben. Zwar lief die Säuerung der Silagen bei allen Sorten in annähernd gleicher Geschwindigkeit ab, jedoch kam es mit zunehmender Dauer der Lagerung zu signifikanten Unterschieden im pH-Wert. Da sich die pH-Werte trotz täglicher Öffnung der Gläser bei allen Sorten unter 3,7 befanden, kann davon ausgegangen werden, dass alle untersuchten Silagen vollständig konserviert waren. Sie erfüllten damit die von GALLER (2011) formulierte Anforderung an eine Nasssilage, die bei einem TS-Gehalt < 20 % (hier höher) einen pH-Wert < 4 aufweisen soll. Bei einer strikt anaeroben Lagerung ohne Öffnung der Gläser ist davon auszugehen, dass die pH-Werte der Silagen noch geringer ausgefallen wären. Diese Annahme bestätigte sich in den Versuchen aus den Jahren 2014 und 2015. Mit durchschnittlichen pH-Werten zwischen 3,44 und 3,61 (2014), sowie 3,38 und 3,5 (2015) lagen alle Silagen deutlich unter dem kritischen Schwellenwert von 4 und fielen, wie erwartet, geringer aus als im Jahr 2013. Die ermittelten Ergebnisse decken sich mit den Aussagen von ERDELJAN (1994), welcher sowohl bei der

anaeroben Lagerung von Zuckerrübenmus in 60 Liter Behältern, als auch in 1,5 Liter Behältern eine schnelle und sichere Silierung nachweisen konnte. Wie in dieser Arbeit fielen die pH-Werte bereits in den ersten zehn Tagen deutlich unter 4. Zwischen dem zehnten Tag und der Auslagerung nach 60 Tagen fand keine bedeutende Veränderung des pH-Werts mehr statt. Das von ERDELJAN (1994) gewonnene Wissen konnte durch die täglichen Messungen im Rahmen dieser Arbeit ergänzt werden. Diese haben gezeigt, dass die Säuerung der Silage nicht erst nach zehn Tagen, sondern bereits nach sieben bis acht Tagen (fast) vollständig abgeschlossen ist.

Abgesehen von der Wahl des Lagerungsverfahrens bieten Zuckerrüben also in Hinblick auf den ausreichenden Feuchtigkeitsgehalt und die große Menge vorhandenen Zuckers gute Bedingungen für eine schnelle und sichere Silierung. Dabei nahm die Höhe des im Ausgangsmaterial enthaltenen Zuckers keinen Einfluss auf die Intensität der Absenkung des pH-Werts. Dies spricht dafür, dass die in Zuckerrüben zum regulären Erntezeitpunkt üblicherweise enthaltenen Zuckergehalte eine ausreichende Grundlage für eine effektive und schnelle Absenkung des pH-Werts bilden. Dass die Schwankungen im Bereich zwischen 15,1 % (z.B. SY 1) und 17,6 % (K 1) Zuckergehalt (bedingt durch unterschiedliche Erntezeitpunkte) im Ausgangsmaterial keinen Einfluss auf die Absenkung des pH-Werts hatten, bestätigt dies. Auch der durch einen Anbau der Sorten auf verschiedenen Standorten zu vermutende unterschiedliche Anfangsbesatz mit Milchsäurebakterien hatte keinen Einfluss auf den Erfolg der Silierung.

Inwieweit sich eine frühe Ernte der Zuckerrüben und damit ein geringerer Zuckergehalt negativ auf die Silierung auswirken, muss überprüft werden. Die Definition eines möglichen Schwellenwerts für den Zuckergehalt, ab dem eine sichere Silierung nicht mehr gewährleistet wäre, hätte hohe Relevanz für die Praxis.

Dass die Ergebnisse dieser Arbeit auch auf eine Lagerung von Zuckerrübenmus in offenen Erdbecken/Lagunen übertragbar sind, zeigen die Ergebnisse von GRÖBLINGHOFF (2011). Dieser erfasste pH-Werte von im Erdbecken gelagertem Zuckerrübenmus in unterschiedlichen Tiefen. Diese lagen 50 cm, 100 cm, 200 cm und 300 cm unter der Lagunenoberfläche und wurden in vierfacher Wiederholung geprüft. Nach 60-tägiger Lagerungsdauer lagen alle gemessenen pH-Werte zwischen 3,55 und 3,78. Der pH-Abfall erfolgte im oberen Messpunkt (50 cm) schneller als in den darunter liegenden Messpunkten. Bereits nach 5 Tagen lag dieser bei einem Niveau von 4,0. Nach 10 Tagen war dieser Wert auch in tieferen Schichten erreicht. Daher ist anzunehmen, dass auch bei der Lagerung von Zuckerrübenmus in offenen Erdbecken/Lagunen ein ähnlicher Verlauf der Säuerung wie unter strikt anaeroben Bedingungen zu erwarten ist. Dies gilt insbesondere für die tieferen Schichten, welche durch die obere Schicht weitestgehend vor dem Einfluss von Sauerstoff geschützt sind.

