

## Spannungsrelaxation und Rückdehnverhalten von angewelktem Wiesengras bei Verdichtungsvorgängen

Dipl.-Ing. Chr. Füll, KDT\*

### 1. Problemstellung

Über die Gesetzmäßigkeiten beim Verdichten von Halmgütern existieren in der Fachliteratur zahlreiche Veröffentlichungen. Sie beschränken sich jedoch in der Hauptsache auf Vorgänge, die in Halmgutpressen und beim Brikettieren ablaufen. Ergebnisse über die Spannungsrelaxation<sup>1</sup> beim sprunghaften Verdichten von Halmgütern wurden bisher dagegen nur von Osobow [1] in Dichtebereichen ermittelt, in denen das Brikettieren stattfindet. In niedrigeren Dichtebereichen wurden noch keine Versuche durchgeführt.

Sprunghaftes Verdichten auf Deformationsbeträge, die über eine gewisse Zeit nahezu konstant gehalten werden, gibt es in der technischen Praxis beispielsweise beim Steilfördern mit Hilfe von übereinander angeordneten, gegenläufigen Bändern oder vor dem Schneiden in Feldhäckseln. Für die Dimensionierung der entsprechenden Arbeitswerkzeuge gibt es zur Zeit nur geringe Anhaltspunkte.

Das Rückdehnungsverhalten nach konstanter Deformation ist beim Fördern von vorher kurzzeitig verdichteten Halmgütern auf Bändern von Interesse.

Für die durchgeführten Versuche bestand deshalb die Aufgabe, erste Ergebnisse über die Spannungsrelaxation und das Rückdehnungsverhalten von angewelktem Wiesengras beim Verdichten auf Deformationsbeträge, die eine bestimmte Zeit konstant gehalten werden, zu ermitteln.

### 2. Durchführung der Versuche

Für das Durchführen der Versuche wurde eine Verdichtungseinrichtung benutzt, deren schematischer Aufbau im Bild 1 dargestellt ist. Das verwendete Untersuchungsmaterial war blattreiches, angewelktes Wiesengras (2. Schnitt). Zu Beginn eines Versuchs wurde mit großer Sorgfalt auf der unteren

Verdichtungsplatte *a* ein Haufwerk *b* mit einem Durchmesser  $d_H = 300$  mm und einer Höhe  $h_0 = 100$  mm geformt. Als Meßgeber für das Registrieren der Deformation diente eine perforierte Aluminiumplatte *c*. Die Masse der Platte war mit 19,5 g sehr gering, so daß die Rückdehnung des Halmguts nach dem Verdichten nur unwesentlich beeinträchtigt wurde. Während der Versuche wurde über einen Faden *d*, der an der Aluminiumplatte *c* befestigt war, das Feinmeßpotentiometer *e* betätigt. Die Deformation des Halmguts wurde auf diese Weise über die elektrischen Spannungen am Potentiometer gemessen. Zum Messen der mechanischen Spannungen beim Verdichten waren an der oberen feststehenden Platte *f* Dehnungsmeßstreifen angebracht. Das Verdichten auf die gewünschte Höhe  $h_{v0}$  geschah mit einer Geschwindigkeit von 35 mm/s. Während der Haltezeit  $t_h$  wurde der Spannungsverlauf  $\sigma(t)$  aufgezeichnet. Der Verlauf der Rückdehnung  $h_v(t)$  nach dem Entlasten wurde über eine Zeitdauer von 4 min gemessen (Bild 2).

Zum Bestimmen des Einflusses des Verdichtungsverhältnisses  $k = h_0/h_{v0}$  auf den Verlauf der Spannungsrelaxation  $\sigma(t)$  sowie der Einflüsse der Haltezeit  $t_h$  und des Verdichtungsverhältnisses  $k$  auf die Rückdehnung wurden diese Größen in den Versuchen variiert. Das Versuchsgut wurde durch die Schüttdichte  $\rho_S$ , den Trockenmassegehalt  $T_M$ , die mittlere Biegesteifigkeit  $EI$  der Einzelhalme und die mittlere Häcksellänge  $\bar{l}$  charakterisiert.

