



Rationalisierungs-Kuratorium
für Landwirtschaft

Technik der Siloerstellung



Prof. Dr. Yves Reckleben

Technik der Siloerstellung

November 2017

Prof. Dr. Yves Reckleben ist Inhaber des Lehrstuhls für Landtechnik in der Außenwirtschaft am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel, Grüner Kamp 11 in 24783 Osterrönfeld, Tel.: 04331-845118, E-Mail: yves.reckleben@fh-kiel.de

Die vorliegende Arbeit ist das Ergebnis einer von der Prof.-Udo-Riemann-Stiftung geförderten Untersuchung.

Herausgeber:

Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft (RKL e.K.)

Albert Spreu

Grüner Kamp 15-17, 24768 Rendsburg, Tel. 04331-708110

Internet: www.rkl-info.de; E-mail: mail@rkl-info.de

Sonderdruck aus der Kartei für Rationalisierung

Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit Zustimmung des Herausgebers

Was ist das RKL?

Das Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft ist ein bundesweit tätiges Beratungsunternehmen mit dem Ziel, Erfahrungen zu allen Fragen der Rationalisierung in der Landwirtschaft zu vermitteln. Dazu gibt das RKL Schriften heraus, die sich mit jeweils einem Schwerpunktthema befassen. In vertraulichen Rundschreiben werden Tipps und Erfahrungen von Praktikern weitergegeben. Auf Anforderung werden auch einzelbetriebliche Beratungen durchgeführt. Dem RKL sind fast 1000 Betriebe aus dem ganzen Bundesgebiet angeschlossen.

Inhalt

1.	Einleitung	923
2.	Faktoren für eine hohe Silagequalität	925
	Aufbau der Siloanlagen	925
	Verdichtung	925
	Abdeckung	927
	Entnahme	928
	Vorschub	929
3.	Ergebnisse der Praxisuntersuchung	929
	Angelieferte Mengen	930
	Verdichtung(sleistung).....	931
	Kostenbetrachtung	936
4.	Schlussfolgerungen für die Praxis	938
5.	Literatur	939

1. Einleitung

Die ganzjährige Nutzung von Biomasse als Futter oder Rohstoff setzt die Erhaltung der Eigenschaften/Qualitäten auch nach der Ernte voraus, die es zu konservieren gilt. Hierfür sind verschiedene Konservierungsverfahren wie das Kühlen, Trocknen und Silieren in der Praxis verbreitet. Dabei ist das Kühlen nur für begrenzte Lagerzeiträume geeignet. Das Trocknen ist mit einer Veränderung der Produkteigenschaften (Feuchtegehalt, Volumen und Energie) und z. T. mit einem hohen Energieverbrauch für die Wärmeerzeugung verbunden. Die Silierung als natürlich ablaufender, kostengünstiger Prozess unter anaeroben Bedingungen hat sich seit jeher zur Konservierung des Erntegutes für eine hochwertige, ganzjährige Futternutzung oder als Gärsubstrat bewährt und das ohne zusätzlichen Einsatz von Energie.

Vereinfacht gilt: je schneller die Silierung erfolgt, desto geringer sind die Verluste und umso besser die Verwendungseigenschaften. Die Geschwindigkeit ist nicht nur bei der Ernte, Silo-Befüllung und -Verdichtung notwendig, sondern ebenfalls beim luftdichten Abschluss des Silos mit Hilfe von mindestens drei Lagen Folie und der anschließenden Beschwerung/Befestigung mit Gewichten (Sandsäcke oder Reifen), um so die Windangriffsfläche zu reduzieren und eine schnelle Absenkung des pH-Wertes durch die Milchsäuregärung zu erreichen. Die Verlustminderung am Silo ist gerade bei der steigenden Flächenkonkurrenz (Nahrungs-/Futtermittel oder Energieproduktion) von besonderer Bedeutung, da weniger Fläche für die gleiche Leistung vorgehalten werden muss.

Die nachfolgende Abbildung 1 verdeutlicht diesen Zusammenhang von Konservierungsverlusten und Biogasausbeuten, gemessen in Normkubikmeter (Nm³) je Tonne Trockenmasse.

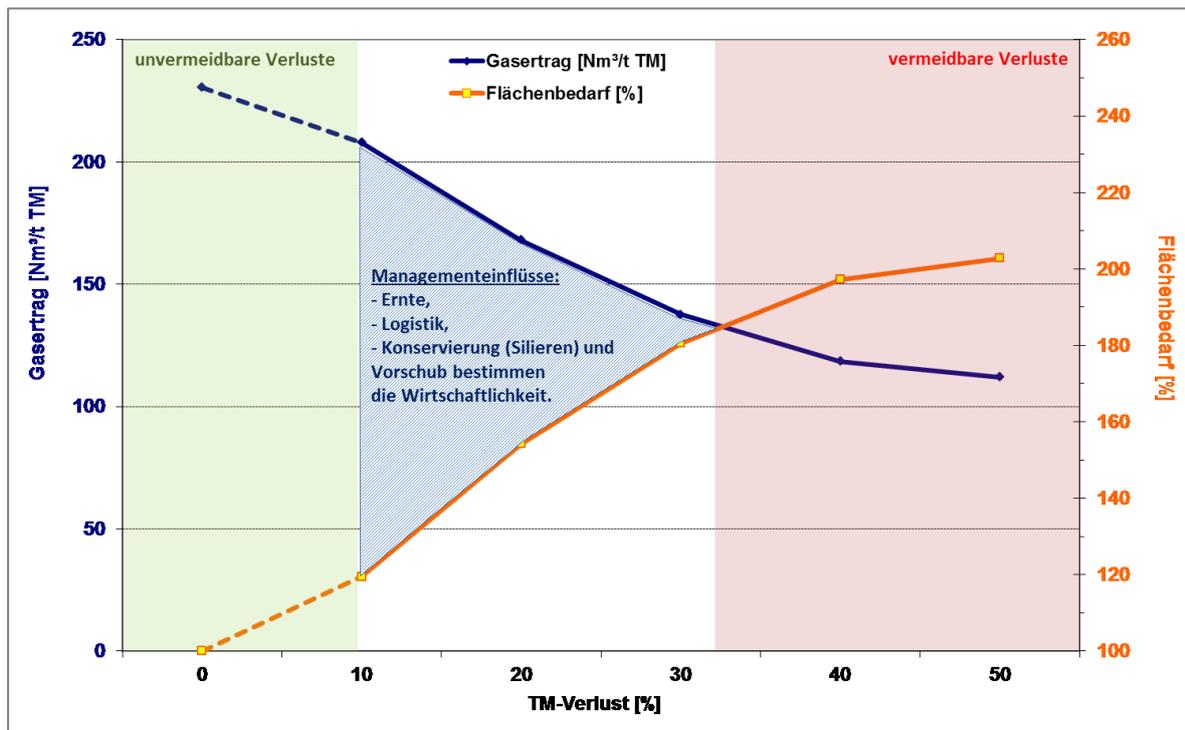


Abbildung 1: Gasertrag und Flächenbedarf in Abhängigkeit vom TM-Verlust im Silo (Reckleben, 2016)

Die unvermeidbaren Verluste (< 10 % TM Verlust) in Abbildung 1 sind Verluste, die durch externe Einflüsse bedingt sind und selbst bei optimaler Erstellung des Silos bis zur Abdeckung auftreten (Honig, 2002).