5.2.2 Verluste und Ursachen

Bei der Betrachtung der Ergebnisse aus den Jahren 2014 und 2015 muss berücksichtigt werden, dass der Anbau der Sorten im Jahr 2014 auf verschiedenen Standorten stattfand, während diese im Jahr 2015 auf einem Standort angebaut wurden. Ein Vergleich der entscheidenden Parameter aus beiden Jahren zeigt eine geringere Variation im Jahr 2015. Die Spannweite der TS-Verluste lag im Jahr 2014 zwischen 2,6 und 22,5 % und auch die MBP-Verluste schwankten mit Werten von 3 bis 18,3 % stärker als im Jahr 2015. In diesem Jahr lagen die TS-Verluste zwischen 7,6 und 20,3 %, während die MBP-Verluste zwischen 10 und 19,6 % schwankten. Auch die Spanne der Alkoholgehalte in den Silagen unterschied sich mit Werten von 4 bis 169,8 g kg⁻¹ TS_k (2014) und 2 bis 87,4 g kg⁻¹ TS_k (2015) deutlich voneinander. Dabei erscheint die Spanne der in beiden Versuchsjahren ermittelten Verlusten an Methanbildungspotenzial relativ hoch und wich sowohl positiv als auch negativ von den Erwartungen aus vorherigen Untersuchungen ab. Ergebnisse von BEECK et al. (2014) ergaben eine Verringerung des Methanbildungspotenzials von 10,8 % über eine Lagerungsdauer von fast neun Monaten in luftdicht abgedeckten 1000 Liter Containern. ERDELJAN (1994) stellte bei der Silierung von Zuckerrübenmus in geschlossenen Glasgefäßen (1,5 Liter) über 60 Tage (n=6) TS-Verluste zwischen 2,1 und 2,9 % fest. Allerdings handelt es sich dabei um TS-Verluste und nicht um MBP-Verluste, was jedoch aufgrund der engen Korrelation MBP-Verluste in ähnlicher Dimension erwarten lässt. Die TS-Verluste wurden gravimetrisch bestimmt, unter der Annahme, dass es in geschlossenen Glasgefäßen nicht zum Verlust von Frischmasse sondern nur zum Verlust von Trockensubstanz in Form von CO₂ kommt. Bei der Flüssigkonservierung von Zuckerrübenmus in 60 Liter Behältern unter anaeroben Bedingungen stellte ERDELJAN (1994) hingegen einen durchschnittlichen TS-Verlust von 4,4 % fest (n=5), ebenfalls bei einer Silierdauer von 60 Tagen. Da im Rahmen der Versuche von ERDELJAN (1994) ebenfalls festgestellt wurde, dass in den 1,5 Liter fassenden Glasgefäßen (n=6) bereits nach 10 Tagen zwischen 56 und 88 % der gesamten TS-Verluste zu verzeichnen waren, ist nicht davon auszugehen, dass die um 30 Tage von der in dieser Arbeit gewählten Lagerungszeit abweichende Silierdauer der Grund für die unterschiedliche Höhe der Verluste ist. Vielmehr wären durch die hier gewählte Versuchsanordnung, welche ebenfalls eine Lagerung ohne den Einfluss von Sauerstoff sicherstellte, Verluste in ähnlicher Dimension zu erwartet gewesen. Jedoch zeigte sich, dass es innerhalb des Lagerungsverfahrens zu unterschiedlich hohen Verlusten kommt. Ein expliziter Einfluss der Sorte konnte dabei nicht nachgewiesen werden.

Die in vierfacher Wiederholung gravimetrisch bestimmten FM-Verluste wurden durch die Höhe der im Labor ermittelten TS-Verluste bestätigt. Hier wurde eine hohe Korrelation zwischen FM-Verlusten und TS-Verlusten nachgewiesen. Dies spricht für die Verwertbarkeit der Laboranalysen, auch wenn

diese nur als Mischprobe der vier Wiederholungen erfolgen konnten. Diese TS-Verluste sind maßgeblich für die Verringerung des Methanbildungspotenzials verantwortlich.

Besonders auffällig waren die starken Schwankungen der Alkoholgehalte in den Silagen und die damit eng korrelierten TS-Verluste. Auch wenn der in der Silage enthaltene Alkohol bei der Berechnung des Methanbildungspotenzials berücksichtigt wird und eine hohe Energiedichte aufweist, stellt jede Form der mikrobiellen Umwandlung eine Verlustquelle dar. So zeigten alle Silagen mit hohen Alkoholgehalten einen erhöhten TS-Verlust und einen damit verbundenen MBP-Verlust. Fehlgärungen als mögliche Verlustursache konnten aufgrund fehlender Buttersäure in den Silagen ausgeschlossen werden.

