

Bild 4. Temperaturen im 12-m-Hochsilo vom 18. Mai bis 7. August 1969. a Einbringung der 5. Schicht, b Öffnung des Deckels, c tägliche Minima, d tägliche Maxima der Außenlufttemperatur

### 3. Ergebnisse

Im Ergebnis der Auswertung liegen Tabellen mit über 5000 Einzelwerten vor. Die Temperaturen einiger charakteristischer Meßstellen sind in Bild 4 dargestellt.

### 4. Einordnung der Ergebnisse und ermittelte Gesetzmäßigkeiten

Das wichtigste Ergebnis besteht darin, daß an keiner Meßstelle im Stapelinneren mehr als 40 °C herrschten; lediglich in der jeweils obersten Schicht stiegen die Temperaturen höher an. Im Stapelinneren blieb die kurz nach dem Einlagern eingenommene Temperatur erhalten, sie wurde vom Verlauf der Außentemperatur praktisch nicht beeinflusst. Das hängt mit der sehr großen Wärmekapazität des Stapels im Verhältnis zu der darauf bezogenen geringen Oberfläche zusammen. Da im Stapelinneren Wärme nur durch Leitung, nicht aber durch Konvektion übertragen werden kann, unterliegt nur die äußerste Schicht den Schwankungen der Außentemperatur. Allerdings blieben aus den gleichen Gründen in der obersten Schicht auch die höheren Temperaturen über 40 °C monatelang erhalten, noch begünstigt durch den geringfügigen Luftwechsel im Raum oberhalb des Stapels. Die absolut höchste Temperatur von 67 °C wurde in der Nähe des äußeren Schachtes in der obersten Schicht gemessen. Das deutet wiederum auf den großen Einfluß des Luftzutritts auf die Temperaturerhöhung hin. (Die hohen Temperaturen um 60 °C in der obersten Schicht blieben über Monate hinweg erhalten.) In der Nähe des Mittelschachtes stieg etwa 5 Wochen nach der Einlage-

rung im Verlaufe von 2 Wochen die Temperatur von 45 auf 55 °C an, was mit der in dieser Zeit vorgenommenen Öffnung des Silos zusammenhängen dürfte. Die übrigen Meßstellen in der Nähe des Mittelschachtes folgten geringfügig den langfristigen Schwankungen der Außenlufttemperatur, und zwar um so mehr, in je geringerer Höhe die Meßstelle lag. Das läßt auf eine geringfügige Luftströmung von unten nach oben durch den Zentralschacht schließen. In der untersten Schicht erreichte die Meßstelle an der Außenwand unmittelbar nach dem Einlagern eine Temperatur von nahezu 50 °C. Anschließend kühlte sich diese Meßstelle ab und folgte schließlich den langfristigen Änderungen der Außentemperatur. Dieses Verhalten läßt darauf schließen, daß innerhalb der Silage unter Luftabschluß keine Wärmeentwicklung mehr stattfindet.

Die Außenlufttemperatur wurde im Diagramm durch die Kurven der ermittelten Maxima und Minima charakterisiert. Die Außenfühler wurden bewußt Regen und Sonne ausgesetzt, dadurch entsprechen die registrierten Werte weitgehend der Temperatur an der Silooberfläche, in deren unmittelbarer Nähe sich die Fühler befanden.

Die mittlere Streuung der Temperatureinzelwerte lag bei etwa  $\pm 1$  grad, so daß die Anforderungen an die Meßgenauigkeit als erfüllt angesehen werden können. Wegen der niedrigen Wärmeleitfähigkeit von Silage ist es in gewisser Hinsicht problematisch, daß im Mittel nur eine Meßstelle auf etwa 50 m<sup>3</sup> entfällt.