Der darauf folgende Bereich bis ca. 30 % TM-Verlust ist der Bereich, der durch eine Vielzahl von Faktoren (Häcksellänge, Logistik, Silierung, Verdichtung und Vorschub bei der Entnahme > Ziel: 2m/Woche) bestimmt wird. Je besser die Managemententscheidungen aufeinander Abgestimmt sind desto geringer sind die Verluste. Die vermeidbaren Verluste sind unnötig und können, bei der richtigen Organisation des Ernteprozesses bis zur Siloabdeckung, vermieden werden.

Thaysen (2014) berichtet, dass in Schleswig Holstein Futter im Wert von 350 bis 370 Mio. Euro als Silage konserviert ist. Seine Schätzungen gehen davon aus, dass 2/3 aller Silos in Schleswig-Holstein mit Rand und Oberflächenproblemen zu tun haben. Die jährlichen Silage Wettbewerbe der Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein zeigen, dass TM-Verluste von 20 bis 30 % eher die Regel als die Ausnahme sind.

2. Faktoren für eine hohe Silagequalität

Die Konservierung des Futters basiert auf den sich ergänzenden Prinzipien Luftabschluss durch gute Verdichtung und Folienabdeckung. So kann die Bildung von CO₂ und Milchsäuregärung erfolgen. Je schneller die Luftverdrängung und der Luftabschluss erfolgen, umso eher dominiert die Milchsäuregärung. Dies führt ebenfalls zu einer schnelleren Absenkung vom pH-Wert (NUSSBAUM 2009, S. 265).

Die luftdichten Lagerung sollte bei allen Silagen mit der Ausnahme von Biertreber mindestens 6 Wochen betragen. Optimal sind 10 Wochen. Dies ist auch für den Fall der Nachfüllung eines Silos anzuraten. Mit zunehmender Silierungsdauer nimmt die aerobe Stabilität bei der Entnahme zu. Deshalb ist die Öffnung erst nach diesem Zeitraum zu empfehlen. Bei Maissilage ist nach diesem Zeitraum auch der Aufschluss der Maisstärke abgeschlossen. (NUSSBAUM 2012, S. 115)

Aufbau der Siloanlagen

Je nach Futtermittelverbrauch muss ein Fahrsilo in Länge, Breite und Höhe geplant werden. Fehlplanungen wie beispielsweise quadratische Siloplatten auf manchen Betrieben führen zu deutlich verminderten Vorschubgeschwindigkeiten und damit zu enormen Verlusten. Der Aufbau der Siloanlagen richtet sich also grundsätzlich nach dem Vorschub bei der Entnahme, der 2m/Woche betragen sollte.

Bei der Erstellung eines Fahrsilos müssen außerdem viele rechtliche und bauliche Rahmenbedingungen eingehalten werden. Ein Fahrsilo fällt unter die Jauche-Gülle-Sickersaft oder kurz JGS-Anlagen. Das heißt, dass es wasserundurchlässig, standsicher sowie chemisch und mechanisch widerstandsfähig sein muss. Es muss sichergestellt werden, dass kein Sickersaft oder verunreinigtes Wasser austreten und kein Grundwasser eintreten kann. Dies bedeutet ein gutes Entwässerungskonzept. Nur ablaufendes Wasser von einer besenreinen Siloplatte darf in den Vorfluter geleitet werden (Tel, 2014). Beim Bau ist also auf einen geregelten Gär- und Sickersaftabfluss sowie auf das Gefälle zur Entnahmeseite von mindestens 1 % zu achten (KASAL et al., 2003)

Verdichtung

Auf dem Acker ist die Zielsetzung Verdichtungen des Bodens so weit wie möglich zu vermeiden. Die Verdichtung ist dabei abhängig von der Radlast in t und dem Kontaktflächendruck der überfahrenen Fläche. Steigt die Radlast bei gleichem Kontaktflächendruck, so steigt auch die Tiefenwirkung vom Druck.

Das heißt, dass schwerere Maschinen eine tiefere Druckwirkung ausüben als leichte Maschinen, selbst wenn diese den gleichen Kontaktflächendruck aufweisen. Bei gleicher Radlast ist die Kontaktflächengröße ausschlaggebend für die Druckwirkung. Bei

unveränderter Radlast führt die Umrüstung von schmalen zu breiten Reifen zu einer Verringerung des Drucks in der Oberflächennähe. Um die Tiefenwirkung zu beeinflussen müssten überproportionale Reifenbreiten gewählt werden. Der Kontaktflächendruck ist abhängig von der Aufstandsfläche. Diese ergibt sich aus der Breite und Höhe des Reifens und dem Reifeninnendruck. Um die mechanische Belastung des Bodens zu beurteilen, muss der Kontaktflächendruck und die Überrollhäufigkeit berücksichtigt werden. (BRUNOTTE et.al. 2013, S. 28)

Auf dem Silo hingegen ist eine starke Verdichtung erwünscht. Die Verdichtung wird als maßgebender Indikator für die Siloqualität genutzt. Angegeben wird die Verdichtung in kg/m^3 oder auch dt/m^3 Trockenmasse. Die Verdichtung im Fahrsilo erfolgt durch Schlepper oder Radlader, Pistenraupen, umgebaute Rübenroder oder andere Spezialfahrzeuge die über das Erntegut fahren. Der Walzdruck beeinflusst dabei die Effektivität der Walzarbeit. Der Walzdruck ist abhängig von dem Kontaktflächendruck (kg/cm^2). Der Kontaktflächendruck kann wie schon beschrieben über die Radlast, also über das Gewicht des Verdichtungsfahrzeuges, den Reifeninnendruck und über die Reifenaufstandsfläche beeinflusst werden. (THAYSEN und WAGNER, 2006, S. 56)

Grundsätzlich gilt für die Verdichtung im Fahrsilo, dass der Reifendruck 2,0-3,5 bar betragen sollte, um die Aufstandsfläche des Schleppers so gering wie möglich zu halten und einen hohen Kontaktflächendruck zu erzeugen. Dafür sollten die Reifen nicht zu breit gewählt werden und auf Zwillingsreifen sollte ganz verzichtet werden. Die maximale Schichtdicke sollte nicht mehr als 30 cm betragen, da sonst die Tiefenwirkung des Verdichtungsfahrzeugs zu gering werden könnte. Je langsamer das Walzfahrzeug fährt, umso höher ist die Druckeinwirkung auf das überfahrene Häckselgut auf Grund der längeren Einwirkdauer. Die Elastizität des Siliergutes wird dadurch vermindert. Jede Schicht sollte mindestens dreimal überfahren werden bevor die nächste Schicht aufgebracht wird. Pro Tonne Erntegut sind also 2-3 Minuten einzuplanen. Dies bedeutet, dass pro Walzfahrzeug und Stunde maximal 20-25 t Trockenmasse Mais und 15-20 t Trockenmasse Gras am Silo ankommen dürfen. Die Berechnung der notwendigen Walzgewichte richtet sich nach der Leistung der Erntemaschine. Als Faustregel gilt, dass die Bergeleistung in t/Frischmasse je Stunde geteilt durch den Faktor 4 – beim Feldhäcksler oder Faktor 3 beim Ladewagen – dem notwendigen Walzgewicht entspricht. Bei heutigen Feldhäckslern mit einer Ernteleistung von bis zu über 100 t Frischmasse je Stunde bedeutet dies ein Walzgewicht von 25 t und mehr. Die Organisation zur Umsetzung der Verdichtungsmaßnahmen muss daher an die Bergeleistung der Erntemaschinen angepasst werden. Mit zunehmender Bergeleistung steigen also die Anforderungen an die Arbeitsorganisation am Silo. (THAYSEN und WAGNER, 2006, S. 56)