Ein Zusammenhang zwischen den Zuckergehalten im Ausgangsmaterial und den Alkoholgehalten in der Silage konnte nicht nachgewiesen werden. Unterschiedliche Besätze an Hefen, welche für die Bildung von Alkohol in den Silagen verantwortlich sind, kommen als Ursache für die unterschiedlichen Alkoholgehalte in Betracht. Geht man davon aus, dass durch den Anbau der Sorten auf verschiedenen Standorten im Jahr 2014 der Hefebesatz heterogener war als im Jahr 2015, wäre dies eine mögliche Erklärung für stärker schwankenden Alkoholgehalte sowie TS- und MBP-Verluste. Da an den frischen Zuckerrüben vor der Silierung keine Hefebesatzanalysen durchgeführt wurden, kann dieser Parameter nicht abschließend beurteilt werden. Jedoch könnte schwankende Hefebesätze eine mögliche Erklärung für die unterschiedlichen Alkoholgehalte sein, da unter den in diesem Versuch gegebenen anaeroben Bedingungen das Wachstum von Hefen im Vergleich zu aeroben Bedingungen deutlich reduziert ist. Auch wurde mit einer Lagerungstemperatur von 15°C das Temperaturoptimum, welches für das Wachstum von Hefen 20°C bis 25°C beträgt, unterschritten (FIEDLER, 2009). Diese Voraussetzungen könnten dazu führen, dass bei stark variierenden Hefebesätzen entsprechende Gehalte an Alkohol gebildet wurden. Ausgehend von der Annahme, dass sich in Silagen mit geringem Hefebesatz dieser nicht adäquat hat vermehren können.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass diese nur anhand einer Schätzformel ermittelt wurden und keine direkten Messungen des tatsächlichen Methanertrags nach VDI Richtlinie 4630 zugrunde liegen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Bildung von Alkoholen während der Silierung einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der auftretenden Verluste nimmt. Dabei kann es im Verfahren der anaeroben Lagerung zu deutlichen Unterschieden zwischen verschiedenen Chargen kommen. Dies konnte jedoch nicht explizit auf die eingesetzte Sorte oder deren Zuckergehalt zurückgeführt werden.

6. Zusammenfassung

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass insbesondere bei den Kennwerten, welche für die Aufbereitung der Zuckerrüben von Bedeutung sind, der Interaktion zwischen Genotyp und Umwelt eine hohe Bedeutung zukommt. Dennoch konnte neben dem starken Einfluss der Umwelt, bzw. des Standorts auch Unterschiede zwischen den untersuchten Genotypen festgestellt werden. Besonders die Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen stellt ein wichtiges Selektionskriterium für die zukünftige Züchtung dar. Der Markgehalt, welcher als mögliche Ursache in Frage kommt, könnte als Selektionskriterium für die zukünftige Züchtung dienen. Dazu müsste dieser jedoch zunächst als tatsächliche Ursache identifiziert werden, was Gegenstand zukünftiger Forschung sein muss. Sollte es gelingen, Zuckerrübensorten mit einer geringen Anfälligkeit gegenüber mechanischen Beschädigungen zu züchten, wäre dies von hoher Bedeutung sowohl für die Biogasproduktion, als auch für die Zuckerindustrie. Zuckerverluste während der Mietenlagerung ließen sich so deutlich reduzieren und die Mietenlagerung dadurch verlängern.

Bezüglich des Erdanhangs wurde festgestellt, dass der Einfluss von Bodenart und Witterung bei der Ernte den Einfluss der phänotypischen Ausprägung der Wurzelrinne deutlich überlagert. So schwankte der Anteil anhaftender Erde zwischen den drei Versuchsjahren stark. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass sich alle im Versuch beteiligten Sorten durch eine Wäsche gut reinigen lassen. Dennoch konnte auch nach der Wäsche ein gewisser Erdanhang festgestellt werden, welcher sich ausschließlich auf den Bereich der Wurzelrinne beschränkte. Somit konnte die Bedeutung der Wurzelrinne als Quelle von Erdanhang nach der Wäsche/Nassreinigung eindeutig nachgewiesen werden. Ließe sich das Volumen, bzw. die Ausprägung der Wurzelrinne durch züchterische Tätigkeit reduzieren, würde dies dazu beitragen Erdanhänge zu reduzieren und den Erfolg der Nassreinigung auf annähernd 100 % zu steigern.

Hinsichtlich der für die Zerkleinerung der Zuckerrüben zu leistenden Arbeit konnte festgestellt werden, dass auch hier der Einfluss der Umwelt den des Genotyps überlagert. So wurde festgestellt, dass ein Anbau aller Sorten auf einem gemeinsamen Standort die Differenzen zwischen den Sorten deutlich reduziert. Dennoch konnten auch bei dieser Untersuchung signifikante Unterschiede zwischen den Genotypen festgestellt werden, auch wenn dies nur auf wenige Sorten zutraf. Als mögliche Ursache für die variierenden Arbeitsaufwände zur Zerkleinerung der unterschiedlichen Genotypen kommt ebenfalls der Markgehalt in Betracht, da dieser maßgeblich von der Umwelt beeinflusst wird, was die Schwankungen zwischen den Jahren erklären würde.

