

Thomas Schuricht und Christian Fürll, Potsdam- Bornim

# Fließeigenschaften landwirtschaftlicher Schüttgüter

## Bestimmung mit Hilfe des Triaxialversuches

Mit der Verwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) in der Schüttgutmechanik leitet sich die Frage nach der Wahl eines geeigneten Materialmodells für das mechanische Verhalten von Schüttgut ab. Dafür erweist sich der Ansatz nach Drucker-Prager und dessen Erweiterung um eine Fließkappe als geeignet. Für ein neues Materialgesetz wurden die Materialparameter aus Kompressions- und Scherversuchen, also Elementversuchen mit einer Triaxialzelle bestimmt.

Mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) steht ein effizientes Verfahren zum Berechnen von Spannungsverteilungen in Schüttgutsilos zur Verfügung [1]. Damit leitet sich die Frage nach der Wahl eines geeigneten Materialmodells für das Implementieren in die gewählte numerische Berechnungsmethode.

### Zielstellung

Aus wissenschaftlicher Sicht werden folgende Ziele formuliert:

- Für das Ausfließen von Kraftfuttermischungen aus einem Kernflusssilo mit Einbautrichter ist für das Anwenden der Finite-Elemente-Methode (FEM) ein inge-

terialparameter zu kalibrieren. Die hydrostatische Kompression gestattet die Ermittlung der kompressiblen Eigenschaften des Materials unter Aufbringen eines allseitigen Drucks. Der konventionelle triaxiale Kompressionsversuch dient zum Ermitteln der Gestaltänderung einer Materialprobe.

### Versuchsgeräte

Für das Ausführen der Elementversuche steht eine Triaxialanlage zur Verfügung (Bild 1). Die gesamte Triaxialzelle konnte wahlweise in einer weggesteuerten Universalprüfmaschine Zwick-Z020® eingespannt werden. Für den Versuch wurde die granulare Materialprobe mit Hilfe einer Vakuumpumpe in eine zylindrische Ausgangsgeometrie eingebracht, wo sie mit Hilfe einer Papierhülle und Gummimembran in der gewünschten Form fixiert wurde. Ein Volumeter ermöglicht in den Versuchen das Kalibrieren von Volumenänderungen in der Materialprobe in Abhängigkeit von definierten Druckänderungen. Diese Druckänderungen werden während der Belastung kontinuierlich erfasst. Das Auswerten der gemessenen Volumen- und Axialdehnungen führt zur Ausgabe der Querdehnungen im Material. In der Schnittdarstellung (Bild 1) der verwendeten Triaxialzelle ist der eingebaute Zustand der aufbereiteten Materialprobe skizziert. Die weggesteuerte Prüfeinrichtung diente vorrangig zum Analysieren des Materialverhaltens bei monotonen Triaxialversuchen unter Vorgabe unterschiedlicher Seitendrucke und Deformationsraten. Der Schwerpunkt dieser Untersuchungen lag auf dem Einsatz der kraftgesteuerten Prüfeinrichtung, mit der in zyklischen Ent- und Wiederbelastungsversuchen das plastische Materialverhalten analysiert wurde. Eine Belastungsvorrichtung leitet die Axialkraft  $F_a$  auf den Belastungsstempel der Triaxialzelle ein (Bild 1).

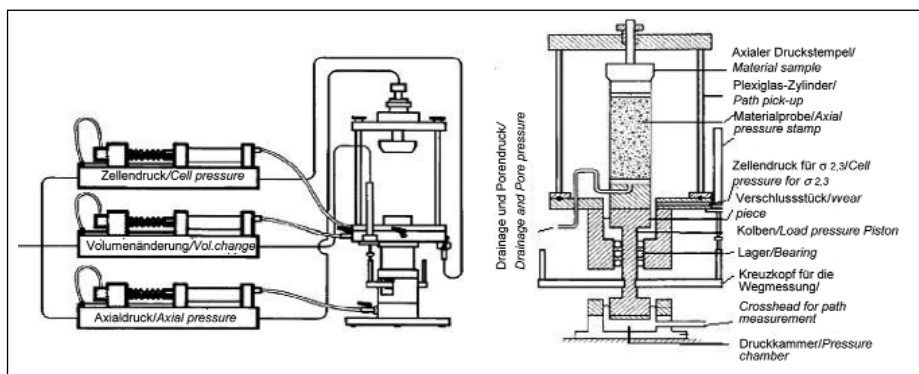


Bild 1: Triaxialzelle

Fig. 1: Triaxial cell

Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Fürll leitet die Abteilung „Technik der Aufbereitung, Lagerung und Konservierung“ am Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim, Max-Eyth-Allee 100, 14469 Potsdam; e-mail: cfuerll@atb-potsdam.de. Dr.-Ing. Thomas Schuricht war Doktorand und Wissenschaftler in dieser Abteilung.