### 3. Diskussion der Versuchsergebnisse

#### 3.1. Ergebnisse aus den Spannungsrelaxationsmessungen

Der Spannungsrelaxationsverlauf, der sich nach einer im Zeitintervall  $\Delta t \rightarrow 0$  sprunghaft erzeugten und im weiteren Zeitverlauf konstant bleibenden Deformation eines Körpers ergibt, kann rheologisch durch ein verallgemeinertes Maxwellmodell (Parallelschaltung einer beliebigen Anzahl von Maxwell'schen Einzelmodellen) ausgedrückt werden. Im vorliegenden Fall war es möglich, hierzu ein verallgemeinertes Maxwellmodell, das aus zwei parallel geschalteten Maxwell'schen Einzelkörpern bestand, zu benutzen (Bild 3). Die Spannungsrelation dieses Modells verläuft nach der Beziehung:

$$\sigma(t) = \sigma_0(t) + \sigma_1(t) = \epsilon_0(E_0 e^{-t/T_0} + E_1 e^{-t/T_1}) \quad (1)$$

Darin bedeuten:

$\sigma$	Spannung in $\text{kp/cm}^2$
$\epsilon_0$	Verformung, $\epsilon_0 = 1 - \frac{h_{v0}}{h_0}$
$E_0$	Elastizitätsmodul in $\text{kp/cm}^2$
$E_1$	Elastizitätsmodul in $\text{kp/cm}^2$
$T_0$	Zeitkonstante in s
$T_1$	Zeitkonstante in s
$t$	Zeit in s

Das Bestimmen der Konstanten  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $T_0$  und  $T_1$  erfolgt aus den experimentell gemessenen Spannungsrelaxationsverläufen nach der Methode der sukzessiven Differenzen. Sie

(Schluß von Seite 565)

einem Flachprofil zu verbinden, so ist das nach Demontage eines Getriebes lösbar.

#### Technische Daten der Doppelkopfreibschweißmaschine

Druckaufbringung	hydraulisch
Reißkraft	100 ··· 2000 kp
Stauchkraft	500 ··· 2000 kp
Leistung des Hauptantriebmotors	7,5 kW (~ 380 V)
Spindeldrehzahl	2000 $\text{min}^{-1}$
Bremssystem	Elektromagnetbremse
Bremszeit	0,1 ··· 0,2 s
Kupplung	Elektromagnetlamellenkupplung
Steuerung	elektro-hydraulisch
Hub eines Arbeitskopfes	max. 50 mm
Anzahl der Schweißvorgänge je Stunde (durch Kupplung begrenzt)	180

Ing. G. Heindl

A 8898

\* Universität Rostock, Sektion Landtechnik (Direktor: Prof. Dr.-Ing. Chr. Eichler)