Auch konnte im Rahmen dieser Arbeit der Verlauf der Silierung von gemusterten Zuckerrüben unter anaeroben Bedingungen dargestellt werden. Dabei konnte festgestellt werden, dass es bei der Silierung unterschiedlicher Sorten von unterschiedlichen Standorten zwar zu signifikanten

Unterschieden bei der Höhe des pH-Werts kommt, diese jedoch nicht von Bedeutung sind, da der pH mit Werten deutlich unter 4 immer ausreichend niedrig ausfällt.

Trotz der fehlenden Wiederholung der Laboranalysen zeigten die in den Jahren 2014 und 2015 erzielten Ergebnisse, dass die bei der konservierenden Lagerung von Zuckerrüben auftretenden Verluste innerhalb des untersuchten anaeroben Lagerverfahrens deutlichen Schwankungen unterliegen können. Bei vollständig anaerober Lagerung wurde eine Verminderung des Methanbildungspotenzials zwischen 3,05 und 19,58 % ermittelt. Eine Beeinflussung der Verlusthöhe durch eine langsame oder ungleichmäßige Silierung konnte anhand der Untersuchungen zur Entwicklung der pH-Werte ausgeschlossen werden. Auch konnte kein direkter Zusammenhang zur eingesetzten Sorte und dem jeweiligen Zuckergehalt ermittelt werden. Die Höhe der Verluste hing vielmehr stark von der Menge des gebildeten Alkohols ab. Hier gilt es in Zukunft zu untersuchen, ob die Höhe der Verluste durch den Einsatz von Siliermitteln zur Hemmung der alkoholischen Gärung reduziert werden kann.

7. Ausblick

Generell hat sich gezeigt, dass Zuckerrüben für die Produktion von Biogas geeignet sind. Der wirtschaftliche Einsatz gestaltet sich jedoch schwierig, da es zum heutigen Zeitpunkt keine einheitliche und kostengünstige Lösung zur Aufbereitung und Konservierung der Zuckerrüben gibt. Anders als beim Mais existieren auf den Betrieben individuelle Lösungen der Aufbereitung und der konservierenden Langzeitlagerung. Deren Wirtschaftlichkeit ist stark von den betriebsindividuellen Gegebenheiten abhängig, sodass sich der Einsatz von Zuckerrüben in Biogasanlagen (noch) nicht flächendeckend durchgesetzt hat. Die Ergebnisse dieser Arbeit können dazu beitragen Zuckerrübensorten züchterisch speziell an die Anforderungen bei der Aufbereitung anzupassen. Anzustreben wären vor allem Zuckerrüben mit einer glatten Oberfläche, bzw. mit einer schwach ausgeprägten Wurzelrinne, die dazu beiträgt Erdanhang zu minimieren. Auf Böden ohne Steinbesatz könnte dadurch grundsätzlich auf eine Wäsche der Rüben verzichtet werden, so wie es heute bereits bei vielen Anlagen der Fall ist. Durch Einsparung dieses Prozessschrittes ließen sich Kosten in Höhe von ca. 5 € t⁻¹ (AUGUSTIN et al., 2010) einsparen. Gelingt es zusätzlich die Festigkeit des Abschlussgewebes der Zuckerrüben zu erhöhen und damit die Anfälligkeit der Rüben gegenüber mechanischen Beschädigungen zu reduzieren, könnten Zuckerverluste bei der Mietenlagerung deutlich reduziert werden. Dies beträfe zum einen Biogasanlagen, welche Zuckerrüben ausschließlich frisch (ohne Konservierung) verfüttern und diese dafür bis ins Frühjahr in Mieten einlagern und zum anderen in besonderem Maße die Zuckerindustrie. Der Stempeltest hat sich dabei als praktikable Methode zur Ermittlung der Festigkeit des Abschlussgewebes erwiesen.

Bei der Zerkleinerung ist nicht mit einem Einsparpotenzial von Energie aufgrund züchterischer Veränderung der Zuckerrüben zu rechnen. Vielmehr gilt es hier Prozessabläufe zu optimieren, Rüst- und Standzeiten zu verkürzen und eine hohe Maschinenauslastung sicherzustellen. All diese Faktoren versprechen deutlich größere Einsparpotenziale als eine Veränderung des Rübenmaterials. Auch der Zeitpunkt der Zerkleinerung, entweder frisch nach der Ernte oder nach einigen Wochen der Lagerung, verspricht kein Einsparpotenzial. Zumal würde ein etwaiges Einsparpotenzial von Energie durch eine vorherige Lagerung der Rüben durch Zuckerverluste während dieser Lagerung deutlich übertroffen.

Die Erkenntnisse aus den Silierversuchen gilt es zukünftig weiter zu erforschen. Ließen sich Verluste bei der Silierung durch eine Unterdrückung der alkoholischen Gärung bei der Silierung konstant auf Werte unter 10 % reduzieren, würde dies einen großen Fortschritt für die konservierende Langzeitlagerung von Zuckerrüben bedeuten. Geringe Verluste würden die Wirtschaftlichkeit eines ganzjährigen Einsatzes deutlich erhöhen. Dass sich Zuckerrüben generell

für eine Silierung eignen und dass die Säuerung der Silagen unabhängig vom Zuckergehalt schnell und sicher gelingt wurde bereits nachgewiesen.

