

## Der Einfluß verschiedener Faktoren auf die Verdichtung von Gras in Lagerbehältern bei statischer Belastung

WERNER DERNEDDE

Institut für Technologie

### Einleitung

Für die Bereitung einer guten Silage durch Milchsäuregärung ist das schnelle Verdichten des Futterstapels, um den Restsauerstoff zu vermindern und einen späteren Luftzutritt einzuschränken, mit von entscheidender Bedeutung. Die Vorwelkung verbessert die Silierfähigkeit des Grases und erhöht außerdem die Futterraufnahme der Tiere. Die Zerkleinerung wird nicht nur zur Erhöhung der Verdichtbarkeit gefordert, sondern auch, um die Handhabung des Materials bei Einlagerung, Entnahme und Verfütterung zu verbessern. Und schließlich ist der Zustand der Futterpflanzen bei der Ernte für eine höchstmögliche Werterhaltung bei der Konservierung von großer Wichtigkeit. Für eine umfassende Bewertung der Verdichtbarkeit von Gras zur Silagebereitung sind demnach die pflanzlichen Parameter „physiologischer Reifegrad“ und „Trockenmassegehalt“ und die technischen Parameter „Zerkleinerungsgrad“ sowie „Belastungshöhe und -dauer“ und deren gegenseitige Beeinflussung zu untersuchen.

### 1 Versuchsmethode

Aus der Anzahl der Parameter und deren Kombinationsmöglichkeiten ergibt sich eine Vielzahl von Einzelversuchen, die eine Beschränkung der Versuche auf Labormaßstab erforderte. In diesen Laborversuchen wurden Kunststoffrohre mit einem Durchmesser von 190 mm als Verdichtungsbehälter verwendet. Zum Ausgleich der unterschiedlichen Wandreibungsbeiwerte zwischen Halmgut und Behälterwand wurde das Halmgut in Silo-Folien verpackt, so daß immer der gleiche Reibungsbeiwert Folie/Behälterwand in Erscheinung tritt. Zur Simulation verschiedener Silierbedingungen wurde der Behälterboden mit einer Abflußmöglichkeit für CO<sub>2</sub>-Gas versehen. Die Belastung wurde durch Gewichte über eine Hebelarmkonstruktion aufgebracht. In Einzelfällen wurden die Gärverluste durch Bestimmung des Gewichtsverlaufs der Proben und durch Material-Analysen ermittelt. Das Halmgut bestand aus reinen Feldgrasbeständen von welschem Weidelgras, Lieschgras und Wiesenschwingel, die zum Teil für diese Versuche angelegt worden waren. Das Häckselgut wurde von zwei Trommelhäckslern, die sich durch verschiedene Messeranstellwinkel unterscheiden, erzeugt. Da dieser Einfluß bei der statischen Verdichtung offensichtlich gering ist, soll dieser Versuchspunkt hier nicht weiter diskutiert werden.

Ein Problem der Futterproduktion liegt darin, daß das Optimum aus Ertrag und Nährstoffzusammensetzung im Grünfutter nur während einer kurzen Zeitspanne von etwa 10 Tagen gegeben ist. Für die Silierung interessiert hier besonders der Gehalt an Rohfaser als Indikator für die Festlegung von Kohlehydraten, sowie Eiweiß und Zucker als Merkmale der Gärfähigkeit. Beides wird neben dem jeweiligen Gesamtnährstoffgehalt bei der Definition der Siloreife

berücksichtigt, die mit bestimmten Vegetationszuständen der Gräser verknüpft ist. Für die Verdichtbarkeit der Gräser ist die Bildung der Gerüstsubstanzen während der vegetativen Phase des Schossens von besonderer Bedeutung. Hierunter sind in erster Linie das Zellulosegerüst der Zellwände und die darin eingelagerten Lignine (Holzstoffe) zu verstehen. Dabei sind das Zellulosegerüst für die Zugfestigkeit und die Lignine für die Druckfestigkeit der Pflanzen verantwortlich. In der Analysetechnik werden die Gerüstsubstanzen analog zum Gehalt an Rohfaser definiert. Zur Bestimmung des Rohfasergehalts gibt es neben der chemischen Analyse heute eine sehr einfache mechanische Methode. Sie beruht auf der Messung des Mahl widerstandes des getrockneten Gutes und bietet somit auch für die Praxis eine hinreichend genaue Möglichkeit zur Bestimmung der Rohfaserqualität.