### Zusammenfassung

Im 12-m-Hochsilo des LVG Potsdam-Bornim wurden 1969 mit Hilfe einer 36-Meßstellen-Einrichtung auf der Basis von Eisen-Konstantan-Thermoelementen Temperaturmessungen durchgeführt. Dabei wurden 1969 folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Nur die jeweils oberste Schicht erwärmte sich auf über 40 °C, darunter und im Stapelinneren wurden nur Werte unter 40 °C festgestellt.
- Die Temperaturen im Stapelinneren verharrten auf nahezu unveränderlichen Werten.
- In der Nähe der Außenwand und in der Nähe des Zentralschachtes folgten die Temperaturen träge den langfristigen Änderungen der Außentemperatur.
- Auch nach Abschluß des Gärprozesses bewirkte die Luftzufuhr eine Temperatursteigerung in den betroffenen Schichten.

Die durchgeführten Arbeiten bestätigten, daß es durchaus möglich ist, die Temperaturen in Hochsilos zu erfassen. Die gewonnenen praktischen Erfahrungen erlauben eine weitere Verbesserung der Meßmethodik für künftige Messungen.

A 5096

## Trocknen

### Einflüsse auf den Wasserentzug beim Welkvorgang

Dipl.-Landw. A. NEUSCHULZ, KDT

#### 1. Aufgabenstellung

Größere Mengen an Welksilage werden in den nächsten Jahren zur Versorgung der Rinderbestände gebraucht, um in der Winterfutterperiode den für höhere tierische Leistungen benötigten Bedarf an Nährstoffen weitgehend aus dem Grundfutter abzudecken. Mit der Welkzubereitung wird eine erwünschte Trockenmassenanreicherung im Ausgangsmaterial erzielt, die für die Konservierung und Fütterung einige bedeutende Vorteile aufweist. Sie lassen sich in technologische, gärbiologische und fütterungsphysiologische Vorteile unterteilen.

Zu den technologischen rechnen wir:

- Verringerung der Erntemasse,
- höhere Trockenmassedurchsätze durch das Schwadhäckseln von Welkgut als beim Mähhäckseln,

- bessere Ausnutzung des Ladevolumens durch höhere Trockenmasse-Schüttdichten,
- geringere Hängerachslasten ermöglichen die Befahrbarkeit weniger tragfähiger Böden,
- bessere Raumausnutzung in Silos durch höhere Trockenmasse-Lagerungsdichten,
- Steigerung des Durchsatzes und Senkung des Energieverbrauches bei der Heißlufttrocknung.

Die gärbiologischen Vorteile bestehen in der

- Verbesserung der Silagequalität bei schwer silierbaren Futterpflanzen und der
  - Senkung der Gärverluste;
- als fütterungsphysiologischer Vorteil ist zu nennen

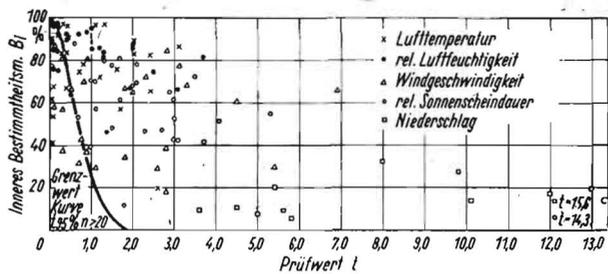


Bild 1. Darstellung von Ausgangswerten innerer Bestimmtheitsmaße  $B_{1i}$  und Prüfwerte  $t_i$  im  $t$ - $B_1$ -Diagramm

— Erhöhung des täglichen Trockenmasserverzehrs und der Nährstoffaufnahme durch Verfütterung von Welksilage. Gegenüber diesen Vorteilen muß als Nachteil angeführt werden, daß mit zunehmendem Umfang der Welkgutproduktion die Verfahren der Silierung im Vergleich zur Frischgutkonservierung witterungsabhängiger werden. Vom Witterungsverlauf in der Zeit von Mai bis Oktober wird maßgeblich die Bereitstellung von nährstoffreichem Welkgut für die Konservierungsverfahren der Silierung und Trockengutbereitung bestimmt.