<sup>1</sup> zeitliches Zurückbleiben einer Wirkung hinter der Ursache

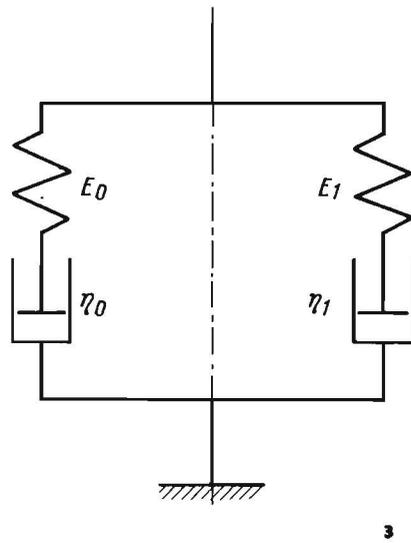
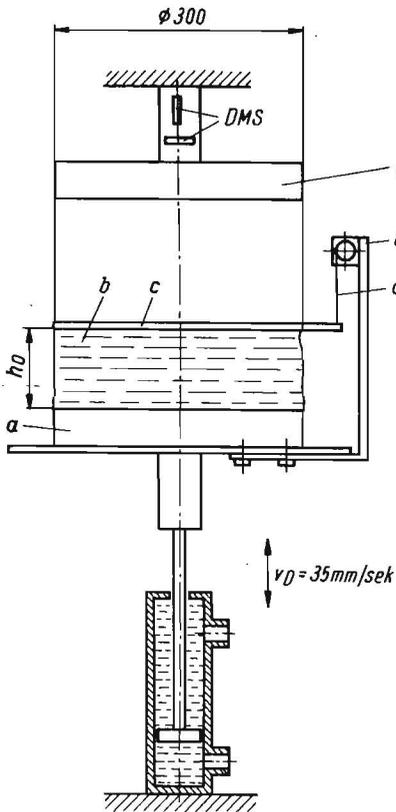
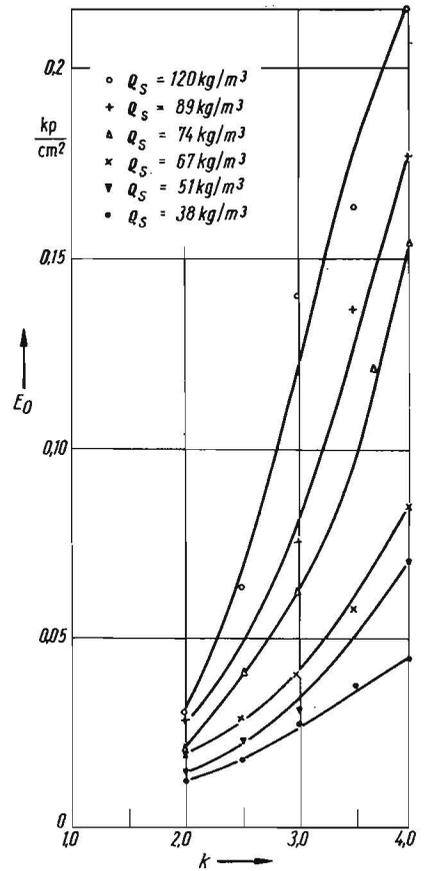


Bild 1 Versuchseinrichtung zum Bestimmen der Spannungsrelaxation und des Rückdehnungsverhaltens (Erläuterung im Text)

Bild 2 Schematische Darstellung des Spannungsrelaxationsverlaufs  $G = f(t)$  und des Deformationsverlaufs  $h = f(t)$  während der Verdichtungsversuche

Bild 3 Verallgemeinertes Maxwellmodell aus zwei parallel geschalteten Maxwellischen Einzelmodellen

Bild 4 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls  $E_0$  vom Verdichtungsverhältnis  $k$  und von der Schüttdichte  $q_S$



ist ausführlich von Moshenin [2] beschrieben worden. Die Modellkonstanten  $\eta_0$  und  $\eta_1$  erhält man aus der Gleichung:

$$\eta_i = T_i \cdot E_i \quad (i = 0; 1) \quad (2)$$

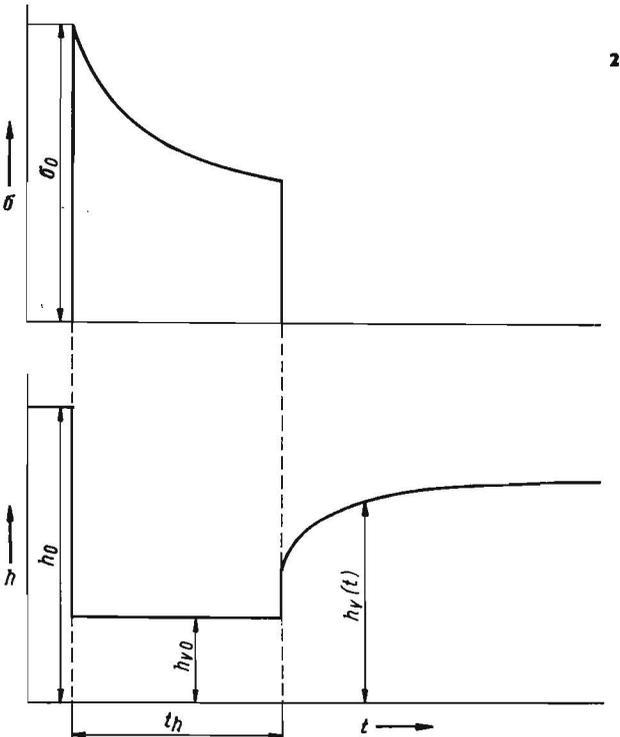
$\eta_0$  Dämpfungskonstante in  $\text{kp} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$

$\eta_1$  Dämpfungskonstante in  $\text{kp} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$

Wie aus Tafel 1 ersichtlich ist, sind die Modellparameter  $E_0$ ,  $E_1$ ,  $\eta_0$  und  $\eta_1$  keine Konstanten. Sie werden wesentlich vom

Tafel 1. Abhängigkeit der Modellparameter von den Grundeigenschaften und dem Verdichtungsverhältnis  $k$

$q_S$ $\text{kg}/\text{m}^3$	$TM$ %	$EI$ $\text{kp} \cdot \text{cm}^2 \text{mm}$	$\bar{T}$ $\text{mm}$	$k$	$E_0$ $\text{kp}/\text{cm}^2$	$E_1$ $\text{kp}/\text{cm}^2$	$\eta_0$ $\text{kp} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$	$\eta_1$ $\text{kp} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$
38,4	78,0	0,5481	17,6	2,0	0,013	0,011	13,00	0,048
				2,5	0,018	0,018	20,00	0,048
				3,0	0,027	0,024	5,83	0,044
				3,5	0,037	0,030	7,75	0,060
				4,0	0,052	0,043	46,50	0,081
51,0	63,0	0,2586	35,2	2,0	0,014	0,012	3,66	0,028
				2,5	0,022	0,022	12,00	0,045
				3,0	0,030	0,025	6,83	0,050
				3,5	0,058	0,045	18,00	0,072
				4,0	0,069	0,062	14,60	0,084
66,8	57,0	0,0934	17,6	2,0	0,019	0,015	22,00	0,042
				2,5	0,028	0,023	9,30	0,057
				3,0	0,040	0,037	6,90	0,090
				3,5	0,057	0,035	12,00	0,138
				4,0	0,084	0,067	14,50	0,187
74,4	34,0	0,0115	35,2	2,0	0,021	0,017	35,00	0,044
				2,5	0,041	0,025	7,65	0,057
				3,0	0,062	0,045	25,80	0,090
				3,5	0,095	0,088	19,00	0,138
				4,0	0,153	0,124	46,00	0,187
89,0	40,0	0,0202	17,6	2,0	0,030	0,020	5,00	0,032
				2,5	0,041	0,030	6,50	0,057
				3,0	0,075	0,067	17,00	0,098
				3,5	0,135	0,101	22,20	0,140
				4,0	0,175	0,125	32,00	0,141
120,0	34,0	0,0115	17,6	2,0	0,030	0,031	11,46	0,054
				2,5	0,063	0,059	19,00	0,090
				3,0	0,139	0,111	19,70	0,110
				3,5	0,162	0,119	24,50	0,120
				4,0	0,213	0,100	68,00	0,216