Inwieweit die in dieser Arbeit erforschten Kennwerte der Aufbereitung und Langzeitlagerung in Zukunft in Forschung und Praxis angewendet und weiter verfolgt werden hängt auch von politischen Entscheidungen ab. Durch die Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes im Jahr 2014 haben sich die Rahmenbedingungen für den Ausbau von Biogasanlagen deutlich verschlechtert. Der Anzahl an Biogasanlagen hat sich seitdem nicht nennenswert verändert. Da nicht zu erwarten ist, dass sich diese Situation bei zukünftigen Novellierungen verbessert, beschränkt sich das Potenzial zur Nutzung von Zuckerrüben in Biogasanlagen auf die bereits bestehenden Anlagen. Die Bereitschaft die Versorgung bereits bestehender Anlagensysteme, welche häufig Mais als Hauptsubstrat nutzen, zu verändern, ist als gering einzuschätzen. Veränderte Rahmenbedingungen, sowohl aus politischer, als auch aus pflanzenbaulicher Sicht könnten hingegen eher dazu führen, dass der Anteil von Zuckerrüben in Biogasanlagen steigt. Besonders das Auftreten von Maiszünsler oder Maiswurzelbohrer und damit einhergehende Anbaubeschränkungen von Mais würden die Nutzung alternativer Substrate bedingen und gegebenenfalls zu einer vermehrten Nutzung von Zuckerrüben führen. Diese wiederum würde die Relevanz der in dieser Arbeit ermittelten Kennwerte und deren Potenziale erhöhen.

8. Literaturverzeichnis

- Aigner, A. (2006): Fruchtfolgegestaltung. In: Munzert, M., Frahm, J.: Pflanzliche Erzeugung, BLV
- ASAE (1996): Compression Test of Food Materials of Convex Shape, ASAE Standards 1996, S.500-504
- Augustin, D. (2013): Bioenergierüben–Zündstoff für den Fermenter, Präsentation, Georg-August-Universität Göttingen, 10.10.2013
- Augustin, D., Hartung, E., Märländer, B. (2010): Aufbereitung, Lagerung, Silierung. In: Märländer et al., DLG-Merkblatt 363: Biomasse-Rüben–Die Zuckerrübe als Biogassubstrat. DLG Fachzentrum Land-und Ernährungswirtschaft, 1. Auflage
- Aumüller-Gruber, C. (2014a): Energierüben geben Gas, Maschinenring Magazin 01.2014
- Aumüller-Gruber, C. (2014b): Frühjahrsrüben in der Waschanlage, Zuckerrübenjournal, 20/2014, S.15-18
- Beeck, H.-T., Kasten, P., Gruber, W., Dahlhoff, A. (2014): Projekt: Einsatz von Rüben in Biogasanlagen. Schlussbericht, Hg.: Rheinischer Rübenbauern-Verband e.V. (RRV), Bonn
- Biertümpfel, A., Dr. von Buttlar, C., Conrad, M., Dudziak, D., Formowitz, B., Gramm, M., Grunewald, J., Dr. Heiermann, M., Dr. Herrmann, C., Dr. Idler, C., Dr. Jäkel, K., Kornatz, P., Dr. Vollrath, B., Willms, M., Zander, D. (2012): Energiepflanzen für Biogasanlagen-Sachsen, FNR, S. 28-34
- BISZ (Beratung und Information für den Süddeutschen Zuckerrübenbau) (2017): URL: http://bisz.suedzucker.de/Anbau/Biomasse-Rueben/Was_ist_beim_Anbau_von_Biomasse-Rueben_zu_beachten/, Stand: 20.02.17
- Bresinsky, A., Körner, C., Kadereit, J.W., Neuhaus, G., Sonnewald, U. (2008): Strasburger-Lehrbuch der Botanik, Spektrum-Akademischer Verlag, Heidelberg
- Clever, H. (2015): Untersuchung der Rhizodermisfestigkeit und der Schnittkräfte bei der Zerkleinerung von frischen und silierten Zuckerrüben, Masterarbeit am Institut für Landtechnik, Universität Bonn
- Deutsches Maiskomitee e.V. (2013). Ein Drittel der Maisanbaufläche für Biogas. URL: <http://www.maiskomitee.de/web/intranet/news.aspx?news=f9a97b5a-51c7-4fb0-ae85-c577730c5f41>
- Dirks, S., Schaiper, D., Büscher, W., Schulze Lammers, P. (2017): Konservierung von Zuckerrüben zur Substratversorgung von Biogasanlagen–Verlauf der Silierung und Verluste bei 12 Sorten, Landtechnik 2, S. 61-75
- DLG (2013): DLG-Richtlinien für die Prüfung von Siliermitteln auf die DLG-Gütezeichen-Fähigkeit. Manuskript, Frankfurt a. M.
- Döhler, H., Eckel, H., Fröba, N., Grebe, S., Grube, J., Hartmann, S., Hauptmann, A., Häußermann, U., Möller, K., Klages, S., Sauer, N., Nakazi, S., Niebaum, A., Paterson, M., Roth, U., Schultheiß, U., Stadelmann, M., Vandr , R., Wirth, B., Witzel, E., Wulf, S. (2013): Faustzahlen Biogas, 3. Ausgabe, S. 105, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt
- Duden (2017): Rheologie, URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Rheologie>, Stand: 08.03.17
- Eder, B., Schulz, H. (2006): Biogas-Praxis, Ökobuch Verlag, 3. Auflage
- Ehlert, D., Plötner, K. (1975): Zum Zerkleinern von Hackfrüchten durch Schneiden, agrartechnik, Heft 11