In den einzelnen Klimagebieten der DDR steht in dieser Zeit nur eine begrenzte Anzahl von witterungsbedingten Welk- und Erntetagen zur Verfügung. Um die Nährstoffverluste in der Welkphase zu verringern und bestes Welkgut zu gewinnen, müssen günstige Witterungsperioden zur Welkguterzeugung optimal genutzt werden und die regional verfügbaren Welktage bekannt sein.

Eine hinreichend genaue Ermittlung der verfügbaren Welktage aus meteorologischen Daten für bestimmte Klimagebiete der DDR in der Zeit von Mai bis Oktober ist nach dem heutigen Erkenntnisstand z. Z. noch nicht möglich. Um die Erkenntnisse über den Trocknungsverlauf und die Trocknungsgeschwindigkeit bei den wichtigsten Futterpflanzen zu vertiefen, sind Untersuchungen nötig. Die Ergebnisse solcher Untersuchungen können zur Klärung der Wechselbeziehungen zwischen Trocknung und Witterung beitragen. Die während des Versuchsablaufes festgehaltenen Witterungsdaten und Verdunstungsmengen werden mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse in einem mathematischen Modell erfaßt. Daraus bestimmte Regressionsgleichungen ermöglichen eine Berechnung des wahrscheinlichen Trocknungsverlaufes unter natürlichen Bedingungen aus meteorologischen Daten. Dadurch können langfristige Witterungsaufzeichnungen des Meteorologischen Dienstes ausgewertet und planungstechnische Unterlagen geschaffen werden.

## 2. Methodik

Zur Ermittlung der Verdunstungsleistung oder der Aufnahme von Niederschlag durch Tau und Regen sind zwei Schwadwaagen gebaut worden. Über Einzelheiten der Meßeinrichtung wurde bereits berichtet [2].

Die Versuche endeten mit Erreichen eines Trockenmassengehaltes von 40 Prozent bei Grünroggen und 60 Prozent bei den übrigen Futterpflanzen.

Während des Versuchsablaufes wurden folgende Witterungsdaten gemessen und registriert:

- Niederschlagsmenge
- relative Luftfeuchtigkeit
- Lufttemperatur
- Sonnenscheindauer
- Windgeschwindigkeit.

Getrocknet wurden klee- und grasartige Futterpflanzen, gequetscht und ohne mechanische Aufbereitung bei Schwadmassen von 6 und 9 kg/m<sup>2</sup>

## 3. Ergebnisse

Zur Darstellung des Zusammenhangs zwischen den einzelnen Einflußgrößen und der Wirksamkeit einer Einflußgröße innerhalb einer Regressionsgleichung auf die Ziel-

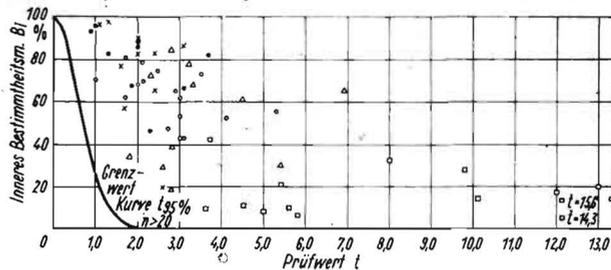


Bild 2. Darstellung innerer Bestimmtheitsmaße  $B_{1i}$  und Prüfwerte  $t_i$  der gesicherten Einflußgrößen  $x_i$  (Erläuterungen s. Bild 1)