### 2 Versuchsergebnisse

#### 2.1 Stoffliche Veränderungen

In der Abbildung 1 ist der Verlauf des Rohfasergehaltes\*1) mehrerer Gräser im ersten Schnitt für die Jahre 1981–1983 dargestellt. Dabei ist die Verknüpfung mit den Kalendertagen standortbedingt. Das Diagramm zeigt, daß hauptsächlich in der Phase des Schossens innerhalb von 12 Tagen bei allen untersuchten Gräsern eine Zunahme des Rohfasergehaltes von etwa 20 auf über 34 % stattfindet. Danach ist nur noch eine sehr geringfügige Zunahme zu beobachten. In der folgenden Darstellung ist die Entwicklung der einzelnen Gerüstsubstanzen Lignin und Zellulose und der Rohfaser für welsches Weidelgras aufgezeichnet. Zellulose und Rohfaser

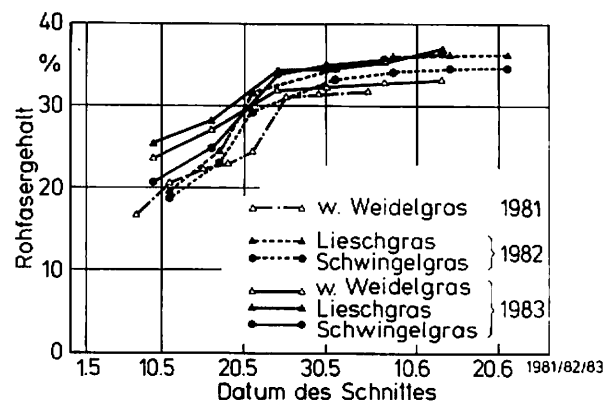


Abb. 1: Entwicklung des Rohfasergehaltes bei verschiedenen Gräsern

\*1) Sämtliche Analysen wurden dankenswerterweise vom Institut für Grünland- und Futterpflanzenforschung durchgeführt.

zeigen einen nahezu identischen Verlauf. Der Gehalt an Lignin weist in der entscheidenden Phase sogar einen noch stärkeren Anstieg auf. Insgesamt zeigt das Diagramm, daß die Bestimmung der Rohfaser zur Charakterisierung des Gehaltes an Gerüstsubstanzen ausreicht.

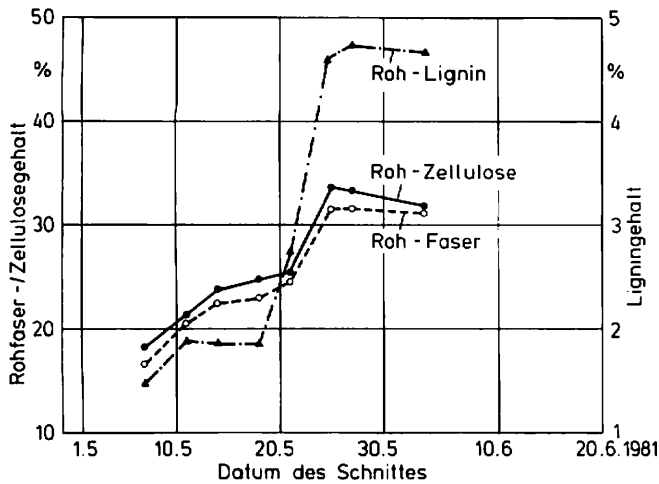


Abb. 2: Entwicklung verschiedener Stoffanteile bei welschem Weidelgras

### 2.2 Einfluß des Rohfasergehaltes

Die Inanspruchnahme des üblicherweise zur Kennzeichnung der Verdaulichkeit eines Rauhfutters benutzten Rohfasergehaltes zur Charakterisierung der Festigkeitseigenschaften, in diesem Fall der Verdichtbarkeit, ist damit gerechtfertigt. Wie eng die Korrelation zwischen dem Rohfasergehalt und der Verdichtbarkeit tatsächlich ist, zeigt die folgende Darstellung in Abbildung 3.