Die Verdichtungsfähigkeit im Silo wird maßgeblich durch den Trockensubstanzgehalt und die Häcksellänge des Ernteguts beeinflusst. Je größer die Häcksellänge gewählt wird, umso schlechter können die Hohlräume zwischen dem Erntegut verschlossen werden. Nach THAYSEN (2015) liegt der Sollwert für Proben unter 30 % TS bei 220 kg/m^3 . Zwischen einem TS-Wert von 30 bis 35 % ist eine Verdichtung von mindestens 240 kg/m^3

anzustreben. Ab einem TS-Gehalt von über 35 % sollte die Verdichtung mindestens 250 kg/m^3 betragen.

Eine Überprüfung der Verdichtung scheint auf jeden Fall sinnvoll. Bei der Bestimmung der Verdichtung ist zu berücksichtigen, dass der Ort der Probenahme einen Einfluss auf das Messergebnis hat. Im Kern des Silos können in der Regel höhere Werte erwartet werden als im Randbereich. Die Unterschiede sollten aber relativ gering sein, wenn die Silogeometrie ideal ist und die Verdichtungstechnik optimal war (THAYSEN UND WAGNER 2006).

Zur Beprobung der Verdichtung verschiedener Silagemieten ist es wichtig vor der Probenahme feste Messpunkte zu definieren an denen jeder Silo beprobt wird. Nur unter diesen Bedingungen können die Ergebnisse bei der Auswertung miteinander verglichen werden. In der nächsten Abbildung sind die gewählten Messpunkte dargestellt.

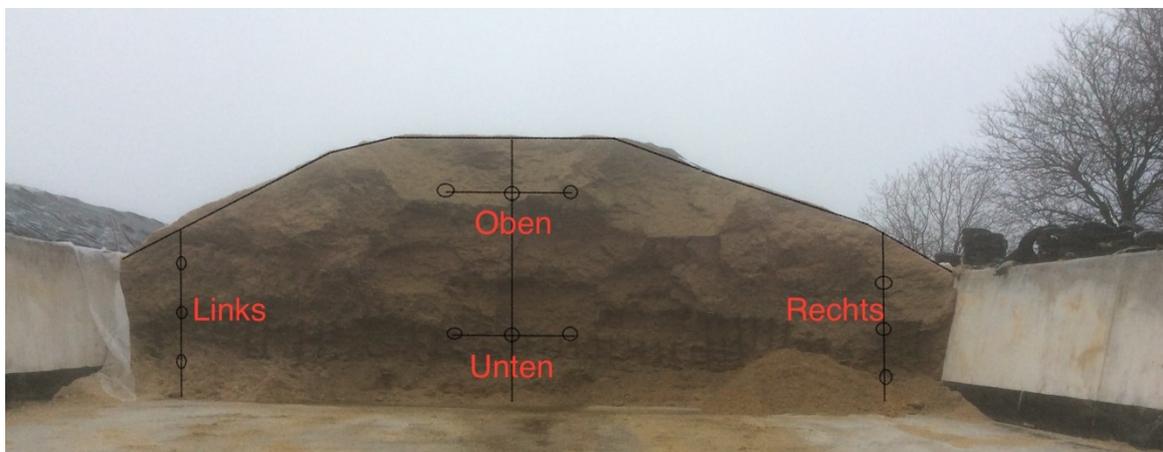


Abbildung 2: Messpunkte der Verdichtungsmessung (Petersen, 2015)

Es wurden vier Messpunkte mit je drei Einstichen festgelegt. Der Messpunkt Oben befindet sich 1 m unter der Oberkante in der Mitte des Silos. Der Messpunkt Unten ist mittig in Höhe von 1,5 m vom Boden aus angesetzt worden. Die beiden Messpunkte dienen bei der Auswertung der Ergebnisse dem direkten Vergleich der Verdichtungsleistung der verschiedenen Walzsysteme. Im unteren Bereich des Silos kommt aber noch der Faktor Eigendruck bedingt durch die unterschiedlichen Silohöhen zum Tragen, daher wurden die Silohöhen ebenfalls erfasst. Zur Bewertung der Ergebnisse befinden sich an den beiden Messpunkten je drei Messpunkte in 1 m Entfernung waagrecht nebeneinander. An beiden Kantenbereichen wurden je drei Messpunkte festgelegt, die im Abstand von 0,5 m senkrecht untereinander verlaufen. Der oberste Messpunkt (Links oben/Rechts oben) ist 0,75 m unterhalb der Oberkante angelegt.

Abdeckung

Die Abdeckung eines Silos ist wichtig, um Verderb so gut wie möglich zu vermeiden. An den Kantenbereichen kann bei mangelnder Abdeckung Luft eindringen und CO_2 entweichen. Dies führt zu einer schlechteren Silierung und damit zu Verlusten.

Grundsätzlich sollte eine Unterziehfolie und eine Silofolie für die Abdeckung benutzt werden. Alternativ zur Silofolie kann auch eine stärkere Folie zum Einsatz kommen. Diese Folie kann dann mehrfach verwendet werden. Die Unterziehfolie dient aber immer nur der einmaligen Verwendung (THAYSEN und WAGNER, 2006, S. 74). Zusätzlich zu den 2 Lagen aus Unterzieh- und Silofolie ist dann noch eine Beschwerung mit Gewebefolie (z.B. Nikosil) zu empfehlen. So wird die Silofolie zum einen vor Wind und zum anderen vor Vögeln oder anderen Beschädigungen geschützt. Die Gewebefolie wird dann zusätzlich mit Reifen oder Sandsäcken beschwert.

Messungen (vgl. Abbildung 1) belegen die Notwendigkeit der Abdeckung des Silos mit drei Lagen Folie, wie nachfolgende Abbildung zeigt.

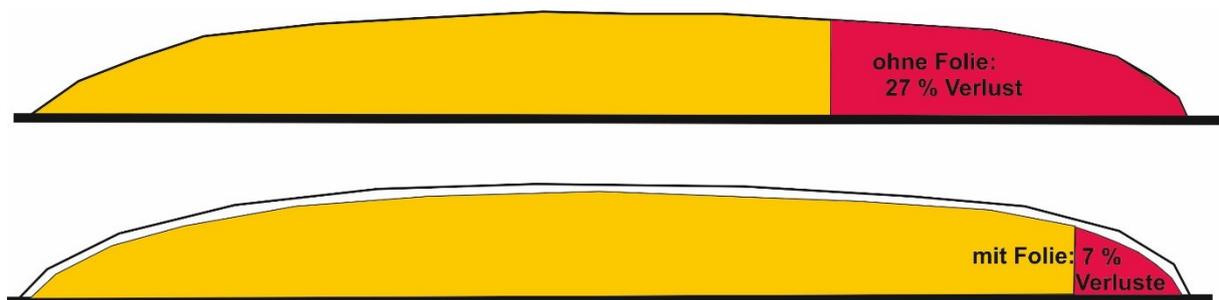


Abbildung 3: Verluste im Fahrsilo mit und ohne Abdeckung (Schaumann, 2011)

Für eine ordnungsgemäße Abdeckung kann man mit einem Materialaufwand von 1,8 bis 2,2 €/m² rechnen, dabei sind die untersten 2 Lagen nach der Benutzung zu recyceln und nur die Gewebefolie kann wiederverwendet werden (Reckleben, 2014).