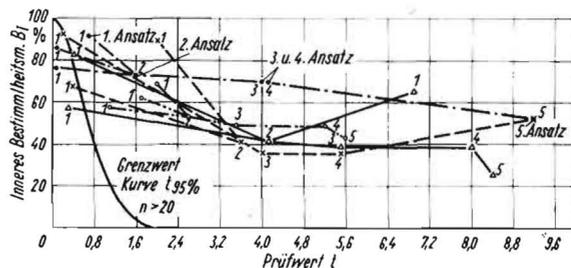


Bild 3. Ergebnisse der 5 Ansätze im  $t$ - $B_1$ -Diagramm (Erläuterungen s. Bild 1). Die Verrechnung des statistischen Materials aus drei Versuchen der Materialvariante Luzerne mit 9 kg/m<sup>2</sup> Schwadmasse ergibt die im 1. Ansatz dargestellten Prüfwerte  $t_i$  (1) der einzelnen Einflußgrößen. In den folgenden Ansätzen werden die drei Versuche zusammengefaßt und die Prüfwerte  $t_i$  (2...5) schrittweise errechnet

größe wird das  $t$ - $B_1$ -Diagramm gewählt. Der auf der Abszisse abgetragene Prüfwert  $t$  gestattet es, die Wirksamkeit einer Einflußgröße im Ansatz zu beurteilen. Bei einem Stichprobenumfang  $n > 20$  und der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 Prozent ist eine Einflußgröße in einem Ansatz gesichert, wenn die Bedingung  $t > 2$  erfüllt ist.

Das auf der Ordinate abgetragene innere Bestimmtheitsmaß  $B_1$  einer bestimmten Einflußgröße ist ein Maß für den Zusammenhang mit allen anderen Einflußgrößen [1]. Je größer der Zusammenhang zwischen einer betrachteten Einflußgröße und den anderen Einflußgrößen ist, um so kleiner wird der Prüfwert  $t$ .

Das vorliegende statistische Material ist mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse schrittweise in 5 Ansätzen verrechnet worden (Tafel 1).

Die ersten vorliegenden Ergebnisse aus den zweijährigen Untersuchungen zeigen, daß im 1. Ansatz der Regressionsanalyse die Einflußgröße Niederschlagsmenge wie erwartet die höchsten  $t$ -Werte hat. Weiterhin haben die Einflußgrößen Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit in der

Tafel 1. Übersicht der angewendeten Funktionsgleichungen in den 5 Ansätzen

| Ausgangsgleichung: | $y = f(x_1, x_2, \dots, x_5)$<br>$= a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_5 x_5$ |
|--------------------|--|
| 1. Ansatz          | $W_n = f(\theta, \varphi, v, s, r)$                                  |
| 2. Ansatz          | $W_n = f(\theta, \varphi, v, s)$                                     |
| 3. Ansatz          | $W_n' = f(\theta, \varphi, v, s) \quad c = 1,0$                      |
| 4. Ansatz          | $W_n'' = f(\theta, \varphi, v, s) \quad c = 0,8$                     |
| 5. Ansatz          | $W_n''' = f(\Delta x_\theta, v, s) \quad c = 0,8$                    |

Darin bedeuten:

$W_n$  Verdunstungsleistung

$W_n'$  feuchtigkeitbezogene Verdunstungsleistung

( $W_n' = W_n \cdot F^{-c}$ )

$F$  Feuchtigkeitsgehalt der Schwadmasse im jeweiligen Trocknungszustand

$c$  Koeffizient

$\theta$  Lufttemperatur

$\varphi$  relative Luftfeuchtigkeit

$v$  Windgeschwindigkeit

$s$  Sonnenscheindauer

$r$  Niederschlag

$\Delta x_\theta$  Sättigungsdefizit ( $\Delta x_\theta = x'' - x'$ )

$x'$  maximal mögliche Wasseraufnahme der Luft bei einer bestimmten Lufttemperatur

$x''$  tatsächlich vorhandener Wassergehalt der Luft bei einer bestimmten Lufttemperatur

Mehrzahl der ermittelten  $t$ -Werte einen größeren gesicherten Einfluß auf die Zielgröße Verdunstungsleistung als die miteinander korrelierenden Einflußgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (Bild 1).