Hierin ist die Trockenmassendichte von welschem Weidelgras mit etwa 40 % TM-Gehalt bei Belastungen von 0,25 und 0,10 bar in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Schnittes und damit vom Rohfasergehalt aufgetragen. Die Belastung von 0,25 bar entspricht etwa dem Bodendruck eines 10 m hohen Silos. Der erste Schnittzeitpunkt liegt noch vor der Siloreife. Nährstofftrag und Zuckergehalt sind noch nicht

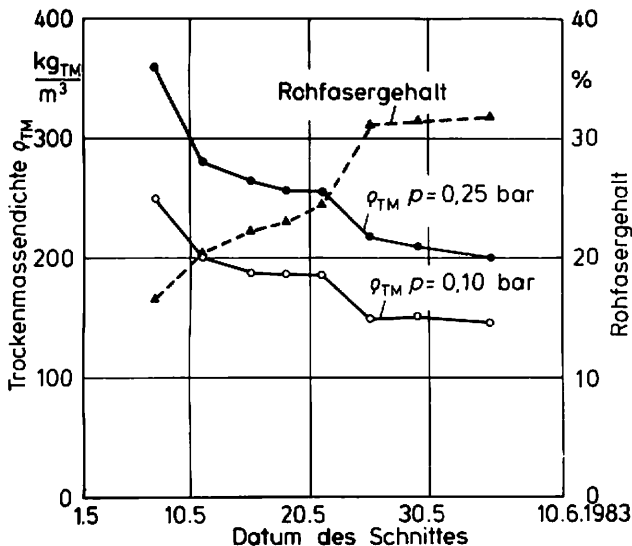


Abb. 3: Einfluß des Rohfasergehaltes auf die Verdichtbarkeit von Gras, welsches Weidelgras, TM-Gehalt 40 %, Häcksellänge  $l_{th} = 14$  mm

ausreichend. Die Siloreife beginnt etwa beim 2. Schnittzeitpunkt um den 23. Mai herum mit einem Rohfasergehalt zwischen 20 und 22 %. Innerhalb von 10 Tagen steigt dann der Rohfasergehalt auf etwa 24–26 %. Innerhalb dieser Zeitspanne liegt der optimale Bereich für die Silierung. Danach steigt der Rohfasergehalt innerhalb weniger Tage auf über 32 % an, um dann auf diesem Niveau zu verharren. Mit diesem Anstieg ist eine starke Abnahme der Verdaulichkeit aber auch eine ähnlich starke Abnahme der Verdichtbarkeit verbunden, so daß hier die Forderung nach einem rechtzeitigen Schnitt sowohl von der Siliertechnik als auch von der Futtermittelverwertung in gleichem Maße gestellt wird. Insgesamt nimmt die erzielte Trockenmassendichte bei sonst konstanten Bedingungen von anfänglich etwa 370 auf 200 kg TM/m<sup>3</sup> also um nahezu 50 % ab.

### 2.3 Einfluß des Zerkleinerungsgrades

Im nächsten Diagramm in Abbildung 4 ist der Einfluß des technischen Parameters Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit von Gras dargestellt. Im Gegensatz zum Rohfasergehalt ist die Realisierung einer optimalen Häcksellänge u. U. mit erheblichem technischen Aufwand verbunden, so daß hier immer wieder nicht nur nach dem optimalen, sondern auch nach dem notwendigen Zerkleinerungsgrad gesucht werden muß.

