

Meno Türk und Günter Hörnig, Potsdam-Bornim

## Rheologische Eigenschaften flüssiger Rübensilagen

**Beschrieben werden Untersuchungen zum Förder- und Lagerverhalten von trocken-substanzreichen frisch gemusteten und silierten Rüben für die Rinderfütterung. Diese Dickstoffe sind im Grenzbereich der Fließfähigkeit einzuordnen und dementsprechend schwer zu kennzeichnen. Herkömmliche Viskosimeter sind nicht einsetzbar. Die Ergebnisse der Förderversuche sind Voraussetzung für die Rohrleitungsdimensionierung und Pumpenauslegung. Dazu kann das Rechenprogramm ROHRWIN genutzt werden.**

Rüben und Kartoffeln sind klassische Futterhackfrüchte mit hoher Flächenproduktivität, deren Bedeutung in den letzten Jahrzehnten aus arbeitswirtschaftlichen Gründen erheblich zurückgegangen ist [1]. Daher wurde das Verfahren der Flüssigkonservierung von Rüben in den letzten Jahren modernisiert und an die Schweinefütterung [2] wie auch Rinderfütterung [3, 4] angepaßt. Die geernteten Rüben werden gereinigt, gemustet und mit Hilfe rotierender Verdrängerpumpen [5] luftfrei in einem Hochsilo eingelagert. Hier entsteht bei geringen Konservierungsverlusten eine Flüssigsilage von hohem Futterwert, die ganzjährig mit Hilfe von Pumpen entnommen werden kann. Zur Silierung sind keine chemischen Konservierungsmittel notwendig. Das umweltschonende Verfahren ermöglicht eine Vielfalt von Futterzusammensetzungen und Futterformen [6, 7].

Die Handhabung der frisch gemusteten Rüben und des Flüssigkonservats beim Fördern mit Pumpen und Rohrleitungen, beim Mischen und beim Lagern ist nicht problemlos. Zur Bemessung der Anlagen und technischen Einrichtungen müssen die rheologischen und fördertechnischen Eigenschaften der Stoffe bekannt sein. Über die dazu durchgeführten Versuche wird in Ergänzung früherer Arbeiten [8,

9] berichtet. Im Vordergrund steht das Stoffverhalten von trocken-substanzreichen Zucker- und Gehaltsrüben beim Lagern und beim Rohrtransport.

### Förder- und Lagerungsversuche

Zur Untersuchung des Förderverhaltens und des Pumpeneinsatzes wurde im Institut für Agrartechnik Bornim (ATB) ein spezieller Versuchsstand im kleintechnischen Maßstab aufgebaut.

Bei den *Förderversuchen* wurden Rübensorten (Zucker- und Gehaltsrüben), TS-Gehalt und Zusammensetzungen von Rüben- und Futtermischungen, Rohrdurchmesser und -werkstoff sowie Durchsatz variiert. Am Förderversuchsstand können Rohr- und Pumpenkennlinien bei unterschiedlich einstellbarem Druck und Durchsatz zugleich in einem Versuch gemessen werden. Auf diese Weise wird ein direkter Zusammenhang zwischen den rheologischen Stoffeigenschaften des Fördermediums, dem Förderverhalten im Rohr und in der Dickstoffpumpe hergestellt [5]. Das ist besonders für diese Dickstoffe im Grenzbereich der Fließfähigkeit von Interesse.