### Schlüsselwörter

Schüttgut, Flieseigenschaften, Triaxialversuch

### Keywords

Bulk material, rheology, triaxial experiment

### Literatur

Bücher sind mit • gezeichnet

- [1] • Schuricht, T.: Analysen des Fließverhaltens von Schüttgut in einem Kernflusssilo mit Einbautrichter. Dissertation, TU Braunschweig, 2004

nieurtechnisch geeignetes Materialgesetz zu modellieren. Hierfür ist der Ansatz nach Drucker-Prager samt dessen Erweiterung um eine Fließkappe geeignet.

- Das Kalibrieren der Materialparameter ist nur in den ersten Schritten mit Ringscherversuchen und in der weiteren Entwicklung mit dem Einsatz einer Triaxialzelle für die hydrostatische und für die konventionelle triaxiale Kompression vorzunehmen.

### Kalibrieren der Materialparameter

Für ein neues Materialgesetz sind die Materialparameter aus Elementversuchen mit einer Triaxialzelle zu bestimmen. Zu diesen Elementversuchen zählen hierbei der Zylinderdruckversuch, die hydrostatische Kompression und die konventionelle triaxiale Kompression. Mit Hilfe der Zylinderdruckversuche ist es möglich, die elastischen Ma-

### Versuchsprogramm

Unter quasistatischen Bedingungen wurden folgende Versuchsvarianten durchgeführt: Hydrostatische Kompressionsversuche, Zylinderdruckversuche und konventionelle Triaxialversuche (Tab. 1).

Mit Hilfe der hydrostatischen Kompressionsversuche lassen sich die spannungsab-

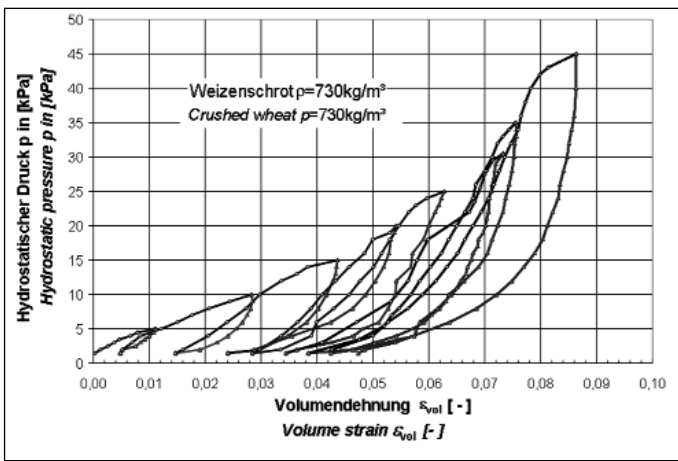


Bild 2: Hydrostatische Kompression von Weizenschrot

Fig. 2: Hydrostatic compression of crushed wheat

hängigen Kompressionsmodule im Erst-, Ent- und Wiederbelastungsbereich und die Parameter der plastisch-kontraktanten Anteile elasto-plastischer Stoffgesetze ermitteln. Bei einaxialen Versuchen mit ungehinderter Seitendehnung umfassen die Zylinderdruckversuche das Zusammenstellen von ergänzenden Parametern für nachfolgende triaxiale Kompressionsversuche. Einen Hauptteil der Elementversuche bilden die konventionellen Triaxialversuche. Diese dienen zum Messen der Volumenänderungen und zum Erfassen der spannungsabhängigen Parameter.

#### Versuchsergebnisse

##### Hydrostatische Kompression

Bild 2 zeigt beispielhaft einen repräsentativen Versuchsablauf für das Spannungs- und Deformationsverhalten in einem hydrostatischen Kompressionsversuch. Der typische Zusammenhang zwischen hydrostatischer Spannung und Volumendehnung weist für die ersten beiden Verdichtungszyklen starke und in den beiden letzten Zyklen schwächere Verdichtungen auf.