Für das Abdecken sind viele Mitarbeiter notwendig, um die Folie unter allen Bedingungen gleichmäßig und beschädigungsfrei auf das Silo zu bringen. NUßBAUM (2006) beziffert den Aufwand für das Ab- und Aufdecken eines Silos mit 1,0 Akh je Hektar Erntefläche. Dieser Richtwert erscheint hoch und ist sicher stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig, trotzdem sollte das Abdecken vom Aufwand nicht unterschätzt werden.

Entnahme

Für die Entnahme der Silage gibt es verschiedene Techniken. Neben dem Siloblocksneider und der Silozange wird auf vielen Betrieben mit einer Greifschaufel das Futter entnommen und verladen. Bei Maissilagen wird zum Teil auch nur mit einer Schaufel am Schlepper/Radlader gearbeitet. Die Entnahmetechnik hat aber einen entscheidenden Einfluss auf die Form und Lockerung der Anschnittfläche der Silage. Die Auswirkungen der Entnahmetechnik auf die Nacherwärmung kann folgender Tabelle entnommen werden:

Tabelle 1: Temperaturanstieg innerhalb von 20 Stunden nach der Entnahme an Messpunkten 20 cm hinter der Anschnittfläche (STEINHÖFEL et al. 2005)

Entnahmetechnik	Temperaturanstieg in °C	
	Grassilage (35 % TM)	Maissilage (30 % TM)
Fräswalze	1,4	1,4
Greifschaufel	2,5	3,1
Silokamm	0,9	2,9
Blockschneider	1,8	1,2
Schneidschild mit beweglichen Messern	1,1	1,6
Schneidschild mit festen Messern	0,5	1,8
Fräse	1,9	3,7

Die Vorzüge der verschiedenen Entnahmetechniken werden in der Tabelle deutlich. Jedoch sind in der Praxis vor allem die Systeme (z.B. Greifschaufel) häufiger zu finden, die höhere Temperaturanstiege bedingt.

Vorschub

Die Entnahmegeschwindigkeit ist ein weiterer Parameter für die Sicherstellung der Qualität. Aufgrund der Entnahme des Futters aus der Silomiete dringt Sauerstoff ein und ermöglicht so die Vermehrung von Hefen und Schimmelpilzen, die bei der Lagerung überdauert haben. Untersuchungen haben hierzu ergeben, dass bei einem wöchentlichen Vorschub unter 1 m bei 45 % der Silagen Nacherwärmung auftrat. Lag der Vorschub über 1 m konnte eine Nacherwärmung bei 29 % der Silomieten festgestellt werden. Bei optimal verdichteten Silagen dringt Sauerstoff bis zu 1 m in den Silo ein, was bedeutet, dass das Futter eine Woche der Luft ausgesetzt ist. Eine Verdoppelung des Vorschubs führt somit zu einem deutlich niedrigeren Risiko der Vermehrung von Hefen und Schimmelpilzen. Im Winter sollten mindestens 1,5 m/Woche und im Sommer 2,5 m/Woche erreicht werden. Um die zügige Befüllung und intensive Walzarbeit zu gewährleisten, sollte die Breite eines Silos mindestens 7-8 m betragen, soweit die Vorschubgeschwindigkeit auf Basis des geplanten Siloverbrauchs dies zulässt. Die Befüllhöhe sollte 4 m nicht überschreiten. (THAYSEN und WAGNER, 2006, S. 64)

3. Ergebnisse der Praxisuntersuchung

Die nachfolgenden Ergebnisse sind Daten, die aus Praxisuntersuchungen verschiedener Absolventen (Nickelsen (2010), Lühr (2012) und Petersen (2015)) des Fachbereichs zusammengetragen wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen alle, dass verschiedene Aufgaben auf das Walzfahrzeug bei der Siloerstellung zukommen. Neben dem Schieben und Verteilen der Silage sind es im Wesentlichen das Verdichten und zum Teil auch das Hochziehen der Abfuhrgespanne, besonders wenn das Silo schon eine gewisse Höhe erreicht hat.

Anzahl von Transportfahrzeugen zum Silo transportiert wird, dann kommen bei Angelieferte Mengen

Die angelieferten Mengen am Silo unterscheiden sich je nach der Ernteleistung, der Hof-Feldentfernung, der Zahl und der Art der eingesetzten Transportfahrzeuge.

Wählt man den rechnerischen Ansatz, dann hat ein 8 reihiger Feldhäcksler mit 450 kW Motorleistung bei guter Flächenstruktur eine Ernteleistung von 4 Hektar die Stunde. Bei 50 t/ha FM-Ertrag macht das eine Ernteleistung von 200 t/h. Wenn diese Menge durch eine ausreichende 10 Abfuhrgespannen mit 150 kW und 50 m³ rund 20 t alle 6 Minuten am Silo an. Diese sind dann vom Walzfahrzeug(en) zu verdichten.

Eigene Messungen während der Silomais Ernte 2014 (Petersen, 2015) ergaben folgendes Bild.