Der Versuchsstand besteht aus einem Wiegemischer, dem Pumpenaggregat mit Druckeinstellung und den Meßrohren. Die Pumpenantriebe werden über Frequenzumformer stufenlos gesteuert. Hinter der Testpumpe ist in Reihe eine sogenannte Bremspumpe angeordnet, mit der über die Drehzahl der Gegendruck stufenlos eingestellt werden kann. Der Pumpe sind die verschiedenen Rohrkreisläufe

mit Meßrohren nachgeordnet. Es werden nahtlos gezogene Stahlrohre und für Flüssigfütterungsanlagen übliche PVC-Rohre für Druckbereiche bis 10 bar eingesetzt. Als Meßgrößen werden bestimmt:

- Volumendurchsatz
- Druck vor und hinter der Pumpe
- Pumpendrehzahl
- elektrische Wirkleistung des Pumpenantriebs
- Drehmoment an der Pumpenwelle
- Differenzdruck in den Meßrohren

Die zur rheologischen Einordnung der Fördermedien benötigten Fließkurven werden in der Regel mit Hilfe der Rohrkennlinien bei laminarer Strömung bestimmt. Dann erfüllen die Meßrohre die Funktionen eines Rohrrheometers, und die Punkte der Fließkurve lassen sich mit Hilfe von Gl. (1) und (2) berechnen: Schubspannung an der Rohrwand:

$$\tau_w = \frac{\Delta p \cdot d}{\Delta l \cdot 4} \quad (1)$$

Newtonsche Schergeschwindigkeit:

$$\dot{\gamma}_N = \frac{8 \cdot v}{d} = \frac{32 \cdot Q}{\pi \cdot d^3 \cdot 3600} \quad (2)$$

In der Regel wurden die Flüssigsilagen schrittweise mit Wasser oder Rübensaft verdünnt, um die Stofffunktionen in Abhängigkeit vom TS-Gehalt zu erhalten.

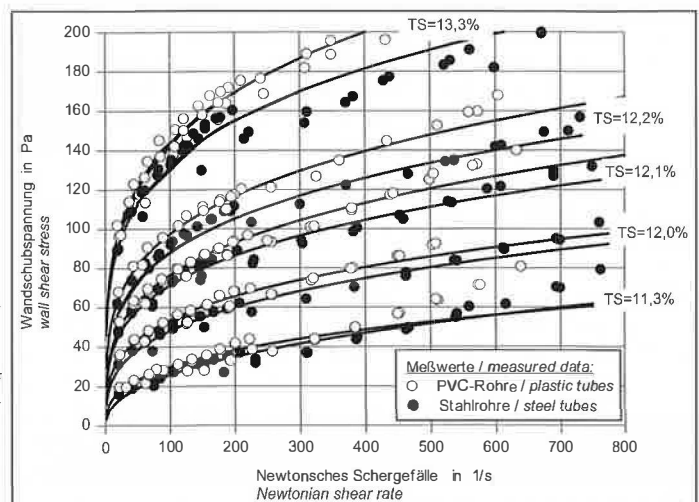
Die *Lagerungsversuche* erfolgten in 3 m hohen Plexiglasstandzylindern mit einem Volumen von etwa 80 l. Ziel war die vergleichende Beobachtung des Schichtungsverhaltens über eine mehrmonatige Lagerungszeit. Dabei sollten auch verschiedene Möglichkeiten zur Vermeidung der Sedimentation und zur diskontinuierlichen Entnahme getestet werden.

### Förderverhalten

*Frisch gemustete* Rüben sind im Sinne des hydromechanischen Rohrtransports nur bedingt fließfähig. Die Struktur ist musartig mit unregelmäßig geformten Rübenpartikeln, das Fließverhalten kann als plastisch bis pseudoplastisch charakterisiert werden. Kolloide Teilchen sind kaum vor-

Bild 1: Fließkurven von silierten Gehaltsrüben mit Saftzusatz aus Förderversuchen mit PVC- und Stahlrohren

Fig. 1: Flow curves of fodder sugar beet mash silage and added beet juice from experiments with plastic and steel tubes.



Dr.-Ing. habil. Meno Türk und Prof. Dr. sc. techn. Günter Hörnig sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung „Technik in der Tierhaltung“ im Institut für Agrartechnik Bornim e. V. (Direktor: Prof. Dr.-Ing. J. Zanke), Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam. Diese Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines von der DFG geförderten Gemeinschaftsprojektes zusammen mit der Univ. Hohenheim.