- Erdeljan, H. (1994): Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Flüssigkonservierung von Beta-Rüben für die Schweinemast, Dissertation, Universität Hohenheim, Forschungsbericht Agrartechnik MEG 250
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2004): Handreichung: Biogasgewinnung und –nutzung, Gülzow
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. FNR (2012): Biogas, Gülzow, S. 16
- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2015): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe. URL: https://mediathek.fnr.de/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/a/b/abb03_2015_4.jpg, Stand: 16.12.16
- Fachverband Biogas e.V. (2016): Branchenzahlen 2015 und Prognosen der Branchenentwicklung 2016. URL: [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/16-07-28_Biogas_Branchenzahlen-2015_Prognose-2016.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/16-07-28_Biogas_Branchenzahlen-2015_Prognose-2016.pdf), Stand: 13.01.17
- Fiedler, B. (2009): Pathogene Mikroorganismen: Hefen, B. Behr's Verlag GmbH & Co. KG, Hamburg
- Galler, J. (2011): Silagebereitung von A bis Z, Grundlagen-Siliersysteme-Kenngrößen, Landwirtschaftskammer Salzburg, Betriebsentwicklung und Umwelt, Linz
- Gram, N. H. und Jørgensen, A. B., (2002): Reduction of soil tare through breeding techniques. Proceedings 65. IIRB-Kongress, Brüssel
- Gröblichhoff, A. F. (2011): Lagerung von Zuckerrüben für die Biogasproduktion in einem Erdbecken, Diplomarbeit, Institut für Landtechnik, Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn
- Gross, F. (1974): Die Erzeugung des Gärfutters, In: Gärfutter–Betriebswirtschaft, Erzeugung, Verfütterung, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart
- Heilmann, H. (2012): Bewertung der Zuckerrübe als Rohstoff für die Biogasproduktion, Arbeitsbericht, Mecklenburg Vorpommern-Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei, Institut für Pflanzenproduktion und Betriebswirtschaft, Gülzow, 27.Juli 2012
- Heilmann, H. (2013): Silierung von Zuckerrüben in offenen Folienbecken, Bioenergie, Ausgabe 1/2013
- Hermus, S., Rottmann-Meyer, M.-L. (2012): Biogaserübe in der Ems-Dollart-Region, Projektbericht Groen Gas
- Hoffmann, C. (2010): Stoffliche Zusammensetzung und Trockenmasseertrag. In: Märländer et al. (2010), DLG-Merkblatt 363: Biomasse-Rüben–Die Zuckerrübe als Biogassubstrat. DLG Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft, 1. Auflage
- Hoffmann, C. (2014): Verminderung von Lagerungsverlusten durch Verbesserung der Lagerstabilität von Zuckerrübensorten, Schlussbericht, IfZ Göttingen
- Hoffmann, C. (2017): Mehr Beschädigungen, mehr Lagerverluste, Zuckerrüben Journal 1.2017
- Hoffmann, A., Glauert, T. (2013): Zuckerrüben für Biogas-worauf es ankommt!, In: Biogas Journal, Ausgabe 02/2013, S. 46-49
- Huijbregts, A.W.M. (2008): Sugar beet storage-an overview of Dutch research. International Sugar Journal 110, S. 618-624
- IfZ (2003), Verein der Zuckerindustrie, Institut für Zuckerrübenforschung, Jahresbericht 2002-2003, Göttingen
- Ingelsson, T. (2002): Rensningsgradens påverkan på lagringsförlusterna vid långtidslagring. SBU Report, 2002-1-1-605