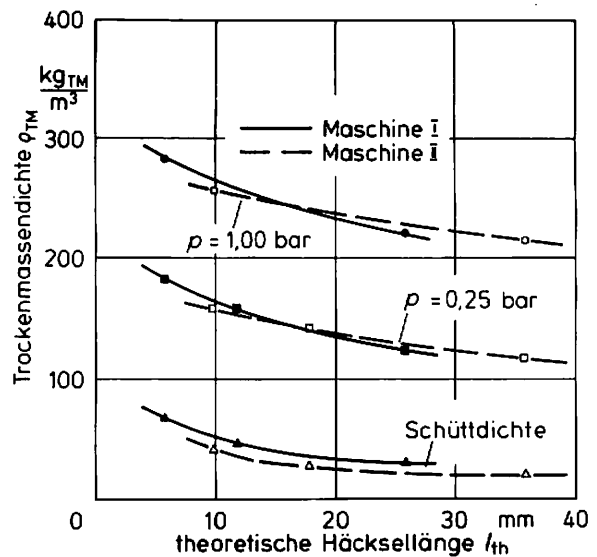


Abb. 4: Einfluß der Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit von Gras, Wiesenschwingel, Rohfasergehalt 35,1 %, TM-Gehalt 37–39 %, Belastungsdauer 15 min

In dem Diagramm ist die erzielte Trockenmassendichte im Bereich zwischen 6 und 36 mm theoretischer Häcksellänge, was etwa dem Verstellbereich eines modernen Exakt-häckslers entspricht, bei Belastungen von 0,25 und 1,00 bar dargestellt. Zusätzlich ist die Schüttdichte bei den einzelnen Häcksellängen eingetragen. Der Rohfasergehalt bei diesem Versuch mit Wiesenschwingel betrug über 35 %, so daß ein maximaler Einfluß der Häcksellänge zu erwarten ist. Die Trockenmassendichte wurde nach einer kurzzeitigen Belastungsdauer von 15 min ermittelt. Betrachtet man die Kurve mit 0,25 bar Belastung, so ist zu erkennen, daß die Trockenmassendichte bei einer Verringerung der theoretischen Häcksellänge von 36 auf 6 mm nur von etwa 120 auf 180 kg TM/m<sup>3</sup> ansteigt. Die Linie mit der höheren Belastung verläuft bei der kurzen Belastungsdauer ungefähr parallel. Wie im Vergleich beider Kurven mit dem Verlauf der Schüttdichte zeigt, ist der Einfluß der Häcksellänge in der verbesserten Verschiebbarkeit der Teilchen gegenein-

ander und der damit gegebenen leichteren Orientierung der Halme zur Ausfüllung von Zwischenräumen gegeben. So werden bereits bei der Befüllung noch ohne Verdichtungsdruck höhere Dichten erzeugt. Diese höheren Dichten bedeuten höheres Gewicht und damit höhere Belastung mit stärkerer Verdichtung des Stapels. Neben der besseren Verschiebbarkeit der Teilchen bei kurzem Häcksel spielt die Quetschung der Halme während des Schnittes eine Rolle. Die Druckkräfte unter dem Häckselmesser sind kurzzeitig wesentlich größer als die Belastungen im Hochsilo, so daß die Halmröhren dort eher bis zum Bruch verdichtet werden können. Schließlich wird durch das Häckseln eine Verkürzung der Luftwege für den Austritt der Luft aus den Interzellularen und den Gefäßleitungen erreicht. Damit kann die Luft schneller abgepreßt werden und damit die Elastizität eines Halmgutstapels wesentlich vermindert werden. In der schnelleren Auspressung der Luft liegt auch die Begründung für höhere Anfangsdichten von Häckselgut in Hochsilos gegenüber Halmgut, das in Kurzschnittladewagen geschnitten wurde, und für die allmähliche Angleichung der Dichten im Verlauf der Lagerdauer. Die Verkürzung der Häcksellänge bringt demnach über die größere Anfangsdichte auch eine bessere Ausnutzung des Siloraumes. Ebenso wichtig ist der Einfluß der Häcksellänge auf die Entnahmeleistung von Fräsen in Hochsilos und die Mischbarkeit mit anderen Komponenten in Futtermischwagen. Vergleicht man allerdings die Einflüsse von Rohfasergehalt und Häcksellänge auf die Verdichtbarkeit, so wird die bereits von Müller gemachte Feststellung, daß nämlich der Einfluß der Häcksellänge eher überschätzt und derjenige des Rohfasergehaltes eher unterschätzt wird, bestätigt.