Tab. 1: Bemessungsempfehlungen zur Druckverlustberechnung in PVC-Rohrleitungen

Table 1: Planning recommendations for pressure loss calculation of plastic pipelines

Rübenart	TS %	Verdg. mit	Dichte kg/m <sup>3</sup>	d mm	Fließparameter			
					A <sub>k</sub> Pa s	B <sub>k</sub>	A <sub>n</sub>	B <sub>n</sub>
Gehaltsrüben - frisch gemust - siliert	18,9 8-15	-	775	50/80	91,54	0	0,3267	0
			1033	50/80	0,0308	0,5146	1,4340	0,1206
Zuckerrüben - frisch gemust - siliert	22,7 10-18	-	564	80	85,66	0	0,3255	0
			995	50/80	0,0553	0,4544	1,3220	0,1068
Gemisch GR:ZR=1:1 siliert	9-17	Wasser	1031	50/80	0,0995	0,4015	0,8420	0,0839

handen. Demzufolge wird die flüssige Phase bei Scherbelastung im Rohr an die Rohrwand gedrückt und bildet dort eine Gleitschicht. Es findet also zugleich Gleit- und Scherfließen statt und der Strömungswiderstand vermindert sich deutlich. Allein aufgrund dieser Fließanomalien können frisch gemustete Gehalts- und Zuckerrüben durch Rohrleitungen gefördert werden. So ist auch das Phänomen erklärbar, daß die Druckverluste in Stahlrohren geringer sind als in Kunststoffrohrleitungen (Bild 1). Infolge der höheren Wandrauigkeit ist die Gleitschicht in Stahlrohren stärker und stabiler ausgebildet als in glatten Kunststoffrohren.

Siliertes Rübenmus hat eine bessere Fließfähigkeit. Struktur und TS-Gehalt verändern sich während des Lagerns, das Scherfließen dominiert, die Gleiteffekte treten nur noch in vermindertem Maße auf. Durch den Silierungsprozeß verbessert sich die Fließfähigkeit der Gehaltsrüben etwa um den Faktor 2, der Zuckerrüben sogar um den Faktor 7,5. Der TS-Gehalt vermindert sich während der Silierung um etwa 20 bis 30 %. Bild 1 zeigt die bei schrittweiser Verdünnung mit Rübensaft aufgenommenen Fließkurven. Das Fließverhalten wird mit dem Fließgesetz von Ostwald und de Waele

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

hinreichend beschrieben. Die Fließkennwerte  $k$  und  $n$  werden in Abhängigkeit vom TS-Gehalt durch die Exponentialfunktionen

$$k = A_k \exp(B_k \text{ TS}) \quad (4)$$

$$n = A_n \exp(B_n \text{ TS}) \quad (5)$$

ausgedrückt [8]. Die Regressionsparameter  $A$  und  $B$  sind als Bemessungsempfehlungen in Tabelle 1 angegeben. Diese Stoffdaten können in das Rechenprogramm ROHRWIN [10] eingegeben und dann zur Planung und Auslegung von Rohrleitungen und Förderpumpen verwendet werden.