- Jäger, E.J.; Neumann, ST., Ohmann, E. (2003): Botanik, Spektrum-Akademischer Verlag, Heidelberg
- Jahr, A., Batos, A., Pillmann, A., Hoppe, S., Dieltz, D. (2012): Determining the cutting properties of agricultural products, International Conference of Agricultural Engineering, Valencia, Spanien
- Jeroch, H., Flachowsky, G., Weißbach, F. (1993): Futtermittelkunde. Gustav Fischer Verlag, Jena
- Kaltschmitt, M., Hartmann, H., Hofbauer, H. (2009): Energie aus Biomasse. Springer-Verlag, 2. Auflage, Berlin
- Kenter, C., Hoffmann, C., Märländer, B. (2006): Sugar beet as raw material—Advanced storage management to gain good processing quality. Zuckerindustrie 131, 706–720
- Kenter, C., Hoffmann, C. (2007): Einfluss von Genotyp und Umwelt auf den Markgehalt von Zuckerrüben, Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 19
- Klotz, K.L., Finger, F.L., Anderson, M.D. (2006): Wounding increases glycolytic but not sucrolytic activities in stored sugarbeet root. Postharvest Biol. Technol. 41
- Koch, H.-J. (2002): Einfluss der Anbaugestaltung auf den Erdanhang von Zuckerrüben, Proc. 65. IIRB-Kongress, Brüssel, S. 107-116
- Kromer, K.-H. (1988): Verringerung des Erdanteils bei der Zuckerrübenernte, Deutsche Zuckerrübenzeitung Nr. 4, S. 12-13
- Kromer, K.-H., Bertram, H.H., Beckmann, A., Heier, L., Heintges, M., Jakubowski, H., Stretz, J., (2004): Test Procedures for Measuring the Quality of Sugar Beet-Seed, Drillability, Precision Seeders, Harvesters, Cleaner Loaders. IIRB, Brüssel, Belgien
- KTBL (2012): Energiepflanzen Daten für die Planung des Energiepflanzenbaus, Hg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 107-128
- KTBL (2013): Faustzahlen Biogas, Hg.: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), Darmstadt, S. 133
- Landwirtschaftlicher Informationsdienst Zuckerrübe (LIZ) (2016): Ernte-Ergebnisse-Wertetabelle. URL: http://www.liz-online.de/ernteergebnis/wertetabelle_re.htm
- Lieberei, R., Reisdorff, C. (2012): Nutzpflanzen, 8. überarbeitete Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart
- Lüttge, U., Kluge, M. (2012): Botanik-Die einführende Biologie der Pflanzen, Wiley-VCH, Weinheim
- Märländer, B. (2010): Sortenwahl, In: Märländer et al., DLG-Merkblatt 363: Biomasse-Rüben—Die Zuckerrübe als Biogassubstrat. DLG Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft, 1. Auflage
- Märländer, B., Hoffmann, C. (2008): Ursachen der Verringerung des Markgehaltes von Zuckerrüben und Auswirkungen auf Menge und Qualität der Schnitzelerzeugung, Forschungskreis der Ernährungsindustrie e.V., (AiF 14789 N)
- Mumford, D.L., Wyse, R.E. (1976): Effect of fungus infection on respiration and reducing sugar accumulation of sugarbeet roots and use of fungicides to reduce infection. J. Am. Soc. Sugar Beet Techn. 19, 157–162.
- Németh, M. (2003): Mechanische Kennwerte als Qualitätsmerkmale von Kartoffeln aus dem organischen Landbau, Dissertation, Institut für Landtechnik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
- Nussbaum, H. (2011): Siliersicherheit: Umgang mit Qualitätsminderungen bei Silage. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung, DLG-Verlags-GmbH, 8. Vollständig überarbeitete Auflage, S.185 ff.