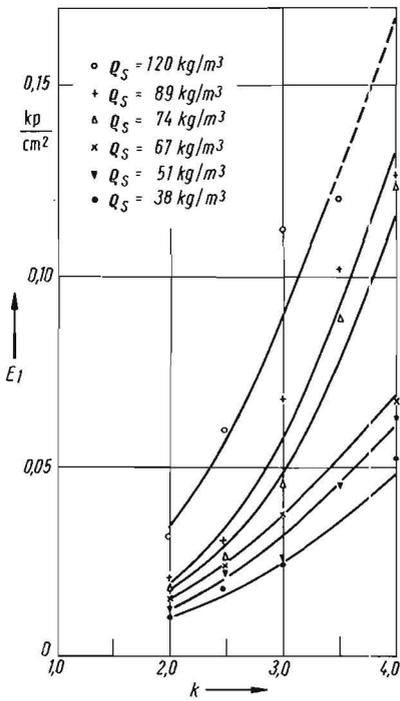


Bild 5  
Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls  $E_1$  vom Verdichtungsverhältnis  $k$  und von der Schüttdichte  $\rho_s$

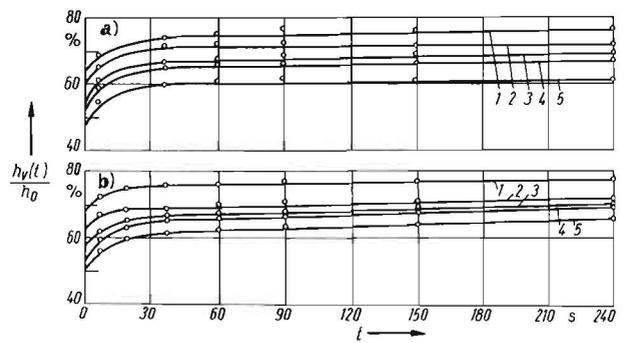
Bild 6  
Verlauf der relativen Guthöhe  $h_v(t)/h_0$  nach dem Entlasten für ein ausgewähltes Halmgut in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis  $k$

- (1  $K = 2,0$ ;  
2  $K = 2,5$ ;  
3  $K = 3,0$ ;  
4  $K = 3,5$ ;  
5  $K = 4,0$ )

a)  
 $\rho_s = 89,4 \text{ kg/m}^3$ ,  
 $\bar{l} = 17,6 \text{ mm}$ ,  
 $t_H = 20 \text{ s}$

b)  
 $\rho_s = 89,4 \text{ kg/m}^3$ ,  
 $\bar{l} = 17,6 \text{ mm}$ ,  
 $t_H = 40 \text{ s}$

Bild 7  
Verlauf der bleibenden relativen Guthöhe  $h_v(t \rightarrow \infty)/h_0$  in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis  $k$  ( $\rho_s = 38,4$  bis  $120,0 \text{ kg/m}^3$ )



6



7

5

Verdichtungsverhältnis  $k$  und von der Schüttdichte  $\rho_s$ , die selbst eine Funktion des Trockenmassegehalts  $TM$ , der mittleren Biegefestigkeit der Einzelhalme  $EI$  und der mittleren Häcksellänge  $\bar{l}$  ist, beeinflusst. Die Zunahme der Elastizitätskonstanten in Abhängigkeit vom Verdichtungsverhältnis  $k$  und von der Schüttdichte  $\rho_s$  (Bilder 4 und 5) ist damit zu erklären, daß mit dem Ansteigen dieser Größen das Hohlräumvolumen im Haufwerk abnimmt und der erforderliche Druck für ein weiteres Verdichten dadurch größer werden muß. Der Grenzfall ist dann erreicht, wenn das Halmgut bis auf seine Substanzdichte  $\rho_{sub}$  verdichtet werden soll.

Der Einfluß des Verdichtungsverhältnisses  $k$  und der Schüttdichte  $\rho_s$  auf die Dämpfungskonstanten ist weniger eindeutig. Nach der Tendenz ist jedoch auch hier eine Zunahme festzustellen.