#### 2.4 Einfluß von Belastungshöhe und -dauer

In der Reihe der Einflußgrößen ist in Abbildung 5 die Trockenmassedichte in Abhängigkeit von der Belastungshöhe dargestellt. Die Belastung bei der Verdichtung in einem Hochsilo ergibt sich aus der Silohöhe und dem spezifischen Gewicht des Halmguthaufwerkes, das in erster Linie durch den Feuchtegehalt bestimmt wird. Außerdem kann im Hochsilo ein wesentlicher Teil des Gewichtes durch Brückenbildung über die Silowände abgestützt werden. Dieser

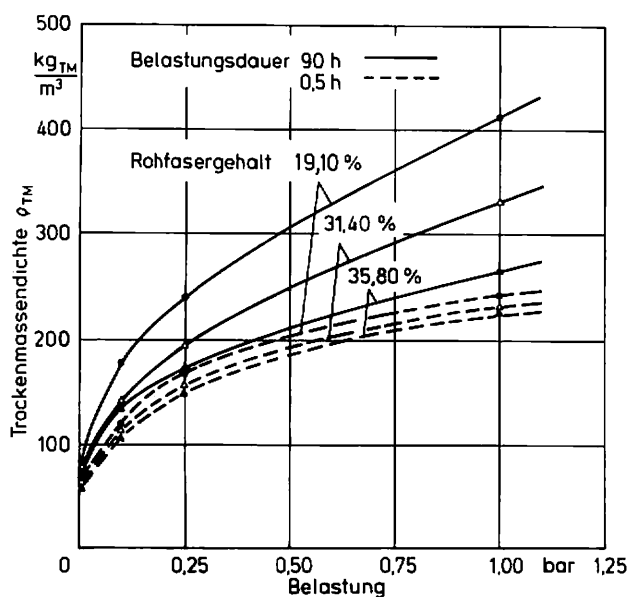


Abb. 5: Einfluß der Belastungshöhe auf die Verdichtbarkeit von Gras, Lieschgras, TM-Gehalt 34,5–39,0%, Häcksellänge  $l_{th} = 14$  mm

Anteil ist abhängig von den Reibungsverhältnissen an der Silowand, bestimmt durch die Reibungsbeiwerte des jeweiligen Stoffpaares und die von der Häcksellänge abhängige Querdehnung des Halmgutstapels. Dadurch können die tatsächlichen Preßdrücke erheblich unter den aus dem Gewicht errechneten Werten liegen.

Im einzelnen zeigt der Kurvenverlauf einen degressiven Anstieg der Trockenmassedichte mit der Belastungshöhe. Deutlich wird auch hier der dominierende Einfluß des Rohfasergehaltes, der sich besonders bei längerer Belastungsdauer auswirkt.

#### 2.5 Einfluß des Trockenmassegehaltes

Wie eingangs erwähnt wurde, verbessert das Vorwelken des Grases durch Erhöhung der Zellsaftkonzentration – Nährstoffangebot für Milchsäurebakterien, Unterdrückung von Gärtschädlingen – die Gärfähigkeit des Grases und erhöht außerdem die Futteraufnahme. Das Vorwelken ist jedoch noch mit einem gewissen Wetterisiko und entsprechenden Verlusten verbunden. Die Vorwelkdauer sollte daher durch Aufbereitung des Futters beschleunigt und auf das notwendige Maß begrenzt werden. Auf die Verdichtbarkeit des Grases wirkt sich das Vorwelken bzw. die dadurch erreichte Zunahme des TM-Gehaltes in zweifacher Weise aus. Zunächst wird durch die Abnahme des Turgordruckes in den Zellen durch den Wasserverlust die Steifigkeit der Halme stetig verringert. Zwischen etwa 45 und 60% TM-Gehalt erreicht die Biegefestigkeit der Halme ihr Minimum. Bei weiterer Abnahme des Wassergehaltes tritt eine gewisse Erstarrung der stark in der Dickenausdehnung geschrumpften Halme ein. Die Zellwände können sich nach Entleerung der Vakuolen berühren und teilweise miteinander verkleben. Die Änderung der Biegesteifigkeit der einzelnen Halme hat natürlich auch unmittelbare Auswirkungen auf die Verdichtbarkeit eines Haufwerkes, wie sie aus der Darstellung in Abbildung 6 zu ersehen ist. In diesem Diagramm ist die Trockenmassedichte in Abhängigkeit vom TM-Gehalt bei einer Belastung von 0,25 bar dargestellt.