- Olcott-Reid, B., Moore, J.N. (1995): Fruit firmness, Calyx and neck ratings correlated with field fruit rot reactions of nine strawberry cultivars, *Fruit Varieties Journal* 49, S.14-19
- Olsson, Å. (2008): The influence of damage to sugar beet roots caused by harvesters on sugar losses during storage 2006-2008. NBR Report 606-2006-2008
- Oltman, W., Burba, M., Bolz, G. (1984): Die Qualität der Zuckerrübe-Bedeutung, Beurteilungskriterien und züchterischen Maßnahmen zu ihrer Verbesserung. Fortschritte der Pflanzenzüchtung, Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg
- Ossenkop, A., Ladewig, E., Horn, W. (2003): Untersuchungen zur Beurteilung des Erdanhangs in Sortenversuchen bei Zuckerrüben, *Mitteilung der Gesellschaft Pflanzenbauwissenschaften* 15, S. 232-235
- Pahlow, G., Hünting, K. (2011): Silierung. In: *Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung*, DLG-Verlags-GmbH, 8. vollständig überarbeitete Auflage, S. 73-82
- Persson, S. (1987): Mechanics of cutting plant material, American Society of Agricultural Engineers, ASAE Monograph No 7, University of Minnesota
- Pommerehne, C. (2011): Aufbereitung von Rüben für die Biogasverwendung, Vortrag bei: Werkstatt-Wissenschaft-Wirtschaft: Praxis der Biomassennutzung, Rendsburg
- Schaffner, S., Wolf, G., Kawasch, M. (2011): Rüben als Biogassubstrat–Überblick über Verfahrenswege zu Transport, Aufbereitung und Lagerung, *Biogas Forum Bayern*, NR. II–7/2011
- Schäfer, B. C. (2008): Energierüben-Anbaustrategien und Leistungen, Fachtagung Energierüben vom 16.07.2008 in Soest
- Schnepel, K., Hoffmann, C. (2016): Genotypic differences in storage losses of sugar beet-causes and indirect criteria for selection. *Plant breeding* 135, S.130-137
- Schulze Lammers, P., Roller, O. (2010): Entblattung von Zuckerrüben-Bewertung der Arbeitsqualität und des Mehrertrages. *Landtechnik* 6, S. 464-467
- Schulze Lammers, P., Dirks, S., Schaiper, D. (2017): Aufbereitung und Konservierung von Zuckerrüben zur Verwendung in NawaRo-Biogasanlagen, Abschlussbericht, Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe
- Smirnow, I.I.(1958): Futterbereitmungsmaschinen, VEB Verlag Technik, Berlin
- Steensen, J.K., Augustinussen, E. (2002): Influence of harvest injury on sugar loss by washing and during storage of sugar betts. *Proceedings of the 65th IIRB congress*, Brussels, S. 337-348
- Steinhöfel, O. (2008): Silierung. In: *Ernährung landwirtschaftlicher Nutztiere*, Eugen Ulmer KG, Regensburg
- Steinhöfel, O., Hünting, K. (2011): Silierung und Konservierung von Saffrüchten und Nebenerzeugnissen. In *Praxishandbuch Futter-und Substratkonservierung*, DLG-Verlags-GmbH, 8. Vollständig überarbeitete Auflage, S. 137 ff.
- Stockfisch, N. (2010): Anbauverfahren. In: Märländer et al. (2010): *Biomasse-Rüben–Die Zuckerrübe als Biogassubstrat.*, DLG-Merkblatt 363, DLG Fachzentrum Land- und Ernährungswirtschaft, 1. Auflage
- Stroppel, T. (1953): Zur Systematik der Technologie des Schneidens. *Grundlagen der Landtechnik*, Heft 5/1953, Braunschweig
- Strube (2012): Rübenerde ist eine kostbare Fracht, Artikel vom 14.09.2012, URL: <http://www.strube.net/service/zuckerrueben/thema-des-monats/?n=7-16-81-652>, Stand: 07.03.2017

- Thaysen, J. (2011): Grobfutter- und Substraterzeugung: Futter- und Zuckerrüben. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung, DLG-Verlags-GmbH, 8. vollständig überarbeitete Auflage, S. 53 ff.
- Throm, G. (2007): Grundlagen der Botanik, 2. Auflage, Nikol Verlagsgesellschaft mbH & Co, Hamburg
- Timbers, G. E., Stately, L. M., Watson, E. L. (1965): Determining modulus of elasticity in agricultural products by loaded plungers, *Agricultural Engineering* 46, S.274-275
- Türk, M., Hörnig, G. (1998): Rheologische Eigenschaften flüssiger Rübensilagen, *Landtechnik*, Band 53, Nr. 2 (1998)
- Vermeulen, G.D., Klooster, J.J., Sprong, M.C., Verwijs, B.R. (1997): Effect of straight and spiral sugar beet extraction paths and lift acceleration on soil tare and relative soil adherence. *Netherl. J. agric. Sci.* 45, S. 163-184
- Vermeulen, G.D., Koolen, A.J. (2002): Soil dynamics of the origination of soil tare during sugar beet lifting, *Soil Tillage Res.* 65, S. 169-184
- Weiler, E., Nover, L. (2008): Allgemeine und molekulare Botanik, Thieme Verlagsgruppe, Stuttgart
- Weissbach, F. (2009): Das Gasbildungspotential von frischen und silierten Zuckerrüben bei der Biogasgewinnung, *Landtechnik* 64 (6.2009), S. 394-397
- Weißbach, F., Strubelt, C. (2008): Die Korrektur des Trockensubstanzgehaltes von Zuckerrübensilagen als Substrat für Biogasanlagen; *Landtechnik* 63 (2008), S. 354-355
- Weissbach, F., Wagner, A., Scholtissek, M., Auerbach, H., Herbes, C. (2011): Konservierungsverluste bei der Silierung von Zuckerrüben für die Biogasgewinnung, *Landtechnik* 66 (2011), S. 254–258
- Wiltshire, J.J.J., Cobb, A.H. (2000): Bruising of sugar beet roots and consequential sugar loss: current understanding and research needs. *Ann. Appl. Biol.* 136, S. 159–166
- Winner, C. (1982): Zuckerrübenbau, Verlagsunion Agrar, Frankfurt (Main)
- Winopal, R.-A., Drobny, L., Schneider-Häder, B. (2015): Instrumentelle Sensorik in der Ernährungswirtschaft, *DLG-Expertenwissen* 3/2015
- Wyss, U. (2011): Hochsilo. In: Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung, DLG-Verlags-GmbH, 8. vollständig überarbeitete Auflage, S. 120 ff.
- Zwick Roell (2016): <https://www.zwick.de/lebensmittel-verpackung/food/texturanalyse>, Stand: 13.12.16