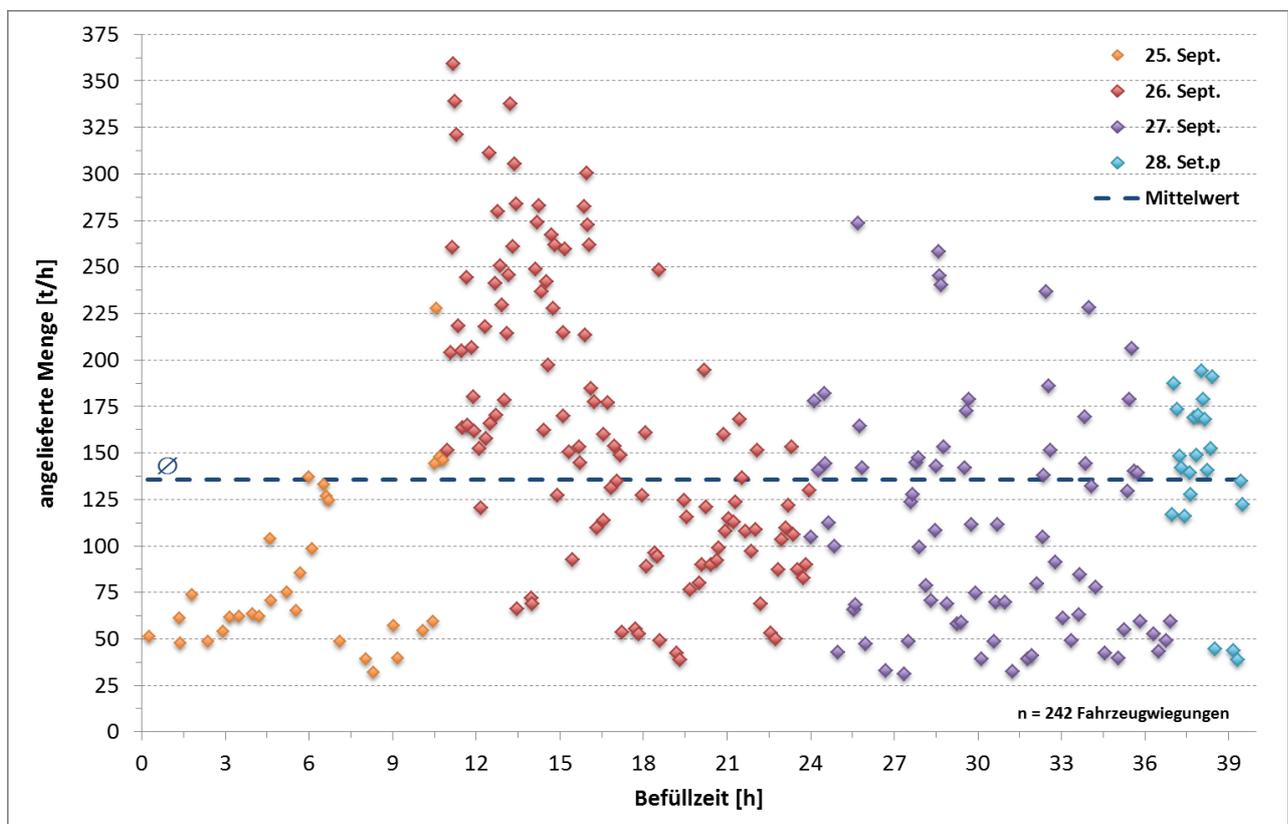


Abbildung 4: Angelieferte Menge [t/h] an einem Fahrsilo in Nordfriesland 2014, Befüllzeit des Silos rund 40 h, über 4 Tage verteilt, Gesamtmenge 3930 t

Die Messungen bei der Silomaisernte zeigen deutlich die Anforderungen an das Ernte- und Silomanagement auf:

Die angelieferte Menge beträgt 3930 Tonnen. Die Dauer der Anlieferung beträgt fast 40 Stunden und ist über 4 Tage verteilt. Dies ist durch die Tatsache begründet, dass die Lohnunternehmer (hier in der Region Nordfriesland) sich an den Ruhezeiten der nichtlandwirtschaftlichen Bevölkerung orientieren. Bei der Messung beträgt die berechnete durchschnittliche Anlieferungsmenge pro Stunde 100 t. Die mittlere Anlieferungsmenge laut Wiegeprotokoll beträgt 136 t/h und die Standardabweichung liegt bei 73 t/h. Am ersten Tag kamen etwa 70 t pro Stunde an. Am darauf folgenden Tag wurde mit LKWs über Stunden mehr als 200 t pro Stunde angeliefert. An diesem Tag wurde mit zwei Häckselern auf Flächen mit weiter Entfernung (> 20 km) zum Silo geerntet. Die angelieferten Mengen waren selbst mit zwei Standardschleppern mit Schubschild nur schwer zu verarbeiten, da im Schnitt alle 4 bis 6 Minuten ein voller Silowagen ankam.

Verdichtung(sleistung)

Durch Gespräche mit einer Auswahl von landwirtschaftlichen Dienstleistern konnte festgestellt werden, dass vor allem die Sorte und der Erntezeitpunkt der Maispflanze einen entscheidenden Einfluss auf die Trockensubstanz und somit auf die Verdichtung von Maissilagen haben. Nicht immer sind ein zu später Erntezeitpunkt auf die Fähigkeiten des Betriebsleiters oder die Verfügbarkeit von Erntemaschinen und Transportwagen zurück zu führen.

Beispielsweise sieht der Anbauplan der einzelnen Betriebe einen optimalen Ablauf der Ernte vor. Sehr häufig ist eine gemeinsame Anbauplanung von mehreren Biogasanlagenbetreibern und ihren Auftragnehmern zu beobachten. Beispielsweise werden bei einer Biogasanlage (BGA) die früh abreifenden Maissorten nahe der BGA angebaut, während bei einer anderen BGA diese Sorten auf den weiter entfernt liegenden Flächen angebaut werden. Beim Start der Erntearbeiten werden somit bei der einen Anlage wenige und bei der anderen Anlage mehrere Transporteinheiten benötigt. Je weiter die Ernte voranschreitet, desto mehr Transportfahrzeuge können von einem zum anderen Kunden geschickt werden. Auf diese Weise ist es für den Lohnunternehmer möglich, die Gesamtanzahl seiner Transportfahrzeuge gering zu halten. Diese Pläne werden jedoch häufig durch den unkalkulierbaren Wittereinfluss zunichte gemacht. Nach starken Regenfällen ist es oft nötig aus Gründen der Befahrbarkeit die Reihenfolge der zu erntenden Flächen vom Plan abweichend zu tauschen. Aufgrund dieser äußeren Einflüsse ist es häufig nicht möglich, den Silomais zu einem optimalen Reifezeitpunkt zu ernten.

Das in der Praxis weit verbreitete Verfahren der Überfahrt ermöglicht es, mit nur einem geringen Aufwand hohe Verdichtungsgrade in der Maissilage zu erzielen. Dieses liegt zum einen daran, dass durch das Eigengewicht des Transportfahrzeugs eine Verdichtung

der als letztes aufgebrachten Schicht an Erntegut stattfindet. Dieses ist auf das hohe Gewicht des Transportgespanns und die Häufigkeit des Überrollens der gleichen Fläche zurück zu führen. Transportgespanne verfügen in der Regel über vier oder fünf Achsen. Dies bedeutet, dass das Erntegut nach dem ersten Überrollen kaum Zeit hat sich wieder auszudehnen, bis es erneut überrollt wird. Zum anderen ist die auf dem Silo abgelegte Schicht an Erntegut dünn und damit gut verdichtbar. Ein weiterer Faktor, der zu einer guten Verdichtung führen soll, ist der Zeitfaktor. Da das Erntegut auf dem Silo entladen wird, ist es lediglich nötig, kleine Unebenheiten zu begradigen. Ist dieses vom Walzfahrzeug erledigt worden, kann sofort mit dem eigentlichen Verdichten begonnen werden. Das zweite und ein sich eventuell auf dem Silo befindliches drittes Walzfahrzeug, können ununterbrochen ihrer Verdichtungsaufgabe nachkommen.

Wenn die geplante Silohöhe besonders groß ist, sollte auf das Verfahren des Hochschiebens zurückgegriffen werden. Gleiches gilt beim vermehrten Einsatz von kippbaren Anhängern bzw. LKW mit Muldenaufbau. Das Hochschieben des Erntematerials ist mit einem erhöhten Kraftstoffaufwand pro Stunde verbunden. Der Kraftstoffverbrauch pro Stunde ist dabei circa doppelt so hoch wie bei den einfachen Walzarbeiten. Je höher die Silomiete ist und somit das Erntegut weiter geschoben werden muss, desto höher ist der Zeitaufwand pro Tonne Erntegut. Da weniger Tonnen Erntematerial pro Stunde bewegt werden, steigt der Kraftstoffverbrauch pro Tonne Erntematerial mit steigender Silohöhe. Je flacher die entstehende Rampe am Silo ist, desto mehr Masse kann von dem Schiebefahrzeug bewegt werden. Aufgrund dessen ist die Schichtdicke geringer.