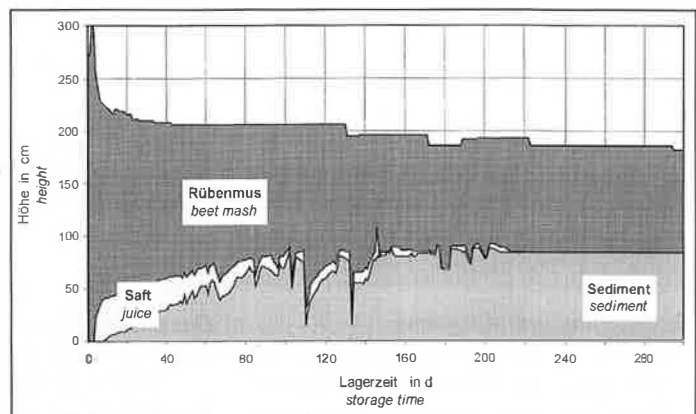
#### Lagerungsverhalten

Das Verhalten im Lagersilo ist in Bild 2 charakterisiert. Der Rübensaft sammelt

sich am Behälterboden, und mit zunehmender Lagerungszeit, also nach mehr als 30 Tagen, sinken auch kleinere organische Teile nach unten und bilden dort eine Sedimentschicht. In dieser ist die Gärung zur Ruhe gekommen, es entstehen keine Gasblasen mehr. In der oberen Musschicht ist dagegen über die gesamte Lagerzeit von bis zu 300 Tagen eine sich mit der Zeit vermindernde Gärgasentwicklung erkennbar.

Bild 2: Schichtungsverhalten bei der Silierung einer Mischung aus Gehalts- und Zuckerrüben im Verhältnis von 2:1 mit TS = 18,2 % im Standzylinder

Fig. 2: Storage behaviour of ensiled sugar beet fodder and sugar beet mash (ratio 2:1) with DM = 18.2 % in a vertical cylinder



Der Saft hat eine geringere Viskosität und wird bei Untenentnahme aus dem Silo zuerst abgeführt. Zwischen der unteren und der oberen Schicht können TS-Differenzen bis zu 3 % auftreten, so daß sich auch der Futterwert deutlich unterscheidet. Das Ziel ist es daher, eine Schichtenbildung im Silo zu vermeiden und möglichst zeitkonstante Stoffeigenschaften als Voraussetzung einer guten Futterqualität bei der Entnahme zu sichern. Die Entmischungsneigung beim Silieren soll durch Erhöhung des Trockensubstanzgehaltes, also durch Vermeidung des freien Saftanteils, verringert werden, ohne jedoch die Fließfähigkeit erheblich zu beeinflussen. Durch eine Mischsilierung von Gehalts- und Zuckerrüben im Massenverhältnis von 1:1 bis 3:1 läßt sich die störende Schichtenbildung weitgehend vermeiden (Bild 2). Nach 150 Tagen ist keine ausgeprägte Saftschrift mehr erkennbar, und die Phasengrenzen werden verwischt. Der TS-Unterschied zwischen der unter-

sten und der obersten Schicht beträgt weniger als 1 %.

Auch durch Zumischen von saftbindenden Kraftfutterzusätzen kann die Saftschrift beim Silieren reduziert werden. Die Zugabe von 5 % Kraftfutterpellets erwies sich als wirkungsvoll, bei der Entnahme konnten kaum noch relevante TS-Differenzen in verschiedenen Schichten festgestellt werden.

#### Zusammenfassung

Es wurden Untersuchungen zum Förder- und zum Lagerverhalten von trockenstanzreichen frisch gemusteten und silierten Gehalts- und Zuckerrüben durchgeführt. Die Rübensilage kann zur Fütterung von Schweinen und Rindern dienen. Diese Dickstoffe sind im Grenzbereich der Fließfähigkeit einzuordnen. Stoffeigenschaften können nur unzureichend beschrieben werden, weil herkömmliche Viskosimeter nicht einsetzbar sind. Mit den Ergebnissen der kleintechnischen Förderversuche (Tab. 1) können Rohrleitungen berechnet und Pumpen ausgelegt

werden. Dazu läßt sich das variable Rechenprogramm ROHRWIN auch für diese Dickstoffe nutzen [10]. Entmischungen beim Lagern von Rübenmus lassen sich durch die gemischte Einlagerung von Gehalts- und Zuckerrüben oder auch durch Getreidezusätze vermindern.

Literaturhinweise sind vom Verlag unter LT 98 203 erhältlich.

#### Schlüsselwörter

Gemustete und silierte Rüben, Förderverhalten von Dickstoffen, Lagerverhalten, rotierende Verdrängerpumpen

#### Keywords

Ensiled beet mash, slurry fluid flow behaviour, storage behaviour, rotary piston pumps