Alle errechneten  $t$ -Werte der Einflußgröße Niederschlag sind in die Regressionsgleichung des 1. Ansatzes eingegangen. Mehr als die Hälfte der jeweils errechneten  $t$ -Werte der Einflußgröße Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind im 1. Ansatz der Regressionsrechnung als nicht signifikant ausgeschlossen (Bild 2).

In den weiteren Ansätzen der Regressionsrechnung ist der Wiederbefeuchtungsvorgang von dem eigentlichen Prozeß der Trocknung getrennt worden. Dadurch läßt sich die Wechselbeziehung zwischen der Trocknung und den anderen gemessenen Einflußgrößen besser klären. Die während der Untersuchungen ermittelten Massezunahmen durch Regen oder Tau werden in einem weiteren Ansatz gesondert verrechnet.

Durch das Weglassen der Einflußgröße Niederschlag erreichen schon im 2. Ansatz der Regressionsrechnung bei einer Kombination von drei Versuchen der Futterart Luzerne und einer Schwadmasse von 9 kg/m<sup>2</sup> Grünmasse alle übrigen Einflußgrößen einen höheren  $t$ -Wert (Bild 3).

Weitere Berechnungen, die den sich laufend verändernden Feuchtigkeitsgehalt der Futterpflanzen in der untersuchten Schwadmasse berücksichtigen, und das Potenzieren der ermittelten feuchtigkeitsbezogenen Verdunstungsleistung mit 0,8, führen im 3. bzw. 4. Ansatz der Regressionsrechnung zu einer weiteren Verbesserung der  $t$ -Werte (Bild 3).

Die einzelnen Materialvarianten sind im 4. Ansatz der Regressionsrechnung mit verschiedenen Koeffizienten  $c_i$  (0,2 bis 0,8) potenziert worden. Gegenüber dem 3. Ansatz erreichte bei fast allen Materialvarianten die Verrechnung mit dem Koeffizienten 0,8 höhere korrigierte Bestimmtheitsmaße.

Eine Zusammenfassung der Einflußgrößen Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit zum Sättigungsdefizit bringt im 5. Ansatz der Regressionsrechnung gegenüber den anderen Einflußgrößen den höchsten gesicherten Einfluß auf die Zielgröße Verdunstungsleistung (Bild 3).

Somit üben bei dieser Materialvariante nach den Ergebnissen des 5. Ansatzes der Regressionsrechnung, ohne Berücksichtigung der Wiederbefeuchtung durch Niederschlag, das Sättigungsdefizit, die Windgeschwindigkeit und die Sonnenscheindauer einen hoch gesicherten Einfluß auf die Verdunstungsleistung aus. Die Straffheit des Zusammenhangs zwischen den Einflußgrößen und der Zielgröße ist bei dieser Materialvariante durch ein korrigiertes Bestimmtheitsmaß von  $B = 0,91$  gekennzeichnet.

#### 4. Schlußfolgerungen

Aus dem vorliegenden statistischen Material lassen sich nach ersten vorliegenden Ergebnissen mit Hilfe der multiplen Regressionsanalyse Regressionsgleichungen bestimmen, mit

denen die stochastischen Zusammenhänge zwischen Verdunstungsleistung und Witterung erfaßt werden können. So konnte festgestellt werden, daß nach der Trennung des Wiederbefeuchtungsvorgangs durch Niederschlag vom eigentlichen Trocknungsprozeß, die aus Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit neu berechnete Einflußgröße Sättigungsdefizit, die Sonnenscheindauer als auch die Windgeschwindigkeit einen gesicherten Einfluß auf die Verdunstungsleistung haben.

Mit den im 5. Ansatz der Regressionsrechnung ermittelten gesicherten Einflußgrößen bei der Materialvariante Luzerne mit 9 kg/m<sup>2</sup> Schwadmasse wird der Zusammenhang zwischen der Verdunstungsleistung und der Witterung beim Trocknen gut wiedergegeben.