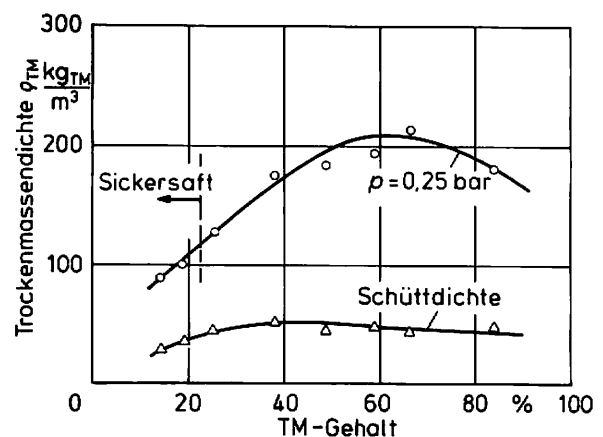


Abb. 6: Einfluß des TM-Gehaltes auf die Verdichtbarkeit von Gras, Lieschgras, Rohfasergehalt 34,4%, Häcksellänge  $l_{th} = 10$  mm, Belastungsdauer 15 min

Bedingt durch die zusätzliche Verminderung des Reibungsbeiwertes mit zunehmendem TM-Gehalt ist das Maximum der Verdichtbarkeit gegenüber dem Minimum der Biegesteifigkeit noch geringfügig zu einem etwas höheren TM-Gehalt verschoben. Wie das Diagramm weiter zeigt, wird die Schüttdichte wesentlich weniger durch den TM-Gehalt beeinflusst.

Der weitere Einfluß des relativ zunehmenden TM-Gehaltes liegt in der Abnahme des Halmgutgewichtes. In der Abbildung 7 sind das Schüttgewicht der Feuchtmasse – also von Trockenmasse und Wassergehalt –, das für die Belastung im Hochsilo maßgebend ist, dem Schüttgewicht der Trockenmasse gegenübergestellt.

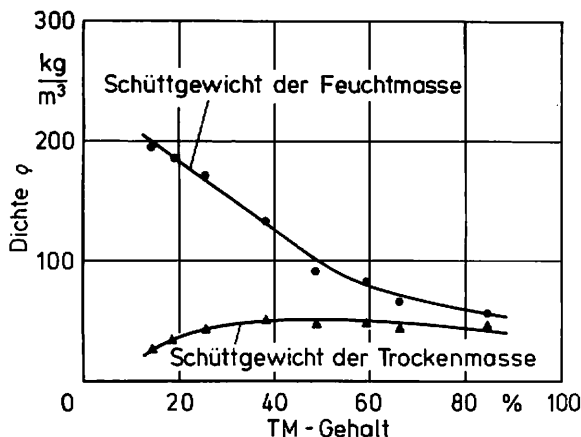


Abb. 7: Schüttgewichte bei verschiedenen TM-Gehalten  
Lieschgras, Rohfasergehalt 34,4% (am 24. 5. 1983), Häcksellänge  $l_{th} = 10$  mm

Ein Vergleich der beiden Kurven zeigt, daß das tatsächliche Schüttgewicht des frischen Grases und damit die Anfangsbelastung etwa doppelt so groß ist wie dasjenige im Bereich der Vorwelksilage zwischen 40 und 60 % TM-Gehalt. Der besseren Verdichtbarkeit mit zunehmender Vorwelkung steht damit eine abnehmende Belastung gegenüber. Die in einem Hochsilo zu erwartende maximale Dichte wird sich also nicht bei dem TM-Gehalt mit der höchsten Verdichtbarkeit, sondern bei einem geringeren TM-Gehalt einstellen.

Errechnet man für den in Abbildung 6 dargestellten Verlauf der Trockenmassedichte bei 0,25 bar Belastung die Volumen der im Futterstock befindlichen Anteile für Luft, Wasser und Trockenmasse, so ergibt sich das in Abbildung 8 dargestellte Bild. Für die Berechnung wurde eine Reindichte von  $1,4 \text{ g/cm}^3$  für die Trockenmasse angenommen.

