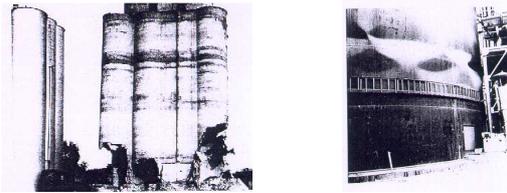




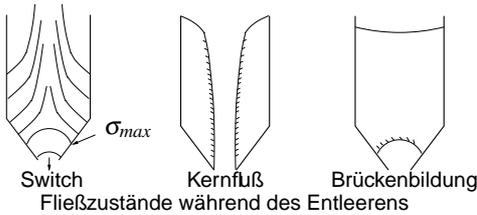
Phänomenologie

In vielen Bereichen wie in der Lebensmittel-, Pharma- und Bauindustrie werden Silos zur Lagerung von Schüttgütern verwendet. Neben der Bemessung für den Füllzustand ist eine Betrachtung des Entleerungsvorganges entscheidend, da große dynamische Lasten während des Ausfließens zu schwerwiegenden Schäden führen können.



Schadensfälle

Bei ungünstigen Lagerbedingungen bildet sich während des Entleerens ein Spannungsmaximum. Die Bildung toter Zonen entlang der Wände und Verdichtungszone oberhalb der Öffnung behindern den Ausfluß.



Fließzustände während des Entleerens

Modellierung

Um die Phänomene während des Fließvorganges beschreiben zu können, wird das granulare Material als nicht-Newtonsches Fluid betrachtet. Die Navier-Stokes-Gleichungen beschreiben die Bewegung des Fluids und werden mit Hilfe der Raum-Zeit Finite Elemente Methode diskretisiert. Der Reibungsterm beruht auf der Annahme einer Reiner-Rivlin-Formulierung

$$\mathbf{T} = -p\mathbf{1} + \Phi_1 \mathbf{D} + \Phi_2 \mathbf{D}^2.$$

Die Viskosität ist dabei abhängig vom inneren Reibungswinkel φ und dem aktuellen Druck p

$$\Phi_1 = \bar{\mu} + \frac{\tau_f}{\sqrt{II_D}}, \quad \Phi_2 = 0 \quad \text{mit} \quad \tau_f = p \sin \varphi.$$

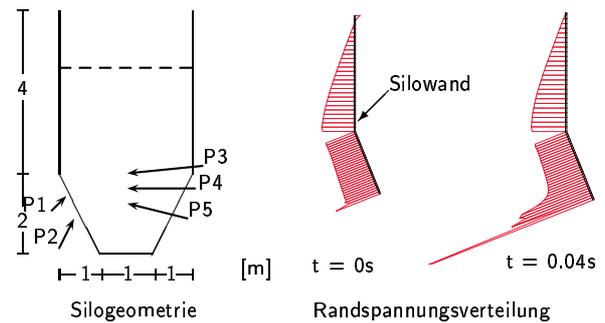
Dieses Modell wird auf kompressible Fluide erweitert, um Auflockerungs- und Verdichtungszone abbilden zu können. Hierbei wird ein quadratischer Zusammenhang zwischen dem hydrostatischen Druckanteil und dem Volumenanteil v des Granulars angenommen

$$p = \alpha(v^2 - v_c^2).$$

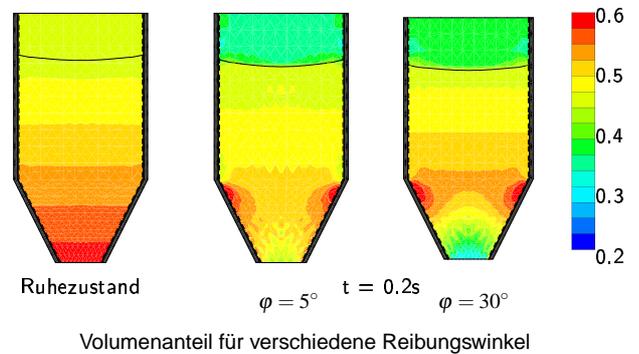
Die Erweiterung um die Levelsettechnik ermöglicht die implizite Abbildung der freien Oberfläche.

Ergebnisse

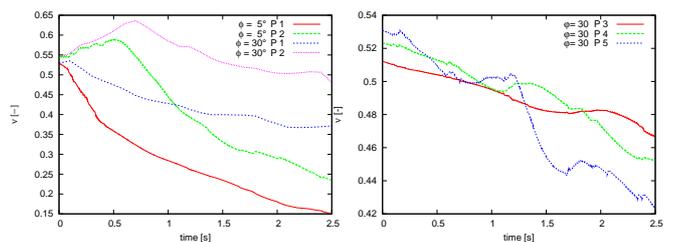
Unter Verwendung des vorgestellten Modells können einige wesentliche Phänomene des Siloausflusses beschrieben werden. Der Füllprozess wird durch Erhöhung der aufgetragenen Gravitation auf die anfänglich konstante Dichte simuliert. Die zunächst stetigen Randspannungen zeigen kurz nach dem Öffnen des Silos eine Spannungsspitze im unteren Trichterbereich, welche in der Bemessung berücksichtigt werden sollte.



Nach dem Öffnen ist das Fließprofil entscheidend von Wandreibung und Grenzscherspannung abhängig. Die Oberfläche bildet ein trichterförmiges Profil. Das Material verdichtet sich aufgrund der inneren Reibung im Trichter, wo ein eine Kompaktionszone in Form eines Gewölbe entsteht.



Diese stützt sich zunächst auf die Trichterwand, die infolgedessen höhere Spannungen aufnimmt. Nach kurzer Zeit löst sich die Kompaktionszone auf und es beginnt ein zunächst ungehindertes Ausfließen. Ein pulsierender Entleerungsvorgang entsteht aufgrund der wiederholten Bildung neuer Verdichtungszone und deren Zusammenfalls.



Zeitlicher Verlauf der Dichteverteilung