Durch weitere Berechnungen muß überprüft werden, welchen Einfluß diese ermittelten Größen bei anderen Materialvarianten auf die Verdunstungsleistung als Zielgröße haben. Lassen die Ergebnisse dieser Berechnungen eine Übereinstimmung erkennen, kann dieser Ansatz für alle Materialvarianten gelten.

Im 5. Ansatz der Regressionsrechnung wird durch das Zusammenfassen von Lufttemperatur und Luftfeuchte zu einer Einflußgröße die Anzahl der zu berechnenden Einflußgrößen in der Regressionsgleichung verringert. Erreicht das Produkt aus Sättigungsdefizit und Windgeschwindigkeit ähnlich gesicherte Werte wie die vorhergenannten Einflußgrößen im 5. Ansatz, ist eine weitere Vereinfachung im nächsten Ansatz möglich. Erste, in dieser Richtung durchgeführte Berechnungen brachten günstige Ergebnisse.

#### Zusammenfassung

Mit einer Schwadwaage konnten die Verdunstungsmengen einiger Futterpflanzenarten in der Zeit von Mai bis Oktober unter Protokollierung der wichtigsten Witterungsdaten gemessen werden.

Die Methodik der Untersuchungen mit der bereits früher beschriebenen Meßeinrichtung wird erläutert.

Durch Anwendung der multiplen Regressionsanalyse konnte bei der Materialvariante Luzerne mit 9 kg Schwadmasse nachgewiesen werden, daß die aus der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit neu berechnete Einflußgröße Sättigungsdefizit neben der Sonnenscheindauer und der Windgeschwindigkeit einen gesicherten Einfluß auf die Zielgröße Verdunstungsleistung haben. In einem gesonderten Rechenang werden die Schwellenwerte der trockenheitsbegrenzenden Einflußgröße Niederschlag ermittelt.

#### Literatur

- [1] KNUPFEL, H., A. STUMPF, B. WIEZORKE: Mathematische Statistik in Eisenhüttenwerken. Teil I Regressionsanalyse. Archiv für das Eisenhüttenwesen 29 (1958) H. 8, S. 521 bis 533.
- [2] NEUSCHULZ, A.: Einfluß der Witterungsfaktoren auf das Welken der Futterpflanzen. Deutsche Agrartechnik (1969) H. 10, S. 494 bis 496 A 8113

## Der Strömungswiderstand bei der Belüftungstrocknung von Welkgutballen

### 1. Aufgabe

Für die Trockengutproduktion im einheitlichen System der Futterkonservierung „Silierung — Trocknung“ sind solche Verfahren der Belüftungstrocknung zu entwickeln und in die Praxis einzuführen, die eine wirksame Verminderung der Gesamtverluste an Nährstoffen, einen hohen Mechanisierungsgrad, hohe Verfahrensleistungen und eine bessere Auslastung des Transport- und Lagerraums ermöglichen. Die Lösung dieser Aufgabe wird in der Gewinnung von hochwertigem Trockengut in Form von Häcksel, Preßballen und Wickelbriketts durch Belüftungstrocknung gesehen. Die belüftungstechnischen Fragen der Konservierung sind bisher

für keine der drei genannten Gutformen ausreichend geklärt und daher Gegenstand umfangreicher Untersuchungen. Die vorliegende Arbeit untersuchte die Belüftbarkeit von Welkgutballen. Exakte Kenntnisse über den Strömungswiderstand in Ballenschüttungen sind notwendige Voraussetzungen für die optimale Auslegung und Nutzung von Anlagen für die Belüftungstrocknung. Das Ziel der Untersuchungen bestand u. a. darin, wesentliche Zusammenhänge zwischen Luftgeschwindigkeit, Einflußgrößen der Ballen und Ballenschüttung auf den Druckabfall zu ermitteln und damit Grundlagen für den optimalen Lüftereinsatz zu schaffen.

Dipl.-Ing. Dr. E. TUREK, KDT