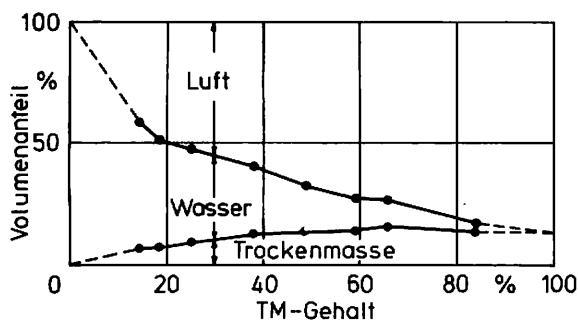


Abb. 8: Volumenanteile bei verschiedenen TM-Gehalten  
Lieschgras, Rohfasergehalt 34,4%, Häcksellänge  $l_{th} = 10$  mm, Belastungsdauer 15 min

Der relative Anteil der Trockenmasse nimmt mit zunehmender Vorwelkung entsprechend der besseren Verdichtbarkeit geringfügig zu. Der Volumenanteil des Wassers nimmt stark ab. Am deutlichsten ist jedoch die sehr starke Zunahme des Luftvolumens. Sein Anteil nimmt von etwa 45% bei frischem Gras auf über 60 bis 75% im Bereich der Vorwelksilagen mit 40 bis 60% zu. Und dies geschieht, obwohl sich die Trockenmassedichte von etwa 100 auf  $200 \text{ kg TM/m}^3$  erhöht. Die Luft befindet sich zum einen Teil in

den Zellen, den Interzellularen und den Gefäßröhren, wo sie das Wasser verdrängt hat, zum anderen Teil befindet sie sich in den größeren Hohlräumen zwischen den einzelnen Häckselteilchen. Davon ist der zweite Teil für die Möglichkeit des Gasaustausches im Futterstock von größerer Bedeutung. Obwohl sich die einzelnen Anteile aus den vorliegenden Untersuchungen nicht errechnen lassen, ist sicherlich der Schluß erlaubt, daß der zunehmende Anteil des Porenvolumens der Luft mit steigendem Vorwelckgrad den Luftaustausch eher begrünstigt. Auf diese Weise lassen sich auch zum Teil die von Zimmer gefundenen unterschiedlichen Minima der Nährstoffverluste für den allgemeinen Hochsilo bei 30% TM-Gehalt und für den gasdichten Silo bei etwa 35% TM-Gehalt erklären. Im normalen Hochsilo behindert der geringere Anteil an Porenvolumen bei geringerem TM-Gehalt den Gasaustausch stärker, während im gasdichten Silo die besseren Siliereigenschaften bei höherem TM-Gehalt ausschlaggebend sind.

### 3 Diskussion der Ergebnisse

In Hochsilos können keine so hohen Verdichtungen erzielt werden, daß ein Gasaustausch völlig unterbunden werden kann. Dieser Gasaustausch findet insbesondere dann statt, wenn durch Öffnungen am Boden des Silos  $\text{CO}_2$  ausfließen kann. Zur Verringerung von Verlusten ist daher die Abdichtung des Futterstocks von ebenso großer Bedeutung wie die Verdichtung. Dies gilt um so mehr, je höher der Nährstoffgehalt des Futters ist. Eine genauere Quantifizierung der Verluste in Abhängigkeit von der Futterstockdichte und der Gasaustauschrate muß daher weiteren Versuchen vorbehalten bleiben.

Viele der dargestellten Ergebnisse lassen sich sinngemäß auch auf die dynamische Verdichtung übertragen, wie sie durch den Walzschlepper im Flachsilo erfolgt. Der Vorgang der dynamischen Verdichtung ist jedoch noch komplexer als die statische Verdichtung. Die Verdichtung im Flachsilo erfolgt durch höhere Belastungen, die bei Radladern bis 4 bar betragen können. Diese Belastungen wirken jedoch nur kurzzeitig. Daher tritt im Flachsilo nach der Entlastung auch eine teilweise Rückdehnung auf. Diese wird bewirkt durch die elastischen Rückstellkräfte der Halme und die Rückdehnung der im Futterstock komprimierten Luft. Daher sind hier die Höhe der Belastung für eine plastische, nicht mehr umkehrbare Verformung der Halme und die Belastungsdauer für die Austrittsmenge der Luft von entscheidender Bedeutung.

### Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen zahlreicher mehrjähriger Versuche wurde der Einfluß der wichtigsten Parameter auf die Verdichtbarkeit von Gras bei statischer Belastung dargestellt. Dabei zeigt sich, daß insbesondere der Rohfasergehalt von den pflanzlichen Einflußgrößen die größte Bedeutung hat. Der Einfluß des TM-Gehaltes und damit des Vorwelckgrades ist im Verbund zwischen Verdichtbarkeit und Gewichtsbelastung zu sehen. Von den technischen Parametern interessiert besonders die Häcksellänge. Sie ist von großer Bedeutung für die Handhabung des Halmgutes bei Befüllung, Entnahme und Verfütterung. Ein starker Einfluß auf die Verdichtbarkeit ist ebenfalls gegeben, obwohl er vergleichsweise geringer ist als derjenige des Rohfasergehaltes. Auf die Praxis bezogen bedeutet dies, daß die bessere Verdichtbarkeit des Exakthäckfels gegenüber dem vom Querschnittsladewagen erzeugten Gut sicherlich nur ein Bewertungskriterium neben anderen sein kann.

### **Influence of different parameters on the compressibility of grass**

The results of numerous experiments in some years have shown the influence of the most important parameters on the compaction of grass. The content of crude-fibre is significant for the behaviour of the whole plant. The dry-matter-content is of direct influence on the compressibility and on the load of the silage in towersilos. Chopping length is of great interest for materials-handling but also for the compressibility. Nevertheless in this case the influence of the crude-fibre is higher than that of the chopping length.

### **Literatur**

- Ahlgrimm, H.-J.: Der Einfluß der Feuchte auf das Bruchverhalten von Halmgut bei Zug-, Scher- und Biegebeanspruchung. – Landbauforschung Völkenrode, Sh. 8 (1970), S. 8–31.
- Dernedde, W.: Intensivzerkleinerung von Halmfutter ohne Exaktschnitt. – Grundlagen der Landtechnik 23 (1973), Nr. 6, S. 153–157.
- Dernedde, W.: Beitrag zur Klärung des Entnahmeverganges bei Silo-Untenfräsen. – Landbauforschung Völkenrode 31 (1981), H. 3, S. 159–162.
- Honig, H., Zimmer, E. und Rohr, K.: Vergleich von Konservierungsverfahren unter pflanzenbaulichen, konservierungstechnischen und ernährungsphysiologischen Gesichtspunkten. – Berichte über Landwirtschaft Sh. 191 (1975), S. 362–382.
- Jakob, R.: Verfahrensvergleich Feldhäcksler/Kurzschnittladewagen bei Grassilage. – FAT-Bätter für Landtechnik (1983), Nr. 221.
- Müller, M.: Verdichten von gehäckseltem Siliergut. – Deutsche Agrartechnik 20 (1970), H. 10, S. 473–474.
- Paul, Chr., Schild, G.-J. und Honig, H.: Mahlwiderstandsmessungen an Rauhfutter. – Landbauforschung Völkenrode 31 (1981), H. 1, S. 7–10.
- Voß, H.: Ermittlung von Stoffgesetzen für Halmgut. – Dissertation TU Braunschweig 1970.
- Zimmer, E.: Grundlagen der Silagebereitung. – Weiterbildungskurs für Futterkonservierung. Freiburg i. Ü. (1972).
- Zimmer, E.: Einfluß einer Zerkleinerung auf Gärverlauf und Futteraufnahme. – Landtechnik von morgen, Folge 18, S. 26–33.
- Verfasser: D e r n e d d e, Werner, Diplomingenieur, Dr. sc. agr., Wiss. Oberrat, Institut für Technologie der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft Braunschweig-Völkenrode (FAL), Institutsleiter: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang B a a d e r.