Allerdings steigt der Zeitaufwand für das Hochschieben. In der Zeit, in der das Schiebefahrzeug mit dem Schieben beschäftigt ist, kann dieses nicht für die Walzarbeit verwendet werden. Dies hat eine sinkende Verdichtungsleistung zur Folge. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Schiebeleistung des Standardschleppers im Vergleich zum CLAAS XERION und einem Pistenfahrzeug geringer ist. Der Standardschlepper benötigt für die gleiche Menge Erntegut bei gleichem Winkel des Silos und sonst gleichen Bedingungen mehr Anläufe und damit mehr Zeit als die beiden anderen vorgestellten Maschinen.

Es wird davon ausgegangen, dass das Pistenfahrzeug unter gleichen Bedingungen am schnellsten eine bestimmte Menge Erntematerial den Silo hochschiebt und verteilt. Die Praxis zeigt allerdings, dass der Winkel, in dem das Erntematerial auf das Silo geschoben wird beim CLAAS XERION größer ist als beim Standardschlepper und beim Pistenfahrzeug am größten ist. Somit ist es mit dem Pistenfahrzeug möglich, die steilsten Silos zu erstellen. Bei diesen steileren Silos kann früher mit dem Zudecken begonnen werden. Dieses hat einen positiven Einfluss auf die Silierqualität. Aufgrund der steileren Silos ist die Fahrzeit von oben nach unten für das Schiebefahrzeug geringer. Aus diesem Grund ist die angelieferte Erntemenge schneller auf dem Silo verteilt und es kann früher mit der reinen Walzarbeit begonnen werden, womit sich eine höhere Verdichtung erzielen lässt. Bei gleicher Ernteleistung pro Stunde ist somit davon auszugehen, dass die Verdichtung

beim Pistenfahrzeug am höchsten und beim Standardschlepper am geringsten ist. Der CLAAS XERION ist zwischen beiden Systemen einzustufen.

Die gute Verdichtungsleistung beim System XERION mit Schiebeschild und Standardschlepper kann durch den Einsatz der Waggonräderwalze weiter erhöht werden.

Der Vibrationswalzenzug (Rüttelwalze) wurde speziell zum Verdichten von Schüttgütern entwickelt. Daher eignet sich dieses System besonders gut zum Verdichten von Maissilage in Fahrsilos. Diese verfügen über Seitenwände, die ein Auseinandertreiben des Maissilos beim Einsatz der Vibrationswalze verhindern. Wenn keine Seitenwände vorhanden sind, ist die Wirkung der Vibrationen laut APPIARIUS (2012) in Frage zu stellen, da die Silomiete ständig breiter wird.

Optimale Verdichtungen im Randbereich einer Silomiete lassen sich nur bei Verwendung von Seitenwänden erzielen. Sind bei einer Silomiete keine Seitenwände vorhanden, können die Verdichtungszielwerte nicht erreicht werden, unabhängig davon, welches System zur Maissiloerstellung zum Einsatz kommt. Die Verdichtungsleistung im Randbereich dürfte bei Einsatz von Silowänden bei allen Systemen gut ist, aber beim Einsatz von Vibrationswalzenzug besonders gut sein. Sind keine Silowände vorhanden, produziert das System CLAAS XERION aufgrund der speziellen Lenkung dieses Fahrzeugs die höchste Verdichtung im Randbereich. Das Pistenfahrzeug und der Standardschlepper werden ähnlich eingestuft. Es wird davon ausgegangen, dass das Verfahren Rüttelwalze die schlechteste Verdichtung im Randbereich aufweist.

Je höher das Silo ist, desto stärker ist die Verdichtung im Bereich „Mitte“. Aufgrund der Höhe ist die Eigenverdichtung des Silos größer als bei niedrigeren Silos. Zudem ist die Gefahr der Gärstoffbildung bei höheren Silomieten größer, da das Gewicht der Silage das in den Pflanzenteilen gebundene Wasser im unteren Bereich herauspresst.

Der Vergleich der Verdichtung unterschiedlicher Systeme kann aus den Ergebnissen der Messpunkte Oben und Unten ermittelt werden, wobei im unteren Messpunkt der Faktor Silohöhe berücksichtigt werden muss. In den Seitenbereichen kommt der Einfluss der Silowände hinzu. Hier hatten lediglich die Fahrsilos der untersuchten Silagen schräge Seitenwände, die mit dem Xerion und dem Schubverfahren mit den beiden Standardschleppern erstellt worden sind. Die Werte in den Messbereichen sind die Mittelwerte über die drei Probestermine. Nach der Auflistung der Messorte ist ein Mittelwert zu jedem Messbereich je System erstellt worden. Daneben ist in der folgenden Tabelle jeweils auch die Standardabweichung (SD) in kg/m^3 angegeben.

Tabelle 2: Mittelwerte und Standardabweichung der Verdichtungsergebnisse (Petersen, 2015)

System	Schub		Überfahrt		Xerion		Spezial	
	2 Standard-schlepper einer mit Schiebeschild		Silowagen fahren über das Silo und entladen gleichmäßig		Sstemschlepper Claas Xerion mit Schiebeschild		Umgebauter Rübenroder mit Schiebeschild	
Messbereich	TM (kg/m ³)	SD (kg/m ³)	TM (kg/m ³)	SD (kg/m ³)	TM (kg/m ³)	SD (kg/m ³)	TM (kg/m ³)	SD (kg/m ³)
oben links	225	16	259	7	239	21	269	15
oben mitte	241	17	257	24	255	9	257	15
oben rechts	249	18	269	21	250	13	254	26
Mittelwert	238	17	262	17	248	15	260	19
unten links	318	23	294	15	303	20	316	7
unten mitte	319	31	305	24	293	26	311	8
unten rechts	305	22	284	13	282	31	328	19
Mittelwert	314	26	294	17	292	25	318	11
links oben	219	16	242	7	195	11	222	18
links Mitte	230	6	278	14	235	18	270	21
links unten	251	12	269	24	250	38	269	20
Mittelwert	233	11	263	15	227	22	253	20
rechts oben	200	10	210	6	199	12	219	27
rechts mitte	222	2	245	29	232	28	234	13
rechts unten	238	22	257	11	251	2	292	19
Mittelwert	220	11	237	15	227	14	248	20

Die Kantenbereiche haben ebenfalls einen Einfluss. System Schub und Xerion sind in einem Fahrsilo mit schrägen Wänden erstellt worden. System Überfahrt und Spezial wurden in einem Fahrsilo ohne Silowand bzw. mit nur einer 1 m hohen Silowand erstellt. Da die Messung der Kantenbereiche hier erst im Abstand von 4 m zur Außenkante der Silos erfolgte, konnte ein Einfluss der Fahrsilowände nahezu ausgeschlossen werden. Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Systeme sich in den Mittelwerten der drei Probenentnahme in der erreichten Verdichtung voneinander unterscheiden. Im oberen Messbereich sind die Systeme Überfahrt und Spezial gemittelt in einem Bereich von 260 kg/m³ Trockenmasse deutlich besser als das Schubverfahren mit den zwei Standardschleppern. Der Xerion liegt mit einem Wert von 248 kg/m³ in einem angestrebten Bereich. Im unteren Bereich liegen alle Werte deutlich über dem Mindestwert. Die Seitenbereiche je Messort unterscheiden sich sowohl von Seite zu Seite, im Messbereich und in den einzelnen Systemen. Der Einfluss einer einzelnen Seite im Vergleich zur anderen kann aber nicht reproduzierbar verglichen werden. Deshalb sind sie nur hier getrennt voneinander dargestellt. In den weiteren Auswertungen werden die Ergebnisse der Seiten zusammengefasst, aber nach Messort weiter unterteilt, also Seite oben, Seite mitte und Seite unten.