Der gemittelte elastische Kompressionsmodul der jeweiligen Erstbelastung beträgt  $K = 384 \text{ kPa}$  und wird für die numerische Simulation des elastischen Initialspannungszustands beim simultanen Befüllen des Silos eingesetzt. Aus dem linearen Anstieg des Spannungs-Dehnungs-Verlaufs der Erstbelastung folgt hierbei der Kompressionsmodul  $K$  zu:

$$K = \frac{dp}{d\varepsilon_v} \quad (1)$$

##### Zylinderdruckversuch

Aus dem einaxialen Zylinderdruckversuch resultieren die Werte zum Elastizitätsmodul  $E$  und zur Querkontraktion  $\mu$ . In diesem Versuch unterliegt der Probenkörper ohne Einwirken des Seitendrucks  $\sigma_3$  einer Axialbelastung. Es liegen Materialparameter aus kraftgesteuerten Versuchsabläufen mit Erst-, Ent- und Wiederbelastung vor. Die Berechnung des Elastizitätsmoduls  $E$  folgt aus dem

Auswerten der Erstbelastung im  $\sigma_1$ - $\varepsilon_1$ -Diagramm.

##### Konventionelle Triaxiale Kompression

Mit der monotonen Belastungssteigerung der Axialkraft gelingt es im Triaxialversuch erfolgreich, die grundlegenden Informationen des Materialverhaltens in Abhängigkeit von verschiedenen Seitendrücken  $\sigma_3$  zu bestimmen. Dazu zählt der mobilisierte Reibungswinkel:

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (2)$$

Zum Bestimmen spannungsabhängiger Materialkennwerte lag der Schwerpunkt der Elementversuche auf kraftgesteuerten zyklischen Triaxialversuchen zum Auswerten der Erstbelastungen  $E_B$ , der Entlastungen  $E_E$ , der Wiederbelastungen  $E_W$  sowie der mittleren Ent- und Wiederbelastungen  $E_{EW}$  in Abhängigkeit von verschiedenen Seitendrücken  $\sigma_3$ .

##### Fließkappe

Mit den durchgeführten Arbeiten zum Ermitteln der elastischen und plastischen Parameter des Materialverhaltens kann nun die geschlossene Fließbedingung konstruiert werden. Entwickelt sich ein zunehmend hydrostatischer Spannungszustand, dient die Fließkappe zum Begrenzen des offenen Fließkegels und bedingt den Spannungsabbau im kompressiblen

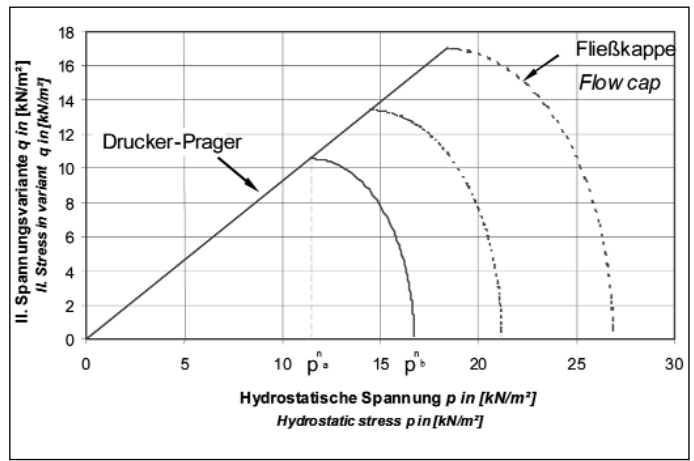


Bild 3: Geschlossene Fließbedingung mit Fließkappe

Fig. 3: Closed flow condition with flow cap

Schüttgut. Für die Form der Fließkappe konnten keine experimentellen Analysen durchgeführt werden. Für einfache Modellierungen bewährt sich die elliptische Geometrie einer Fließkappe.

Bild 3 zeigt abschließend die geschlossene Fließbedingung bei Annahme eines idealplastischen Fließkegels nach Drucker-Prager und einer elliptischen Fließkappe.

##### Schlussfolgerungen

Mit Hilfe von Triaxialversuchen können die Materialkennwerte von landwirtschaftlichen Schüttgütern gewonnen werden, die zum Berechnen von Schüttgutspannungen mit Hilfe der FEM-Methode benötigt werden. Vor allem konnten mit dem neuen Materialgesetz nach Drucker-Prager mit der Ergänzung einer Fließkappe als Fließbegrenzung die realen Schüttgutspannungen durch die Berechnung besser angenähert werden [1].

Tab. 1: Angewandte Versuchsvarianten der Elementversuche (schematisch)

Table 1: Applied experimental variants for element experiment

Versuchsart Method of test	$\sigma_3$	Be- und Entlastungsregime Load and load reduction strategy	Versuchsdurchführung Test procedure	
	kPa		KS Kraftsteuerung strength control	WS Wegsteuerung way control
HK	5 10		KS	
	40 45			
ZDV	0		WS KS	
KTK	5 10 15 20 30 40		WS KS	
HK - Hydrostatische Kompression - hydrostatic compression ZDV - Zylinderdruckversuch - cylinder compression test KTK - Konventioneller triaxialer Kompressionsversuch - conventional triaxial compression test				