### 3.2. Ergebnisse über die Rückdehnung

Die Haltezeit  $t_H$  wurde in den Grenzen von 20 bis 60 s variiert. Die Untersuchungen erbrachten, daß die Rückdehnung bei Konstantbleiben aller übrigen möglichen Größen von der Haltezeit  $t_H$  nicht beeinflusst wird.

Der Trockenmassegehalt  $TM$  und die mittlere Biegesteifigkeit  $EI$  der Einzelhalme haben ebenfalls keinen Einfluß auf die Rückdehnung des Guts.

Die mittlere Häcksellänge  $\bar{l}$  der Einzelhalme wurde mit 17,6 mm und 35,2 mm nur in zwei Größen variiert. In den Untersuchungen erwies sich, daß auch die Häcksellänge  $\bar{l}$  nur einen unwesentlichen Einfluß auf die Rückdehnung hat. Die relative Guthöhe  $h_v(t)/h_0$  war bei einer Häcksellänge  $\bar{l} = 17,6 \text{ mm}$  lediglich um 2 bis 3 Prozent kleiner als bei einer Häcksellänge  $\bar{l} = 35,2 \text{ mm}$ .

Die Rückdehnung des Guts ist in erster Linie vom Verdichtungsverhältnis  $k$  abhängig. Im Bild 6 ist der Verlauf der relativen Guthöhe  $h_v(t)/h_0$  als Funktion der Zeit  $t$  nach dem Aufheben der konstanten Deformation für ein ausgewähltes Gut darstell.

Bild 7 zeigt den Verlauf der relativen Guthöhe  $h_v(t)/h_0$  für  $t \rightarrow \infty$  (bleibende relative Guthöhe) in Abhängigkeit vom

Verdichtungsverhältnis  $k$ . Man kann erkennen, daß sich der Hauptanteil der Rückdehnung in den ersten 45 s nach der Entlastung vollzieht. Im Vergleich dazu nimmt die relative Guthöhe danach nur noch unwesentlich zu.

Der Zusammenhang zwischen der bleibenden relativen Guthöhe und dem Verdichtungsverhältnis  $k$  kann für den Bereich  $k = 2,0$  bis  $4,0$  durch die Gleichung

$$\frac{h_v(t \rightarrow \infty)}{h_0} = -5,9k + 88 \quad [\%] \quad (3)$$

ausgedrückt werden.

### 4. Zusammenfassung

Zum Bestimmen der Spannungsrelaxation und des Rückdehnungsverhaltens von Halmgütern bei Verdichtungsverfahren wurden erste Versuche mit angewelktem Wiesen gras (2. Schnitt) durchgeführt. Die Ergebnisse aus den Spannungsrelaxationsmessungen wurden in Form eines verallgemeinerten Maxwellmodells mit zwei Maxwellschen Einzelmodellen dargestellt. Die Modellkonstanten werden von den Stoffeigenschaften und vom Verdichtungsverhältnis  $k$  beeinflusst. Die Ergebnisse gelten nur für ein sprunghaftes Verdichten mit einer Geschwindigkeit von 35%/s. Die Rückdehnung des Halmguts nach einer vorherigen sprunghaft erzeugten und konstant gehaltenen Deformation ist vor allem vom Verdichtungsverhältnis  $k$  abhängig. Die Haltezeit  $t_H$  und die Stoffeigenschaften des Guts hatten in den untersuchten Bereichen keinen wesentlichen Einfluß.

Die ermittelten Ergebnisse sollen den Konstrukteuren von Landmaschinen und landtechnischen Anlagen beim Dimensionieren entsprechender Arbeitsorgane als erste Anhaltspunkte dienen.

### Literatur

- [1] Osobow, V. U.: Posledstvie pri uplotnenii voloknistich rastitelnykh materialov. Vestnik sel'sk. choz. nauki 3 (1968), S. 115-119
- [2] Moshenia, N.: Physical Properties of Plant and Animal Materials. Vol. 1: Structure, physical characteristics, mechanical properties. London: Gordon and Breach 1971 A 8931