Die Untersuchungen wurden an insgesamt 107 Silomieten durchgeführt. An jeder Silomiete wurden drei Bohrungen gemacht. Daraus ergibt sich eine Gesamtzahl von 321 untersuchten Proben. Es wurde für jede Silomiete festgehalten, welche Walzfahrzeuge für die Verdichtungsarbeit zum Einsatz kamen. Des Weiteren wurde dabei festgestellt, dass nahezu auf jeder Silomiete ein anderes Walzsystem eingesetzt wurde. Dieses ist beispielsweise auf die jeweils unterschiedlichen Gewichte der zum Einsatz gekommenen Schlepper zurück zu führen. Allerdings konnte jedes Walzsystem in eines der nachfolgenden vorgestellten Verfahren eingeordnet werden. Daraus ergibt sich die in Tabelle 9 gezeigte Verteilung der unterschiedlichen Verfahren.

Tabelle 3: Übersicht der unterschiedlichen Walzsysteme und Verteilung der Stichproben (Lühr 2012)

System-Nr.	Systembeschreibung	Anzahl der Stichproben
System 1	Überfahrt Standardschlepper mit Schiebschild + Standardschlepper	24
System 2	Hochschieben Standardschlepper mit Schiebeschild + Standardschlepper	26
System 3	Hochschieben CLAAS XERION mit Schild + Standardschlepper	20
System 4	Hochschieben CLAAS XERION + Standardschle. mit Waggonräderwalze	8
System 5	Überfahrt + Hochschieben Standardschlepper + Vibrationswalzenzug	14
System 6	Hochschieben Pistenfahrzeug + Standardschlepper	13

In der Tabelle 10 ist dargestellt, wie sich die Ergebnisse der für diese Arbeit durchgeführten Beprobung verteilen. Sie zeigt jeweils den Mittelwert, die Minimal- und Maximalwerte und die Standardabweichung für die Untersuchungsparameter Trockenmassegehalt, Verdichtung, die entsprechenden Zielwerte für die Verdichtung, prozentuale Abweichungen zwischen Ist- und Zielwerten und für die Silohöhe für alle Systeme aus Tabelle 9.

Tabelle 4: Übersicht der Ergebnisse

Untersuchungsparameter	Mittelwert	Minimalwert	Maximalwert	Standardabweichung
TM- Gehalt [% TM]	35,36	22,81	48,51	3,61
Verdichtung [kg TM/ m ³]	253,31	140,98	565,75	43,68
Zielwert [kg TM/ m ³]	301,29	180,00	350,00	30,08
Differenz Zielwert [kg TM/ m ³]	-47,60	-176,14	215,75	46,80
% - Differenz Gehalt / Zielwert	-15,30	-50,33	61,64	14,53
Silohöhe [m]	6,17	2,5	13	1,55

Der Mittelwert für den TM-Gehalt liegt bei 35,36 Prozent. Der Minimalwert und der Maximalwert schwanken zwischen 22,81 und 48,51 Prozent. Die Standardabweichung beträgt 3,61 Prozent. Der Mittelwert der Verdichtung liegt bei 253,31 kg TM/ m³. Auch bei diesem Untersuchungsparameter liegen die gemessenen Werte in einem breiten Schwankungsbereich. Sie schwanken zwischen 140,98 und 565,75 kg TM/ m³. Die Standardabweichung beträgt 43,68 kg.

Der Zielwert für die Verdichtung liegt im Mittel bei 301,29 kg TM/ m³ und schwankt in einem Bereich von 180 bis 350 kg TM/ m³, bei einer Standardabweichung von 30,08 kg TM/m³. Durchschnittlich wurde der Zielwert um 15,30 Prozent unterschritten. Die Schwankungsbreite lag dabei zwischen -50,33 und 61,64 Prozent. Die Standardabweichung beträgt dabei 14,53 Prozent vom Mittelwert. Die Silohöhe der beprobten Mieten schwankt zwischen 2,5 und 13 Metern. Der Durchschnitt liegt allerdings bei 6,17 Metern, bei einer Standardabweichung von 1,55 Metern.

Kostenbetrachtung

Die Unterschiede in der Auslastung ergeben sich schon aus dem Verfahren, ob Schubverfahren oder Überfahrt. Zusätzlich ist der Vergleich der Systeme mit unterschiedlicher Fahrzeuganzahl durchgeführt worden. Es stellt sich also die Frage ob und welche Systeme im Versuch an der Auslastungsgrenze waren und welche Systeme mengenmäßig noch Kapazitäten hätten ohne dass dadurch die Verdichtung leidet.

Tabelle 11: Vergleich der Walztechnik (Petersen, 2015)

System	Schub	Überfahrt	Xerion	Spezial
Anzahl der Fahrzeuge	2	2	1	1
Gewicht des 1. Walzfahrzeugs	20,5 t	18 t	18,5 t	20 t
Reifenbreite Hinterachse in mm	900	900	800	1050
Reifenbreite Vorderachse in mm	710	710	800	800
Gewicht des 2. Fahrzeugs	17,6 t	17,6 t	/	/
Kosten je Std. für Walzfahrzeug	85 €/h	85 €/h	95 €/h	75 €/h
Kosten je Std. für 2. Fahrzeug	75 €/h	75 €/h	/	/
Dieserverbrauch Walzfahrzeug	8,5 l/h	8 l/h	11,5 l/h	21 l/h
Dieserverbrauch 2. Fahrzeug	19 l/h	19 l/h	/	/
Gesamtkosten	187,5 €/h	187 €/h	106,5 €/h	96 €/h

In der Tabelle sind die wichtigsten Daten der Walzsysteme dargestellt. Die Systeme Xerion und Spezial waren im Gegensatz zu den anderen beiden Systemen nur mit jeweils einem Fahrzeug im Einsatz. Dies erklärt auch die Kostendifferenzen. Die Kosten sind bei den jeweiligen Lohnunternehmen erfragt worden, die diese Systeme auf den jeweils untersuchten Silagen im Einsatz hatten.

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die verschiedenen Walzsysteme und stellt die Kosten des jeweiligen Systems übersichtlich dar. Bei den Kosten handelt es sich um Nettopreise inklusive Diesel- und Personalkosten pro Stunde.

Tabelle 12: Kostenübersicht der Walzsysteme

System-Nr.	Systembeschreibung	Kosten des Systems [€ / Std]
1	Überfahrt: Standardschlepper mit Schiebschild + Standardschlepper	121 - 153
2	Hochschieben: Standardschlepper mit Schiebeschild + Standardschlepper	149
3	Hochschieben: CLAAS XERION mit Schild + Standardschlepper	167
4	Hochschieben: CLAAS XERION + Standardschle. mit Waggonräderwalze	157
5	Überfahrt + Hochschieben: Standardschlepper + Vibrationswalzenzug	132 – 181
6	Hochschieben: Pistenfahrzeug + Standardschlepper	193

Tabelle 12 zeigt, dass die Kosten pro Stunde der verschiedenen Verfahren sehr stark voneinander abweichen. Die Kosten liegen zwischen 121 und 193 Euro pro Stunde.

4. Schlussfolgerungen für die Praxis

Diese Untersuchung konnte aufzeigen, dass eine ordnungsgemäße Silagebereitung wichtig ist, um Silagen mit guter Qualität zu erzeugen. Es gilt, monetäre Schäden durch Silierverluste zu vermeiden. Diese Silierverluste können durch zu spätes Abdecken, fehlendem Luftabschluss und mangelnder Entnahmetechnik auftreten. Die Verteilung und Verdichtung des Ernteguts bei der Silierung hat den größten Einfluss auf die Qualität einer Silage. Werden sehr große Erntemengen pro Stunde erreicht und durch leistungsfähige Transport Systeme zu den Siloanlagen gebracht. Kommt es hier darauf an, die angelieferten Mengen optimal auf dem Silo zu verteilen und richtig zu verdichten. Für diese Aufgabe stehen in der Praxis verschiedene Systeme zur Verfügung. Diese unterscheiden sich vor allem durch ihre Leistungsfähigkeit und die Kosten.

Die vorgestellten Systeme eignen sich, um 100 t FM pro Stunde in einem Flachsilo einzulagern. Die Kosten für die verschiedenen Verfahren liegen in einem Bereich zwischen 121 und 193 Euro pro Stunde. Andererseits gibt es Unterschiede in der Wirkung der Systeme. Die in der Literatur festgelegten Zielwerte konnten häufig nicht erreicht

werden. Für die in dieser Untersuchung durchgeführte Analyse wurden an 107 Maissilos in Norddeutschland Proben entnommen und die Verdichtung gemessen.

Durch die statistische Auswertung der gesammelten Daten konnte gezeigt werden, dass System 5 (Vibrationswalzenzug) und System 1 (System Überfahrt) durchschnittlich am besten geeignet sind, um hohe Lagerungsdichten in Maissilagen zu erzeugen. Bei diesen beiden Verfahren handelt es sich um die beiden kostengünstigsten Systeme, die untersucht wurden. Eine ähnliche Untersuchung dieser Art wurde in dieser Form bislang nicht durchgeführt. Daher ist ein Vergleich mit anderen Studien nicht möglich. Allerdings konnte auch aufgezeigt werden, dass die Verteilung der ermittelten Werte eine hohe Streuung aufweist. Es ist zu beobachten, dass nicht nur das Walzsystem allein einen Einfluss auf die Lagerungsdichten hat. Die Silohöhe und das Vorhandensein von Silowänden sind ebenfalls entscheidende Faktoren in diesem Zusammenhang. Außerdem ist ein Betriebsleitereinfluss auf das Ergebnis der Verdichtung im Silo festzustellen. Der Betriebsleiter entscheidet, welche Fahrzeuge zur Verdichtung auf dem Silo zum Einsatz kommen und welchen Stellenwert das Verdichten des Ernteguts in der Häckselkette hat. Zudem gibt es weitere Einflüsse wie den TM- Gehalt. Dieser kann beispielsweise durch den Witterungsverlauf (Frosteinwirkung auf Pflanzen, Befahrbarkeit der Flächen) in einem für die Verdichtung nicht optimalen Bereich liegen. Nachdem sich der Verfasser dieser Thesis eingehend mit dem Thema Maissiloerstellung auseinandergesetzt hat, wird aus technischer und ökonomischer Sicht die Empfehlung gegeben, die Maissilage in befestigten Siloanlagen mit Seitenwänden einzusilieren. Die Maße dieser Siloanlage und die Silohöhe sind dabei an den erforderlichen Mindestvorschub anzupassen. An der Siloeinfahrt sollte eine genügend hohe Rampe installiert werden. Sind diese Bedingungen geschaffen, wird empfohlen, die Silage im System Überfahrt in das Silo einzubringen und für die Verteilung und Verdichtung Standardschlepper mit Schiebeschild sowie einen Vibrationswalzenzug einzusetzen. Für die spätere Entnahme der Maissilage ist die Entnahmetechnik wichtig, um das Unfallrisiko bei diesem Arbeitsschritt zu minimieren.

5. Literatur

Appiarius, V. (2012): persönliche Mitteilung. Lohnunternehmen Heinz-Hermann Appiarius und Söhne, 27637 Wanhöden-Nordholz

Brunotte, J., Brandhuber, R., Vorderbrügge, T. (2013): Gute fachliche Praxis Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz. aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz, Bonn

Kasal, A.; Frick, M.; Wachtler, S. (2003): Silowirtschaft. Autonome Provinz-Bozen-Südtirol Abteilung land-, forst- und hauswirtschaftliche Berufsbildung Zugriff 19.04.2015 URL: <http://www.gruenland.it/fileadmin/content/pdf/Silowirtschaft.pdf>

Lühr, J. F., (2012): Systeme zur Maissiloerstellung: Eine technische und ökonomische Analyse. Master-Thesis im Studienfach Landtechnik am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel, Osterrönfeld

Nickelsen, T. (2010): Silagebereitung – Verschiedenen Verfahren im Vergleich. Bachelor-Thesis im Studienfach Landtechnik am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel, Osterrönfeld

Nußbaum, H. (2012): Fahrsilo. In: Gerighausen, H.G. (Redaktion und Bearbeitung): Praxishandbuch Futter- und Substratkonservierung. DLG Verlag, Frankfurt/Main, 8. vollst. überarb. Auflage S.99-120

Nußbaum, H. (2013): Futterkonservierung. In: Lütke Entrup, N. (Hrsg.); Schwarz, F.J. (Hrsg.); Heilmann, H. (Hrsg.): Handbuch Mais: Grundlagen, Anbau, Verwertung, Ökonomie. 5. überarb. Auflage, DLG Verlag, Frankfurt/Main, S. 264 - 288

Petersen, H. (2015): Siloerstellung – ein Vergleich von verschiedenen Verdichtungssystemen und Optimierungsansätzen. Bachelor-Thesis im Studienfach Landtechnik am Fachbereich Agrarwirtschaft der Fachhochschule Kiel, Osterrönfeld

Schaumann (2011): Biogasfibel. Schaumann Bioenergy GmbH, Pinneberg

Steinhöfel O., Pahlke M., Feuerborn B. (2005): Überraschungssieger. Vergleich Entnahmetechnik. DLZ 12/2005; S. 72 – 77

Reckleben, Y. (2013): Siloerstellung – Verschiedene Systeme im Vergleich. Bauernblatt Schleswig-Holstein, Rendsburg, S. 44-45

Reckleben, Y. (2015): Neue Methoden zur Siloabdeckung. Vortrag auf den KWS-Feldabenden in Schleswig-Holstein vom 05.09.-16.09.2016

Tel, W. (2014): Bau von Fahrsiloanlagen. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/bauberatung/fahrsilo.htm>
Zugriff am 19.04.2015

Thaysen, J., Wagner, A. (2006): Allgemeine Grundsätze der Silierung. In: Frank, H.(Redaktion und Bearbeitung): Praxishandbuch Futterkonservierung (Silagebereitung Siliermittel Dosiergeräte Silofolien.) DLG Verlag, Frankfurt/Main, . 7.Auflage